注册电气工程师（供配电）
执业资格考试辅导教材

专业部分

北京土木建筑学会电气设计委员会
北京电气设计情报网 组编

- 把握考试大纲应试要求
- 讲解考试大纲逐条内容
- 体现知名专家宝贵经验

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

注册电气工程师（供配电）
执业资格考试辅导教材

专业部分

北京土木建筑学会电气设计委员会
北京电气设计情报网 组编

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

注册电气工程师（供配电）执业资格考试辅导教材

内容提要

注册电气工程师执业资格考试即将于今年9月份进行，根据2004年3月公布的大纲，现组织出版注册电气工程师（供配电）执业资格考试辅导教材，共分为公共基础部分、专业基础部分和专业部分三册。本书组织者和每一部分的执笔人均为该领域的专家，并正在参与注册电气工程师培训讲课工作，他们具有深厚的专业知识和丰富的工程设计经验，从而使该套图书具有较强的指导性和实用性。

专业部分主要内容为法律法规与工程管理，环境保护，安全，节能，负荷分及计算，10kV及以下电源及供电系统，变电所所址选择及电气设备布置，短路电流计算，电气设备选择，成套电器的选择，35kV及以下导体及电流的设计选择，变配所控制、测量仪表、继电保护及自动装置，变配电所操作电源，防雷及过电压保护，接地，室内布线，照明，电气传动及建筑智能化。

本书可作为建筑、电力、化工、冶金、纺织等专业的电气工程设计人员应试注册电气工程师的培训教材，也可作为电气设计人员日常工作学习用书，并可供相关专业的人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

注册电气工程师（供配电）执业资格考试辅导教材．专业部分/北京土木建筑学会电气设计委员会，北京电气设计情报网组编．—北京：中国电力出版社，2004
ISBN 7-5083-2328-9

Ⅰ．注…　Ⅱ．①北…　②北…　Ⅲ．①供电—工程师—资格考核—教材②配电系统—工程师—资格考核—教材　Ⅳ．TM72

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第050329号

中国电力出版社出版、发行
（北京三里河路6号　100044　http://www.cepp.com.cn）
北京通天印刷厂印刷
各地新华书店经售
*
2004年6月第一版　2004年6月北京第二次印刷
787毫米×1092毫米　16开本　32.25印张　816千字
印数3001—6000册　定价65.00元

版权专有　翻印必究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

前言

全国注册电气工程师考试，是当前广大电气设计人员十分关注的一件大事。根据国家人事部、建设部关于注册电气工程师执业资格考试的文件精神和执业资格（供配电）专业考试大纲的要求，在北京土木建筑学会的领导和全国建筑电气设计情报网的关怀下，本会（网）于2002年8月专门召开常委会研究决定，充分依靠本会（网）雄厚的技术实力，尽力做好电气设计人员的考前辅导工作，多次召开专家、教授座谈会，并组成编委会，经过一年多的努力共同编写了本辅导教材。

本书是在经多次修改而成的原注册电气工程师考试辅导材料的基础上，又根据2004年3月公布的考试大纲，补充完善而成的。本书组织者和每一部分的执笔人均为该领域的专家，并正在参与注册电气工程师培训讲课工作，他们具有深厚的专业知识和丰富的工程设计经验。在该书的前期编写过程中，在编委会的组织下，各位编写人员通力合作，牺牲了许多业余休息时间，收集素材，结合日常工作经验和培训要求，并听取各方建议，经过多次讨论、修改和整理，使该书具有较强的指导性和实用性，能较全面地反映电气工程师应具有的知识内容，力求能满足注册电气工程师培训之用。

希望这套辅导教材，对电力设计人员应考有所帮助。由于编写时间仓促，书中内容不当之处，请批评指正。

北京土木建筑学会电气设计委员会
北京电气设计情报网

2004年4月

注册电气工程师（供配电）执业资格
考试辅导教材　专业部分
编　委　会

总顾问　王时煦
主　任　马胜贵
副主任　刘泰坤
主　编　蔡进民
副主编　葛福余　刘屏周　张艺滨

各章编写人员名单如下（按章节前后排序）

第1章	王素英　熊　延　魏怡宽　王迎春
第2、4章	李道本
第3章	陈崇光
第5、6章	黎显生
第7、8、11、12章	姚家祎
第9章	任元会　姚家祎
第10章	黄思伟　崔育忠　张　宜
第13章	黄思伟　崔育忠　刘屏周
第14章	刘屏周
第15章	黄思伟　崔育忠
第16章	黄德明
第17章	李惠昇　叶安丽
第18章	于万生　李　刚　朱立彤
	张　宜　尚承志　徐文学

目[1]录

前言

1 法律法规与工程管理 …… 1

1.1 我国工程勘察设计中必须执行的法律、法规的基本要求 …… 1
1.2 工程勘察设计中必须执行建设标准强制性条文的概念 …… 8
1.3 我国工程项目管理的基本概念和项目建设法人、项目经理、项目招标与投标、项目承包与分包等基本要素 …… 12
1.4 我国工程项目勘察设计的设计依据、内容深度、标准设计、设计修改、设计组织、审批程序等的基本要求 …… 17
1.5 我国工程项目投资估算、概算、预算的基本概念 …… 21
1.6 我国工程项目建设造价的主要构成、造价控制的要求和在工程勘察设计中控制造价的要点 …… 24
1.7 我国工程项目勘察设计过程质量管理的基本规定 …… 28
1.8 我国工程勘察设计过程质量管理和保证体系的基本概念 …… 30
1.9 计算机辅助程序在工程项目管理中的应用 …… 31
1.10 注册电气工程师的权利和义务 …… 34
1.11 我国工程勘察设计行业的职业道德基本要求 …… 35

2 环境保护 …… 36

2.1 我国对工程项目的主要环保要求和污染治理的基本措施 …… 36
2.2 我国工程建设中电气设备对环境影响的主要内容 …… 37
2.3 我国工程项目环境影响评价的基本概念和环境评价审批的基本要求（熟悉） …… 38

3 安全 …… 41

3.1 我国工程勘察设计中必须执行人身安全的法律、法规、建设标准中的强制性条文 …… 41
3.2 我国工程勘察设计中电气安全保护的概念和要求 …… 42
3.3 电流对人体的效应及电击防护的基本要求 …… 44
3.4 低压系统接地故障的保护设计和等电位联结的有关规定 …… 46
3.5 对危险环境下电力装置的特殊要求 …… 51

[1] 本书目录即为注册电气工程师（供配电）执业资格考试专业部分的考试大纲，读者可根据需要查阅相关内容。

3.6 安全电压选择的有关规定 …… 55
3.7 电气设备防误操作的要求及措施 …… 55
3.8 电气工程设计的防火要求 …… 56

4 节能 …… 59

4.1 供配电系统设计的节能措施 …… 59
4.2 节能型产品的选用方法 …… 60

5 负荷分级及计算 …… 61

5.1 负荷分级原则及供电要求 …… 61
5.2 建筑负荷的计算及计算方法 …… 62

6 电源及供配电系统（35kV 及以下） …… 69

6.1 电源及供配电系统的一般规定 …… 69
6.2 电压选择的原则及电能质量要求 …… 70
6.3 供配电系统（35kV 及以下）接线方式及特点 …… 74
6.4 无功补偿设计要求 …… 84
6.5 谐波产生的原因及对电力系统的危害 …… 85
6.6 谐波电压、谐波电流的限值 …… 86
6.7 抑制谐波的措施 …… 86

7 变配电所所址选择及电气设备布置 …… 88

7.1 变电所所址选择的基本要求 …… 88
7.2 变电所布置的设计要求 …… 90
7.3 配电装置布置设计 …… 96
7.4 特殊地区配电装置 …… 98
7.5 各级电压配电装置带电距离的确定及校验方法 …… 104

8 短路电流计算 …… 108

8.1 短路电流计算方法 …… 108
8.2 短路电流计算结果的应用 …… 115
8.3 影响短路电流的因素及限制短路电流的措施 …… 115

9 电气设备选择 …… 116

9.1 常用电气设备选择的技术条件和环境条件 …… 116
9.2 变压器，高、低压电气设备及保护设备的选择 …… 119
9.3 成套电器的选择 …… 134

10 35kV 及以下导体及电缆的设计选择 …… 138

10.1 导体设计选择的原则 …… 138

10.2 电缆设计选择的原则 …… 139
10.3 硬导体（硬母线）的设计选择 …… 155
10.4 软导体（软导线）的设计选择 …… 166
10.5 电缆敷设的设计要求 …… 171
10.6 电缆支持与固定的设计要求 …… 179
10.7 电缆防火与阻燃的设计要求 …… 181

11 变配电所控制、测量仪表、继电保护及自动装置 …… 186

11.1 变配电所控制、测量和信号设计 …… 186
11.2 电气设备继电保护配置、整定计算和设备选型的原则 …… 196
11.3 变配电所自动装置及综合自动化的设计要求 …… 216

12 变配电所操作电源 …… 218

12.1 直流操作电源设计要求 …… 218
12.2 交流操作电源的设计要求 …… 222

13 防雷及过电压保护 …… 226

13.1 电力系统过电压的种类和过电压水平 …… 226
13.2 交流电气装置过电压保护设计要求及限制措施 …… 228
13.3 建筑物防雷分类及保护措施 …… 250
13.4 建筑物防雷设计的计算方法和设计要求 …… 259

14 接地 …… 270

14.1 电气装置接地的一般规定 …… 270
14.2 电气装置保护接地的范围 …… 274
14.3 电气装置接地电阻的要求 …… 274
14.4 电气装置的接地装置设计要求 …… 276
14.5 各种接地型式的适用范围 …… 280
14.6 接触电压、跨步电压计算方法 …… 283

15 室内布线 …… 285

15.1 一般场所布线的有关规定 …… 285
15.2 特殊场所布线的有关规定 …… 295
15.3 建筑物内综合布线设计要求 …… 300

16 照明 …… 311

16.1 照明基础知识 …… 311
16.2 照度标准及照明质量要求 …… 313
16.3 光源选用和灯具选型的有关规定 …… 319
16.4 照明供电的有关规定 …… 321

16.5 照明工程应用 …… 322
16.6 照度计算的基本方法 …… 326
16.7 照明与环境的关系 …… 331
16.8 照明控制与节能技术应用 …… 333
16.9 应急照明设计原则 …… 333
16.10 特殊照明的应用 …… 334

17 电气传动 …… 336

17.1 电气传动系统的组成及分类 …… 336
17.2 电动机的选择 …… 337
17.3 交、直流电动机的起动方式及起动校验 …… 347
17.4 交、直流电动机调速技术 …… 352
17.5 交、直流电动机的电气制动方式及计算方法 …… 386
17.6 电动机保护配置及计算方法 …… 393
17.7 低压电动机控制电器的选择 …… 396
17.8 电动机调速系统性能指标 …… 401
17.9 传动系统动态指标的运用 …… 404
17.10 调节理论在电气传动工程中的运用 …… 404
17.11 PLC 的组成及工作原理 …… 415

18 建筑智能化 …… 424

18.1 火灾自动报警系统的设计要求 …… 424
18.2 建筑设备自动控制系统的设计要求 …… 433
18.3 安全防范系统的设计要求 …… 454
18.4 通信网络及系统的设计要求 …… 461
18.5 有线电视的设计要求 …… 490
18.6 扩声和音响的设计要求 …… 496
18.7 呼叫系统及公共显示装置的设计要求 …… 505

1 法律法规与工程管理

1.1 我国工程勘察设计中必须执行的法律、法规的基本要求

1.1.1 《建设工程勘察设计管理条例》基本要求

（1）从事建设工程勘察、设计活动，必须遵守本条例。

本条例所称建设工程勘察，是指根据建设工程的要求，查明、分析、评价建设场地的地质地理环境特征和岩土工程条件，编制建设工程勘察文件的活动。

本条例所称建设工程设计，是指根据建设工程的要求，对建设工程所需的技术、经济、资源、环境等条件进行综合分析、论证、编制建设工程设计文件的活动。

（2）建设工程勘察、设计应当与社会、经济发展水平相适应，做到经济效益、社会效益和环境效益相统一。

从事建设工程勘察、设计活动，应当坚持先勘察、后设计、再施工的原则。

（3）县级以上人民政府建设行政主管部门和交通、水利等有关部门应当依照本条例的规定，加强对建设工程勘察、设计活动的监督管理。

建设工程勘察、设计单位必须依法进行建设工程勘察、设计，严格执行工程建设强制性标准，并对建设工程勘察、设计的质量负责。

（4）国家鼓励在建设工程勘察、设计活动中采用先进技术、先进工艺、先进设备、新型材料和现代管理方法。

（5）国家对从事建设工程勘察、设计活动的单位，实行资质管理制度。具体办法由国务院建设行政主管部门及国务院有关部门制定。

（6）建设工程勘察、设计单位应当在其资质等级许可的范围内承揽建设工程勘察、设计业务。

禁止建设工程勘察、设计单位超越其资质等级许可的范围或者以其他建设工程勘察、设计单位的名义承揽建设工程勘察、设计业务。禁止建设工程勘察、设计单位允许其他单位或者个人以本单位的名义承揽建设工程勘察、设计业务。

（7）国家对从事建设工程勘察、设计活动的专业技术人员，实行执业资格注册管理制度。未经注册的建设工程勘察、设计人员，不得以注册执业人员的名义从事建设工程勘察、设计活动。

（8）建设工程勘察、设计注册执业人员和其他专业技术人员只能受聘于一个建设工程勘察、设计单位；未受聘于建设工程勘察、设计单位的，不得从事建设工程的勘察、设计活动。

（9）建设工程勘察、设计单位资质证书和执业人员注册证书，由国务院建设行政主管部

门统一制作。

（10）建设工程勘察、设计发包依法实行招标发包或者直接发包。

（11）建设工程勘察、设计应当依照《中华人民共和国招标投标法》的规定，实行招标发包。

（12）建设工程勘察、设计方案评标，应当以投标人的业绩、信誉和勘察、设计人员的能力以及勘察、设计方案的优劣为依据，进行综合评定。

（13）建设工程勘察、设计的招标人应当在评标委员会推荐的候选方案中确定中标方案。但是，建设工程勘察、设计的招标人认为评标委员会推荐的候选方案不能最大限度满足招标文件规定的要求的，应当依法重新招标。

（14）下列建设工程的勘察、设计，经有关主管部门批准，可以直接发包：

1）采用特定的专利或者专有技术的；

2）建筑艺术造型有特殊要求的；

3）国务院规定的其他建设工程的勘察、设计。

（15）发包方不得将建设工程勘察、设计业务发包给不具有相应勘察、设计资质等级的建设工程勘察、设计单位。

（16）发包方可以将整个建设工程的勘察、设计发包给一个勘察、设计单位；也可以将建设工程的勘察、设计分别发包给几个勘察、设计单位。

（17）除建设工程主体部分的勘察、设计外，经发包方书面同意，承包方可以将建设工程其他部分的勘察、设计再分包给其他具有相应资质等级的建设工程勘察、设计单位。

（18）建设工程勘察、设计单位不得将所承揽的建设工程勘察、设计转包。

（19）承包方必须在建设工程勘察、设计资质证书规定的资质等级和业务范围内承揽建设工程的勘察、设计业务。

（20）建设工程勘察、设计的发包方与承包方，应当执行国家规定的建设工程勘察、设计程序。

（21）建设工程勘察、设计的发包方与承包方应当签订建设工程勘察、设计合同。

（22）建设工程勘察、设计发包方与承包方应当执行国家有关建设工程勘察、设计费的管理规定。

（23）编制建设工程勘察、设计文件，应当以下列规定为依据：

1）项目批准文件；

2）城市规划；

3）工程建设强制性标准；

4）国家规定的建设工程勘察、设计深度要求。

铁路、交通、水利等专业建设工程，还应当以专业规划的要求为依据。

（24）编制建设工程勘察文件，应当真实、准确，满足建设工程规划、选址、设计、岩土治理和施工的需要。

编制方案设计文件，应当满足编制初步设计文件和控制概算的需要。

编制初步设计文件，应当满足编制施工招标文件、主要设备材料订货和编制施工图设计文件的需要。

编制施工图设计文件，应当满足设备材料采购、非标准设备制作和施工的需要，并注明建设工程合理使用年限。

(25) 设计文件中选用的材料、构配件、设备，应当注明其规格、型号、性能等技术指标，其质量要求必须符合国家规定的标准。

除有特殊要求的建筑材料、专用设备和工艺生产线等外，设计单位不得指定生产厂、供应商。

(26) 建设单位、施工单位、监理单位不得修改建设工程勘察、设计文件；确需修改建设工程勘察、设计文件的，应当由原建设工程勘察、设计单位修改。经原建设工程勘察、设计单位书面同意，建设单位也可以委托其他具有相应资质的建设工程勘察、设计单位修改。修改单位对修改的勘察、设计文件承担相应责任。

施工单位、监理单位发现建设工程勘察、设计文件不符合工程建设强制性标准、合同约定的质量要求的，应当报告建设单位，建设单位有权要求建设工程勘察、设计单位对建设工程勘察、设计文件进行补充、修改。

建设工程勘察、设计文件内容需要作重大修改的，建设单位应当报经原审批机关批准后，方可修改。

(27) 建设工程勘察、设计文件中规定采用的新技术、新材料，可能影响建设工程质量和安全，又没有国家技术标准的，应当由国家认可的检测机构进行试验、论证，出具检测报告，并经国务院有关部门或者省、自治区、直辖市人民政府有关部门组织的建设工程技术专家委员会审定后，方可使用。

(28) 建设工程勘察、设计单位应当在建设工程施工前，向施工单位和监理单位说明建设工程勘察、设计意图，解释建设工程勘察、设计文件。

建设工程勘察、设计单位应当及时解决施工中出现的勘察、设计问题。

(29) 国务院建设行政主管部门对全国的建设工程勘察、设计活动实施统一监督管理。国务院铁路、交通、水利等有关部门按照国务院规定的职责分工，负责对全国的有关专业建设工程勘察、设计活动的监督管理。

县级以上地方人民政府建设行政主管部门对本行政区域内的建设工程勘察、设计活动实施监督管理。县级以上地方人民政府交通、水利等有关部门在各自的职责范围内，负责对本行政区域内的有关专业建设工程勘察、设计活动的监督管理。

(30) 建设工程勘察、设计单位在建设工程勘察、设计资质证书规定的业务范围内跨部门、跨地区承揽勘察、设计业务的，有关地方人民政府及其所属部门不得设置障碍，不得违反国家规定收取任何费用。

(31) 县级以上人民政府建设行政主管部门或者交通、水利等有关部门应当对施工图设计文件中涉及公共利益、公众安全、工程建设强制性标准的内容进行审查。

施工图设计文件未经审查批准的，不得使用。

(32) 任何单位和个人对建设工程勘察、设计活动中的违法行为都有权检举、控告、投诉。

(33) 违反本条例第6条规定的，责令停止违法行为，处合同约定的勘察费、设计费1倍以上2倍以下的罚款，有违法所得的，予以没收；可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书。

未取得资质证书承揽工程的，予以取缔，依照前款规定处以罚款；有违法所得的，予以没收。

以欺骗手段取得资质证书承揽工程的，吊销资质证书，依照本条第一款规定处以罚款；

有违法所得的，予以没收。

（34）违反本条例规定、未经注册，擅自以注册建设工程勘察、设计人员的名义从事建设工程勘察、设计活动的，责令停止违法行为，没收违法所得，处违法所得2倍以上5倍以下罚款；给他人造成损失的，依法承担赔偿责任。

（35）违反本条例规定，建设工程勘察、设计注册执业人员和其他专业技术人员未受聘于一个建设工程勘察、设计单位或者同时受聘于两个以上建设工程勘察、设计单位，从事建设工程勘察、设计活动的，责令停止违法行为，没收违法所得，处违法所得2倍以上5倍以下的罚款；情节严重的，可以责令停止执行业务或者吊销资格证书；给他人造成损失的，依法承担赔偿责任。

（36）违反本条例规定，发包方将建设工程勘察、设计业务发包给不具有相应资质等级的建设工程勘察、设计单位的，责令改正，处50万元以上，100万元以下的罚款。

（37）违反本条例规定，建设工程勘察、设计单位将所承揽的建设工程勘察、设计转包的，责令改正，没收违法所得，处合同约定的勘察费、设计费25%以上50%以下的罚款，可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书。

（38）违反本条例规定，有下列行为之一的，依照《建设工程质量管理条例》第六十三条的规定给予处罚：

1）勘察单位未按照工程建设强制性标准进行勘察的；

2）设计单位未根据勘察成果文件进行工程设计的；

3）设计单位指定建筑材料、建筑构配件的生产厂、供应商的；

4）设计单位未按照工程建设强制性标准进行设计的。

（39）本条例规定的责令停业整顿，降低资质等级和吊销资质证书、资格证书的行政处罚，由颁发资质证书、资格证书的机关决定；其他行政处罚，由建设行政主管部门或者其他有关部门依照法定职权范围决定。

依照本条例规定被吊销资质证书的，由工商行政管理部门吊销其营业执照。

（40）国家机关工作人员在建设工程勘察、设计活动的监督管理工作中玩忽职守、滥用职权、徇私舞弊，构成犯罪的，依法追究刑事责任；尚不构成犯罪的，依法给予行政处分。

1.1.2 《建设工程质量管理条例》基本要求

（1）从事建设工程活动，必须严格执行基本建设程序，坚持先勘察、后设计、再施工的原则。

（2）建设单位应当将施工图设计文件报县级以上人民政府建设行政主管部门或者其他有关部门审查。施工图设计文件审查的具体办法，由国务院建设行政主管部门会同国务院其他有关部门制定。

施工图设计文件未经审查批准的，不得使用。

（3）从事建设工程勘察、设计的单位应当依法取得相应等级的资质证书，并在其资质等级许可的范围内承揽工程。

禁止勘察、设计单位超越其资质等级的许可的范围或者以其他勘察、设计单位的名义承揽工程，禁止勘察、设计单位允许其他单位或者个人以本单位的名义承揽工程。

勘察、设计单位不得转包或者违法分包所承揽的工程。

（4）勘察、设计单位必须按照工程建设强制性标准进行勘察、设计，并对其勘察、设计的质量负责。

注册建筑师、注册结构工程师等注册执业人员应当在设计文件上签字，对设计文件负责。

(5) 勘察单位提供的地质、测量、水文等勘察成果必须真实、准确。

(6) 设计单位应当根据勘察成果文件进行建设工程设计。

设计文件应当符合国家规定的设计深度要求，注明工程合理使用年限。

(7) 设计单位在设计文件中选用的建筑材料、建筑构配件和设备，应当注明规格、型号、性能等技术指标，其质量要求必须符合国家规定的标准。

除有特殊要求的建筑材料、专用设备、工艺生产线等外，设计单位不得指定生产厂、供应商。

(8) 设计单位应当就审查合格的施工图设计文件向施工单位作出详细说明。

(9) 设计单位应当参与建设工程质量事故分析，并对因设计造成的质量事故，提出相应的技术处理方案。

(10) 违反本条例规定，勘察、设计、施工、工程监理单位超越本单位资质等级承揽工程的，责令停止违法行为，对勘察、设计单位或者工程监理单位处合同约定的勘察费、设计费或者监理酬金1倍以上2倍以下的罚款；对施工单位处工程合同价款百分之二以上百分之四以下的罚款，可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书；有违法所得的，予以没收。

未取得资质证书承揽工程的，予以取缔，依照前款规定处以罚款；有违法所得的，予以没收。

以欺骗手段取得资质证书承揽工程的，吊销资质证书，依照本条第一款规定处以罚款；有违法所得的，予以没收。

(11) 违反本条例规定，勘察、设计、施工、工程监理单位允许其他单位或者个人以本单位名义承揽工程的，责令改正，没收违法所得，对勘察、设计单位和工程监理单位处合同约定的勘察费、设计费和监理酬金1倍以上2倍以下的罚款；对施工单位处工程合同价款百分之二以上百分之四以下的罚款；可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书。

(12) 违反本条例规定，承包单位将承包的工程转包或者违法分包的，责令改正，没收违法所得，对勘察、设计单位处合同约定的勘察费、设计费25%以上50%以下的罚款；对施工单位处工程合同价款0.5%以上1%以下的罚款，可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书。

工程监理单位转让工程监理业务的，责令改正，没收违法所得，处合同约定的监理酬金25%以上50%以下的罚款；可以责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的，吊销资质证书。

(13) 违反本条例规定，有下列行为之一的，责令改正，处10万元以上30万元以下的罚款：

1) 勘察单位未按照工程建设强制性标准进行勘察设计；

2) 设计单位未根据勘察成果文件进行工程设计的；

3) 设计单位指定建筑材料、建筑构配件的生产厂、供应商的；

4) 设计单位未按照工程建设强制性标准进行设计的。

有前款所列行为，造成工程质量事故的，责令停业整顿，降低资质等级；情节严重的吊

销资质证书，造成损失的，依法承担赔偿责任。

（14）违反本条例规定，注册建筑师、注册结构工程师、监理工程师等注册执业人员因过错造成质量事故的，责令停止执业1年；造成重大质量事故的，吊销执业资格证书，5年内不予注册；情节特别恶劣的，终身不予注册。

（15）依照本条例规定，给予单位罚款处罚的，对单位直接负责的主管人员和其他直接责任人员处单位罚款数额5%以上10%以下罚款。

（16）建设单位、设计单位、施工单位、工程监理单位违反国家规定，降低工程质量标准，造成重大安全事故，构成犯罪的，对直接责任人员依法追究刑事责任。

（17）建设、勘察、设计、施工、工程监理单位的工作人员因调动工作、退休等原因离开该单位后，被发现在该单位工作期间违反国家有关建设工程质量管理规定，造成重大工程质量事故的，仍应当依法追究法律责任。

（18）建设单位、设计单位、施工单位、工程监理单位违反国家规定，降低工程质量标准，造成重大安全事故的，对直接责任人员处五年以下有期徒刑或者拘役，并处罚金；后果特别严重的，处五年以上十年以下有期徒刑，并处罚金。

1.1.3 《建设工程勘察设计市场管理规定》基本要求

（1）国家对设计市场实行从业单位资质、个人执业资格准入管理制度。

（2）从事设计市场活动，应当遵循公开、公正、平等竞争的原则。禁止任何单位和个人以任何理由分割、封锁、垄断设计市场。

（3）从事勘察设计业务应当遵守国家有关法律、法规，必须符合工程建设强制性标准。坚持先勘察后设计，先设计后施工的程序，保证建设工程的勘察设计质量。

（4）凡在国家建设工程设计资质分级标准规定范围内的建设工程项目，均应当委托勘察设计业务。

（5）委托工程设计业务的建设工程项目应当具备以下条件：

1）建设工程项目可行性研究报告或项目建议书已获批准；

2）已经办理了建设用地规划许可证等手续；

3）法律、法规规定的其他条件。

工程勘察业务可以根据工程进展情况和需要进行委托。

（6）以国家投资为主的建设工程项目、按建设部项目分类标准规定的特、一级的建设工程项目、标志性建筑、纪念性建筑、风景区的主要建筑和重要地段有影响的建筑，以及建筑面积10万 m^2 以上的住宅小区的建设项目的设计业务鼓励通过竞选方式委托。具体办法由国务院建设行政主管部门另行规定。

（7）勘察设计业务的承接方必须持有建设行政主管部门颁发的工程勘察资质证书或工程设计资质证书，在证书规定的业务范围内承接勘察设计业务，并对其提供的勘察设计文件的质量负责。严禁无证或超越本单位资质等级的单位和个人承接勘察设计业务。

（8）从事勘察设计活动的专业技术人员只能在一个勘察设计单位从事勘察设计工作，不得私自挂靠承接勘察设计业务。

严禁勘察设计专业技术人员和执业注册人员出借、转让、出卖执业资格证书、执业印章和职称证书。

（9）承接方应当自行完成承接的勘察设计业务，不得接受无证组织和个人的挂靠。经委托方同意，承接方也可以将承接的勘察设计业务中的一部分委托给其他具有相应资质条件的

分承接方，但须签订分委托合同，并对分承接方所承担的业务负责。分承接方未经委托方同意，不得将所承接的业务再次分委托。

（10）建设行政主管部门和有关管理部门应按各自职责分工，加强对设计市场活动的监督管理，依法查处设计市场活动中的违法行为，维护和保障设计市场秩序。

（11）建设行政主管部门、有关管理部门及委托单位，应当加强对勘察设计单位资质和执业注册人员、专业技术人员资格的动态管理，对勘察设计单位实行资质年度检查制度并公布检查结果。不得越权审批、颁发单位资质和个人资格证书，不得颁发其他与证书效力相同的证件，不得给不具备条件的单位和个人颁发资质证书或资格证书。

（12）承接方违反本规定，有下列行为之一一次的，勘察设计文件无效，由县级以上人民政府建设行政主管部门给予警告，责令限期改正，没收违法所得，并可处以三万元以下罚款，在六个月至一年内停止承接新的勘察设计业务，将违法行为记录在案，作为资质年检的重要依据；有下列行为之一二次以上或造成重大事故的，并处降低资质等级，两年内不得升级；有下列行为之一，造成特大事故的，吊销资质证书。构成犯罪的依法追究刑事责任：

1）超越勘察设计资质证书规定的等级和业务范围承接业务的；

2）出借、转让、出卖资质证书、图签、图章或以挂靠方式允许他人以本单位名义承接勘察设计业务的；

3）转手委托或未经委托方同意将分承接业务再次委托的；

4）违反国家法律、法规或有关工程建设强制性标准的；

5）使用或推荐使用不符合质量标准的材料和设备的。

（13）承接方违反本规定，有下列行为之一的，由县级以上人民政府建设行政主管部门给予警告，责令限期改正，没收违法所得，将违法行为记录在案，作为资质年检的重要依据，并可处以三万元以下的罚款：

1）以低于国家规定的最低标准收费等不正当手段承接勘察设计业务的；

2）未按规定办理聘用或借用手续，私下拉人从事勘察设计业务的；

3）违反本规定的其他行为。

（14）勘察设计专业技术人员（含技术劳务人员）和执业注册人员，有下列行为之一的，由县级以上人民政府建设行政主管部门给予警告，责令限期改正，没收违法所得，并可处以三万元以下罚款：

1）同时受聘于两个或两个以上勘察设计单位执业的；

2）违反本规定的其他行为。

（15）任何单位或个人违反本规定有下列行为之一的，原勘察设计文件无效，由县级以上建设行政主管部门责令停止违法行为，没收违法所得，并可处以三万元以下的罚款。构成犯罪的依法追究刑事责任：

1）无勘察设计资质证书的单位和个人，承接勘察设计业务的；

2）涂改或伪造资质、资格证书承揽业务的；

3）剽窃、抄袭、非法出售和转让勘察设计单位的专有技术、勘察报告、设计文件，或将其用于合同以外的建设工程项目的。

无证从事勘察设计业务的，同时提请工商部门予以取缔。以欺骗手段取得资质证书的，还应吊销资质证书。

1.1.4 《关于加强勘察设计市场准入管理的补充通知》基本要求

1）该通知规定了勘察设计市场的准入管理，提出凡承接建设工程勘察设计业务必须持有由有发证权限的建设行政主管部门颁发的，建设部统一印制的工程勘察、工程设计、工程总承包或专项工程设计证书。无有效证书，不得从事工程勘察设计任务。任何单位和个人不得无证、越级、超范围承接勘察设计业务。

为了加强对专项工程设计证书的市场准入管理及有序竞争需要，近年来，经建设部批准设置并颁发了建筑装饰设计、消防设施专项工程设计、环境工程设计、建筑智能化系统工程设计等专项工程设计证书。持专项工程设计证书的单位只能承担专项证书规定范围内的业务，不得超越专项证书范围承接工程设计业务。

2）对境外执业注册人员和境外办事机构市场准入管理等问题作了规定。

1.2 工程勘察设计中必须执行建设标准强制性条文的概念

根据中华人民共和国建设部建标第［2001］40号及85号文的要求，参与建设活动的各方应执行工程建设强制性标准。

该套标准称《强制性条文》它是参与建设的人员各方执行工程建设的强制标准和政府对执行情况实施监督的依据。

《强制性条文》是现行工程建设国家标准和行业标准中直接涉及人民生命财产安全、人身健康、环境保护和其他公众利益方面的内容，同时也考虑了提高经济效益和社会效益等方面的要求，凡列入《强制性条文》的所有条文都必须严格执行。

1.2.1 工程建设强制性条文有关电气专业的内容

工程建设强制性条文有关电气专业的内容

（1）民用建筑部分：

1）《供配电系统设计规范》 GB50052—1995

第2.0.1条；第2.0.2条；第3.0.2条。

2）《低压配电设计规范》 GB50054—1995

第2.2.2条；第2.2.11条；第2.2.12条；第3.2.1条；第3.2.2条；第4.4.4条；第4.4.7条；第4.4.21条；第4.5.6条。

3）《10kV及以下变电所设计规范》 GB50053—1994

第2.0.5条；第3.4.10条；第4.2.1条；第4.2.6条；第5.1.1条；第5.2.1条；第6.1.1条；第6.1.2条；第6.1.5条；第6.1.7条；第6.1.8条。

4）《建筑物防雷设计规范》（2000年版）GB50057—1994

第2.0.1条；第2.0.2条；第2.0.3条；第2.0.4条；第3.1.1条；第3.1.2条；第3.3.5条；第3.3.10条；第3.4.10条；第5.1.1条；第5.2.1条；第6.1.4条；第6.3.2条；第6.3.3条；第6.3.4条；第6.4.1条。

5）《老年人建筑设计规范》JGJ122—1999

第5.0.9条；第5.0.11条；第5.4.1条。

6）《方便残疾人使用的城市道路》 GBJ50—1988

第5.0.8条；第5.0.11条。

7）《中小学校建筑设计规范》 GBJ99—1986

第2.1.1条。

8)《科学实验建筑设计规范》 JGJ91—1993

第 3.2.6 条。

9)《博物馆建筑设计规范》 JGJ66—1991

第 5.3.1 条。

10)《港口客运站建筑设计规范》 JGJ86—1992

第 6.0.8 条。

11)《铁路旅客车站建筑设计规范》 GB50226—1995

第 8.2.3 条。

12)《档案馆建筑设计规范》 JGJ25—1986

第 5.2.1 条。

13)《采暖通风与空气调节设计规范》 GBJ19—1987

第 7.1.2 条；第 7.2.5 条；第 7.4.1 条；第 7.4.2 条。

14)《民用建筑照明设计标准》 GBJ133—1990

第 2.2.1 条；第 2.2.2 条；第 2.2.3 条；第 2.2.4 条；第 2.2.5 条；第 2.2.7 条；第 2.2.8 条；第 2.2.9 条；第 2.2.10 条；第 4.1.2 条；第 4.1.3 条。

15)《建筑设计防火规范》 GBJ16—1987（2001 年版）

第 3.2.6 条；第 3.2.7 条；第 3.3.10 条；第 5.4.1 条；第 10.2.8 条；第 10.3.1A 条；第 10.3.1B 条。

16)《高层民用建筑防火规范》（2001 年版）GB50045—1995

第 3.0.1 条；第 4.1.2 条；第 4.1.3 条；第 4.1.5A.6 条；第 4.1.5B.6 条；第 9.4.1 条；第 9.4.2 条；第 9.4.3 条。

17)《汽车库、停车库、停车场设防火规范》GB50067—1997

第 9.0.7 条。

18)《人民防空工程设计防火规范》（2001 年版）GB50098—1998

第 8.2.1A 条。

19)《电梯工程施工质量验收规范》 GB50310—2002

第 4.10.1 条。

20)《建筑电气工程施工质量验收规范》 GB50303—2002

第 3.1.7 条；第 3.1.8 条；第 7.1.1 条；第 8.1.3 条；第 9.1.4 条；第 11.1.1 条；第 12.1.1 条；第 13.1.1 条；第 14.1.2 条；第 15.1.1 条；第 19.1.2 条；第 19.1.6 条；第 21.1.3 条；第 22.1.2 条；第 24.1.2 条。

21)《汽车加油加气站设计与施工规范》GB50156—2002

第 10.1.7 条；第 10.1.8 条；第 10.2.1 条；第 10.2.2 条；第 10.2.4 条；第 10.2.5 条；第 10.2.6 条；第 10.3.1 条；第 10.3.2 条；第 10.3.3 条；第 10.3.4 条；第 10.4.1 条；第 10.4.2 条；第 10.4.3 条。

（2）工业建筑部分：

1)《供配电系统设计规范》 GB50052—1995

第 2.0.2 条；第 3.0.2 条。

2)《低压配电设计规范》 GB50054—1995

第 2.2.11 条；第 2.2.12 条；第 3.2.1 条；第 3.2.2 条；第 4.4.5 条；第 4.4.7 条；第

4.4.21 条；第 4.5.6 条。

3)《10kV 及以下变电所设计规范》 GB50053—1994

第 2.0.5 条；第 3.4.10 条；第 4.2.1 条；第 4.2.6 条；第 5.1.1 条；第 5.2.1 条；第 6.1.2 条；第 6.1.4 条；第 6.1.5 条；第 6.1.7 条；第 6.1.8 条。

4)《电热设备电力设备设计规范》 GB50056—1993

第 2.0.12 条；第 2.0.15 条；第 2.0.22 条；第 2.0.23 条；第 3.2.3 条；第 3.2.11 条；第 3.3.2 条；第 3.4.8 条；第 4.0.4 条；第 6.0.3 条；第 6.0.8 条。

5)《爆炸和火灾环境电力装置设计规范》 GB50058—1992

第 2.5.4 条；第 2.5.10 条；第 2.5.12 条；第 3.4.4 条；第 4.3.8 条。

6)《工业与民用电力装置的接地设计规范》 GBJ65—1983

第 3.0.1 条。

7)《建筑物防雷设计规范》(2000 年版) GB50057—1994

第 2.0.2 条；第 2.0.3 条；第 2.0.4 条；第 3.1.1 条；第 3.1.2 条；第 3.3.5 条；第 3.3.10 条；第 3.4.10 条；第 5.1.1 条；第 5.2.1 条；第 6.1.4 条；第 6.3.2 条；第 6.3.3 条；第 6.3.4 条；第 6.4.1 条。

8)《电气装置安装工程低压电器施工及验收规范》 GB50254—1996

第 2.0.6 条；第 3.0.4 条；第 10.0.1 条。

9)《电气装置安装工程电力变流设备施工及验收规范》 GB50255—1996

第 2.0.7 条。

10)《电气装置安装工程起重机电气装置施工及验收规范》 GB50256—1996

第 1.0.11 条；第 2.0.1.3 条；第 2.0.2.1 条。

11)《电气装置安装工程爆炸和火灾危险环境电气装置施工及验收规范》 GB50257—1996

第 2.1.5 条；第 2.1.8 条；第 2.4.6 条；第 2.6.3.1 条；第 3.2.1 条；第 3.2.2 条；第 3.3.8 条；第 3.4.2.1 条；第 3.4.2.2 条；第 4.2.3 条；第 5.1.1 条；第 5.1.6 条；第 5.2.1.2 条。

12)《工业企业总平面设计规范》 GB50187—1993

第 7.3.4 条。

13)《建筑设计防火规范》(2001 年版) GBJ16—1987

第 3.2.6 条；第 3.2.7 条；第 3.3.10。

14)《建筑地面设计规范》 GB50037—1996

第 3.0.8 条。

15)《工业建筑防腐蚀设计规范》 GB50046—1996

第 3.2.6 条。

16)《锅炉房设计规范》 GB50041—1992

第 13.2.12 条；第 13.2.13 条；第 13.2.14 条；第 13.2.16 条；第 13.2.17 条。

17)《氧气站设计规范》 GB50030—1991

第 9.0.10 条。

18)《发生炉煤气站设计规范》 GB50195—1994

第 13.0.13.1 条；第 13.0.13.2 条；第 13.0.13.3 条；第 13.0.13.5 条；第 13.0.13.6 条；第 17.0.4 条；第 17.0.5 条；第 17.0.9 条。

19)《乙炔站设计规范》 GB50031—1991

第4.0.1条。

20)《氢氧站设计规范》 GB50177—1993

第7.0.8条；第7.0.9条；第7.0.10条；第7.0.11条；第7.0.12条；第7.0.13条；第8.0.1条；第8.0.2条；第8.0.3条；第8.0.4条；第8.0.5条；第8.0.6条；第8.0.7条。

21)《冷库设计规范》 GBJ72—1984

第6.0.5条；第6.0.7条；第6.0.10条；第6.0.11条。

22)《机械工厂建筑设计规范》 JBJ7—1996

第11.2.3条；第11.2.6条。

23)《机械工厂电力设计规范》 JBJ6—1996

第18.1.7条；第18.1.9条；第18.4.11条。

24)《酒精厂设计规范》 Q136014—1996

第8.5.1条；第8.5.4条。

25)《制浆造纸厂设计规范》 QBJ101—1988

第4.7.2条；第6.2.33条；第6.2.42条；第6.3.42条。

26)《真空制盐厂设计规范》 QB6008—1995

第9.1.4条；第9.6.6条。

(3) 城乡规划部分：

1)《城市电力规划规范》 GB50293—1999

第7.5.2.1中（B.0.1；B.0.2）条；第7.5.2.2条；第7.5.2.3条；第7.5.2.5条；第7.5.3.1中（C.0.1；C.0.2）条；第7.5.5.2条；第7.5.6.1条第7.5.6.2条；第7.5.9.2条。

2)《村镇规划标准》 GB50188—1993

第9.3.7条。

3)《城市工程管线综合规划规范》 GB50289—1998

第2.2.1条；第2.2.9条；第2.2.10条；第2.2.12条；第3.0.6条；第3.0.8条；第3.0.9条。

(4)《施工现场临时用电安全技术规范》：

第2.2.1条；第3.1.1条；第3.1.2条；第3.1.3条；第3.1.4条；第3.1.5条；第3.2.1条；第3.2.2条；第3.2.3条；第4.1.1条；第4.1.2条；第4.1.3条；第4.1.4条；第4.1.5条；第4.1.7条；第4.3.7条；第4.4.2条；第5.2.2条；第5.2.3条；第6.1.1条；第6.1.2条；第6.1.17条；第6.2.1条；第6.2.4条；第6.2.7条；第6.3.1条；第7.1.5条；第7.1.13条；第7.1.14条；第7.2.1条；第7.2.5条；第7.2.7条；第7.2.9条；第7.2.14条；第7.2.15条；第7.3.4条；第7.3.10条；第8.1.1条；第8.2.6条；第8.2.8条；第8.2.10条；第8.2.11条；第8.5.1条；第8.5.2条；第9.1.1条；第9.1.3条；第9.1.4条；第9.2.2条；第9.2.5条；第9.3.11条。

(5)《建筑机械使用安全技术规程》 JGJ33—1986

第1.0.17条；第3.1.4条；第3.1.5条；第3.1.8条；第3.1.14条；第14.1.6条；第14.1.9条；第14.1.10条。

1.3 我国工程项目管理的基本概念和项目建设法人、项目经理、项目招标与投标、项目承包与分包等基本要素

1.3.1 项目管理

项目管理是通过合理的组织工作，制定科学的管理制度和程序，进行有效的协调配合，使项目实施过程中的各项工作取得最好的效果，实现项目预期的进度、质量和费用目标。

1.3.1.1 项目管理的一般概念

工程建设的项目管理从广义上理解，包括项目的规划、可行性研究、询价报价、合同谈判及签约、设计、采购、施工、开车、考核验收和项目的后评估。

对一个具体的项目来讲，项目的管理，包括组织、人员、资金、财务、计划、进度、设备、材料、质量、成本、安全、信息、环境、设计、采购、施工、开车、考核和验收等内容。这些内容虽然错综复杂，但它们之间是相互联系、相互制约、具有内在的规律，把这些内容的要素合理地进行组织和管理，就能有效地达到工程建设项目管理和控制的整体目的。

1.3.1.2 国内外项目管理的主要方式

国内外建设项目管理的主要方式有：

(1) 建设单位自管方式。建设单位自管方式即建设单位自己设置基建机构，负责支配建设资金、办理规划手续及准备场地、委托设计、采购器材、招标施工、验收工程等全部工作；有的还自己组织设计、施工队伍，直接进行设计和施工。这是我国多年来常用的方式。

(2) 工程指挥部管理方式。在计划经济体制下，过去我国一些大型工程项目和重点工程项目的管理多采用这种方式。指挥部通常由政府主管部门指令各有关方面派代表组成。近几年在进入社会主义市场经济的条件下，这种方式已不多用。

(3) 总承包管理方式。建设单位仅提出工程项目的使用要求，而将勘察设计、设备选购、工程施工、材料供应、试车验收等全部工作委托一家承包公司去做，竣工以后接过钥匙即可启用。

(4) 工程托管方式。对超大型或多功能、多装置的项目，建设单位将整个工程项目的全部工作，包括可行性研究、场地准备、规划、勘察设计、设备材料采购策略、施工监理及工程验收等全部任务，都委托给工程项目管理专业公司去做，或与该管理公司共同组成项目管理机构。工程承发包公司或咨询公司派出项目经理，再进行招标或组织有关专业公司共同完成整个项目，即国际上日趋普遍的 PMC 方式。

(5) 三角管理方式。由建设单位分别与承包单位和咨询公司签订合同，由咨询公司代表建设单位对承包单位进行管理。这是国际上通行的传统工程管理方式。

1.3.1.3 项目管理的核心内容

项目管理的核心内容是项目控制，主要是通过制定控制目标，定期进行监测分析和趋势预测，判定项目实施过程中的各项偏差，采取相应的措施加以控制等手段，实现项目的预期目标。项目控制包括进度控制、费用控制和材料控制。

1.3.2 项目建设法人

为了建立投资约束机制，规范建设单位的行为，建设工程应当按照政企分开的组织原则组建项目法人，实行项目法人责任制，即由项目法人对项目的策划、资金筹措、建设实施、生产经营、债务偿还和资产的保值增值，实行全过程负责的制度。

1.3.2.1 项目法人

国有单位经营性大中型建设工程必须在建设阶段组建项目法人。项目法人的设立时间是

在新上项目项目建议书被批准后，组建项目法人筹备组，具体负责项目法人的筹建工作，项目法人筹建组主要由项目投资方派代表组成。在审报项目可行性研究报告时，需同时提出项目法人组建方案，否则，其项目可行性研究报告不于审批。项目可行性报告批准后，正式成立项目法人，并按有关规定保证资金到位，同时及时办理公司设立登记。国家重点建设项目的公司章程须报国家计委备案，其他项目的公司章程按项目隶属关系分别向有关部门、地方计委备案。

1.3.2.2 项目法人的组织形式和职责

国有独资公司设立董事会，董事会由投资方负责组建。国有控股或参股的有限公司、股份有限公司设立股东会、董事会和监事会。董事会、监事会由各投资方按照《公司法》的有关规定组建。

建设项目董事会职权主要是负责筹措建设资金；审批上报项目初步设计和概算文件；审批上报年度投资计划并落实年度资金；提出项目开工报告；研究解决建设过程中出现的重大问题；负责提出项目竣工验收申请报告；审定偿还债务计划和生产经营方针，并负责按时偿还债务等等。

实行项目法人职责制，贯彻执行谁投资、谁决策、谁担风险的市场经济下的基本原则，这就为项目法人提出了一个重大问题：如何做好决策和承担风险的工作。

1.3.3 项目经理

项目经理是企业法人代表在项目上的全权委托代理人。在企业内部，项目经理是项目实施全过程全部工作的总负责人，对外可以作为企业法人的代表在授权范围内负责、处理各项事务，因此项目经理是项目实施的最高责任者和组织者。

1.3.3.1 项目经理的任务

(1) 确定项目组织结构并配置相应人员，组织项目经理班子。

(2) 制定各项规章制度和岗位职责，组织项目，有序地开展工作。

(3) 制定项目的总目标和阶段性目标，进行目标分解，制定总体控制计划，并实施控制，保证项目目标的实现。

(4) 及时、准确地作出项目管理决策，严格管理，保证合同的顺利执行。

(5) 协调项目组织的内部及外部各方面的关系，并代表企业法人在授权范围内进行有关签证。

(6) 建立完善的内部及外部信息管理系统，确保信息畅通无阻，保证工作高效率进行。

1.3.3.2 项目经理应具备的基本条件

(1) 有广泛的理论和科学知识。作为项目管理的核心，项目经理应有丰富的知识，较深的专业知识，掌握现代化管理方法，并具有一定的经济知识和法律知识，以处理项目实施过程中出现的有关经济与财务问题。

(2) 有较高的领导艺术和协调能力。作为项目组织管理者，项目经理应具有良好的组织才能和优秀的个人素质，并具有决策应变能力、组织指挥能力、交际能力、谈判能力等。

(3) 有健康的身体和丰富的实践经验。由于工程繁忙，尤其风险大或进展不利的项目，项目经理将肩负沉重压力，因此应有健康的体魄。

1.3.3.3 项目经理的选用与培养

项目经理的选拔和培养是各国项目管理界普遍关注的问题。对于项目经理人才的素质、资历、知识结构和知识水平等要求较高，因此项目经理要有计划的培养，以满足项目管理的

需求。

从长远看，应当把项目管理人员，包括项目管理，作为一个专业，在学校中进行有计划的培养；或者从熟悉专业知识、懂得管理经济知识、有较强能力和社会活动能力的工程师、经济师或工程技术管理人员中，经过基本素质考核后，作为项目经理预备人选进行培训并提供锻炼的机会，使之逐步成为中小型项目经理。大中型项目经理，在上岗前要在有经验的项目经理带领下，接受项目工程师、计划工程师、采购经理或见习经理的锻炼。

1.3.4 项目招标与投标

招标也称作询价。工程项目主要来源于市场，一般都需通过投标竞争获得项目。国家计委1997年发布了“国家基本建设大中型项目实行招标投标的暂行规定”，要求建设项目主体工程的设计、建筑安装、监理和主要设备、材料供应、工程总承包单位以及招标代理机构，除保密上有特殊要求或国务院另有规定外，必须通过招标确定。

招标（或称为询价）是国际贸易中的一种交易方式，是指买方为建设一个工程项目向候选的多家承包商或供货厂商正式发出招标（询价）文件，邀其参加投标竞争、提出报价的一种活动过程。

1.3.4.1 招标的过程

招标的过程一般分为下列几项：准备招标文件、刊登广告、资格预审、发行招标文件、投标准备和投标、开标、评标、签定合同。

公开招标应当发布招标通告。招标公告应当通过报刊或者其他媒介发布。招标通告应当载明下列事项：

1）招标人的名称和地址；

2）招标项目的性质、数量；

3）招标项目的地点和时间要求；

4）获取招标文件的办法、地点和时间；

5）对招标文件收取的费用；

6）需要公告的其他事项。

招标人或招标中介机构可以对有兴趣投标的法人或者其他组织进行资格预审，但应当通过报刊或者其他媒介发布资格预审通告。资格预审通告应当载明下列事项：

1）招标人的名称和地址；

2）招标项目的性质、数量；

3）招标项目的地点和时间要求；

4）获取资格预审文件的办法、地点和时间；

5）对资格预审文件收取的费用；

6）提交资格预审申请书的地点和截止日期；

7）资格预审的日程安排；

8）需要通告的其他事项。

上述预审应当主要审查有兴趣投标的法人或者其他组织，是否具有圆满履行合同的能力。有兴趣投标的法人或者其他组织应当向招标人或者招标投标中介机构提交证明其具有圆满履行合同的能力的证明文件或者资料。招标人或者招标投标中介机构应当对提交资格预审申请书的法人或者其他组织作出预审决定。

采用邀请招标或议标程序的，招标人一般应当向三家以上有兴趣投标的或者通过资格预

审的法人或者其他组织发出投标邀请书。

1.3.4.2 招标文件

招标人或者招标投标中介机构根据招标项目的要求编制招标文件。招标文件一般应当载明下列事项：

1）投标人须知；

2）招标项目的性质、数量；

3）技术规格；

4）投标价格的要求及其决算方式；

5）评标的标准和方法；

6）交货、竣工或提供服务的时间；

7）投标人应当提供的有关资格和资信证明文件；

8）投标保证金的数额或者同期形式的担保；

9）投标文件的编制要求；

10）提供投标文件的方式、地点和截止日期；

11）开标、评标、定标的日期安排；

12）合同格式及主要合同条款；

13）需要载明的其他事项。

招标人或者招标投标中介机构在招标文件中，可以规定投标人在提交符合招标文件要求的投标文件的同时，提交备选投标文件，但应作出说明，并规定相应的评审和比较办法。

招标文件规定的技术规格应当采用国际或者国内公认、法定标准。招标文件中规定的各项技术规格，不得要求或者标明某一特定的专利、商标、名称、设计、型号、原产地或生产厂家，不得有倾向或者排斥某一有兴趣投标的法人或者其他组织的内容。

招标人或者招标投标中介机构应当按照招标公告或者投标邀请书规定的时间、地点出售招标文件。招标文件售出后不予退还。除不可抗力原因外，招标人或者招标投标中介机构在发布招标公告或者发出投标邀请书后不得终止招标。

招标人或者招标投标中介机构需要对已售出的招标文件进行澄清或者非实质性修改的，一般应当在提交投标文件截止日期 15 天前以书面形式通知所有招标文件的购买者，该澄清或修改内容为招标文件的组成部分。

招标文件发出之日到提交招标文件截止之日止，一般不得少于 20 天。

对于同一招标项目，招标人或者招标中介机构可以分两阶段进行招标。第一阶段，招标人或者招标中介机构应当要求有兴趣投标的法人或者其他组织先提交不包括投标价格的初步投标文件，列明关于招标项目技术、质量或者其他方面的建议。招标人或者招标投标中介机构可以与投标人就初步投标文件的内容进行讨论。第二阶段，招标人或者招标投标中介机构应当向提交了初步投标文件并未被拒绝的投标人提供正式招标文件。投标人或者招标投标中介机构根据正式招标文件的要求提交包括投标价格在内的最后投标文件。

1.3.4.3 资格预审

资格预审是招标过程中的一个很重要的步骤，即买方对投标商的投标资格要预先按一定的程序进行调查、审查和确认，审查合格者才能列入合格投标商表（或合格供货商表），再根据具体招标项目的要求等情况，从中确定几家作为本次招标的对象，正式对其招标。

资格预审审查标准主要有五个方面。即：投标人概况，经验与信誉，财务能力、人员能

力和设备能力。

1.3.4.4　招标的方法

招标的方法一般有公开招标、邀请招标和议标。

(1) 公开招标。由招标单位通过报纸、专业性刊物或电台、电视广播等发布公开招标通告，请所有符合条件的公司参加投标竞争。

(2) 邀请招标。邀请招标，确切地说为“邀请投标”，国外称为有限招标也称选择性招标，即由招标单位向经预先选择的数目有限的公司发出邀请信，要求它们参加某项工程的投标竞争。

上述的两种招标方式应该按当地政府主管部门关于选择投标单位的最少数量严格执行。如有的省市规定公开招标与邀请招标，投标单位不得少于4家。

(3) 议标。即不需通过公开或邀请招标，而直接邀请某单位进行协商。第一家协商不行，可另外邀请一家，直到达成协议为止。

1.3.4.5　投标、报价

投标人应当按照招标文件的规定编制投标文件。投标文件应当载明下列事项：

1) 投标函；

2) 投标人资格、资信证明文件；

3) 投标项目方案及说明；

4) 投标价格；

5) 投标保证金或者其他形式的担保；

6) 招标文件要求具备的其他内容。

投标文件应在规定的截止日期前密封送达到投标地点。招标人或者招标投标中介机构对在提交投标文件截止日期后收到的投标文件，应不予开启并退还。招标人或者招标投标中介机构应当对收到的投标文件签收备案。投标人有权要求招标人或者招标中介机构提交签收证明。投标人可以撤回、补充或者修改已提交的投标文件；但是应当在提交投标文件截止日之前，书面通知招标人或者招标投标中介机构。

1.3.4.6　开标

开标应当按照招标文件规定的时间、地点和程序以公开方式进行。开标由招标人或者招标投标中介机构主持，邀请评标委员会成员、投标人代表和有关单位代表参加。

投标人检查投标文件的密封情况，确认无误后，由有关工作人员当众拆封、验证投标资格，并宣读投标人名称、投标价格以及其他主要内容。

投标人可以对唱标作必要的解释，但所作的解释不得超过投标文件记载的范围或改变投标文件的实质性内容。开标应当作记录，存档备查。

1.3.4.7　评标

评标应当按照招标文件的规定进行。

招标人或者招标投标中介机构负责组建评标委员会。评标委员会由招标人的代表及其聘请的技术、经济、法律等方面的专家组成，总人数一般为5人以上单数，其中受聘的专家不得少于三分之二。与投标人有利害关系的人员不得进入评标委员会。

评标委员会负责评标。评标委员会对所有投标文件进行审查，对与招标文件规定有实质性不符的投标文件，应当决定其无效。

评标委员会可以要求投标人对投标文件中含义不明确的地方进行必要的澄清，但澄清不

得超过投标文件记载的范围或改变投标文件的实质性内容。

评标委员会应当按照招标文件的规定对投标文件评审和比较，并向招标人推荐一至三个中标候选人，也可以按照招标人的委托，直接确定中标人。

招标人应当从评标委员会推荐的中标候选人中确定中标人。中选的投标者应当符合下列条件之一：

(1) 满足招标文件各项要求，并考虑各种优惠及税收等因素，在合理条件下所报投标价格最低的。

(2) 最大满足招标文件中规定的综合评价标准的。

除采用议标程序外，招标人或者招标投标中介机构不得在定标前与投标人就投标价格、投标方案等事项进行协商谈判。

招标人或者投标中介机构应当将中标结果书面通知所有投标人。招标人与中标人应当按照中标文件的规定和中标结果签订书面合同。

1.3.5 项目承包与分包

项目承包按合同范围通常分为项目总承包、设计采购承包和设计承包；项目分包通常有装置分包、设计分包、施工分包和成套设备分包。

1.3.5.1 项目总承包

工程公司负责项目的设计、采购、施工和开车指导，直至项目的考核、验收。工程公司对业主（用户）提供项目建设全过程服务。通常也将工程总承包工程称作交钥匙工程。

1.3.5.2 设计采购承包

在这类项目中工程公司只负责项目的设计和采购工作，而项目的施工任务由业主（用户）自行委托施工单位或业主自己组织进行。由于工程公司负责项目设计和采购工作，所以工程公司有责任负责解决项目中与设计和设备、材料采购有关的问题，同时根据合同规定提供施工和开车的技术服务。

1.3.5.3 设计承包

在这类项目中工程公司只负责项目的设计任务，而项目的设备、材料采购和施工均由用户（业主）自行组织或委托施工单位完成。由于工程公司负责设计工作，因此有责任同时根据合同规定提供施工和开车的技术服务，并负责处理其中与设计有关的问题。

1.3.5.4 分包

分包是指总承包商与业主之间签定了某项目的总承包合同后，由总承包商将其中一部分工程及权利和义务分包给分包商。分包内容所涉及的权利和义务关系只能在总承包商和分包商之间发生，业主和分包商之间不直接发生合同法律关系。但是分包商要间接地承担总承包商对业主承担的相关的承包项目的义务。

1.4 我国工程项目勘察设计的设计依据、内容深度、标准设计、设计修改、设计组织、审批程序等的基本要求

设计是对拟建工程的实施在技术上和经济上所进行的全面而详尽的安排，是基本建设的具体化，是把先进技术和科研成果引入建设的渠道，是整个工程的决定性环节，是组织实施的依据。它直接关系着工程质量和将来的使用效果。可行性研究报告经批准的建设项目应通过招标投标择优选择设计单位，按照批准的可行性研究报告的内容和要求进行设计，编制设计文件。根据建设项目的不同情况，设计过程一般划分为两个设计阶段，即初步设计阶段和

施工图设计阶段，重大项目和技术复杂项目，可根据不同行业的特点和需求，增加技术设计阶段。

1.4.1 初步设计

初步设计根据批准的可行性研究报告和必要而准确的设计基础资料，对设计对象进行通盘研究，阐明在指定的地点、时间和投资控制数内，拟建工程在技术上的可行性和经济上的合理性。通过对设计对象作出的基本技术规定，制定项目的总概算。根据国家文件规定，如果初步设计提出的总概算超过可行性研究报告确定的总投资估算10%以上或其他主要指标需要变更时，要重新报批可行性研究报告。

1.4.1.1 初步设计的依据

初步设计开始主要的设计依据如下：

(1) 文件依据。

1) 可行性研究报告与符合国家资质要求的工程咨询公司的评估意见；

2) 与项目建设有关各方签定的同项目设计有关的正式合同文件；

3) 有关主管部门（或业主）对项目建设的要求和指示性文件；

4) 与项目建设有关的各种协议，主要有：有关建设条件的协议：如用地、拆迁、主要原材料供应、供排水、供电、供热、供气、交通、运输、通讯、环保、航空、协作关系以及城市规划等方面的协议；

5) 委托其他设计部门进行设计的协议；

6) 委托其他科研单位进行科研和实验的协议。

(2) 资料依据。设计的资料依据也称为设计的技术条件，是赖以进行设计的基本根据。设计时所需的基本技术资料很多，内容十分广泛，可以说不胜枚举；同时由于行业和项目性质的不同，其所需要的技术条件和资料就不大一样。因此，这里只能根据一般情况将设计所需的资料依据，大致分类列举如下：

1) 区域构造、区域稳定、发震背景、历史地震情况及基本烈度等；

2) 水文地质情况、动态观测资料、水源、水质、水量、洪水及泥沙等情况；

3) 气温、气压、风向、风力、日照、云雾、雨量及蒸发量等；

4) 区域及场地的地形、地貌、位置、各种比例的测量、测绘、测试资料及成图；

5) 场地的工程地质、地基、钻探、坑探、洞探、井探、槽探、物探、测绘、测试、调查及观测等资料；

6) 矿藏资源的分布、埋深、层深、形状、厚度、体积、储量、成分、品位、特点及有关地质资料等；

7) 所需要主要设备的容量、型号、规格、尺寸、大小、性能、特征、效率、价格等；

8) 各种专业科研成果及实验资料；

9) 其他资料，如当地建筑材料的产量、性能、特点和价格，地方有关政策及习尚等。

1.4.1.2 初步设计所包括的内容

各类建设项目的初步设计内容不尽相同。其主要内容如下：

1) 设计依据和设计的主导思想；

2) 建设规模、产品方案以及原材料、燃料和动力的用量来源；

3) 总图布置、运输方案；

4) 工艺流程、主要设备选型和配置；

5）主要建筑物、构筑物、公用辅助设施和生活区的建设；

6）主要材料用量及要求；

7）占地面积和土地使用情况；

8）外部协作配合条件；

9）综合利用、“三废”治理、环境评价及保护措施；

10）抗震及人防措施；

11）生产组织、劳动定员和各项技术经济指标分析及评价；

12）生活区建设；

13）建设顺序及年限；

14）总概算；

15）主要效益指标，分析及评价。

1.4.1.3 初步设计的审核和归口管理

初步设计主要由投资方组织审批。

大中型项目的初步设计和总概算，按隶属关系，由国务院主管部门或由各部门或省、市、自治区、组织审查，提出审核意见，报国家建委批准；特大、特殊项目，由国家建委报请国务院批准。

中型项目的初步设计和总概算，按隶属关系，由国务院主管部门或由各部门或省、市、自治区审查批准。批准文件抄送国家建委备案。国家指定的中型项目的初步设计和总概算要报国家建委审批。

小型项目的初步设计和总概算的审批权限，由主管部门或省、市、自治区自行规定。

总体规划设计（或总体设计）的审批权限，与初步设计的审批权限相同。

各部直接代管的下放项目的初步设计，以国务院主管部门为主，会同有关省、市、自治区审查或批准。

1.4.2 施工图设计

1.4.2.1 施工图设计的依据

（1）文件依据。

1）经有关部门正式批准的初步设计及其批准文件；

2）与项目建设有关各方正式签定的合同文件及指标文件；

3）与设备制造厂正式签定的有关合同或技术协议；

4）其他文件（见初步设计文件依据）。

（2）资料依据。在施工图设计阶段所需的资料依据与初步设计的资料依据的内容基本相同，但应在初设阶段资料的基础上，根据施工图设计阶段的特点和需要，应注意进行核实和补充。

1.4.2.2 施工图设计的内容

施工图设计的内容，主要是根据批准的初步设计的内容和要求，对建设项目所有主、辅生产厂房、附属设施及其主要关键部位的土建和安装绘制出正确完整和尽可能详尽的图纸，并应满足下列要求：

1）设备材料的采购、运输和安排；

2）各种非标设备、工具的制作、采购和运输；

3）建筑、安装工程量的计算和材料用量估算；

4）施工图预算的编制；

5）土建、安装工程的进行；

6）施工组织设计的编制。

县级以上人民政府建设行政主管部门或者水利、交通等有关部门应当对施工图设计文件中涉及公共利益、公众安全、工程建设强制性标准的内容进行审查。设计单位对施工图的质量负责，并向业主、施工单位进行技术交底，听取意见。

1.4.3 标准设计

工程标准设计通常指工程设计中，可在一定范围内通用的标准图、通用图和复用图，一般统称为标准图。在工程设计中采用标准设计可促进工业化水平、加快工程进度、节约材料、降低建设投资。

1.4.3.1 标准设计的特点

1）以图形表示为主，对操作要求和使用方法作文字说明；

2）具有设计、施工、经济标准各项要求的综合性；

3）设计人员选用后可直接用于工程建设，具有产品标准的作用；

4）对地域、环境的适应性要求强，地方性标准较多；

5）除特殊情况可作少量修改外，一般情况设计人员不得自行修改标准设计。

1.4.3.2 标准设计的分类

1）国家标准设计，指在全国范围内需要统一的标准设计；

2）部级标准设计，指在全国各行业范围内需要统一的标准设计，应由主编单位提出并报告主管部门审批颁发；

3）省、市、自治区标准设计，指在本地区范围内需要统一的标准设计，由主编单位提出并报省、市、自治区主管基建的综合部门审批颁发；

4）设计单位自行制定的标准，是指在本单位范围内需要统一，在本单位内部使用的设计技术原则、设计技术规定，由设计单位批准执行，并报上级主管部门备案。

1.4.3.3 标准设计的一般要求

标准设计覆盖范围很广，重复建造的建筑类型及生产能力相同的企业、单独的房屋构筑物均应采用标准设计或通用设计。在设计阶段投资过程中，对不同用途和要求的建筑物，应按统一的建筑模数、建筑标准、设计规范、技术规定等进行设计。若房屋或构筑物整体不便定型化时，应将其中重复出现的建筑物单元、房间和主要的结构节点构造，在构配件标准化的基础上定型化。建筑物和构筑物的柱网、层高及其他构件参数尺寸应力求统一化，在基本满足使用要求和修建条件的情况下，尽可能具有通用互换性。

1.4.3.4 推广标准设计的意义

1）加快提供设计图纸的速度、缩短设计周期、节约设计费用；

2）可使工艺定型、易提高工人技术水平、易使生产均衡、提高劳动生产率和节约材料，有益于较大幅度降低建设投资；

3）可加快施工准备和定制预制构件等项工作，并能使施工速度大大加快，既有利于保证工程质量，又能降低建筑安装工程费用；

4）按通用性条件编制、按规定程序审批，可供大量重复使用，做到既经济又优质；

5）贯彻执行国家的技术经济政策，密切结合自然条件和技术发展水平，合理利用资源和材料设备，考虑施工、生产、使用和维修的要求，便于工业化生产。

1.4.4 设计修改

建设单位、施工单位、监理单位不得修改建设工程勘察、设计文件；确需修改建设勘察设计文件的，应由原建设工程勘察、设计单位修改。经原建设工程勘察、设计单位书面同意，建设单位也可以委托其他具有相应资质的建设工程勘察、设计单位修改。

施工单位、监理单位发现建设工程勘察、设计文件不符合工程建设强制标准、合同约定的质量要求的，应当报告建设单位，建设单位有权要求建设勘察、设计单位对建设工程勘察、设计文件进行补充、修改。

凡涉及计划任务书的主要内容，如建设规模、产品方案、建设地点、主要协作关系等方面的修改，须经原计划任务书审批机关批准。

凡涉及初步设计的主要内容，如总平面布置、主要工艺流程、主要设备、建筑面积、建筑标准、总定员、总概算等方面的修改，须经原设计审批机关批准。修改工作由原设计单位负责进行。

1.5 我国工程项目投资估算、概算、预算的基本概念

1.5.1 投资估算的基本概念及编制要求

1.5.1.1 投资估算的概念

投资估算是在对项目的建设规模、产品方案、工艺技术及设备方案、工程方案及项目实施进度等进行研究并基本确定的基础上，估算项目所需资金总额（包括建设投资和流动资金）并测算建设期分年资金使用计划。投资估算是拟建项目编制项目建议书、可行性研究报告的重要组成部分，是项目决策的重要依据之一。

1.5.1.2 投资估算的作用

（1）投资估算是建设项目建议书和可行性研究报告经济评价不可缺少的内容。是作为上报审批及论证是否投建的依据；

（2）是限额设计控制和遵循依据；

（3）通过投资估算和经济分析，衡量设计方案是否经济合理的依据。

1.5.1.3 投资估算编制的内容和范围

投资估算的内容，从费用构成来讲应包括该项目从筹建、设计、施工直至竣工投产所需的全部费用，分为建设投资和流动资金两部分。包括范围如下：

（1）红线以内的准备工作（如土地征拔、购、拆迁、赔偿、三通一平等）、主体工程、设备、电源、水源、动力、总图（如土石方、通路、室外管线、构筑物、绿化）等全部工程建设费用；

（2）其他工程费用，如建设单位管理费；

（3）税金及贷款利息；

（4）建设项目在城乡的还有市政建设公用设施配套费；

（5）固定资产投资方向调节税。

1.5.1.4 投资估算的依据

（1）在立项计划阶段，投资估算根据建设项目的工程内容、建设的目的、规模、工艺要求、产品方案及前期工作可能发生的工程费用，结合材料和设备价格动态，并参考类似工程的造价资料编制。

（2）在可行性研究阶段，根据规划要求、工程概况、工艺及产品方案、市场预测和资金

来源、市场价格变化等各种影响投资因素作出分析。采用排项目、排单位工程造价的方法，以防漏项和高估低算。

(3) 在设计方案阶段，要根据设计方案匡算工程量，尽可能按现行定额单位估价表进行编制。

(4) 为了避免投资估算高估低算，必须做到编制有依据和考虑价格变动因素。其他基本建设费用漏列，也是造成投资估算不准的原因之一。

1.5.1.5 投资估算的审查

为了保证项目投资估算的准确性和估算质量，必须加强对项目投资估算的审查工作。

项目投资估算的审查部门和单位，在审查项目投资估算时，应注意审查以下几点：

(1) 投资估算编制依据的时效性、准确性。估算项目投资所需的数据资料很多，如设备材料价格、运输费以及有关的定额、指标、标准和规定等，这些资料随着市场的变化也在发生着不同程度的变化，因此必须注意其时效性。

(2) 审查选用的投资估算方法的科学性、适用性。投资估算方法有很多种，如生产能力指数法、资金周转率法、比例估算法以及综合指标投资估算法，每种估算方法都有各自的适用条件和范围，并具有不同的精确度。如果使用的投资估算方法与项目的客观条件和情况不相适应，将不能保证投资估算的质量。

(3) 审核投资估算的编制内容与拟建项目规划要求的一致性。审查投资估算包括的内容应与规划要求一致，其中的公用工程辅助部分、室外工程部分的建设费用不应被忽略。审查项目投资估算中生产装置的技术水平和自动化程度是否满足规划要求的先进程度。

(4) 审查投资估算的费用项目、费用数额的真实性。审查费用项目与规划要求、实际情况是否相符，有否漏项或重项，估算的费用是否符合国家规定，对“三废”处理是否进行了估算，是否考虑了物价上涨因素等等。

1.5.2 设计概算

1.5.2.1 设计概算的内容

设计概算是控制和确定工程造价的文件。是在初步设计或扩大初步设计阶段，由设计单位按照设计要求计算和确定每项新建、改建、扩建和恢复工程的全部建设费用。其中包括拟建工程从立项开始到交付使用为止全过程所发生的建设费用的文件，是设计文件的重要组成部分。在报请审批初步设计或扩大初步设计时，作为完整的技术文件必须附有相应的设计概算。

设计概算分为单位工程概算、单项工程综合概算、建设工程总概算三级。

建设工程总概算是确定某一建设项目从筹建到竣工验收全部建设费用的总文件，它是根据项目内各个单项工程综合概算以及其他工程和费用概算汇编而成。单项工程综合概算包括各单位建筑工程概算和各单位设备及安装工程概算。

各单位建筑工程概算包括下列内容：

1) 一般土建工程概算；

2) 给排水工程概算；

3) 采暖工程概算；

4) 通风工程概算；

5) 电气照明工程概算；

6) 工业管道工程概算；

7) 特殊构筑物工程概算。

设备及安装工程概算包括：

1）机械设备及安装工程概算；

2）电气设备及安装工程概算；

3）器具、工具及生产家具购置费用概算。

建设工程总概算组成内容如下：

（1）第一部分　工程费用：主要工程项目综合概算；辅助和服务性项目综合概算；住宅、宿舍、文化福利和公共建筑项目综合概算；室外工程项目综合概算；场外工程项目综合概算。

（2）第二部分　工程建设其他费用：土地使用费、建设单位管理费、勘察设计费、研究试验费、联合试运转费、生产准备费、施工机构迁移费、引进机构迁移费、引进技术和进口设备项目的其他费用、供电帖费、办公和生活用品购置费、临时设施费、工程监理费、工程保险费。

（3）第三部分　预备费、建设期利息、固定资产投资方向调节税、经营性项目辅底流动资金。

1.5.2.2　设计概算的作用

（1）设计概算是国家确定和控制基本建设投资、编制基本建设计划的依据。初步设计及总概算按规定程序报请有关部门批准后即为建设工程总投资的最高限额，不得任意突破，如确需突破时需报原审批部门批准。

（2）设计概算是设计方案经济评价与选择的依据。设计人员根据设计概算进行设计方案技术经济分析、多方案评价并优选方案，以提高工程项目设计质量和经济效果。同时，设计概算为下阶段施工图设计确定了投资控制目标。

（3）设计概算是实行项目承包的依据。在进行概算承包时，单项工程综合概算及建设工程总概算是投资承包指标商定和确定的基础，尤其经上级主管部门批准的设计概算或修整概算，是主管单位和承包单位签订承包合同、控制承包数额的依据。

（4）设计概算是基本建设核算、考核建设工程成本和投资效果的依据。设计概算是建设单位进行项目核算、考核项目成本和投资经济效果的重要依据。

1.5.2.3　设计概算的编制依据

设计概算的编制依据是：

1）经批准的有关文件、上级有关文件、指标；

2）工程地质勘测资料；

3）经批准的设计文件；

4）水、电和原材料供应情况；

5）交通运输情况及运输价格；

6）地区工资指标、已批准的材料预算价格及机械台班价格。

设计概算的审查方式一般采用集中会审的方法进行，一般情况下可按如下步骤进行：概算审查准备、概算审查、技术经济对比分析、调查研究、积累资料。

1.5.3　施工图预算

1.5.3.1　施工图预算的内容

施工图预算是根据批准的施工图设计、预算定额和单位计价表、施工组织设计文件以及各种费用定额等有关资料进行计算和编制的单位工程预算造价的文件。

施工图预算是拟建工程设计概算的具体化文件，也是单项工程综合预算的基础文件。施工图预算的编制对象为单位工程，因此也称单位工程预算。

施工图预算通常分为建筑工程预算和设备安装工程预算两大类。根据单位工程和设备的性质、用途的不同，建筑工程预算可分为一般土建工程预算、卫生工程预算、工业管道工程预算、特殊构筑物工程预算和电气照明工程预算；设备安装工程预算又可分为机械设备安装工程预算、电气设备安装工程预算。

1.5.3.2 施工图预算的编制依据

(1) 经批准和会审的施工图设计文件及有关标准图集。编制施工图预算所用的施工图纸须经主管部门批准,须经业主、设计工程师参加的图纸会审并签署“图纸会审纪要”,应有与图纸有关的各类标准图集。通过上述资料可熟悉编制对象的工程性质、内容、构造等工程情况。

(2) 施工图组织设计。施工图组织设计是编制施工图预算的重要依据之一，通过它可充分了解各分部分项工程的施工方法、施工进度计划、施工机械的选择、施工平面图的布置及主要建设措施等内容，与工程量计算、定额的套用密切相关。

(3) 工程预算定额。工程预算定额是编制施工图预算的基础资料，是分项工程项目划分、分项工程工作内容、工程量计算的重要依据。

(4) 经批准的设计概算文件。经批准的设计概算文件是控制工程拨款或贷款的最高限额，也是控制单位工程预算的重要依据。若工程预算确定的投资总额超过设计概算，须补做调整设计概算，经原批准机构批准后方可实施。

(5) 地区单价计价表。地区单价计价表是单价法编制施工图预算最直接的基础资料。

(6) 工程费用定额。将直接费（或人工费）作为计算基数，根据地区和工程类别的不同套用相应的定额或费用标准，确定工程预算造价。

(7) 材料预算价格。各地区材料预算价格是确定材料价差的依据，是编制施工图预算的必备资料。

(8) 工程承包合同或协议书。预算编制时须认真执行合同或协议书规定的有关条款，如预算包干费等。

(9) 预算工作手册。预算工作手册是编制预算必备的工具之一。主要有各种常用数据、计算公式、金属材料的规格、单位重量等项内容。

1.5.3.3 施工图预算的审查

施工图预算审查的重点是施工图预算的工程量计算是否准确、定额或单价套用是否合理、各项取费标准是否符合现行规定等方面。审查的内容有：

1) 工程量；

2) 定额或单价的套用；

3) 其他有关费用。

1.6 我国工程项目建设造价的主要构成、造价控制的要求和在工程勘察设计中控制造价的要点

1.6.1 工程造价的含义

工程造价的直意就是工程的建造价格。工程，是泛指一切建设工程，它的范围和内涵具有很大的不确定性。

工程造价有两种含义，但都离不开市场经济的大前提。

第一种含义：工程造价是指建设一项工程预期开支或实际开支的全部固定资产投资费用。显然，这一含义是从投资者——业主的角度来定义的。投资者选定一个投资项目，为了获得预期的效益，就要通过项目评估进行决策，然后进行设计招标、工程招标，直至竣工验收等一系列投资管理活动。在投资活动中所支付的全部费用形成了固定资产和无形资产。所有这些开支就构成了工程造价。从这个意义上说，工程造价就是工程投资费用，建设项目工程造价就是建设项目固定资产投资。

第二种含义：工程造价是指工程价格。即为建设一项工程，预计或实际在土地市场、设备市场、技术劳务市场，以及承包市场等交易活动中形成的建筑安装工程的价格和建设工程总价格。显然，工程造价的第二种含义是以社会主义商品经济和市场经济为前提的。它以工程这种特定的商品形式作为交易对象，通过招标、承发包或其他交易方式，在进行多次性预估的基础上，最终由市场形成的价格。

通常是把工程造价的第二种含义只认定为工程承发包价格。承发包价格是工程造价中一种重要的，也是典型的价格形式。

从建设工程的投资者来说，面对市场经济条件下的工程造价就是项目投资，是“购买”项目要付出的价格；同时也是投资者在作为市场供给主体时“出售”项目时订价的基础。

对于承包商来说，对于供应商和规划、设计等机构来说，工程造价是他们作为市场供给主体出售商品和劳务的价格的总和，或是特指范围的工程造价，如建筑安装工程造价。

工程造价的两种含义是对客观存在的概括。它们既是共生于一个统一体，又是相互区别的。最主要的区别在于需求主体和供给主体在市场追求的经济利益不同，因而管理的性质和管理目标不同。从管理性质看，前者属于投资管理范畴，后者属于价格管理范畴。从管理目标看，作为项目投资或投资费用，降低工程造价是投资者始终如一的追求。作为工程价格，承包商所关注的是利润和高额利润，他追求的是较高的工程造价。

1.6.2 工程造价的特点

（1）工程造价的大额性。能够发挥投资效用的任一项工程，不仅实物形体庞大，而且造价高昂。动辄百万、数千万、数亿、数十亿，特大的工程项目造价可达百亿、千亿元人民币。工程造价的大额性使它关系到有关各方面的重大经济利益，同时也会对宏观经济产生重大影响。这就决定了工程造价的特殊地位，也说明了造价管理的重要意义。

（2）工程造价的个别性、差异性。任何一项工程都有特定的用途、功能、规模。因此对每一项工程的结构、造型、空间分割、设备配置和内外装饰都有具体的要求，所以工程内容和实物形态都具有个别性、差异性。产品的差异性决定了工程造价的个别性差异。同时每项工程所处地区、地段都不相同，使这一特点得到强化。

（3）工程造价的动态性。任一项工程从决策到竣工交付使用，都有一个较长的建设期间，而且由于不可控因素的影响，在预计工期内，许多影响工程造价的动态因素，如工程变更，设备材料价格，工资标准以及费率、利率、汇率会发生变化。这种变化必然会影响到造价的变动。所以工程造价在整个建设期中处于不确定状态，直至竣工决算后才能最终确定工程的实际造价。

（4）工程造价的层次性。造价的层次性取决于工程的层次性。一个建设项目往往含有多个能够独立发挥设计效能的单项工程（车间、写字楼、住宅楼等）。一个单项工程又是由能够各自发挥专业效能的多个单位工程（土建工程、电气安装工程等）组成。与此相适应，工程造价有3个层次：建设项目总造价、单项工程造价和单位工程造价。如果专业分工更细，

单位工程（如土建工程）的组成部分—分部分项工程也可以成为交换对象，如大型土方工程、基础工程、装饰工程等，这样工程造价的层次就增加分部工程和分项工程而成为5个层次。即使从造价的计算和工程管理的角度看，工程造价的层次性也是非常突出的。

（5）工程造价的兼容性。造价的兼容性首先表现在它具有两种含义，其次表现在造价构成因素的广泛性和复杂性。在工程造价中，首先说成本因素非常复杂。其中为获得建设工程用地支出的费用、项目可研和规划设计费用、与政府一定时期政策（特别是产业政策和税收政策）相关的费用占有相当的份额。再次，盈利的构成也较为复杂，资金成本较大。

工程造价的职能既是价格职能的反映，也是价格职能在这一领域的特殊表现。工程造价的职能除一般商品价格职能以外，还具有预测职能、控制职能、评价职能和调控职能。

1.6.3 工程造价的作用

（1）项目决策的工具。建设工程造价决定着项目的一次投资费用，投资者是否有足够的财务能力支付这笔费用，是否认为值得支付这项费用，是项目决策中要考虑的主要问题。

（2）制定投资计划和控制投资的有效工具。投资计划是按照建设工期、工程进度和建设工程价格等逐年分月加以制定的。正确的投资计划有助于合理和有效地使用资金。

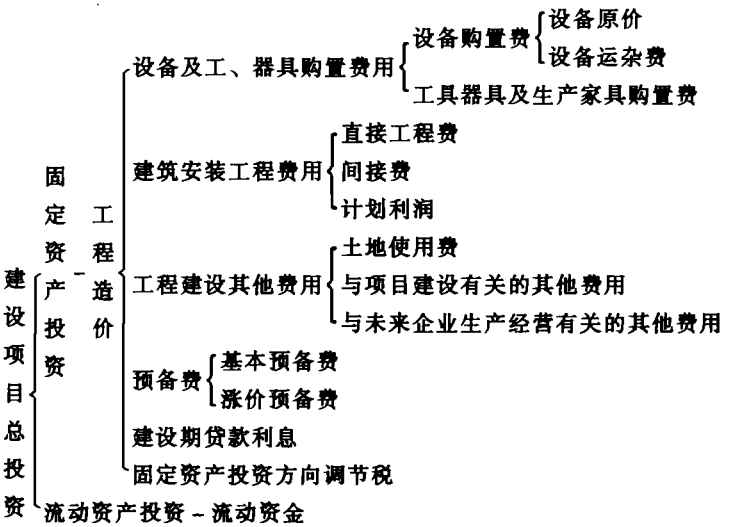
（3）筹集建设资金的依据。投资体制的改革和市场经济的建立，要求项目的投资者必须有很强的筹资能力，以保证工程建设有充足的资金供应。

（4）合理利益分配和调节产业结构的手段。工程造价的高低，涉及到国民经济各部门和企业间的利益分配。

（5）评价投资效果的重要指标。建设工程造价是一个包含着多层次工程造价的体系，就一个工程项目来说，它既是建设项目的总造价，又包含单项工程的造价和单位工程的造价，同时也包含单位生产能力的造价，或一个平方米建筑面积的造价等等。所有这些，使工程造价自身形成了一个指标体系。所以它能够为评价投资效果提供出多种评价指标，并能够形成新的价格信息，为今后类似项目的投资提供参照系。

1.6.4 工程造价的构成

建设项目总投资包含固定资产投资和流动资产两部分。工程造价由设备及工、器具购置费用、建筑安装工程费用、工程建设其他费用、预备费、建设期贷款利息、固定资产投资方向调节税构成。



1.6.4.1 设备及工、器具购置费用的构成

设备及工、器具购置费用是由设备费和工具、器具及生产家具购置费组成的，它是固定资产投资中的积极部分。在生产性工程建设中，设备及工、器具购置费用占工程造价比重的增大，意味着生产技术的进步和资本有机构成的提高。

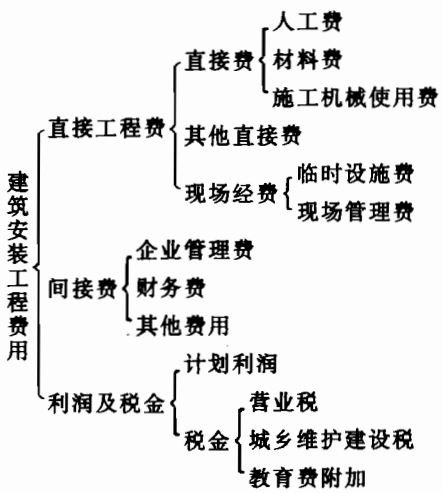
(1) 设备购置费的构成。设备购置费是指为建设项目购置或自制的达到固定资产标准的各种国产或进口设备、工具、器具的购置费用。它由设备原价和设备运杂费构成。设备原价指国产设备或进口设备的原价；设备运杂费指除设备原价之外的关于设备采购、运输、途中包装及仓库保管等方面支出费用的总和。

(2) 工具、器具及生产家具购置费的构成。工具、器具及生产家具购置费，是指新建或扩建项目初步设计规定的，保证初期正常生产必须购置的没有达到固定资产标准的设备、仪器、工卡模具、器具、生产家具和备品备件等的购置费用。一般以设备购置费为计算基数，按照部门或行业的工具、器具及生产家具费率计算。

工具、器具及生产家具购置费 = 设备购置费 × 定额费率

1.6.4.2 建筑安装工程费用构成

如下图所示



1.6.4.3 工程建设其他费用构成

工程建设其他费用，是指从工程筹建起到工程竣工验收交付使用止的整个建设期间，除建筑安装工程费用和设备及工、器具购置费用以外的，为保证工程建设顺利完成和交付使用后能够正常发挥效用而发生的各项费用。

工程建设其他费用，按其内容大体可分为三类。第一类指土地使用费；第二类指与工程建设有关的其他费用；第三类指与未来企业生产经营有关的其他费用。

1.6.4.4 预备费、建设期贷款利息、固定资产投资方向调节税

(1) 预备费。预备费包括基本预备费和涨价预备费。

基本预备费是指在初步设计及概算内难以预料的工程费用。涨价预备费是指建设项目在建设期间内由于价格等变化引起工程造价变化的预测预留费用。

(2) 建设期贷款利息。建设期贷款利息包括向国内银行和其他非银行金融机构贷款、出口信贷、外国政府贷款、国际商业银行贷款以及在境内外发行的债券等在建设期间内应偿还的贷款利息。建设期贷款利息实行复利计算。

(3) 固定资产投资方向调节税。为了贯彻国家产业政策，控制投资规模，引导投资方向，调整投资结构，加强重点建设，对在我国境内进行固定资产投资的单位和个人征收固定资产方向调节税，其计税依据是固定资产投资项目实际完成的投资额。

1.6.5 工程造价的有效控制

所谓工程造价的有效控制，就是在优化建设方案、设计方案的基础上，在建设程序的各个阶段，采用一定的方法和措施把工程造价的发生控制在合理的范围和核定的造价限额以内。具体说，要用投资估算价控制设计方案的选择和初步设计概算造价；用概算造价控制技术设计和修正概算造价；用概算造价或修正概算造价控制施工图设计和预算造价。

工程造价的控制贯穿于项目建设的全过程，这一点是毫无疑问的，但必须重点突出。根据分析，影响项目造价最大的阶段是约占工程建设周期 1/4 的技术设计结束前的工作阶段。在初步设计阶段，影响工程造价的可能性为 75% ~ 95%；在技术设计阶段，影响工程造价的可能性为 35% ~ 75%；在施工图设计阶段，影响工程造价的可能性则为 5% ~ 35%。很显然，工程造价控制的重点在于施工以前的投资决策和设计阶段，而在项目作出投资决策后，控制工程造价的关键在于设计。同时，要有效地控制工程造价，应从组织、技术、经济等多方面采取措施。

从组织上采取的措施，包括明确项目组织结构，明确造价控制者及其任务，明确管理职能分工；从技术上采取措施，包括重视设计多方案选择，严格审查监督初步设计、技术设计、施工图设计、施工组织设计，深入技术领域研究节约投资的可能性；从经济上采取措施，包括动态地比较造价的计划值和实际值，严格审核各项费用支出，采取对节约投资的有力奖励措施。

1.7 我国工程项目勘察设计过程质量管理的基本规定

中华人民共和国国务院令（第 279 号），于 2000 年 1 月 30 日发布并即日起实施《建设工程质量管理条例》（以下简称《条例》）。该条例共有九章八十二条，条例包含建设单位、勘察单位、设计单位、施工单位、工程监理单位。

《条例》第三章专门规定了勘察、设计单位的质量责任和义务，即勘察、设计单位进入设计市场所应承担的责任和义务，规定共有七条：

1.7.1 《条例》第三章第十八条

(1) 规定“从事建设工程勘察、设计的单位应当依法取得相应等级的资质证书，并在其资质等级许可的范围内承揽工程”，这里讲的资质要求，是市场条件和市场行为的要求。《建筑法》第三条中有这方面规定，勘察、设计单位市场行为直接关系到设计质量，资质还代表着单位的能力，不容许超越资质等级去搞设计。

(2) 另外，还规定了禁止以其他勘察、设计单位的名义承揽工程，禁止勘察、设计单位允许其他单位或个人以本单位的名义承揽工程，勘察、设计单位不得转包或违法分包所承揽的工程。

1.7.2 《条例》第三章第十九条

(1) 规定“必须按照工程建设强制性标准进行勘察、设计，并对其勘察、设计质量负责”。

(2) 同时，规定各类注册执业人员应当在数据文件上签字，并对设计文件负责。本条规定要求当超越标准进行勘察、设计时应上报。要求对质量负责，影响质量的因素有很多方

面，但即使建设单位原因，也是设计单位负责。施工图审查后出事故，还是设计单位负责。

(3) 对于注册执业人员，注册建筑师条例上有规定，事故发生时，由单位赔偿，单位又有权向签字的注册师追查责任。刑法第一百三十七条规定，违反国家规定，降低工程质量标准，造成重大安全事故的，对直接责任人员处五年以下有期徒刑或者拘役，并处罚金。后果特别严重的，处五年以上十年以下有期徒刑，并处罚金。

1.7.3 《条例》第三章第二十条

规定“勘察单位提供的地质、测量、水文等勘察成果必须真实、准确”，即要求提供的勘察成果安全可靠、经济合理。

1.7.4 《条例》第三章第二十一条

(1) 规定“设计单位应当根据勘察成果文件进行建设工程设计”。

(2) 规定“设计文件应当符合国家规定的设计深度要求，注明工程合理使用年限”。关于工程合理使用年限，即指工程竣工后，投入使用后的年限，也就是勘察、设计单位责任年限。

《民用建筑通则》(JGJ37—1987) 中规定，可使使用者了解安全使用年限。

1.7.5 《条例》第三章第二十二条

(1) 规定“设计单位在设计文件中选用的建筑材料、建筑构件和设备，应注明规格、型号、性能等技术指标，其质量要求必须符合国家规定的标准”。

(2) 还规定了除有特殊要求的材料、设备、工艺线等外，设计单位不得指定生产厂、供应商。《建筑法》上也有此规定。由建设单位委托设计单位选用材料、设备等，可以指定生产厂商。

1.7.6 《条例》第三章第二十三条

(1) 规定“设计单位应当就审查合格的施工图设计文件向施工单位作出详细说明”，所谓审查合格是指经政府指定的施工图审查部门审查结果合格。

(2) 设计单位第一步要向施工单位做技术交底。

1.7.7 《条例》第三章第二十四条

(1) 规定“设计单位应当参与建设工程质量事故分析，并对因设计造成的质量事故，提出相应的技术处理方案”。

(2) 对非设计原因造成的质量事故，设计单位也要负责分析，但要由建设单位付费。

《条例》与勘察、设计单位相关的条文，还有 14 条：

(1)《条例》第一章第三条规定了“建设单位、勘察单位、设计单位、施工单位、工程监理单位依法对建设工程质量负责”。这里的质量负责是法人负责。

(2)《条例》第一章第五条规定必须严格执行基本建设程序，坚持先勘察、后设计、再施工的原则。

(3)《条例》第二章第十一条规定了建设单位应当将施工图设计文件报政府建设行政主管部门或其他有关部门审查，规定施工图设计文件未经审查批准的，不得使用。

(4)《条例》第二章第十二条规定了实行监理的建设工程，建设单位也可以委托具有工程监理相应资质等级并与被监理工程的施工承包单位没有隶属关系或者其他利害关系的该工程的设计单位进行监理。

(5)《条例》第七章第四十八条规定了政府建设行政主管部门或其他有关部门，在履行监督检查职责时，有权要求被检查的单位提供有关工程质量的文件和资料、进入施工现场进

行检查和发现有影响工程质量的问题时，责令改正。

(6)《条例》第七章第五十二条突出明确了建设工程发生质量事故的报告制度。要求发生质量事故，有关单位应当在24h内向当地建设行政主管部门和其他有关部门报告。对于特别重大质量事故的调查程序按照国务院有关规定办理。

(7)《条例》第八章第六十条规定了，违反本条例规定，超越本单位资质等级承揽工程的，责令停止违法行为，对勘察、设计单位或者工程监理单位处合同约定的勘察费、设计费或者监理酬金1倍以上2倍以下的罚款，情节严重的，吊销资质证书，有违法所得的，予以没收。

(8)《条例》第八章第六十一条规定了，违反本条例规定，勘察、设计、施工、工程监理单位允许其他单位或者个人以本单位名义承揽工程的，责令改正，没收违法所得，对勘察、设计单位和工程监理单位处合同约定的勘察费、设计费和监理酬金1倍以上2倍以下的罚款，情节严重的，吊销资质证书。

(9)《条例》第八章第六十二条规定了，违反本条例规定，将承包的工程转包或者违法分包的，责令改正，没收违法所得，对勘察、设计单位处合同约定的勘察费、设计费25%以上50%以下的罚款，情节严重的，吊销资质证书。

(10)《条例》第八章第六十三条规定了，违反本条例规定，有下列行为之一的，责令改正，处10万元以上30万元以下的罚款：

1）勘察单位未按照工程建设强制性标准进行勘察的；

2）设计单位未根据勘察成果文件进行工程设计的；

3）设计单位指定建筑材料、建筑构配件的生产厂、供应商的；

4）设计单位未按照工程建设强制性标准进行设计的。

有上列行为，造成工程质量事故的，责令停业整顿，降低资质等级，情节严重的吊销资质证书，造成损失的，依法承担赔偿责任。

(11)《条例》第八章第七十二条规定了，违反本条例规定，对注册执业人员因过错造成质量事故的，责令停止执业1年；造成重大质量事故的，吊销执业资格证书，5年以内不予注册；情节特别恶劣的，终身不予注册。

(12)《条例》第八章第七十四条规定了，建设、设计、施工、工程监理单位违反国家规定，降低工程质量标准，造成重大安全事故，构成犯罪的，对直接责任人员依法追究刑事责任。

(13)《条例》第八章第七十七条规定了，对因调动工作、退休等原因离开原单位后，被发现在原单位工作期间违反国家有关建设工程质量管理规定，造成重大工程质量事故的，仍应当依法追究法律责任。

(14)《条例》第九章第八十条规定了，抢险救灾及其他临时性房屋建筑和农民自建低层住宅的建设活动，不适用本条例。

1.8 我国工程勘察设计过程质量管理和保证体系的基本概念

1.8.1 质量管理和质量保证的定义

在GB/T 19000－2000－ISO9000：2000标准（质量管理体系　基础和术语）中，第3.2.8条对“质量管理”定义为“在质量方面指挥和控制组织的协调的活动”，其活动通常包括制定质量方针和质量目标以及质量策划、质量控制、质量保证和质量改进。

第3.2.11条对“质量保证”定义为“质量管理的一部分，致力于提供质量要求会得到满足的信任”。但在2000版ISO9001标准的名称中，不再有“质量保证”一词，这反映了2000版标准规定的质量管理体系要求包括了产品质量保证和顾客满意。

1.8.2 工程勘察设计过程质量管理体系

在GB/T 19000－2000－ISO2000：2000标准中，第3.2.3条对“质量管理体系”定义为“在质量方面指挥和控制组织的管理体系”。

1.8.3 质量管理体系的基本概念

（1）建立、完善质量管理体系并保持其有效运行，是一个组织质量管理的核心，是贯彻国家质量管理标准的关键，也是一项复杂和具有相当难度的系统工程。

（2）在一个组织内，只能建立并保持一个质量管理体系。

（3）质量管理体系要求是通用的，适用于所有行业或经济领域。ISO9001标准仅仅规定了质量管理体系要求。而产品要求可由顾客规定，或由组织通过预测顾客的要求规定，或由法规规定。

（4）质量管理体系是组织的管理体系的一部分。一个组织的管理体系包括质量管理体系、环境管理体系、财务管理体系、职业健康与安全管理体系等。

（5）质量管理体系应形成文件，ISO9001：2000标准中，在体系的管理方面只要求6个形成文件的程序。但为了管理质量管理体系有效实施，组织还需要其他形成文件的程序，这随组织不同而不同。

（6）对质量管理体系评价方法包括四个方面：

1）质量管理体系过程评价（过程是否规定、职责是否分配、程序是否得到实施、结果是否有效）。

2）质量管理体系审核（第一方审核即内部质量体系审核、第二方审核即顾客或顾客委托一个审核机构对组织进行审核、第三方审核即外部体系认证机构对组织进行审核）。

3）质量管理体系评审（最高管理者对质量方针、目标和体系的评价，即管理评审）。

4）组织的自我评定（参照质量管理体系或优秀模式进行全面和系统的评审）。

（7）质量管理体系是在不断改进中得到完善的，而这种持续改进是永无止境的。

1.9 计算机辅助程序在工程项目管理中的应用

1.9.1 项目管理软件中的几个主要方面

1.9.1.1 进度计划管理

对于建设工程项目来说，时间是最重要的资源。计划管理功能是工程项目管理中应用最普遍的技术上最成熟的功能，是大多数项目管理软件的核心部分。一般包括工作包的分解、计算关键路径、时间进度分析、资源平衡、实际计划执行状况，输出报告、绘制网络图等。

1.9.1.2 费用管理

进度计划管理系统是建立项目的时间进度计划，费用管理控制系统确定项目的价格。费用管理提供的功能包括投标报价、预算管理、费用预测、费用控制、绩效检测和差异分析。

1.9.1.3 资源管理

项目管理软件中所涉及的资源包括项目实施过程中实际投入的资源，如人力资源、施工机械、设备材料等，还包括其他如工程量、影响因素等；所有这些资源可以根据使用过程中的特点划分为消耗性资源和非消耗性资源。资源管理的功能包括：拥有完善的资源库，能自

动调配所有可行的资源，能通过与其他功能的配合提供资源需求，能对资源需求和供给的差异进行分析，能自动或协助用户通过不同途径解决资源冲突问题。

1.9.1.4 风险管理

项目中的风险包括时间上的风险、费用上的风险（如报价过低）、技术上的风险（如设计错误）等等。从简单的风险范围估计方法到复杂的风险模拟分析都在工程上得到了一定程度的应用。风险管理软件包括：项目风险的文档化管理、进度计划模拟、减少乃至消除风险的计划管理等。

1.9.2 常用工程项目管理软件

目前国内外正在使用的项目管理软件有2000多种，在此只介绍几种常用的综合进度管理软件、合同及费用控制管理软件。

1.9.2.1 综合进度计划管理软件（P3）

在国内外的大型项目管理软件中，美国Primavera公司开发的Primavera Project planner（P3）普及程度和市场占有率是最高的。国内的大型项目和特大型项目几乎都采用了P3。目前国内广泛使用的P3进度计划软件主要是指项目级的P3。

P3是用于项目进度计划、动态控制、资源管理和费用控制的综合进度计划管理软件。P3的特点是：拥有完善的管理复杂、大型工程项目的手段，拥有完善的编码体系，包括WBS（工作分解结构）编码、作业代码编码、作业分类编码、资源编码和费用科目编码等。具体功能如下：

（1）同时管理多个工程，通过各种视图、表格和其他分析、展示工具，帮助项目管理人员有效控制大型项目、复杂项目。

（2）可以通过开放数据库互联与其他系统结合进行相关数据的采集、数据存储和风险分析。

（3）提供了上百种标准的报告，同时还内置报告生成器，可以生成各种自定义的图形和表格报告。

1.9.2.2 Microsoft Project

由Microsoft公司推出Microsoft Project是到目前为止在世界范围内应用最广泛的、以进度计划为核心的项目管理软件，Microsoft Project可以帮助项目管理人员编制进度计划，管理资源的分配，生成费用预算，也可以绘制商务图表，形成图文并茂的报告。主要功能如下：

（1）进度计划管理。Microsoft Project为项目的进度计划管理提供了完备的工具，用户可以根据自己的习惯和项目的具体要求采用“自上而下”或“自下而上”的方式安排整个工程项目。

（2）资源管理。Microsoft Project为项目资源管理提供了适度、灵活的工具，用户可以方便地定义和输入资源，可以采用软件提供的各种手段观察资源的基本情况和使用状况，同时还提供了解决资源冲突的手段。

（3）费用管理。Microsoft Project为项目管理工作提供了简单的费用管理工具，可以帮助用户实现简单的费用管理。

Microsoft Project是截今为止易用性较好的项目管理软件之一，其操作界面和操作风格与大多数人平时使用的Microsoft Office软件中的Word、Excel完全一致。此软件实现了“从内到外”的完全汉化。

作为Microsoft Office的一员，Microsoft Project也内置了Visual Basic for Application（VBA），

VBA 是 Microsoft 开发的互交式应用程序宏语言，用户可以利用 VBA 作为工具进行二次开发，一方面可以帮助用户实现日常工作的自动化；另一方面还可以开发该软件所没有提供的功能。此外，用户可以依靠 Microsoft Office 与 Office 家族其他软件的紧密联系，将项目数据输出到 Word 中生成项目报告，输出到 Excel 中生成电子表格文件或图形，输出到 PowerPoint 中生成项目演示软件，还可以将 Microsoft Project 的项目文件直接存为 Access 数据库文件，实现与项目管理信息系统的直接对接。

1.9.2.3 Welcom Open Plan 项目管理软件

Welcom Open Plan 也是一个企业级的项目管理软件，其特点如下：

（1）进度计划管理。Open Plan 采用自上而下的方式分解工程。拥有无限级别的子工程，每个作业都可分解子网络、孙网络，无限分解，这一特点为大型、复杂建设工程项目管理的多极网络计划的编制和控制提供了便利；此外，其作业目录不限，同时提供了最多 256 位宽度的作业编码和作业分类码，为建设工程项目的多层次、多角度管理提供了可能，使得用户可以很方便地实现这些编码与工程信息管理系统中其他子系统的编码的直接对接。

（2）资源管理与资源优化。资源分解结构（RBS）可结构化地定义数目无限的资源，包括资源群、技能资源、驱控资源，以及通常资源、消费品、消耗品。拥有资源强度非线性曲线、流动资源计划。

（3）项目管理模板。Open Plan 中的项目管理专家功能提供了几十种基于美国项目管理学会（PMI）专业标准的管理模板，用户可以使用或自定义管理模板，建立 C/SCSC（费用/进度控制系统标准）或 ISO（国际标准化组织）标准，帮助用户自动应用项目标准程序和规程进行工作，例如每月工程状态报告、变更管理报告等。

（4）风险分析。Open Plan 集成了风险分析和模拟工具，可以直接使用进度计划数据计算最早时间、最晚时间和时差的标准差和作业危险程度指标，不需再另行输入数据。

（5）开放的数据库结构。Open Plan 全面支持 OLE2.0，与 Excel 等 Windows 应用软件可简单地拷贝和粘贴；工程数据可保存为通常的数据库；用户还可以修改库结构，增加自己的字段，并定义计算公式。

1.9.3 工程项目管理软件的应用

1.9.3.1 工程项目管理软件应用的必要性

将项目管理软件引入到项目管理过程中，同时也是引入了一种项目管理模式。项目管理是系统工程，在项目管理过程中引入项目管理软件，特别是以项目管理软件为核心的工程信息系统的引入同样也是一个系统工程，是一个人机合一的有层次的系统工程，包括项目各个参与方的领导和项目管理队伍成员理念的转变，项目管理决策和组织管理的转变；项目管理手段的转变。这样一个系统工程的实现过程包括了前期规划、方案设计、设备采购、网络建设、软件选择、应用培训、二次开发等一系列工作。对于这样一个复杂的工程，如果未经周密的规划就仓促实施，必然会影响到最终的使用效果，严重的还会使整个项目的管理处于一种混乱无序的状态之中。

1.9.3.2 工程管理软件应用的步骤

1）确定项目管理软件应用的目标；

2）确定项目管理软件应用的范围；

3）确定项目管理软件应用的需求；

4）项目管理软件的选择；

5）项目管理软件的应用规划；

6）项目管理软件的需求。

1.9.3.3 工程项目管理软件的选择

目前市场上项目管理软件的种类很多，功能各不相同，价格的差异也很大，在实际选择时应根据工程项目管理的具体情况，并兼顾未来的应用来选择项目管理软件。显然，前面所确定的项目管理软件应用的目标和范围是选择项目管理软件所应考虑的重要因素。

项目管理软件的应用，特别是进度管理软件，从应用深度上可以分为几个层次：

1）利用项目管理软件控制项目进度；

2）考虑基本的资源、费用分析的进度计划控制；

3）资源和费用的进度计划管理。

大部分基于进度计划的项目管理软件都可以达到前两个层次要求的管理深度，但如果需要达到资源和费用管理，则需要引入高层次的项目管理软件，或者是对普通的项目管理软件进行二次开发。用户应当根据自身的管理基础、管理水平、应用水平、硬件条件、二次开发的能力和在这方面的投资承受能力以及具体项目的管理目标和管理深度等多方面的因素来确定选择什么样的项目管理软件。

1.9.3.4 工程项目管理软件规划设计的主要内容

（1）确定项目计划的层次和工作包、组织、资源、费用的划分原则。应根据项目管理的需要来划分项目计划的层次。一般来说，不同层次的管理人员需要了解的项目信息的详细程度是不同的，即不同的管理层对应不同级别、不同层次的（网络）计划，在划分时应考虑到项目管理组织的结构和职责的划分情况。

在确立了项目计划的层次后，就可以确定工作包、组织、资源和费用的划分原则。在划分原则时除了考虑项目的具体情况、项目的管理目标和管理深度外，还应兼顾项目其他参与方的管理水平和管理基础，否则只能是一厢情愿。

（2）根据划分原则确定并建立项目管理软件的编码系统。一个项目必须有一套统一的信息编码系统，统一的编码系统一方面是建设工程项目各个参与方进行交流的基础，另一方面也是各方对项目的不同理解的统一，是各方的项目管理思想和具体管理方式的一种体现。典型的项目管理软件的编码系统包括工作分解结构、组织分解结构、资源分解结构、费用分解结构和其他代码结构。目前，比较先进的、面向大型复杂项目的项目管理软件可实现上述大部分，甚至全部编码结构。

（3）建立项目管理软件应用的管理办法和相关细则。如果确定在工程项目中采用项目管理软件，则应在实施前建立项目管理软件应用的管理办法和相关细则，同时要在建设工程项目招标文件和合同中体现这些办法和细则，还应有相应的制约规定。

1.10 注册电气工程师的权利和义务

1.10.1 注册电气工程师的权利

（1）注册电气工程师有权以注册电气工程师的名义从事规定的专业活动。

（2）在电气专业工程设计、咨询及相关业务工作中形成的主要技术文件，应当由注册电气工程师签字盖章后生效。

（3）在任何单位和个人修改注册电气工程师签字盖章的技术文件，须征得该注册电气工程师同意；因特殊情况不能征得其同意的，可由其他注册电气工程师签字盖章并承担相应责

任。

1.10.2 注册电气工程师的义务

(1) 遵守法律、法规和职业道德，维护社会公众利益；

(2) 保证执业工作的质量，并在其负责的技术文件上签字盖章；

(3) 保守在执业中知悉的商业技术秘密；

(4) 不得同时受聘于两个及以上单位执业；

(5) 不得准许他人以本人名义执业。

1.11 我国工程勘察设计行业的职业道德基本要求

(1) 认真学习和实践“三个代表”，不断提高思想政治和知识文化水平，树立正确的人生观、价值观，勇于攀登高新科技领域，更好地为祖国建设服务。

(2) 遵纪守法，自觉接受和服从管理，做到令行禁止，恪尽职守。

(3) 树立高度责任感，精心勘察、精心设计、精心管理，保证质量，做到万无一失。

(4) 敬业爱岗，无私奉献，一心为公，做好本职工作。

(5) 解放思想，实事求是，敢于创新，热情服务，主动配合，发扬团结协作精神。

(6) 从全局出发，抵制不正之风，恪守市场规则，自觉做到不强行介绍施工单位和制定厂商：不私自收取中介费、好处费；不无故拖延解答工程中碰到的问题；不得违反建设标准规范，不剽窃、抄袭和侵犯他人知识产权。

(7) 加强行为自律、廉洁执业，洁身做人，自觉维护行业和单位的名誉。

2 环 境 保 护

2.1 我国对工程项目的主要环保要求和污染治理的基本措施

（1）环境是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等。

环境保护即保护和改善生活环境与生态环境，防治污染和其他公害。

（2）在国务院、国务院有关主管部门和省、自治区、直辖市人民政府划定的风景名胜区、自然保护区和其他需要特别保护的区域内，不得建设污染环境的工业生产设施；其他设施，其污染物排放不得超过规定的排放标准。已建成的设施，其污染物排放超过规定的排放标准的，限期治理。

（3）开发利用自然资源，必须采取措施保护生态环境。

（4）产生环境污染和其他公害的单位，必须把环境保护工作纳入计划，建立环境保护责任制度；采取有效措施，防治在生产建设或者其他活动中产生的废气、废水、废渣、粉尘、恶臭气体、放射性物质以及噪声、振动、电磁辐射等对环境的污染和危害。

（5）新建工业企业和现有工业企业的技术改造，应当采用资源利用率高、污染物排放量少的设备和工艺，采用经济合理的废弃物综合利用技术和污染物处理技术。

（6）建设产生污染的建设项目，必须遵守污染物排放的国家标准和地方标准；在实施重点污染物排放总量控制的区域内，还必须符合重点污染物排放总量控制的要求。

（7）工业建设项目应当采用能耗物耗小、污染物产生量少的清洁生产工艺，合理利用自然资源，防止环境污染和生态破坏。

（8）改建、扩建项目和技术改造项目必须采取措施治理与该项目有关的原有环境污染和生态破坏。

（9）建设项目中防治污染的设施，必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。

防止污染的设施必须经原审批环境影响报告书的环境保护行政主管部门验收合格后，该建设项目方可投入生产和使用。

防治污染的设施不得擅自拆除或者闲置，确有必要拆除或者闲置的，必须征得所在地的环境保护行政主管部门同意。

（10）排放污染物的企业事业单位，必须依照国务院环境保护行政主管部门的规定申报登记。

（11）排放污染物超过国家或者地方规定的污染物排放标准的企业事业单位，依照国家

规定的缴纳超标准排污费、并负责治理。水污染防治依照中华人民共和国水污染防治法的规定执行。

(12) 对造成环境严重污染的企业事业单位，限期治理。

中央或省、自治区、直辖市直接管辖的企业事业单位的限期治理，由省、自治区、直辖市人民政府决定。

市、县或者市、县以下人民政府管辖的企业事业单位的限期治理，由市、县人民政府决定。

被限期治理的企业事业单位必须如期完成治理任务。

(13) 禁止引进不符合我国环境保护规定的技术和设备。

(14) 因发生事故或者其他突然性事件，造成或者可能污染事故的单位，必须立即采取措施处理，及时通报可能受到污染危害的单位和居民，并向当地环境保护行政主管部门和有关部门报告，接受调查处理。

可能发生重大污染事故的企业事业单位，应当采取措施，加强防范。

(15) 生产、储存、运输、销售、使用有毒化学物品和含有放射性物质的物品，必须遵守国家有关规定，防止污染环境。

(16) 任何单位不得将产生严重污染的生产设备转移给没有污染防治能力的单位使用。

(17) 国家实行建设项目环境影响评价制度。

《建设项目环境保护管理条例》规定："建设项目对环境可能造成重大影响的，应当编制环境影响报告书，对建设项目产生的污染和对环境的影响进行全面、详细的评价。""建设项目对环境可能造成轻度影响的，对建设项目产生的污染和对环境的影响进行分析或者专项评价。""建设项目对环境影响很小，不需要进行环境评价的，应当填报环境影响登记表。"

2.2 我国工程建设中电气设备对环境影响的主要内容

我国工程建设中电气设备对环境影响的主要内容是：电磁污染、无线电干扰、电压高次谐波、电流高次谐波、空气污染、噪音污染、事故及检修对环境的污染、腐蚀污染等。

(1) 电磁污染又称频谱污染或电噪音污染。以电磁场的场力为其特征，与电噪音的性质、功率密度等因素密切相关。

电磁污染源主要有高频感应加热设备、高频介质加热设备、短波超短波理疗设备、无线电广播通讯、微波加热与发射设备等。

电磁污染源主要有如下危害。

1) 电磁辐射由于高电平电磁感应和辐射可以引起易爆物质和电爆兵器控制失灵，发生意外爆炸。

2) 电磁辐射由于高电平电磁感应和辐射可以引发挥发性液体或气体爆炸性介质发生意外燃烧或爆炸。

3) 大功率微波和射频设备泄漏出来的电波向空间辐射，形成的空间电波噪音可以干扰位于所在范围内的各种电子设备的正常工作。

4) 电磁辐射危害人体健康。微波对人体健康危害最大，中长波最小。产生的生物效应其机理是把吸收的射频能转换为热能，形成因过热而引起的损伤。若长期生活在电磁污染的环境中，由于磁场的改变，人会出现乏力，记忆力减退为主的神经衰弱症侯群和心悸、心前区疼痛、胸闷、易激动和月经紊乱等症状。

电磁辐射污染的防护采用电磁屏蔽使有害的电磁强度减小至容许的范围内及合理布局使电磁污染源远离居民区，改进电气设备减小电磁辐射污染，采用吸收电磁辐射污染的材料和装置，采用遥控遥测遥信的三遥技术使操作人员远离电磁辐射污染源等综合性防护措施。

（2）电压高次谐波、电流高次谐波污染指变流装置及其他非线性用电设备产生的高次谐波电流注入电网，使电网电压正弦波形发生畸变，电能质量下降，使发变电和用电设备效率降低，加速电力电缆绝缘老化而使其被击穿，影响继电保护自动装置动作的准确性，对通信线路和控制信号造成电磁及射频干扰等，威胁电网和其他用户电气设备的安全经济运行。

谐波源指与电网连接并输入两倍于50Hz及以上频率电流的设备。

电压高次谐波、电流高次谐波污染的防护。

1）谐波超过SD 126—1984《电力系统谐波管理暂行规定》规定的电压正弦波形发生畸变率极限值时，应查明谐波源并采取措施，把电压正弦波形发生畸变率限制在极限值以内。

2）用户的非线性用电设备接入电网会增加或改变电网的谐波电流值及其分布，特别是会使与电网连接点的谐波电压、电流升高，用户必须采取措施，把谐波电流限制在允许的范围内，方能接入电网运行。

3）进口设备和技术合作项目必须满足SD 126—84的要求。

4）谐波对通信等的影响按国内有关规定执行。

5）抑制谐波可在谐波源处装设抑制谐波的无源型交流滤波器。

谐波有关的国家标准如下：

GB/T 14549—1993　电能质量　公用电网谐波

GB 17625.1—1998　低压电气及电子设备发出的谐波电流限值

（设备每相输入电流≥16A）

（3）空气污染、噪音污染、事故及检修对环境的污染、腐蚀污染等内容的防治执行《中华人民共和国水污染防治法》、《中华人民共和国大气污染防治法》、《中华人民共和国固体废物污染防治法》、《中华人民共和国噪声污染防治法》。

2.3　我国工程项目环境影响评价的基本概念和环境评价审批的基本要求（熟悉）

2.3.1　环境影响评价基本概念

环境影响评价是指对拟议中的工程项目的重要决策和开发建设活动，可能对环境产生的物理性、化学性或生物性的作用及其造成的环境的变化和对人类健康和福利的可能影响，进行系统的分析和评估，明确建设者的环境责任，并提出减少这些影响的对策措施及应采取的行动，为建设项目的工程设计提出环保要求和建议，为环境管理部门提供对建设项目实施有效管理的科学依据。

（1）我国环境影响评价是由法律、行政法规、部门行政规章和地方法规几个层次组成。法律有：《中华人民共和国环境法》、《中华人民共和国海洋环境保护法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《中华人民共和国大气污染防治法》、《中华人民共和国固体废物污染防治法》、《中华人民共和国噪声污染防治法》。行政法规有：《建设项目环境保护管理条例》。部门行政规章有：国家环境保护总局、国务院有关部委关于环境影响评价的规定。地方法规：各省、自治区、直辖市有关建设项目环境保护管理的条例、办法、政府令等。

（2）环境影响评价一般分为环境质量评价（主要是环境现状质量评价）、环境影响预测

与评价以及环境影响后评估。

(3) 环境质量评价是依据国家和地方制定的环境质量标准，用调查、监测和分析的方法，对区域环境质量进行定量判断，并说明其与人体健康、生态系统的相关关系。环境质量评价按照时间域分为环境质量回顾评价（过去的环境质量评价）、环境质量现状评价及环境质量预测评价。环境质量评价按照空间域分，建设项目的环境质量评价主要是环境现状质量评价。

(4) 建设项目的环境影响评价工作，由取得相应资格证书的单位承担。

2.3.2 环境影响评价工作程序

环境影响评价工作程序大体分为三个阶段。第一阶段为准备阶段，主要工作为研究有关文件，进行初步的工程分析和环境现状调查，筛选重点评价项目，确定各项环境影响评价的工作等级，编制评价大纲；第二阶段为正式工作阶段，其主要工作为进一步做工程分析和环境现状调查，并进行环境影响预测和评价环境影响；第三阶段为环境影响评价报告书编制阶段，其主要工作为汇总、分析第二阶段工作所得到的各种资料、数据，得出结论，完成环境影响评价报告书的编制。

(1) 环境影响评价的工作等级指需要编制环境影响评价及各专题其工作深度的划分，环境影响评价的工作等级划分为三个工作等级。一级评价最详细，二级次之，三级较简略。工作等级的划分依据如下：

1) 建设项目的工程特点（工程性质、工程规模、能源及资源的使用量及类型、源项等）；

2) 项目的所在地区的环境特征（自然环境特点、环境敏感程度、环境质量现状及社会经济状况等）；

3) 国家或地方政府所颁布的有关法规（包括环境质量标准和污染物排放标准）。

(2) 环境影响评价大纲一般包括以下内容。

1) 总则（包括评价任务的由来，编制依据，控制污染和保护环境的目标，采用的评价标准，评价项目及其工作等级和重点等）；

2) 建设项目概况；

3) 拟建设项目地区环境简况；

4) 建设项目工程分析的内容与方法；

5) 环境现状调查（根据已确定的各评价项目工作等级、环境特点和影响预测的需要，尽量详细说明调查参数、调查范围及调查的方法、时期、地点、次数等）；

6) 环境影响预测与评价建设项目的环境影响（包括预测方法、内容、范围、时段及有关参数的估值方法，对于环境影响综合评价，应说明拟采用的评价方法；

7) 评价工作成果清单，拟提出的结论和建议的内容；

8) 评价工作组织、计划安排；

9) 经费概算。

(3) 建设项目环境影响报告书，应当包括下列内容：

1) 建设项目概况；

2) 建设项目周围环境现状；

3) 建设项目对环境可能造成影响的分析和预测；

4) 环境保护措施及其经济、技术论证；

5）环境影响经济效益分析；

6）对建设项目实施环境监测的建议；

7）环境影响评价结论。

（4）环境影响评价报告书的编写要满足以下基本要求。

1）环境影响评价报告书总体编排结构应符合《建设项目环境保护管理条例》要求，内容全面，重点突出，实用性强；

2）基础数据可靠，对不同来源的同一参数数据出现不同时应进行核实；

3）预测模式及参数选择合理，选择总结参数时的环境条件和评价条件相近（相同）的参数；

4）结论观点明确，客观可信，结论必须以报告书中客观的论证为依据，不能带感情色彩；

5）语句通顺、条理清楚、文字简练、篇幅不宜过长；

6）环境影响评价报告书中应有评价资格证书，报告书的署名，报告书编制人员按行政总负责人、技术总负责人、技术审核人、项目总负责人，依次署名盖章，报告编写人署名。

2.3.3 环境影响评价审批

环境影响评价报告书的审批程序：一律由建设单位负责提出，报主管部门预审，主管部门提出预审批意见后转报负责审批的环境保护部门审批。

（1）当建设项目的性质、规模、建设等发生较大改变时，按照规定的审批程序重新报批。

（2）对于环境问题有争议的建设项目其环境影响评价报告书（表），可提交上一级环境保护部门审批。

（3）环境影响评价报告书的审批应贯彻下述原则。

1）审查该项目是否符合国家产业政策；

2）审查该项目是否符合城市环境功能区划和城市总体发展规划，做到合理布局；

3）审查该项目的技术与装备政策是否符合清洁生产；

4）审查该项目是否做到污染物达标排放；

5）审查该项目是否满足国家和地方规定的污染物总量控制指标；

6）审查该项目建成后是否能维持地区环境质量，符合功能区要求。

3 安　全

3.1 我国工程勘察设计中必须执行人身安全的法律、法规、建设标准中的强制性条文

3.1.1 人身安全的有关法律、法规

3.1.1.1 《中华人民共和国建筑法》（人代会常委会28次会议通过）：

第三条 建筑活动应当确保建筑工程质量和安全，符合国家的建筑工程安全标准。

第三十六条 建筑工程安全生产管理必须坚持安全第一、预防为主的方针，建立健全安全生产的责任制度和群防群治制度。

第三十八条 建筑施工企业在编制施工组织设计时，应当根据建筑工程的特点，制定相应的安全技术措施；对专业性较强的工程项目，应当编制专项安全施工组织设计，并采取安全技术措施。

第四十三条 建设行政主管部门负责建筑安全生产的管理，并依法接受劳动行政主管部门对建筑安全生产的指导和监督。

第四十四条 建筑施工企业的法定代表人对本企业的安全生产负责。

第四十五条 施工现场安全由建筑施工企业负责。实行施工总承包的，由总承包单位负责，分包单位向总承包单位负责，服从总承包单位对施工现场的安全生产管理。

第四十六条 建筑施工企业应当健全劳动安全生产教育培训制度，加强对职工安全生产的教育培训，未经安全生产教育培训的人员，不得上岗作业。

第四十七条 作业人员对危及生命安全和人身健康的行为有权提出批评、检举和控告。

3.1.1.2 《建设工程质量管理条例》附刑法有关条款（国务院279号令）

第一百三十七条 建设单位、设计单位、施工单位、工程监理单位、违反国家规定，降低工程质量标准，造成重大安全事故的，对直接责任人员处五年以下有期徒刑或者拘役，并处罚金；后果特别严重的，处五年以上十年以下有期徒刑，并处罚金。

3.1.1.3 《实施工程建设强制性标准监督规定》（建设部81号令）

第十条 强制性标准监督检查的主要内容：

（四）工程项目的安全、质量是否符合强制性标准的规定。

3.1.2 人身安全建设标准中的强制性条文（部分内容）

3.1.2.1 《低压配电设计规范》GB50054—1995

4.4.4条 采用接地故障保护时，在建筑物内应将下列导电体作总等电位联结。（略）

4.4.7条 相线对地电压为220V的TN系统，配电线路的接地故障保护，其切断故障回路的时间应符合下列规定：配电线路、固定设备不大于5s；手握式、移动设备，不大于0.4s。

3.1.2.2 《10kV 及以下变电所设计规范》 GB50053—1994

4.2.1 条 室内、外配电装置的最小电气安全净距，应符合规定。（略）

4.2.6 条 配电装置的长度大于 6m 时，其柜通道应设两个出口。低压配电装置两个出口间的距离超过 15m 时，尚应增加出口。

3.1.2.3 《高层民用建筑设计防火规范》GB50045—1995

6.1.16 条 高层建筑的公共疏散门均应向疏散方向开启，且不应采用侧控门、吊门和转门（电气设计专业应注意疏散指示灯的安装位置）。

3.2 我国工程勘察设计中电气安全保护的概念和要求

3.2.1 安全防护的基本原则

（1）电击防护。

1）直接接触防护：指正常工作时，对于人和家畜在接触电器装置的带电部分时，可能发生危险的应有防护，防止人体电流通过或限制通过人体的电流。

2）间接接触防护：指故障情况下的电击防护，故障情况下接触外露可导电部分时可能发生危险的防护。防止故障电流从人体通过，限制通过人体的故障电流，使其低于电击电流。

（2）热效应防护。电气布置做到不会发生由于高温或电弧而引燃易燃物的危险。另外，对人、畜不应有灼伤的危险。

（3）过电流保护（过负荷保护）。在带电体中出现由任何过电流引起的高温或机电应力时，应保护人、畜、财产不受伤害和损失。在电流达到危险值之前自动切断，使电流在持续时间内限制在安全值之内。

（4）故障电流保护（短路或其他故障）。

预计承受故障电流的导体（带电导体除外）和其他物件，应能承载故障电流，不致达到过高温度。

（5）过电压保护。在供电电压不同的电路的带电部分之间发生故障时，应保护人、畜、财产不受有害的影响。对其他原因，如大气过电压或操作过电压，应同样保护不受伤害。

3.2.2 电击防护基本准则

电气安全是指防止电流经由人体任何部位通过；限制可能流经人体的电流，使之小于电击电流；在故障情况下触及外露可导电部分时，可能引起流经人体的电流大于电击电流时，能在规定的时间内自动断开电源；发生短路或过负载时，过热或电弧引起可燃物燃烧或使人遭受灼伤时，能在规定的时间内自动断开电源。

在下列两种情况下，易触及的可导电部分均应是无危险：

（1）在正常情况（正常操作和无故障情况）下。正常情况需要有基本电击防护，可由一种防护措施来提供。其防护措施有：

1）基本绝缘；

2）限制稳态接触电流；

3）限制电压；

4）外护物。

（2）在事故情况下。如果出现以下情况之一，就需要考虑是某种故障：

1）正常情况下不带电的易触及的可导电部分变为危险的带电部分（加到外露可导电部

分基本绝缘失效）；

2）易触及的无危险的带电部分变为危险的带电部分（稳态接触电流的限制失效）；

3）正常不易触及的危险的带电部分变为易触及带电部分（外壳机械性损坏）。

故障情况需要有基本防护和附加防护，其防护措施有：

1）两个独立的防护措施。使用基本绝缘和附加绝缘，即双重绝缘，是两个独立的防护措施应用之一。

2）一个加强的防护措施。采用加强绝缘或安装保护阻抗器是一个加强的防护措施的具体应用。

3.2.3 电击防护基本措施

3.2.3.1 自动切断供电的防护

1）基本防护由危险的带电部分与外露可导电部分之间的基本绝缘提供；

2）附加防护由在基本防护失效可能对人体产生有害的生理效应危险时的自动切断供电提供。

自动切断供电通过下述方法实现：

1）为故障电流提供一个包括装置中的保护导体和设备的保护连接成的返回通路；

2）在装置中或在考虑了装置特性的设备中提供一个可切断供电的保护电器。

3.2.3.2 使用Ⅱ类设备或等效绝缘的防护

（1）基本防护由在危险的带电部分与易触及部分（易触及的可导电部分和易触及的绝缘材料表面）之间的基本绝缘提供；

（2）附加保护由基本绝缘之外的附加绝缘提供；

（3）基本防护和附加防护由下述方法提供：

1）在危险的带电部分与易触及部分（易触及的可导电部分和易触及的绝缘材料表面）之间的加强绝缘；

2）通过结构配置提供等效的防护。

3.2.3.3 SELV 防护

（1）基本防护由以下措施提供：

1）将电路（SELV 电路）的电压限制在无危险水平；

2）将 SELV 电路与除 SELV 电路以外的所有电路隔离。

（2）附加防护由以下措施提供：

1）将 SELV 电路与除 SELV 电路以外的所有电路之间作保护隔离；

2）将 SELV 电路与大地之间作基本隔离。

不允许有意将外露可导电部分连接到保护导体或接地导体上。

3.2.3.4 PELV 防护

（1）基本防护由以下措施提供：

1）将接地电路（PELV 电路）的电压限制在无危险水平；

2）将 PELV 电路与除本系统以外的所有电路隔离。

（2）附加防护由在 PELV 电路与除本系统以外的所有电路之间的保护隔离提供：

3.2.3.5 限制稳态电流和电荷的防护

（1）基本防护由限流电源电路供电提供；

（2）附加防护由在危险的带电部分与限流电源电路之间的保护隔离提供。

3.2.3.6 非导电场所的防护

(1) 基本防护由在危险的带电部分与外露可导电部分之间的基本绝缘提供;

(2) 附加防护由工作场所的绝缘地面和墙壁提供。

3.2.3.7 电气隔离防护

(1) 基本防护由在危险的带电部分与外露可导电部分之间的基本绝缘提供;

(2) 附加防护由下述措施提供:

1) 该电路与其他电路的保护隔离;

2) 该电路与大地间的基本隔离。

3.2.3.8 不接地的局部等电位联结防护

(1) 基本防护由在危险的带电部分与外露可导电部分之间的基本绝缘提供。

(2) 附加防护由下述措施提供:

1) 设备内作保护联结;

2) 装置中所有外露可导电部分和装置外可导电部分均不接地,而是用不接地的局部等电位联结导体相互连接。

3.2.4 用电安全的基本要求

(1) 用电单位应制订安全规程及岗位责任制,对人员进行安全教育和培训,掌握基本知识和急救知识。

(2) 电气装置使用前,确认安全认证,并检验合格。使用时要符合环境要求和使用等级要求。详细阅读说明书,及对出现的问题应采取的相应处理措施。

(3) 掌握电气装置的技术情况,如额定容量、保护方式、保护整定值。不得更改电气线路、保护值和元件。不允许超负荷和带故障使用。

(4) 用电设备要有良好的工作环境;安全通道、工作空间周围不堆放易燃、易爆和腐蚀性物品。

(5) 线路选择正确无误,如导电能力、绝缘强度、机械强度及外皮颜色等。

(6) 儿童活动场所。不使用低位置插座,浴室、游泳池等场所应使用专用插座,否则应采取防护措施。拔插座不得拉导线。

(7) 临时用电要经过主管部门批准,并限期使用和拆除。用电设备停止使用时,要切断电源。设备运行保护器动作时,要查明原因后再恢复使用。

(8) 禁止设置电网。露天使用设备时,应有相应保护措施。

(9) 禁止利用大地做工作中性线,不得利用暖气管、煤气管、水管做保护地线。

(10) 发生人身触电事故时或电气火灾时,要立即切断电源。

3.3 电流对人体的效应及电击防护的基本要求

3.3.1 电流流过人体的效应——常用部分

3.3.1.1 15~100Hz 正弦交流电流的效应

(1) 反应阈的通用值为 0.5mA。

(2) 摆脱阈的平均值为 10mA。

(3) 心室纤维性颤动阈。持续时间不到 0.1s、500mA 以上电流就可能引起纤维性颤动。如持续时间长、电流大,则会导致心脏停跳和电击死亡。

(4) 电流的其他效应。窒息,心跳停止;肌肉收缩,呼吸困难,血压升高;心房纤维性

颤动，心脏停博等。

时间/电流区域说明。把电流通过人体的效应，以时间、电流为坐标，划分为四个区域（见图 3－1）：即无反应区 AC－1；无有害的生理效应区 AC－2；不会发生器质性损伤区 AC－3；电流量、时间增加，出现危险的病理、生理效应，死亡危险区 AC－4。

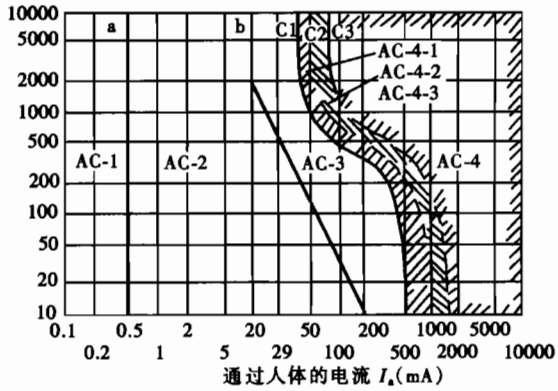


图 3－1　15～100Hz 正弦交流电的时间/电流效应区域的划分

人体不同电流通路的心室纤维性颤动电流 I_h 计算公式如下：

$$I_h = I_{ref}/F \qquad (3-1)$$

式中　I_{ref}——左手到双脚心室纤维性颤动电流；

I_h——某一通路的心室纤维性颤动电流；

F——某一通路相应的心脏电流系数，见表 3－1。

表 3－1　　不同电流通路的心脏电流系数

电流通路	心脏电流系数 F	电流通路	心脏电流系数 F
左手到左脚、右脚或两脚	1.0	后背到左手	0.7
两手到两脚	1.0	胸部到右手	1.3
左手到右手	0.4	胸部到左手	1.5
右手到左脚、右脚或两脚	0.8	臀部到左手、右手或双手	0.7
后背到右手	0.3		

3.3.1.2　直流电流的效应

直流电流比交流电易于摆脱。当电击时间大于心博周期时，直流电流的心室纤维性颤动阈比交流电流高的多。要产生相同的刺激效应，恒定的直流电流强度要比交流电流强达 2～4 倍（直流电危害小）。

（1）反应阈约为 2mA。

（2）摆脱阈。直流电流没有确定的摆脱阈，只有在直流接通、断开时疼痛。

（3）心室纤维性颤动阈。与交流电相同，由生理参数、电气参数等决定（有相同区域划分曲线）。

3.3.1.3　人体的电阻抗

人体阻抗值由电流通路、接触电压、通电时间、频率、皮肤温度、接触面积、施加压力和温度等因素决定。

大接触面积人体总阻抗 Z_T，在大面积（50～100cm^2）、干燥状况、交流 220V 时，95％的人的 Z_T 为 2125Ω。

3.3.2　电流流过人体的效应——特殊情况

现代电气设备，越来越多地用到频率高于 50/60Hz 交流电。如飞机（400Hz）、电焊（450Hz）、电疗（4000～5000Hz）等等。其规律是：人体皮肤阻抗对几十伏的接触电压，是与频率成反比地降低，即频率高—皮肤阻抗低—通过人体电流大。

3.3.3　电击防护的基本要求

3.3.3.1　直接接触防护

按不同情况，可采用下列几种防护方式。

1）将带电体进行绝缘保护。防止与带电部分有任何接触，应遵守国家的绝缘标准。绝缘覆盖层应只有采取破坏性手段才能除去。

2）用遮拦和外护物防护。防护物孔洞大小应遵照有关要求。防护物用工具或切断电源才可打开。

3）用阻挡物保护。这可防止无意触及带电部分，但不能防止绕过阻挡物有意触及带电部分。阻挡物必须固定，可以不用钥匙或工具拆除。

4）置于伸臂范围以外的防护。能同时触及不同电位的两部分间的距离，严禁在伸臂范围之内。计算伸臂范围时，要将手持大尺寸导电工具考虑在内。如向上为距站立面 2.5m，水平为 1.25m，前、后侧面 1.25m。

5）利用剩余电流动作保护器（漏电电流保护器）做为附加保护。

3.3.3.2 间接接触保护

间接接触保护可采用以下几种方式。

1）自动切断电源的保护（包括漏电电流动作保护），并辅以总等电位联结；

2）用Ⅱ类设备或与其等效的绝缘防护；

3）采用电气隔离措施；

4）采用安全超低电压；

5）局部等电位联结。

3.3.3.3 防间接触电

根据电气设备防电击的不同要求，设备防电击类别分为四类：

0 类设备：它有机械强度高的金属外壳，其只靠一层基本绝缘来防电击，不接 PE 线，如电扇、台灯。

Ⅰ类设备：它具有金属外壳，除靠一层基本绝缘外，还有补充措施，可经 PE 线接地。如洗衣机、电洗澡器。

Ⅱ类设备：除一层基本绝缘外，还加第二层绝缘，以形成双重绝缘，如目前带塑料外壳的电视机。

Ⅲ类设备：这类设备防间接触电的措施是降低设备的工作电压。额定电压规定为不大于 50V，对人体接触不致造成伤害。在工程设计中常用一次为 380V、220V 的隔离变压器供电。

3.4 低压系统接地故障的保护设计和等电位联结的有关规定

3.4.1 接地故障保护一般规定

3.4.1.1 接地故障是指因绝缘损坏致使相线与 PE 线、电气装置外露导电部分、装置外导电部分或大地间的短路。

3.4.1.2 接地故障保护的设置应能防止人身间接电击以及电气火灾、线路损坏等事故，除正确地选用和整定配电线路的保护电器，使其可靠地切断故障线路外，还应正确地协调和配合下列因素：

（1）配电系统的接地型式（后文介绍）；

（2）电气设备防触电等级，使用特点（移动式、手握式或固定式）；

（3）电气回路中保护线的截面，见表 3－2；

（4）环境影响。

表 3－2　　保护线截面的选择　　单位：mm^2

截面 S	接地线保护线	截面 S	接地线保护线	截面 S	接地线保护线
$S \leqslant 16$	S	$16 < S \leqslant 35$	16	$S > 35$	$S/2$

3.4.2　接地故障保护

3.4.2.1　正常环境中用自动开关切断故障电路的接地故障保护的要求

（1）为防止电击，要求当接触电压超过 50V 时，应在规定时间内切断电路。

（2）接地和总等电位联结是降低建筑物电气装置接触电压的基本措施。总等电位联结的作用在于使各导电部分及地面的电位趋于接近，从而降低接触电压。还可消除和降低外部窜入的危险电压。

根据《低压配电设计规范》GB50054—1995 第 4.4.4 条规定，采用接地故障保护时，在建筑物内应将下列各导电体作总等电位联结。

1）PE、PEN 干线；

2）电气装置接地极的接地干线；

3）建筑物内的水管、煤气管、采暖和空调管道等金属管道。

4）条件许可的建筑物金属构件等导电体。

上述导电体宜在进入建筑物处接向总等电位联结，等电位联结中金属管道连接处应可靠地连通导电（端子测试方法）。

（3）局部等电位联结。做总等电位联结后，在发生接地故障时，其接地故障保护不能满足接触电压值和切断故障电流时间要求时，应在局部范围内做局部等电位联结或辅助等电位联结。

辅助等电位联结和局部等电位联结的定义如下：

辅助等电位联结 SEB：在导电部分间，用导线直接连通，使其电位相等或接近，称辅助等电位联结。

局部等电位联结 LEB：在局部范围内将各导电部分连通，称局部等电位联结。

根据《民用建筑设计规范》JGJ/T 16—1992 第 14.8.2 条规定，装有澡盆和淋浴盆的场所，除采取总等电位联结外，尚应进行辅助等电位联结。

3.4.2.2　接地系统分类

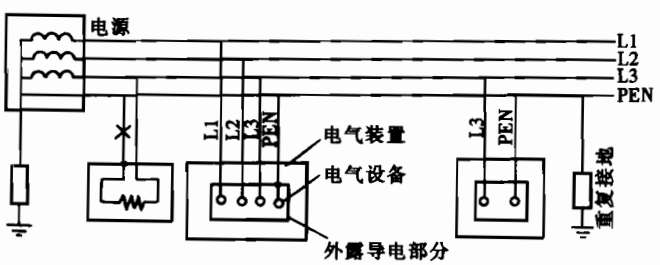
（1）TN 系统，包括 TN－C、TN－S、TN－C－S 系统。

（2）TT 系统。

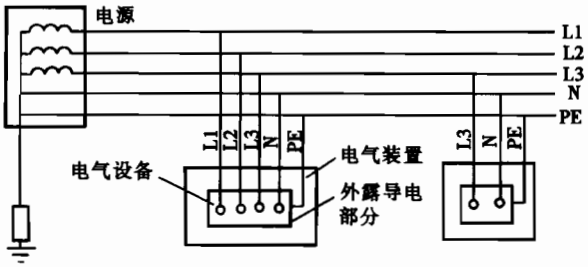
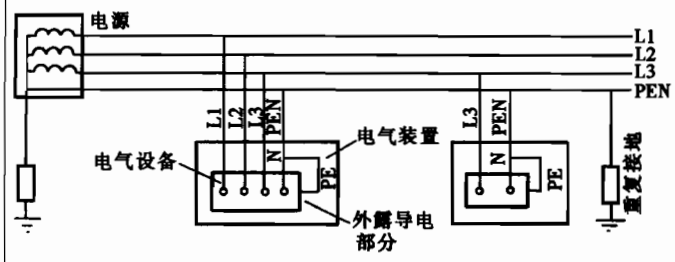
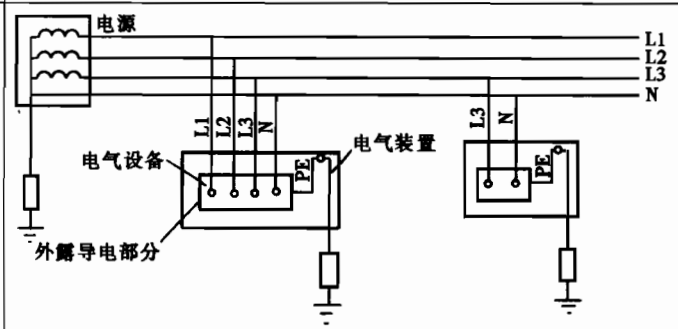
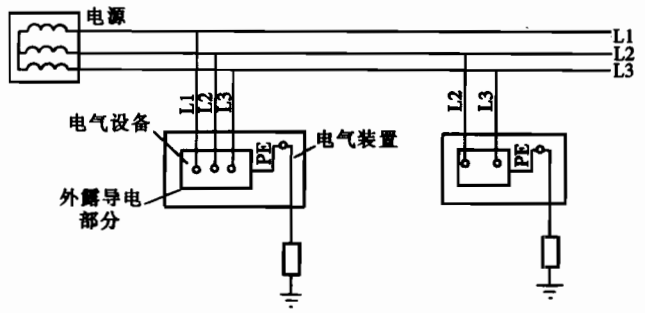
（3）IT 系统。

各类接地系统的接线及特点见表 3－3。

表 3－3　　各类接地系统的接线及特点

接地系统类型	接地保护接线	特　点
TN－C 系统		早期由前苏联引进，三相四线可节省一根导线 存在以下不安全因素： （1）PEN 线中断时，外壳带 220V 电 （2）此系统不能使用 RCD 保护 （3）不能使用四极开关，不能断中性线 （4）中性线有电流，外壳有电位，存在不安全因素

续表

接地系统类型	接地保护接线	特　点
TN－S系统		TN－S系统PE线和N线分开，PE线不通过电流，无电位，外露导电部分不带电位，安装施工比TN－C系统要多敷一根导线
TN－C－S系统		电源到户之前节省了PE线，电源进线后PE线、N线分开，系统安全水平与TN－S相同
TT系统		TT系统各电气装置有自己接地，外露导电部分为地电位。 接地故障时，故障回路阻抗较大，电流小，不用过电流保护，必须用RCD切断电源
IT系统		IT系统发生接地故障时，没有故障电流返回电源通路，故障电流为电容电流，非常小，对地电压低，不引发事故 发生接地故障时，不切电源，可继续供电。 没有220V电源，不能供照明，使用受限制

3.4.2.3　TN系统的接地故障保护

（1）保护电器切断电源条件如下：

$$I_k \geqslant I_{op}$$

$$I_k = \frac{U_{ph}}{Z_s}$$

则 $$\frac{U_{ph}}{Z_s} \geqslant I_{op}$$

即 $$Z_s I_{op} \leqslant U_{ph} \qquad (3-2)$$

以上式中 I_k——故障电流，A；

I_{op}——保护电器动作电流，A；

U_{ph}——相电压，交流为220V；

Z_s——故障回路阻抗，Ω。

由式（3-2）可见，为减小阻抗 Z_s，应增大地线（PE线）截面，或采用等电位联结的方法。从而增大故障电流，使保护动作。

（2）TN系统允许最大切断接地故障时间。配电线路或给固定式电气设备供电的线路不大于5s。供电给手握式或移动式电气设备供电的线路不大于0.4s。

（3）TN系统采用熔断器作接地故障保护允许最小 I_{op}/I_n，即熔断动作电流与熔体额定电流之比见表3-4。由表3-4可见，5s之内切断故障，则熔断动作电流应为熔体额定电流的5倍以上；0.4s之内切断故障，则应为8倍以上。

当配电线路较长，故障电流小，过电流保护不动作或时间超过5s或0.4s时，可以放大线路截面以缩短动作时间或以做局部等电位联结代替。

表3-4　　TN系统用熔断器作接地故障保护时的允许最小 I_{op}/I_n 值

熔体额定电流 I_n（A）	4~10	16~32	40~63	80~200	250~500
切断故障电路时间≤5s	4.5	5	5	6	7
切断故障电路时间≤0.4s	8	9	10	11	—

3.4.2.4 TT系统接地保护的要求：

（1）配电线路接地故障保护要求为

$$I_{op} R_A \leqslant 50V$$

式中 I_{op}——保护电器动作电流，A；

R_A——接地电阻和PE线电阻，Ω。

与TN系统比较，TT系统故障电路阻抗大，故障电流小，故障电流不宜准确计算，过电流保护难以满足要求，一般推荐采用漏电保护器作接地保护。

（2）TT系统允许最大切断接地故障时间。固定设备5s，手推、移动设备允许最大时间可查表得到。

3.4.2.5 IT系统接地故障保护要求

IT系统在电源侧不做系统接地，如图3-2所示。当系统内发生第一次接地故障时，故障电流没有直接返回电源的通路。只能通过另外两个非故障相导体对地的电容返回电源，其值甚小，不引发电气危险，不需切断电源，可维持供电的不间断。只在发生第二次接地故障时才切断电源。切断电源方式按TN系统或TT系统方式切断。

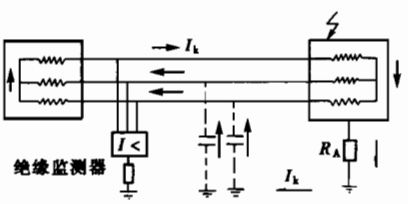


图3-2　IT系统接地故障保护

第一次接地故障情况下，一般都作用于信号。这时应在尽量短的时间内排除第一次接地

故障以维持供电的不间断。在 IT 系统中一般装设绝缘监测器来检测接地故障，监测器可发出声、光信号或切断电源。

IT 系统采用下列电击防护电器。

(1) 绝缘监测器。它装在回路相线与地之间，用以监测第一次接地故障。当电气装置的绝缘水平降至整定值以下时发出信号。

(2) 过电流防护电器。用以发生第二次接地故障时，按 TN 系统切断电源。

(3) RCD。用以发生第二次接地故障时，按 TT、TN 切断电源。

IEC 标准建议三相 IT 系统只配出三根相线，而不配出中性线。如果配出中性线，当中性线损坏接地，绝缘监测器对此故障不能作出反应。

IT 系统供电优、缺点：IT 系统一相接地后，另二相对地电压将升高为线电压 380V，此时接触电压也升高到 380V，增加了电击致死的危险。

尽管存在缺点，但它仍在不少电气装置中应用，具有不可替代的优点。如供电中断故障大部分是接地故障，而 IT 系统一次接地故障时不必切断电源，因此在一些对供电要求不间断电气装置中得到广泛应用。我国在医疗场所，矿井等处多采用此接线，国外应用更广。

3.4.2.6 漏电保护器 RCD 的使用

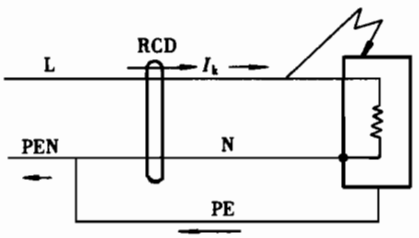


图 3－3 TN－C 系统漏电保护器不动作原理示意图

在 TN－C 系统，PEN 线穿过 RCD 电流互感器发生接地故障时，相线和 PEN 线故障电流在电流互感器中的感应磁场互相抵消，RCD 检测不出故障电流，不能动作，见图 3－3。

因此在 TN－C 系统有 PEN 线的回路内，RCD 不动作。如需装用 RCD，必须在 RCD 的电源侧将 PE 线自 PEN 线引出接设备外壳，使 RCD 有效动作，否则必须采用 TN－C－S 系统。

TN－S 系统中性线和相线一起穿过 RCD 的零序电流互感器，当发生接地故障时，电流互感器中感应磁场发生变化，RCD 检测出故障电流而动作。

《低压配电设计规范》GB50054—1995 第 4.5.6 条要求，在 TT 或 TN－S 系统中，N 线上不宜装设电器将 N 线断开，当需要断开 N 线时，应装设相线和 N 线一起断的保护电器。

3.4.2.7 TN 系统选用隔离变压器防间接触电

隔离变压器是绕组间或绕组与地间具有高度绝缘水平或绕组间具有接地的屏蔽层的变压器，变比为 1:1。隔离变压器防间接触电的原理示意图见图 3－4。

图 3－4 中，设备 B 经隔离变压器供电，变压器二次回路带电导体是不接地的，且 B 的外壳也不与 PE 线连接（即不接地），从而没有了故障电压传导至 B 外壳的途径，防止了电击事故发生。

利用隔离变压器，还可防范本回路接地故障引起的间接接触电击。接地故障时，故障电流 I_k 没有返回电源通路，只有通过极大容抗返回电源，故障电流 I_k 和接触电压 U_t 极小，不足引起电击。如果隔离变压器供电线路过

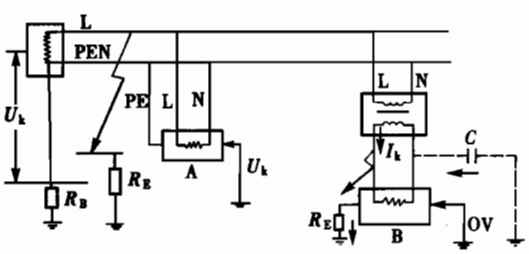


图 3－4 隔离变压器防间接触电的原理示意图

长，电容电流加大，电压有可能达到危险值，一般供电线路长度要≤500m。

隔离变压器供电应用较广泛，它适用于功率小的设备。最好一台隔离变压器供一台设备，也可采用一台多个二次绕组的隔离变压器，每个绕组接一台设备。此时要做各台设备金属外壳不接地的等电位联结，防止人体同时触及两台故障设备时，故障电压升高的危险。

3.5 对危险环境下电力装置的特殊要求

所谓特殊环境，是指在特别潮湿或浸水的场所、无法做等电位联结的地方、狭窄而多金属导体的作业场所，发生电气事故的危险性较大，称为特殊环境。

3.5.1 浴室的区域划分（《民用建筑设计规范》JGJ/T 16—1992 第 14.8.2.1 条）

按电击的危险程度，浴室内分为以下四个区：

0 区：澡盆或淋浴盆内部。

1 区：围绕澡盆或淋浴盆外边缘的垂直面内，距淋浴头 0.6m 的垂直面内，其高度离地面 2.25m 处。

2 区：1 区至离 1 区 0.6m 的平行垂直面内，高度 2.25m。

3 区：2 区至离 2 区 2.4m 的平行垂直面内，高度 2.25m。

平面、立面浴室内区域划分见图 3－5 和图 3－6。

3.5.2 防电击措施

（1）在 0 区内，只允许用标称电压不超过 12V 的安全超低电压供电，安全电源应设于 3 区以外的地方。

（2）0、1、2 区内严禁装设开关设备及辅助设备。

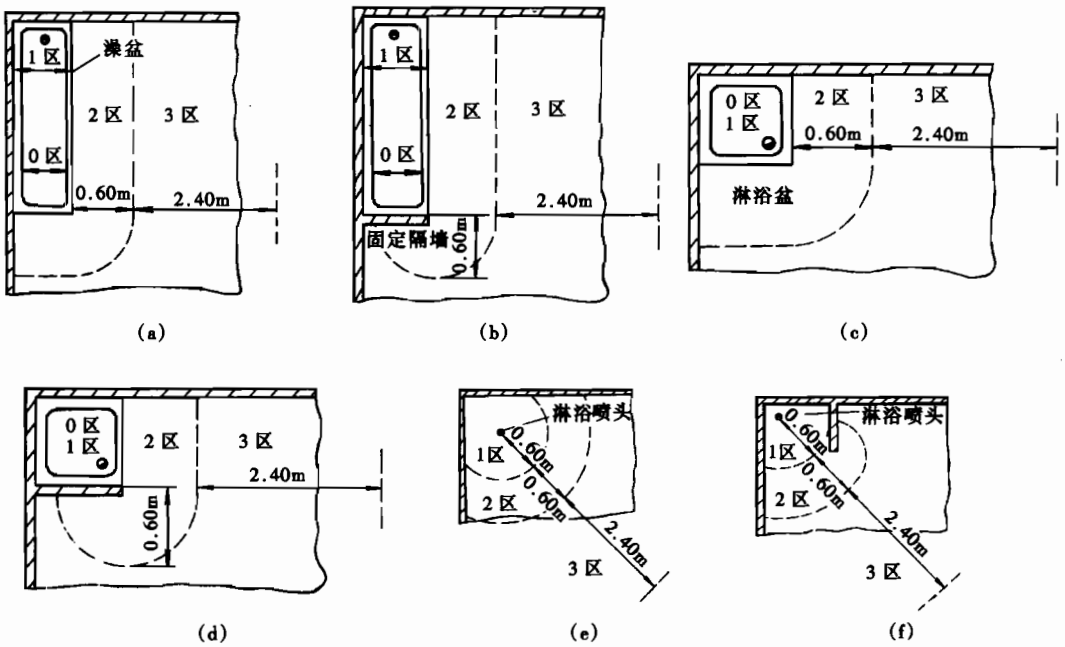


图 3－5 浴室内区域划分（平面）

（a）澡盆；（b）有固定隔墙的澡盆；（c）淋浴盆；

（d）有固定隔墙的淋浴盆；（e）无盆淋浴；（f）有固定隔墙的无盆淋浴

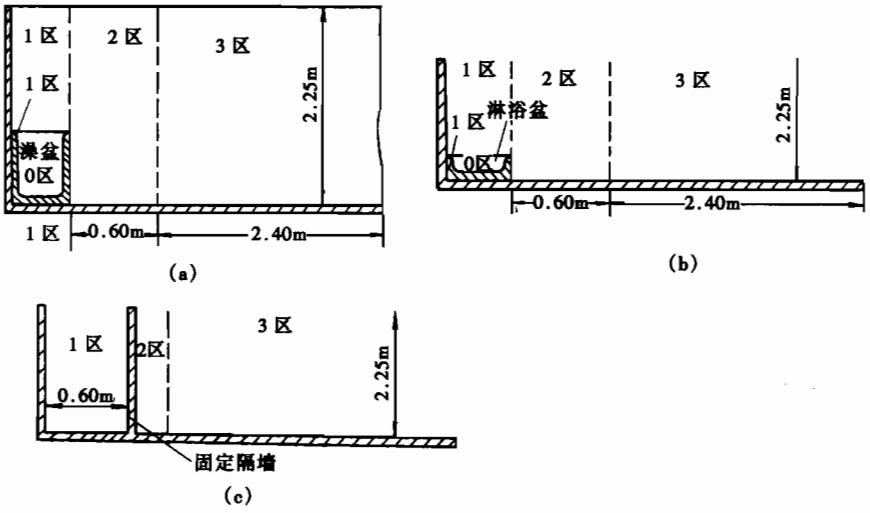


图 3－6　浴室内区域划分（立面）

（a）澡盆；（b）淋浴盆；（c）有固定隔断的无盆淋浴间

（3）建筑物除采用等电位联结外，在 0、1、2 区内还应作局部等电位联结。

（4）在使用安全超低压的地方，不论标称电压如何必须用以下方式提供直接保护。

a. 设置防护等级不低于 IP2X 的遮拦及外护物。

b. 采用承受 500V 试验电压 1min 的绝缘。

（5）不允许采取用阻挡物的直接接触保护措施。

（6）3 区内如安装插座，必须符合以下条件：

a. 由隔离变压器供电；

b. 由安全超低电压供电；

c. 由采取漏电保护措施的供电线路供电，动作电流 30mA。

3.5.3　游泳池电气安装要求

按电击危险程度，游泳池内分为三个区，见图 3－7。保护措施应根据不同区域而定。

设有跳台、跳板、起跳台、滑槽的地方，1 区包括前述部分周围 1.50m 的垂直平面，有人站立面上 2.5m 水平面。

防电击措施与浴室做法基本相同，可做为参考。

3.5.4　桑拿浴室电气安全要求（民规中无此部分内容）

桑拿浴室比一般浴室温度高，因此在电气安全上增加耐高温要求，区域划分按耐高温水平分为四个区，见图 3－8。

图 3－8 中，各区的划分为：

1 区——离加热器边缘 0.5m 的垂直面内，其高度止于离顶板 0.3m 处；

2 区——1 区以外离地面 0.5m 水平面以下的区域；

3 区——1 区以外离地面 0.5m 水平面和离顶板 0.3m 水平面之间的区域；

4 区——顶板至离顶板 0.3m 水平面之间的区域。

桑拿浴室防电击措施与浴室做法基本相同，可做为参考。一般可采用隔离变压器、超低压配电、桑拿房做局部等电位联结、加遮栏或外护物等措施，电气开关和附件应安装在桑拿

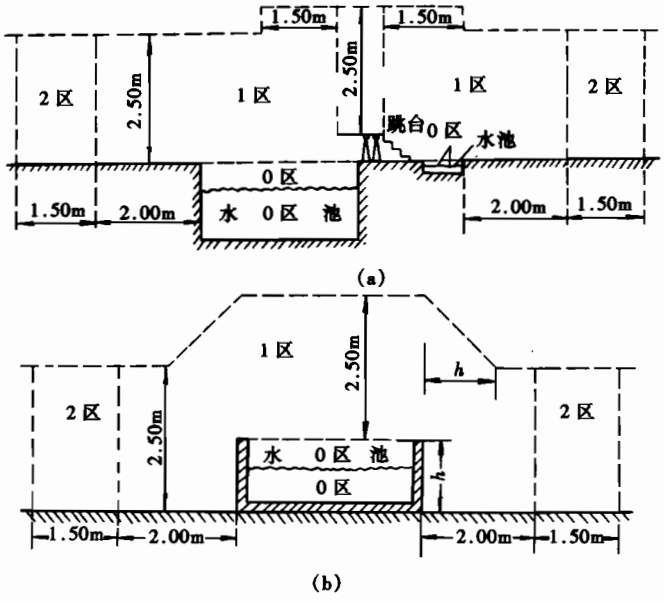


图 3－7　游泳池和涉水池的区域划分

(a) 地下游泳池；(b) 地上游泳池

注：所示尺寸已计入墙壁及固定隔墙的厚度。

房外边，线路应用 170℃以上高温的耐热导线。

3.5.5　狭窄导电场所

狭窄导电场所指主要用接地金属或其他导电部分构成的狭窄场所，如锅炉和金属罐槽内部，当电源线绝缘损坏时，人即受电击。应采取以下措施：

(1) 移动式或手握式设备的供电，采用特低电压或 1∶1 隔离变压器供电，一个二次绕组只能接一台设备。

(2) 当固定式设备需作功能接地，与外露导电部分连通时，应实现局部等电位联结。

3.5.6　医院

医院对不间断供电和对防电击都有很高的要求。医疗电气设备不仅与人体表面接触，有时还与人的心脏接触，且发生电击时病人无法摆脱。因此，对医院电气设备提出更高要求。

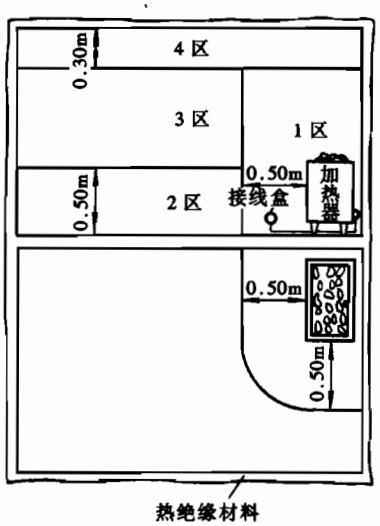


图 3－8　桑拿浴室内区域划分

(平面及立面)

医疗电气设备与人体接触状况的场所分组和允许间断供电时间的场所分级，可参见国际电工委员会草案。其防电击措施可采用局部等电位联结，特低电压供电，1∶1 隔离变压器供电，过电流保护，用漏电保护断路器等（在民规 JGJ/T 16—1992 第 14.7.6 条中说明较详细）。

3.5.7　危险环境电力装置的设计

(1) 在爆炸性气体环境中产生爆炸必须存在以下条件：

即：存在易燃气体、易燃液体的蒸气，浓度在爆炸极限之内。同时出现了引燃爆炸性气

体的火花或高温，如：加油站、煤气表室、厨房等。因此，防爆措施有：采取工艺装置，露天或开敞式布置；设置机械通风；在区域内清除电气和人为产生的明火、高温的因素。

(2) 爆炸性气体环境，按以下规定分区：

0区：连续出现或长期出现爆炸性气体混合物场所。

1区：正常运行时，可能出现爆炸性气体混合物场所。

2区：正常运行时不可能出现爆炸性气体混合物的场所，或即使出现也是短时间的爆炸性气体混合物的环境。

(3) 释放源按易燃物质的释放频繁程度和时间长短分级如下：

连续释放源：指长期释放或短时间频繁释放的区域，其区域定为0区。

第一级释放源：正常运行时周期或偶尔释放的释放源，其区域定为1区。

第二级释放源：正常运行时不释放，释放是偶尔或事故时，其区域定为2区。

应根据通风条件调整区域划分。通风良好时，可降低爆炸危险区域等级；通风不良时，应提高爆炸危险等级。

(4) 爆炸性气体环境危险区域范围，一般存在于工业厂房、化工厂房、易燃品库房等。民用建筑未涉及此部分内容，详细了解参见规范。

(5) 爆炸性气体环境的电气装置确定及电力设计规定：

1) 将正常运行时发生火花的电气设备，安排在爆炸危险小或非爆炸危险的场所。

2) 减少防爆电器数量，设置时要符合国家标准。

(6) 电气设备防爆结构的选型应符合下列规定：

1) 电机、变压器防爆结构选型。见：GB50058—1992《爆炸和危险环境电力装置设计规范》规范表2.5.3－1和2.5.3－2规定，与民用建筑电气设计关系不大。

2) 开关、控制电器、灯具选型。见GB50058—1992中的表2.5.3－3和表2.5.3－4的规定。一般设计是要求与工艺已选的防爆电器同等级。

(7) 变、配电所，控制室的设计要求

1) 应布置在爆炸危险区域以外，当为正压室时，可在1区、2区。

2) 当易燃物质气体比重大于空气时，在1区、2区或附近的变电所、配电所、控制室的室内地面，要高出室外地面0.6m。

(8) 爆炸性气体环境电气线路的设计和安装要求。

1) 电气线路应在爆炸危险性小的环境或远离释放源的地方敷设。

2) 敷设电气线路的沟道、电缆或钢管穿过不同区域之间时，墙板的孔洞要采用非燃性材料封堵。

3) 电气线路宜避开易燃气体、液体管道。必需沿管道敷设时，在管道上面、下面敷设时，要沿危险性较低侧敷设。

4) 线路要避开振动、腐蚀、受热的地方，避不开时要有预防措施。

5) 电缆、导线应选择为铜芯，并考虑周围环境的腐蚀影响，且耐压不低于500V。在架空桥架敷设时宜采用阻燃型电缆。

1区：电缆、绝缘导线的截面不小于2.5mm^2，接线盒应采用隔爆型。在TN－S系统中使用双极开关，同时切断相线和中性线，保护装置宜作用于跳闸。

2区：电缆、绝缘导线的截面不小于1.5mm^2，接线盒采用隔爆型和增安型，保护装置宜作用于信号。

1区、2区的钢管配线必须做隔离密封。

(9) 爆炸性气体环境接地设计。

1) 扩大接地范围，电气设备正常不带电的外壳应全部接地。

2) 1区、2区内除照明灯具以外的电气设备应采用专门的接地线，该接地线与相线有相同的绝缘，并且相线同管敷设。

3) 接地干线应在爆炸区域不同方向两处以上与接地体连接。

4) 做总等电位联结，建筑物防雷与设备接地联结，但防止雷击的独立避雷针应分开设置。

3.6 安全电压选择的有关规定

人身遭受电击危险所处的环境不同，要求的安全电压值也不同。人身所处环境有三种状况。

状况1：干燥或湿润的区域，干燥的皮肤、高电阻地面，其安全电压值交流为不大于50V（IEC规定交流不大于50V，直流不大于120V)。

状况2：潮湿的区域，潮湿的皮肤、低电阻地面，我国规定安全电压不大于24V（IEC规定交流不大于25V，直流不大于60V)。

状况3：侵入水中，此时皮肤电阻，环境介质电阻均可忽略不计。我国尚无具体规定，但一般宜选用交流6V为妥（浴室、游泳池等0区允许标称电压不超过12V)。

以上安全电压包括接地系统的相对地电压，在不接地或非有效接地系统中的相间或极间电压。

3.7 电气设备防误操作的要求及措施

电气装置建成交付使用前必须进行检验，合格后才能交付使用，施工安装中可能留下的缺陷，需要通过检测发现缺陷，予以改正。

检验分目察和测试两个部分。在检验过程中注意电气安全，一般在切断电源后，进行检验，防止发生人身伤亡和财产损失事故。

3.7.1 目测

一般在电气装置未通电、专用仪器检测以前进行，应确认下列各项：

(1) 符合电气设备产品标准的安全要求，如安全距离、地面绝缘等。

(2) 安装符合电气设计和安装规范的要求，如图纸、样本等。

(3) 外观上未出现有损安全的毛病。

目察应按需要对下列各项进行校核。

(1) 对电击事故的防范是否已采用了合适的措施，例如：遮拦、外护物、阻挡物、伸臂范围以及总等电位联结、局部等电位联结等措施的正确应用。

(2) 对防电气火灾的蔓延和电气设备正常高温引燃起火是否采取了合适的封堵和隔热，远离热源等措施。

(3) 隔离电器和开关电器的安装是否正确，是否适合所处的外界环境条件，绝缘子清洁无破损，柜内清洁，箱体严密。

(4) 设备、线路的安装、布置是否便于操作及维护。

(5) 中性线、PE线、相线有无色标区分。

3.7.2 检测

用仪器设备进行检测，可判定电气设备安全水平。一般防止操作有不安全因素的设备，应按需要检测下列项目：

(1) PE 线、PEN 线、接地线和总等电位联结的导通性。采用测低电阻的欧姆表进行检测。要求采用 4～24V 的交、直流电源测试，测试电流不得小于 0.2A。

(2) 测绝缘电阻。测“相”间、“相对地”之间的绝缘电阻，一般用兆欧表。用 500V 或 1000V 兆欧表时，绝缘电阻值应≥0.5MΩ 和≥1.0MΩ。

(3) 回路的隔离。即一回路的带电导体与其他回路的带电导体以及地之间的隔离。隔离变压器供电时，其二次回路导体既不应接地，也不应与其他回路的带电导体有任何电的联系。可用兆欧表测量。

3.7.3 隔离和开关电器防误操作的措施

(1) 隔离电器的设计和安装，应能防止意外的闭合。

(2) 采取措施固定无载隔离电器，防止无意或随意断开。

(3) 隔离电器的断路点应明显，保持达到隔离距离。

(4) 隔离电器应清楚表示出它所隔离的回路，可用标记。

(5) 半导体器件不应用作隔离电器。

3.7.4 机械维修时断电用的电器

(1) 机械维修时断电用电器应接入主电源回路。

(2) 机械维修时断电用电器应是人工操作的。

(3) 机械维修时断电用电器应有防止意外闭合功能。

(4) 机械维修时断电用电器位置和标记易识别。

3.7.5 紧急开关（包括紧急停止）电器

(1) 紧急开关用电器应具有断开电气装置满载电流能力。

(2) 紧急开关包括能够直接切断有关电源的开关电器。可采用以下电器来完成：主电路中的开关，控制电路中的按钮或类似电器，远距离控制的断路器、接触器等。

(3) 紧急开关的操作器件（手柄、按钮），应能清楚地识别，经常涂成红颜色，安装位置便于使用。

(4) 紧急开关操作器件应能自锁，限位在“断”或“停”处。

3.7.6 高压开关柜防误操作要求及措施

10kV 开关柜的“五防”功能如下：

(1) 防止误分（合）断路器。

(2) 防止带负荷拉（合）隔离开关。

(3) 防止带电挂接地线。

(4) 防止带接地线送电。

(5) 防止误入带电隔离区。

3.8 电气工程设计的防火要求

3.8.1 对建筑专业的要求

(1) 变配电所各房间的耐火等级。见《高层民用建筑设计防火规范》GB50045—1995 表 3.0.2。

1）油浸变压器室为一级。

2）非燃或难燃介质的变压器室、高压配电室（少油断路器）、高压电容器室（油浸式电容器）、控制室、值班室等不应低于二级。

3）低压配电室、干式变压器室、真空断路器或非燃介质断路器的高压配电室、低压干式电容器室不低于三级。

（2）有充油设备的高压配电室、高压电容器室的门，应为向外开的甲级防火门。

（3）油浸变压器室的门应为向外开启甲级防火门。

（4）低压配电室、无油高压配电室、干式变压器室及控制室、值班室的门，不宜低于乙级防火门。

（5）变配电所各房间之间的通道门宜为双向开启门或向低压侧开启门。

3.8.2 线路敷设规定

（1）布线用塑料管、塑料线槽及附件，应采用氧指数为 30 以上的阻燃型制品，普通线槽时电缆用防火型。

（2）插座回路与照明回路宜分别供电，低压配电线路宜以防火分区或结构缝为界。

（3）线缆穿越防火分区、楼板、墙体的洞口等处应做防火封堵，选用无机防火堵料。

（4）电缆沟在进入建筑物处应设防火墙。电缆隧道进入建筑物处、变电所围墙处应设带门的防火墙。防火门要装锁。隧道内每 50m 需设一道防火密闭隔门。通过隔门处的电缆须做防火处理。

3.8.3 消防系统导线选择和线路敷设

消防用电设备的线路敷设方式应符合现行规范中有关布线要求，可参照以下原则设计。

（1）火灾探测器的传输线路可按穿管槽配线方式敷设。即 50V 以下供电控制线路，应采用电压等级不低于 250V 导线。220/380V 以下供电控制线路，应采用电压等级不低于 500V 导线。

芯线截面选择，还应满足机械强度要求，截面见表 3－5。

表 3－5　铜芯绝缘导线、电缆芯线的最小截面

序　号	类　别	线芯的最小截面（mm^2）
1	穿管敷设的绝缘导线	1.0
2	线槽敷设的绝缘导线	0.75
3	多芯电缆	0.5

（2）连接手动报警器（包括起泵按钮）、消防设备起动控制装置、运行状态反馈信号、灭火系统中的电控阀门、水流指示器、应急广播等线路，宜采用耐热配线。

（3）由应急电源引至第一设备（如应急配电装置、报警控制器等）以及从应急配电装置至消防泵、喷淋泵、送排烟风机、消防电梯、防火卷帘门、疏散照明等的配电线路，宜采用耐火配线。

耐热配线、耐火配线定义见表 3－6。

（4）耐热配线、耐火配线采用普通线槽时，应选用耐热电缆和耐火电缆。

按《民用建筑设计规范》JGJ/T 16—1992 第 24.8.2 条要求，超高层建筑内的电力、照明、自控等线路应采用阻燃型电线和电缆；但重要设备（如消防水泵，消防电梯，防、排烟风机）的供电回路，宜采用耐火型电缆。各种电缆定义如下：

阻燃电缆：离开火源即不燃烧的电缆。

耐热电缆：一般指耐 250℃温度的电缆。

耐火电缆：一般指耐 800℃～1000℃温度的电缆。

表 3－6　　耐热配线、耐火配线定义

配线类别	电线种类	配线方式
耐热配线	0.45/0.75kV 耐热绝缘电线 四氟化乙烯绝缘电线 硅橡胶绝缘电线 石棉绝缘电线 母线槽 桥架上聚乙烯绝缘塑料护套电缆 铝包电缆 铅包电缆 钢带铠装电缆 氧丁橡胶绝缘电缆 阻燃型电缆	采用金属管、软金属管或金属线槽（或其他非燃性线槽）配线，但在符合耐火等级的电气专用房间内的布线方式不受此限。 当在电气专用房间内与其他配线共同敷设时，相互间距大于 15cm 并应用不燃材料制成的隔板加以隔开
	耐热电线（BV－105，AF－250） 耐火电线（NH－BV） 耐火电缆 MI（矿物绝缘）电缆	在电缆工程施工或类似的设施中采用
耐火配线	0.45/0.75kV 耐热绝缘电线 四氟化乙烯绝缘电线 硅橡胶绝缘电线 石棉绝缘电线 母线槽 桥架上聚乙烯绝缘塑料护套电缆 铝包电缆 铅包电缆 钢带铠装电缆 氧丁橡胶绝缘电缆 阻燃型电缆	采用金属管、软金属管或合成树脂管暗配于混凝土或其他耐火材料的横板、墙体内，且保护层厚度应大于 3cm。但在符合耐火等级的电气专用房间内的布线方式不受此限。 当在电气专用房间内与其他配线共同敷设时，相互间距应大于 15cm 并应采用不燃材料制成隔板加以隔开。 如在施工中难于将管线暗配时，也可采用与上述耐火效果相同或更好的其他保护方法
	耐火电线 耐火电缆 MI（矿物绝缘）电缆	在电缆工程施工或类似的设施中采用

4 节　能

4.1 供配电系统设计的节能措施

（1）应根据用电性质、用电容量，选择合理供电电压和供电方式。

（2）变配电所的位置应接近负荷中心，减少变压级数，缩短供电半径，按经济电流密度选择导线截面，减少线路损耗。

（3）根据受电端至用电设备的变压级数，其总线损率分别不超过以下指标：

a）一级　3.5%；

b）二级　5.5%；

c）三级　7%。

（4）受电端电压在额定电压允许偏差范围内，用电设备的供电电压偏移值不应超过额定电压 ±5%。

（5）单相用电设备应均匀地接在三相网络上，降低三相电压不平衡度，供电网络的电压不平衡度应小于 2%。

（6）用户在提高自然功率因数的基础上，应在负荷侧合理装置集中与就地无功补偿设备，在用户最大负荷时的功率因数应不低于 0.90；低负荷时，应调整无功补偿设备，不得过补偿。

（7）用户应根据用电负荷的特性和变化规律，正确选择和配置变压器容量和台数，通过运行方式的择优，合理调整负荷，实现变压器经济运行。

（8）用电设备的非线性负荷产生高次谐波，引起电网电压畸变及电流的畸变，应采取抑制高次谐波的措施达到 GB/T 14549—1993《电能质量　公用电网谐波》的要求。

（9）供配电系统设计采用的设备和器材，应符合国家或行业的产品技术标准，并应优先选用技术先进、经济适用和节能的成套设备和定型产品，不得采用淘汰产品。

（10）采用交流电机调速节电。

（11）采用高频可控硅调压装置。

（12）采用电动机及其附属装置。

（13）电动机类型应在满足电动机安全、起动、制动、调速等方面要求的情况下，以节能的原则来选择。

1）恒负载连续运行，功率在 250kW 及以上，宜采用同步电动机。

2）功率在 200kW 及以上，宜采用高压电动机。

3）除特殊负载需要外，一般不宜选用直流电动机。

4）电动机功率选择，应根据负载特性和运行要求合理选择，使电动机工作在经济运行

范围内。

5）异步电动机当采取调压节电措施时，需经综合功率损耗与节约功率计算及起动转矩的校验后，在满足机械负载要求的条件下，使调压的电动机工作在经济运行范围内。

6）对机械负载经常变化的电气传动系统，应采用调速运行的方式加以调节。调速运行方式的选择，应根据系统的特点和条件，通过安全、经济、运行维护等方面综合经济比较后确定。

7）在安全、经济合理的条件下，对异步电动机采取就地补偿无功功率，提高功率因数，降低线损，达到经济运行。

8）对交流电气传动系统，应满足工艺要求、生产安全和运行可靠前提下，通过科学管理及技术改进，使电气传动系统中的设备，管网及负载相匹配，达到系统经济运行，提高系统电能利用率。

（14）照明

1）根据使用场所和周围环境对照明的要求及不同电光源的特点。选择合理的照明方式。在保证照明质量前提下，优先选用光效高、显色性好的光源及配光合理、安全高效的灯具。

2）使用气体放电光源时，应装设就地补偿电容器，补偿后的功率因数应不低于0.90。

3）企业照明用电应配置相应的测量和计量仪表，并定期测量电压、照度和考核用电量。

4）合理选择照明控制方式，加强照明设备的运行管理。

5）充分利用天然光。

6）各种工作场所的照度标准值满足国家标准的要求。

4.2 节能型产品的选用方法

（1）根据《中华人民共和国节约能源法》，国家对落后的耗能过高的用能产品、设备实行淘汰制度。淘汰的耗能过高的用能产品、设备的名录由国务院管理节能工作的部门会同国务院有关部门确定并公布。不选用国家已公布淘汰的机电产品和超过能耗标准的设备。

（2）根据《中华人民共和国节约能源法》，企业可以根据自愿原则，按照国家有关产品质量认证的规定，向国务院产品质量监督管理部门或者国务院产品质量监督管理部门授权的部门认可的认证机构提出用能产品节能质量认证申请；经认证合格后，取得节能质量认证证书，在用能产品或者其包装上使用节能质量认证标志。即选用经认证合格取得节能质量认证证书的节能型产品。

（3）选用由行业协会组织推荐；经过权威检测单位测试；有运行业绩；节能数据先进的节能型产品。

（4）选用经过权威检测单位测试；通过节能主管部门组织的技术鉴定或论证；运行业绩实践证明节能效果显著；节能数据先进的节能型产品。

5 负荷分级及计算

5.1 负荷分级原则及供电要求

5.1.1 负荷分级原则

电力负荷应根据对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上所造成损失或影响的程度进行分级。

5.1.1.1 符合下列情况之一时，应为一级负荷

（1）中断供电将造成人身伤亡时。

（2）中断供电将在政治、经济上造成重大损失时。例如：重大设备损坏、重大产品报废、用重要原料生产的产品大量报废，国民经济中重点企业的连续生产过程被打乱需要长时间才能恢复等。

（3）中断供电将影响有重大政治、经济意义的用电单位的正常工作。例如：重要交通枢纽、重要通信枢纽、重要宾馆、大型体育场馆、经常用于国际活动的大量人员集中的公共场所等用电单位中的重要电力负荷。

在一级负荷中，当中断供电将发生中毒、爆炸和火灾等情况的负荷，以及特别重要场所的不允许中断供电的负荷，应视为特别重要的负荷。

5.1.1.2 符合下列情况之一时，应为二级负荷

（1）中断供电将在政治、经济上造成较大损失时。例如：主要设备损坏、大量产品报废、连续生产过程被打乱需较长时间才能恢复、重点企业大量减产等。

（2）中断供电将影响重要用电单位的正常工作。例如：交通枢纽、通信枢纽等用电单位中的重要电力负荷，以及中断供电将造成大型影剧院、大型商场等较多人员集中的重要的公共场所秩序混乱。

5.1.1.3 三级负荷

不属于一级和二级负荷者应为三级负荷。

5.1.2 负荷的供电要求

5.1.2.1 一级负荷的供电要求

（1）一级负荷应由两个电源供电；当一个电源发生故障时，另一个电源不应同时受到损坏。

（2）一级负荷中特别重要的负荷，除由两个电源供电外，尚应增设应急电源，并严禁将其他负荷接入应急供电系统。

5.1.2.2 二级负荷的供电要求

二级负荷的供电系统，宜由两回线路供电。在负荷较小或地区供电条件困难时，二级负

荷可由一回 6kV 及以上专用的架空线路或电缆供电。当采用架空线时，可为一回架空线供电；当采用电缆线路时，应采用两根电缆组成的线路供电，其每根电缆应能承受 100% 的二级负荷。

5.1.2.3 三级负荷的供电要求

三级负荷对供电无特殊要求。

5.2 建筑负荷的计算及计算方法

5.2.1 负荷计算

5.2.1.1 负荷计算的内容

(1) 计算负荷，作为按发热条件选择配电变压器、导体及电器的依据，并用来计算电压损失和功率损耗。在工程上为方便计，亦可作为电能消耗量及无功功率补偿的计算依据。

(2) 尖峰电流，用以校验电压波动和选择保护电器。

(3) 一、二级负荷，用以确定备用电源或应急电源。

(4) 季节性负荷，从经济运行条件出发，用以考虑变压器的台数和容量。

5.2.1.2 负荷计算方法及选用的原则

负荷计算的方法有需要系数法、利用系数法、单位面积功率法等几种。

(1) 需要系数法。用设备功率需要系数和同时系数，直接求出计算负荷。这种方法比较简便，应用广泛，尤其适用于配、变电所的负荷计算。

(2) 利用系数法。采用利用系数求出最大负荷的平均负荷，再考虑设备台数和功率差异的影响，乘以与有效台数有关的最大系数得出计算负荷。这种方法的理论根据是概率论和数理统计，因而计算结果比较接近实际。适用于各种范围的负荷计算，但计算进程稍繁。

(3) 单位面积功率法。单位指标法和单位产品耗电量法。前两者多用于民用建筑，后者用于某些工业。

(4) 对用电设备进行分组计算时，应按下列条件考虑：

1) 3 台及以下，计算负荷等于其设备功率的总和；3 台以上时，其计算负荷应通过计算确定。

2) 类型相同的用电设备，其总容量可以用算数加法求得。

3) 类型不同的用电设备，其总容量应按有功和无功负荷分别相加确定。

(5) 对于台数较少（4 台及以下）的用电设备。3 台及 2 台用电设备的计算负荷，取各设备功率之和；4 台用电设备的计算负荷，取设备功率之和乘以 0.9 的系数。

(6) 在方案设计阶段可采用单位指标法；在初步设计及施工图设计阶段，宜采用需要系数法。对于住宅，在设计的各个阶段均可采用单位指标法。

(7) 用电设备台数较多，各台设备容量相差不悬殊时，宜采用需要系数，一般用于干线、配变电所的负荷计算。

(8) 用电设备台数较少，各台设备容量相差悬殊时，宜采用二项式法，一般用于支干线和配电屏（箱）的负荷计算。

5.2.1.3 设备功率的确定

进行负荷计算时，应按下列规定计算设备功率：

(1) 对于不同工作制的用电设备的额定功率应换算为统一的设备功率。

1) 连续工作制电动机的设备功率等于额定功率。

2）断续或短时工作制电动机的设备功率，当采用需要系数法或二项式法计算时，是将额定功率统一换算到负载持续率为25%时的有功功率

$$P_e = P_n\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{0.25}} = 2P_r\sqrt{\varepsilon_r} \quad \text{kW} \tag{5-1}$$

当采用利用系数计算负荷时，应统一换算到负载持续率 ε 为100%下的有功功率

$$P_e = P_n\sqrt{\varepsilon_n} \quad \text{kW} \tag{5-2}$$

式中 P_n——电动机额定功率，kW；

ε_n——电动机额定负载持续率。

3）电焊机的设备功率是指将额定功率换算到负载持续率为100%时的有功功率

$$P_e = S_n\sqrt{\varepsilon_n}\cos\varphi \quad \text{kW} \tag{5-3}$$

式中 S_n——电焊机额定功率，kVA；

$\cos\varphi$——功率因数。

（2）照明用电设备的设备功率为：

1）白炽灯、高压卤钨灯是指灯泡标出的额定功率。

2）低压卤钨灯除灯泡功率外，还应考虑变压器的功率损耗。

3）气体放电灯、金属卤化物灯除灯泡的功率外，还应考虑镇流器的功率损耗。

（3）整流器的设备功率是指额定交流输入功率。

（4）成组用电设备的设备功率，不应包括备用设备。

（5）当消防用电的计算有功功率大于火灾时可能同时切除的一般电力、照明负荷的计算有功功率时，应按未切除的一般电力、照明负荷加上消防负荷计算低压总的设备功率，计算负荷。否则计算低压总负荷时，不应考虑消防负荷。

5.2.1.4 需要系数法

当采用需要系数计算负荷时，应将配电干线范围内的用电设备按类型统一划组。配电干线的计算负荷为各用电设备组的计算负荷之和再乘以同时系数。变电所或配电所的计算负荷，为各配电干线计算负荷之和再乘以同时系数。计算变电所高压侧负荷，应加上变压器的功率损耗。

（1）用电设备组的计算负荷及计算电流：

有功功率 $$P_c = K_x P_e \quad \text{kW} \tag{5-4}$$

无功功率 $$Q_c = P_c\text{tg}\varphi \quad \text{kvar} \tag{5-5}$$

视在功率 $$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad \text{kVA} \tag{5-6}$$

计算电流 $$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3}\,U_n} \quad \text{A} \tag{5-7}$$

（2）配电干线或车间变电所的计算负荷：

有功功率 $$P_c = K_{\sum p}\sum\ (K_x P_e) \quad \text{kW} \tag{5-8}$$

无功功率 $$Q_c = K_{\sum q}\sum\ (K_x P_e\ \text{tg}\varphi) \quad \text{kvar} \tag{5-9}$$

视在功率 $$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad \text{kVA} \tag{5-10}$$

以上式中 P_e——用电设备组的设备功率，kW；

K_x——需要系数；

$\mathrm{tg}\varphi$——用电设备功率因数角的正切值；

$K_{\sum p}$、$K_{\sum q}$——有功功率、无功功率同时系数，分别取 0.8～0.9 和 0.93～0.97；

U_n——用电设备额定电压（线电压），kV。

（3）配电所或总降压变电所的计算负荷，为各车间变电所计算负荷之和再乘以同时系数 $K_{\sum p}$和 $K_{\sum q}$对配电所的 $K_{\sum p}$和 $K_{\sum q}$分别取 0.85～1 和 0.95～1，对总降压变电所的 $K_{\sum p}$和 $K_{\sum q}$分别取 0.85～0.9 和 0.93～0.97。

当简化计算时，同时系数 $K_{\sum p}$和 $K_{\sum q}$都取 $K_{\sum p}$值。

5.2.1.5 利用系数法

利用系数法确定计算负荷时，不论计算范围大小，都必须求出该计算范围内用电设备有效台数及最大系数，而后算出结果。

（1）用电设备组在最大负荷班内的平均负荷：

有功功率 $$P_p = K_m P_e \quad \text{kW} \tag{5-11}$$

无功功率 $$Q_p = P_p \mathrm{tg}\varphi \quad \text{kvar} \tag{5-12}$$

式中 P_e——用电设备组的设备功率，kW；

K_m——用电设备组在最大负荷的利用系数，从设计手册查得；

$\mathrm{tg}\varphi$——用电设备组的功率因数角的正切值。

（2）平均利用系数为

$$K_{av} = \frac{\sum P_{av}}{\sum P_e} \tag{5-13}$$

式中 $\sum P_{av}$——各用电设备组平均负荷的有功功率之和，kW；

$\sum P_e$——各用电设备组的设备功率之和，kW。

（3）用电设备的有效台数 n_{yx}，是将不同设备功率和工作制的用电设备台数换算为相同设备功率和工作制的等效值。故

$$n_{yx} = \frac{(\sum P_e)^2}{\sum P_{1e}^2} \tag{5-14}$$

式中 P_{1e}——单个用电设备的设备功率，kW。

（4）计算负荷及计算电流：

有功功率 $$P_c = K_m \sum P_{av} \quad \text{kW} \tag{5-15}$$

无功功率 $$Q_c = K_m \sum Q_{av} \quad \text{kvar} \tag{5-16}$$

视在功率 $$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad \text{kVA} \tag{5-17}$$

计算电流 $$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3}\,U_n} \quad \text{A} \tag{5-18}$$

式中 U_n——额定电压，kV；

K_m——最大系数，根据有效台数 n_{yx}和平均利用系数 K_{av}，从设计手册[①] 查得；

其他符号含义同上。

3 台及以下用电设备的计算有功功率取设备功率总和。

① 由中国航空规划设计研究院等编，工业与民用配电设计手册第二版，中国电力出版社出版，1994 年，下同。

3台以上用电设备，而有效台数小于4时，计算有功功率取设备功率总和，再乘以系数0.9。

5.2.1.6 单位面积功率法和单位指标法

(1) 单位面积功率（或负荷密度）法：单位面积法计算有功功率的公式为

$$P_e = \frac{P'_e S}{1000} \quad \text{kW} \tag{5-19}$$

式中 P'_e——单位面积功率（负荷密度），W/m^2；

S——建筑面积，m^2。

(2) 单位指标法：单位指标计算有功功率的公式为

$$P_c = \frac{P'_e N}{1000} \tag{5-20}$$

式中 P'_e——单位用电指标，如W/户、W/人、W/床；

N——单位数量，如户数、人数、床。

应用以上方法计算负荷时，还应结合工程具体情况，乘以不同的同时系数。

5.2.1.7 单相负荷计算

单相负荷应均衡分配到三相上。当单相负荷的总容量小于计算范围内三相对称负荷总容量的15%时，全部按三相对称负荷计算；当超过15%时，应将单相负荷换算为等效三相负荷，再与三相负荷相加，等效三相负荷可按下列方法计算：

(1) 只有相负荷时，等效三相负荷取最大相负荷的3倍。

(2) 只有线间负荷时，等效三相负荷 P_e 为：单台时取最大线间负荷的$\sqrt{3}$倍加上次最大线间负荷的 $(3-\sqrt{3})$ 倍，即

$$P_e = \sqrt{3}P_{ab} + (3-\sqrt{3})P_{bc} = 1.73P_{ab} + 1.27P_{bc} \tag{5-21}$$

当 $P_{ab} = P_{bc}$ 时

$$P_e = 3P_{ab} \tag{5-22}$$

当只有 P_{ab} 时

$$P_e = \sqrt{3}P_{ab} \tag{5-23}$$

式中 P_{ab}、P_{bc}——接于ab、bc线间负荷，kW；

P_e——等效三相负荷，kW。

(3) 既有线间负荷又有相负荷时，应先将线间负荷换算为相负荷，然后各相负荷分别相加，选取最大相负荷乘3倍作为等效三相负荷。

(1) 先将线间负荷换算为相负荷，各相负荷分别为：

a相 $$P_a = P_{ab}p_{(ab)a} + P_{ca}p_{(ca)a} \tag{5-24}$$

$$Q_a = P_{ab}q_{(ab)a} + P_{ca}q_{(ca)a} \tag{5-25}$$

b相 $$P_b = P_{ab}p_{(ab)b} + P_{bc}p_{(bc)b} \tag{5-26}$$

$$Q_b = P_{ab}q_{(ab)b} + P_{bc}q_{(bc)b} \tag{5-27}$$

c相 $$P_c = P_{bc}p_{(bc)c} + P_{ca}p_{(ca)c} \tag{5-28}$$

$$Q_c = P_{bc}q_{(bc)c} + P_{ca}q_{(ca)c} \tag{5-29}$$

以上式中 P_{ab}、P_{bc}、P_{ca}——接于ab、bc、ca线间负荷，kW；

P_a、P_b、P_c——换算为a、b、c相有功负荷，kW；

Q_a、Q_b、Q_c——换算为a、b、c相无功负荷，kvar；

$p_{(ab)a}$、$q_{(ab)a}$、……——接于 ab、……线间负荷换算为 a、……相负荷的有功及无功换算系数，见表 5－1。

表 5－1　　线间负荷换算为相负荷的有功无功换算系数

换算系数	负荷功率因数								
	0.35	0.40	0.50	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00
$P_{(ab)a}$、$P_{(bc)b}$、$P_{(ca)c}$	1.27	1.17	1.00	0.89	0.84	0.80	0.72	0.64	0.50
$P_{(ab)b}$、$P_{(bc)c}$、$P_{(ca)a}$	－0.27	－0.17	0	0.11	0.16	0.20	0.28	0.36	0.50
$q_{(ab)a}$、$q_{(bc)b}$、$q_{(ca)c}$	1.05	0.86	0.58	0.38	0.30	0.22	0.09	－0.05	－0.29
$q_{(ab)b}$、$q_{(bc)c}$、$q_{(ca)a}$	1.63	1.44	1.16	0.96	0.88	0.80	0.67	0.53	0.29

（2）各组负荷分别相加，选出最大相负荷，取其 3 倍作为等效三相负荷。

5.2.1.8　尖峰电流的确定

对于不同性质的负荷，其尖峰电流的计算公式是不同的。

（1）单台电动机、电弧炉或电焊变压器的支线，其尖峰电流 I_{jf}为

$$I_{jf} = KI_n \qquad A \tag{5-30}$$

式中　I_n——电动机、电弧炉或电焊变压器一次侧额定电流，A；

K——起动电流倍数，即起动电流与额定电流之比，鼠笼电动机可达 6～7，绕线电动机为 2～2.5，直流电动机为 1.5～2，单台电弧炉为 3，弧焊变压器和弧焊整流器不大于 2.1，电阻焊机为 1，闪光对焊机为 2。

（2）接有多台电动机的配电线路，只考虑一台电动机起动时的尖峰电流为

$$I_{jf} = (KI_r)_{max} + I'_c \qquad A \tag{5-31}$$

式中　$(KI_r)_{max}$——起动电流为最大的一台电动机的起动电流，A；

I'_c——除起动电动机以外的配电线路计算电流，A。

两台及以上设备的电动机有可能同时起动时，尖峰电流根据实际情况确定。

（3）对于自起动的电动机组，其尖峰电流为所有参与起动的电动机的起动电流之和。

5.2.2　年电能损耗和年电能消耗量计算

5.2.2.1　功率损耗计算

（1）三相线路中有功及无功功率损耗：

有功功率损耗

$$\Delta P_l = 3I_c^2 R \times 10^{-3} \qquad kW \tag{5-32}$$

无功功率损耗

$$\Delta Q_l = 3I_c^2 X \times 10^{-3} \qquad kvar \tag{5-33}$$

其中

$$R = R'l;\quad X = X'l$$

以上式中　R——每相线路电阻，Ω；

X——每相线路电抗，Ω；

l——线路计算长度，km；

I_c——计算相电流，A；

R'、X'——线路单位长度的交流电阻及电抗，Ω/km。

（2）电力变压器的有功及无功功率损耗：

有功功率损耗

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \Delta P_k \left[\frac{S_c}{S_n}\right]^2 \quad \text{kW} \tag{5-34}$$

无功功率损耗

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k \left[\frac{S_c}{S_n}\right]^2 \quad \text{kvar} \tag{5-35}$$

其中

$$\Delta Q_k = \frac{U_k\% S_n}{100}$$

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0\% S_n}{100}$$

以上式中 S_c——变压器计算负荷，kVA；

S_n——变压器额定容量，kVA；

ΔP_0——变压器空载有功损耗，kW；

ΔP_k——变压器满载（短路）有功损耗，kW；

ΔQ_0——变压器空载无功损耗，kvar；

$I_0\%$——变压器空载电流占额定电流的百分数；

ΔQ_k——变压器满载（短路）无功损耗，kvar；

$U_k\%$——变压器阻抗电压占额定电压的百分数。

ΔP_0、ΔP_k、$I_0\%$、$U_k\%$均可由变压器产品样本中查得。当变压器负荷率不大于85%时，其功率损耗可以概略计算如下

$$\Delta P_T = 0.01 S_c \quad \text{kW} \tag{5-36}$$

$$\Delta Q_T = 0.05 S_c \quad \text{kvar} \tag{5-37}$$

（3）高压电动机的有功及无功功率损耗：

有功功率损耗

$$\Delta P_M = P_n \left[\frac{1-\eta}{\eta}\right] \quad \text{kW} \tag{5-38}$$

无功功率损耗

$$\Delta Q_M = \Delta P_M \operatorname{tg}\varphi \quad \text{kvar} \tag{5-39}$$

式中 P_n——电动机额定功率，kW；

η——电动机效率；

$\operatorname{tg}\varphi$——电动机额定功率因数角的正切值。

5.2.2.2 年电能损耗计算

（1）供电线路年有功电能损耗为

$$\Delta W_L = \Delta P_l \tau \quad \text{kWh} \tag{5-40}$$

式中 ΔP_l——三相线路中有功功率损耗，kW；

τ——最大负荷年损耗小时数，可按最大负荷的年利用小时数 T_{max} 及功率因数 $\cos\varphi$，从设计手册查得。

（2）变压器年有功电能损耗为

$$\Delta W_T = \Delta P_0 t + \Delta P \left[\frac{S_c}{S_n}\right] \tau \quad \text{kWh} \tag{5-41}$$

式中　t——变压器全年投运小时数，可取 8760h。

5.2.2.3　年电能消耗量计算

企业年电能消耗量用年平均负荷和年实际工作小时数计算，当已知企业的计算有功功率 P_c及计算无功功率 Q_c后，企业的年有功及无功电能消耗量可按下式确定

$$W_n = \alpha_n P_c T_n \quad \text{kWh} \tag{5-42}$$

$$W_{rn} = \beta_n Q_c T_n \quad \text{kvarh} \tag{5-43}$$

式中 α_n、β_n——年平均有功、无功负荷系数，α_n 值一般取 0.7～0.75，β_n 值取 0.67～0.82；

T_n——年实际工作小时数，一班制可取 2300h，二班制可取 4600h，三班制可取 6900h。

6

电源及供配电系统(35kV 及以下)

6.1 电源及供配电系统的一般规定

6.1.1 一般规定

(1) 符合下列条件之一时，用电单位宜设置自备电源：

1) 需要设置自备电源作为一级负荷中特别重要负荷的应急电源时。

2) 设置自备电源较从电力系统取得第二电源经济合理或第二电源不能满足一级负荷要求的条件时。

3) 所在地区偏僻，远离电力系统，经与供电部门共同规划，设置自备电源作为主电源经济合理时。

4) 有常年稳定余热、压差、废气可供发电，技术可靠、经济合理时。

(2) 应急电源与工作电源之间必须采取可靠措施防止并列运行。

(3) 在设计供配电系统时，对于一级负荷中的特别重要负荷，应考虑一电源系统检修或故障的同时，另一电源系统又发生故障的严重情况，此时应从电力系统取得第三电源或自备电源。

(4) 需要两回电源线路的用电单位，宜采用同级电压供电，但根据各级负荷的不同需要及地区供电条件，也可采用不同电压供电。

(5) 同时供电的两回及以上供配电线路中，一回路中断供电时，其余线路应能满足全部一级和全部或部分二级负荷的用电需要。

(6) 供配电系统应简单可靠，同一电压的正常配电级数不宜多于两级。

(7) 高压配电线路应深入负荷中心。根据负荷容量和分布，宜使总变电所和配电所靠近高压负荷中心，变电所靠近各自的低压用电负荷中心。

(8) 对供电电压为 35kV 且负荷小而集中的用电单位，如没有高压用电设备，发展可能性小且面积受到限制，在取得供电部门同意后，可采用 35/0.4kV 直降配电变压器。

(9) 高压配电系统宜采用放射式。根据变压器的容量、分布及地理环境等情况，亦可采用树干式或环式。

(10) 室外配电线路当有下列情况之一时，应采用电缆：

1) 没有架空线路走廊时。

2) 城市规划不允许通过架空线路时。

3) 高层建筑多，架空线路的安全运行受到严重威胁时。

4) 环境对架空线路有严重腐蚀时。

5) 重点风景旅游区的建筑群。

6）大型民用建筑。

（11）在用电单位内部为提高供电可靠性或出于节约用电及检修电源设备的需要，临近的变电所之间宜设置低压联络线。

（12）小负荷的一般用电单位宜纳入当地低压电网。

6.1.2 居住区高压配电

（1）应根据城市规划、城市电网发展规划综合考虑近期、中期、远期的用电负荷，确定居住区的供配电方案。

（2）一般按每占地 $2km^2$ 或按总建筑面积 $4 \times 10^5 m^2$ 设置一个 10kV 变电所。当变电所在六个以上时，也可设置 10kV 配电所。

（3）10kV 配电系统应有较大的适应性。根据负荷等级、负荷容量、负荷分布及线路走廊等情况，配电系统宜以放射式为主，也可采用环式或树干式，有条件时也可采用格式接线。

每条线路、每个配变电所都应有明确的供电范围，不宜交错重叠。

（4）对居住区内 10kV 用户变电所，可根据负荷等级、负荷容量、地理位置等情况采取不同的供电方式。对负荷等级较高及容量大的用户变电所宜采用双回专用线路或一回专用线路加公共备用干线或双干线方式供电；对其余用户变电所可采用树干式，环式或格式配电系统。

（5）为了限制系统短路容量，简化继电保护，环式配电系统应采取开环方式。

（6）配变电所进出线方式宜采用电缆。

（7）在确定路灯变压器装设的位置、数量及控制方式时，应根据各城市有关规定，与主管部门商定。

（8）配电线路的导线截面，应与城市供电部门协商确定，其中主干电缆截面应根据规划容量选定。

6.1.3 大型民用建筑高压配电

（1）应根据用电负荷的容量及分布，使变压器深入负荷中心，以降低电能损耗和有色金属消耗。在下列情况之一时，宜分散设置配电变压器：

1）单体建筑面积大或场地大，用电负荷分散。

2）超高层建筑。

3）大型建筑群。

（2）对于负荷较大面又相对集中的高层建筑，除底层、地下层外，可根据负荷分布将变压器设在顶层、中间层。

（3）对于空调、采暖等季节性负荷所占比重较大的民用建筑，在确定变压器台数、容量时，应考虑变压器的经济运行。

（4）一级负荷中特别重要负荷宜设置专用低压母线段。

（5）高压配电系统宜采用放射式，根据具体情况也可采用环式、树干式或双干线。

6.2 电压选择的原则及电能质量要求

6.2.1 电压选择的原则

（1）用电单位的供电电压应根据用电容量、用电设备特性、供电距离、供电线路的回路数、当地公共电网现状及其发展规划等因素，经技术经济比较确定。

（2）当供电电压为35kV及以上时，用电单位的一级配电电压应采用10kV；当6kV用电设备的总容量较大，选用6kV经济合理时，宜采用6kV。低压配电电压应采用220/380V。

（3）当供电电压为35kV，为减少配变电级数、简化接线及技术经济合理时，配电电压宜采用35kV，用电设备容量在250kW或需用变压器容量在160kVA以上者应以高压方式供电；用电设备容量在250kW或需用变压器容量在160kVA及以下者，应以低压方式供电，特殊情况也可以高压方式供电。

（4）3kV及以上三相交流设备的额定电压和系统的标称电压，见表6－1。

（5）各级电压线路的送电能力见表6－2。

表6－1　3kV及以上三相交流设备的额定电压和系统的标称电压

受电设备额定电压和系统标称电压（kV）	供电设备额定电压（kV）
3	3.15
6	6.3
10	10.5
35	37

表6－2　各级电压线路的送电能力

标称电压（kV）	送电容量（MW）	送电距离（km）
6	0.1～1.2（3）	15～4（<3）
10	0.2～2（4）	20～6（<6）
35	2～8	50～20

注　1. 表中数字为架空线路数据，括号内数字为电缆线路数据。

2. 表中数字的计算依据：线芯截面最大240mm^2，电压损失≤5%；导线的实际工作温度：架空线为55℃，6kV电缆为60℃，10kV电缆为55℃；导线间的几何均距 D_j：10（6）kV为1.25m，35kV为3m；功率因数（$\cos\varphi$）均为0.85。

6.2.2　用电设备端子处电压偏差允许值

（1）正常运行情况下用电设备端子处电压偏差允许值（以额定电压的百分数表示）可按下列要求验算：

1）一般电动机为±5%。

2）电梯电动机为±7%。

3）照明：在一般工作场所为±5%；在视觉要求较高的屋内场所为+5%、－2.5%；对于远离变电所的小面积一般工作场所，难以满足上述要求时，可为+5%、－10%；应急照明、道路照明和警卫照明为+5%、－10%。

4）其他用电设备，当无特殊规定时为±5%。

（2）电子计算机供电电源的电能质量应满足表6－3所列数值。

表6－3　计算机性能允许的电能质量变动范围表

项目 \ 指标 \ 级别	A级	B级	C级
电压波动（%）	－5～+5	－10～+7	－10～+10
频率变化（Hz）	－0.05～+0.05	－0.5～+0.5	－1～+1
波形失真率（%）	≤5	≤10	≤20

（3）医用X线诊断机的允许电压波动范围为额定电压的－10%～+10%。

6.2.3　电压损失的计算

6.2.3.1　线路电压损失按下式计算：

(1) 三相平衡负荷线路

$$\left.\begin{aligned}\Delta U\% &= \frac{\sqrt{3}Il}{10U_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) = Il\Delta U_a\% \\ \Delta U\% &= \frac{Pl}{10U_n^2}(R' + X'\mathrm{tg}\varphi) = Pl\Delta U_p\%\end{aligned}\right\} \quad (6-1)$$

(2) 线电压的单相负荷线路

$$\left.\begin{aligned}\Delta U\% &= \frac{2Il}{10U_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) \approx 1.15Il\Delta U_a\% \\ \Delta U\% &= \frac{2Pl}{10U_n^2}(R' + X'\mathrm{tg}\varphi) \approx 2Pl\Delta U_p\%\end{aligned}\right\} \quad (6-2)$$

(3) 相电压的单相负荷线路

$$\left.\begin{aligned}\Delta U\% &= \frac{2\sqrt{3}Il}{10U_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) \approx 2Il\Delta U_a\% \\ \Delta U\% &= 6PL\Delta U_p\%\end{aligned}\right\} \quad (6-3)$$

以上式中 $\Delta U\%$——线路电压损失，%；

U_n——系统标称电压，kV；

I——负荷电流，A；

$\cos\varphi$——负荷功率因数；

P——负荷的有功功率，kW；

l——线路长度，km；

R'、X'——三相线路单位长度的电阻和电抗，Ω/km；

$\Delta U_a\%$——三相线路单位电流、长度的电压损失，%/（A·km）；

$\Delta U_p\%$——三相线路单位功率、长度的电压损失，%（kW·km）。

线路单位长度的电阻、电抗和电压损失数据见设计手册。

6.2.3.2 变压器电压损失按下式计算

$$\Delta U_T = \beta(U_a\cos\varphi + U_r\sin\varphi) = \frac{P_{ua} + Q_{ur}}{S_{nT}}\% \quad (6-4)$$

式中 S_{nT}——变压器的额定容量，kVA；

U_a——变压器阻抗电压的有功分量，%，$U_a = \dfrac{100\Delta P_T}{S_{nT}}$；

U_r——变压器阻抗电压的无功分量，%，$U_r = \sqrt{U_T^2 - U_a^2}$；

U_T——变压器的阻抗电压，%；

ΔP_T——变压器的短路损耗，kW；

β——变压器的负荷率，即实际负荷与额定容量 S_T 的比值；

$\cos\varphi$——负荷的功率因数；

P_{ua}——三相负荷的有功功率，kW；

Q_{ur}——三相负荷的无功功率，kvar。

6.2.4 电压偏差

6.2.4.1 基本概念

电压偏差是供配电系统在正常运行方式下（即系统中所有元件都按预定工况运行），系统各点的实际电压 U 对系统标称电压 U_n 的偏差 δU，常用相对于系统标称电压的百分数表示，即

$$\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100\% \tag{6-5}$$

6.2.4.2 电压偏差计算

如果在某段时间内线路或其他供电元件首端的电压偏差为 δU_1，线路电压损失为 ΔU_1，则线路末端电压偏差为

$$\delta U_x = \delta U_1 - \Delta U_1 \tag{6-6}$$

当有变压器或其他调压设备时，还应计入其电压提升，即

$$\delta U_x = \delta U_1 + e - \sum \Delta U$$

式中 δU_1——线路首端的电压偏差，%；

$\sum \Delta U$——回路中电压损失总和，%；

e——变压器分接头或调压设备的提升率，%。

常用配电变压器分接头与二次空载电压和电压提升的关系见表 6-4。

表 6-4　　变压器分接头与二次空载电压和电压提升的关系

10（6）±5%/0.4kV 变压器分接头	+5%	0	-5%
变压器二次空载电压*（V）	380	400	420
电压提升*（%）	0	+5	+10

*　变压器一次端子电压为网络标称电压 10（6）kV 时。

6.2.5 减小电压偏差的措施

（1）为减小电压偏差，供配电系统的设计应符合下列要求：

1）正确选择变压器的变压比和电压分接头。

2）合理减少系统阻抗。

3）合理补偿无功功率。

4）尽量使三相负荷平衡。

（2）计算电压偏差时，应计入采取下列措施的调压效果：

1）自动或手动调整并联补偿电容器、并联电抗器。

2）自动或手动调整同步电动机的励磁电流。

3）改变供配电系统运行方式。

（3）变电所中的变压器在下列情况之一时，应采用有载调压变压器：

1）35kV 以上电压的变电所中的降压变压器，直接向 35、10（6）kV 电网送电时。

2）35kV 降压变电所的主变压器，在电压偏差不能满足要求时。

（4）10（6）kV 配电变压器不宜采用有载调压型，但在当地 10（6）kV 电源电压偏差不能满足要求，且用电单位有对电压要求严格的设备，单独设置调压装置技术经济不合理，也可采用 10（6）kV 有载调压变压器。

(5) 为了限制电压波动和闪变（不包括电动机起动时允许的电压波动）在合理范围，对冲击性低压负荷宜采取下列措施：

1）采用专线供电。

2）与其他负荷共用配电线路时，宜降低配电线路阻抗。

3）较大功率的冲击性负荷或冲击性负荷群与对电压波动、闪变敏感的负荷，宜分别由不同的配电变压器供电。

6.3 供配电系统（35kV及以下）接线方式及特点

6.3.1 高压供配电系统接线方式及特点

(1) 根据对供电可靠性的要求、变压器的容量及分布、地理环境等情况，高压配电系统宜采用放射式，也可采用树干式、环式或其他组合方式。

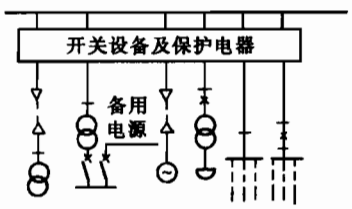
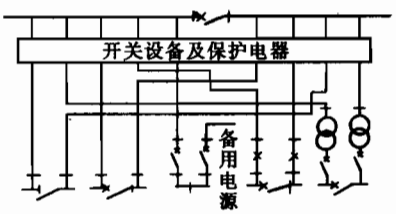
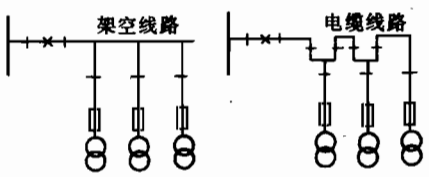
1）放射式。供电可靠性高，故障发生后影响范围较小，切换操作方便，保护简单，便于自动化，但配电线路和高压开关柜数量多而造价较高。

2）树干式。配电线路和高压开关柜数量少且投资少，但故障影响范围较大，供电可靠性较差。

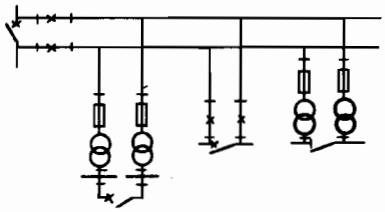
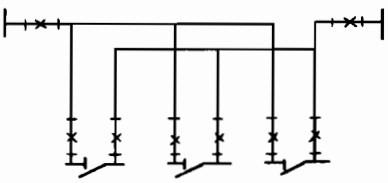
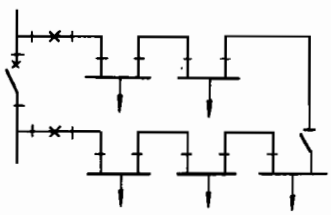
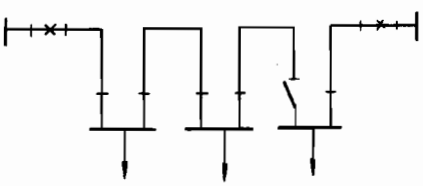
3）环式。有闭路环式和开路环式两种。为简化保护，一般采用开路环式，其供电可靠性较高，运行比较灵活，但切换操作较繁。

(2) 常用供配电系统接线方式见表6－5。

表6－5　　配电系统接线方式

接线方式	接线图	简要说明
单回路放射式		一般用于配电给二、三级负荷或专用设备，但对二级负荷供电时，尽量要有备用电源。如另有独立备用电源时，则可供电给一级负荷
双回路放射式		线路互为备用，用于配电给二级负荷。电源可靠时，可供电给一级负荷
单回路树干式		一般用于对三级负荷配电，每条线路装接的变压器约5台以内，总容量一般不超过2000kVA

续表

接线方式	接　线　图	简　要　说　明
单侧供电双回路树干式		供电可靠性稍低于双回路放射式，但投资较省，一般用于二、三级负荷。当供电电源可靠时，也可供电给一级负荷
双侧供电双回路树干式		分别由两个电源供电，与单侧供电双回路树干式相比，供电可靠性略有提高，主要用于二级负荷。当供电电源可靠时，也可供电给一级负荷
单侧供电环式		用于对二、三级负荷配电，一般两回电源同时工作开环运行，也可一用一备闭环运行。供电可靠性较高，电力线路检修时可以切换电源，故障时可以切除故障点，缩短停电时间。可对二级负荷配电，但保护装置和整定配合都比较复杂
双侧供电环式		用于对二、三级负荷配电。正常运行时由一侧供电或在线路的负荷分界处断开。配电系统应加闭锁，避免并联，故障后手动切换，寻找故障时要中断供电

6.3.2　35kV 变电所的主接线

（1）变电所的主接线，应根据变电所在电力网中的地位、出线回路数、设备特点及负荷性质 等条件确定。并应满足供电可靠 、运行灵活、操作检修方便。节约投资和便于扩建等要求。

（2）当能满足运行要求时，变电所高压侧宜采用断路器较少或不用断路器的接线。

（3）35kV 线路为两回及以下时，宜采用桥形、线路变压器组或线路分支接线。超过两回时，宜采用扩大桥形、单母线或分段单母线的接线。35kV 线路为 8 回及以下时，亦可采用双母线接线。

（4）在采用单母线、分段单母线或双母线的 35kV 主接线中，当不允许停电检修断路器时，可设置旁路设施。

当有旁路母线时，首先宜采用分段断路器或母联断路器兼作旁路断路器的接线。当 35kV 线路为 8 回及以上时，可装设专用的旁路断路器。

(5) 当变电所装有两台主变压器时，6～10kV 侧宜采用分段单母线。线路为 12 回及以上时，亦可采用双母线。当不允许停电检修断路器时，可设置旁路设施。

当 6～35kV 配电装置采用手车式高压开关柜时，不宜设置旁路设施。

(6) 当需限制变电所 6～10kV 线路的短路电流时，可采用下列措施之一：

1) 变压器分列运行；

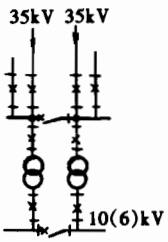
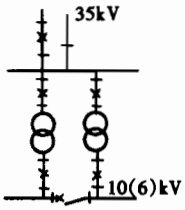
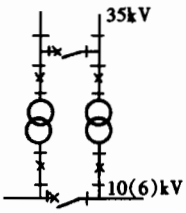
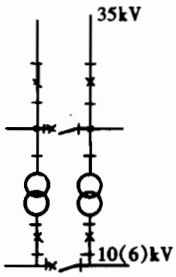
2) 采用高阻抗变压器；

3) 在变压器回路中装设电抗器。

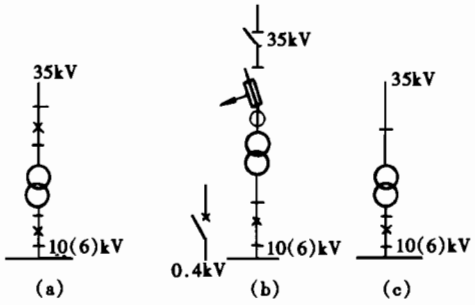
(7) 接在母线上的避雷器和电压互感器，可合用一组隔离开关。

(8) 常用的 35kV 变电所的主接线见表 6－6。

表 6－6　　常用的 35kV 变电所的主接线

接线方式	接　线　图	简　要　说　明
分段单母线		两回电源线路和两台变压器，大、中型企业中采用较多，可有一、二回转送负荷的线路
单母线		一回电源线路（或一用一备）和两台变压器，用于昼夜负荷变化较大（考虑轻负荷时可停用一台）及对二、三级负荷供电，35kV 配电装置的出线回路数不超过 3 回
外　桥		两回电源线路和两台变压器，当供电线路较短，或需要经常切断变压器时采用。可用于一、二级负荷
内　桥		两回电源线路和两台变压器，当电源线路较长，或不需要经常切断变压器时采用。可用于一、二级负荷

续表

接线方式	接　线　图	简　要　说　明
线路变压器组		一回电源线路和单台主变压器，可用于对二级和三级负荷供电。 当变压器内部或二次侧母线上故障时，可使继电保护装置动作于跳闸，为便于操作及管理，一般采用图（a）接线； 35kV 跌落式熔断器的参数（额定电流、断流容量）能满足要求时，图（b）接线常用于 35/0.4kV 直降变电所；图（c）接线只适用于用电单位内部的 35kV 分变电所，线路电源端的保护装置应能满足变压器保护要求，隔离开关应能切断变压器的空载电流

6.3.3　10（6）kV 变电所的主接线

（1）配电所、变电所的高压及低压母线宜采用单母线或分段单母线接线。当供电连续性要求很高时，高压母线可采用分段单母线带旁路母线或双母线的接线。

（2）配电所专用电源线的进线开关宜采用断路器或带熔断器的负荷开关。当无继电保护和自动装置要求，且出线回路少无需带负荷操作时，可采用隔离开关或隔离触头。

（3）从总配电所以放射式向分配电所供电时，该分配电所的电源进线开关宜采用隔离开关或隔离触头。

当分配电所需要带负荷操作或继电保护、自动装置有要求时，应采用断路器。

（4）配电所的 10kV 或 6kV 非专用电源线的进线侧，应装设带保护的开关设备。

（5）10kV 或 6kV 母线的分段处宜装设断路器，当不需带负荷操作且无继电保护和自动装置需要时，可装设隔离开关或隔离触头。

（6）两配电所之间的联络线，应在供电侧的配电所装设断路器，另侧装设隔离开关或负荷开关；当两侧的供电可能性相同时，应在两侧均装设断路器。

（7）配电所的引出线宜装设断路器。当满足继电保护和操作要求时，可装设带熔断器的负荷开关。

（8）向频繁操作的高压用电设备供电的出线开关兼作操作开关时，应采用具有频繁操作性能的断路器。

（9）10kV 或 6kV 固定式配电装置的出线侧，在架空出线回路或有反馈可能的电缆出线回路中，应装设线路隔离开关。

（10）采用 10kV 或 6kV 熔断器负荷开关固定式配电装置时，应在电源侧装设隔离开关。

（11）接在母线上的避雷器和电压互感器，宜合用一组隔离开关。配电所、变电所架空进、出线上的避雷器回路中，可不装设隔离开关。

（12）由地区电网供电的配电所电源进线处，宜装设供计费用的专用电压、电流互感器。

（13）变压器一次侧开关的装设，应符合下列规定：

1）以树干式供电时，应装设带保护的开关设备或跌落式熔断器；

2）以放射式供电时，宜装设隔离开关或负荷开关。当变压器在本配电所内时，可不装

设开关。

（14）变压器二次侧电压为6kV或3kV的总开关，可采用隔离开关或隔离触头。当属下列情况之一时，应采用断路器：

1）出线回路较多；

2）有并列运行要求；

3）有继电保护和自动装置要求。

（15）常见的10（6）kV变电所的主接线见表6－7、表6－8及图6－1。

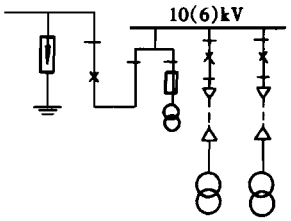
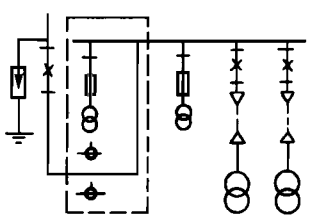
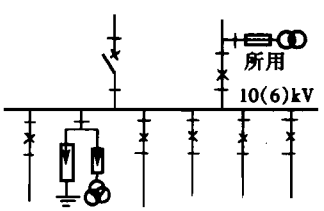
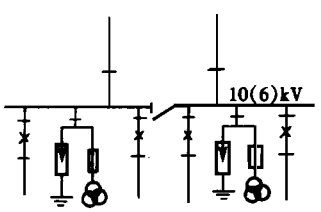
6.3.4 低压配电系统接线方式及特点

6.3.4.1 低压配电系统接线原则

（1）变压器低压侧（电压0.4kV）的总开关和母线分段开关宜采用低压断路器。

（2）当低压母线为双电源，变压器低压侧总开关和母线分段断路器（或单台变压器母线的联络线断路器）采用低压断路器时，在总断路器的出线侧及母线分段断路器（或联络线断路器）的两侧，宜装设刀开关或隔离触头。

表6－7　　10（6）kV配变电所常用主接线

设备名称	主接线简图	简要说明
带高压室的变电所		电源引自用电单位总变配电所，避雷器可以装在室外进线处
		电源引自电力系统装设的专用计量柜。若电力部门同意时，进线断路器也可以不装。 进线上的避雷器如为开关柜，则宜加隔离开关
单母线		电源引自电力系统，一路工作，一路备用。一般用于配电给二级负荷。 需要装设计量装置时，两回电源线路的专用计量柜均装设在电源线路的送电端
分段单母线（隔离开关受电）		适用于电源引自本企业的总配变电所，放射式接线，供二、三级负荷用电

续表

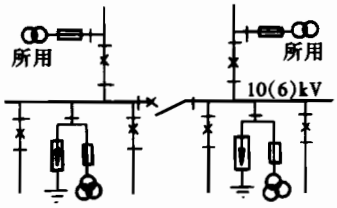
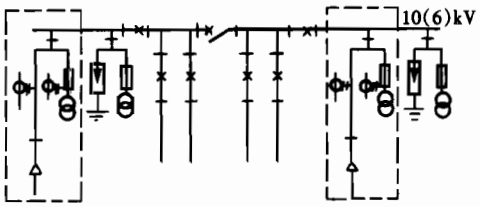
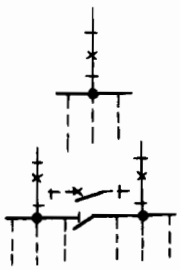
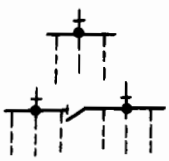
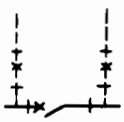
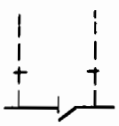
设备名称	主接线简图	简要说明
分段单母线（断路器受电）		适用于两路工作电源，分段断路器自动投入或出线回路较多的配变电所，供一、二级负荷用电。所用变压器是否装设视情况而定
		用于电源引自电力系统，须装设专供计费计量用电压互感器、电流互感器的配变电所

表 6－8　　10（6）kV 配变电所主要设备的配置

设备名称	简　图	使 用 条 件
10（6）kV 母线进线开关		（1）专用电源线引自电力系统时，宜采用断路器或熔断器负荷开关； （2）分配变电所的专用电源线引自用电单位总配变电所时，若需要带负荷操作或继电保护和自动装置有要求时，应采用断路器； （3）非专用电源线的进线侧，应装设带保护的开关设备
		（1）专用电源线的继电保护和自动装置若无要求，且出线回路少，无需带负荷操作时，也可采用隔离开关或隔离触头组； （2）分配变电所的专用电源线引自用电单位总变配电所时，如无需带负荷操作或继电保护和自动装置无要求时，宜采用隔离开关或隔离触头组
10（6）kV 母线分段开关		10（6）kV 母线的分断处宜装设断路器
		当不需带负荷操作且继电保护和自动装置无要求时，可装设隔离开关或隔离触头组

续表

设备名称	简　图	使 用 条 件
10（6）kV 配电引出线开关		（1）引出线开关设备宜采用断路器； （2）两配电所之间的联络线，应在供电侧配电所装设断路器，另侧装隔离开关或负荷开关，如两侧的供电可能性相同，应在两侧均装设断路器； （3）向频繁操作的高压用电设备供电的出线开关设备兼做操作开关设备时，应采用具有频繁操作性能的断路器
		（1）当满足保护和操作要求时，也可用带熔断器的负荷开关，例如辅助车间变压器容量≤500kVA或容量≤400kvar 的并联电容器组； （2）采用 10（6）kV 熔断器负荷开关固定式配电装置时，应在电源侧装设隔离开关
10（6）kV 出线侧线路隔离开关		（1）10（6）kV 固定式配电装置的出线侧，在架空出线回路或有反馈可能的电缆出线回路中，应装设隔离开关； （2）在没有反馈可能的线路，如电动机、电炉及低压侧与外部无联系的变压器，可不装设隔离开关

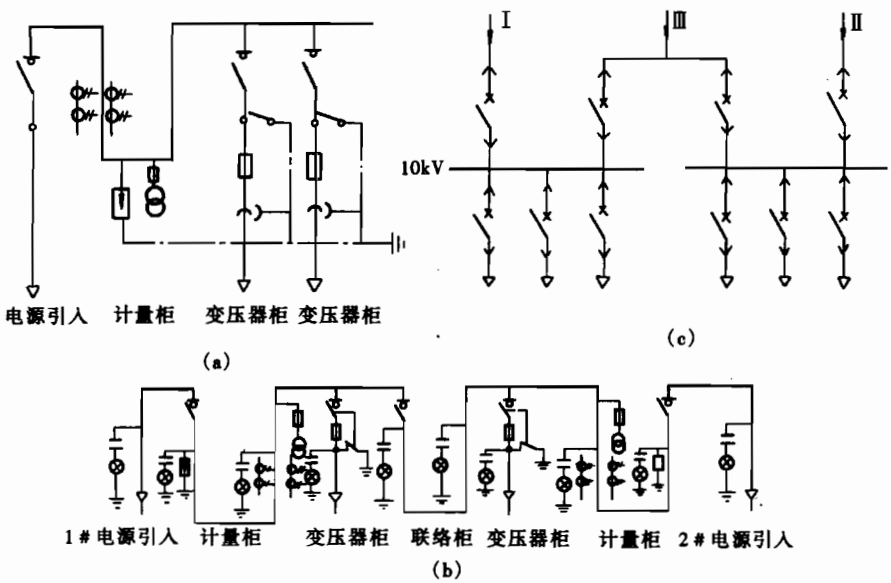


图 6-1　10（6）kV 变电所常用主接线

（a）单电源环网柜配电方式；（b）双电源环网柜配电方式；（c）高压三路电源接线方式

注：1.1#、2#电源引入柜与联络柜应有连锁，避免两路电源并列。

2. Ⅰ、Ⅱ电源为正常工作电源；Ⅲ电源为备用电源。

当低压母联断路器采用自投方式时，应符合下列要求：

1）应装设“自投自复”、“自投手复”、“自投停用”三种状态的位置选择开关；

2）低压母联断路器自投应有一定的延时（0～1s），当低压侧主断路器因过载及短路故障分闸时，不允许自动关合母联断路器；

3）低压侧主断路器与母联断路器应有电气联锁。

（3）应急电源（如柴油发电机）接入变电所低压配电系统时，应符合下列要求：

1）与外网电源间应设连锁，不得并网运行；

2）避免与外网电源的计费混淆；

3）在接线上要其有一定的灵活性，以满足在非事故情况下能供给部分重负荷用电的可能。

（4）低压配电电压采用220/380V。带电导体系统的型式宜采用单相二线制、两相三线制、三相三线制和三相四线制。

（5）在正常环境的车间或建筑物内，当大部分用电设备为中小容量，且无特殊要求时，宜采用树干式配电。

（6）当用电设备为大容量，或负荷性质重要，或在有特殊要求的车间、建筑物内，宜采用放射式配电。

（7）当部分用电设备距供电点较远，而彼此相距很近、容量很少的次要用电设备，可采用链式配电，但每一回路环链设备不宜超过5台，其总容量不宜超过10kW。容量较小用电设备的插座，采用链式配电时，每一条环链回路的设备数量可适当增加。

（8）在高层建筑物内，当向楼层各配电点供电时，宜采用分区树干式配电；但部分较大容量的集中负荷或重要负荷，应从低压配电室以放射式配电。

（9）平行的生产流水线或互为备用的生产机组，根据生产要求，宜由不同的回路配电；同一生产流水线的各用电设备，宜由同一回路配电。

（10）在TN系统[①]及TT系统[②]接地型式的低压电网中，宜选用D，yn11接线组别的三相变压器作为配电变压器。

（11）在TN系统及TT系统接地型式的低压电网中，当选用Y，yn0[③]接线组别的三相变压器时，其由单相不平衡负荷引起的中性线电流不得超过低压绕组额定电流的25%，且其一相的电流不得超过额定电流值。

（12）当采用220/380V的TN系统及TT系统接地型式的低压电网时，照明和其他电力设备宜由同一台变压器供电。必要时亦可单独设置照明变压器供电。

（13）由建筑物外引入的配电线路，应在室内靠近进线点便于操作维护的地方装设隔离电器。

6.3.4.2 常见低压配电系统接线方式及特点见表6－9、表6－10及图6－1～图6－3。

---

① TN系统：在此系统内，电源有一点与地直接连接，负荷侧电气装置的外露可导电部分则通过保护线（PE线）与该点连接。

② TT系统：在此系统内，电源有一点与地直接连接，负荷侧电气装置的外露可导电部分所连接的接地极和电源的接地极无电气联系。

③ Y，yn0接线组别的三相变压器是指表示其高压绕组为星形，低压绕组亦为星形且有中性点和“0”接线组别的三相变压器。

表 6-9　　10（6）kV 配变电所主要设备配置

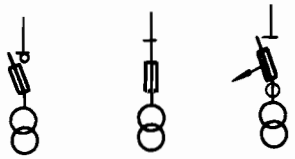
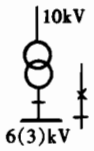
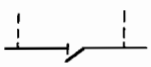
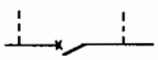
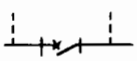
设备名称	简　图	使 用 条 件
10（6）/0.4kV 变压器高压侧开关设备		以树干式供电时，应用带熔断器的负荷开关，容量≤500kVA 时，可用隔离开关和熔断器；露天变电所的变压器容量≤630kVA 时，宜用跌落式熔断器
		以放射式供电时，宜用隔离开关或负荷开关，当变压器在本配变电所内或变压器电源侧开关和配电所属同一用电单位时，也可不装
10/6（3）kV 变压器二次侧总开关设备		可采用隔离开关或隔离触头组，但当出线回路较多，有并列运行要求，或有继电保护和自动装置要求时，应采用断路器
10（6）/0.4kV 变压器低压侧总开关设备		宜采用低压断路器，当有继电保护或自动切换电源要求时应采用低压断路器
		当低压母线为双电源，变压器低压侧总开关设备采用低压断路器时，在总开关设备的出线侧，宜装设刀开关或隔离触头组
		当无继电保护或自动切换电源要求且不需要带负荷操作时，可用隔离开关
220/380V 母线分段开关		低压母线分段开关设备，一般采用刀开关
		当有继电保护或自动切换电源要求时，应采用低压断路器
		当低压母线为双电源、母线分段开关采用低压断路器时，在母线分段开关的两侧宜装设刀开关或隔离触头

表 6－10　　多层建筑的低压配电方式

供电方式	照明配电系统接线图	简　要　说　明
由外部线路供电	电源线 正常照明　电力	适用于次要的或较小的建筑物，照明接于电力配电箱总断路器前
低压供电（多层建筑）	×层 ×层 ×层 ×层 二层 低压配电屏(箱)　一层	在多层建筑物内，一般采用干线式供电，总配电箱装在底层

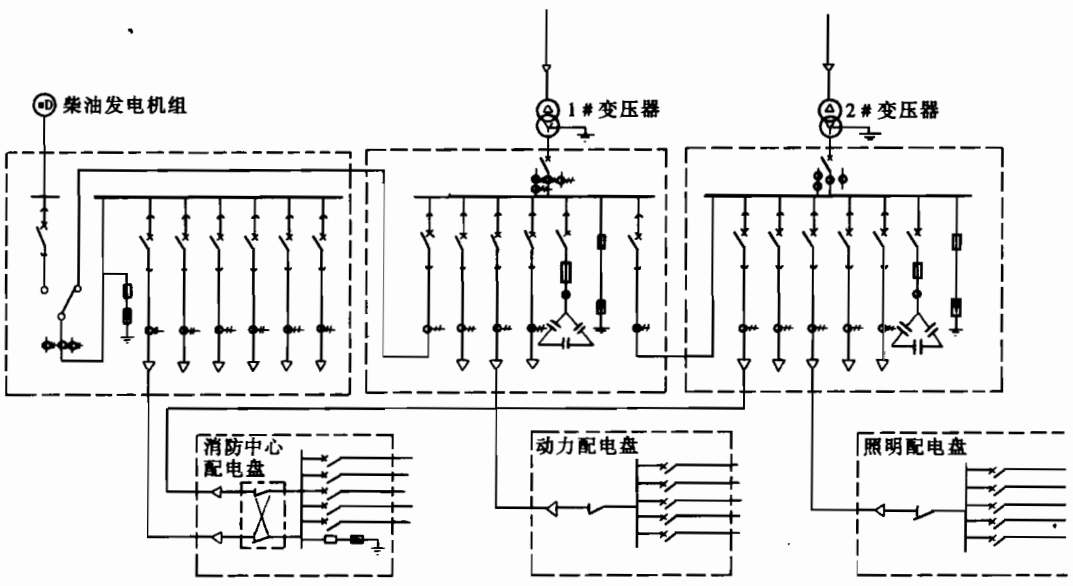


图 6－2　公共建筑配电系统（有自备应急发电机组）

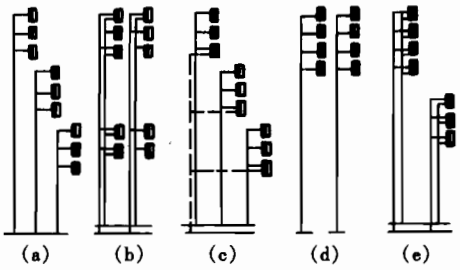


图 6-3 高层建筑的低压配电方式
(a) 单干线式；(b) 双干线式；
(c) 有公共备用干线的多干线式；
(d) 母干线式；(e) 双母干线式

6.4 无功补偿设计要求

6.4.1 无功补偿装置的设置原则

(1) 设计中应正确选择电动机、变压器的容量，减少线路感抗。在工艺条件适当时，可采用同步电动机以及选用带空载切除的间歇工作制设备等措施，以提高用电单位的自然功率因数。

(2) 当采用提高自然功率因数措施后，仍达不到下列要求时，应采用并联电力电容器作为无功补偿装置。

1) 高压供电的用电单位，功率因数为 0.9 以上。

2) 低压供电的用电单位，功率因数为 0.85 以上。

(3) 采用电力电容器作无功补偿装置时，宜采用就地平衡原则。低压部分的无功负荷由低压电容器补偿，高压部分的无功负荷由高压电容器补偿。容量较大、负荷平衡且经常使用的用电设备的无功负荷宜单独就地补偿。补偿基本无功负荷的电容器组，宜在配变电内集中补偿。居住区的无功负荷宜在小区变电所低压侧集中补偿。

(4) 对下列情况之一者，宜采用手动投切的无功补偿装置：

1) 补偿低压基本无功功率的电容器组。

2) 常年稳定的无功功率。

3) 配电所内的高压电容器组。

(5) 对下列情况之一者，宜装设无功自动补偿装置：

1) 避免过补偿，装设无功自动补偿装置在经济上合理时。

2) 避免在轻载时电压过高，造成某些用电设备损坏（例如灯泡烧毁或缩短寿命）等损失，而装设无功自动补偿装置在经济上合理时。

3) 必须满足在所有负荷情况下都能改善电压变动率，只有装设无功自动补偿装置才能达到要求时。

在采用高、低压自动补偿效果相同时，宜采用低压自动补偿装置。

(6) 无功自动补偿宜采用功率因数调节原则，并要满足电压变动率的要求。

(7) 电容器分组时，应符合下列要求：

1) 分组电容器投切时，不应产生谐振；

2) 适当减少分组组数和加大分组容量；

3) 应与配套设备的技术参数相适应；

4) 应满足电压波动的允许条件。

(8) 接到电动机控制设备负荷侧的电容器容量，不应超过为提高电动机空载功率因数到 0.9 所需的数值，其过电流保护装置的整定值，应按电动机—电容器组的电流来选择。并应符合下列要求：

1) 电动机仍在继续运转并产生相当大的反电势时，不应再起动。

2) 不应采用星—三角起动器。

3) 对吊车、电梯等机械负载可能驱动电动机的用电设备，不应采用电容器单独就地补

偿。

4）对需停电进行变速或变压的用电设备，应将电容器接在接触器的线路侧。

（9）高压电容器组宜串联适当的电抗器以减少合闸冲击涌流和避免谐波放大。有谐波源的用户，装设低压电容器时，宜采取措施，避免谐波造成过电压。

（10）高压供电的用电单位采用低压补偿时，高压侧的功率因数应满足供电部门的要求。

6.4.2 无功补偿容量的计算

功率因数计算：企业自然平均功率因数为

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{\beta_n Q_c}{\alpha_n P_c}\right)^2}} \tag{6-7}$$

式中 P_c——企业的计算有功功率，kW；

Q_c——企业的计算无功功率，kvar；

α_n、β_n——年平均有功、无功负荷系数，α_n 值一般取 0.7～0.75，β_n 值一般取 0.76～0.82。

采用人工补偿后，最大计算负荷的功率因数应在 0.9 以上。

已经进行生产的企业，其平均功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{W_m}{\sqrt{W_m^2 + W_{rm}^2}} = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{W_{rm}}{W_m}\right)^2}} \tag{6-8}$$

式中 W_m——月有功电能消耗量，即有功电能表的读数，kWh；

W_{rm}——月无功电能消耗量，即无功电能表的读数，kvarh。

补偿容量按无功负荷曲线或下式确定

$$Q_c = P_c(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2) \quad \text{kvar} \tag{6-9}$$

或

$$Q_c = P_c q_c \quad \text{kvar} \tag{6-10}$$

式中 $\mathrm{tg}\varphi_1$——补偿前计算负荷功率因数角的正切值；

$\mathrm{tg}\varphi_2$——补偿后功率因数角的正切值；

q_c——无功功率补偿率，kvar/kW，从设计手册查得。

补偿后的功率因数为

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{Q_c - Q}{P_c}\right)^2}} \tag{6-11}$$

式中 Q——人工补偿的无功功率，kvar。

6.5 谐波产生的原因及对电力系统的危害

（1）谐波的产生。在供用电系统中，通常总是希望交流电压和交流电流呈正弦波形。当正弦波电压施加在线性无源元件电阻、电感和电容上时，仍为同频率的正弦波。但当正弦电压施加在非线性电路时，电流就变为非正弦波，非正弦波电流在电网阻抗上产生压降，会使电压波形也变为非正弦波。对于非正弦波周期电压、电流，可分解为傅里叶级数，其中频率与工频相同的分量称为基波，频率为大于基波频率的分量 为谐波，谐波次数为谐波频率和基波频率整数比。如整流换流设备，电弧炉、电力机车、调光设备、日光灯、变频空调、可

控硅等均会产生多次谐波。

（2）谐波的危害。谐波对公用电网是一种污染，客观存在对公用电网和其他系统的危害大致有：

1）谐波使公用电网的元件产生了附加的谐波损耗，降低了发电、输电及用电设备的使用效率，大量的3次谐波电流流过中线时会使线路过热甚至发生火灾。

2）谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波对电动机的影响除引起附加损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，使变压器局部严重过热。谐波使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短以至损坏。

3）谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，这就使上述的危害大大增加，甚至引起严重事故。

4）谐波会导致继电保护和自动装置的误动作，并会使电气测量仪表计量不正确。

5）谐波会对邻近的通信系统产生干扰，轻者引起噪声，降低通信质量，重者导致信息丢失，使通信系统无法正常工作。

6.6 谐波电压、谐波电流的限值

（1）谐波电压限值、公用电网谐波电压（相电压）限值见表6－11。

表6－11　　谐波电压（相电压）限值表

电网标称电压（kV）	电压总谐波畸变率（%）	各次谐波电压含有率（%）	
		奇　次	偶　次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.0
10			
35	3.0	2.4	1.2

（2）注入公共连接点的谐波电流允许值见表6－12。

表6－12　　各次谐波电流允许值表

标准电压（kV）	谐波电流允许值（A）　谐波次数 / 基准短路容量（mVA）	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9

注　当电网短路容量与本表中的基准短路容量不同时，谐波电流允许值与电网的短路容量成正比。

6.7 抑制谐波的措施

（1）为控制各类非线性用电设备所产生的谐波引起的电网电压正弦波形畸变在合理范围内，宜采取下列措施：

1）各类大功率非线性用电设备变压器的受电电压有多种可供选择时，如选用较低电压不能符合要求，宜选用较高电压。

2）对大功率静止整流器，宜采取下列措施：

a. 宜提高整流变压器二次侧的相数和增加整流器的整流脉冲数。

b. 多台相数相同的整流装置，宜使整流变压器的二次侧有适当的相角差。

c. 宜按谐波次数装设分流滤波器。

3）选用 D，yn11[①] 接线组别的三相配电变压器。

（2）为降低三相低压配电系统的不对称度，设计低压配电系统应遵守下列规定：

1）220V 或 380V 单相用电设备接入 220V 或 380V 三相系统时，宜使三相平衡。

2）由地区公共低压电网供电的 220V 照明负荷，线路电流不超过 30A 时，可用 220V 单相供电，否则应以 220/380V 三相四线制供电。

① D，yn11 接线组别的三相配电变压器是指表示其高压绕组为三角形、低压绕组为星形且有中性点和“11”接线组别的三相配电变压器。

7 变配电所所址选择及电气设备布置

7.1 变电所所址选择的基本要求

7.1.1 35kV 变电所所址选择和所区布置

（1）变电所所址的选择，应根据下列要求，考虑确定：

1）靠近负荷中心；

2）节约用地，不占或少占耕地及经济效益高的土地；

3）与城乡或工矿企业规划相协调，便于架空和电缆线路的引入和引出；

4）交通运输方便；

5）环境宜无明显污秽，如空气污秽时，所址宜设在受污源影响最小处；

6）具有适宜的地质、地形和地貌条件（例如避开断层、滑坡、塌陷区、溶洞地带、山区风口和有危岩或易发生滚石的场所），所址宜避免选在有重要文物或开采后对变电所有影响的矿藏地点，否则应征得有关部门的同意；

7）所址标高宜在 50 年一遇高水位之上，否则，所区应有可靠的防洪措施或与地区（工业企业）的防洪标准相一致，但仍应高于内涝水位；

8）应考虑职工生活上的方便及水源条件；

9）应考虑变电所与周围环境、邻近设施的相互影响。

（2）变电所的总平面布置应紧凑合理。

（3）变电所宜设置不低于 2.2m 高的实体围墙。城网变电所、工业企业变电所围墙的高度及形式，应与周围环境相协调。

（4）变电所内为满足消防要求的主要道路宽度应为 3.5m。主要设备运输道路的宽度可根据运输要求确定，并应具备回车条件。

（5）变电所的场地设计坡度，应根据设备布置、土质条件、排水方式和道路纵坡确定，宜为 0.5%～2%，最小不应小于 0.3%，局部最大坡度不宜大于 6%，平行于母线方向的坡度，应满足电气及结构布置的要求。当利用路边明沟排水时，道路及明沟的纵向坡度最小不宜小于 0.5%，局部困难地段不应小于 0.3%；最大不宜大于 3%，局部困难地段不应大于 6%。

电缆沟及其他类似沟道的沟底纵坡，不宜小于 0.5%。

（6）变电所内的建筑物标高、基础埋深、路基和管线埋深，应相互配合；建筑物内地面标高，宜高出屋外地面 0.3m；屋外电缆沟壁，宜高出地面 0.1m。

（7）各种地下管线之间和地下管线与建筑物、构筑物、道路之间的最小净距，应满足安全、检修安装及工艺的要求，并宜符合《35～110kV 变电所设计规范》的附录一和附录二的

规定。

(8) 变电所所区场地宜进行绿化。绿化规划应与周围环境相适应并严防绿化物影响电气的安全运行。绿化宜分期、分批进行。

(9) 变电所排出的污水必须符合现行国家标准《工业企业设计卫生标准》的有关规定。

7.1.2 10 (6) kV 配变电所所址选择

(1) 配变电所位置选择，应根据下列要求综合考虑确定：

1) 接近负荷中心；

2) 进出线方便；

3) 接近电源侧；

4) 设备吊装、运输方便；

5) 不应设在有剧烈振动或高温的场所；

6) 不宜设在多尘、水雾（如大型冷却塔）或有腐蚀性气体的场所，如无法远离时，不应设在污染源的下风侧；

7) 不应设在厕所、浴室或其他经常积水场所的正下方且不宜与其贴邻。

8) 不应设在爆炸危险场所以内和不宜设在有火灾危险场所的正上方或正下方，如布置在爆炸危险场所范围以内和布置在与火灾危险场所的建筑物毗连时，应符合现行的《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》的规定。

9) 配变电所为独立建筑物时，不宜设在地势低洼和可能积水的场所。

10) 高层建筑地下层配变电所的位置，宜选择在通风、散热条件较好的场所。

11) 配变电所位于高层建筑（或其他地下建筑）的地下室时，不宜设在最底层。当地下仅有一层时，应采取适当抬高该所地面等防水措施，并应避免洪水或积水从其他渠道淹渍配变电所的可能性。

(2) 装有可燃性油浸电力变压器的变电所，不应设在耐火等级为三、四级的建筑中。

(3) 在无特殊防火要求的多层建筑中，装有可燃性油的电气设备的配变电所，可设置在底层靠外墙部位，但不应设在人员密集场所的正上方、正下方、贴邻或疏散出口的两旁。

(4) 高层建筑的配变电所，宜设置在地下层或首层；当建筑物高度超过 100m 时，也可在高层区的避难层或上技术层内设置变电所。

(5) 一类高、低层主体建筑内，严禁设置装有可燃性油的电气设备的配变电所。二类高、低层主体建筑内不宜设置装有可燃性油的电气设备的配变电所，如受条件限制必须设置时可采用难燃性油的变压器，应设在首层靠外墙部位或地下一层，且不应设在人员密集场所的正上方、正下方、贴邻或出口的两旁，并应采取相应的防火和排油措施。

(6) 大、中城市除居住小区的杆上变电所外，民用建筑中不宜采用露天或半露天的变电所，如确因需要设置时，宜选用带防护外壳的户外成套变电所。

(7) 露天或半露天的变电所，不应设置在下列场所：

1) 有腐蚀性气体的场所；

2) 挑檐为燃烧体或难燃体和耐火等级为四级的建筑物旁；

3) 附近有棉、粮及其他易燃、易爆物品集中的露天堆场；

4) 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维、灰尘或导电尘埃且严重影响变压器安全运行的场所。

7.2 变电所布置的设计要求

7.2.1 变配电所型式和布置

（1）35/10（6）kV 变电所分屋内式和屋外式。屋内式运行维护方便，占地面积少。在选择 35kV 总变电所的型式时，应考虑所在地区的地理情况和环境条件，因地制宜；技术经济合理时，应优先选用占地少的型式。35kV 变电所宜用屋内式。

（2）配电所一般为独立式建筑物，也可与所带 10（6）kV 变电所一起附设于负荷较大的厂房或建筑物。

（3）变电所的型式应根据用电负荷的状况和周围环境情况确定，并应符合下列规定：

1）负荷较大的车间和站房，宜设附设变电所或半露天变电所；

2）负荷较大的多跨厂房，负荷中心在厂房的中部且环境许可时，宜设车间内变电所或组合式成套变电站；

3）高层或大型民用建筑内，宜设室内变电所或组合式成套变电站；

4）负荷小而分散的工业企业和大中城市的居民区，宜设独立变电所，有条件时也可设附设变电所或户外箱式变电站；

5）环境允许的中小城镇居民区和工厂的生活区，当变压器容量在 315kVA 及以下时，宜设杆上式或高台式变电所。

7.2.2 变配电所布置

7.2.2.1 一般要求

（1）带可燃性油的高压配电装置，宜装设在单独的高压配电室内。当高压开关柜的数量为 6 台及以下时，可与低压配电屏设置在同一房间内。

（2）不带可燃性油的高、低压配电装置和非油浸的电力变压器，可设置在同一房间内。

具有符合 IP3X 防护等级外壳的不带可燃性油的高、低压配电装置和非油浸的电力变压器，当环境允许时，可相互靠近布置在车间内。

注：IP3X 防护要求应符合现行国家标准《低压电器外壳防护等级》的规定，能防止直径大于 2.5mm 的固体异物进入壳内。

（3）室内变电所的每台油量为 100kg 及以上的三相变压器，应设在单独的变压器室内。

（4）在同一配电室内单列布置高、低压配电装置时，当高压开关柜或低压配电屏顶面有裸露带电导体时，两者之间的净距不应小于 2m；当高压开关柜和低压配电屏的顶面封闭外壳防护等级符合 IP2X 级时，两者可靠近布置。

注：IP2X 防护要求应符合现行国家标准《低压电器外壳防护等级》的规定，能防止直径大于 12mm 的固体异物进入壳内。

（5）有人值班的配电所，应设单独的值班室。当低压配电室兼作值班室时，低压配电室面积应适当增大。

高压配电室与值班室应直通或经过通道相通，值班室应有直接通向户外或通向走道的门。

（6）变电所宜单层布置。当采用双层布置时，变压器应设在底层。

设于二层的配电室应设搬运设备的通道、平台或孔洞。

（7）高（低）压配电室内，宜留有适当数量配电装置的备用位置。

（8）高压配电装置的柜顶为裸母线分段时，两段母线分段处宜装设绝缘隔板，其高度不

应小于 0.3m。

(9) 由同一配电所供给一级负荷用电时，母线分段处应设防火隔板或有门洞的隔墙。供给一级负荷用电的两路电缆不应通过同一电缆沟，当无法分开时，该电线沟内的两路电缆应采用阻燃性电缆，且应分别敷设在电缆沟两侧的支架上。

(10) 户外箱式变电站和组合式成套变电站的进出线宜采用电缆。

(11) 配电所宜设辅助生产用房。

(12) 室内、外配电装置的最小电气安全净距，应符合表 7-1 的规定。

表 7-1　　室内、外配电装置的最小电气安全净距　　单位：mm

符号	适用范围	场所	额定电压（kV）			
			<0.5	3	6	10
	无遮栏裸带电部分至地（楼）面之间	室内	屏前 2500 屏后 2300	2500	2500	2500
		室外	2500	2700	2700	2700
	有 IP2X 防护等级遮栏的通道净高	室内	1900	1900	1900	1900
A	裸带电部分至接地部分和不同相的裸带电部分之间	室内	20	75	100	125
		室外	75	200	200	200
B	距地（楼）面 2500mm 以下裸带电部分的遮栏防护等级为 IP2X 时，裸带电部分与遮护物间水平净距	室内	100	175	200	225
		室外	175	300	300	300
	不同时停电检修的无遮栏裸导体之间的水平距离	室内	1875	1875	1900	1925
		室外	2000	2200	2200	2200
	裸带电部分至无孔固定遮栏	室内	50	105	130	155
C	裸带电部分至用钥匙或工具才能打开或拆卸的栅栏	室内	800	825	850	875
		室外	825	950	950	950
	低压母排引出线或高压引出线的套管至屋外人行通道地面	室外	3650	4000	4000	4000

注　海拔高度超过 1000m 时，表中符号 A 项数值应按每升高 100m 增大 1% 进行修正。B、C 两项数值应相应加上 A 项的修正值。

7.2.2.2　变压器室

(1) 变压器外廓（防护外壳）与变压器室墙壁和门的净距不应小于表 7-2 所列数值。干式变压器的金属网状遮栏，其防护等级不低于 IP1X，遮栏高度不低于 1.70m。

表 7-2　　变压器外廓（防护外壳）与变压器室墙壁和门的最小净距

项目 \ 变压器容量（kVA） / 净距（m）	100～1000	1250～1600
油浸变压器外廓与后壁、侧壁净距	0.60	0.80
油浸变压器外廓与门净距	0.80	1.00

续表

项目 \ 变压器容量（kVA） / 净距（m）	100～1000	1250～1600
干式变压器带有 IP2X 及以上防护等级金属外壳与后壁、侧壁净距	0.60	0.80
干式变压器有金属网状遮栏与后壁、侧壁净距	0.60	0.80
干式变压器带有 IP2X 及以上防护等级金属外壳与门净距	0.80	1.00
干式变压器有金属网状遮栏与门净距	0.80	1.00

注 1. 表中各值不适用于制造厂的成套产品；

2. 网状遮栏内与高、低压导电体之间的值见表 7－3。

（2）对于就地检修的室内油浸变压器，室内高度可按吊芯所需的最小高度再加 0.70m；宽度可按变压器两侧各加 0.80m 确定。

（3）多台干式变压器布置在同一房间内时，变压器防护外壳间的净距不应小于表 7－4 所列数值。

表 7－3　　屋内配电装置的最小安全净距

项目 \ 额定电压（kV） / 最小净距（mm）	3	6	10
带电部分至接地部分（A_1）	75	100	125
不同相的带电部分之间（A_2）	75	100	125
（1）带电部分至栅栏（B_1） （2）交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间	825	850	875
带电部分至网状遮栏（B_2）	175	200	225
无遮栏裸导体至地（楼）面（C）	2500	2500	2500
不同时停电检修的无遮栏裸导体之间的水平净距（D）	1875	1900	1925
出线套管至屋外通道的路面（E）	4000	4000	4000

注 1. 海拔高度超过 1000m 时，本表所列 A 值应按每升高 100m 增大 1% 进行修正，B、C、D 值应分别增加 A 值的修正差值，当为板状遮栏时，其 B_2 值可取 A_1+30mm。

2. 本表所列各值不适用于制造厂生产的产品。

表 7－4　　变压器防护外壳间的最小净距

项目 \ 变压器容量（kVA） / 净距（m）		100～1000	1250～1600
变压器侧面具有 IP2X 防护等级及以上的金属外壳	A②	0.60	0.80
变压器侧面具有 IP4X 防护等级以上的金属外壳	A	可贴邻布置	可贴邻布置
考虑变压器外壳之间有一台变压器拉出防护外壳	B①	变压器宽度 b 加 0.60	变压器宽度 b 加 0.60
不考虑变压器外壳之间有一台变压器拉出防护外壳	B	1.00	1.20

①变压器外壳的门应为可拆卸式，当变压器外壳的门为不可拆卸式时其 B 值应是门扇的宽度 c 加变压器宽度 b 之和再加 0.30m，见图 7－2。

②A 值变压器外壳水平之间距离，见图 7－1。

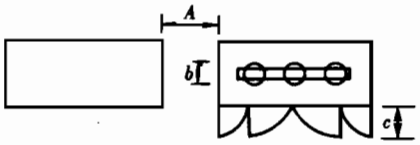


图 7-1　多台干式变压器之间 *A* 值

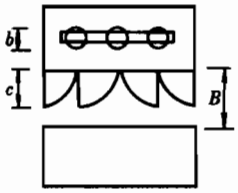


图 7-2　多台干式变压器之间 *B* 值

(4) 露天或半露天变电所的变压器四周应设不低于 1.7m 高的固定围栏（墙）。变压器外廓与围栏（墙）的净距不应小于 0.8m，变压器底部距地面不应小于 0.3m，相邻变压器外廓之间的净距不应小于 1.5m。

(5) 当露天或半露天变压器供给一级负荷用电时，相邻的可燃油油浸变压器的防火净距不应小于 5m，若小于 5m 时，应设置防火墙。防火墙应高出油枕顶部，且墙两端应大于挡油设施各 0.5m。

7.2.2.3　高、低压配电装置室

(1) 高压配电室内各种通道最小宽度，应符合表 7-5 的规定。

表 7-5　　高压配电室内各种通道最小宽度

开关柜布置方式	柜后维护通道宽度（mm）	柜前操作通道宽度（mm）	
		固定式	手车式
单排布置	800	1500	单车长度 + 1200
双排面对面布置	800	2000	双车长度 + 900
双排背对背布置	1000	1500	单车长度 + 1200

注　1. 固定式开关柜为靠墙布置时，柜后与墙净距应大于 50mm，侧面与墙净距应大于 200mm。

2. 通道宽度在建筑物的墙面遇有柱类局部凸出时，凸出部位的通道宽度可减少 200mm。

3. 当采用 35kV 手车式开关柜时，柜后通道不宜小于 1.0m。

(2) 屋内布置的 GIS 应设置通道，宽度应满足运输部件的需要，但不宜小于 1.5m。屋外布置的 GIS 通道宽度应根据现场作业要求确定。

(3) 配电装置的长度大于 6m 时，其柜（屏）后通道应设两个出口，低压配电装置两个出口间的距离超过 15m 时，尚应增加出口。

(4) 当电源从柜（屏）后进线且需在柜（屏）正背后墙上另设隔离开关及其手动操动机构时，柜（屏）后通道净宽不应小于 1.5m，当柜（屏）背面的防护等级为 IP2X 时，可减为 1.3m。

(5) 低压配电室内成排布置的配电屏，其屏前、屏后的通道最小宽度，应符合表 7-6的规定。

表 7-6　　配电屏前、后通道最小宽度

型式	布置方式	屏前通道宽度（mm）	屏后通道宽度（mm）
固定式	单排布置	1500	1000
	双排面对面布置	2000	1000
	双排背对背布置	1500	1500
抽屉式	单排布置	1800	1000
	双排面对面布置	2300	1000
	双排背对背布置	1800	1000

注　当建筑物墙面遇有柱类局部凸出时，凸出部位的通道宽度可减少 200mm。

7.2.2.4　电容器室

(1) 室内高压电容器装置宜设置在单独房间内，当电容器组容量较小时，可设置在高压

配电室内，但与高压配电装置的距离不应小于1.5m。

低压电容器装置可设置在低压配电室内，当电容器总容量较大时，宜设置在单独房间内。

(2) 安装在室内的装配式高压电容器组，下层电容器的底部距地面不应小于0.2m，上层电容器的底部距地面不宜大于2.5m，电容器装置顶部到屋顶净距不应小于1.0m。高压电容器布置不宜超过三层。

(3) 电容器外壳之间（宽面）的净距，不宜小于0.1m。电容器的排间距离，不宜小于0.2m。

(4) 装配式电容器组单列布置时，网门与墙距离不应小于1.3m；当双列布置时，网门之间距离不应小于1.5m。

(5) 成套电容器柜单列布置时，柜正面与墙面距离不应小于1.5m；当双列布置时，柜面之间距离不应小于2.0m。

7.2.2.5 控制室

(1) 控制室应位于运行方便、电缆较短、朝向良好和便于观察屋外主要设备的地方。

(2) 控制屏（台）的排列布置，宜与配电装置的间隔排列次序相对应。

(3) 控制室的建筑，应按变电所的规划容量在第一期工程中一次建成。

(4) 无人值班变电所的控制室，应适当简化，面积应适当减小。

7.2.3 对相关专业的要求

(1) 可燃油油浸电力变压器室的耐火等级应为一级。非燃（或难燃）介质的电力变压器室、高压配电装置室和高压电容器室的耐火等级不应低于二级。低压配电装置和低压电容器室的耐火等级不应低于三级。

(2) 有下列情况之一时，变压器室的门应为防火门：

1) 变压器室位于高层主体建筑物内。

2) 变压器室附近堆有易燃物品或通向汽车库。

3) 变压器位于建筑物的二层或更高层。

4) 变压器位于地下室或下面有地下室。

5) 变压器室通向配电装置室的门。

6) 变压器室之间的门。

(3) 变压器室的通风窗，应采用非燃烧材料。

(4) 配电装置室及变压器室门的宽度宜按最大不可拆卸部件宽度加0.30m，高度宜按不可拆卸部件最大高度加0.30m。

(5) 有下列情况之一时，油浸变压器室应设置容量为100%变压器油量的挡油设施或设置能将油排到安全处所的设施：

1) 变压器室附近有易燃物品堆积的场所。

2) 变压器室下面有地下室。

3) 变压器室位于民用主体建筑内。

(6) 配变电所中消防设施的设置：一类建筑的配变电所宜设火灾自动报警及固定式灭火装置；二类建筑的配变电所可设火灾自动报警及手提式灭火装置。

(7) 当配电装置室设在楼上时，应设吊装设备的吊装孔或吊装平台。吊装平台、门或吊装孔的尺寸，应能满足吊装最大设备的需要，吊钩与吊装孔的垂直距离应满足吊装最高设备

的需要。

（8）高压配电室和电容器室，宜设不能开启的自然采光窗，窗户下沿距室外地面高度不宜小于1.80m。临街的一面不宜开窗。

（9）变压器室、配电装置室、电容器室的门应向外开，并装有弹簧锁。装有电气设备的相邻房间之间有门时，此门应能双向开启或向低压方向开启。

（10）配变电所各房间经常开启的门窗，不应直通相邻的酸、碱、蒸汽、粉尘和噪声严重的建筑。

（11）当变压器室、电容器室采用机械通风且周围环境污秽时，宜加空气过滤器。

（12）变压器室、配电装置室、电容器室等应有防止雨、雪和小动物从采光窗、通风窗、门、电缆沟等进入屋内的措施。

（13）配电装置室、电容器室和各辅助房间的内墙表面均应抹灰刷白。配电装置室、变压器室、电容器室的顶棚及变压器室的内墙面应刷白。地（楼）面宜采用高标号水泥抹面压光或用水磨石地面。

（14）长度大于7m的配电装置室应设两个出口，并宜布置在配电室的两端。若两个出口之间的距离超过60m时，尚应增加出口。

楼上、楼下均为配电装置室时，位于楼上的配电装置室至少应设一个出口通向室外的平台或通道。

（15）配变电所的电缆沟和电缆室，应采取防水排水措施。当配变电所设置在地下室时，其进出地下室的电缆口必须采取有效的防水措施。

（16）变压器室宜采用自然通风，夏季的排风温度不宜高于45℃，进风和排风的温差不宜大于15℃。

（17）电容器室应有良好的自然通风，通风量应根据电容器温度类别按夏季排风温度不超过电容器所允许的最高环境空气温度计算。当自然通风不满足排热要求时，可采用自然进风和机械排风方式。电容器室内应有反映室内温度的指示装置。

（18）变压器室、电容器室当采用机械通风或配变电所位于地下室时，其通风管道应采用非燃烧材料制作。如周围环境污秽时，宜加空气过滤器（进风口处）。

（19）有条件时配电装置室宜采用自然通风。高压配电装置室装有较多油断路器时，宜装设事故排烟装置。

（20）在采暖地区，控制室（值班室）应采暖，采暖计算温度为18℃。在特别严寒地区的配电装置室装有电度表时应设采暖。采暖计算温度为5℃。

控制室和配电装置室内的采暖装置，宜采用钢管焊接，且不应有法兰、螺纹接头和阀门等。

（21）位于炎热地区的配变电所，屋面应有隔热措施。控制室（值班室）宜考虑通风，有条件时可接入空调系统。

（22）位于地下室的配变电所，其控制室（值班室）应保证运行和卫生条件，当不能满足要求时，宜装设通风系统或空调装置。

（23）变压器室、电容器室、配电装置室、控制室内不应有与其无关的管道、明敷线路通过。

（24）装有六氟化硫的配电装置、变压器的房间其排风系统要考虑有底部排风口。

（25）有人值班的配变电所，宜设有上、下水设施。

(26) 在配电装置室内裸导体上空布置灯具时，灯具的水平投影与裸导体的净距应大于1m。灯具不应采用软线吊装或链吊装。

(27) 干式变压器室、配电装置室、控制室、电容器室当设置在地下层时，在高潮湿场所，宜设置吸湿机或在装置内加装去湿电加热器，在地下室内并应有排水设施。

7.3 配电装置布置设计

7.3.1 3～110kV 配电装置的安全净距

屋外配电装置的安全净距应符合表 7－14 的规定，并按图 7－4～图 7－6 进行校验。

当电气设备外绝缘体最低部位距地面小于 2.5m 时，应装设固定遮栏。

屋外配电装置使用软导线时，在不同条件下，带电部分至接地部分和不同相带电部分之间的安全净距，应根据表 7－15 进行校验，并应采取其中最大数值。

屋内配电装置的安全净距应符合表 7－16 的规定，并按图 7－7 和图 7－8 进行校验。

当电气设备外绝缘体最低部位距地面小于 2.3m 时，应装设固定遮栏。

配电装置中相邻带电部分的额定电压不同时，应按高的额定电压确定其安全净距。

配电装置中相邻带电部分的上面和下面，不应有照明、通信和信号线路架空跨越或穿过；屋内配电装置裸露带电部分的上面不应有明敷的照明或动力线路跨越。

7.3.2 3～110kV 配电装置的型式选择及布置

配电装置型式的选择，应考虑所在地区的地理情况及环境条件，通过技术经济比较，优先选用占地少的配电装置型式。

35kV 配电装置一般有屋内配电装置和屋外配电装置。

屋外布置形式有高型、半高型、中型和低型的，现一般采用中型的。屋内布置方式中一般采用成套开关柜布置方式。

35kV 两种配电装置比较，在经济上两者总投资基本接近，因屋内式电气投资较屋外式略少，而土建投资又稍高于屋外式；但屋内式具有节约用地、便于运行维护、防污性能好等优点，因此在选型时一般采用屋内配电装置。

110kV 配电装置一般有普通中型配电装置、半高型配电装置、高型配电装置三种型式及屋内配电装置型式。

普通中型配电装置是将所有电气设备都安装在地面设备支架上，母线下不布置任何电气设备。

半高型配电装置是将母线及母线隔离开关抬高，将断路器、电流互感器等电气设备布置在母线的下面。

高型配电装置的特点是将母线和隔离开关上下重叠布置，母线下面没有电气设备。

屋内配电装置的特点是将母线、隔离开关等电气设备上下重叠布置在室内，也可采用 SF_6 全封闭组合电器（简称 GIS）。

各型 110kV 配电装置中屋外半高型能大幅度节约用地，能够满足施工、运行和检修的要求，所以在设计选型时，除污秽地区、市区和地震烈度为 8 度及以上地区外，一般宜优先选用屋外半高型配电装置。

110kV 屋外高型配电装置由于钢材耗量大，土建费用多，安装检修及运行维护条件均较差，故在 110kV 电压等级中较少采用。

市区或污秽地区的 35～110kV 配电装置宜采用屋内配电装置；

大城市中心地区或其他环境特别恶劣地区，110kV 配电装置可采用 GIS。

GIS 宜采用室内布置。当 GIS 采用室外布置时，应考虑气温、日温差、日照、冰雹及腐蚀等环境条件的影响。

7.3.3 通道与围栏

配电装置的布置，应便于设备的操作、搬运、检修和试验。

屋外配电装置应设置必要的巡视小道及操作地坪。

配电装置室内各种通道的最小宽度（净距）应符合表 7－7 的规定。

表 7－7 配电装置室内各种通道的最小宽度 单位：mm

通道类型 / 布置方式	维护通道	操作通道	
		固定式	手车长
设备单列布置	800	1500	单车长＋1200
设备双列布置	1000	2000	双车长＋900

屋内布置的 GIS 应设置通道。其通道宽度应满足运输部件的需要，但不宜小于 1.5m。屋外布置的 GIS，其通道宽度应根据现场作业要求确定。

设置于屋内的油浸变压器，其外廓与变压器室四壁的最小净距应符合表 7－8 的规定。

表 7－8 油浸变压器外廓与变压器室四壁的最小净距 单位：mm

变压器容量（kVA）	1000 及以下	1250 及以上
变压器与后壁、侧壁之间	600	800
变压器与门之间	800	1000

对于就地检修的屋内油浸变压器，变压器室的室内高度可按吊芯所需的最小高度再加 700mm，宽度可按变压器两侧各加 800mm 确定。

设置于屋内的干式变压器，其外廓与四周墙壁的净距不应小于 0.6m，干式变压器之间的距离不应大于 1m，并应满足巡视维修的要求。

全封闭型的干式变压器可不受上述距离的限制。

厂区内的屋外配电装置，其周围应设置围栏，高度不应小于 1.5m。

配电装置中电气设备的栅状遮栏高度，不应小于 1.2m，栅状遮栏最低栏杆至地面的净距，不应小于 200mm。配电装置中电气设备的网状遮栏高度，不应小于 1.7m，网状遮栏网孔不应大于 40mm×40mm。网栏门应装锁。

在安装有油断路器的屋内间隔内除设置遮栏外，对就地操作的油断路器及隔离开关，应在其操作机构处设置防护隔板，宽度应满足人员操作的范围，高度不应小于 1.9m。

7.3.4 防火与蓄油设施

3～35kV 双母线布置的屋内配电装置，母线与母线隔离开关之间宜装设耐火隔板。

当电压等级为 3～35kV 时，屋内断路器、油浸电流互感器和电压互感器宜装设在两侧有隔墙（板）的间隔内；当电压等级为 63～110kV 时，屋内断路器、油浸电流互感器和电压互感器应装设在有防爆隔墙的间隔内。

总油量超过 100kg 的屋内油浸电力变压器，宜装设在单独的防爆间内，并应设置消防设施。

屋内单台电气设备总油量在 100kg 以上应设置储油设施或挡油设施。挡油设施宜按容纳 20%油量设计，并应有将事故油排至安全处的设施。当事故油无法排至安全处时，应设置能容纳 100%油量的储油设施。排油管内径的选择应能尽快将油排出，但不应小于 100mm。

在防火要求较高的场所，有条件时宜选用不燃或难燃的变压器。

在高层民用建筑中，设置在首层或地下层的变压器不宜选用油浸变压器，设置在其他层的变压器严禁选用油浸变压器。

布置在高层民用主体建筑中的配电装置，亦不宜采用具有可燃性能的断路器。

主变压器等充油电气设备，当单个油箱的油量在1000kg以上，应同时设置储油坑及总事故油池，其容量分别不小于单台设备油量的20%及最大单台容量的60%。储油坑的长宽尺寸宜较设备外廓尺寸每边大1m，总事故储油池应有油水分离的功能，其出口应引自安全处所。

主变压器的油释放装置或防爆管，其出口宜引至储油坑的排油口处。

储油池的四周，应高出地面100mm。储油池内宜铺设厚度不小于250mm的卵石层，其卵石直径为50～80mm。

油重为2500kg以上的屋外油浸变压器之间无防火墙时，其最小防火净距应符合表7－9的规定。

表7－9　油浸变压器最小防火净距

电压等级（kV）	最小防火净距（m）
35及以下	5
63	6
110	8

当屋外油浸变压器之间需设置防火墙时，防火墙的高度不宜低于变压器油枕的顶端高度，防火墙的两端应分别大于变压器储油池的两侧各0.5m。屋外油浸变压器与油量在600kg以上的本回路充油电气设备之间的防火净距不应小于5m。

当火灾危险类别为丙、丁、戊类的生产建筑物外墙距屋外油浸变压器外廓5m以内时，在变压器高度以上3m的水平线以下及外廓两侧各加3m的外墙范围内，不应有门、窗或通风孔。当建筑物外墙距变压器外廓为10m以内时，可在外墙上设防火门，并可在变压器高度以上设非燃烧性的固定窗。

3～10kV变压器油量在1000kg以下时，其外廓两侧可减为各加1.5m。

变电所内建筑物、构筑物的耐火等级，不应低于规范（GB 50059—1992）《35～110kV变电所设计规范》附录九的要求。

变电所与所外的建筑物、堆场、储罐之间的防火净距，应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》的规定。变电所内部的设备之间、建筑物之间及设备与建筑物、构筑物之间的最小防火净距应符合GB 50059—1992附录十的规定。

变电所应根据容量大小及其重要性。对主变压器等各种带油电气设备及建筑物，配备适当数量的手提式及推车式化学灭火器。对主控制室等设有精密仪器、仪表设备的房间，应在房间内或附近走廊内配置灭火后不会引起污损的灭火器。

电缆从室外进入室内的入口处、电缆竖井的出入口及主控制室与电缆层之间，应采取防止电缆火灾蔓延的阻燃及分隔措施。

设在城市市区的无人值班变电所，宜设置火灾检测装置并遥信有关单位。对特别重要场所的无人值班变电所，可以装设自动灭火装置。

7.4　特殊地区配电装置

7.4.1　污秽地区配电装置

为了保证处于工业污秽、盐雾等污秽地区电气设备的安全运行，在进行配电装置设计时，必须采取有效措施，防止发生污闪事故。

7.4.1.1　污秽等级：

污秽等级主要由污染源特征、等值附盐密度，并结合运行经验确定。发电厂、变电所污秽分级标准见表7－10。

表 7－10　　发电厂、变电所污秽分级标准

污秽等级	污秽条件			泄漏比距（cm/kV）
	污湿特征	盐密（mg/cm²）	中性点直接接地	中性点非直接接地
1	大气无明显污染地区或大气轻度污染地区；在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	0～0.03（强电解质） 0～0.06（弱电解质）	1.7	2.0
2	大气中等污染地区；沿海地带及盐场附近；在污闪季节中多雾（含毛毛雨）且雨量较少	0.03～0.25	2.5	3.0
3	大气严重污染地区；严重盐雾地区	>0.25	3.5	4.0

注　1. 盐密指由普通悬式绝缘子（X－4.5型）所组成的悬垂串上测得值。

2. 化工厂及冶金厂附近的发变电所，可根据污源所排放的导电气体和导电金属粉尘的严重程度分别列为2级或3级污秽。

3. 有冷水塔的发电厂，其污秽等级可根据电厂烟囱的除尘效率及冷水塔是否装设除水器等条件，确定列为2级或3级污秽。

4. 泄漏比距计算取系统额定线电压。

5. 本表引自水利电力部部颁标准（1985年）。另外，国家标准《高压电力设备外绝缘污秽等级》（GB 5582—1985）为电力设备制造部门对产品进行设计和定型试验的依据，而不是电力系统设计、施工和运行维护部门应用的工程建设规范。

7.4.1.2　污秽地区配电装置的要求及防污闪措施：

表 7－11　屋外配电装置与各类污染源之间的最小距离

污染源类别	与污染源之间的最小距离（km）
制铝厂	2
化肥厂	1～2
化工厂和冶金厂	1.5
化工厂和一般厂	0.8
冶金厂和钢厂	0.6～1.0
一般厂	0.5
冶金厂	0.6
水泥厂	0.5

（1）尽量远离污染源。发电厂、变电所配电装置的位置，在条件许可的情况下，应尽量远离污染源，并且应使配电装置在潮湿季节处于污染源的上风向。表7－11为屋外配电装置和各类污染源之间的最小距离。

（2）尽量减少火力发电厂烟囱及冷却塔对配电装置的污染。新建火力发电厂的烟囱，应装除尘设备，烟囱的高度及排放量必须符合GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》的要求。对有冷却塔的发电厂，必须根据冷却塔的高度、容量和气象条件等，合理确定配电装置的位置，保持必要的距离，并尽量将配电装置布置在冷水塔冬季主导风向的上风侧。冷却塔应装除水器，尽量减少水汽污染。

（3）合理选择配电装置型式。6～35kV配电装置一般都采用屋内配电装置；63～110kV配电装置处于2级及以上污秽区时，宜采用屋内配电装置；当技术经济合理时，220kV配电装置也可采用屋内型。

在重污秽地区，经过技术经济分析，也可采用SF_6全封闭电器。

（4）增大电瓷外绝缘的有效泄漏距离或选用防污型产品。污秽地区电瓷外绝缘的有效泄漏距离应不小于表7－10的规定值。

电瓷尽量选用防污型产品。防污型产品除有效泄漏距离较大外，其表面材料或造型也有利于防污。如采用半导体釉、大小伞、大倾角、钟罩式等特制瓷套和绝缘子。

污秽地区配电装置的悬垂绝缘子串的绝缘子片数应与耐张绝缘子串相同。

(5) 采用防污涂料。对于污秽严重地区，在绝缘瓷件表面敷防污油脂涂料也是有效的防污措施之一。目前采用的防污涂料主要有矿脂涂料和有机硅涂料两类。

地蜡是矿脂涂料的一种，其性能稳定，有较长的使用寿命，一般可达 3～5 年，价格便宜。但地蜡涂料只能浸涂，多用于悬式绝缘子。另外，地蜡对金属粉尘和水泥污秽的使用效果不好。

有机硅涂料使用效果较好，硅油的有效期一般为 3～6 个月；硅脂的有效期可达 1 年。有机硅涂料的价格较贵，多用于重污秽地区的配电装置。

(6) 加强运行维护。加强运行维护是防止污闪事故的重要环节。除运行单位定期进行停电清扫外，在进行重污秽地区配电装置设计时，应考虑带电水冲洗。

7.4.2 高烈度地震区配电装置

我国地震区分布较广泛、震源浅、烈度高。大地震使配电装置和电气设备遭受严重破坏，造成大面积、长时间停电，不仅给国民经济造成巨大损失，而且直接影响抗震救灾工作及恢复生产。因此，在进行高烈度地震区的配电装置设计时，必须进行抗震计算和采取有效的抗震措施，保证配电装置及电气设备在遭受到设计烈度及以下的地震袭击时能安全供电。

7.4.2.1 设防烈度

设防烈度取决于配电装置所在地区的地震烈度。

地震烈度是表示地震时地面受到的影响和破坏的程度。地震烈度不仅与震级有关，还与震源深度、距震中的距离以及地震波通过的介质条件（如岩石或土层的结构、性质）等多种因素有关。目前国际上普遍采用的是划分为 12 度的烈度表，而日本采用的是划分为 8 度的烈度表。我国现采用的“新中国地震烈度表”为划分为 12 度的烈度表。将 12 度烈度表的判据简缩后，列于表 7－12 中。

表 7－12　　简 缩 烈 度 表

烈度（度）	简　称	判　　据	最大加速度（cm/s^2）	震　级 M（级）
1	微　震	只有仪器记录	2.5	
2	轻　震	极少数敏感之人有感	2.5	$3\frac{1}{2}$
3	小　震	少数休息之人有感，震动如卡车驶过	5	4
4	弱　震	行动之人也有感，吊物摆动	10	$4\frac{1}{2}$
5	强　震	人人有感，睡者震醒	25	5
6	损　坏	树木摇动，架上东西掉落，老朽及劣质房屋损坏	50	$5\frac{1}{2}$
7	轻破坏	人惊逃，房屋普遍掉土，壁面裂，不好房屋有倾倒	100	6
8	破　坏	砖砌房屋裂缝，烟囱倒，一般建筑物严重破坏	200	$6\frac{1}{2}$
9	重破坏	地裂，喷水带泥沙；水管折裂，建筑物多倒塌	500	7
10	毁　坏	地裂成渠，山崩滑坡，桥梁水坝损坏，铁轨弯曲	1000	
11	毁　灭	很少建筑物能保存，铁轨扭曲，地下管道破坏，水泛滥		
12	大灾难	全面破坏。地面起伏波浪，大规模变形		

注　此表摘自李善邦著《中国地震》。

为了便于工业与民用建（构）筑物设计，我国制订了全国地震烈度区划图。区划图中给出的地震烈度为该地区的基本烈度。

在进行电气抗震设计时，一般情况下取基本烈度作为设防烈度；对于特别重要的大型发电厂和枢纽变电所，设防烈度可比基本烈度提高一度。提高设防烈度必须经上级主管部门批准。

7.4.2.2　高烈度地震区配电装置选型

合理地选择配电装置型式是电气抗震设计的重要内容之一。在地震烈度较高的地区，必须综合考虑工程在电力系统的重要程度、建设费用、场地条件以及环境条件（如污秽等级）等的影响，进行技术经济分析，选择抗震性能较好的配电装置型式。高烈度地震区配电装置的选型，应考虑以下几点：

（1）地震烈度为8度及以上的地震区，35kV及以上电压等级的配电装置，宜优选用屋外式配电装置。

根据海城和唐山地震的震害教训，许多屋内配电装置的电气设备，不是由于地震直接造成的破坏，而是由于房屋倒塌砸坏电气设备而造成的次生灾害。且屋内配电装置房屋损坏后修复困难，恢复供电的周期长，而屋外配电装置的震害比屋内配电装置轻，恢复供电的速度也较快。

（2）屋外配电装置的中型布置方案比高型、半高型布置方案的抗震性能好。

高型、半高型配电装置的构架较高，部分电气设备安装在较高的构架横梁上，其动力反应加大，更容易破坏。同时，由于部分设备上下重叠布置，如上层设备损坏后跌落下来还会打坏下层设备。再者，由于高型、半高型配电装置的部分引下线或设备间连线较长，导线拉力较大，地震时导线摇摆也较大，易拉坏设备。

（3）地震烈度为8度及以上的地震区，220kV及以上电压等级的配电装置宜优先采用分相布置的中型配电装置；对于场地特别狭窄和城市中心地区的110kV及以上电压等级的配电装置可采用SF_6全封闭组合电器或混合式配电装置。

（4）地震烈度为8度及以上的地震区，220kV及以上电压等级的配电装置不宜采用棒式支柱绝缘子支持的管型母线配电装置。当采用管型母线配电装置时，铝管母线宜采用悬吊式。

7.4.2.3　安装设计中采取的抗震措施

（1）选择抗震性能较好的电气设备。电气设备的选型是进行电气设备抗震设计的前提。目前我国尚无定型的抗震型电气设备，而现已定型的电气设备大部分抗震性能较差。为了避免或减少电气设备在地震时受到破坏，应慎重进行设备选型。

1）设备选型应根据其安装地点地基的场地土类型，尽可能选用设备的自振频率与当地场地的地震波频率相距较远的电气设备，以便避免在发生地震时，设备与地震波发生共振。

2）选用具有较高阻尼比的电气设备，以降低设备对地震作用的动力反应放大系数。

3）选用以高强度支柱绝缘子和绝缘套管为绝缘支柱的电气设备。

4）选用设备重心低、顶部重量轻等有利于抗震的结构型式的电气设备。

5）对新试制或引进国外的电气设备，在签订设备技术协议时，应提出抗震性能的要求。一般根据地震烈度，提出当发生地震时，设备承受的地面输入最大加速度值为基准。不同地震烈度下，地面输入的最大加速值如表7－13所示。

表 7－13　　地面输入最大加速度值①

地震烈度（度）	7	8	9
地面最大水平加速度值（g）	0.125	0.25	0.5
地面最大垂直加速度值（g）	0.063	0.125	0.25

① 本表最大水平加速度值摘自《中国地震烈度表（1980）》。

（2）装设减震阻尼装置。

（3）在布置条件允许时，适当加大设备间的距离。

（4）减少设备端子的拉力。

（5）降低设备安装高度。

（6）重视设备基础与设备支架的抗震设计。

（7）设备安装应牢固可靠。

（8）电气设备一定要有良好的接地。

（9）充油式电气设备的事故排油设施应齐全。

（10）消防设施应健全。

7.4.3　高海拔地区配电装置

当海拔高度超过 1000m 时，由于空气稀薄、气压低，使电气设备外绝缘和空气间隙的放电电压降低。因此，在进行高海拔地区配电装置设计时，应加强电气设备的外绝缘和放大空气间隙。

7.4.3.1　外绝缘补偿

（1）对于安装在海拔高度超过 1000m 地区的电气设备外绝缘一般应予加强。当海拔高度在 3500m 以下时，其工频和冲击试验电压应乘以系数 K。系数 K 的计算公式如下

$$K = \frac{1}{1.1 - \dfrac{H}{10000}} \qquad (7-1)$$

式中　H——安装地点的海拔高度，m。

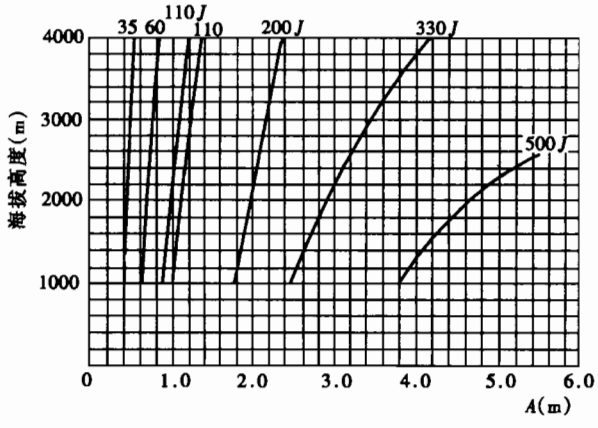


图 7－3　海拔高度大于 1000m 时，A 值的修正

注：110J 系指中心点直接接地电网。

（2）当海拔高度超过 1000m 时，配电装置的 A 值应按图 7－3 进行修正。

7.4.3.2　高海拔地区配电装置设计所采用的措施

（1）海拔高度超过 1000m 的地区，电气设备应采用高原型产品或选用外绝缘提高一级的产品。

（2）由于现有 110kV 及以下电压等级的大多数电气设备，如变压器、断路器、隔离开关、互感器等的外绝缘有一定的裕度，故可使用在海拔高度不超过 2000m 的地区。

（3）海拔高度超过 1000m 的高压配电装置的空气间隙 A 值按图 7－3 进行修正后，其 B、C、D 值应分别为增加 A 值的修正差值。

(4) 采用 SF_6 全绝缘封闭电器，可避免高海拔对外绝缘的影响。

(5) 海拔高度为 1000～3000m 地区的屋外配电装置，当需要增加悬式绝缘子片数来加强绝缘时，耐张绝缘子串和悬垂绝缘子串的片数，按下式进行修正

$$N_H = N[1 + 0.1(H - 1)] \tag{7-2}$$

式中 N_H——修正后的绝缘子片数；

N——海拔高度为 1000m 及以下地区的绝缘子片数；

H——海拔高度，km。

(6) 随着海拔高度升高，裸导体的载流量降低，裸导体的载流量在不同海拔高度及环境温度下，应乘以综合修正系数。

7.4.4 特别狭窄地区配电装置

特别狭窄地区的配电装置可以采用高型、半高型、全封闭组合电器和混合式组合配电装置等型式。本条着重介绍全封闭组合电器及混合式组合配电装置。

7.4.4.1 SF_6 全封闭组合电器配电装置

SF_6 全封闭组合电器是把断路器、隔离开关、电压及电流互感器、母线、避雷器、电缆终端盒、接地开关等元件，按电气主接线的要求，依次连接，组合成一个整体，并且全部封闭于接地的金属外壳中，壳体内充以 SF_6 气体，作为绝缘和灭弧介质。

(1) SF_6 全封闭组合电器的特点：

1) 占用面积和空间小。全封闭组合电器与常用的各级电压中型布置配电装置的面积之比约为$\frac{25}{U_n + 25}$，其空间之比约为$\frac{10}{U_n}$（U_n 为额定电压，kV）。

2) 运行可靠性高。暴露的外绝缘少，因而外绝缘事故少；内部结构简单，机械故障机会减少；外壳接地，无触电危险；SF_6 为非燃性气体，无火灾危险；气压低，爆炸危险性也小。

3) 运行维护工作量小。平时不需冲洗绝缘子；设备检修周期长，与常规电器比较约为(5～10)∶1，几乎在使用寿命内不需要解体检修。

4) 环境保护好。无静电感应和电晕干扰，噪声水平低。

5) 适应性强。因为重心低、脆性元件少，所以抗震性能好；因为是全封闭，不受外界环境影响，还可用于高海拔地区和污秽地区。

6) 安装调试容易。因为制造厂在厂内经过组装密封，又是单元整体运输，所以现场只需整装调试，安装方便。

(2) 应用条件：在技术经济比较合理时，封闭电器宜用于下列情况的 110kV 及以上电网：

1) 深入市内的变电所；

2) 布置场所特别狭窄地区；

3) 地下式配电装置；

4) 重污秽地区；

5) 高海拔地区；

6) 高烈度地震区。

(3) SF_6 全封闭组合电器配电装置的布置：

1) 布置特点。全封闭组合电器由各个独立的标准元件组成，各元件间都可以通过法兰连接起来，故具有积木式的特点。对于不同电气主接线，可以用各种元件组合成不同形式的

装置。但在一般情况下，断路器和母线筒的结构型式对布置影响最大。例如屋内式全封闭组合电器，若选用水平布置的断路器，一般将母线筒布置在下面，断路器布置在最上面；若断路器选用垂直断口时，则断路器一般落地布置在侧面。屋外式 SF_6 全封闭组合电器，断路器一般布置在下部，母线筒布置在上部，用支架托起。

2）布置方式。由于 SF_6 全封闭组合电器安装在屋外需设置加热和防雨装置，检修时还必须运入检修间或采取临时措施；而装于屋内则安装、检修和运行不受环境条件影响，同时因 SF_6 全封闭组合电器占用面积和空间小，厂房面积及高度均小，厂房投资占总投资的比例也很小，故目前一般多采用屋内式。

3）主要尺寸的确定。SF_6 全封闭组合电器的进出线端部带电体通常暴露于空气中，其最小安全净距（*A*、*B*、*C*、*D* 值）[①] 应按敞开式的规定。其余带电体均密封于金属壳体内，各元件间的距离主要是根据安装、检修、试验和运行维护等的需要而确定的，一般按下列几方面进行校验：

a. 同一间隔内相间外壳距离应满足各元件之间拆、装法兰螺栓的距离（由拆、装断路器法兰螺栓控制），一般需 5～25cm，相间不需有维护通道。

b. 不同间隔相间外壳距离应设有能进行维护的通道，一般可取 50～60cm。若有操动机构时，尚应满足组装、操作的距离。

c. 在同一间隔内，若上、下均布置有元件时，元件外壳之间的距离应满足检修元件操动机构的要求，其尺寸按操动机构可拆零件的大小决定，一般由制造厂提供。

d. SF_6 全封闭组合电器的维护通道应满足搬运气体回收小车或试验设备的宽度，一般取 200～300cm。

e. SF_6 全封闭组合电器的元件，在吊运过程中与其他运行元件或停电检修中的盆式绝缘子、导电杆之间应保持一定的安全距离，一般可取 10～20cm。

f. SF_6 全封闭组合电器采用屋内布置时，应在一端设置安装间，其长度一般取 2～3 个间隔宽度。

7.4.4.2 混合式 SF_6 全封闭组合电器配电装置

为了增加出线走廊宽度，便于架空进出线及在满足供电可靠性的前提下，降低工程造价，采用常规的开敞式母线与不包括母线单元的 SF_6 全封闭组合电器组成的配电装置，称为混合式 SF_6 全封闭组合电器配电装置。

7.5 各级电压配电装置带电距离的确定及校验方法

屋外配电装置的安全净距不应小于表 7－14 所列数值，并按图 7－4～图 7－6 进行校验。

表 7－14　　屋外配电装置的安全净距　　单位：mm

符号	适用范围	图号	额定电压（kV）					
			3～10	15～20	35	63	110J	110
A_1	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状遮栏向上延伸线距地 2.5m 处与遮栏上方带电部分之间	7－4 7－5	200	300	400	650	900	1000

① *A*、*B*、*C*、*D* 值详见 7.5 节。

续表

符号	适用范围	图号	额定电压（kV）					
			3～10	15～20	35	63	110J	110
A_2	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的断口两侧引线带电部分之间	7－4 7－6	200	300	400	650	1000	1100
B_1	1. 设备运输时，其外廓至无遮栏带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 3. 栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 4. 带电作业时的带电部分至接地部分之间	7－4 ～ 7－6	950	1050	1150	1400	1650	1750
B_2	1. 网状遮栏至带电部分之间	7－5	300	400	500	750	1000	1100
C	1. 无遮栏裸导体至地面之间 2. 无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间	7－5 7－6	2700	2800	2900	3100	3400	3500
D	1. 平行的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 2. 带电部分与建筑物、构筑物的边沿部分之间	7－4 7－5	2200	2300	2400	2600	2900	3000

注 1. 110J系指中性点直接接地电网。

2. 海拔超过1000m时，A值应按图7－3进行修正。

3. 本表所列各值不适用于制造厂生产的成套配电装置。

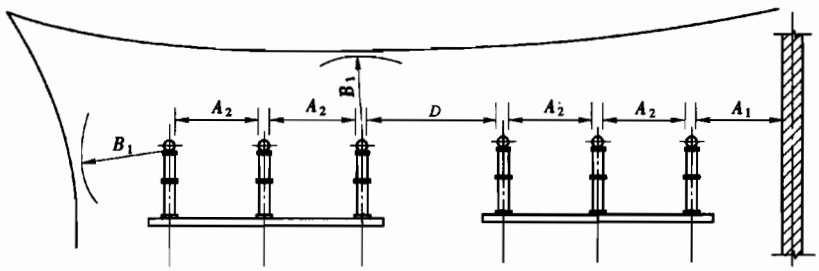


图7－4 屋外A_1、A_2、B_1、D值校验图

屋外电气设备外绝缘体最低部位距地小于2.5m时，应装设固定遮栏。

屋外配电装置使用软导线时，带电部分至接地部分和不同相的带电部分之间的最小电气距离，应根据下列三种条件进行校验，并采用其中最大数值：

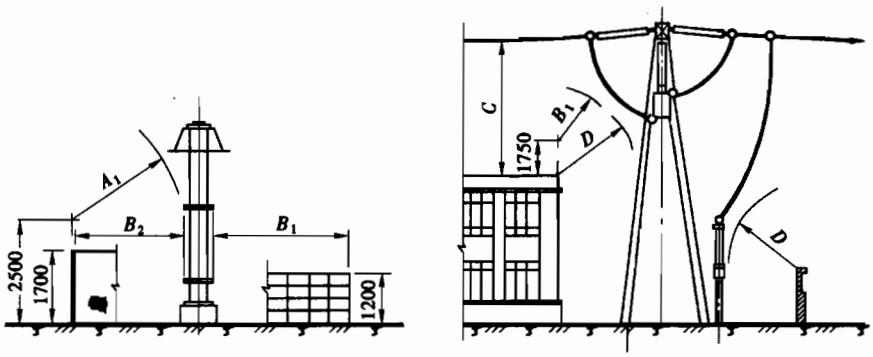


图7－5 屋外A_1、B_1、B_2、C、D值校验图

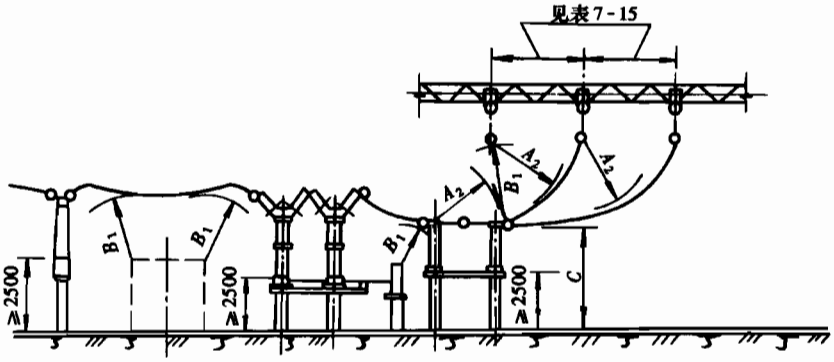


图 7-6　屋外 A_2、B_1、C 值校验图

（1）外过电压和风偏；

（2）内过电压和风偏；

（3）最大工作电压、短路摇摆和风偏。

不同条件下的安全净距和计算风速如表 7-15 所示。

表 7-15　　不同条件下的计算风速和安全净距　　单位：mm

条　件	校　验　条　件	计算风速（m/s）	A 值	额定电压（kV）			
				35	63	110J	110
外过电压	外过电压和风偏	10①	A_1	400	650	900	1000
			A_2	400	650	1000	1100
内过电压	内过电压和风偏	最大设计风速的 50%	A_1	400	650	900	1000
			A_2	400	650	1000	1100
最大工作电压	1. 最大工作电压，短路和风偏（取 10m/s 风速） 2. 最大工作电压和风偏（取最大设计风速）	10 或最大设计风速	A_1	150	300	300	450
			A_2	150	300	500	500

① 在气象条件恶劣的地区（如最大设计风速为 35m/s 及以上，以及雷暴时风速较大的地区）用 15m/s。

屋内配电装置的安全净距不应小于表 7-16 所列数值，并按图 7-7、图 7-8 进行校验。

表 7-16　　屋内配电装置的安全净距　　单位：mm

符号	适　用　范　围	图号	额　定　电　压（kV）								
			3	6	10	15	20	35	63	110J①	110
$A_1$④	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状和板状遮栏向上延伸线距地 2.3m 处，与遮栏上方带电部分之间	7-7	75	100	125	150	180	300	550	850	950
A_2	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的断口两侧带电部分之间	7-7	75	100	125	150	180	300	550	900	1000
B_1	1. 栅状遮栏至带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间	7-7 7-8	825	850	875	900	930	1050	1300	1600	1700

续表

符号	适 用 范 围	图号	额 定 电 压 (kV)								
			3	6	10	15	20	35	63	110J①	110
B_2	网状遮栏至带电部分之间②	7-7	175	200	225	250	280	400	650	950	1050
C	无遮栏裸导体至地（楼）面之间	7-7	2500	2500	2500	2500	2500	2600	2850	3150	3250
D	平行的不同时停电检修的无遮栏裸导体之间	7-7	1875	1900	1925	1950	1980	2100	2350	2650	2750
E	通向屋外的出线套管至屋外通道的路面③	7-8	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4500	5000	5000

① 110J系指中性点直接接地电网。

② 当为板状遮栏时，其 B_2 值可取 A_1+30mm。

③ 当出线套管外侧为屋外配电装置时，其至屋外地面的距离，不应小于表7-14中所列屋外部分之 C 值。

④ 海拔超过1000m时，A 值应按图7-3进行修正。

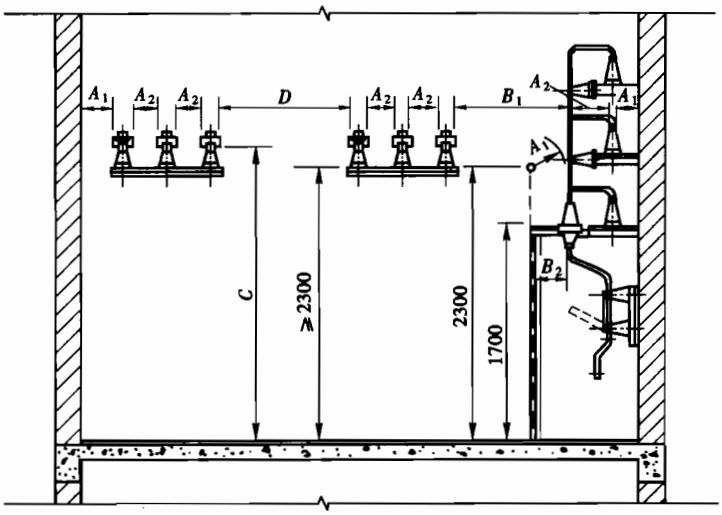


图7-7 屋内 A_1、A_2、B_1、B_2、C、D 值校验图

屋内电气设备外绝缘体最低部位距地小于2.3m时，应装设固定遮栏。

配电装置中相邻带电部分的额定电压不同时，应按较高的额定电压确定其安全净距。

屋外配电装置带电部分的上面或下面，不应有照明、通信和信号线路架空跨越或穿过；屋内配电装置带电部分的上面不应有明敷的照明或动力线路跨越。

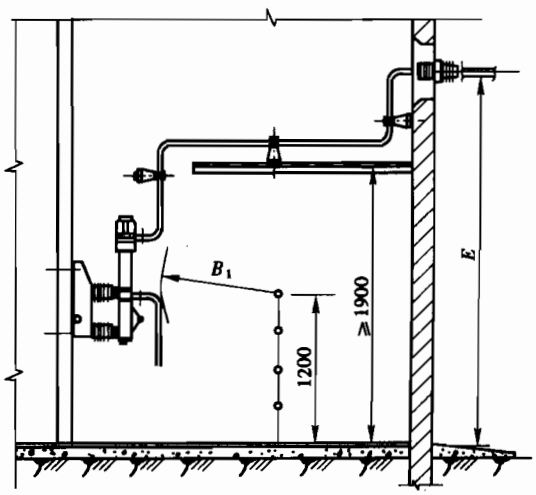


图7-8 屋内 B_1、E 值校验图

8

短路电流计算

8.1 短路电流计算方法

8.1.1 高压系统（35kV及以下）短路电流计算方法

8.1.1.1 计算条件：

（1）短路前三相系统应是正常运行情况下的接线方式，不考虑仅在切换过程中短时出现的接线方式。

校验导体和电器的稳定性时，一般以最大运行方式下的三相短路电流为依据，计算短路点应选择在流过所校验导体或电器的短路电流为最大地点。

在继电保护计算中，不仅要考虑最大运行方式下的三相短路电流，而且还应验算最小运行方式下的两相短路或单相短路电流。

（2）设定短路回路各元件的磁路系统为不饱和状态，即认为各元件的感抗为一常数。计算中应考虑对短路电流有影响的所有元件的电抗；有效电阻可略去不计。但若短路电路中总电阻 R_{Σ} 大于总电抗 X_{Σ} 的1/3，则仍应计入其有效电阻。

（3）假定短路发生在短路电流为最大值的瞬间；所有电源的电动势相位角相同；所有同步电机都具有自动调整励磁装置（包括强行励磁）；系统中所有电源都在额定负荷下运行。

（4）电路电容和变压器的励磁电流略去不计。

8.1.1.2 计算内容：

短路电流计算应求出最大短路电流值，以确定电气设备容量或额定参数；求出最小短路电流值，作为选择熔断器、整定继电保护装置和校验电动机起动的依据。一般需要计算下列短路电流值：

i_{ch}—短路冲击电流（短路全电流最大瞬时值或短路电流峰值）；

I_{ch}——短路全电流最大有效值（第一周期的短路全电流有效值）；

I''_k或 I''——超瞬变短路电流有效值（起始或0s的短路电流周期分量有效值；

$I_{0.2}$——短路后0.2s的短路电流周期分量有效值；

I_k——稳态短路电流有效值（时间为无穷大短路电流周期分量有效值）；

S''——超瞬变短路容量；

S_k——稳态短路容量。

8.1.1.3 电路元件参数的换算及网络变换：

（1）标么制。标么制是一种相对单位制，电参数的标么值为其有名值与基准值之比，即容量标么值

$$S_* = \frac{S}{S_0} \tag{8-1}$$

电压标么值

$$U_* = \frac{U}{U_0} \tag{8-2}$$

电流标么值

$$I_* = \frac{I}{I_0} \tag{8-3}$$

电抗标么值

$$X_* = \frac{X}{X_0} \tag{8-4}$$

式中 S、U、I、X——容量、电压、电流、电抗的有名值；

S_0、U_0、I_0、X_0——容量、电压、电流、电抗的基准值。

工程计算上通常首先选定基准容量 S_0 和基准电压 U_0，与其相应的基准电流 I_0 和基准电抗 X_0，在三相电力系统中可由下式导出

$$I_0 = \frac{S_0}{\sqrt{3}U_0} \tag{8-5}$$

$$X_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3}I_0} = \frac{U_0^2}{S_0} \tag{8-6}$$

根据式（8-4）和式（8-6），在三相电力系统中，电路元件电抗的标么值 X_* 可表示为

$$X_* = \frac{\sqrt{3}I_0X}{U_0} = \frac{S_0X}{U_0^2} \tag{8-7}$$

基准值可以任意选定。但为了计算方便，基准容量 S_0 一般取 100MVA；如为有限电源容量系统，则可选取向短路点馈送短路电流的发电机额定总容量 $S_{n\Sigma}$作为基准容量。基准电压 U_0 应取各电压级平均电压（指线电压）U_{av}，即 $U_0 = U_{av} \approx 1.05U_n$（$U_n$ 为系统标称电压），但对于标称电压为 220/380V 的电压级，则计入电压系数 C（取 1.05），即 $1.05U_n = 400V$ 或 0.4kV。

采用标么值计算短路的总阻抗时，必须先将元件电抗的有名值和相对值按同一基准容量换算为标么值，而基准电压采用各元件所在级的平均电压。电路元件阻抗标么值和有名值的换算公式见《工业与民用配电设计手册》第二版表 4-2（中国电力出版社出版），以下简称“配电手册”。

（2）有名单位制。用有名单位制（欧姆制）计算短路电路的总阻抗时，必须把各电压所在元件阻抗的相对值和欧姆值，都归算到短路点所在级平均电压下的欧姆值。

（3）网络变换。网络变换的目的是简化短路电路，以求得电源至短路点间的等值总阻抗。

8.1.1.4 远离发电机端的三相短路电流周期分量的计算：远离发电机端的（无限大电源容量的）网络发生短路时，即以电源容量为基准的计算电抗 $X_{*c} \geqslant 3$ 时，短路电流周期分量在整个短路过程不发生衰减，即 $I'' = I_{0.2} = I_k$，其计算方法有：

（1）用标么制计算时，三相短路电流周期分量有效值 I''按下式计算

$$I_{*z} = S_{*k} = I''_{*} = \frac{1}{X_{*c}} \tag{8-8}$$

$$I_z = I_{*z} I_0 = I''_{*} I_0 = \frac{I_0}{X_{*c}} \tag{8-9}$$

$$S_k = S_{*k} S_0 = I_{*z} S_0 = I''_{*} S_0 = \frac{S_0}{X_{*c}} \tag{8-10}$$

式中 I_{*z}——短路电流周期分量有效值标么值；

S_{*k}——短路容量标么值；

X_{*c}——短路电路计算电抗标么值；

I_z——短路电流有效值，kA；

S_k——短路容量，MVA；

I_0——基准电流，kA；

S_0——基准容量，MVA。

(2) 用有名单位制计算时，三相短路电流周期分量有效值 I_z 按下式计算

$$I_z = I'' = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} X_c} \quad \text{kA} \tag{8-11}$$

如果 $R_c > \frac{1}{3} X_c$，则应计入计算电阻 R_c，I_z 值应按下式算出

$$I_z = I'' = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} Z_c} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}\sqrt{R_c^2 + X_c^2}} \quad \text{kA} \tag{8-12}$$

式中 U_{av}——短路点所在级的网络平均电压，kV，见配电手册表 4-1；

Z_c——短路电路计算阻抗，Ω；

R_c——短路电路计算电阻，Ω；

X_c——短路电路计算电抗，Ω。

8.1.1.5 靠近发电机端的三相短路电流周期分量的计算：靠近发电机端或有限电源容量的网络发生短路的主要特点是：

电源母线上的电压在短路发生后的整个过渡过程不能维持恒定，短路电流周期分量 i_z 随之变化，电源的内阻抗不能忽略不计。

短路电流的变化与发电机的电参数及电压自动调整装置的特性有关。工程设计中常采用运算曲线法计算短路过程某一时刻的短路电流周期分量。因为同步电机的转子绕组（等效阻尼绕组及励磁绕组）的磁链在突然短路瞬间不能突变，与转子绕组的磁链成正比的超瞬变电动势 E''，在突然短路瞬间仍保持短路前的数值，因此短路电流周期分量的起始值，即超瞬变短路电流有效值 I''，可利用公式直接计算：

对于汽轮发电机

$$I'' = \frac{E''}{\sqrt{3}(X''_d + X_w)} \quad \text{kA} \tag{8-13}$$

或

$$I'' = \frac{I_0}{X''_{*d} + X_{*w}} \quad \text{kA} \tag{8-14}$$

对于水轮发电机

$$I'' = \frac{KE''}{\sqrt{3}(X''_d + X_w)} = \frac{KI_0}{X''_{*d} + X_{*w}} \qquad (8-15)$$

式中 I_0——基准电流，kA；

E''——发电机超瞬变电动势，kV，工程计算中可以认为 $E'' \approx U_{nG}$；

U_{nG}——发电机额定电压，kV，$U_{nG} = 1.05U_n$；

U_n——系统标称电压，kV；

X''_d——发电机超瞬变电抗，Ω；

X_w——自发电机出口至短路点间的短路电路电抗，Ω；

X''_{*d}、X_{*w}——以发电机额定总容量 $S_{n\Sigma}$为基准容量的 X''_d和 X_w 的标么值；

K——考虑到水轮发电机的超瞬变电抗 X''_d值比较大而引入的计算系数，见“配电手册”表 4－17。

8.1.1.6 短路点由多个电源供电的三相短路电流周期分量的计算：如果一个网络是由参数条件相差悬殊的多个电源供电，则在制订短路电流计算网络时，应将参数条件相近的电源合并，分成几个等效电源组。然后分别算出各等效电源组向短路点提供的短路电流，最后将各组提供的短路电流相加，即得到通过短路点的全部短路电流。

8.1.1.7 三相短路冲击电流和全电流最大有效值的计算：从“配电手册”图 4－1 短路电流变化可知，短路全电流 i_k 包含有周期分量 i_z 和非周期分量 i_f。短路电流非周期分量的起始值 $i_{f0} = \sqrt{2}I''$，短路冲击电流 i_{ch}即为短路全电流最大瞬时值，它出现在短路发生后的半周期（0.01s）内的瞬间，其值可按下式计算

$$i_{ch} = K_{ch}\sqrt{2}I'' \quad \text{kA} \qquad (8-16)$$

短路全电流最大有效值 I_{ch}按下式计算

$$I_{ch} = I''\sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} \quad \text{kA} \qquad (8-17)$$

其中

$$K_{ch} = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_f}}$$

式中 K_{ch}——短路电流冲击系数；

T_f——短路电流非周期分量衰减时间常数，s，当电网频率为 50Hz 时，$T_f = \frac{X_\Sigma}{314R_z}$；

X_Σ——短路电路总电抗（假定短路电路没有电阻的条件下求得），Ω；

R_Σ——短路电路总电阻（假定短路电路没有电抗的条件下求得），Ω。

如果电路只有电抗，则 $T_f = \infty$，$K_{ch} = 2$；如果电路只有电阻，则 $T_f = 0$，$K_{ch} = 1$；可见 $2 \geqslant K_{ch} \geqslant 1$。

K_{ch}与$\frac{X_\Sigma}{R_\Sigma}$的数值关系见“配电手册”图 4－13 所示曲线。工程设计中 K_{ch}的取值以及 i_{ch}和 I_{ch}的计算值如下：

（1）当短路发生在单机容量为 12000kW 及以上的发电机端时，取 $K_{ch} = 1.9$，$i_{ch} = 2.69I''$，$I_{ch} = 1.62I''$。

（2）短路点远离发电厂，短路电路的总电阻较小，总电抗较大$\left(R_\Sigma \leqslant \frac{1}{3}X_\Sigma\right)$时，$T_f \approx 0.05$s，取 $K_{ch} = 1.8$，$i_{ch} = 2.55I''$，$I_{ch} = 1.51I''$。

（3）在电阻较大$\left(R_\Sigma > \frac{1}{3}X_\Sigma\right)$的电路中，发生短路时短路电流非周期分量衰减较快，可

取 $K_{ch}=1.3$，$i_{ch}=1.84I''$，$I_{ch}=1.09I''$。

8.1.1.8 电动机对短路电流的影响

(1) 高压同步电动机对短路电流的影响可按有限电源容量考虑。同步电动机在短路过渡过程任一时刻，所给出的短路电流周期分量可利用运算曲线“配电手册”图 4－3～图 4－11，或运算曲线数字表“配电手册”（表 4－18～表 4－21）计算。如果同步电动机的励磁绕组时间常数与制订曲线的标准参数［“配电手册”（表 4－22）］相差较大时，则时间 t 应按“配电手册”式（4－25）和式（4－26）修正。

(2) 高压异步电动机对短路电流的影响，只有在计算电动机附近短路点的短路冲击电流和短路全电流最大有效值时才予以考虑。

在下列情况下，可以不考虑高压异步电动机对短路冲击电流和短路全电流的影响：

1) 异步电动机与短路点的连接已相隔一个变压器；

2) 在计算不对称短路电流时。

由异步电动机提供的短路冲击电流 $I_{ch.M}$ 按下式计算

$$I_{ch.M}=0.9\sqrt{2}K_{ch.m}K_{qM}I_{rM} \quad \text{kA} \tag{8-18}$$

计入异步电动机影响后的短路冲击电流 i_{ch} 和短路全电流最大有效值 I_{ch}，按下列两式计算

$$i_{ch}=i_{ch.s}+i_{ch.M} \quad \text{kA} \tag{8-19}$$

$$I_{ch}=\sqrt{(I''_s+I''_M)^2+2[(K_{ch.s}-1)I''^2_s+(K_{ch.M}-1)I''^2_M]} \quad \text{kA} \tag{8-20}$$

以上式中 $i_{ch.s}$——由系统送到短路点去的短路冲击电流，kA；

I''_s——由系统送到短路点去的超瞬变短路电流，kA；

I''_M——由短路点附近的异步电动机送到短路点去的超瞬变短路电流，kA，其值 $I''_M=0.9K_{qM}I_{rM}$，如有多台异步电动机，则 $I''_M=0.9K'_{qM}\Sigma I_{rM}$；

K_{qM}——异步电动机的起动电流倍数，一般可取平均值 6，亦可由产品样本查得，如果有多台异步电动机，则应以等效电动机起动电流倍数 K'_{qM} 代之其值

$$K'_{qM}=\frac{\Sigma(K_{qM}P_{rM})}{\Sigma P_{rM}};$$

P_{rM}——异步电动机的额定功率，kW；

I_{rM}——异步电动机的额定电流，kA，可由产品样本查得，如果有多台异步电动机，则应以各台电动机额定电流的总和 ΣI_{rM} 代之；

$K_{ch.s}$——由系统馈送的短路电流冲击系数；

$K_{ch.M}$——由异步电动机馈送的短路电流冲击系数，一般可取 1.4～1.7，准确数据可查配电手册图4－14。

8.1.1.9 两相短路电流的计算

(1) 超瞬变短路电流 I''_{k2}、短路冲击电流 $i_{ch.k2}$ 和短路全电流最大有效值 $I_{ch.k2}$ 两相短路超瞬变电流 I''_{k2} 的计算公式如下：

$$\left.\begin{aligned}&\text{对于汽轮发电机} \quad I''_{k2}=\frac{E''}{2(X''_d+X_w)}\\&\text{对于水轮发电机} \quad I''_{k2}=\frac{KE''}{2(X''_d+X_w)}\end{aligned}\right\} \tag{8-21}$$

将上述两式与三相短路超瞬变电流 I''_{k3}[①]的计算式（8－13）、式（8－15）相除，即得

$$\frac{I''_{k2}}{I''_{k3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$$

而 i_{ch}和 I_{ch}均正比于 I''，故

$$\left.\begin{aligned} I''_{k2} &= 0.866 I''_{k3} \\ i_{ch\cdot k2} &= 0.866 i_{ch\cdot k3}{}^{①} \\ I_{ch\cdot k2} &= 0.866 I_{ch\cdot k3}{}^{①} \end{aligned}\right\} \tag{8-22}$$

（2）稳态短路电流：两相短路稳态电流 I_{k2}与三相短路稳态电流 I_{k3}的比值关系，视短路点与电源的距离远近而定：

1）在发电机出口处发生短路时

$$I_{k2} = 1.5\ I_{k3} \quad \text{kA} \tag{8-23}$$

2）在远距离点短路时，即 $X_{*c} > 3$ 时，因为 $I_k = I''$，故

$$I_{k2} = 0.866\ I_{k3} \quad \text{kA} \tag{8-24}$$

3）一般可以这样估计

$X_{*c} > 0.6$ 时，$I_{k2} < I_{k3}$

$X_{*c} \approx 0.6$ 时，$I_{k2} \approx I_{k3}$

$X_{*c} < 0.6$ 时，$I_{k2} > I_{k3}$

8.1.1.10 变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的换算关系

变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的换算关系见“配电手册”表 4－23。

8.1.2 低压系统短路电流计算方法

8.1.2.1 计算条件：高压系统短路电流的计算条件同样适用于低压网络短路电流的计算，但低压网络还有如下一些特点：

（1）一般用电单位的电源来自地区大中型电力系统，配电用的电力变压器的容量远小于系统的容量，因此短路电流可按远离发电机端，即无限大电源容量的网络短路进行计算，短路电流周期分量不衰减。

（2）计入短路电路各元件的有效电阻，但短路点的电弧电阻、导线连接点、开关设备和电器的接触电阻可忽略不计。

（3）当电路电阻较大，短路电流非周期分量衰减较快，一般可以不考虑非周期分量。只有在离配电变压器低压侧很近处，例如低压侧 20m 以内大截面线路上或低压配电屏内部发生短路时，才需要计算非周期分量。

（4）单位线路长度有效电阻的计算温度不同，在计算三相最大短路电流时，导体计算温度取为 20℃；在计算单相短路（包括单相接地故障）电流时，假设的计算温度升高，电阻值增大，其值一般取 20℃时电阻的 1.5 倍。

（5）计算过程采用有名单位制，电压用伏、电流用千安、容量用千伏安、阻抗用毫欧。

（6）计算 220/380V 网络三相短路电流时，计算电压 cU_n 取电压系数 c 为 1.05，计算单相接地故障电流时，c 取 1.0，U_n 为系统标称电压（线电压）380V。

---

① 各种三相短路电流的符号有 I''、i_{ch}、I_{ch}、I_k。在同时出现二相短路电流的符号的场合，为了便于区别比较，在三相短路电流的符号的右下角加注“k3”，例如 I''_{k3}、$i_{ch.k3}$、$I_{ch.k3}$、I_{k3}。

8.1.2.2 三相和二相短路电流的计算：在220/380V网络中，一般以三相短路电流为最大。一台变压器供电的低压网络三相短路电流计算电路见“配电手册”图4-15。

低压网络三相起始短路电流周期分量有效值按下式计算

$$I'' = \frac{cU_n/\sqrt{3}}{Z_k} = \frac{1.05U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{230}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{8-25}$$

$$R_k = R_s + R_T + R_m + R_L$$

$$X_k = X_s + X_T + X_m + X_L$$

式中 U_n——网络标称电压（线电压），V，220/380V网络为380V；

c——电压系数，计算三相短路电流时取1.05；

Z_k、R_k、X_k——短路电路总阻抗、总电阻、总电抗，mΩ；

R_s、X_s——变压器高压侧系统的电阻、电抗（归算到400V侧），mΩ；

R_T、X_T——变压器的电阻、电抗，mΩ；

R_m、X_m——变压器低压侧母线段的电阻、电抗，mΩ；

R_L、X_L——配电线路的电阻、电抗，mΩ；

I''、I_k——三相短路电流的初始值、稳态值。

只要$\sqrt{R_T^2 + X_T^2}/\sqrt{R_s^2 + X_s^2} \geqslant 2$，变压器低压侧短路时的短路电流周期分量不衰减，即$I_k = I''$。

三相短路冲击电流和短路全电流最大有效值的计算与高压系统相同，见式（8-16）、式（8-17）。电动机反馈对短路冲击电流的影响，仅当短路点附近所接用电动机额定电流之和大于短路电流的1%（$\Sigma I_{r.M} > 0.01I''$）时，才予以考虑。异步电动机起动电流倍数可取为6~7，异步电动机的短路电流冲击系数可取1.3。由异步电动机馈送的短路冲击电流的计算见高压系统部分式（8-18）。

低压网络两相短路电流I''_{k2}与三相短路电流I''_{k3}的关系也和高压系统一样，即

$$I''_{k2} = 0.866I''_{k3}。$$

两相短路稳态电流I_{k2}与三相短路稳态电流I_{k3}的比值关系也与高压系统一样，在远离发电机短路时，$I_{k2} = 0.866I_{k3}$；在发电机出口处短路时，$I_{k2} = 1.5I_{k3}$。

8.1.2.3 单相短路电流的计算：

（1）单相接地故障电流的计算。TN接地系统的低压网络单相接地故障电流I''_{k1}可用下述公式计算

$$I''_{k1} = \frac{220}{Z_{\phi p}} \text{ kA} \tag{8-26}$$

$$Z_{\phi p} = \sqrt{R_{\phi p}^2 + X_{\phi p}^2}$$

以上式中 $R_{\phi p}$、$X_{\phi p}$、$Z_{\phi p}$——短路电路的相线—保护线回路（以下简称相保，保护线包括PE线和PEN线）电阻、相保电抗、相保阻抗，mΩ。

（2）相线与中性线之间短路的单相短路电流I''_{k1}的计算。TN和TT接地系统的低压网络相线与中性线之间短路的单相短路电流I''_{k1}的计算，与上述单相接地故障电流计算一样，仅

将配电线路的相保电阻 $R_{\phi p.L}$、相保电抗 $X_{\phi p.L}$改用相线—中性线回路的电阻、电抗。

8.2 短路电流计算结果的应用

(1) 电气接线方案的比较和选择；
(2) 正确选择和校验电器设备；
(3) 正确选择和校验载流导体；
(4) 继电保护的选择和整定；
(5) 接地装置的设计及确定中性点接地方式；
(6) 验算接地装置的接触电压和跨步电压；
(7) 验算大、中型电动机的启动。

8.3 影响短路电流的因素及限制短路电流的措施

8.3.1 影响短路电流的因素：

(1) 系统的电压等级。
(2) 主接线形式以及主接线的运行方式。
(3) 系统的元件阻抗及零序阻抗大小（变压器中性点接地点的多少）。
(4) 是否加装限流电抗器（如限流电抗器，分裂电抗器或分裂绕组变压器）。
(5) 是否采用限流型电器（如限流熔断器，限流型低压断路器）。

8.3.2 限制短路电流的措施：

电力系统可采取的限流措施：
(1) 提高电力系统的电压等级。
(2) 直流输电。
(3) 在电力系统主网加强联系后，将次级电网解环运行。
(4) 在允许的范围内，增大系统的零序阻抗，例如采用不带第三绕组或第三组为 Y 接线的全星形自耦变压器，减少变压器的接地点等。

发电厂和变电所中可以采取的限流措施：
(1) 发电厂中，在发电机电压母线分段回路中安装电抗器。
(2) 变压器分列运行。
(3) 变电所中，在变压器回路中装设分裂电抗器或电抗器。
(4) 采用低压侧为分列绕组的变压器。
(5) 出线上装设电抗器。

终端变电所中可采取的限流措施：
(1) 变压器分列运行。
(2) 采用高阻抗变压器。
(3) 在变压器回路中装设电抗器。
(4) 采用小容量变压器。

9 电气设备选择

9.1 常用电气设备选择的技术条件和环境条件

9.1.1 技术条件

选择的高压电器，应能在长期工作条件下和发生过电压、过电流的情况下保持正常运行。

（1）长期工作条件。

1）电压。选用的电气设备允许最高工作电压 U_{max} 不得低于该回路的最高运行电压 U_g，即

$$U_{max} \geqslant U_g \tag{9-1}$$

2）电流。选用的电气设备额定电流 I_n 不得低于所在回路在各种可能运行方式下的持续工作电流 I_g，即

$$I_n \geqslant I_g \tag{9-2}$$

由于变压器短时过载能力很大，双回路出线的工作电流变化幅度也较大，故其计算工作电流应根据实际需要确定。

高压电器没有明确的过载能力，所以在选择其额定电流时，应满足各种可能运行方式下回路持续工作电流的要求。

3）机械荷载。所选电器端子的允许荷载，应大于电器引线在正常运行和短路时的最大作用力。

电器机械荷载的安全系数，由制造部门在产品制造中统一考虑。套管和绝缘子的安全系数不应小于表 9-1 所列数值。

表 9-1　套管和绝缘子的安全系数

类　别	荷载长期作用时	荷载短时作用时
套管、支持绝缘子及其金具	2.5	1.67
悬式绝缘子及其金具①	4	2.5

① 悬式绝缘子的安全系数对应于 1h 机电试验荷载，而不是破坏荷载。若是后者，安全系数则分别应为 5.3 和 3.3。

（2）短路稳定条件。

1）校验的一般原则：

a. 电器在选定后应按最大可能通过的短路电流进行动、热稳定校验。校验的短路电流一般取三相短路时的短路电流，若发电机出口的两相短路，或中性点直接接地系统及自耦变压器等回路中的单相、两相接地短路较三相短路严重时，则应按严重情况校验。

b. 用熔断器保护的电器可不验算热稳定。当熔断器有限流作用时，可不验算动稳定。用熔断器保护的电压互感器回路，可不验算动、热稳定。

2）短路的热稳定条件

$$I_t^2 t > Q_{dt} \tag{9-3}$$

式中 Q_{dt}——在计算时间 t_cs 内，短路电流的热效应，$KA^2 \cdot s$；

I_t——ts 内设备允许通过的热稳定电流有效值，kA；

t——设备允许通过的热稳定电流时间，s。

校验短路热稳定所用的计算时间 t_c 按下式计算

$$t_c = t_b + t_d \tag{9-4}$$

式中 t_b——继电保护装置后备保护动作时间，s；

t_d——断路器的全分闸时间，s。

采用无延时保护时，t_c 可取表 9-2 中的数据。该数据为继电保护装置的起动机构和执行机构的动作时间、断路器的固有分闸时间以及断路器触头电弧持续时间的总和。当继电保护装置有延时整定时，则应按表中数据加上相应的整定时间。

表 9-2　校验热效应的计算时间

断路器开断速度	断路器的全分闸时间 t_d（s）	计算时间 t_c（s）
高速断路器	<0.08	0.1
中速断路器	0.08~0.12	0.15
低速断路器	>0.12	0.2

3）短路的动稳定条件

$$\left.\begin{aligned} i_{cb} &\leqslant i_{df} \\ I_{ch} &\leqslant I_{df} \end{aligned}\right\} \tag{9-5}$$

式中 i_{cb}——短路冲击电流峰值，kA；

I_{ch}——短路全电流有效值，kA；

i_{df}——电器允许的极限通过电流峰值，kA；

I_{df}——电器允许的极限通过电流有效值，kA。

（3）绝缘水平。在工作电压和过电压的作用下，电气设备的内、外绝缘应保证必要的可靠性。

电气设备的绝缘水平，应按电网中出现的各种过电压和保护设备相应的保护水平来确定。当所选电气设备的绝缘水平低于国家规定的标准数值时，应通过绝缘配合计算，选用适当的过电压保护设备。

9.1.2　环境条件

（1）温度：选择电气设备用的环境温度按表 9-3 选取。

表 9-3　选择电气设备的环境温度

安装场所	最　高	最低
屋外	年最高温度	年最低温度
电抗器室	该处通风设计最高排风温度	
屋内其他处	该处通风设计温度。当无资料时，可取最热月平均最高温度加 5℃	

注　1. 年最高（或最低）温度为一年中所测得的最高（或最低）温度的多年平均值。

2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值，取多年平均值。

按 GB/T 11022—1999《高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求》的规定，普通高压电气设备在环境最高温度为 +40℃时，允许按额定电流长期工作。当电气设备安装点的环境温度高于 +40℃（但不高于 +60℃）时，每增高 1℃，建议额定电流减少 1.8%；当低于 +40℃时，每降低 1℃，建议额定电流增加 0.5%，但总的增加值不得超过额定电流的 20%。

普通高压电器一般可在环境最低温度为 -30℃时正常运行。在高寒地区，应选择能适应

环境最低温度为－40℃的高寒电气设备。

在年最高温度超过40℃，而长期处于低湿度的干热地区，应选用型号后带“TA”字样的干热带型产品。

（2）日照：屋外高压电气设备在日照影响下将产生附加温升。但高压电气设备的发热试验是在避免阳光直射的条件下进行的。如果制造部门未能提出产品在日照下额定载流量下降的数据，在设计中可暂按电器额定电流的80%选择设备。

在进行试验或计算时，日照强度取0.1W/cm^2，风速取0.5m/s。

（3）风速：一般高压电气设备可在风速不大于35m/s的环境下使用。

选择电气设备时所用的最大风速，可取离地10m高、30年一遇的10min平均最大风速。最大设计风速超过35m/s的地区，可在屋外配电装置的布置中采取措施。阵风对屋外电气设备及电瓷产品的影响，应由制造部门在产品设计中考虑，可不作为选择电器的条件。

对于台风经常侵袭或最大风速超过35m/s的地区，除向制造部门提出特殊订货外，在设计布置时应采取有效防护措施，如降低安装高度、加强基础固定等。

（4）冰雪：在积雪和覆冰严重的地区，应采取措施防止冰串引起瓷件绝缘对地闪络。

隔离开关的破冰厚度一般为10mm。在重冰区（如云贵高原，山东河南部分地区，湘中、粤北重冰地带以及东北部分地区），所选隔离开关的破冰厚度，应大于安装场所的最大覆冰厚度。

（5）湿度：选择电气设备的湿度，应采用当地相对湿度最高月份的平均相对湿度（相对湿度——在一定温度下，空气中实际水气压强值与饱和水气压强值之比；最高月份的平均相对湿度——该月中日最大相对湿度值的月平均值）。对湿度较高的场所（如岸边水泵房等），应采用该处实际相对湿度。当无资料时，可取比当地湿度最高月份平均值高5%的相对湿度。

一般高压电器可使用在＋20℃，相对湿度为90%的环境中（电流互感器为85%）。在长江以南和沿海地区，当相对湿度超过一般产品使用标准时，应选用湿热带型高压电气设备。这类产品的型号后面一般都标有“TH”字样。

湿热带型高压电气设备的使用环境条件见表9－4。

表9－4　　湿热带型高压电气设备的使用环境条件

环境因素		额定值	环境因素	额定值
空气温度	最高（℃）	40	凝　露	有
	最低（℃）	0	含盐空气	有
空气最大相对湿度（%）		95（25℃时）	霉　菌	有
黑色物体表面最高温度（℃）		80	最大降雨强度（mm/10min）	50
太阳辐射最大强度［J/（cm^2·min）］		5.86	海拔高度（m）	≤1000

注　1. 本表引自《湿热带型高压电器》标准。

2. 湿热带型高压电器分为屋内与屋外两种型式，屋外使用的产品应考虑太阳辐射、雨、露的因素。在沿海地区，仅屋外存在盐雾，才作为特殊污秽考虑。

（6）污秽：在距海岸1～2km或盐场附近的盐雾场所，在火电厂、炼油厂、冶炼厂、石油化工厂和水泥厂等附近含有由工厂排出的二氧化硫、硫化氢、氨、氯等成分烟气、粉尘等场所，在潮湿的气候下将形成腐蚀性或导电的物质。污秽地区内各种污物对电气设备的危

害，取决于污秽物质的导电性、吸水性、附着力、数量、比重及距物源的距离和气象条件。在工程设计中，应根据污秽情况选用下列措施：

1）增大电瓷外绝缘的有效泄漏比距或选用有利于防污的电瓷造型，如采用半导体、大小伞、大倾角、钟罩式等特制绝缘子。

2）采用屋内配电装置。2级及以上污秽区的63～110kV配电装置采用屋内型。

（7）海拔：电气设备的一般使用条件为海拔高度不超过1000m，海拔超过1000m的地区称为高原地区。

高原环境条件的特点主要是：气压低、气温低、日温差大、绝对湿度低、日照强。对电气设备的绝缘、温升、灭弧、老化等的影响是多方面的。

在高原地区，由于气温降低足够补偿海拔对温升的影响，因而在实际使用中其额定电流值可与一般地区相同。

对安装在海拔高度超过1000m地区的电气设备外绝缘一般应予加强，可选用高原型产品或选用外绝缘提高一级的产品。在海拔3000m以下地区，220kV及以下配电装置也可选用性能优良的避雷器来保护一般电器的外绝缘。

由于现有110kV及以下大多数电气设备的外绝缘有一定裕度，故可使用在海拔2000m以下的地区。

（8）地震：地震对电器的影响主要是地震波的频率和地震振动的加速度。一般电器的固有振动频率与地震振动频率很接近，应设法防止共振的发生，并加大电器的阻尼比。地震振动的加速度与地震烈度和地基有关，通常用重力加速度 g 的倍数表示。

选择电气设备时，应根据当地的地震烈度选用能够满足地震要求的产品。电气设备的辅助设备应具有与主设备相同的抗震能力。一般电气设备产品可以耐受地震烈度为8度的地震力。在安装时，应考虑支架对地震力的放大作用。根据有关规程的规定，地震基本烈度为7度及以下地区的电气设备可不采取防震措施。在7度以上地区，电器应能承受的地震力，可按表9－5所列加速度值和电器的质量进行计算。

表9－5　计算电气设备承受的地震力时用的加速度值

地震烈度（度）	8	9
地面水平加速度	$0.2g$	$0.4g$
地面垂直加速度	$0.1g$	$0.2g$

9.2　变压器，高、低压电气设备及保护设备的选择

9.2.1　高压电气设备选择方法（配电手册）

9.2.1.1　高压电气设备选择一般规定

（1）按正常工作条件包括电压、电流、频率、负荷；

（2）按工作环境条件包括环境温度、相对湿度、海拔高度、最大风速；

（3）按短路条件包括动稳定、热稳定和持续时间的校验；

（4）按各类高压电器的不同特点，如断路器的操作性能、互感器的二次侧负载和准确等级、熔断器的上下级选择性配合等进行选择。

选择高压电器对应校验的项目见表9－6。

9.2.1.2　按正常工作条件选择高压电器

9.2.1.2.1　按工作电压选择：选择的高压电器，其额定电压应符合所在回路的系统标称电压，其允许最高工作电压 U_{max} 不应小于所在回路的最高运行电压 U_y，即

表 9-6　　选择高压电器时应校验的项目

电器名称	额定电压	额定电流	额定开断电流	短路电流校验		环境条件	其　他
				动稳定	热稳定		
断路器	○	○	○	○	○	○	操作性能
负荷开关	○	○	○	○	○	○	操作性能
隔离开关	○	○		○	○	○	操作性能
熔断器	○	○	○	○		○	上、下级间配合
限流电抗器	○	○		○	○	○	
电流互感器	○	○		○	○	○	二次侧负荷、准确等级
电压互感器	○					○	二次侧负荷、准确等级
支柱绝缘子	○			○		○	
穿墙套管	○	○		○	○	○	
母线		○		○	○	○	
电缆	○	○			○	○	

注　1. 表中“○”为选择电器应进行校验的项目。

2. 以上是按电气设备用于 50Hz 的情况，用于其他频率时对频率也要校验。

$$U_{max} \geqslant U_y \tag{9-6}$$

熔断器、避雷器、电压互感器的额定电压应符合所在回路的系统标称电压。

9.2.1.2.2　按工作电流选择：高压电器和导体的额定电流 I_n 不应小于所在回路的最大持续工作电流 I_{max}，即

$$I_n \geqslant I_{max} \tag{9-7}$$

当高压电器的额定环境温度与实际工作环境温度不一致时，电器的最大允许工作电流应按表 9-7 修正。

表 9-7　　高压电器最高工作电压及在不同环境温度下的允许最大电流

项目		支持绝缘子	穿墙套管	隔离开关	断路器	电流互感器	限流电抗器	负荷开关	熔断器	电压互感器
最高工作电压		$1.5U_n$				$1.1U_n$		$1.15U_n$		$1.1U_n$
最大工作电流	当 $\theta < \theta_n$ 时		环境温度每降低 1℃，可增加 0.5% I_n，但最大不得超过 20% I_n				I_n			
	当 $\theta_n < \theta \leqslant 60$℃时		环境温度每增高 1℃，应减少 1.8% I_n							

注　表中 U_n——电器额定电压，kV；

I_n——电器额定电流，A；

θ——实际环境温度，℃；

θ_n——额定环境温度，普通型和湿热带型为 +40℃，干热带型为 +45℃。

9.2.2.3　按开断电流（或断流容量）选择：

（1）按断路器的额定开断电流（或断流容量）选择断路器时，应满足下式要求

$$I_{bn} \geqslant I_{sct} \tag{9-8}$$

或

$$S_{bn} \geqslant S_{sct} \tag{9-9}$$

式中　I_{bn}——断路器额定开断电流，kA；

S_{bn}——断路器额定断流容量，MVA；

I_{sct}——断路器触头开始分离瞬间的短路电流的有效值，kA；

S_{sct}——断路器触头开始分离瞬间的短路容量，MVA。

按开断电流（或断流容量）选择高压电器时，宜取断路器实际开断时间（继电器动作时间与断路器固有分闸时间之和）的短路电流作为选择条件。

对于装有快速保护的快速断路器，当实际开断时间小于0.1s，其开断短路电流还应考虑非周期分量的影响，即按短路全电流最大有效值来选择。

（2）熔断器按开断电流选择时需满足下式要求

$$I_{bn} \geqslant I_{ch} \text{ 或 } I'' \tag{9-10}$$

式中 I_{bn}——熔断器额定开断电流，kA；

I_{ch}——三相短路全电流最大有效值，kA；

I''——超瞬变短路电流有效值，kA。

9.2.1.3 按环境条件选择电器

（1）选择电器和导体时，应按当地环境条件校核，如温度、湿度、海拔、风速、污秽、地震烈度等。

（2）断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器、电流互感器、电压互感器、绝缘子、套管在户内安装时不必校核风速和污秽。在户外安装时不必校核相对湿度。

（3）海拔在1000m以下的地区可选用一般产品，当海拔为1000～2000m的地区应选用适用该海拔的产品，在海拔超过2000m的地区，可选用高原型产品；选择导体和电器的环境温度一般采用表9－8所列数值摘自《民用建筑电气设计规范》。

表9－8　　选择导体和电器的环境温度

类别	安装场所	环境温度（℃）	
		最高	最低
裸导体	屋内	该处通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度加5℃	
电缆	屋外电缆沟（无覆土）	最热月平均最高温度	年最低温度
	屋内电缆沟	屋内通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度加5℃	
	电缆隧道	该处通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度	
	土中直埋	最热月平均地温	
电器	屋内电抗器	该处通风设计最高排风温度	
	屋内其他	该处通风设计温度，当无资料时，可取最热月平均最高温度加5℃	

注　1. 年最高（或最低）温度为一年中所测量的最高（或最低）温度的多年平均值；

2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值：取多年平均值。

（4）选择导体和电器时的相对湿度，一般采用当地湿度最高月份的平均相对湿度。对湿度较高的场所，应采用该处实际相对湿度。

9.2.1.4 短路校验的一般要求（“配电手册”）

高压电器一般按表9－9的要求进行短路电流动稳定和热稳定校验，但下列情况除外。

（1）用熔断器保护的高压电器和导体可不验算热稳定，但动稳定仍应验算。用限流熔断器保护的电器和导体可根据限流熔断器的特性来校验电器和导体动稳定。

（2）用熔断器保护的电压互感器回路，可不验算动、热稳定。

（3）架空线路，可不验算动、热稳定。

高压电器和导体的动稳定、热稳定及高压电器的断开电流，一般按三相短路电流校验。当单相短路、两相短路较三相短路严重时，则按严重情况校验。

确定短路电流时，应按可能发生最大短路电流的正常接线方式计算。

做短路电流动、热稳定校验时，短路点应选择在正常接线方式下短路电流为最大的地点。对带电抗器的10（6）kV出线，隔板（母线与母线隔离开关之间）前的引线和套管应按短路点在电抗器前计算；隔板后的引线和电器一般按短路点在电抗器后计算。

9.2.1.5 验算电缆的热稳定时，短路点按下述情况确定

（1）不超过制造长度的单根电缆，短路发生在电缆末端。

（2）有中间接头的电缆，短路发生在每一缩减电缆截面线段的首端；电缆线段为等截面时，则短路发生在第二段电缆的首端，即第一个接头处。

（3）无中间接头的并列连接电缆，短路发生在并列点后。

表9-9　　高压电器短路稳定校验计算公式

电器名称	校验项目及计算公式	代号说明
断路器 负荷开关 隔离开关	动稳定 $i_{ch} \leqslant i_{max}$　　$I_{ch} \leqslant I_{max}$ 热稳定 $Q_t \leqslant I_t^2 t$	i_{ch}——三相短路冲击电流，kA； I_{ch}——三相短路全电流最大有效值，kA； i_{max}——电器动稳定电流峰值，kA，由样本查得； I_{max}——电器动稳定电流有效值，kA，由样本查得； I_t——电器在 ts 内允许通过的热稳定电流，kA，由样本查得； t——允许通过热稳定电流的持续时间，s； Q_t——短路电流热效应，$kA^2.s$； i_{dw}——电抗器动稳定电流，kA，由样本查得； $I_t\sqrt{t}$——电抗器热稳定度，$kA.s^{1/2}$由样本查得； I_{nl}——电流互感器一次额定电流，A； K_{dw}——电流互感器稳定倍数，由样本查得； a——相间距离，m； F'——电流互感器一次绕组出线端允许力，N，由样本查得； l——由电流互感器出线端至最近一个固定点的距离，m； F_m——母线型电流互感器套帽处允许力，Pa，由样本查得； l_m——母线相互作用的计算长度，m，其值为$\frac{l_1+l_2}{2}$； l_1——母线型电流互感器瓷套帽至最近一个固定点的距离，m； l_2——电流互感器内部长度，m； K_t——电流互感器的1s热稳定倍数，由样本查得； F_c——作用于绝缘子上的计算力，N； F_{ph}——绝缘子机械破坏负荷，N，由样本查得； l_c——绝缘子间跨距，m，当绝缘子两边的跨距不同时，取其平均值； K——绝缘子受力系数，当绝缘子水平布置，母线平放时为1，母线立放时，6～10kV为1.4，35kV为1.18，当绝缘子垂直布置时为1； l_{11}——套管端与最近一个绝缘子间距离，m； l_{12}——套管本身长度，m； σ_c——作用于母线的计算应力，Pa； σ_y——母线最大允许应力，Pa，硬铝为69MPa，硬铜为137MPa； W——截面系数，m^3，见“配电手册”表5-5； S_{min}——导体所需最小截面，mm^2； c——热稳定系数，见“配电手册”表5-8； I_s——短路电流周期分量有效值，kA； t——短路切除时间，s
电抗器	动稳定　$i_{ch} \leqslant i_{dw}$ 热稳定　$Q_t < (I_t\sqrt{t})^2$	
电流互感器	内部动稳定 $i_{ch} \leqslant \sqrt{2}K_{dw}I_{nl} \times 10^{-3}$ 外部动稳定： （1）样本标明允许力 F'时 $i_{ch} \leqslant 3.4\sqrt{\frac{aF'}{l}}$ （2）样本未标明 F'而只给以 $a=40$cm，$l=50$cm 的动稳定倍数 K_{dw}时 $i_{ch} \leqslant \sqrt{2}K_{dw}I_{nl}\sqrt{\frac{50a}{40l}} \times 10^{-3}$ （3）样本标明有允许力 F_m 的母线型电流互感器 $i_{ch} \leqslant 2.4\sqrt{\frac{aF_m}{l_m}}$ 热稳定 $Q_t \leqslant (K_tI_{nl} \times 10^{-3})^2 t$	
支持绝缘子	动稳定 $F_c \leqslant 0.6F_{ph}$ $F_c = 0.173K\frac{l_c}{a}i_{ch}^2$	
穿墙套管	动稳定 $F_c \leqslant 0.6F_{ph}$ $F_c = 8.62(\frac{l_{11}+l_{12}}{a})\ i_{ch}^2 \times 10^{-2}$ 热稳定 $Q_t \leqslant I_t^2 t$	
母　线	动稳定 $\sigma_c \leqslant \sigma_y$ 当跨数大于2时母线应力 $\sigma_c = 1.73\frac{l_c^2}{aw}(i_{ch})^2 \times 10^{-2}$ 热稳定 $S_{min} \geqslant \frac{1}{c}\sqrt{Q_t} \times 10^3$	
电缆	热稳定　$S_{min} = \frac{\sqrt{I_s^2 t}}{c} \times 10^3$	

9.2.2 低压电气设备选择方法（《低压配电设计规范》）

9.2.2.1 低压电器设备选择的一般条件：

（1）电器的额定电压应与所在回路标称电压相适应；

（2）电器的额定电流不应小于所在回路的计算电流；

（3）电器的额定频率应与所在回路的频率相适应；

（4）电器应适应所在场所的环境条件；

（5）电器应满足短路条件下的动稳定与热稳定的要求。用于断开短路电流的电器，应满足短路条件下的通断能力。

（6）验算电器在短路条件下的通断，应采用安装处预期短路电流周期分量的有效值，当短路点附近所接电动机额定电流之和超过短路电流的1%时，应计入电动机反馈电流的影响。

（7）当维护、测试和检修设备需断开电源时，应设置隔离电器。

（8）隔离电器应使所在回路与带电部分隔离，当隔离电器误操作会造成严重事故时，应采取防止误操作的措施。

（9）隔离电器宜采用同时断开电源所有极的开关或彼此靠近的单极开关。

（10）隔离电器可采用下列电器：

1）单极或多极隔离开关、隔离插头；

2）插头与插座；

3）连接片；

4）不需要拆除导线的特殊端子；

5）熔断器。

（11）半导体电器严禁作隔离电器。

（12）通断电流的操作电器可采用下列电器：

1）负荷开关及断路器；

2）继电器、接触器；

3）半导体电器；

4）10A及以下的插头与插座。

9.2.2.2 按正常工作条件选择

9.2.2.2.1 熔断器额定电流的确定。熔断器主要用于配电线路和电气设备的短路保护，也可用作电气线路的过负荷保护。熔断器熔体电流的选择应保证在正常工作电流和起动尖峰电流下不误动作，并按故障电流校验其熔断时间不超过规定的最大切断时间。

（1）按正常工作电流选择

$$I_n \geqslant I_B \tag{9-11}$$

（2）按起动尖峰电流选择：

1）单台电动机回路熔断器的选择。熔断器宜选用保护电动机型的熔断器。熔体的额定电流应大于电动机的额定电流，电动机频繁起动时，熔体的额定电流应再加大一至二级。

为保证电动机起动时不会熔断，熔体的额定电流应按熔体在电动机起动时间内允许通过的最大电流选择。NT型熔断器熔体额定电流选择见表9-10。

表 9－10　　NT 型熔断器的熔体通过电动机起动电流的最大允许值　　单位：A

熔体额定电流(A)		10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	300	315	355	400
电动机起动时间（s）	≤3	37	58	82	100	125	190	220	310	430	550	680	1000	1300	1600	1850	2050	2350	2700
	≤8	32	48	65	82	105	160	190	250	340	440	540	730	1000	1250	1500	1600	1800	2000

注　起动时间≤3s 适用于轻载启动；

起动时间≤8s 适用于重载启动；

当起动时间＞8s，或频繁起动、反接制动时，熔体额定电流按表中≤8s 的数值加大一级。

2）配电线路

$$I_n \geqslant K_r \left[I_{rml} + I_{c(n-1)} \right] \tag{9-12}$$

（3）照明线路

$$I_n \geqslant K_m I_c \tag{9-13}$$

以上式中　I_n——熔断器的额定电流，A；

I_c——线路的计算电流，A；

I_z——被保护导体的允许持续载流量，A；

I_{rml}——线路中起动电流最大的一台电动机的额定电流，A；

$I_{c(n-1)}$——除起动电流最大的一台电动机外的线路计算电流，A；

K_r——配电线路熔体选择计算系数，取决于最大的一台电动机的起动情况，最大的一台电动机额定电流与线路计算电流的比值［$I_{rml}/I_{c(n-1)}$］和熔体时间—电流特性，其值见表 9－11；

K_m——照明线路熔体选择计算系数，取决于电光源起动状况和熔体时间—电流特性，其值见表 9－12。

表 9－11　　K_r 值

$I_{rml}/I_{c(n-1)}$	＜1	1	＞1
K_r	1.1	1.15	1.2

表 9－12　　K_m 值

熔断器型号	熔体额定电流（A）	K_m		
		白炽灯、荧光灯、卤钨灯	荧光高压汞灯	高压钠灯、金属卤化物灯
RL7，NT	≤63	1.0	1.1～1.5	1.2
RL6	≤63	1.0	1.3～1.5	1.5

表 9－13　TN 接地系统的接地故障电流 I_k 和熔体额定电流比的允许最小值

要求切断时间（s） ＼ 熔体额定电流（A）	4～10	16～32	40～63	80～200	250～500
≤5	4.5	5		6	7
≤0.4	8	9	10	11	—

（3）为使熔体在规定时间内切断故障电路，对于 TN 接地系统，其接地故障电流 I_k 与熔断体的额定电流 I_n 的比值 K_i 应满足下式要求

$$I_k / I_n \geqslant K_i \tag{9-14}$$

式中　I_k——接地故障电流，A；

I_n——熔断体的额定电流，A；

K_i——比值，应符合表 9－13 的要求。

（4）熔断器的最大分断电流 $I_{kd.r}$应大于或等于被保护线路的最大三相短路电流有效值 I_k，即符合下式要求

$$I_{kd.r} \geqslant I_k \tag{9-15}$$

9.2.2.2.2 低压断路器额定电流的确定：低压断路器主要用于配电线路的过载、欠压、失压、短路和接地故障保护，其用途分类见表 9－14。

表 9－14　　低压断路器用途分类

断路器类型	电流范围（A）	保护特性			主要用途
配电用低压断路器	630～4000	选择型（B类）	三段保护	瞬时、短延时、长延时	电源总开关和靠近变压器近端干线开关
			四段保护	瞬时、短延时、长延时、接地故障	
	100～630	非选择型（A类）	限流型	瞬时、长延时	支路末端开关
			一般型		
电动机保护用低压断路器	63～630	直接起动	一般型	过电流脱扣器瞬时整定电流（8～15）I_{nt}保护笼型电动机	保护笼型电动机
			限流型	过电流脱扣器瞬时整定电流 $12I_{nt}$	用于靠近变压器近端电动机
		间接起动	过电流脱扣器瞬时整定电流（3～8）I_{nt}		保护笼型和绕线转子电动机
照明用数型断路器	6～63	过载长延时，短路瞬时			用于照明线路和信号二次回路
剩余电流保护器	20～200	电磁式	动作电流分为 15、30、50、75、100、300、500mA，分断时间 0.1～0.6s		接地故障保护
		集成电路式			

注　I_{nt}表示过电流脱扣器额定电流，对可调式脱扣器可长期通过的最大电流。

（1）断路器额定电流的确定：断路器壳架等级额定电流（指塑壳或框架中所能装的最大过电流脱扣器的额定电流）I_{nQ}和断路器额定电流（指过电流脱扣器额定电流 I_{nt}）的确定如下

$$I_{nQ} \geqslant I_B \tag{9-16}$$

$$I_{nt} \geqslant I_c \tag{9-17}$$

式中　I_{nQ}——断路器壳架等级额定电流，A；

I_c——线路的计算负载电流，A；

I_{nt}——过电流脱扣器额定电流，A。

（2）瞬时过电流脱扣器的整定值（I_{set}）：配电用低压断路器的瞬时过电流脱扣器整定电流 I_{set3}，应躲过线路正常工作时发生的尖峰电流，即按下式确定

$$I_{set3} \geqslant K_{set3}\left[I'_{qM1} + I_{c(n-1)}\right] \tag{9-18}$$

式中　K_{set3}——低压断路器瞬时脱扣器可靠系数，取 1.2；

I'_{qM1}——线路中电流最大的一台电动机的全起动电流，A，它包括了周期分量和非周期分量，其值按电动机起动电流 I_{qM1}的 2 倍计算；

$I_{c(n-1)}$——除起动电流最大的一台电动机以外的线路负载计算电流，A。

为满足被保护线路各级保护电器间选择性动作要求，选择型低压断路器瞬时脱扣器电流整定值 I_{set3}，在满足被保护线路相间短路电流故障时动作灵敏度要求的前提下，应尽量选择大一些，以躲过下一级开关所保护线路故障时的短路电流。

非选择型低压断路器瞬时脱扣器电流整定值，在躲过回路尖峰电流的条件下，尽可能整定得小一些，以保证故障时动作的灵敏度。

(3) 短延时过电流脱扣器的整定值 (I_{set2})：

1) 配电用低压断路器的短延时过电流脱扣器的整定电流 I_{set2}，应躲过短时间出现的负荷尖峰电流，即按下式确定

$$I_{set2} \geqslant K_{rel2}\left[I_{qM1} + I_{c(n-1)}\right] \tag{9-19}$$

式中 K_{rel2}——低压断路器短延时脱扣器可靠系数，取 1.2；

I_{qM1}——线路中最大的一台电动机的起动电流，A；

$I_{c(n-1)}$——除起动电流最大的一台电动机以外的线路负载计算电流，A。

2) 动作时间的确定：短延时主要用于保证保护装置的动作选择性。低压断路器短延时的断开时间通常有 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8s 和 1.0s 等可供选择。根据与下级熔断器间的选择性切断要求确定动作时间。上下级时间级差取 0.1～0.2s。

(4) 长延时过电流脱扣器的整定值 (I_{set1})：配电用低压断路器的长延时过电流脱扣器整定电流 I_{set1}，应大于线路计算电流，并小于导体载流量，即按下式确定

$$I_z \geqslant I_{set1} \geqslant I_c \tag{9-20}$$

式中 I_c——线路的计算电流，A；

I_z——被保护导体的允许持续载流量，A。

(5) 照明用低压断路器的过电流脱扣器的整定：照明用低压断路器的长延时和瞬时过电流脱扣器整定电流分别为

$$I_{set1} \geqslant K_{rel1} I_c \tag{9-21}$$

$$I_{set3} \geqslant K_{rel3} I_{set1} \tag{9-22}$$

式中 I_c——照明线路的计算电流，A；

K_{rel1}、K_{rel3}——低压断路器长延时和瞬时脱扣器可靠系数，取决于电光源起动状况和低压断路器的特性，其值见表 9-15。

表 9-15　　低压断路器长延时和瞬时脱扣器可靠系数

低压断路器过电流脱扣器的种类	可靠系数	白炽灯、荧光灯、卤钨灯	荧光高压汞灯	高压钠灯、金属卤化物灯
长延时脱扣器	K_{rel1}	1.0	1.1	1.0
瞬时脱扣器	K_{rel3}	4～7	4～7	4～7

9.2.2.2.3 剩余电流保护器：剩余电流保护器（俗称漏电保护器）能迅速断开接地故障时的故障电路，以防发生间接电击伤亡和引起火灾事故。

当漏电保护器用于插座回路和末端配电线路，并侧重防间接电击时，则应选择动作电流为 30mA 的高灵敏度漏电保护器。如作为上一级保护，其动作电流不应小于 300mA，并有必要的动作延时；对于配电干线不大于 500mA，并有足够的动作延时或作用于报警。

漏电电流保护装置的动作电流宜按下列数值选择：

1）手握式用电设备为 15mA。

2）环境恶劣或潮湿场所的用电设备（如高空作业）为 6～10mA。

3）建筑施工工地的用电设备为 15～30mA。

4）家用电器回路为 30mA。

5）成套开关柜、分配电盘等为 100mA 以上。

6）防止电气火灾为 300mA。

漏电保护器的动作电流应能躲开正常的泄漏电流，保证正常运行时不会发生误动作，其要求如下：

1）用于单台用电设备时，动作电流不应小于正常运行时的实际泄漏电流（包括设备和线路）的 4 倍；

2）用于配电线路时，动作电流不应小于正常运行时线路和设备的实际泄漏电流的 2.5 倍，同时还应满足其中泄漏电流最大的一台用电设备正常运行的泄漏电流的 4 倍；

3）用于整个建筑物配电干线时，动作电流不应小于正常运行时实际泄漏电流的 2 倍。

9.2.2.2.4 开关及接触器的选择：

（1）隔离器、刀开关和熔断器组合电器。

1）几种电器的作用：

a. 隔离器。一般指无载通断电器，只能接通和分断空载电流，但应有一定的载流能力。

b. 刀开关。可供接通电路用，亦可作为不频繁接通、分断照明设备和小型电动机电路之用。

c. 熔断器组合电器。包括负荷开关、刀熔开关、熔断器式隔离器。

2）隔离器、刀开关的选择原则：应按线路的额定电压、计算电流及断开电流选择，还应按短时耐受电流校验。

（2）接触器。接触器是一种适用于近距离或远距离频繁接通和分断电路的电器。主要用作电动机的起动、控制，也可用来控制其他用电设备和线路。

接触器在不同使用场合下操作条件有很大差异，其额定工作电流和额定控制功率随使用条件（额定工作电压、使用类别、操作频率、工作制等）的不同而变化，还应根据不同使用条件正确选用其容量。

其选择原则如下：

1）应接电动机的额定功率或线路计算电流选择接触器的容量。

2）按短时耐受电流校验：接触器的短时耐受电流值不应小于线路的三相短路电流。

3）根据安装场所或部位的环境条件选择结构型式。

4）接触器吸引线圈的额定电压、额定电流及辅助触头数量应符合控制回路电压、电流及接线要求。

5）用于 AC－1、AC－2 类别时，在规定操作频率下，可按电动机的满载电流选用相同额定电流的接触器；用于 AC－2、AC－4 类别时，可用降低容量方法，以增加其电寿命。

9.2.3 变压器选择（《民用建筑电气设计规范》）

9.2.3.1 变电所符合下列条件之一时，宜装设两台及以上变压器：

（1）有大量一级负荷或虽为二级负荷，但从保安角度需设置时（如消防等）；

（2）季节性负荷变化较大时；

（3）集中负荷较大时。

9.2.3.2 在下列情况下可设专用变压器：

（1）当动力和照明采用共用变压器严重影响质量及灯泡寿命时，可设照明专用变压器；

（2）当季节性的负荷容量较大时（如大型民用建筑的空调冷冻机等负荷），可设专用变压器；

（3）接线为 Y，yn0 的变压器，当单相不平衡负荷引起的中性线电流超过变压器低压绕组额定电流的 25%时，宜设单相变压器（不推荐使用 Y，yn0 接线变压器）；

（4）出于功能需要的某些特殊设备（如容量较大的电焊机等）宜设专用变压器；

（5）单台单相负荷较大时，宜设单相变压器；

（6）冲击性负荷较大，严重影响电能质量时，可设冲击负荷专用变压器；

（7）在电源系统不接地或经阻抗接地，电气装置外露导电体就地接地系统（IT 系统）的低压电网中，照明负荷应设专用变压器。

9.2.3.3 具有下列情况之一者，应选用接线为 D，yn11 型变压器：

（1）三相不平衡负荷超过变压器每相额定功率 15%以上者；

（2）需要提高单相短路电流值，确保低压单相接地保护装置动作灵敏度者；

（3）需要限制三次及三的奇数次谐波含量者。

在现代建筑中，按照限制三次谐波及提高接地故障保护灵敏度之需要，推荐这种接线的变压器。

9.2.3.4 设置在一类高、低层主体建筑中的变压器，应选择干式、气体绝缘或非可燃性液体绝缘的变压器；三类高、低层主体建筑中也宜如此，并应按规范采取防火措施。

9.2.3.5 特别潮湿的环境不宜设置浸渍绝缘干式变压器。在多尘或有腐蚀性气体严重影响变压器安全运行的场所，应选用防尘型或防腐型变压器。

9.2.3.6 低压为 0.4kV 变电所中单台变压器的容量不宜大于 1600kVA，当用电设备容量较大、负荷集中且运行合理时，可选用较大的变压器。

设置在二层以上的三相变压器，应考虑垂直与水平的运输对通道及楼板荷载的影响，如采用干式变压器时，其容量不宜大于 630kVA。

9.2.3.7 居住小区变电所内单台变压器容量不宜大于 630kVA。

9.2.4 低压配电线路保护及整定计算方法

9.2.4.1 一般规定

9.2.4.1.1 配电线路装设的上下级保护电器，其动作应具有选择性；各级之间应能协调配合。对于非重要负荷的保护电器，当有困难时，可采用无选择性切断。

9.2.4.1.2 低压配电线路应装设下列各种保护，作用于切断供电电源或发出报警信号。

（1）短路保护；

（2）过负荷保护；

（3）接地故障保护。

9.2.4.2 短路保护：配电线路的短路保护，应在短路电流对导体和连接件产生的热作用和机械作用造成危害之前切断短路电流。

（1）绝缘导体的热稳定校验应符合下列规定：

1）当短路持续时间不大于 5s 时，绝缘导体的热稳定应按下式进行校验

$$S \geqslant \frac{\sqrt{I^2 t}}{K} \tag{9-23}$$

式中 S——绝缘导体的线芯截面，mm^2；

I——短路电流有效值（均方根值），A；

t——在已达到允许最高持续工作温度的导体内发生短路电流持续作用的时间，s；

K——不同导体及绝缘材料的计算系数。

2）不同绝缘材料、不同线芯材料的 K 值，应符合表 9-16 的规定。

（2）短路持续时间小于 0.1s 时，应计入短路电流非周期分量的影响；大于 5s 时应计入散热的影响。

表 9-16　　不同线芯及绝缘材料的导体的 K 值

绝缘材料 / 线芯材料	聚氯乙烯	丁基橡胶	乙丙橡胶	油浸纸
铜芯	115	131	143	107
铝芯	76	87	94	71

（3）当保护电器为符合 GB 14048.2—2001《低压断路器》标准的低压断路器时，短路电流不应小于低压断路器瞬时或延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍，这是考虑保证断路器动作可靠性所需要。

（4）在线芯截面减小处、分支处或导体类型、敷设方式或环境条件改变后载流量减小处的线路，当越级切断电路不引起故障线路以外的一、二级负荷的供电中断，且符合下列情况之一时，可不装设短路保护：

1）配电线路被前段线路保护电器有效的保护，且此线路和其过负载保护电器能承受通过的短路能量；

2）配电线路电源侧装有额定电流为 20A 及以下的保护电器；

3）架空配电线路的电源侧装有短路保护电器。

9.2.4.3 过负荷保护：

（1）配电线路的过负载保护，应在过负载电流引起的导体温升对导体的绝缘、接头、端子或导体周围的物质造成损害前切断负载电流。

（2）配电线路应装设过负载保护，但下列线路可不装设：

1）配电线路已由电源侧的过负载保护电器有效地保护；

2）不可能过负载的线路。

（3）过负载保护电器宜采用反时限特性的保护电器，其分断能力可低于电器安装处的短路电流值，但应能承受通过的短路能量。

（4）过负载保护电器的动作特性应同时满足下列条件

$$I_c \leqslant I_n \leqslant I_z \tag{9-24}$$

$$I_2 \leqslant 1.45 I_z \tag{9-25}$$

式中 I_c——线路计算负载电流，A；

I_n——熔断器熔体额定电流或断路器长延时脱扣器的整定电流，A；

I_z——导体允许持续载流量，A；

I_2——保证保护电器可靠动作的电流，A，当保护电器为低压断路器时，I_2 为约定时

间内的约定动作电流，当为熔断器时，I_2 为约定时间内的约定熔断电流。

按式（9－24）、式（9－25）校验过负载保护电器的动作特性，当采用符合 GB 14048.2—2001 标准的低压断路器时，长延时脱扣器整定电流（I_{set1}）与导体允许持续载流量（I_z）的比值不应大于 1。即 $I_{set1}/I_z \leqslant 1$。

当采用熔断器时，符合国家标准 GB 13539.1—1992《低压熔断器基本要求》和 GB 13539.2—1992《低压熔断器　专职人员使用的熔断器的补充要求》，经推导，熔断器熔体电流（I_r）与导体允许持续载流量（I_z）的比值应符合表 9－17 要求，此时，就是满足了式（9－24）和式（9－25）的条件。

表 9－17　　过负载保护用，熔体电流 I_r 与导体允许持续载流量 I_z 的关系

专职人员用 gG 型熔断器类型	I_r 值的范围	I_r/I_z
螺栓连接熔断器	全范围	$\leqslant 1$
刀型触头熔断器和圆筒帽型熔断器	$I_r \geqslant 16A$	$\leqslant 1$
	$16A > I_r > 4A$	$\leqslant 0.85$
	$I_r \leqslant 4A$	$\leqslant 0.75$

（5）突然断电比过负载造成的损失更大的线路，其过负载保护应作用于信号而不应作用于切断电路，如消防设施、钢水浇铸设备等。

（6）多根并联导体组成的线路采用过负载保护，其线路的允许持续载流量（I_z）为每根并联导体的允许持续载流量之和，且应符合下列要求：

1）导体的型号、截面、长度和敷设方式均相同；

2）线路全长内无分支线路引出；

3）线路的布置使各并联导体的负载电流基本相等。

9.2.4.4　接地故障保护：

（1）一般规定。

1）接地故障保护的设置应能防止人身间接电击以及电气火灾、线路损坏等事故。接地故障保护电器的选择应根据配电系统的接地型式，移动式、手握式或固定式电气设备的区别，以及导体截面等因素经技术经济比较确定。

2）防止人身间接电击的保护采用下列措施之一时，可不采用 1）款接地故障保护。

a. 采用双重绝缘或加强绝缘的电气设备（Ⅱ类设备[①]）；

b. 采取电气隔离措施；

c. 采用安全超低电压；

d. 将电气设备安装在非导电场所内；

e. 设置不接地的等电位联结。

3）本节接地故障保护措施所保护的电气设备，只适用于防电击保护分类为Ⅰ类电气设备[②]。设备所在的环境为正常环境，人身电击安全电压限值（U_L）为 50V。

4）采用接地故障保护时，在建筑物内应将下列导电体作总等电位联结：

① Ⅱ类设备的定义应符合（GB/T 12501－1992）《电气和电子设备按防触电保护的分类》的规定。

② Ⅰ类设备的定义应符合（GB/T 12501－1992）《电气和电子设备按防触电保护的分类》的规定。

a. PE、PEN 干线；

b. 电气装置接地极的接地干线；

c. 建筑物内的水管、煤气管、采暖和空调管等金属管道；

d. 条件许可的建筑物金属构件等导电体。

上述导电体宜在进入建筑物处接向总等电位联结端子。等电位联结中金属管道连接处应可靠地连通导电。

5）当电气装置或电气装置某一部分的接地故障保护不能满足切断故障回路的时间要求时，尚应在局部范围内作辅助等电位联结。

当难以确定辅助等电位联结的有效性时，可采用下式进行校验

$$R \leqslant 50/I_{op} \tag{9-26}$$

式中 R——可同时触及的外露可导电部分和装置外可导电部分之间，故障电流产生的电压降引起接触电压的一段线段的电阻，Ω；

$I^{①}_{op}$——切断故障回路时间不超过 5s 的保护电器动作电流，A。

（2）TN 系统的接地故障保护。

1）TN 系统配电线路接地故障保护的动作特性应符合下式要求

$$Z_s \cdot I_a \leqslant U_0 \tag{9-27}$$

式中 Z_s——接地故障回路的阻抗，Ω；

I_a——保证保护电器在规定的时间内自动切断故障回路的电流，A；

U_0——相线对地标称电压，V。

2）相线对地标称电压为 220V 的 TN 系统配电线路的接地故障保护，其切断故障回路的时间应符合下列规定：

a. 配电线路或仅供给固定式电气设备用电的末端线路，不宜大于 5s；

b. 供电给手握式电气设备和移动式电气设备的末端线路或插座回路，不应大于 0.4s。

3）熔断器作接地故障保护，且符合下列条件时，可认为满足上述第 2）款的要求。

a. 当要求切断故障回路的时间小于或等于 5s 时，短路电流（I_k）与熔断器熔体额定电流（I_n）的比值不应小于表 9－18 的规定；

b. 当要求切断故障回路的时间小于或等于 0.4s 时，短路电流（I_k）与熔断器熔体额定电流（I_n）的比值不应小于表 9－19 的规定。

表 9－18　切断接地故障回路时间小于或等于 5s 的 I_k/I_n 最小比值

熔体额定电流（A）	4～10	12～63	80～200	250～500
I_k/I_n	4.5	5	6	7

表 9－19　切断接地故障回路时间小于或等于 0.4s 的 I_k/I_n 最小比值

熔体额定电流（A）	4～10	16～32	40～63	80～200
I_k/I_n	8	9	10	11

4）当配电箱同时有上述 2）款之 a 和 b 项所述的两种末端线路引出时，应满足下列条件之一：

a. 自配电箱引出的上述 2）款 a 项所述的线路，其切断故障回路的时间不应大于 0.4s；

① 当保护电器为瞬时或短延时动作的低压断路器时，I_{op}值应取低压断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的 1.3 倍。

b. 使配电箱至总等电位联结回路之间的一段 PE 线的阻抗不大于（$U^{①}_{L}.Z_{e}$）/U_0（U_L 为安全电压限值，为 50V），或作辅助等电位联结。

5）TN 系统配电线路应采用下列的接地故障保护方式：

a. 当过电流保护能满足 9.2.4.4 条中（2）的 2）款要求时，宜采用过电流保护兼作接地故障保护；

b. 在三相四线制配电线路中，当过电流保护不能满足 9.2.4.4 条中（2）的 2）款的要求且零序电流保护能满足时，宜采用零序电流保护，此时保护整定值应大于配电线路最大不平衡电流（通常宜大于 1.5～2.0 倍不平衡电流）；

c. 当上述一、二款的保护均不能满足要求时，应采用漏电电流动作保护。

（3）TT 系统② 的接地故障保护。

1）TT 系统配电线路接地故障保护的动作特性应符合下式要求

$$R_A \cdot I_{op} \leqslant 50V \tag{9-28}$$

式中 R_A——外露可导电部分的接地电阻和 PE 线电阻，Ω；

I_{op}——保证保护电器切断故障回路的动作电流，A，当采用过电流保护电器时，反时限特性过电流保护电器的 I_{op}为保证在 5s 内切断的电流，采用瞬时动作特性过电流保护电器的 I_{op}为保证瞬时动作的最小电流。当采用漏电电流动作保护器时，I_{op}为其额定动作电流 $I_{\Delta n}$。

事实上，TT 系统通常都应采用漏电电流动作保护器。

2）TT 系统配电线路内由同一接地故障保护电器保护的外露可导电部分，应用 PE 线连接至共用的接地极上。当有多级保护时，各级宜有各自的接地极。

（4）IT 系统③ 的接地故障保护。

1）在 IT 系统的配电线路中，当发生第一次接地故障时，应由绝缘监视电器发出音响或灯光信号，其动作电流应符合下式要求：

$$R_A \cdot I_k \leqslant 50V \tag{9-29}$$

式中 R_A——外露可导电部分的接地极电阻，Ω；

I_k——相线和外露可导电部分间第一次短路故障的故障电流，A，它计及泄漏电流和电气装置全部接地阻抗值的影响。

2）IT 系统的外露可导电部分可用共同的接地极接地，亦可个别地或成组地用单独的接地极接地。

当外露可导电部分为单独接地，发生第二次异相接地故障时，故障回路的切断应符合 TT 系统接地故障保护的要求。

当外露可导电部分为共同接地，则发生第二次异相接地故障时，故障回路的切断应符合 TN 系统接地故障保护的要求。

3）IT 系统的配电线路，当发生第二次异相接地故障时，应由过电流保护电器或漏电电

---

① U_L 为安全电压限值，为 50V。

② TT 系统。在此系统内，电源有一点与地直接连接，负荷侧电气装置外露可导电部分连接的接地极和电源的接地极无电气联系，其定义应符合现行国家标准《交流电气装置接地设计规范》的规定。

③ IT 系统。在此系统内，电源与地绝缘或一点经阻抗接地，电气装置外露可导电部分直接接地。其定义应符合现行国家标准《交流电气装置接地设计规范》的规定。

流动作保护器切断故障回路，并应符合下列要求：

a. 当 IT 系统不引出 N 线，线路标称电压为 220/380V 时，保护电器应在 0.4s 内切断故障回路，并符合下式要求

$$Z_s \cdot I_{op} \leqslant \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot U_0 \tag{9-30}$$

式中 Z_s——包括相线和 PE 线在内的故障回路阻抗，Ω；

I_{op}——保护电器切断故障回路的动作电流，A。

b. 当 IT 系统引出 N 线，线路标称电压为 220/380V 时，保护电器应在 0.8s 内切断故障回路，并应符合下式要求

$$Z_s \cdot I_{op} \leqslant \frac{1}{2} U_0 \tag{9-31}$$

式中 Z_s——包括相线、N 线和 PE 线在内的故障回路阻抗，Ω。

4）建议 IT 系统不引出 N 线。

（5）接地故障采用漏电电流动作保护。

1）PE 或 PEN 线严禁穿过漏电电流动作保护器中电流互感器的磁回路。

2）漏电电流动作保护器所保护的线路及设备外露可导电部分应接地。

3）TN 系统配电线路采用漏电电流动作保护时，可选用下列接线方式之一：

a. 被保护的外露可导电部分与漏电电流动作保护器电源侧的 PE 线相连接，并应符合式（9-27）的要求；

b. 被保护的外露可导电部分接至专用的接地极上，并应符合 9.2.4.4 条（3）的 2）款的要求。

4）IT 系统中采用漏电电流动作保护器切断第二次异相接地故障时，保护器额定不动作电流 $I_{\Delta no}$，应大于第一次接地故障时的相线内流过的接地故障电流。

5）为减少接地故障引起的电气火灾危险而装设的漏电电流动作保护器，其额定动作电流不应超过 0.5A。

6）多级装设的漏电电流动作保护器，应在时限上有选择性配合。

9.2.4.5 保护电器的装设位置：

（1）保护电器应装设在维护方便、不易受机械损伤、不靠近可燃物的地方，并应避免保护电器工作时意外损坏对周围人员造成伤害。

（2）保护电器应装设在被保护线路与电源线路的连接处，但为了维护与操作方便可设置在离开连接点的地方，但应符合下列要求：

1）线路长度不超过 3m；

2）采取措施将短路危险减至最小，如导线有双层绝缘，穿管敷设，连接端子采取特别措施；

3）不靠近可燃物。

（3）从高处的干线向下引接分支线路，为了操作维护的方便需将分支线路的保护电器装设在距连接点的线路长度大于 3m 的地方时，应符合下列要求：

1）在该分支线装设保护电器前的那一段线路发生短路或接地故障时，离短路点最近的上一级保护电器应能保证符合规定要求动作；

2）该段分支线应敷设于不可燃或难燃的管、槽内。

（4）短路保护电器应装设在配电线路中不接地的各相上。对于中性点不接地的 IT 系统，且无 N 线引出的三相三线配电系统，允许只在两相上装设保护电器。

（5）在 TT、TN 系统中，如果 N 线截面小于相线，则 N 线应装设相应于该导线截面的过电流检测电器，该检测电器使保护电器断开相线，或同时断开相线和 N 线；但如果能同时满足下列条件时，则 N 线上可不装设过电流检测电器：

1）线路的相线保护电器已能保护 N 线；

2）正常（可较长时间缺相运行的线路除外）工作时，可能通过 N 线的最大电流明显地小于该导线的载流量。

（6）IT 系统不宜配出 N 线，如有 N 线配出时，需要在该 N 线上装设过电流保护电器，并用来使包括 N 线在内的所有带电导线断电。但具有下列条件之一者，可不遵守本规定：

1）当个别 N 线的短路受到装设在供电侧保护电器的有效保护；

2）如果个别线路是由漏电电流动作保护电器保护的，且其额定漏电电流不超过相应 N 线载流量的 0.15 倍。

（7）在 TT 系统或 TN－S 系统（含 TN－C－S 系统的 N 线与 PE 线分开部分）中，N 线上不宜装设电器将 N 线断开，当需要断开 N 线时，应装设相线和 N 线同时切断的保护电器。

当装设漏电电流动作保护电器时，应能将其所保护的回路所有带电导线断开。在 TN 系统中，当能可靠地保持 N 线为地电位时，N 线可不需断开。

在 TN－C（含 TN－C－S 系统的 N 和 PE 合一部分）系统中，严禁断开 PEN 线，不得装设可断开 PEN 线的任何电器。

9.3 成套电器的选择

9.3.1 高压配电装置产品基本组成及主要用途

产品基本组成：高压配电装置由高压断路器、负荷开关、接触器、高压熔断器、隔离开关、接地开关、互感器及站用变压器，以及控制、测量、保护、调节装置，内部连接件、辅件、外壳和支持件等组成的成套配电装置，其内的空间以空气或复合绝缘材料作为绝缘和灭弧介质，用作接受和分配电网的电能。或用作对高压用电设备的保护和控制。

9.3.1.1 半封闭式高压开关柜。高压开关柜中离地面 2.5m 以下的各组件安装在接地金属外壳内的高压开关柜，2.5m 及以上的母线或隔离开关无金属外壳封闭。其金属壳内、外的导电体对地及相间距离应符合相关规范的规定。

9.3.1.2 金属封闭式高压开关柜。除进、出线外，高压开关柜中的高低压电器组件及其辅助回路完全安装在接地金属外壳内的高压开关柜。

金属封闭式高压开关柜分三种类型：金属铠装式高压开关柜、间隔式高压开关柜及箱式高压开关柜。

（1）金属铠装式高压开关柜。某些组件分装在用接地的金属隔板隔开的隔室中的金属封闭式高压开关柜内，金属隔板应符合表 9－20 所规定的防护等级（或者更高），至少下列组件应在单独的隔室里：

1）每一组主断路器；

2）连向主断路器一侧的组件，如馈电线路；

3）连向主断路器另一侧的部件，如母线。如果有多于一组的母线，各组母线应分设于

单独的隔室内。

如果利用绝缘板作活门的一部分，这部分应符合 DL/T 404—1997 技术条件第 7.2.1 条的要求。

表 9－20　　外 壳 防 护 等 级

防护等级	能防止物体接近带电部分和触及运动部分
IP2X	能阻挡手指或直径大于 12mm、长度不超过 80mm 的物体进入
IP3X	能阻挡直径或厚度大于 2.5mm 的工具、金属丝等物体进入
IP4X	能阻挡直径大于 1.0mm 的金属丝或厚度大于 1.0mm 的窄条等物体进入
IP5X	能防止影响设备安全运行的大量尘埃进入，但不能安全防止一般灰尘进入

（2）间隔式高压开关柜。某些组件分设于单独的隔室内（与金属铠装式高压开关柜一样），但具有一个或多个非金属隔板的金属封闭式高压开关柜，隔板的防护等级应达到 IP2X～IP5X（或者更高）的要求。

（3）箱式高压开关柜。除铠装式和间隔式高压开关柜以外的金属封闭式高压开关柜，它具有下列特性：

1）隔室的数目少于金属铠装式开关柜和间隔式开关柜；

2）隔板的防护等级低于表 9－20 的规定；

3）没有隔板。

9.3.2　高压开关柜产品选用要点

（1）高压开关柜的选择。为保证高压开关柜中高压电器元件在正常运行、检修、短路和过电压情况下的安全，高压开关柜应按下列条件选择：

1）按环境条件包括温度、湿度、海拔、地震烈度等选择；

2）按正常工作条件包括电压、电流、频率、机械荷载等选择；

3）按短路条件包括短时耐受电流、峰值耐受电流、额定短路关合和开断电流等选择；

4）按承受过电压能力包括绝缘水平等选择；

5）按各类高压电器的不同特点包括开关的操作性能、熔断器的保护特性配合、互感器的负载及准确等级等选择。

（2）金属封闭开关柜类型的选择。根据具体工程使用条件选择金属封闭开关柜的类型。如铠装式金属封闭开关柜、间隔式金属封闭开关柜和箱式金属封闭开关柜。

（3）金属封闭开关柜断路器的选择。根据具体工程使用条件选择金属封闭开关柜中断路器类型。如真空断路器、SF_6 断路器和少油断路器。

（4）一次线路方案的选择。根据具体工程主接线选择金属封闭开关柜的一次线路方案。

（5）继电保护和二次线路接线方式的选择。根据具体工程接线方案选择金属封闭开关柜的继电保护和二次线路接线方式。

9.3.3　12kV 高压开关柜技术性能

9.3.3.1　主要技术内容：

（1）使用环境条件。

1）海拔高度：不超过 1000m。

2）环境温度：不高于＋40℃，不低于－5℃。

3）相对湿度：≤90%（15℃）。

4）抗震能力：地面水平加速度 0.4g；地面垂直加速度 0.2g。

5）安全系数：安全系数 > 2；特殊使用环境条件，订货时协商解决。

（2）使用技术条件及产品试验参数。

1）额定工作电压：10kV［35kV］①。

2）最高工作电压：12kV［40.5kV］。

3）额定工作频率：50Hz。

4）额定关合电流≥63kA，额定开断电流≥25kA。

5）额定动稳定电流：63、（80）kA（峰值）。

6）额定热稳定电流：25、（31.5）kA。

7）对 10kV 不接地系统（中性点经消弧线圈接地）高压设备的绝缘水平应符合额定电压 15/17.5kV 等级标准。

8）工频耐压：瓷绝缘工频耐压：42kV、1min［95kV、1min］；非瓷绝缘工频耐压：38kV、1min。

9）冲击耐压：75kV（峰值）［185kV］（峰值）。

10）温度：开关柜可接触部件为 30℃；导体表面为 65℃。

11）内部故障电弧效应试验：电缆室为 20kA/0.1s；断路器室为 20kA/0.8s。

12）局放试验，按规定。

9.3.4 低压配电柜产品基本组成、主要用途

基本组成：主要由母线、元器件（包括隔离开关、断路器、熔断器、接触器和热继电器等）、仪表及柜体等组成。

主要用途：适用于发电厂、变电所、工矿企业、民用建筑等低压配电系统的动力、配电和电动机控制中心、电容补偿等的电能转换、分配与控制用。

产品分类、基本特点，见表 9－21。

表 9－21　　产品分类及特点

内容	分　类	特　　点
按开关安装方式	固定式	具有结构简单，价格便宜等优点，维修时容易影响其他回路
	抽屉式	具有操作安全，易于检修及维护，更换故障开关容易，可以缩短故障开关停电时间
	抽插式	仅开关本身能插拔，其他配件固定
	组合式	工程中经常采用抽屉、插拔组合的型式较多，小开关用抽屉式、大开关用插拔式
按进出线方式	上进上出	电缆进出线都是由配电柜的上部引出
	上进下出	电缆进线是由配电柜的上部引进，出线由配电柜的下部引出
	下进上出	电缆进线是由配电柜的下部引进，出线由配电柜的上部引出
	下进下出	电缆进线是由配电柜的下部引进，出线由配电柜的下部引出

9.3.5 低压配电柜产品选用要点

（1）根据建筑物的类别确定用电负荷等级。

（2）用电负荷性质（阻性、容性、感性）、设备近期安装容量和远期规划容量、同时使用系数和季节性使用系数、电源进线路数和进线方式、网络短路电流、系统接地型式确定配

① ［］号内数据为 35kV 高压开关柜技术数据。

电系统分支路数和出线方式。

（3）根据业主资金承受能力分析研究，达到确保系统的经济合理、安全可靠。

（4）变配电所的低压配电柜，因为进线电流很大，建议由变压器低压侧至低压配电柜采用封闭式母线上进线方式安装。

（5）配电柜的出线方式宜优先采用下出线方式。

（6）根据计算逐一确定各回路的计算电流，通过计算电流选择相对应的开关（开关的框架电流、脱扣器的额定电流、脱扣器的整定值）和所用电缆规格。然后计算整条母排的计算电流，通过计算电流选择相对应的主开关（开关的框架电流、脱扣器的额定电流、脱扣器的整定值）和所用母排规格。计算出总的功率因数，确定无功功率补偿容量。

（7）根据变压器的容量和系统短路容量确定断路器分断能力。当分断能力不够时，可采取改用分断能力强的熔断器或采用限流型断路器。

（8）有些设备属于冲击性大的负荷，有功功率和无功功率随机地或周期性地大幅波动，或运行功率因数低，或产生大量谐波。冲击性负荷会引起电压的波动，而且电压的波动速度要高于工频变化，电压波动不但会影响电压质量，还会引起电压闪变。这类负荷不宜与对电网质量要求高的设备同在一段母排。

9.3.6 低压配电柜产品规格及技术性能

（1）按 GB 7251—1993 应满足以下条件：

1）周围空气温度不高于 +40℃，不低于 -5℃。24h 内平均温度不高于 +35℃。超过时，需根据实际情况降容运行。

2）户内使用，使用地点的海拔高度不得超过 2000m。超过时，需根据实际情况降容运行。

3）周围空气相对湿度在最高温度为 +40℃时不超过 50%，在较低温度时允许有较大的相对湿度。在会产生凝露的场合，开关柜中应采用通风或加热等措施。

（2）各种型号配电柜的主要技术参数。交流低压配电柜主要技术参数，见表 9-22。

表 9-22　　主要技术参数

项　目	指　标
额定电压（V）	380
额定电流（A）	≤4000
额定短路开断电流（kA）	—
额定短时耐受电流（1s）（kA）	15、30、50、80
额定峰值耐受电流（kA）	30、63、105、176
外壳防护等级	IP30

10

35kV及以下导体及电缆的设计选择

10.1 导体设计选择的原则

10.1.1 导体的选择应满足在当地环境条件下正常运行、安装维护、短路状态的要求，绝缘导体尚应符合工作电压的要求。

10.1.2 环境条件

（1）选择裸导体的环境温度应符合表10－1的规定。

表10－1 选择裸导体的环境温度

安装场所	环境温度（℃）	
	最 高	最 低
屋 外	最热月平均最高温度	
屋 内	该处通风设计温度	

注 1. 年最高（或最低）温度为一年中所测得的最高（或最低）温度的多年平均值。

2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值，取多年平均值。

3. 选择屋内裸导体的环境温度，若该处无通风设计温度资料时，可取最热月平均最高温度加5℃。

（2）选择导体的相对湿度，应采用当地湿度最高月份的平均相对湿度。

（3）选择导体的最大风速，可采用离地10m高，30年一遇10min平均最大风速。设计最大风速超过35m/s的地区，在屋外配电装置的布置中，宜采取降低电气设备的安装高度、加强设备与基础的固定等措施。

10.1.3 导体截面的选择

（1）设计所选用的导体，其长期允许电流不得小于该回路的最大持续工作电流；对屋外导体，尚应计及日照对其载流量的影响。

（2）验算导体动稳定、热稳定所用的短路电流，应按设计规划容量计算，并应考虑电力系统的远景发展规划。

确定短路电流时，应按可能发生最大短路电流的正常接线方式计算。

（3）验算导体用的短路电流，应按下列情况进行计算：

1）除计算短路电流的衰减时间常数外，元件的电阻可略去不计。

2）在电气连接的网络中应计及具有反馈作用的异步电动机的影响和电容补偿装置放电电流的影响。

（4）导体的动稳定、热稳定可按三相短路验算，当单相、两相接地短路较三相短路严重时，应按严重情况验算。

（5）验算导体短路热效应的计算时间，宜采用主保护动作时间加相应的断路器全分闸时间。当主保护有死区时，应采用对该死区起作用的后备保护动作时间，并应采用相应的短路电流值。

（6）用高压限流熔断器保护的导体，可根据限流熔断器的特性验算其动稳定和热稳定。

(7) 裸导体的正常最高工作温度不应大于 +70℃，在计及日照影响时，钢芯铝线及管形导体不宜大于 +80℃。

当裸导体接触面处有镀（搪）锡的可靠覆盖层时，其最高工作温度可提高到 +85℃。

(8) 验算短路热稳定时，裸导体的最高允许温度，对硬铝及铝锰合金可取 +200℃，硬铜可取 +300℃，短路前的导体温度应采用额定负荷下的工作温度。

(9) 在按回路正常工作电流选择裸导体截面时，导体的长期允许载流量，应按所在地区的海拔高度及环境温度进行修正。

当采用多导体结构时（如导体并联），应计及邻近效应和热屏蔽对载流量的影响。

(10) 在正常运行和短路时，电器引线的最大作用力不应大于电器端子允许的荷载。屋外配电装置的导体，应根据当地气象条件和不同受力状态进行力学计算，其安全系数不应小于表 10－2 的规定。

(11) 验算短路动稳定时，硬导体的最大允许应力应符合表 10－3 的规定。

表 10－2　导体和绝缘子的安全系数

类　别	荷载长期作用时	荷载短时作用时
软导体	4	2.5
硬导体	2.0	1.67

注　硬导体的安全系数对应于破坏应力，若对应于屈服点应力，其安全系数应分别为 1.6 和 1.4。

表 10－3　硬导体的最大允许应力

导体材料	硬铝	硬铜	LF21 型铝锰合金管
最大允许应力（MPa）	70	140	90

重要回路的硬导体应力计算，尚应计及动力效应的影响。

(12) 导体和导体、导体和电器的连接处，应有可靠的连接接头。

硬导体间的连接宜采用焊接。需要断开的接头及导体和电器端子的连接处，应采用螺栓连接。

不同金属的导体连接时，根据环境条件，应采取装设过渡接头等措施。

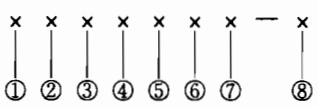
(13) 采用硬导体时，应按温度变化、不均匀沉降和震动等情况，在适当的位置装设伸缩接头或采取防震措施。

10.2　电缆设计选择的原则

10.2.1　电缆分类及型号标记

电缆可按用途、绝缘及缆芯材料分类，并可从型号标记中区分出来。

电缆型号由拼音及数字组成，拼音表示电缆用途及绝缘、缆芯材料；数字表示铠装及外护层材料。其型式及标记如下：



① 用途：电力电缆不表示，控制电缆为 K，信号电缆为 P。

② 绝缘：纸绝缘为 Z，聚氯乙烯为 V，聚乙烯为 Y，交联聚乙烯为 YJ，橡皮为 X。

③ 缆芯：铜芯不表示，铝芯为 L。

④ 内护层：铝为 Q，聚氯乙烯为 V，聚乙烯为 Y。

⑤ 特征：不滴流为 D，屏蔽为 P，无特征不表示。

⑥ 铠装层：分五种，以 0～4 为标记，见表 10－4。

⑦ 外被层：分五种，以 0～4 表示，见表 10－4。

⑧ 电压：以数字表示，以 kV 为单位。

举例：VLV22－1 型表示 1kV 铝芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装电力电缆。

表 10－4　　铠装层及外被层标记

标记	铠装层	外　被　层	标记	铠装层	外　被　层
0	无	无	3	细圆钢丝	聚乙烯护套
1		纤维绕包（麻被）暂时保留	4	粗圆钢丝②	
2	双钢带	聚氯乙烯护套①			

① 聚氯乙烯旧型号标记为 9；

② 粗圆钢丝旧型号标记为 5。

10.2.2　电缆型式选择

电缆型式的选择，应按工作电压、环境条件、敷设方式、用电设备的要求和产品技术数据等因素来确定，原则如下。

10.2.2.1　电缆线芯材料选择：

（1）控制电缆应采用铜芯。

（2）用于下列情况的电力电缆，应采用铜芯：

1）电机励磁、重要电源、移动式电气设备等需要保持连接具有高可靠性的回路。

2）振动剧烈、有爆炸危险或对铝有腐蚀等严酷的工作环境。

3）耐火电缆。

（3）用于下列情况的电力电缆，宜采用铜芯：

1）紧靠高温设备配置。

2）安全性要求高的重要公共设施中。

3）水下敷设当工作电流较大需增多电缆根数时。

（4）除限于产品仅有铜芯和上述（1）～（3）确定宜用铜芯的情况外，电缆缆芯材质应采用铝芯。

10.2.2.2　电力电缆芯数选择：

（1）1kV 及其以下电源中性点直接接地时，三相回路的电缆芯数选择应符合下列规定：

1）保护线与受电设备的外露可导电部位连接接地的情况：保护线与中性线合用同一导体时，应采用四芯电缆；保护线与中性线各自独立时，宜用五芯电缆。

2）受电设备外露可导电部位的接地与电源系统接地各自独立的情况，应采取四芯电缆。

（2）1kV 及其以下电源中性点直接接地时，单相回路的电缆芯数选择应符合下列规定：

1）保护线与受电设备的外露可导电部位连接接地的情况：① 保护线与中性线合用同一导体时，应采用两芯电缆；② 保护线与中性线各自独立时，宜采用三芯电缆。

2）受电设备外露可导电部位的接地与电源系统接地各自独立的情况，应采用两芯电缆。

（3）工作电流较大的回路或水下敷设时，当技术经济比较合理，可采用单芯电缆。

（4）除上述第（1）、（2）、（3）条的规定情况外，交流供电回路宜用三芯电缆。

（5）直流供电回路，宜采用两芯电缆；当需要时可采用单芯电缆。

10.2.2.3　电缆绝缘水平：

（1）交流系统中电力电缆缆芯的相间额定电压，不得低于使用回路的工作线电压。

（2）交流系统中电力电缆缆芯与绝缘屏蔽或金属套之间额定电压的选择，应符合下列规定：

1）中性点直接接地或经低阻抗接地的系统当接地保护动作不超过 1min 切除故障时，应按 100%的使用回路工作相电压。

2）对于 1）项外的供电系统，不宜低于 133%的使用回路工作相电压；在单相接地故障可能持续 8h 以上，或发电机回路等安全性要求较高的情况，宜采取 173%的使用回路工作相电压。

（3）交流系统中电缆的冲击耐压水平，应满足系统绝缘配合要求。

（4）直流输电用电力电缆绝缘水平，应计及负荷变化因素、满足内部过电压的要求。

（5）控制电缆额定电压的选择，应不低于该回路工作电压、满足可能经受的暂态和工频过电压作用要求，且宜符合下列规定：

1）沿较长高压电缆并行敷设的控制电缆（导引电缆），选用相适合的额定电压。

2）在 220kV 及以上高压配电装置敷设的控制电缆，宜选用 600/1000V，或在有良好屏蔽时可选用 450/750V。

3）除 1）、2）项情况外，一般宜选用 450/750V；当外部电气干扰影响很小时，可选用较低的额定电压。

10.2.2.4 电缆绝缘类型：

（1）油浸纸绝缘电缆的选择，应符合下列规定：

1）当电缆线路最高与最低点之间的高差，未超过黏性油浸纸绝缘电缆允许高差时（表 10－5），宜采用黏性油浸纸绝缘电缆。

2）除 1）项外，应采用不滴流油浸纸绝缘电缆。

表 10－5 黏性油浸纸绝缘电缆的允许高差

额定电压（kV）	电缆线路的特征	允许高差（m）
1～3	有铠装	25
	无铠装	20
6～10		15
35	有防止油干枯的补加措施	10
	无防止油干枯的补加措施	5

注 防止油干枯的补加措施，如采用能补充注油的充油式终端等。

（2）当自容式充油电缆与六氟化硫全封闭电器直接相连、且封闭式终端不具备油与气的严密隔离时，电缆的最低工作油压应大于六氟化硫全封闭电器的最高工作气压。

（3）移动式电气设备等需经常弯移或有较高柔软性要求的回路，应使用橡皮绝缘电缆。

（4）放射线作用场所，应按绝缘型类要求选用交联聚乙烯、乙丙橡皮绝缘等耐射线辐照强度的电缆。

（5）60℃以上高温场所，应按经受高温及其持续时间和绝缘型类要求，选用耐热聚氯乙烯、普通交联聚乙烯、辐照式交联聚乙烯或乙丙橡皮绝缘等适合的耐热型电缆；100℃以上高温环境，宜采用矿物绝缘电缆。

高温场所不宜用聚氯乙烯绝缘电缆。

（6）低温－20℃以下环境，应按低温条件和绝缘型类要求，选用油浸纸绝缘类或交联聚乙烯、聚乙烯绝缘、耐寒橡皮绝缘电缆。

低温环境不宜用聚氯乙烯绝缘电缆。

（7）有低毒难燃性防火要求的场所，可采用交联聚乙烯、聚乙烯或乙丙橡皮等绝缘不含卤素的电缆。

防火有低毒性要求时，不宜用聚氯乙烯电缆。

（8）除按上述第（5）～（7）条明确要求的情况外，6kV 以下回路，可用聚氯乙烯绝缘电缆；非重要性的 6kV 回路，经技术经济比较合理时也可用聚氯乙烯绝缘电缆。

（9）用在中、高压回路的交联聚乙烯电缆，应选择属于具备耐水树特性的绝缘构造型式。

对重要回路的 6kV 及以上电压回路，宜采用含有干式交联和内、外半导电与绝缘层三层共挤工艺特征的电缆。

10.2.2.5 电缆外护层类型

（1）电缆的外护层，应符合下列要求：

1）交流单相回路的电力电缆，不得有未经非磁性处理的金属带、钢丝铠装。

2）在潮湿、含化学腐蚀环境或易受水浸泡的电缆，金属套、加强层、铠装上应有挤塑外套，水中电缆的粗钢丝铠装尚应有纤维外被。

3）除低温 -20℃以下环境或药用化学液体浸泡场所，以及有低毒难燃性要求的电缆挤塑外套宜用聚乙烯外，可采用聚氯乙烯外套。

4）用在有水或化学液体浸泡场所的 6～35kV 重要性或 35kV 以上交联聚乙烯电缆，应具有符合使用要求的金属塑料复合阻水层、铅套、铝套或膨胀式阻水带等防水构造。

敷设于水下的中、高压交联聚乙烯电缆还宜具有纵向阻水构造。

（2）选择自容式充油电缆的加强层类型，且当线路未设置塞止式接头时，最高与最低点之间高差应符合下列要求：

1）仅有铜带等径向加强层，容许高差为 40m；但用于重要回路时宜为 30m。

2）径向和纵向均有铜带等加强层，容许高差为 80m；但用于重要回路时宜为 60m。

（3）直埋敷设电缆的外护层选择，应符合下列规定：

1）电缆承受较大压力或有机械损伤危险时，应有加强层或钢带铠装。

2）在流沙层、回填土地带等可能出现位移的土壤中，电缆应有钢丝铠装。

3）白蚁严重危害且塑料电缆未有尼龙外套时，可采用金属套或钢带铠装。

4）除本条 1）～3）项外的情况，可采用不带铠装的外护层。

（4）空气中固定敷设电缆时的外护层选择，应符合下列规定：

1）油浸纸绝缘铅套电缆直接在臂式支架上敷设时，应具有钢带铠装。

2）小截面挤塑绝缘电缆直接在臂式支架上敷设时，宜具有钢带铠装。

3）在地下客运、商业设施等安全性要求高而鼠害严重的场所，塑料绝缘电缆可具有金属套或钢带铠装。

4）电缆位于高落差的受力条件需要时，可含有钢丝铠装。

5）除本条 1）～4）项外，敷设在梯架或托盘等支承密接的电缆，可不含铠装。

6）除应按第（1）条 3）项的规定采用，以及高温 60℃以上场所应采用聚乙烯等耐热外套的电缆外，宜用聚氯乙烯外套。

7）严禁在封闭式通道内使用纤维外被的明敷电缆。

（5）移动式电气设备等需经常弯移或有较高柔软性要求回路的电缆，应采用橡皮外护层。

（6）放射线作用场所的电缆，应具有适合耐受放射线辐照强度的聚氯乙烯、氯丁橡皮、氯磺化聚乙烯等防护外套。

（7）敷设于保护管中的电缆，应具有挤塑外套；油浸纸绝缘铅套电缆，尚宜含有钢铠层。

(8) 水下敷设电缆的外护层选择，应符合下列规定：

1) 在沟渠、不通航小河等不需铠装层承受拉力的电缆，可选用钢带铠装。

2) 江河、湖海中电缆，采用的钢丝铠装型式应满足受力条件。当敷设条件有机械损伤等防范需要时，可选用符合防护、耐蚀性增强要求的外护层。

(9) 路径通过不同敷设条件时电缆外护层的选择，应符合下列规定：

1) 线路总长未超过电缆制造长度时，宜选用满足全线条件的同一种或差别尽量少的一种以上型式。

2) 线路总长超过电缆制造长度时，可按相应区段分别采用适合的不同型式。

10.2.2.6 控制电缆及其金属屏蔽：

(1) 双重化保护的电流、电压以及直流电源和跳闸控制回路等需增强可靠性的两套系统，应采用各自独立的控制电缆。

(2) 下列情况的回路，相互间不宜合用同一根控制电缆：

1) 弱电信号、控制回路与强电信号、控制回路。

2) 低电平信号与高电平信号回路。

3) 交流断路器分相操作的各相弱电控制回路。

(3) 弱电回路的每一对往返导线，宜属于同一根控制电缆。

(4) 强电回路控制电缆，除位于超高压配电装置或与高压电缆紧邻并行较长，需抑制干扰的情况外，可不含金属屏蔽。

(5) 弱电信号、控制回路的控制电缆，当位于存在干扰影响的环境又不具备有效抗干扰措施时，宜有金属屏蔽。

(6) 控制电缆金属屏蔽型类的选择，应按可能的电气干扰影响，计入综合抑制干扰措施，满足需降低干扰或过电压的要求。

1) 位于 110kV 以上配电装置的弱电控制电缆，宜有总屏蔽、双层式总屏蔽。

2) 计算机监测系统信号回路控制电缆的屏蔽选择，应符合下列规定：

a. 开关量信号，可用总屏蔽；

b. 高电平模拟信号，宜用对绞线芯总屏蔽，必要时也可用对绞线芯分屏蔽；

c. 低电平模拟信号或脉冲量信号，宜用对绞线芯分屏蔽，必要时也可用对绞线芯分屏蔽复合总屏蔽。

3) 其他情况，应按电磁感应、静电感应和地电位升高等影响因素，采用适宜的屏蔽型式。

4) 敷设方式要求电缆具有钢铠、金属套时，应充分利用其屏蔽功能。

(7) 需降低电气干扰的控制电缆，可在工作芯数外增加一个接地的备用芯。

(8) 控制电缆金属屏蔽的接地方式，应符合下列规定：

1) 计算机监控系统的模拟信号回路控制电缆屏蔽层，不得构成两点或多点接地，宜用集中式一点接地。

2) 除 1) 项等需要一点接地情况外的控制电缆屏蔽层，当电磁感应的干扰较大，宜采用两点接地；静电感应的干扰较大，可用一点接地。

双重屏蔽或复合式总屏蔽，宜对内、外屏蔽分用一点、两点接地。

3) 两点接地的选择，还宜考虑在暂态电流作用下屏蔽层不致被烧熔。

10.2.3 常用电缆型号名称及使用范围

常用电缆型号名称及使用范围见表 10－6。

表 10－6　　常用电缆型号名称及使用范围

序号	电缆型号		名　　称	使 用 范 围
	铜　芯	铝　芯		
1	ZQ	ZLQ	纸绝缘裸铅包电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内，对电缆应没有机械损伤。且对铅护层应有中性环境
2	ZQ_1	ZLQ_1	纸绝缘铅包麻被电力电缆	敷设在土壤中，其他条件与序号 1 相同
3	ZQ_2	ZLQ_2	纸绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在土壤中，能承受机械损伤，但不能受大的拉力
4	ZQ_{20}	ZLQ_{20}	纸绝缘铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内，其他条件与序号 3 相同
5	ZQ_3	ZLQ_3	纸绝缘铅包细钢丝铠装电力电缆	敷设在土壤中，能承受机械损伤及大的拉力
6	ZQ_{30}	ZLQ_{30}	纸绝缘铅包裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中，其他条件与序号 5 相同
7	ZQ_4	ZLQ_4	纸绝缘铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设在水中，能承受较大的拉力
8	ZQF_2	$ZLQF_2$	纸绝缘分相铅包钢带铠装电力电缆	敷设条件与序号 3 相同
9	ZQF_{20}	$ZLQF_{20}$	纸绝缘分相铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设条件与序号 4 相同
10	ZQF_4	$ZLQF_4$	纸绝缘分相铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设条件与序号 7 相同
11	ZL	ZLL	纸绝缘裸铅包电力电缆	敷设在干燥的户内、沟管中，电缆不能承受机械外力作用，且对铅层应有中性环境
12	ZQD_3	$ZLQD_3$	纸绝缘铅包细钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在土壤及空气中，电缆能承受机械外力作用，并能承受相当的拉力，用于垂直敷设或高差较大处
13	ZQD_{30}	$ZLQD_{30}$	纸绝缘铅包裸钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在室内矿井中，其他条件与序号 12 相同
14	ZQD_4	$ZLQD_4$	纸绝缘铅包粗钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在水中或电缆承受较大拉力的地方，用于垂直敷设或高差较大处
15	XQ	XLQ	橡皮绝缘铅包电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆不能受推动和机械外力作用，且对铅护层应有中性环境
16	XQ_2	XLQ_2	橡皮绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在地下（隧道），电缆不能承受大的拉力
17	XQ_{20}	XLQ_{20}	橡皮绝缘铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆不能承受大的拉力
18	VV	VLV	聚氯乙烯绝缘及护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中
19	VV_{20}	VLV_{20}	聚氯乙烯绝缘及护套裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆不能承受大的拉力
20	VV_{22}	VLV_{22}	聚氯乙烯绝缘及护套钢带内铠装电力电缆	敷设在地下，电缆不能承受大的拉力
21	VV_3	VLV_3	聚氯乙烯绝缘及护套细钢丝铠装电力电缆	敷设在地下，电缆能承受机械外力作用，并能承受相当的拉力
22	VV_{32}	VLV_{32}	聚氯乙烯绝缘及护套细钢丝内铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中，其他条件与序号 21 相同
23	VV_{40}	VLV_{40}	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套裸粗钢丝铠装电力电缆	敷设在室内、矿井中，电缆能承受机械外力作用，并能承受较大的拉力

续表

序号	电缆型号		名　　称	使 用 范 围
	铜　芯	铝　芯		
24	VV_{42}	VLV_{42}	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套粗钢丝内铠装电力电缆	敷设在水中，电缆能承受较大的拉力
25	YJV	YJLV	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆不能承受机械外力作用
26	YJ_{22}	YJL_{22}	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内铠装电力电缆	敷设在地下，电缆不能承受大的拉力
27	YJ_{32}	YJL_{32}	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套细钢丝内铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中或地下，能承受机械外力作用，并能承受相当的拉力
28	YJV－FR	YJLV－FR	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套阻燃电力电缆	敷设在有阻燃要求的场合，其他条件与序号25相同
29	YJ_{22}－FR	YJL_{22}－FR	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内铠装阻燃电力电缆	敷设在有阻燃要求的场合，其他条件与序号26相同
30	YJV_{40}	$YJLV_{40}$	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套裸粗钢丝铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及矿井中，电缆能承受机械外力作用，并能承受较大的拉力
31	YJV_{42}	$YJLV_{42}$	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套粗钢丝内铠装电力电缆	敷设在水中，电缆能承受较大的拉力
32	XV_{20}	XLV_{20}	橡皮绝缘聚氯乙烯护套裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，电缆能承受机械外力作用，但不能承受大的拉力
33	YC		重型橡套电缆	用于500V及以下移动式受电装置，能承受较大的机械外力作用
34	CHY		船用橡皮绝缘耐油橡套电缆	固定敷设于瓦斯继电器、变压器温度表等回路中
35	KVV		聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，不能受机械外力作用
36	KVV_{22}		聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带内铠装控制电缆	敷设在室内、地下（隧道），电缆能承受机械外力作用。但不能承受大的拉力
37	KYV		聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	敷设在室内、隧道内及管道中，不能承受机械外力作用
38	KYV_{22}		聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带内铠装控制电缆	敷设在室内及地下，能承受机械外力作用，不能承受大的拉力
39	PVV		聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套信号电缆	敷设在室内及地下，不能承受机械外力作用
40	PVV_{22}		聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带内铠装信号电缆	敷设在室内及地下，能承受机械外力作用，不能承受大的拉力
41	$KYVP_2$－22		聚氯乙烯绝缘钢带绕包总屏蔽内铠装聚氯乙烯护套控制电缆	敷设在室内及地下，能承受机械外力作用，不能承受大的拉力
42	KYJV		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	敷设条件与序号35相同
43	KYJV－FR		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套阻燃控制电缆	敷设在有阻燃要求的场合，其他条件与序号35相同
44	KYJVP		交联聚乙烯绝缘铜丝编织屏蔽聚氯乙烯护套控制电缆	敷设条件与序号35相同
45	KYJVP－FR		交联聚乙烯绝缘铜丝编织屏蔽聚氯乙烯护套阻燃控制电缆（上缆厂）	敷设在有阻燃要求的场合，其他条件与序号35相同
46	KYJ_{22}-FR		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装阻燃电缆	敷设在有阻燃要求的场合，其他条件与序号40相同

10.2.4 电力电缆截面选择

10.2.4.1 电力电缆缆芯截面选择的基本要求：

（1）最大工作电流作用下的缆芯温度，不得超过按电缆使用寿命确定的允许值。持续工作回路的缆芯工作温度，应符合附录 A 的规定。

（2）最大短路电流作用时间产生的热效应，应满足热稳定条件。对非熔断器保护的回路，满足热稳定条件可按短路电流作用下缆芯温度不超过表 10－7 所列允许值。

表 10－7　　常用电力电缆最高允许温度

电缆类型	电压（kV）	最高允许温度（℃）	
		额定负荷时	短　路　时
黏性浸渍纸绝缘	1～3	80	250
	6	65	
	10	60	
	35	50	175
不滴流纸绝缘	1～6	80	250
	10	65	
	35	65	175
交联聚乙烯绝缘	≤10	90	250
	>10	80	
聚氯乙烯绝缘		70	160
自容式充油	63～500	75	160

注　1. 对发电厂、变电所以及大型联合企业等重要回路铝芯电缆，短路最高允许温度为 200℃。

2. 含有锡焊中间接头的电缆，短路最高允许温度为 160℃。

（3）连接回路在最大工作电流作用下的电压降，不得超过该回路允许值。

（4）较长距离的大电流回路或 35kV 以上高压电缆，当符合上述条款时，宜选择经济截面，可按“年费用支出最小”原则。

（5）铝芯电缆截面，不宜小于 $4mm^2$。

（6）水下电缆敷设当需缆芯承受拉力且较合理时，可按抗拉要求选用截面。

10.2.4.2 对 10kV 及以下常用电缆按持续工作电流确定允许最小缆芯截面时，宜满足表 10－10～表 10－16 电缆允许持续载流量（建议性基础值），以及 10.2.4.13 条（1）款按下列使用条件差异影响计入校正系数所确定的允许载流量。

1）环境温度差异。

2）直埋敷设时土壤热阻系数差异。

3）电缆多根并列的影响。

4）户外架空敷设无遮阳时的日照影响（见表 10－22）。

10.2.4.3 不属于 10.2.4.2 条规定的其他情况下，电缆按持续工作电流确定允许最小缆芯截面时，应经计算或测试验证，且计算内容或参数选择应符合下列规定：

（1）中频供电回路使用非同轴电缆，应计入非工频情况下集肤效应和邻近效应增大损耗发热的影响。

（2）单芯高压电缆以交叉互连接地，当单元系统中三个区段不等长时，应计入金属护层的附加损耗发热影响。

（3）敷设于塑料保护管中的电缆，应计入热阻影响；排管中不同孔位的电缆还应分别计入互热因素的影响。

（4）敷设于封闭、半封闭或透气式耐火槽盒中的电缆，应计入包含该型材质及其盒体厚

度、尺寸等因素对热阻增大的影响。

(5) 施加在电缆上的防火涂料、包带等覆盖层厚度大于 1.50mm 时，应计入其热阻影响。

(6) 沟内电缆埋砂且无经常性水分补充时，应按砂质情况选取大于 2.0℃·m/W 的热阻系数计入对电缆热阻增大的影响。

10.2.4.4 缆芯工作温度大于 70℃的电缆，计算持续允许载流量时，尚应符合下列规定：

(1) 数量较多的该类电缆敷设于未装机械通风的隧道、竖井时，应计入对环境温升的影响。

(2) 电缆直埋敷设在干燥或潮湿土壤中，除实施换土处理等能避免水分迁移的情况外，土壤热阻系数宜选取不小于 2.0 (℃·m)/W。

10.2.4.5 确定电缆持续允许载流量的环境温度，应按使用地区的气象温度多年平均值，并计入实际环境的温升影响，宜符合表 10－8 的规定。

表 10－8 电缆持续允许载流量的环境温度确定

电缆敷设场所	有无机械通风	选取的环境温度（℃）
土中直埋		埋深处的最热月平均地温
水　下		最热月的日最高水温平均值
户外空气中、电缆沟		最热月的日最高温度平均值
有热源设备的厂房	有	通风设计温度
	无	最热月的日最高温度平均值另加 5℃
一般性厂房、室内	有	通风设计温度
	无	最热月的日最高温度平均值
户内电缆沟	无	最热月的日最高温度平均值另加 5℃*
隧　道		
隧　道	有	通风设计温度

* 当属于本规范第 10.2.4.4 条 (1) 项的情况时，不能直接采取仅加 5℃。

10.2.4.6 电缆通过不同散热条件区段时的缆芯截面选择，应符合下列规定：

(1) 回路总长未超过电缆制造长度的情况：

1) 重要回路全长宜按其中散热较差区段条件选择同一截面。

2) 水下电缆敷设有机械强度要求需增大截面时，回路全长可选择同一截面。

3) 非重要回路，可对大于 10m 区段散热条件按段选择截面，但每回路不宜多于三种规格。

(2) 回路总长超过电缆制造长度的情况，宜按区段选择相应合适的缆芯截面。

10.2.4.7 对非熔断器保护回路，按满足短路热稳定条件确定允许缆芯最小截面时，可按 10.2.4.8 条的规定计算。

10.2.4.8 选择短路计算条件应符合下列规定：

(1) 计算用系统接线，应采取正常运行方式，且宜按工程建成后 5 年以上规划发展考虑。

(2) 短路点应选取在通过电缆回路最大短路电流可能发生处。

(3) 宜按三相短路计算。

(4) 短路电流作用时间，应取保护切除时间与断路器全分闸时间之和。对电动机等直馈线，应采取主保护时间；其他情况，宜按后备保护计。

10.2.4.9 1kV 以下电源中性点直接接地时三相四线制系统的电缆中性线截面，不得小于按线路最大不平衡电流持续工作所需最小截面；对有谐波电流影响的回路，还应同时满足所要求截面，且符合下列规定：

（1）以气体放电灯为主要负荷的回路，中性线截面不宜小于相芯线截面。

（2）除（1）项规定的情况外，中性线截面可不小于50%的相芯线截面。

10.2.4.10 1kV以下电源中性点直接接地时配置保护接地线、中性线或保护接地中性线系统的电缆芯线截面选择要求。

（1）中性线、保护接地中性线的截面，应符合10.2.4.9条的规定；保护接地中性线截面，尚应按缆芯材质分别符合下列规定：

1）铜芯，不小于10mm²。

2）铝芯，不小于16mm²。

（2）保护地线的截面，应满足回路保护电器可靠动作的要求，且应符合表10－9的规定。

表10－9　　按热稳定要求的保护地线允许最小截面

电缆相芯线截面 S	保护地线允许最小截面(mm²)	电缆相芯线截面 S	保护地线允许最小截面(mm²)
$S \leqslant 16$	S	$S > 35$	$S/2$
$16 < S \leqslant 35$	16		

10.2.4.11 交流供电回路由多根电缆并联组成时，宜采用相同截面。

10.2.4.12 电力电缆金属屏蔽层的有效截面，应满足在可能的暂态电流作用下温升值不超过绝缘与外护层的短路容许最高温度平均值。

10.2.4.13 电缆截面选择计算公式：

（1）按持续允许电流选择。敷设在空气中和土壤中的电缆允许载流量按下式计算

$$KI_n \geqslant I_g \tag{10-1}$$

式中 I_g——计算工作电流，A；

I_n——电缆在标准敷设条件下的额定载流量，A，见表10－10～表10－16；

K——不同敷设条件下综合校正系数，空气中单根敷设 $K = K_t$，空气中多根敷设 $K = K_t K_1$，空气中穿管敷设 $K = K_t K_2$，土壤中单根敷设 $K = K_t K_3$，土壤中多根敷设 $K = K_t K_3 K_4$；

K_t——环境温度校正系数，见表10－17；

K_1——空气中并列敷设电缆载流量的校正系数，见表10－20，桥架上多层并列时，见表10－21；

K_2——空气中穿管敷设时载流量的校正系数，电压为10kV及以下、截面为95mm²及以下取0.9，截面为120～185mm²取0.85；

K_3——直埋敷设电缆因土壤热阻不同的校正系数，见表10－18；

K_4——多根并列直埋敷设时的校正系数，见表10－19。

表10－10　　1～3kV油纸、聚氯乙烯绝缘电缆空气中敷设时允许载流量

项　　目	电缆允许持续载流量（A）	
绝缘类型	黏性浸渍纸，不滴流纸	聚氯乙烯
护　　套	有钢铠护套	无钢铠护套
缆芯最高工作温度（℃）	80	70

续表

项目		电缆允许持续载流量（A）					
缆芯数		单芯	二芯	三芯或四芯	单芯	二芯	三芯或四芯
缆芯截面（mm^2）	2.5					18	15
	4		30	26		24	21
	6		40	35		31	27
	10		52	44		44	38
	16		69	59		60	52
	25	116	93	79	95	79	69
	35	142	111	98	115	95	82
	50	174	138	116	147	121	104
	70	218	174	151	179	147	129
	95	267	214	182	221	181	155
	120	312	245	214	257	211	181
	150	356	280	250	294	242	211
	185	414		285	340		246
	240	495		338	410		294
	300	570		383	473		328
环境温度（℃）		40					

注　1. 表中系铝芯电缆数值；铜芯电缆的允许持续载流量值可乘以 1.29。

2. 单芯只适用于直流。

表 10－11　　1～3kV 油纸、聚氯乙烯绝缘电缆直埋敷设时允许载流量

项目		电缆允许持续载流量（A）								
绝缘类型		黏性浸渍纸、不滴流纸			聚氯乙烯			聚氯乙烯		
护套		有钢铠护套			无钢铠护套			有钢铠护套		
缆芯最高工作温度（℃）		80			70					
缆芯数		单芯	二芯	三芯或四芯	单芯	二芯	三芯或四芯	单芯	二芯	三芯或四芯
缆芯截面（mm^2）	4		34	29	47	36	31		34	30
	6		45	38	58	45	38		43	37
	10		58	50	81	62	53	77	59	50
	16		76	66	110	83	70	105	79	68
	25	143	105	88	138	105	90	134	100	87
	35	172	126	105	172	136	110	162	131	105
	50	198	146	126	203	157	134	194	152	129
	70	247	182	154	244	184	157	235	180	152
	95	300	219	186	295	226	189	281	217	180
	120	344	251	211	332	254	212	319	249	207
	150	389	284	240	374	287	242	365	273	237
	185	441		275	424		273	410		264
	240	512		320	502		319	483		310
	300	584		356	561		347	543		347
	400	676			639			625		
	500	776			729			715		
	630	904			846			819		
	800	1032			981			963		
土壤热阻系数［(℃·m)/W］		1.5			1.2					
环境温度（℃）		25								

注　1. 表中系铝芯电缆数值；铜芯电缆的允许持续载流量值可乘以 1.29。

2. 单芯适用于直流。

表 10－12　　1～3kV 交联聚乙烯绝缘电缆空气中敷设时允许载流量

项　目		电缆允许持续载流量（A）									
缆　芯　数		三　芯		单　芯							
单芯电缆排列方式				品字形				水平形			
金属屏蔽层接地点				单　侧		两　侧		单　侧		两　侧	
缆　芯　材　质		铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜
缆芯截面（mm^2）	25	91	118	100	132	100	132	114	150	114	150
	35	114	150	127	164	127	164	146	182	141	178
	50	146	182	155	196	155	196	173	228	168	209
	70	178	228	196	255	196	251	228	292	214	264
	95	214	273	241	310	241	305	278	356	260	310
	120	246	314	283	360	278	351	319	410	292	351
	150	278	360	328	419	319	401	365	479	337	392
	185	319	410	372	479	365	461	424	546	369	438
	240	378	483	442	565	424	546	502	643	424	502
	300	419	552	506	643	493	611	588	738	479	552
	400			611	771	579	716	707	908	546	625
	500			712	885	661	803	830	1026	611	693
	630			826	1008	734	894	963	1177	680	757
环境温度（℃）		40									
缆芯最高工作温度（℃）		90									

注　1. 允许载流量的确定，还应遵守本规范第 10.2.4.4 条的规定。

2. 水平形排列电缆相互间中心距为电缆外径的 2 倍。

表 10－13　　1～3kV 交联聚乙烯绝缘电缆直埋敷设时允许载流量

项　目		电缆允许持续载流量（A）					
缆　芯　数		三　芯		单　芯			
单芯电缆排列方式				品　字　形		水　平　形	
金属屏蔽层接地点				单　侧		单　侧	
缆　芯　材　质		铝	铜	铝	铜	铝	铜
缆芯截面（mm^2）	25	91	117	104	130	113	143
	35	113	143	117	169	134	169
	50	134	169	139	187	160	200
	70	165	208	174	226	195	247
	95	195	247	208	269	230	295
	120	221	282	239	300	261	334
	150	247	321	269	339	295	374
	185	278	356	300	382	330	426
	240	321	408	348	435	378	478
	300	365	469	391	495	430	543
	400			456	574	500	635
	500			517	635	565	713
	630			582	704	635	796
缆芯最高工作温度（℃）		90					
土壤热阻系数[(℃·m)/W]		2.00					
环境温度（℃）		25					

注　水平形排列电缆相互间中心距为电缆外径的 2 倍。

6kV 常用电缆允许持续载流量见表 10－14、表 10－15。

表 10－14　　6kV 三芯电力电缆空气中敷设时允许载流量

项　目		电缆允许持续载流量（A）					
绝缘类型		黏性油浸纸	不滴流纸	聚氯乙烯		交联聚乙烯	
钢铠护套		有		无	有	无	有
缆芯最高工作温度（℃）		65	80	70		90	
缆芯截面（mm^2）	10			40			
	16	46	58	54			
	25	62	79	71			
	35	76	92	85		114	
	50	92	116	108		141	
	70	118	147	129		173	
	95	143	183	160		209	
	120	169	213	185		246	
	150	194	245	212		277	
	185	223	280	246		323	
	240	265	334	293		378	
	300	295	374	323		432	
	400					505	
	500					584	
环境温度（℃）		40					

注　1. 表中系铝芯电缆数值；铜芯电缆的允许持续载流量值应乘以 1.29。

2. 缆芯工作温度大于 70℃时，允许持续载流量的确定还应遵守 10.2.4.4 条的规定。

表 10－15　　6kV 三芯电力电缆直埋敷设时允许载流量

项　目		电缆允许持续载流量（A）					
绝缘类型		黏性油浸纸	不滴流纸	聚氯乙烯		交联聚乙烯	
钢铠护套		有		无	有	无	有
缆芯最高工作温度（℃）		65	80	70		90	
缆芯截面（mm^2）	10			51	50		
	16	58	63	67	65		
	25	79	84	86	83	87	87
	35	94	101	105	100	105	102
	50	114	119	126	126	123	118
	70	140	148	149	149	148	148
	95	167	180	181	177	178	178
	120	193	209	209	205	200	200
	150	215	232	232	228	232	222
	185	249	264	264	255	262	252
	240	288	308	309	300	300	295
	300	323	344	346	332	343	333
	400					380	370
	500					432	422
土壤热阻系数［(℃·m)/W］		1.2	1.5	1.2		2	
环境温度（℃）		25					

注　表中系铝芯电缆数值；铜芯电缆的允许持续载流量值可乘以 1.29。

表 10－16　　10kV 三芯电力电缆允许载流量

项　目		电缆允许持续载流量（A）							
绝缘类型		黏性油浸纸		不滴流纸		交联聚乙烯			
钢铠护套						无		有	
缆芯最高工作温度（℃）		60		65		90			
敷设方式		空气中	直　埋	空气中	直　埋	空气中	直　埋	空气中	直　埋
缆芯截面（mm^2）	16	42	55	47	59				
	25	56	75	63	79	100	90	100	90
	35	68	90	77	95	123	110	123	105
	50	81	107	92	111	146	125	141	120
	70	106	133	118	138	178	152	173	152
	95	126	160	143	169	219	182	214	182
	120	146	182	168	196	251	205	246	205
	150	171	206	189	220	283	223	278	219
	185	195	233	218	246	324	252	320	247
	240	232	272	261	290	378	292	373	292
	300	260	308	295	325	433	332	428	328
	400					506	378	501	374
	500					579	428	574	424
环境温度（℃）		40	25	40	25	40	25	40	25
土壤热阻系数[(℃·m)/W]			1.2		1.2		2.0		2.0

注　1. 表中系铝芯电缆数值；铜芯电缆的允许持续载流量值应乘以 1.29。

2. 缆芯工作温度大于 70℃时，允许载流量的确定还应遵守 10.2.4.4 条的要求。

表 10－17　　35kV 及以下电缆在不同环境温度时的载流量校正系数 K_t

项　目		空　气　中				土　壤　中			
环境温度（℃）		30	35	40	45	20	25	30	35
缆芯最高工作温度（℃）	60	1.22	1.11	1.0	0.86	1.07	1.0	0.93	0.85
	65	1.18	1.09	1.0	0.89	1.06	1.0	0.94	0.87
	70	1.15	1.08	1.0	0.91	1.05	1.0	0.94	0.88
	80	1.11	1.06	1.0	0.93	1.04	1.0	0.95	0.90
	90	1.09	1.05	1.0	0.94	1.04	1.0	0.96	0.92

注　其他环境温度下载流量的校正系数 K_t 可按下式计算

$$K_t = \sqrt{\frac{\theta_m - \theta_2}{\theta_m - \theta_1}} \qquad (10-2)$$

式中　θ_m——缆芯最高工作温度，℃；

θ_1——对应于额定载流量的基准环境温度，℃；

θ_2——实际环境温度，℃。

表 10－18　　不同土壤热阻系数时电缆载流量的校正系数 K_3

土壤热阻系数 [(℃·m)/W]	分类特征（土壤特性和雨量）	校正系数
0.8	土壤很潮湿，经常下雨。如湿度大于9%的沙土；湿度大于10%的沙—泥土等	1.05
1.2	土壤潮湿，规律性下雨。如湿度大于7%但小于9%的沙土；湿度为12%～14%的沙—泥土等	1.0
1.5	土壤较干燥，雨量不大。如湿度为8%～12%的沙—泥土等	0.93
2.0	土壤干燥，少雨。如湿度大于4%但小于7%的沙土；湿度为4%～8%的沙—泥土等	0.87
3.0	多石地层，非常干燥。如湿度小于4%的沙土等	0.75

注　1. 本表适用于缺乏实测土壤热阻系数时的粗略分类，对110kV及以上电压电缆线路工程，宜以实测方式确定土壤热阻系数。

2. 本表中校正系数适于表10－10～表10－16各表中采取土壤热阻系数为1.2(℃·m)/W的情况，不适用于三相交流系统的高压单芯电缆。

表 10－19　　土中直埋多根并行敷设时电缆载流量的校正系数 K_4

根数		1	2	3	4	5	6
电缆之间净距（mm）	100	1	0.9	0.85	0.80	0.78	0.75
	200	1	0.92	0.87	0.84	0.82	0.81
	300	1	0.93	0.90	0.87	0.86	0.85

注　本表不适用于三相交流系统单芯电缆。

表 10－20　　空气中单层多根并列敷设时电缆载流量的校正系数 K_1

并列根数		1	2	3	4	6
电缆中心距	$s=d$		0.90	0.85	0.82	0.80
	$s=2d$	1.00	1.00	0.98	0.95	0.90
	$s=3d$		1.00	1.00	0.98	0.96

注　1. s 为电缆中心间距离，d 为电缆外径。

2. 本表按全部电缆具有相同外径条件制订，当并列敷设的电缆外径不同时，d 值可近似地取电缆外径的平均值。

3. 本表不适用于交流系统中使用的单芯电力电缆。

表 10－21　　在电缆桥架上无间距配置多层并列电缆时持续载流量的校正系数

叠置电缆层数		一	二	三	四
桥架类别	梯架	0.8	0.65	0.55	0.5
	托盘	0.7	0.55	0.5	0.45

注　呈水平状并列电缆数不少于7根。

表 10－22　　1～6kV电缆户外明敷无遮阳时载流量的校正系数

截面（mm^2）				35	50	70	95	120	150	185	240
电压（kV）	1	芯数	三				0.90	0.98	0.97	0.96	0.94
	6		三	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.9	0.88
			单				0.99	0.99	0.99	0.99	0.98

注　运用本表系数校正对应的载流量基础值，是采取户外环境温度的户内空气中电缆载流量。

(2) 按短路热稳定选择。按下式计算电缆热稳定截面并选用接近于计算值的电缆。

1) 固体绝缘电缆缆芯允许最小截面：缆芯允许最小截面，由下列公式确定

$$S \geqslant \frac{\sqrt{Q}}{C} \times 10^3 \tag{10-3}$$

$$C = \frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{Jq}{\alpha K \rho}\ln\frac{1+\alpha(\theta_m-20)}{1+\alpha(\theta_p-20)}} \tag{10-4}$$

$$\theta_p = \theta_0 + (\theta_H - \theta_0)\left(\frac{I_p}{I_H}\right)^2 \tag{10-5}$$

除电动机馈线回路外，均可取 $\theta_p = \theta_H$。

Q 值确定方式如下：

对火电厂 3～6kV 厂用电动机馈线回路，当机组容量为 100MW 及以下时

$$Q = I^2(t + T_b) \tag{10-6}$$

对火电厂 3～6kV 厂用电动机馈线回路，当机组容量大于 100MW 时，Q 的表达式见表 10－23。

表 10－23　　机组容量大于 100MW 时火电厂电动机馈线回路 Q 值算式

t (s)	T_b (s)	T_d (s)	Q 值 ($A^2 \cdot s$)	t (s)	T_b (s)	T_d (s)	Q 值 ($A^2 \cdot s$)
0.15	0.045	0.062	$0.195I^2 + 0.22I_d + 0.09I_d^2$	0.2	0.045	0.062	$0.245I^2 + 0.22I_d + 0.09I_d^2$
	0.06		$0.21I^2 + 0.23I_d + 0.09I_d^2$		0.06		$0.26I^2 + 0.24I_d + 0.09I_d^2$

注　T_d——电动机返馈电流衰减时间常数，s；

I_d——电动机返馈电流周期分量起始有效值，kA。

1. 对于电抗器或 $U_0\%$ 小于 10.5 的双绕组变压器，取 $T_b = 0.045$，其他情况取 $T_b = 0.06$s。

2. 对 SN10 系列中速遮断器，t 可取 0.15s，对 SN1 系列或 SN2 系列慢速遮断器 t 取 0.2s。

除火电厂 3～6kV 厂用电动机馈线外的情况：

$$Q = I^2 t \tag{10-7}$$

以上式中　Q——短路电流热效应，$kA^2 \cdot s$；

S——缆芯导体截面，mm^2；

J——热功当量系数，取 1.0；

q——缆芯导体的单位体积热容量，$J/(cm^3 \cdot ℃)$，铝芯取 2.48，铜芯取 3.4；

θ_m——短路作用时间内电缆缆芯允许最高温度，℃；

θ_p——短路发生前的缆芯最高工作温度，℃；

θ_H——电缆额定负荷的缆芯允许最高工作温度，℃；

θ_0——电缆所处的环境温度最高值，℃；

I_H——电缆的额定负荷电流，A；

I_p——电缆实际最大工作电流，A；

I——系统电源供给短路电流的周期分量起始有效值，A；

t——短路切除时间，s；

T_b——系统电源非周期分量的衰减时间常数，s；

α——20℃ 时缆芯导体的电阻温度系数，1/℃，铜芯为 0.00393、铝芯为

0.00403；

ρ——20℃时缆芯导体的电阻系数（$\Omega \cdot cm^2$）/cm，铜芯为 0.0184×10^{-4}，铝芯为 0.031×10^{-4}；

η——计入包含电缆芯线充填物热容影响的校正系数，对 3～6kV 电动机馈线回路，宜取 $\eta = 0.93$，其他情况 $\eta = 1$；

K——缆芯导体的交流电阻与直流电阻之比值，可由表 10-24 择取。

表 10－24　　K 值选择用表

电缆类型		6～35kV 油纸或挤塑					自容式充油		
缆芯截面（mm^2）		95	120	150	185	240	240	400	600
缆芯数	单芯	1.002	1.003	1.004	1.006	1.010	1.003	1.011	1.029
	多芯	1.003	1.006	1.008	1.009	1.021			

2）自容式充油电缆缆芯允许最小截面：缆芯导体允许最小截面应满足下式

$$S^2 + \left(\frac{q_0}{q}S_0\right)S \geqslant \left[\alpha k\rho I^2 t / Jq \ln \frac{1 + \alpha(\theta_m - 20)}{1 + \alpha(\theta_p - 20)}\right] \times 10^4 \qquad (10-8)$$

式中　S_0——不含油道内绝缘油的缆芯导体中绝缘油充填面积，mm^2；

q_0——绝缘油的单位体积热容量J/($cm^3 \cdot$℃)，可取 1.7。

3）除对变压器回路的电缆可按最大工作电流作用时的 θ_p 值外，其他情况宜取 $\theta_p = \theta_H$。

（3）按电压损失校验：

三相交流　$$\Delta U\% = \frac{173}{U} I_g L(r\cos\varphi + x\sin\varphi) \qquad (10-9)$$

单相交流　$$\Delta U\% = \frac{200}{U} I_g L(r\cos\varphi + x\sin\varphi) \qquad (10-10)$$

直流线路　$$\Delta U\% = \frac{200}{U} I_g LR \qquad (10-11)$$

式中　U——线路工作电压，三相为线电压，单相为相电压，V；

I_g——计算工作电流，A；

L——线路长度，km；

r——电缆单位长度电阻，Ω/km；

x——电缆单位长度的电抗，Ω/km；

$\cos\varphi$——功率因数。

（4）按经济电流密度选择。当最大负荷利用小时大于 5000h，且线路长度超过 20m 时，应按经济电流密度选择电缆截面，即

$$S = \frac{I_g}{j} \qquad (10-12)$$

式中　I_g——计算工作电流，A；

j——经济电流密度，A/mm^2。

10.3　硬导体（硬母线）的设计选择

10.3.1　母线选型

10.3.1.1　母线材料的基本特性

母线通常由铜、铝、铝合金及钢材料制成，各种材料的基本特性如表 10－25 所示。

表 10－25　　母线材料的基本特性

基本特性	材料名称				
	铜	铝	铝锰合金	铝镁合金	钢
20℃时的电阻率(Ω·m)	0.0179	0.0290	0.0379	0.0458	0.1390
20℃时的电阻温度系数(1/℃)	0.00385	0.00403	0.0042	0.0042	0.00455
密度(g/cm^3)	8.89	2.71	2.73	2.68	7.85
熔点(℃)	1083	653			1536
比热(J/g·℃)	0.3843	0.9295			0.4522
导热系统(J/cm·s·℃)	3.8644	2.1771			0.8038
温度线膨胀系数(1/℃)	16.42×10^{-6}	24×10^{-6}	23.2×10^{-6}	23.8×10^{-6}	12×10^{-6}
抗拉强度(N/mm^2)	210～250	>120	160	300	>280
伸长率(%)	>3	>3	10	24	>25
最大允许应力(N/mm^2)	140	70	90	170	160
弹性模数(N/mm^2)	100000	70000	71000	70000	200000
允许最高加热温度(℃)	300	200	200		600

10.3.1.2　母线型式及适用范围

母线除满足工作电流、机械强度和电晕要求外，母线形状还应满足下列要求：

1）电流分布均匀（即集肤效应系数尽可能低）；

2）机械强度高；

3）散热良好（与导体放置方式和形状有关）；

4）有利于提高电晕起始电压；

5）安装、检修简单，连接方便。

我国目前常用的硬母线型式有矩形、槽形和管形等。

(1) 矩形母线。单片矩形母线具有集肤效应系数小、散热条件好、安装简单、连接方便等优点，一般适用于工作电流 $I\leqslant2000A$ 的回路中。

多片矩形母线集肤效应系数比单片母线的大，所以附加损耗增大。因此载流量不是随母线片数增加而成倍增加的，尤其是每相超过三片以上时，母线的集肤效应系数显著增大。在工程实用中多片矩形母线适用于工作电流 $I\leqslant4000A$ 的回路。当工作电流为 4000A 以上时，母线则应选用有利于交流电流分布的槽形或圆管形的成型母线。

(2) 槽形母线。槽形母线的电流分布比较均匀，与同截面的矩形母线相比，其优点是散热条件好、机械强度高、安装也比较方便。尤其是在垂直方向开有通风孔的双槽形母线比不开孔的方管形母线的载流能力约大 9%～10%；比同截面的矩形母线载流能力约大 35%。因此在回路持续工作电流为 4000～8000A 时，一般可选用双槽形母线，大于上述电流值时，由于会引起钢构件严重发热，故不推荐使用。

(3) 管形母线。管形母线是空心导体，集肤效应系数小，且有利于提高电晕的起始电压。户外配电装置使用管形母线，具有占地面积小、架构简明、布置清晰等优点。但导体与设备端子连接较复杂，用于户外时易产生微风振动。

10.3.2 母线截面的选择和校验

10.3.2.1 一般要求：裸母线应根据具体情况，按下列技术条件分别进行选择或校验：

1) 工作电流；

2) 经济电流密度；

3) 电晕；

4) 动稳定或机械强度；

5) 热稳定。

裸母线尚应按下列使用环境条件校验：

1) 环境温度；

2) 日照；

3) 风速；

4) 海拔高度。

高压和超高压配电装置中选用的管形母线，由于跨距和短路容量的增大，其母线截面除应满足载流量和机械强度要求外，其形状应有利于提高电晕起始电压和避免微风振动。

10.3.2.2 按回路持续工作电流选择

$$I_{xu} \geqslant I_g \tag{10-13}$$

式中 I_g——母线回路持续工作电流（A）；

I_{xu}——相应于母线在某一运行温度、环境条件及安装方式下长期允许的载流量（A）。

10.3.2.3 按经济电流密度选择

除配电装置的汇流母线以外，对于全年负荷利用小时数较大，母线较长（长度超过20m），传输容量较大的回路（如发电机至主变压器和发电机至主配电装置的回路），均应按经济电流密度选择母线截面，并按下式计算

$$S_j = \frac{I_g}{j} \tag{10-14}$$

式中 S_j——经济截面，mm^2；

I_g——回路的持续工作电流，A；

j——经济电流密度，A/mm^2。

当无合适规格的导体时，导体截面可小于经济电流密度的计算截面。

10.3.2.4 截面的校验：

(1) 按电晕条件校验。对110kV及以上电压的母线应按电晕电压校验。

(2) 按短路热稳定校验

$$S \geqslant \frac{\sqrt{Q_k}}{C} \tag{10-15}$$

式中 S——母线的载流截面，mm^2；

Q_k——短路电流的热效应，$A^2 \cdot s$；

C——与导体材料及发热温度有关的系数，其值见表10-26。

表 10－26　　短路前导体温度为＋70℃时的热稳定系数 C 值

导体材料	短路时导体最高允许温度（℃）	C	导体材料	短路时导体最高允许温度（℃）	C
铜	300	171	钢（不和电器直接连接时）	400	67
铝及铝锰合金	200	87	钢（和电器直接连接时）	300	60

若导体短路前的温度不是＋70℃时，C 值可按下式计算或由表 10－27 查得

$$C=\sqrt{K\ln\frac{\tau+t_2}{\tau+t_1}\times10^{-4}} \tag{10-16}$$

式中　K——常数，铜为 522×10^6，铝为 222×10^6 [(W·s)/(Ω·cm⁴)]；

τ——常数，铜为 235℃，铝为 245℃；

t_1——导体短路前的发热温度，℃；

t_2——短路时导体最高允许温度，℃，铝及铝锰合金可取 200℃，铜导体取 300℃。

（3）按短路动稳定校验。

1）一般要求：母线短路时产生的机械应力一般均按三相短路验算。若在发电机出口的两相短路或中性点直接接地系统中自耦变压器回路中的单相或两相接地短路较三相短路严重时，则应按严重情况验算，其验算结果应满足

$$\sigma_{xu}>\sigma \tag{10-17}$$

$$\sigma=\sigma_{x-x}+\sigma_x \tag{10-18}$$

式中　σ——短路时母线产生的总机械应力，N/cm²；

σ_{x-x}——短路时母线相间产生的最大机械应力，N/cm²；

σ_x——短路时同相母线片间相互作用的机械应力，N/cm²；

σ_{xu}——母线材料的允许应力，其值见表 10－28。

2）母线短路电动力计算：当三相导体位于同一平面时，短路电动力计算式为

$$\begin{aligned}F&=1.02\times10^{-2}\frac{2l}{a}(\sqrt{2}I'')^2[N_1+N_2e^{-\frac{2t}{T_f}}+N_3e^{-\frac{t}{T_f}}\cos\omega t+N_4\cos2\omega t]\\&=6.037\times10^{-2}\frac{l}{a}i_{ch}^2N_5\end{aligned} \tag{10-19}$$

式中　F——短路电动力，N；

i_{ch}——短路冲击电流，kA；

N_1、N_2、N_3、N_4、N_5——与短路类型有关的系数，见表 10－29。

a——相间距离，cm；

l——平行导体长度，cm。

表 10－27　　不同工作温度下 C 值

工作温度（℃）	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
硬铝及铝锰合金	95	93	91	89	87	85	83	81	79	77	75	73
硬　铜	181	179	176	174	171	169	166	164	161	159	157	155

表 10－28　　硬母线最大允许应力

母线材料	铝	钢	LF－21 型铝锰合金管
最大允许应力（N/cm^2）	6860	13720	8820

注　1. 对于槽形母线，可能达不到表中数值，选择母线时应向制造部门咨询。

2. 表中所列数值为计及安全系数后的最大允许应力，安全系数一般取 1.7（对应于材料破坏应力）或 1.4（对应于材料屈服点应力）。

表 10－29　　与短路类型有关的系数

短路类型	固定分力 N_1	非周期分力 N_2	周期分力（50Hz） N_3	周期分力（100Hz） N_4	当 $T_f=0.05s$、$t=0.01s$ 时 N_5
两相短路	0.375	0.75	－1.5	0.375	2.47
三相短路、边相母线	0.375	0.808	－1.616	0.433	2.67
三相短路、中相母线	0	0.866	－1.732	0.866	2.88

因为 $I''^{(2)} < I''^{(3)}$，一般情况下，$I''^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I''^{(3)}$，故两相短路电动力小于三相短路电动力，因此动稳定一般均应按三相短路计算，三相短路电动力计算式为

$$F = 17.248 \frac{1}{a} i_{ch}^2 N_5 \beta \times 10^{-2} \tag{10-20}$$

（4）母线短路时的机械应力计算。

1）单片矩形母体的机械应力：各种型式母线的机械应力计算均应计及动负荷作用下的振动系数 β。

对于三相母线水平布置在同一平面的矩形导体，相间应力 σ_{x-x} 按下式计算

$$\sigma_{x-x} = 17.248 \times 10^{-3} \frac{l^2}{aW} i_{ch}^2 \beta \tag{10-21}$$

式中　l——绝缘子间跨距，cm；

a——相间距离，cm；

W——母体的截面系数，cm^3，见表 10－30；

β——振动系数，见本节共振校验部分。

绝缘子的最大允许跨距 l_{max} 为

$$l_{max} = \frac{7.603}{i_{ch}} \sqrt{a \cdot W \cdot \sigma_{xu}} \tag{10-22}$$

简化式

$$l_{max} = K' \frac{\sqrt{a}}{i_{ch}} \tag{10-23}$$

式中　K'——随导体材料与截面而定的系数。

对于三相矩形按直角三角形布置时，见图 10－1 所示，短路时导体相间最大的机械应力为

$$\sigma_{x-x} = 9.8 K_x \frac{l^2}{a_1 W} i_{ch}^2 \times 10^{-3} \beta \tag{10-24}$$

$$W = 0.167 bh^2 \tag{10-25}$$

上两式中　W——导体截面系数，cm^2；

a_1——相间距离，cm；

K_x——系数，由图 10－2 查得。

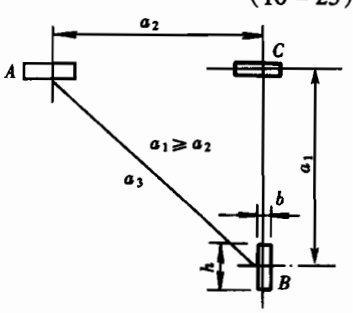
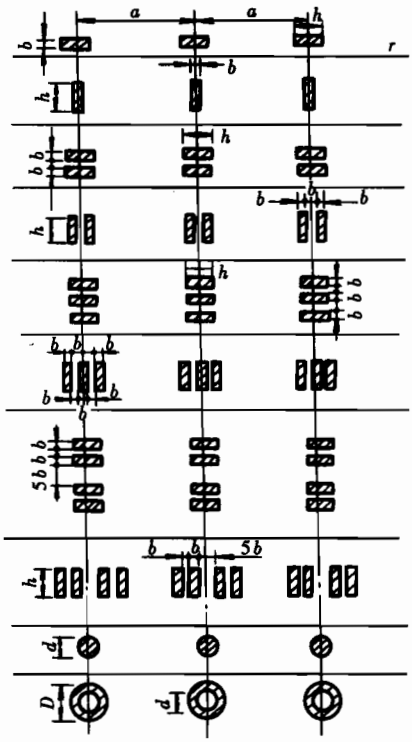


图 10－1　三相矩形导体直角三角形布置

表 10－30　　不同形状和布置的矩形母线的截面系数及惯性半径

母线布置草图及其截面形状	截面系数 W	惯性半径 r_i
	$0.167bh^2$	$0.289h$
	$0.167bh^2$	$0.289b$
	$0.333bh^2$	$0.289h$
	$1.44hb^2$	$1.04b$
	$0.5bh^2$	$0.289h$
	$3.3hb^2$	$1.66b$
	$0.667bh^2$	$0.289h$
	$12.4hb^2$	$4.13b$
	$\sim 0.1d^2$	$0.25d$
	$\sim 0.1\dfrac{D^4-d^4}{D}$	$\dfrac{\sqrt{D^2+d^2}}{4}$

注　b、h、d 及 D 单位为 cm。

2）多片矩形母线的机械应力

$$\sigma = \sigma_{x-x} + \sigma_x \tag{10-26}$$

$$\sigma_x = 4.9\frac{F_x l_c^2}{hb^2} \tag{10-27}$$

上两式中　σ_{x-x}——相间作用应力，N/cm²，计算公式同单片导体；

σ_x——同相母线片间相互作用力的应力，N/cm²；

F_x——母线片间电动力，N/cm²，F_x 按式（10－28）、式（10－29）计算。

每相两片时

$$F_x = 2.55k_1\frac{i_{ch}^2}{b}\times 10^{-2} \tag{10-28}$$

每相三片时

$$F_x = 0.8(k_{12}+k_{13})\frac{i_{ch}^2}{b}\times 10^{-2} \tag{10-29}$$

式中　k_{12}、k_{13}——分别为第 1 片与第 2 片母线、第 1 与第 3 片母线的形状系数，可由图 10－3（a）曲线查得。

对于片间距离等于母线厚度，每相由 2～3 片矩形母线组成时，式（10－28）和式（10－29）可简化为

$$F_x = 9.8 k_x \frac{i_{ch}^2}{b} \times 10^{-2}$$

式中　k_x—形状系数，由图 10－3（b）曲线查得。

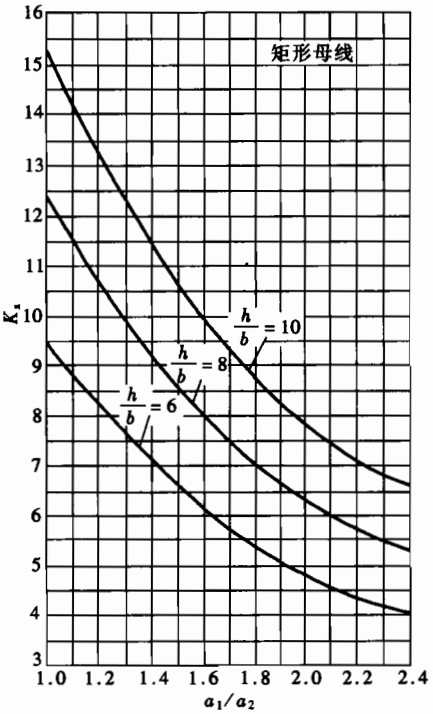


图 10－2　三相导体成直角形布置时 K_x 值曲线

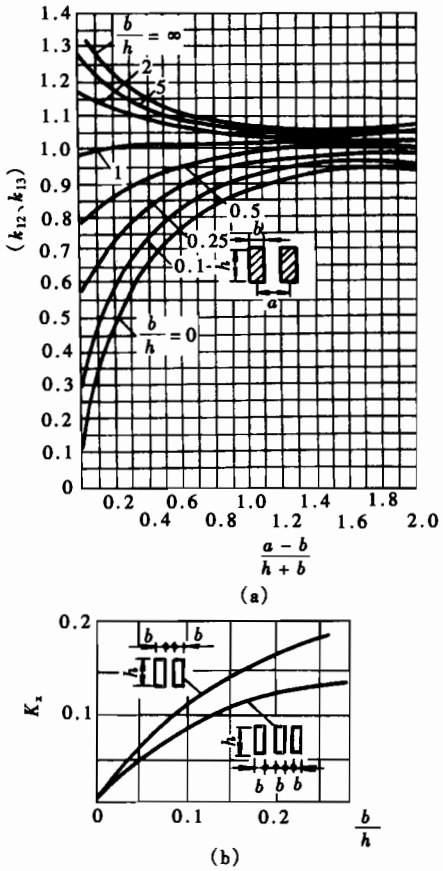


图 10－3　矩形导体形状系数曲线

(a) 形状系数 k 曲线；(b) 形状系数 k_x 曲线

3）母线片间的临界跨距为

$$l_c = 1.77 \lambda b^4 \sqrt{\frac{h}{F_x}} \qquad (10-30)$$

式中　λ——系数，每相两片时，铝为 57、铜为 65，每相三片时，铝为 68、铜为 77；

l_c——片间临界跨距，cm。

每相母线片间间隔垫的距离 l 必须小于片间临界跨距 l_c。

4）槽形母线短路时的机械应力：

a. 槽形导体短路时相间应力 σ_{x-x} 计算公式与单片矩形导体相同，见式（10－20），其中，W 为槽形导体的断面系数（cm^3）。

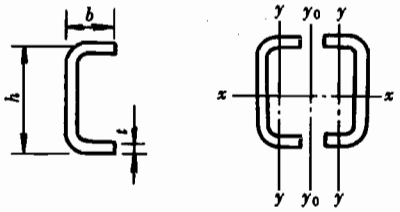
当导体按□□□布置时，$W = 2W_x$；

当导体按 [ ] [ ] [ ] 布置时，$W = 2W_y$；

当导体按 [ ] [ ] [ ] 布置，并在两槽间加垫片实连时，$W = W_{y0}$。

各种尺寸的槽形导体机械应力计算用数据见表 10－31。

表 10－31　　槽形铝导体长期允许载流量及计算用数据



截面尺寸				双槽导体截面 S (mm^2)	集肤效应系数 k_f	导体载流量 (A)	中中中			品品品			双槽焊成整体时				共振最大允许距离 (cm)	
h (mm)	b (mm)	t (mm)	r (mm)				截面系数 W_y (cm^3)	惯性矩 I_y (cm^4)	惯性半径 r_y (cm)	截面系数 W_x (cm^3)	惯性矩 I_x (cm^4)	惯性半径 r_x (cm)	截面系数 W_{y0} (cm^3)	惯性矩 I_{y0} (cm^4)	惯性半径 r_{y0} (cm)	静力矩 S_{y0} (cm^3)	双槽实连时绝缘子间距	双槽不实连时绝缘子间距
75	35	4	6	1040	1.012	2280	2.52	6.2	1.09	10.1	41.6	2.83	23.7	89	2.93	14.1		
75	35	5.5	6	1390	1.025	2620	3.17	7.6	1.05	14.1	53.1	2.76	30.1	113	2.85	18.4	178	114
100	45	4.5	8	1550	1.02	2740	4.51	14.5	1.33	22.2	111	3.78	48.6	243	3.96	28.8	205	125
100	45	6	8	2020	1.038	3590	5.9	18.5	1.37	27	135	3.7	58	290	3.85	36	203	123
125	55	6.5	10	2740	1.05	4620	9.5	37	1.65	50	290	4.7	100	620	4.8	63	228	139
150	65	7	10	3570	1.075	5650	14.7	68	1.97	74	560	5.65	167	1260	6.0	98	252	150
175	80	8	12	4880	1.103	6600	25	144	2.4	122	1070	6.65	250	2300	6.9	156	263	147
200	90	10	14	6870	1.175	7550	40	254	2.75	193	1930	7.65	422	4220	7.9	252	285	157
200	90	12	16	8080	1.237	8800	46.5	294	2.7	225	2250	7.6	490	4900	7.9	290	283	157
225	105	12.5	16	9760	1.285	10150	66.5	490	3.2	307	3400	8.5	645	7240	8.7	390	299	163
250	115	12.5	16	10900	1.313	11200	81	660	3.52	360	4500	9.2	824	10300	9.84	495	321	200

注　1. 载流量系按最高允许温度＋70℃、基准环境温度＋25℃、无风、无日照条件计算的。

2. 上表截面尺寸中，h 为槽形铝导体高度，b 为宽度，t 为壁厚，r 为弯曲半径。

b. 槽形导体短路时片间应力 σ_x 按下式计算

$$\sigma_x = \frac{F_x l^2}{12 W_y} \tag{10-31}$$

$$F_x = 5 \times 10^{-2} \frac{l}{h} i_{ch}^2 \tag{10-32}$$

式中 l——导体垫片中心线间距离，cm，对于垫片用螺栓固定时取 l'，焊接固定时取 l，$l = l' - b_c$，见图 10-4；

F_x——短路时导体片间相互作用力，N/cm；

h——槽形导体高度，cm。

允许片间应力最大值为

$$\sigma_x = \sigma_{xu} - \sigma_{x-x} \tag{10-33}$$

允许垫片间临界距离为

$$l_c = \sqrt{\frac{12 W_y (\sigma_{xu} - \sigma_{x-x})}{F_x}} \tag{10-34}$$

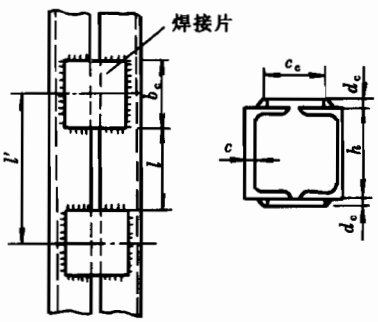


图 10-4 槽形导体焊接片

c. 短路时导体垫板所承受的剪应力 τ 的计算：为了加大槽形导体截面系数，将两个槽组成一个整体时，一般是每隔一段距离 l' 焊一平板，如图 10-4 所示，此焊接平板同时也起着垫片的作用。短路时要求焊接平板所承受的剪力 τ 必须小于焊缝的允许剪力 τ_{xu}，即 $\tau \leqslant \tau_{xu}$，对于铝 $\tau_{xu} = 3920 N/cm^2$，对于铜 $\tau_{xu} = 7840 N/cm^2$。

τ 一般由三个分力组成，即：弯曲力矩应力 σ_{Jm}

$$\sigma_{Jm} = \frac{0.36 F_{x-x} S_{y0} l'_c}{I_{y0} l_m d_c} \tag{10-35}$$

纵向力的切线应力 σ_{m1}

$$\sigma_{m1} = \frac{1.07 F_{x-x} S_{y0} l' C_c}{I_{y0} l_m d_c} \tag{10-36}$$

导体片间相互作用的应力 σ_{m2}

$$\sigma_{m2} = 0.71 \frac{F_x l'}{l_m d_c} \tag{10-37}$$

平板焊缝承受的总应力为

$$\tau = \sqrt{(\sigma_{m1} + \sigma_{m2})^2 + \sigma_{Jm}^2}$$

或

$$\tau = 0.36 \frac{l'}{(b_c - 1) d_c} F_{x-x} \frac{S_{y0}}{I_{y0}} \times \sqrt{1 + \left(3 \frac{C_c}{b_c - 1} + 2 \frac{f_x}{F_{x-x} \times \frac{S_{y0}}{I_{y0}}} \right)^2} \tag{10-38}$$

以上式中 F_{x-x}——短路时一个跨距内相间作用力，N；

F_x——短路时片间所承受的力，N/cm；

S_{y0}——导体截面静力矩，cm^3；

I_{y0}——导体截面惯性矩，cm^4；

b_c——焊接板长，cm，一般 b_c 取 $(0.5 \sim 0.75) h$；

C_c——焊接板宽，cm，一般 C_c 取 5～8cm；

d_c——焊接板厚，cm，一般取 $d_c = 0.05h$；

l_m——焊缝的计算长度，cm，一般取 $l_m = b_c - 1$。

（4）按机械共振条件校验。为了避免母线危险的共振，并使作用于母线上的电动作用力减小，应使母线的自振频率避开产生共振的频率范围。

对于单条母线和母线组中的各单条母线，其共振频率范围为 35～135Hz；对于多条母线组及有引下线的单条母线，其共振频率范围为 35～155Hz；槽形和管形母线的共振频率范围为 30～160Hz，在以上频率范围内，振动系数 β 等于 1。

在上述情况下，母线自振频率可直接按下列公式计算。

对于三相母线布置在同一平面，母线的自振频率为

$$f_m = 112 \times \frac{r_1}{l^2} \cdot \varepsilon \tag{10-39}$$

式中 f_m——母线的自振频率，Hz；

l——跨距长度，cm；

r_1——母线的惯性半径，cm，其值见表 10－38；

ε——材料系数，铜为 1.14×10^4，铝为 1.55×10^4，钢为 1.64×10^4。

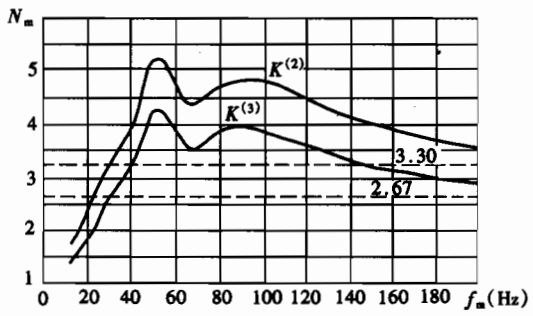


图 10－5　单频振动系统 N_m 与 f_m 的关系

$K^{(3)}$—三相短路的边相；$K^{(2)}$—两相短路

对于三相母线不在同一平面布置者，母线的自振频率在 x 轴和 y 轴均需按式（10－39）校验，式中 r_1 分别以 r_x 和 r_y 代入。

当母线自振频率无法限制在共振频率范围以外时，母线受力必须乘以振动系数 β。

在单频振动系统中，假设母线具有集中质量，系统固有频率 f_0 等于母线的固有频率 f_m。当绝缘子的固有频率大大超过导体的固有频率时，可将绝缘子看成绝对刚体，共振计算可按只有导体振动的单频振动系统计算。当绝缘子的刚度和固有频率未知时，也可近似按单频振动系统计算。此时 $\beta = 0.35N_m$，N_m 可由图 10－5 查得。

1）单频振动系统固有频率计算

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{W_n}{m_m}} \tag{10-40}$$

$$W_m = \frac{384EJ}{l^3} \tag{10-41}$$

$$m_m = \frac{384}{a^4} m_1 l \tag{10-42}$$

$$m_1 = \frac{S \cdot \gamma}{g} \tag{10-43}$$

以上式中 W_m——导体固支时的刚度，kg/cm；

l——支持绝缘子间跨距，cm；

m_m——导体振动的等效质量，$(kg \cdot s^2)/cm$；

a——与母线支承方式有关的系数，见表 10－32；

m_1——单位长度导体振动的等效质量，$(kg \cdot s^2)/cm^2$；

S、γ——分别为导体截面，cm^2 和比重，kg/cm^3；

g——重力加速度为 981，cm/s^2；

E——导体材料的弹性模数，N/cm^2；

J——垂直于弯曲方向的惯性矩，cm^4。

将 W_m、m_m 值代入式（10－40）中得

$$f_0 = \frac{a^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_1}} \tag{10-44}$$

$$f_m = \frac{a^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_1}} \text{ 或 } f_m = \frac{N_f}{l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_1}} \tag{10-45}$$

按表 10－32 中的 a 值，计算的导体不同固定方式下的一阶和二阶频率系数 N_f 值也列于表中。

表 10－32　　母线不同固定方式下的 a 值及 N_f 值

跨数及支承方式	一　阶		二阶	
	a 值	N_f 值	a 值	N_f 值
单跨、两端简支	3.142	1.57	6.283	6.28
单跨、一端固定、一端简支 两等跨、简支	3.927	2.45	7.069	7.95
单跨、两端固定 多等跨简支	4.73	3.56	7.854	9.82
单跨、一端固定、一端活动	1.875	0.56	4.73	3.51

2）双频振动系统固有频率计算：双频振动系统，即母线、绝缘子均参加振动，母线、绝缘子为两个自由度的振动系统，具有两个自由振动频率 f_1 和 f_2。此时 $\beta = 0.35N_m$，N_m 可由图 10－5 查得。双频振动系统的固有频率按下式计算

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{h - \sqrt{h^2 - 4k}}{2k}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{h + \sqrt{h^2 - 4k}}{2k}}$$

$$h = \frac{m_m}{W_m} + \frac{m_{fu}}{W_{fu}} + \frac{m_m}{W_{fu}}$$

$$k = \frac{m_m m_{fu}}{W_m W_{fu}}$$

$$m_{fu} = \frac{W_{fu}}{4\pi^2 f_{fu}^2}$$

式中　m_{fu}——绝缘子的等效质量，$(kg \cdot s^2)/cm$；

W_{fu}——绝缘子刚度，kg/cm；

f_{fu}——绝缘子的固有频率。

m_{fu}、W_{fu}和 f_{fu}数据应由制造厂提供，缺乏数据时可参照表 10－33 数据。

表 10－33　　支柱绝缘子的机械特性

绝缘等级	m_{fu}	W_{fu}	f_{fu}
标 准 级	2.47×10^{-2}	1250	113
加 强 级	3.77×10^{-2}	2500	130

按照计算所得的 f_1 和 f_2，可从图 10－6 中查得 N_m。

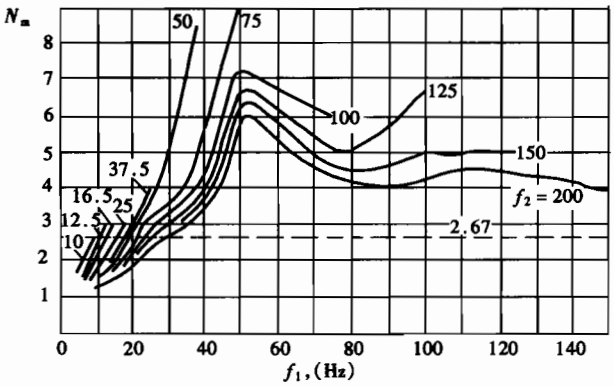


图 10－6　双频振动系统 N_m 与 f_1、f_2 的关系

10.3.3　管形母线设计的特殊问题

高压配电装置中的管形母线，由于跨度大，且多为 2～4 跨的连续梁。其一阶自振频率很低，一般为 2.5Hz 以下，显示出低频特性。因此相间电动力内的工频和 2 倍频分量都很小，致使整个相间电动力比静态法计算值低很多。所以在设计中需要引入一个小于 1 的振动系数 β。β 实测值见表 10－34。为了安全，工程设计计算中一般取 $\beta=0.58$。

表 10-34　　管形母线振动系数 β 实测值

母线一阶自振频率	<2	3	4	5
β 值	0.47	0.49	0.52	0.55

有关管形母线的一些特殊问题，如管形母线的机械计算、微风振动及消减的措施、端部效应及消减的方法等见有关设计手册的介绍。

10.4　软导体（软导线）的设计选择

10.4.1　一般要求

（1）配电装置中软导线的选择，应根据环境条件（环境温度、日照、风速、污秽、海拔高度）和回路负荷电流、电晕、无线电干扰等条件，确定导线的截面和导线的结构型式。

（2）在空气中含盐量较大的沿海地区或周围气体对铝有明显腐蚀的场所，应尽量选用防腐型铝绞线。

（3）当负荷电流较大时，应根据负荷电流选择较大截面的导线。当电压较高时，为保持导线表面的电场强度，导线最小截面必须满足电晕的要求，可增加导线外径或增加每相导线的根数。

（4）对于 220kV 及以下的配电装置，电晕对选择导线截面一般不起决定作用，故可根据负荷电流选择导线截面。导线的结构型式可采用单根钢芯铝绞线或由钢芯铝绞线组成的复导

线。

（5）对于330kV及以上的配电装置，电晕和无线电干扰则是选择导线截面及导线结构型式的控制条件。扩径导线具有单位重量轻、电流分布均匀、结构安装上不需要间隔棒、金具连接方便等优点，而且没有分裂导线在短路时引起的附加张力，故330kV配电装置中的导线宜采用空心扩径导线。

（6）对于500kV配电装置，单根空心扩径导线已不能满足电晕等条件的要求，而分裂导线虽然具有导线拉力大、金具结构复杂、安装麻烦等缺点，但因它能提高导线的自然功率和有效地降低导线表面的电场强度，所以500kV配电装置宜采用由空心扩径导线或铝合金绞线组成的分裂导线。

10.4.2 导线截面的选择和校验

屋外配电装置中的软导线可按下列条件分别进行选择和校验。

（1）按回路持续工作电流选择

$$I_{xu} \geqslant I_g$$

式中 I_g——导体回路持续工作电流，A，按表10－35要求确定；

I_{xu}——相应于导体在某一运行温度、环境条件下长期允许工作电流。

若导体所处环境条件与表中载流量计算条件不同时，载流量应乘以相应的校正系数，见表10－36。

组合导线选择如表10－37所示。

（2）按经济电流密度选择

$$S_j = I_g / j$$

式中 S_j——按经济电流密度计算的导体截面，mm^2；

j——经济电流密度，A/mm^2，见图10－7。

（3）按短路热稳定校验。短路热稳定要求的导线最小截面计算方法同式（10－14）。

表10－35　　回路持续工作电流

回路名称		计算工作电流	说明
出线	带电抗器出线	电抗器额定电流	
	单回路	线路最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	双回路	（1.2～2）倍一回线的正常最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	环形与一台半断路器接线回路	两个相邻回路正常负荷电流	考虑断路器事故或检修时，一个回路加另一最大回路负荷电流的可能
	桥型接线	最大元件负荷电流	桥回路尚需考虑系统穿越功率
变压器回路		1.05倍变压器额定电流	1. 根据在0.95额定电压以上时其容量不变； 2. 带负荷调压变压器应按变压器的最大工作电流
		（1.3～2.0）倍变压器额定电流	若要求承担另一台变压器事故或检修时转移的负荷，则按第五章内容确定
母线联络回路		1个最大电源元件的计算电流	
母线分段回路		分段电抗器额定电流	1. 考虑电源元件事故跳闸后仍能保证该段母线负荷； 2. 分段电抗器一般发电厂为最大一台发电机额定电流的50%～80%，变电所应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷

续表

回路名称	计算工作电流	说明
旁路回路	需旁路的回路最大额定电流	
发电机回路	1.05倍发电机额定电流	当发电机冷却气体温度低于额定值时，允许提高电流为每低1℃加0.5%，必要时可按此计算
电动机回路	电动机的额定电流	

表 10－36　　裸导体载流量在不同海拔高度及环境温度下的综合校正系数

导体最高允许温度（℃）	适用范围	海拔高度（m）	实际环境温度（℃）						
			+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
+70	屋内矩形、槽形、管形导体和不计日照的屋外软导线		1.05	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
+80	计及日照时屋外软导线	1000及以下	1.05	1.00	0.95	0.89	0.83	0.76	0.69
		2000	1.01	0.96	0.91	0.85	0.79		
		3000	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75		
		4000	0.93	0.89	0.84	0.77	0.71		
	计及日照时屋外管形导体	1000及以下	1.05	1.00	0.94	0.87	0.80	0.72	0.63
		2000	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74		
		3000	0.95	0.90	0.84	0.76	0.69		
		4000	0.91	0.86	0.80	0.72	0.65		

注　导体允许工作温度+70℃、环境温度+25℃、导体表面涂漆、无日照、海拔高度1000m及以下条件计算的。

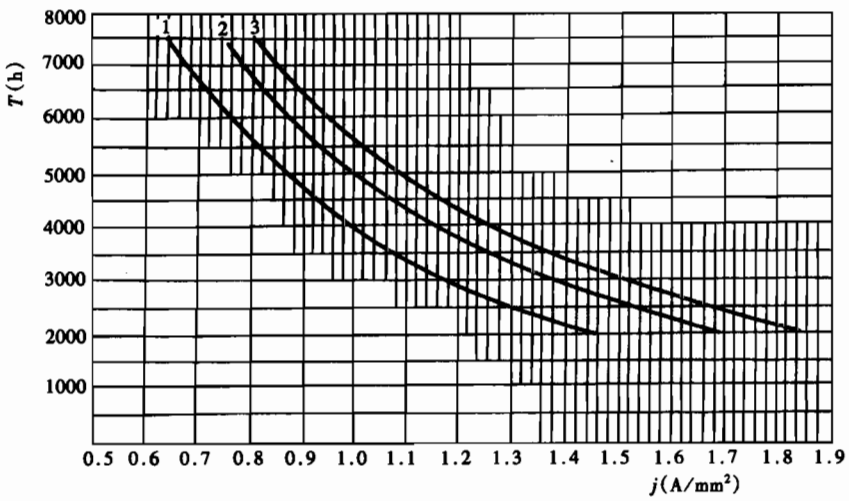


图 10－7　软导线经济电流密度

1—10kV及以下LJ系列导线经济电流密度；2—10kV及以下LGJ系列导线经济电流密度；3—35～220kVLGJ、LGJQ系列导线经济电流密度

表 10－37　　组合导线选择

发电机规格			计算经济截面（mm²）	选用组合导线	
容量（kW）	电压（kV）	电流（A）		规格	铝部总截面（mm²）
6000	6.3	687	824	2×LGJ－400/20	812

续表

发电机规格			计算经济截面	选用组合导线	
容量 (kW)	电　压 (kV)	电　流 (A)	(mm^2)	规　格	铝部总截面 (mm^2)
12000	6.3	1374	1649	2×LGJ-400/20+4×LJ-185	1544
				2×LGJ-300/15+6×LJ-185	1689
	10.5	825	990	2×LGJ-500/35	994
25000	6.3	2870	3444	2×LGJ-300/15+16×LJ-185	3518
				2×LGJ-500/35+14×LJ-185	3553
				2×LGJ-630/45+12×LJ-185	3440
	10.5	1720	2064	2×LGJ-300/15+8×LJ-185	2055
				2×LGJ-500/35+6×LJ-185	2093
50000	6.3	5740	6888	2×LGJ-630/45+24×LJ-240	6976
	10.5	3440	4128	2×LGJ-500/35+16×LJ-185	3918
				2×LGJ-630/45+16×LJ-185	4171
100000	10.5	6480	7776	2×LGJ-800/55+24×LJ-240	7357
125000	13.8	6150	7380	2×LGJ-630/45+24×LJ-240	6976
				2×LGJ-800/55+24×LJ-240	7357

注　1. 表中指标经济电流密度 $j=0.8$（A/mm^2）选择。

2. 10～12.5 万 kW 机组按经济电流密度选择的组合导线截面较大，故要求主变压器尽量靠近主厂房布置，改用母线桥出线方式。

组合导线一般按经济电流密度选择，其热稳定亦能满足要求，所以，一般不作此项校验。

（4）按电晕电压校验。110kV 及以上电压的线路、发变电所母线均应以当地气象条件下晴天不出现全面电晕为控制条件，使导线安装处的最高工作电压小于临界电晕电压。即

$$\left.\begin{aligned} &U_g \leqslant U_c \\ &U_0 = 84 m_1 m_2 k \delta^{\frac{2}{3}} \frac{n r_0}{k_0}\left(1+\frac{0.301}{\sqrt{r_0\delta}}\right)\times \lg\frac{a_{jj}}{r_d} \\ &\delta = \frac{2.895p}{273+t}\times 10^{-3} \\ &k_0 = 1+\frac{r_0}{d}2(n-1)\sin\frac{\pi}{n} \end{aligned}\right\} \qquad (10-46)$$

式中　U_g——回路工作电压，kV；

U_c——电晕临界电压，kV（线电压有效值）；

k——三相导线水平排列时，考虑中间导线电容比平均电容大的不均匀系数，一般取 0.96；

m_1——导线表面粗糙系数，一般取 0.9；

m_2——天气系数，晴天取 1.0，雨天取 0.85；

n——每相分裂导线根数，对单根导线 $n=1$；

d——分裂间距，cm；

r_0——导线半径，cm；

δ——相对空气密度；

p——大气压力，Pa；

t——空气温度，℃，$t = 25 - 0.005H$；

H——海拔高度，m；

a_{jj}——导线相间几何均距，三相导线水平排列时 $a_{jj} = 1.26a$；

a——相间距离，cm；

k_0——次导线电场强度附加影响系数，见表 10－38；

r_d——分裂导线的等效半径，cm，$r_d = \sqrt[n]{r_0 n\left(\dfrac{a}{2\sin\dfrac{\pi}{n}}\right)^{n-1}}$，单根导线 $r_d = r_0$，分裂导线 r_d 值见表 10－38。

表 10－38　　分裂导线不同排列方式时的 k_0、r_d 值

排列方式	双分裂水平排列	三分裂正三角形排列	三分裂水平排列	四分裂正四角形排列
k_0	$1+\dfrac{2r_0}{d}$	$1+\dfrac{3.46r_0}{d}$	$1+\dfrac{3r_0}{d}$	$1+\dfrac{4.24r_0}{d}$
r_d	$\sqrt{r_0 d}$	$\sqrt[3]{r_0 d^2}$	$\sqrt[3]{r_0 d^2}$	$\sqrt[4]{r_0\sqrt{2}d^2}$

表 10－39　　可不进行电晕校验的最小导体型号及外径

电压（kV）	110	220	330
软导线型号	LGJ－70	LGJ－300	LGKK－500/50 2×LGJQ－300
管形导线外径（mm）	ϕ20	ϕ30	ϕ40

海拔高度不超过 1000m，在常用相间距离情况下，如导体型号或外径不小于表 10－39 所列数值时，可不进行电晕校验。

（5）按电晕对无线电干扰校验。变电所无线电干扰，主要是由电晕和火花放电产生的，干扰对象主要是收音机和收信台，对电力载波也有影响。但因载波通信设计时就已考虑到电晕干扰引起的高频杂音，自身有效信号较强，不会成为变电站无线电干扰的控制条件。

按无线电干扰水平校验导线，当三相水平排列、干扰频率为 1MHz 时，变电所围墙外 20m 处（非出线方向）无线电干扰值应不大于 50dB。各种电气设备的综合干扰水平，距围墙 20m 处不应大于导线的干扰水平，干扰电压不应大于 2500μV。

对于分裂导线，无线电干扰的计算公式采用与标准线路相比较的对比法。标准线路导线最大表面场强为 12.2kV/cm，对于 500kV 配电装置三相导线均采用水平布置，其中相导线的电晕无线电干扰计算公式为

$$N = (3.7E - 12.2) \pm 3 + 40\lg\frac{d}{2.53} + 40\lg\frac{h}{D_1} \tag{10-47}$$

$$E = \frac{18cU_m k}{nr_0\sqrt{3}} \tag{10-48}$$

$$C = 1.07C_{pj} = 1.07 \times \frac{0.024}{\lg\dfrac{1.26D}{r_d}} \tag{10-49}$$

式中　N——分贝数，dB；

E——导线最大表面场强，kV/cm；

C——导线电容，取中相值，μF/km；

U_m——最高线电压，kV；

12.2——标准线路导线最大表面场强，kV/cm；

±3——标准偏差；

$40\lg\frac{d}{2.53}$——次导线直径不同时干扰值的修正量；

d——次导线直径，cm；

$40\lg\frac{h}{D^1}$——导线下测点的距离对干扰值的修正量；

h——导线最低点对地高度，cm；

D_1——测点至导线斜距，cm，$D_1=\sqrt{x^2+h^2}$；

x——计算点至边相导线水平距离，cm；

k——中相导线场强比平均场强大的系数；

C_{pj}——导线电容的平均值，μF/km。

10.5 电缆敷设的设计要求

10.5.1 一般要求

10.5.1.1 电缆路径的选择：

(1) 避免电缆遭受机械性外力、过热、腐蚀等危害。

(2) 满足安全要求条件下使电缆较短。

(3) 便于敷设、维护。

(4) 避开将要挖掘施工的地方。

(5) 充油电缆线路通过起伏地形时，使供油装置较合理配置。

(6) 电缆在任何敷设方式及其全部路径条件的上下左右改变部位，都应满足电缆允许弯曲半径要求。各型电缆容许弯曲半径，可由相应的电缆制造标准查明或供货方提供。

电缆的允许弯曲半径，应符合电缆绝缘及其构造特性要求。对自容式铅包充油电缆，允许弯曲半径可按电缆外径的20倍计。

10.5.1.2 电缆群敷设在同一通道中位于同侧的多层支架上配置：

(1) 应按电压等级由高至低的电力电缆、强电至弱电的控制和信号电缆、通信电缆的顺序排列。

当水平通道中含有35kV以上高压电缆，或为满足引入柜盘的电缆符合允许弯曲半径要求时，宜按“由下而上”的顺序排列。

在同一工程中或电缆通道延伸于不同工程的情况，均应按相同的上下排列顺序原则来配置。

(2) 支架层数受通道空间限制时，35kV及以下的相邻电压级电力电缆，可排列于同一层支架，1kV及以下电力电缆也可与强电控制和信号电缆配置在同一层支架上。

(3) 同一重要回路的工作与备用电缆需实行耐火分隔时，宜适当配置在不同层次的支架上。

10.5.1.3 同一层支架上电缆排列配置方式：

(1) 控制和信号电缆可紧靠或多层叠置。

（2）除交流系统用单芯电力电缆的同一回路可采取品字形（三叶形）配置外，对重要的同一回路多根电力电缆，不宜叠置。

（3）除交流系统用单芯电缆情况外，电力电缆相互间宜有35mm空隙。

10.5.1.4 单芯电力电缆：

（1）交流系统用单芯电力电缆的相序配置及其相间距离，应同时满足电缆金属护层的正常感应电压不超过允许值，并使按持续工作电流选择电缆截面尽可能较小的原则来确定。

未呈品字形配置的单芯电力电缆，有两回线及以上配置在同一通路时，应计入相互影响。

（2）交流系统用单芯电力电缆与公用通信线路相距较近时，宜维持技术经济上有利的电缆路径，必要时可采取下列抑制感应电势的措施：

1）使电缆支架形成电气通路，且计入其他并行电缆抑制因素的影响。

2）对电缆隧道的钢筋混凝土结构实行钢筋网焊接连通。

3）沿电缆线路适当附加并行的金属屏蔽线或罩盒等。

10.5.1.5 明敷及电缆构筑物敷设：

（1）明敷的电缆不宜平行敷设于热力管道上部。电缆与管道之间无隔板防护时，相互间距应符合电缆与管道相互间允许距离的规定（表10－40）。

表10－40　　电缆与管道相互间允许距离

电缆与管道之间走向		电力电缆（mm）	控制和信号电缆（mm）
热力管道	平行	1000	500
	交叉	500	250
其他管道	平行	150	100

（2）在隧道、沟、浅槽、竖井、夹层等封闭式电缆通道中，不得含有可能影响环境温升持续超过5℃的供热管路。有重要回路电缆时，严禁含有易燃气体或易燃液体的管道。

（3）在有行人通过的地坪、堤坝、桥面、地下商业设施的路面或通行的隧洞中，电缆不得敞露敷设于地坪上或楼梯走道上。

（4）在工厂、建筑物的风道中、煤矿里机械提升的除运输机通行的斜井通风巷道中或木支架的竖井井筒中，严禁敷设敞露式电缆。

10.5.1.6 需抑制电气干扰强度的弱电回路控制和信号电缆，除遵照有关金属屏蔽的要求外，当需要时可采取下列措施：

（1）与电力电缆并行敷设时相互间距，在可能范围内宜远离；对电压高、电流大的电力电缆间距更宜较远。

（2）敷设于配电装置内的控制和信号电缆，与耦合电容器或电容式电压互感器、避雷器或避雷针接地处的距离，宜在可能范围内远离。

（3）沿控制和信号电缆可平行敷设屏蔽线或将电缆敷设于钢制管、盒中。

10.5.1.7 防护及保护措施：

（1）非铠装电缆用于下列场所、部位时，应采用具有机械强度的管或罩加以保护：

1）非电气人员经常活动场所的地坪以上2m范围、地中引出的地坪下0.3m深电缆区段。

2）可能有载重设备移经电缆上面的区段。

(2) 除架空绝缘型电缆外的非户外型电缆，使用在户外时，宜有罩、盖等遮阳。

(3) 电缆敷设在有周期性振动的易振场所，应采用能减少电缆承受附加应力或避免金属疲劳断裂的措施。可采取下列方法：

1) 在支持电缆部位设置由橡胶等弹性材料制成的衬垫。

2) 使电缆敷设成波浪状且留有伸缩节。

10.5.1.8 爆炸性气体危险场所敷设电缆的要求。

(1) 在可能范围应使电缆距爆炸释放源较远，敷设在爆炸危险较小的场所。并应符合下列规定：

1) 易燃气体比空气重时，电缆应在较高处架空敷设，且对非铠装电缆采取穿管或置于托盘、槽盒中等机械性保护。

2) 易燃气体比空气轻时，电缆应敷设在较低处的管、沟内，沟内非铠装电缆应埋砂。

(2) 电缆沿输送易燃气体的管道敷设时，应配置在危险程度较低的管道一侧，且应符合下列规定：

1) 易燃气体比空气重时，电缆宜在管道上方。

2) 易燃气体比空气轻时，电缆宜在管道下方。

(3) 电缆及其管、沟穿过不同区域之间的墙、板孔洞处，应以非燃性材料严密堵塞。

(4) 电缆线路中间不应有接头。

10.5.1.9 1kV 以上电源直接接地且配置独立分开的中性线和保护地线构成的系统，当使用独立于相芯线和中性线以外的电缆作保护地线时，同一回路的该两部分电缆敷设方式，应符合下列规定：

(1) 在爆炸性气体环境，应在同一路径的同一结构管、沟或盒中敷设。

(2) 除上述情况外，宜在同一路径的同一构筑物中尽量靠近敷设。

10.5.1.10 计算长度和订货长度：

(1) 电缆的计算长度，应包括实际路径长度与附加长度。附加长度，宜计入下列因素：

1) 电缆敷设路径地形等高差变化、伸缩节或迂回备用裕量。

2) 35kV 及以上电压电缆蛇形敷设时的弯曲状影响增加量。

3) 终端或接头制作所需剥截电缆的预留段、电缆引至设备或装置所需的长度。

(2) 电缆的订货长度，应符合下列规定：

1) 长距离的电缆线路，宜采取计算长度作为订货长度。对 35kV 以上电压单芯电缆，应按相计；当线路采取交叉互联等分段连接方式时，应按段开列。

2) 35kV 及以下电压电缆用于非长距离情况，宜考虑整盘电缆中截取后不能利用其剩余段的因素，按计算长度计入 5% ~ 10% 的裕量，作为同型号规格电缆的订货长度。

3) 水下敷设电缆的每盘长度，不宜少于水下段的敷设长度。有困难时，可含有工厂制的软接头。

10.5.2 敷设方式选择

电缆工程敷设方式的选择，应视工程条件、环境特点和电缆型类、数量等因素，且按满足运行可靠、便于维护的要求和技术经济合理的原则来选择。

10.5.2.1 在地中直埋敷设：

(1) 电缆直埋敷设方式的选择。

1）同一通路少于6根的35kV及以下电力电缆，在厂区通往远距离辅助设施或城郊等不易有经常性开挖的地段，宜用直埋；在城镇人行道下较易翻修情况或道路边缘，也可用直埋。

2）厂区内地下管网较多的地段，可能有熔化金属、高温液体溢出的场所，待开发将有较频繁开挖的地方，不宜用直埋。

3）在化学腐蚀或杂散电流腐蚀的土壤范围，不得采用直埋。

（2）直埋敷设电缆的路径选择。

1）避开含有酸、碱强腐蚀或杂散电流电化学腐蚀严重影响的地段。

2）未有防护措施时，避开白蚁危害地带、热源影响和易遭外力损伤的区段。

（3）直埋敷设电缆应满足下列要求。

1）电缆应敷设在壕沟里，沿电缆全长的上、下紧邻侧铺以厚度不少于100mm的软土或砂层。

2）沿电缆全长应覆盖宽度不小于电缆两侧各50mm的保护板，保护板宜用混凝土制作。

3）位于城镇道路等开挖较频繁的地方，可在保护板上层铺以醒目的标志带。

4）位于城郊或空地旷带，沿电缆路径的直线间隔约100m、转弯处或接头部位，应竖立明显的方位标志或标桩。

5）直埋敷设于非冻土地区时，电缆埋置深度应符合下列规定：

a. 电缆外皮至地下构筑物基础，不得小于0.3m。

b. 电缆外皮至地面深度，不得小于0.7m；当位于车行道或耕地下时，应适当加深，且不宜小于1m。

6）直埋敷设于冻土地区时，宜埋入冻土层以下，当无法深埋时可在土壤排水性好的干燥冻土层或回填土中埋设，也可采取其他防止电缆受到损伤的措施。

（4）直埋敷设的电缆，严禁位于地下管道的正上方或下方。电缆与电缆或管道、道路、构筑物等相互间容许最小距离，应符合表10－41的要求。

表10－41　　电缆与电缆或管道、道路、构筑物等相互间容许最小距离

电缆直埋敷设时的配置情况		平　行　（m）	交　叉　（m）
控制电缆之间		—	0.5*
电力电缆之间或与控制电缆之间	10kV及以下电力电缆	0.1	0.5*
	10kV以上电力电缆	0.25**	0.5*
不同部门使用的电缆		0.5**	0.5*
电缆与地下管沟	热力管沟	2***	0.5*
	油管或易燃气管道	1	0.5*
	其他管道	0.5	0.5*
电缆与铁路	非直流电气化铁路路轨	3	1.0
	直流电气化铁路路轨	10	1.0
电缆与建筑物基础		0.6***	—
电缆与公路边		1.0***	
电缆与排水沟		1.0***	
电缆与树木的主干		0.7	
电缆与1kV以下架空线电杆		1.0***	
电缆与1kV以上架空线杆塔基础		4.0***	

*　用隔板分隔或电缆穿管时可为0.25m；

**　用隔板分隔或电缆穿管时可为0.1m；

***　特殊情况可酌减且最多减少一半值。

(5) 直埋敷设的电缆与铁路、公路或街道交叉时，应穿于保护管，且保护范围超出路基、街道路面两边以及排水沟边 0.5m 以上。

直埋敷设的电缆引入构筑物，在贯穿墙孔处应设置保护管，且对管口实施阻水堵塞。

(6) 直埋敷设电缆的接头配置。

1) 接头与邻近电缆的净距，不得小于 0.25m。

2) 并列电缆的接头位置宜相互错开，且不小于 0.5m 的净距。

3) 斜坡地形处的接头安置，应呈水平状。

4) 对重要回路的电缆接头，宜在其两侧约 1000mm 开始的局部段，按留有备用量方式敷设电缆。

(7) 直埋敷设电缆在采取特殊换土回填时，回填土的土质应对电缆外护套无腐蚀性。

10.5.2.2 在保护管中敷设

(1) 电缆穿管敷设方式的选择。

1) 在有爆炸危险场所明敷的电缆，露出地坪上需加以保护的电缆，地下电缆与公路、铁道交叉时，应采用穿管。

2) 地下电缆通过房屋、广场的区段，电缆敷设在规划将作为道路的地段，宜用穿管。

3) 在地下管网较密的工厂区、城市道路狭窄且交通繁忙或道路挖掘困难的通道等电缆数量较多的情况下，可用穿管敷设。

(2) 在保护管中敷设应满足下列要求。

1) 电缆保护管必须是内壁光滑无毛刺。保护管的选择，应满足使用条件所需的机械强度和耐久性，且符合下列基本要求：

a. 需穿管来抑制电气干扰的控制电缆，应采用钢管。

b. 交流单相电缆以单根穿管时，不得用未分隔磁路的钢管。

2) 部分或全部露出在空气中的电缆保护管选择，应遵守下列规定：

a. 防火或机械性要求高的场所，宜用钢质管。且应采取涂漆或镀锌包塑等适合环境耐久要求的防腐处理。

b. 满足工程条件自熄性要求时，可用难燃型塑料管。部分埋入混凝土中等需有耐冲击的使用场所，塑料管应具备相应承压能力，且宜用可挠性的塑料管。

(3) 地中埋设的保护管，应满足埋深下的抗压要求和耐环境腐蚀性。通过不均匀沉降的回填土地段等受力较大的场所，宜用钢管。

同一通道的电缆数量较多时，宜用排管。

(4) 保护管管径与穿过电缆数量的选择，应符合下列规定：

1) 每管宜只穿 1 根电缆。除发电厂、高压变电所等重要性场所外，对一台电动机所有回路或同一设备的低压电机所有回路，可在每管合穿不多于 3 根电力电缆或多根控制电缆。

2) 管的内径，不宜小于电缆外径或多根电缆包络外径的 1.5 倍。排管的管孔内径，还不宜小于 75mm。

(5) 单根保护管使用时：

1) 每根管路不宜超过 4 个弯头；直角弯不宜多于 3 个。

2) 地中埋管，距地面深度不宜小于 0.5m；与铁路交叉处距路基，不宜小于 1m；距排水沟底不宜小于 0.5m。

3）并列管之间宜有不小于20mm的空隙。

（6）使用排管时：

1）管孔数宜按发展预留适当备用。

2）缆芯工作温度相差大的电缆，宜分别配置于适当间距的不同排管组。

3）管路顶部土壤覆盖厚度不宜小于0.5m。

4）管路应置于经整平夯实土层且有足以保持连续平直的垫块上；纵向排水坡度不宜小于0.2%。

5）管路纵向连接处的弯曲度，应符合牵引电缆时不致损伤的要求。

6）管孔端口应有防止损伤电缆的处理。

（7）较长电缆管路中的下列部位，应设有工作井：

1）电缆牵引张力限制的间距处。其最大间距，可按规范要求确定。

2）电缆分支、接头处。

3）管路方向较大改变或电缆从排管转入直埋处。

4）管路坡度较大且需防止电缆滑落的必要加强固定处。

10.5.2.3 在电缆构筑物中敷设：

（1）浅槽敷设方式的选择。

1）地下水位较高的地方。

2）通道中电力电缆数量较少，且在不经常有载重车通过的户外配电装置等场所。

（2）电缆沟敷设方式的选择。

1）有化学腐蚀液体或高温熔化金属溢流的场所，或在载重车辆频繁经过的地段，不得用电缆沟。

2）经常有工业水溢流、可燃粉尘弥漫的厂房内，不宜用电缆沟。

3）在厂区、建筑物内地下电缆数量较多但不需采用隧道时，城镇人行道开挖不便且电缆需分期敷设时，又不属于上述1）、2）项的情况下，宜用电缆沟。

4）有防爆、防火要求的明敷电缆，应采用埋砂敷设的电缆沟。

（3）电缆隧道敷设方式的选择，应符合下列规定。

1）同一通道的地下电缆数量众多，电缆沟不足以容纳时应采用隧道。

2）同一通道的地下电缆数量较多，且位于有腐蚀性液体或经常有地面水流溢的场所，或含有35kV以上高压电缆，或穿越公路、铁道等地段，宜用隧道。

3）受城镇地下通道条件限制或交通流量较大的道路下，与较多电缆沿同一路径有非高温的水、气和通信电缆管线共同配置时，可在公用性隧道中敷设电缆。

（4）垂直走向的电缆，宜沿墙、柱敷设，当数量较多，或含有35kV以上高压电缆时，应采用竖井。

（5）在控制室、继电保护室等有多根电缆汇聚的下部，应设有电缆夹层。电缆数量较少的情况，也可采用有活动盖板的电缆层。

（6）电缆构筑物的高、宽尺寸，应符合下列规定：

1）隧道、工作井的净高，不宜小于1900mm；与其他沟道交叉的局部段净高，不得小于1400mm。

2）电缆夹层的净高，不得小于2000mm，但不宜大于3000mm。

3）电缆沟、隧道中通道的净宽，不宜小于表10－42所列值。

表 10－42　　电缆沟、隧道中通道净宽允许最小值　　单位：mm

电缆支架配置及其通道特征	电缆沟沟深			电缆隧道
	≤600	600～1000	≥1000	
两侧支架间净通道	300	500	700	1000
单列支架与壁间通道	300	450	600	900

注　在 110kV 及以上高压电缆接头中心两侧 3000mm 局部范围，通道净宽不宜小于 1500mm。

（7）电缆支架的层间垂直距离，应满足电缆能方便地敷设和固定，且在多根电缆同置于一层支架上时，有更换或增设任一电缆的可能。电缆支架层间垂直距离宜符合表 10－43 所列数值。

（8）水平敷设情况下电缆支架的最上层、最下层布置尺寸，应符合下列规定：

1）最上层支架距构筑物顶板或梁底的净距允许最小值，应满足电缆引接至上侧柜盘时的允许弯曲半径要求，且不宜小于按表 10－43 所列数再加 80～150mm 的合值。

2）最上层支架距其他设备装置的净距，不得小于 300mm；当无法满足时应设置防护板。

3）最下层支架距地坪、沟道底部的净距，不宜小于表 10－44 所列值。

表 10－43　电缆支架层间垂直距离的允许最小值

电缆电压级和类型，敷设特征		普通支架、吊架（mm）	桥架（mm）
控制电缆明敷		120	200
电力电缆明敷	10kV 及以下，但 6～10kV 交联聚乙烯电缆除外	150～200	250
	6～10kV 交联聚乙烯	200～250	300
	35kV 单芯	250	300
	110～220kV，每层 1 根		
	35kV 三芯	300	350
	110～220kV，每层 1 根以上		
电缆敷设在槽盒中		$h+80$	$h+100$

注　h 表示槽盒外壳高度。

表 10－44　最下层电缆支架距地坪、沟道底部的允许最小净距

电缆敷设场所及其特征		垂直净距（mm）
电缆沟		50～100
隧道		100～150
电缆夹层	除下项外的情况	200
	至少在一侧不小于 800mm 宽通道处	1400
公共廊道中电缆支架未有围栏防护		1500～2000
厂房内		2000
电缆敷设场所及其特征		垂直净距
厂房外	无车辆通过可能	2500
	有汽车通过时	4500

（9）电缆构筑物应满足防止外部进水、渗水的要求，且符合下列规定：

1）对电缆沟或隧道底部低于地下水位、电缆沟与工业水沟并行邻近、隧道与工业水管沟交叉的情况，宜加强电缆构筑物防水处理。

2）电缆沟与工业水管、沟交叉时，应使电缆沟位于工业水管沟的上方。

3）在不影响厂区排水情况下，厂区户外电缆沟的沟壁宜稍高出地坪。

（10）电缆构筑物应能实现排水畅通，且符合下列规定：

1）电缆沟、隧道的纵向排水坡度，不得小于 0.5%。

2）沿排水方向适当距离宜设集水井及其泄水系统，必要时实施机械排水。

3）隧道底部沿纵向宜设泄水边沟。

（11）电缆沟沟壁、盖板及其材质构成，应满足可能承受荷载和适合环境耐久的要求。

可开启的沟盖板的单块重量，不宜超过50kg。

（12）电缆隧道应每隔不大于75m距离设安全孔（人孔）；安全孔距隧道的首末端不宜超过5m。

安全孔直径不得小于700mm，厂区内的安全孔宜设置固定式爬梯。

（13）高差地段的电缆隧道中通道不宜呈阶梯状；纵向坡度不宜大于15°。

电缆接头不宜安设在倾斜位置上。

（14）电缆隧道宜采取自然通风。当有较多电缆缆芯工作温度持续达到70℃以上或其他影响环境温度显著升高时，可装设机械通风；但机械通风装置应在一旦出现火灾时能可靠地自动关闭。

长距离的隧道，宜适当分区段实行相互独立的通风。

（15）非拆卸式电缆竖井中，应有容纳供人上下的活动空间，且宜符合下列规定：

1）未超过5m高时，可设爬梯且活动空间不宜小于800mm×800mm。

2）超过5m高时，宜有楼梯，且每隔3m左右有楼梯平台。

3）超过20m高且电缆数量多或重要性要求较高时，可设简易式电梯。

10.5.2.4 在水下敷设：

（1）通过河流、水库的电缆，无条件利用桥梁、堤坝敷设时，可采取水下敷设。

（2）水下电缆敷设应满足下列要求。

1）水下电缆路径选择，应满足电缆不易受机械性损伤、能实施可靠防护、敷设作业方便、经济合理等要求，且符合下列规定：

a. 电缆宜敷设在河床稳定、流速较缓、岸边不易被冲刷、海底无石山或沉船等障碍、少有沉锚和拖网渔船活动的水域。

b. 电缆不宜敷设在码头、渡口、水工构筑物近旁、疏浚挖泥区和规划筑港地带。

2）水下电缆不得悬空于水中，应埋设于水底。在通航水道等需防范外部机械力损伤的水域，电缆应埋置于水底适当深度，并加以稳固覆盖保护；浅水区埋深不宜小于0.5m，深水航道的埋深不宜小于2m。

3）水下电缆相互间严禁交叉、重叠。相邻的电缆应保持足够的安全间距，且符合下列规定：

a. 主航道内，电缆相互间距不宜小于平均最大水深的1.2倍。引至岸边间距可适当缩小。

b. 在非通航的流速未超过1m/s的小河中，同回路单芯电缆相互间距不得小于0.5m，不同回路电缆间距不得小于5m。

除a、b项情况外，应按水的流速和电缆埋深等因素确定。

4）水下的电缆与工业管道之间水平距离，不宜小于50m；受条件限制时，不得小于15m。

5）水下电缆引至岸上的区段，应有适合敷设条件的防护措施，且符合下列规定：

a. 岸边稳定时，应采用保护管、沟槽敷设电缆，必要时可设置工作井连接，管沟下端宜置于最低水位下不小于1m的深处。

b. 岸边未稳定时，还宜采取迂回形式敷设以预留适当备用长度的电缆。

6）水下电缆的两岸，应设有醒目的警告标志。

10.5.2.5 其他敷设方式：

(1) 在地下水位较高的地方、化学腐蚀液体溢流的场所，厂房内应采用支持式架空敷设。建筑物或厂区不适于地下敷设时，可用架空敷设。

(2) 明敷又不宜用支持式架空敷设的地方，可采用悬挂式架空敷设。

(3) 通过木质构造桥梁、码头、栈道等公用构筑物，用于重要性木质建筑设施的非矿物绝缘电缆，应敷设于不燃性的管或槽盒中。

(4) 交通桥梁上、隧洞中或地下商场等公共设施的电缆，应有防止电缆着火危害、避免外力损伤的可靠措施，且应符合下列规定：

1) 电缆不得明敷在通行的路面上。

2) 自容式充油电缆应埋沙敷设。

3) 非矿物绝缘电缆用在未有封闭式通道的情况，宜敷设在不燃性的管或槽盒中。

(5) 公路、铁道桥梁上的电缆，应考虑振动、热伸缩以及风力影响下防止金属套长期应力疲劳导致断裂的措施，且应符合下列规定：

1) 桥墩两端和伸缩缝处，电缆应充分松弛。当桥梁中有挠角部位时，宜设电缆迂回补偿装置。

2) 35kV 以上大截面电缆宜以蛇形敷设。

3) 经常受到振动的直线敷设电缆，应设置橡皮、沙袋等弹性衬垫。

10.6 电缆支持与固定的设计要求

10.6.1 一般规定

(1) 电缆明敷时，应沿全长采用电缆支架、挂钩或吊绳等支持。最大跨距，应符合下列规定：

表 10-45 普通支架、吊架的允许跨距

电缆特征	不同敷设方式下允许跨距 (mm)	
	水平	垂直
未含金属套、铠装的全塑小截面电缆	400*	1000
除上述情况外的中、低压电缆	800	1500
35kV 以上高压电缆	1500	3000

* 电缆较平直时该值可增加 1 倍。

1) 满足支持件的承载能力和无损电缆的外护层及其缆芯。

2) 使电缆相互间能配置整齐。

3) 适应工程条件下布置要求。

(2) 直接支持电缆用的普通支架（臂式支架）、吊架的允许跨距，宜符合表 10-45 规定的数值。

(3) 35kV 及以下电缆明敷时，应设适当固定的部位，并符合下列规定：

1) 水平敷设，应设在电缆线路首、末端和转弯处以及接头的两侧；且宜在直线段每隔不少于 100m 处。

2) 垂直敷设，应设在上、下端和中间适当数量位置处。

3) 斜坡敷设，应遵照 1)、2) 项因地制宜。

4) 当电缆间需保持一定间隙时，宜在每隔约 10m 处。

5) 交流单相电力电缆，还应满足按短路电动力确定所需预固定的间距。

(4) 固定电缆用的夹具、扎带、捆绳或支托件等部件，应具有表面平滑、便于安装、足够的机械强度和适合使用环境的耐久性。

(5) 电缆固定用部件的选择，应符合下列规定：

1) 除交流单相电力电缆情况外，可采用经防腐处理的扁钢制夹具或尼龙扎带、镀塑金

属扎带。强腐蚀环境，应采用尼龙扎带或镀塑金属扎带。

2）交流单相电力电缆的刚性固定，宜采用铝合金等不构成磁性闭合回路的夹具；其他固定方式，可用尼龙扎带、绳索。

3）不得用铁丝直接捆扎电缆。

（6）交流单相电力电缆固定部件的机械强度，应验算短路电动力条件。宜满足下列关系式

$$F \geqslant \frac{2.05 i^2 LK}{D} \times 10^{-7} \tag{10-50}$$

式中 F——夹具、扎带等固定部件的抗张强度，N；

i——通过电缆回路的最大短路电流峰值，A；

D——电缆相间中心距，m；

L——在电缆上安置夹具、扎带等的相邻跨距，m；

K——安全系数，取大于2。

对于矩形断面夹具

$$F = b \cdot h \cdot \sigma \tag{10-51}$$

式中 b——夹具厚度，mm；

h——夹具宽度，mm；

σ——夹具材料允许拉应力，Pa，对铝合金夹具取 $\sigma = 80 \times 10^6$Pa。

（7）位于直流牵引的电气化铁道附近时，电缆与金属支持物之间宜设置绝缘衬垫。

10.6.2 电缆支架

（1）电缆支架应符合下列规定：

1）表面光滑无毛刺。

2）适应使用环境的耐久稳固。

3）满足所需的承载能力。

4）符合工程防火要求。

（2）电缆支架除支持单相工作电流大于1000A的交流系统电缆情况外，宜用钢制。在强腐蚀环境，选用其他材料电缆支架，应符合下列规定：

1）电缆沟中普通支架（臂式支架），可选用耐腐蚀的刚性材料制。

2）电缆桥架组成的梯架、托盘，可选用满足工程条件难燃性的玻璃钢制。

3）技术经济综合较优时，可用铝合金制电缆桥架。

（3）金属制的电缆支架应有防腐蚀处理，且应符合下列规定：

1）大容量发电厂等密集配置场所或重要回路的钢制电缆桥架，应从一次性防腐处理具有的耐久性，按工程环境和耐久要求，选用适合的防腐处理方式。

在强腐蚀环境，宜采用热浸锌等耐久性较高的防腐处理。

2）型钢制臂式支架，轻腐蚀环境或非重要性回路的电缆桥架，可用涂漆处理。

（4）电缆支架的强度，应满足电缆及其附属件荷重和安装维护的受力要求，且应符合下列规定：

1）有可能短暂上人时，按900N的附加集中荷载计。

2）机械化施工时，计入纵向拉力、横向推力和滑轮重量等影响。

3）在户外时，计入可能有覆冰、雪和大风的附加荷载。

(5) 电缆桥架的组成结构，应满足强度、刚度及稳定性要求，且符合下列规定：

1) 桥架的承载能力，不得超过使桥架最初产生永久变形时的最大荷载除以安全系数为1.5的数值。

2) 梯架、托盘在允许均布承载作用下的相对挠度值，对钢制不宜大于1/200；对铝合金制不宜大于1/300。

3) 钢制托臂在允许承载下的偏斜与臂长比值，不宜大于1/100。

(6) 电缆支架种类的选择，应符合下列规定：

1) 明敷的全塑电缆数量较多，或电缆跨越距离较大、高压电缆蛇形安置方式时，宜用电缆桥架。

2) 除1) 项外，可用普通支架、吊架直接支持电缆。

(7) 电缆桥架品种的选择，应符合下列规定：

1) 在有易燃粉尘场所，或需屏蔽外部的电气干扰，应采用无孔托盘。

2) 高温、腐蚀性液体或油的溅落等需防护场所，宜用托盘。

3) 需因地制宜组装时，可用组装式托盘。

4) 除1) ~3) 项外，宜用梯架。

(8) 梯架、托盘的直线段超过下列长度时，应留有不少于20mm的伸缩缝：

1) 钢制，30m。

2) 铝合金或玻璃钢制，15m。

(9) 金属制桥架系统，应有可靠的电气连接并接地。使用玻璃钢桥架，应沿桥架全长另敷设专用接地线。

(10) 位于振动场所的桥架系统，对包括接地部位的螺栓连接处，应装置弹簧垫圈。

(11) 要求防火的金属桥架，除应遵守10.7节规定外，应对金属构件外表面施加符合国家有关规范规定的耐火涂层。

10.7 电缆防火与阻燃的设计要求

10.7.1 电缆火灾的危险性

电缆火灾的发生，有电缆过热、短路、绝缘老化或绝缘性能变坏等内因，也有煤粉或油漏经高温引燃、电焊渣等可燃物着火等影响下的外因，统计显示内、外因几乎各占一半，分析认为难以仅凭加强管理来完全防范，工程建设时创造利于电缆防火、阻止延燃的条件，就有减灾的积极意义。

统计分析表明，各类建筑设施中几乎都有电缆火灾的例子，电缆火灾的概率分布，主要在含有煤灰、油等可燃质和高温环境的火电厂、钢铁、石化企业以及电缆群密集的沟道等场所，火电厂中以锅炉房、汽机房发生概率最高，且主要在制粉系统防爆门、炉体和高温管道、油管路近旁的部位。而300MW及以上机组火电厂的区域性供电范围较大，一旦电缆火灾带来社会经济损失和影响严重，况且，该场所电缆密集，常处于火灾概率较高的范围。

电缆着火后的蔓延程度及其危害各不相同。明敷电缆数量较少时可能不形成延燃而自熄；密集敷设电缆，尤其在沟道、竖井等情况火势发展迅猛。有些场所或回路，电缆火灾损失不大，有时如涉及重要回路或场所，即或少量局部电缆着火，却导致大范围断电或事故恶性影响。至于在密集电缆群的隧道中，或外部电缆着火通过未封堵孔洞延燃至控制室电缆层等情况，不乏烧毁汇聚其间众多电缆的破坏性事例。

值得注意：使用难燃电缆并不能避免电缆着火，现行标准考核通过的难燃性，往往不足以等价工程条件的有效阻止延燃，故电缆着火延燃可能依然存在，为限制事故扩大且考虑到投资增加有限，因而采取适当的阻火分隔措施是必要的。

电缆可能着火蔓延导致严重事故的回路、易受外部影响波及火灾的电缆密集场所，应有适当的阻火分隔，并按工程重要性、火灾概率及其特点和经济合理等因素，确定采取安全措施。

电缆火灾属偶然性，相应投资则属必然性。实现减灾的目的是为了谋求社会经济效益，需要对增加投资的总和有所估价，从这一意义出发，宜有适度的投资以免去重大的损失，如同防洪投资意义相同，虽然不能绝对免灾，总可减灾。

10.7.2　电缆防火与阻燃的安全措施

对电缆可能着火蔓延导致严重事故的回路、易受外部影响波及火灾的电缆密集场所，应有适当的阻火分隔，并按工程重要性、火灾几率及其特点和经济合理等因素，确定采取下列安全措施。

1）实施阻燃防护或阻止延燃。

2）选用具有难燃性的电缆。

3）实施耐火防护或选用具有耐火性的电缆。

4）实施防火构造。

5）增设自动报警与专用消防装置。

防火阻燃材料必须经过技术或产品鉴定。在使用时，应按设计要求和材料使用工艺提出施工措施。涂料应按一定浓度稀释，搅拌均匀，并应顺电缆长度方向进行涂刷，涂刷厚度或次数、间隔时间应符合材料使用要求。包带在绕包时，应拉紧密实，缠绕层数或厚度应符合材料使用要求。绕包完毕后，每隔一定距离应绑扎牢固。

10.7.3　电缆防火与阻燃的设计要求

10.7.3.1　阻火分隔方式的选择：

（1）电缆构筑物中电缆引至电气柜、盘或控制屏、台的开孔部位，电缆贯穿隔墙、楼板的孔洞处，均应实施阻火封堵。

（2）在隧道或重要回路的电缆沟中下列部位，宜设置阻火墙（防火墙）。

1）公用主沟道的分支处。

2）多段配电装置对应的沟道适当分段处。

3）长距离沟道中相隔约 200m 或通风区段处。

4）至控制室或配电装置的沟道入口、厂区围墙处。

（3）在竖井中，宜每隔约 7m 设置阻火隔层。

10.7.3.2　实施阻火分隔的技术特性：

（1）阻火封堵、阻火隔层的设置，可采用防火堵料、填料或阻火包、耐火隔板等；在楼板竖井孔处，应能承受巡视人员的荷载。

（2）阻火墙的构成，宜采用阻火包、矿棉块等软质材料或防火堵料、耐火隔板等便于增添或更换电缆时不致损伤其他电缆的方式，且在可能经受积水浸泡或鼠害作用下具有稳固性。

（3）除通向主控室、厂区围墙或长距离隧道中按通风区段分隔的阻火墙部位应设防火门外，其他情况下，有防止窜燃措施时可不设防火门。防窜燃方式，可在阻火墙紧靠两侧不少

于1m区段所有电缆上施加防火涂料、包带，或设置挡火板等。

（4）阻火墙、阻火隔层和封堵的构成方式，均应满足按等效工程条件下标准试验的耐火极限不低于1h。

10.7.3.3 明敷电缆的使用：

（1）非难燃型电缆用于明敷情况，增强防火安全时，应符合下列规定：

1）在易受外因波及着火的场所，宜对相关范围电缆实施阻燃防护；对重要电缆回路，可在适当部位设置阻火段以实施阻止延燃。

阻燃防护或阻火段，可采取在电缆上施加防火涂料、包带或当电缆数量较多时采用难燃、耐火槽盒或阻火包等。

2）在接头两侧电缆各约3m区段和该范围并列邻近的其他电缆上，宜用防火包带实施阻止延燃。

（2）在火灾几率较高、灾害影响较大的场所，明敷方式下电缆选择，应符合下列规定：

1）单机容量为300MW及以上机组火电厂的主厂房和燃煤、燃油系统以及其他易燃、易爆环境，宜采用具有难燃性的电缆。

2）地下的客运或商业设施等人流密集环境中需增强防火安全的回路，宜采用具有低烟、低毒的难燃性电缆。

3）其他重要的工业与公共设施供配电回路，当需要增强防火安全性时，也可采用具有难燃性或低烟、低毒难燃性的电缆。

10.7.3.4 难燃电缆的选用要求：

（1）电缆的难燃性，应符合现行国家标准GB 12666.6—1990《电线电缆燃烧试验方法》的规定。多根密集配置时电缆的难燃性，应按该标准第5部分“成束电线电缆燃烧试验方法”，以及电缆配置情况、所需防止灾难性事故和经济合理的原则，满足适合的类别要求。

（2）当确定该等级类难燃电缆能满足工程条件下有效阻止延燃性时，可减少第10.7.3.3条的要求。

（3）同一通道中，不宜把非难燃电缆与难燃电缆并列配置。

10.7.3.5 耐火电缆的选用：

（1）在外部火势作用一定时间内需维持通电的下列场所或回路，明敷的电缆应实施耐火防护或选用具有耐火性的电缆。

1）消防、报警、应急照明、遮断器操作直流电源和发电机组紧急停机的保全电源等重要回路。

2）计算机监控、双重化继电保护、保安电源等双回路合用同一通道未相互隔离时其中一个回路。

3）油罐区、钢铁厂中可能有熔化金属溅落等易燃场所。

4）其他重要公共建筑设施等需有耐火要求的回路。

（2）耐火电缆用于发电厂等明敷有多根电缆配置中，或位于油管、熔化金属溅落等可能波及场所时，其耐火性应符合现行国家标准《电线电缆燃烧试验方法》的规定，并满足该标准第6部分A类的要求。除上述情况外且为少量电缆配置时，可采用符合该标准第6部分B类要求的耐火电缆。

（3）在油罐区、重要木结构公共建筑、高温场所等其他耐火要求高且敷设安装和经济性能接受的情况，可采用不燃性矿物绝缘电缆。

10.7.3.6 电缆实施耐火防护的要求：

（1）明敷电缆实施耐火防护方式，应符合下列规定：

1）电缆数量较少时，可用防火涂料、包带加于电缆上或把电缆穿于耐火管。

2）同一通道中电缆较多时，宜敷设于耐火槽盒内，且对电力电缆宜用透气型式，在无易燃粉尘的环境可用半封闭式，敷设在桥架上的电缆防护区段不长时，也可采用阻火包。

（2）自容式充油电缆明敷在公用廊道、客运隧洞、桥梁等要求实施防火处理的情况，可采取埋沙敷设。

（3）靠近高压电流、电压互感器等含油设备的电缆沟，宜使该区段沟盖板密封。

（4）在安全性要求较高的电缆密集场所或封闭通道中，应配备适于环境可靠动作的火灾自动探测报警装置。

明敷充油电缆的供油系统，应设有能反映喷油状态的火灾自动报警和闭锁装置。

（5）在地下公共设施的电缆密集部位，多回充油电缆的终端设置处等安全性要求较高的场所，可装设水喷雾灭火等专用消防设施。

10.7.3.7 电缆用防火阻燃材料产品的选用，应符合下列规定：

（1）难燃性材料应符合现行国家标准《建筑材料难燃性试验方法》的规定。

（2）防火涂料、包带应按施加于电缆上的使用特征，符合现行国家标准《电线电缆燃烧试验方法》试验要求的有关规定。

（3）用于阻止延燃的材料产品，除本条（2）项外，应按等效工程使用条件的燃烧试验满足有效自熄性。

（4）用于耐火防护的材料产品，应按等效工程使用条件的燃烧试验满足耐火极限不低于1h的要求，且耐火温度不宜低于1000℃。

（5）用于电力电缆的难燃、耐火槽盒，应确定电缆载流能力或有关参数。

（6）采用的材料产品应适于工程环境，具有耐久可靠性。

10.7.3.8 值得借鉴的问题：

（1）维修问题。过去设计阻火墙有用普通砖砌、在电缆贯通孔洞部位用板结状材料封堵的方式，虽可能满足阻火性，但在运行中更换或增添电缆时，由于不便拆装且常易碰伤其他电缆，也因而往往未及时封堵处理，导致延燃发展的事故。矿棉、岩棉或泡沫石棉块等软质材料构成阻火墙，经多次试验和应用实践，可避免上述缺点。

（2）施工问题。施工隧道中不设防火门辅以防止窜燃措施的好处是，避免因关闭防火门造成正常运行方式下的通风不良，或开启门运行担心一旦发生火灾时自动关闭装置失灵不可靠。

（3）材料问题。设计采用聚氯乙烯等含卤化物材料构成电缆虽有助难燃性提高，但电缆着火时析出卤化氢气体，含有毒性和较浓烟气，危及人的生命，不少电缆火灾事故教训屡有昭示，故对人流云集的场所，采用难燃电缆时还需兼有低烟、低毒性。

（4）充油电缆。充油电缆着火烧损引起燃油流溢，采取埋砂敷设，是一种较妥善对策。我国水电厂尤其在洞内等廊道中的充油电缆，已较普遍地实践。日本在隧道、桥梁上也较广泛地采取埋沙敷设充油电缆，且多以玻璃纤维增强塑料制轻型槽盒内埋沙方式，近年在500kV充油电缆沿8km跨海桥梁上敷设也用此法。

（5）特种电缆。金属管氧化镁等矿物绝缘电缆，简称MI电缆，具有高耐火性和耐高温、防机械力损伤特性。但有造价相对稍贵、又不像通常电缆具有的挠曲性特点。国内外已有较

广泛应用，被认为是可靠的防火电缆。

高压电流、高压互感器包括电容式电压互感器以及耦合电容器，构造上存在易进潮气的弱点。曾多次因进潮导致爆炸溢油、流入近旁电缆沟的燃油使电缆着火。过去在潮湿的隧道中装设报警用探头，常因湿气影响误动而不受欢迎，以致停用。如果缺乏自动报警，就不能及时发觉实施消防灭火，造成事故扩大。防潮型探头、感温报警线可避免上述缺点。

（6）电缆设计的防火措施

1）在有火灾危险的场所，明敷设电缆时穿过墙要有金属套管，如使用塑料管时，应选用难燃自熄型管材。电缆桥架也要用耐燃型或用金属桥架。

2）在有火灾危险或有爆炸危险的场所，采用非密封电缆沟时，应在沟内充砂，使电缆上下各有 20cm 黄砂。

3）在消防、报警、应急照明及直流电源双重化继电保护等重要的公用回路，应急照明电缆和其他电缆一起敷设时，应在电缆上敷设防火涂料，并用耐火隔离板使其保证耐火性能。

4）在电缆竖井穿过楼板的部位应作防火封堵，每三层一封堵。

11

变配电所控制、测量仪表、继电保护及自动装置

11.1 变配电所控制、测量和信号设计

11.1.1 变配电所控制和信号设置原则

（1）变电所内的下列元件应在控制室内控制：

1）主变压器；

2）母线分段、旁路及母联断路器；

3）63～110kV 屋内外配电装置的线路，35kV 屋外配电装置的线路。

6～35kV 屋内外配电装置馈电线路，宜采用就地控制。

（2）有人值班的变电所，宜装设能重复动作、延时自动解除，或手动解除音响的中央事故信号和预告信号装置。驻所值班的变电所，可装设简单的事故信号和能重复动作的预告信号装置。无人值班的变电所，可装设当远动装置停用时转为变电所就地控制的简单的事故信号和预告信号。

断路器的控制回路，应有监视信号。

（3）隔离开关与相应的断路器和接地开关之间，应装设闭锁装置。屋内的配电装置，尚应装设防止误入带电间隔的设施。

闭锁连锁回路的电源，应与继电保护、控制信号回路的电源分开。

11.1.2 断路器的控制、信号回路

断路器的控制、信号回路的设计原则：

（1）控制、信号回路一般分为控制保护回路、合闸回路、事故信号回路、预告信号回路、隔离开关与断路器闭锁回路等。

（2）断路器的控制、信号回路电源取决于操动机构的型式和控制电源的种类。

断路器一般采用电磁或弹簧操动机构。弹簧操动机构的控制电源可用直流也可用交流，电磁操动机构的控制电源要用直流。

（3）断路器的控制、信号回路接线可采用灯光监视方式或音响监视方式。工业企业变配电所一般采用灯光监视的接线方式。

（4）断路器的控制、信号回路的接线要求：

1）应能监视电源保护装置（熔断器或低压断路器）及跳、合闸回路的完整性（在合闸线圈及合闸接触器线圈上不允许并接电阻）；

2）应能指示断路器合闸与跳闸的位置状态，自动合闸或跳闸时应有明显信号；

3）有防止断路器跳跃（简称“防跳”）的闭锁装置；

4）合闸或跳闸完成后应使命令脉冲自动解除；

5）接线应简单可靠，使用电缆芯最少。

（5）当断路器控制电源采用硅整流器带电容储能的直流系统时，对断路器的控制保护回路补充要求如下：

1）为了在故障时减少储能电容器能量的过多消耗，应将回路内的指示灯等常接负荷的正极，即从控制电源 + KM 小母线改接至另外的 + XM 或 + DM 小母线的电源回路；

2）由于上述原因，控制回路正电源的监视应采用其他办法，如重要回路采用合闸位置继电器监视。

（6）断路器的事故跳闸的信号回路，采用不对应原理的接线。当断路器为电磁或弹簧操动时，利用控制开关与操动机构辅助触点构成不对应接线。

（7）各断路器应有事故跳闸信号，事故信号能使中央信号装置发出音响及灯光信号。用灯光（平光或闪光）表示本回路发生事故，并用信号继电器直接指示故障的性质。

（8）断路器的控制、信号回路根据需要可采用闪光信号装置，用以与事故信号和自动装置配合，指示事故跳闸和自动投入的回路。绿灯闪光表示断路器自动跳闸，红灯闪光表示断路器自动合闸（有自动投入装置时，才将红灯接入闪光）。

当断路器的转换开关采用 LW2 型时（此时要求将红灯也接入闪光信号回路），闪光信号还能起到对位作用，转换开关在“预备跳闸”位置时红灯闪光，转换开关在“预备合闸”位置时绿灯闪光。

（9）有可能出现不正常情况的线路和回路，应有预告信号。预告信号应能使中央信号装置发出音响及灯光信号，并用信号继电器直接指示故障性质，发生故障的线路及回路。

11.1.3 中央信号装置

中央信号装置的设计原则：

（1）变、配电所在控制室或值班室内一般设中央信号装置。中央信号装置由事故信号和预告信号组成。

（2）中央事故信号装置应保证在任何断路器事故跳闸时，能瞬时发出音响信号，在控制屏上或配电装置上还应有表示该回路事故跳闸的灯光或其他指示信号。

（3）中央预告信号装置应保证在任何回路发生故障时，能及时发出音响信号，并有显示故障性质和地点的指示信号（灯光或信号继电器）。

（4）中央事故与预告音响信号应有区别。一般事故音响信号用电笛，预告音响信号用电铃。

（5）中央事故与预告信号装置在发出音响信号后，应能手动或自动复归音响，而灯光或指示信号仍应保持，直至处理后故障消除时为止。

（6）中央信号接线应简单、可靠，对其电源熔断器是否熔断应有监视。

（7）企业变、配电所为直流操作并采用灯光监视时，一般设有闪光装置，与断路器的事故信号和自动装置相配合，指示断路器的事故跳闸和自动投入。闪光装置一般装在直流电源屏上。

（8）企业变电所的中央事故与预告信号一般采用重复动作的信号装置。如变电所主接线简单，中央事故信号可采用不重复动作。企业配电所一般采用不重复动作的中央信号装置。

11.1.4 继电保护、自动装置、控制、信号的二次回路

继电保护、自动装置控制信号的二次回路设计原则：

（1）二次回路的工作电压不应超过 500V。

（2）互感器二次回路连接的负荷，不应超过继电保护和自动装置工作准确等级所规定的

负荷范围。

(3) 发电厂和变电所，以及其他重要的或有专门规定的二次回路应采用铜芯控制电缆和绝缘导线。

在绝缘可能受到油侵蚀的地方，应采用耐油的绝缘导线或电缆。

(4) 按机械强度要求，铜芯控制电缆或绝缘导线的芯线最小截面为：强电控制回路，不应小于 $1.5mm^2$；弱电回路，不应小于 $0.5mm^2$。

电缆芯线截面的选择尚应符合下列要求：

1) 电流回路：应使电流互感器的工作准确等级，符合《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》第 2.0.8 的规定。短路电流倍数无可靠数据时，可按断路器的断流容量确定最大短路电流，电缆芯线截面不应小于 $2.5mm^2$。

2) 电压回路：当全部保护装置和安全自动装置动作时（考虑到发展，电压互感器的负荷最大时），电压互感器至保护和自动装置屏的电缆压降不应超过额定电压的 3%。电缆芯线截面不应小于 $1.5mm^2$。

3) 操作回路：在最大负荷下，操作母线至设备的电压降，不应超过额定电压的 10%。

(5) 在安装各种设备、断路器和隔离开关的连锁接点、端子排和接地线时，应能在不断开 3kV 及以上一次线的情况下，保证在二次回路端子排上安全地工作。

(6) 电压互感器的一次侧隔离开关断开后，其二次回路应有防止电压反馈的措施。

(7) 电流互感器的二次回路应在一点接地。一般在配电装置附近经端子排接地。但对于有几组电流互感器连接在一起的保护装置，应在保护屏上经端子排接地。

(8) 电压互感器二次侧中性点或线圈引出端之一应接地。对 110kV 直接接地系统的电压互感器，应设置公共接地点。接地点宜设在控制室内，并应牢固焊接在小母线上。

向交流操作的保护装置和自动装置操作回路供电的电压互感器，应通过击穿保险器接地。采用 B 相直接接地的星形接线的电压互感器，其中性点也应通过击穿保险器接地。

(9) 在电压互感器二次回路中，除开口三角绕组和另有专门规定者外，应装设熔断器或自动开关。

在接地线上不应安装有开断可能的设备，当采用 B 相接地时，熔断器或自动开关应装在线圈引出端与接地点之间。

电压互感器开口三角绕组的试验用引出线上，应装设熔断器或自动开关。

(10) 各独立安装单位二次回路的操作电源，应经过专用的熔断器或自动开关。

在发电厂和变电所中，每一安装单位的保护回路和断路器控制回路，可合用一组单独的熔断器或自动开关。

(11) 发电厂和变电所中重要设备和线路的继电保护和自动装置，应有经常监视操作电源的装置。断路器的跳闸回路、重要设备断路器的合闸回路和装有自动合闸装置的断路器合闸回路，应装设监视回路完整性的监视装置。

(12) 在可能出现操作过电压的二次回路内，应采取降低操作过电压的措施。

(13) 屏和屏上设备的前面和后面，应有必要的标志，以标明其所属安装单位及用途。屏上的设备，在布置上应使各安装单位分开，不允许互相交叉。

(14) 接到端子和设备上的电缆芯和绝缘导线应有标志，并应避免跳合闸回路靠近正电源。

(15) 当采用静态保护，根据保护装置的要求，在二次回路内应采用下列抗干扰措施：

1）在电线敷设时，首先应充分利用自然屏蔽物的屏蔽作用；

2）采用屏蔽电缆，屏蔽层宜在两端接地；

3）强电和弱电回路不宜合用同一根电线；

4）保护用电缆与电力电缆不应同层敷设；

5）保护用电线敷设路径，宜避开高压母线及高频暂态电流的入地点。

11.1.5 二次回路的保护及控制、信号回路的设备选择

11.1.5.1 二次回路的保护设备

二次回路的保护设备用来切除二次回路短路故障，并作为二次回路检修和调试时断开交、直流电源用。保护设备可用熔断器也可采用低压断路器。

（1）控制回路的熔断器配置。

1）同一安装单位的控制、保护和自动装置一般共用熔断器。当一个安装单位内只有一台断路器时，只装设一组熔断器。当一个安装单位有几台断路器时，应分别装设熔断器，此时对公用保护回路是接于电源侧断路器的熔断器上，还是另行装设总的熔断器，应根据主接线的要求来确定。当有总熔断器时，凡属本安装单位的熔断器应接于总熔断器之下，以便监视。

2）当一个安装单位有几台断路器而又无单独运行可能（如双绕组变压器的高、低压侧断路器），或断路器之间有程序控制要求（如电动机的起动断路器与主断路器）等时，其控制回路宜共用一组熔断器。

3）两个及以上安装单位的公用保护和自动装置回路，应装设单独的熔断器。

4）弹簧储能机构所需交、直流操作电源，一般装设单独的熔断器。

控制、保护及自动装置用的熔断器均应加以监视，一般用断路器控制回路的监视装置来完成。对装有单独熔断器的回路，宜采用继电器进行监视，其信号应接至另外的电源。

（2）信号回路的熔断器配置：

1）每个安装单位的信号回路（包括隔离开关的位置信号、事故和预告信号、指挥信号等），宜用一组熔断器。

2）公用的信号回路（如中央信号等），应装设单独的熔断器。

3）厂（所）用电源及母线设备信号回路，宜分别装设公用的熔断器。

4）闪光小母线的分支线上，不宜装设熔断器。

信号回路的熔断器均应加以监视，可用隔离开关的位置指示器，也可用继电器或信号灯来监视。

（3）电压互感器回路的保护设备配置：

1）电压互感器回路中，除开口三角形绕组和另有专门规定者外，应在其出口处装设熔断器或低压断路器。当电压回路发生故障可能使保护和自动装置发生误动或拒动时，宜装设低压断路器。

2）电压互感器二次侧中性点引出线上，不宜安装熔断器或低压断路器。当采用 B 相接地方式时，B 相熔断器或低压断路器应装在电压互感器绕组引出端与接地点之间。

3）电压互感器开口三角绕组的试验芯上，应装设熔断器或低压断路器。

（4）二次回路熔断器电流的选择：熔断器应按二次回路最大负荷电流选择，并应满足选择性的要求。干线上的熔断器熔体的额定电流应比支线上的熔断器大 2～3 级。

二次回路电压为 110～220V 时，二次回路熔断器熔体额定电流的选择见表 11－1。

表 11－1　二次回路电压为 110～220V 时熔断器熔体额定电流及低压断路器脱扣器额定电流的选择

回路名称	熔断器熔体额定电流（A）	低压断路器电磁脱扣器额定电流（A）	回路名称	熔断器熔体额定电流（A）	低压断路器电磁脱扣器额定电流（A）
断路器的控制保护回路	4～6	2	电压干线的总保护	4～6（10～15）	
隔离开关与断路器闭锁回路	4～6		成组低压保护的控制回路	4～6	
中央信号装置	4～6				

注　括号中的数值用于变电所的交流操作（利用电压互感器作为交流操作电源）。

（5）电压互感器二次侧熔断器选择：

1）熔断器的熔体必须保证在二次电压回路内发生短路时，熔体熔断的时间小于保护装置的动作时间。

2）熔断器的电流应满足下列条件：

a. 熔体的额定电流应大于二次电压回路的最大负荷电流（在母线分段情况下，应考虑一组母线运行时所有电压回路的负荷全部切换至一组电压互感器上），即

$$I_n = K_{rel} I_{L.max} \quad A \tag{11-1}$$

式中　I_n——熔体额定电流，A；

$I_{L.max}$——二次电压回路最大负荷电流，A；

K_{rel}——可靠系数，取 1.5。

b. 当电压互感器二次侧短路时，不致引起保护的动作，此数值最好由试验确定。

（6）电压互感器二次侧低压断路器的选择。低压断路器瞬时脱扣器的动作电流应满足下列条件：

1）低压断路器瞬时脱扣器的动作，应按大于电压互感器二次回路的最大负荷电流来整定

$$I_{op} = K_{rel} I_{L.max} \tag{11-2}$$

式中　I_{op}——低压断路器的动作电流，A；

$I_{L.max}$——二次电压回路最大负荷电流，A；

K_{rel}——可靠系数，取 1.5～2。

2）当电压互感器运行电压为 90% 额定电压时，二次电压回路末端两相经过渡电阻短路，而加于继电器线圈上的电压低于 70% 额定电压时（相当于低电压元件的动作值），低压断路器应瞬时动作。动作电流 I_{op} 的关系式如下

$$U_{g.min} - K_{rel} I_{op} R_2 = 0.7 U_{2n} \quad V \tag{11-3}$$

式中　$U_{g.min}$——最小工作电压，取 $0.9U_{2n}$，V；

K_{rel}——可靠系数，取 1.3；

I_{op}——低压断路器的动作电流，A；

R_2——两相短路时的环路电阻，Ω；

U_{2n}——电压互感器二次额定电压，V。

经简化后

$$I_{op} = \frac{0.2 U_{2n}}{K_{rel} R_2} = \frac{15}{R_2} \tag{11-4}$$

3）瞬时电流脱扣器断开短路电流的时间应不大于0.02s。

4）瞬时电流脱扣器的灵敏系数 K_{sen}，应按电压回路末端发生两相金属性短路时的最小短路电流来校验

$$K_{sen}=\frac{I_{2k.min}}{I_{op}} \tag{11-5}$$

式中 $I_{2k.min}$——二次电压回路末端发生两相短路时的最小短路电流，A；

K_{sen}——灵敏系数，取≥2。

（7）二次回路低压断路器脱扣器额定电流的选择。二次回路电压为110～120V时，二次回路低压断路器脱扣器额定电流的选择见表11－1。

11.1.5.2 转换开关的选择

转换开关应按需要的触点数量、控制接线（触点闭合图表）、操作的频繁程度、回路的额定电压、额定电流和分断电流来选择。

11.1.5.3 灯光监视中的信号灯及附加电阻的选择

（1）当灯泡引出线短路时，通过跳、合闸回路的电流应小于其最小动作电流及长期热稳定电流，可按不大于线圈的额定电流的10%来选择。

（2）当直流母线电压为其95%额定电压时，加在灯泡上的电压应为其额定电压的60%～70%。

实际上工厂生产带附加电阻的信号灯，只需按信号灯的额定电压来选择。常用的信号灯及其附加电阻的技术数据见“配电手册”表8－17。

11.1.5.4 中间继电器的选择

（1）跳、合闸位置继电器的选择：

1）在正常情况下，通过跳、合闸回路的电流应小于其最小动作电流及长期热稳定电流。

2）当控制回路电压为85%额定电压时，加于继电器的电压不小于其额定电压的70%。

（2）电气“防跳”继电器的选择：

1）电流起动的防跳继电器，其电流线圈额定电流的选择应与断路器跳闸线圈的额定电流相配合，并保证动作的灵敏系数不小于1.5。

2）电压线圈的额定电压按控制回路额定电压来选择。

3）当跳闸回路并联有出口信号继电器时，在跳闸回路内应增加附加电阻。

11.1.5.5 串接信号继电器及附加电阻的选择

（1）在额定直流电压下，信号继电器动作的灵敏系数不宜小于1.4。

（2）在80%额定直流电压下，由于串接信号继电器而引起回路的电压降应不大于额定电压的10%。

（3）选择中间继电器的并联电阻时，应使保护继电器触点断开容量不大于其允许值。

（4）应满足信号继电器的热稳定要求。

11.1.5.6 其他继电器的选择

（1）自动重合闸继电器及其出口信号继电器额定电流的选择，应与其起动元件动作电流相配合，并保证动作的灵敏系数不小于1.5。

（2）重瓦斯保护回路并联信号继电器或附加电阻的选择：

1）并联信号继电器应根据直流额定电压来选择。

2）当用附加电阻代替并联信号继电器时，选择附加电阻应满足11.3.5.5条第（1）、

(3)、(4) 项要求。

(3) 选择断路器的合闸或跳闸继电器的电流线圈额定电流，应与断路器的合闸或跳闸线圈的额定电流相配合，并保证动作的灵敏系数不小于 1.5。

11.1.6 变配电所电气测量及电能计量设计要求

11.1.6.1 一般规定

(1) 常用测量仪表应符合下列要求：

1) 能正确反映电力装置的运行参数；

2) 能随时监测电力装置回路的绝缘状况。

(2) 常用测量仪表的精确度等级，应按下列要求选择：

1) 除谐波测量仪表外，交流回路仪表的精确度等级，不应低于 2.5 级；

2) 直流回路仪表的精确度等级，不应低于 1.5 级；

3) 电量变送器输出侧仪表的精确度，不应低于 1.0 级。

(3) 常用测量仪表配用的互感器精确度等级，应按下列要求选择：

1) 1.5 级及 2.5 级的常用测量仪表，应配用不低于 1.0 级的电流互感器；

2) 电量变送器应配用不低于 0.5 级的电流互感器。

(4) 直流电流表配用外附分流器的精确度等级，不应低于 0.5 级。

(5) 电量变送器的精确度等级，不应低于 0.5 级。

(6) 仪表的测量范围和电流互感器变比的选择，宜满足当电力装置回路以额定值的条件运行时，仪表的指示在标度尺的 70% ~ 100% 处。

对有可能过负荷运行的电力装置回路，仪表的测量范围，宜留有适当的过负荷裕度。对重载起动的电动机和运行中有可能出现短时冲击电流的电力装置回路，宜采用具有过负荷标度尺的电流表。

对有可能双向运行的电力装置回路，应采用具有双向标度尺的仪表。

(7) 对多个同类型电力装置回路参数的测量，宜采用以电量变送器组成的选测系统。

选测参数的种类及数量，可根据生产工艺和运行监测的需要确定。

11.1.6.2 电流测量

(1) 下列电力装置回路，应测量交流电流：

1) 发电机；

2) 高压侧为 35kV 及以上，低压侧为 1200V 及以上的主变压器，其中：双绕组主变压器只测量一侧，三绕组主变压器测量各侧；

3) 并联电力电容器组；

4) 1200V 及以上的线路和 1200V 以下的供电、配电、用电网络的总干线路；

5) 母线联络、母线分段、旁路和桥断路器回路；

6) 消弧线圈；

7) 55kW 及以上的电动机；

8) 根据生产工艺的要求，需监测交流电流的其他电力装置回路。

(2) 下列电力装置回路，宜测量或记录负序电流：

1) 向三相负荷显著不平衡的电力用户供电，在运行中有可能超过制造厂规定所允许的长时承受负序电流能力的发电机；

2) 电力系统中和电力用户处的负序电流监测点。

(3) 三相电流基本平衡的电力装置回路，可采用一只电流表测量其一相电流。但在下列电力装置回路，应采用三只电流表分别测量三相电流：

1) 汽轮发电机和 380V 的水轮发电机；

2) 并联电力电容器组的总回路；

3) 110kV 重要的线路；

4) 三相负荷不平衡率大于 10%的 1200V 及以上的电力用户线路；

5) 三相负荷不平衡率大于 15%的 1200V 以下的供电线路。

(4) 下列电力装置回路，应测量直流电流：

1) 直流发电机；

2) 直流电动机；

3) 蓄电池组；

4) 充电回路；

5) 电力整流装置；

6) 发电机、除无刷励磁外的同步电动机励磁回路以及自动调整励磁装置的输出回路；

7) 根据生产工艺的要求，需监测直流电流的其他电力装置回路。

11.1.6.3 电压测量和绝缘监测

(1) 下列电力装置回路，应测量交流电压：

1) 发电机；

2) 交流系统的各段母线；

3) 根据生产工艺的要求，需监测交流电压的其他电力装置回路。

(2) 下列电力装置回路，应测量直流电压：

1) 直流发电机；

2) 直流系统的各段母线；

3) 蓄电池组；

4) 充电回路；

5) 电力整流装置；

6) 发电机的励磁回路；

7) 根据生产工艺的要求，需监测直流电压的其他电力装置回路。

(3) 下列电力装置回路，应监测交流系统的绝缘：

1) 发电机；

2) 中性点非有效接地系统的各段母线。

(4) 下列电力装置回路，应监测直流系统的绝缘：

1) 发电机的励磁回路；

2) 直流系统的各段母线。

11.1.6.4 有功、无功功率测量

(1) 下列电力装置回路，应测量有功功率：

1) 发电机；

2) 高压侧为 35kV 及以上，低压侧为 1200V 及以上的主变压器，其中，双绕组主变压器只测量一侧，三绕组主变压器测量两侧；

3) 35kV 及以上的线路；

4）专用旁路和兼用旁路的断路器回路；

5）35kV 及以上的永久性外桥断路器回路；

6）根据生产工艺的要求，需监测有功功率的其他电力装置回路。

（2）下列电力装置回路，应测量无功功率：

1）发电机；

2）高压侧为 35kV 及以上，低压侧为 1200V 及以上的主变压器，其中，双绕组主变压器只测量一侧，三绕组主变压器测量两侧；

3）1200V 及以上的并联电力电容器组；

4）35kV 以上的线路；

5）35kV 以上的专用旁路和兼用旁路的断路器回路；

6）35kV 以上的永久性外桥断路器回路；

7）根据生产工艺的要求，需监测有功功率的其他电力装置回路。

（3）同步电动机应装设功率因数表。

11.1.6.5　频率测量

下列电力装置回路，应设置频率监测点：

（1）发电机；

（2）接有发电机和发电机变压器的各段母线；

（3）变电所中，有可能解列运行的各段母线；

11.1.6.6　电能计量

（1）下列电力装置回路，应装设有功电度表：

1）发电机。

2）主变压器。对需考核母线有功电量平衡的主变压器各侧，均应装设有功电度表；对不需考核母线有功电量平衡的主变压器，其中三绕组主变压器应装设两侧，双绕组主变压器应只装设一侧。

3）电力系统中，1200V ~ 110kV 的线路。

4）1200V 以下，供电、配电、用电网络的总干线路。

5）电力用户处的有功电量计量点。

6）专用旁路和兼用旁路的断路器回路。

7）需进行技术经济考核的 75kW 及以上的电动机。

8）根据技术经济考核和节能管理的要求，需计量有功电量的其他电力装置回路。

（2）下列电力装置回路，应装设无功电度表：

1）发电机。

2）主变压器。对三绕组主变压器，应装设两侧。对双绕组主变压器，应只装设一侧。

3）电力系统中，3 ~ 110kV 的线路。

4）并联电力电容器组。

5）电力用户处的无功电量计量点。

6）专用旁路和兼用旁路的断路器回路。

7）根据技术经济考核和节能管理的要求，需计量无功电量的其他电力装置回路。

（3）专用电能计量仪表的设置，应按供用电管理部门对电力用户不同计费方式的规定确定。

（4）电力用户处的电能计量装置，宜采用全国统一标准的电能计量柜。

(5) 装设在63kV及以上的电能计量点的计费电度表，应使用互感器的专用二次回路；装设在63kV以下的电力用户处电能计量点的计费电度表，应设置专用的互感器。

(6) 电能计量用电流互感器的二次侧电流，当电力装置回路以额定值的条件运行时，宜为电度表标定电流的70%～100%。

(7) 双向送、受电的电力装置回路，应分别计量送、受电的电量。当以两只电度表分别计量送、受电量时，应采用有止逆器的电度表。

(8) 有功电度表的精确度等级，应按下列要求选择：

1) 月平均用电量1×10^6kWh及以上的电力用户电能计量点，应采用0.5级的有功电度表。

2) 下列电力装置回路，应采用1.0级的有功电度表：

a. 发电机；

b. 主变压器；

c. 需考核有功电量平衡的送配电线路；

d. 火力发电厂中，厂用电的总计量点；

e. 月平均用电量小于1×10^6kWh，在315kVA及以上的变压器高压侧计费的电力用户电能计量点。

3) 下列电力装置回路，应采用2.0级的有功电度表：

a. 在315kVA以下的变压器低压侧计费的电力用户电能计量点；

b.75kW及以上的电动机；

c. 仅作为企业内部技术经济考核而不计费的线路和电力装置回路。

(9) 无功电度表的精确度等级，应按下列要求选择：

1) 下列电力装置回路，应采用2.0级的无功电度表：

a. 发电机；

b. 主变压器；

c. 并联电力电容器组；

d. 在315kVA及以上的变压器高压侧计费的电力用户电能计量点；

e. 电力系统中，需考核技术经济指标的送配电线路。

2) 下列电力装置回路，应采用3.0级的无功电度表：

a. 在315kVA以下的变压器低压侧计费的电力用户能量计量点；

b. 仅作为企业内部技术经济考核而不计费的电力用户电能计量点。

(10) 专用电能计量仪表的精确度等级的选择，应按其计量的对象分别采用与其相应的普通电度表相同的精确度等级。

(11) 电能计量用互感器的精确度等级，应按下列要求选择：

1) 0.5级的有功电度表和0.5级的专用电能计量仪表，应配用0.2级的互感器。

2) 1.0级的有功电度表、1.0级的专用电能计量仪表、2.0级计费用的有功电度表及2.0级的无功电度表，应配用不低于0.5级的互感器。

3) 仅作为企业内部技术经济考核而不计费的2.0级有功电度表及3.0级的无功电度表，宜配用不低于1.0级的互感器。

11.1.6.7 仪表安装

(1) 仪表的安装设计，应符合运行监测、现场调试的要求和仪表正常工作的条件。

(2) 仪表水平中心线距地面尺寸，应符合下列要求：

1）指示仪表和数字仪表，宜装在0.8～2.0m的高度；

2）电能计量仪表和记录仪表，宜装在0.6～1.8m的高度。

11.2 电气设备继电保护配置、整定计算和设备选型的原则

11.2.1 一般规定

（1）电力网中的电力设备和线路，应装设反应短路故障和异常运行的继电保护和自动装置。继电保护和自动装置应能尽快地切除短路故障和恢复供电。

（2）电力设备和线路应有主保护、后备保护和异常运行保护，必要时可增设辅助保护。

（3）继电保护和自动装置应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求，并应符合下列规定：

1）继电保护和自动装置应简单可靠，使用的元件和接点应尽量少，接线回路简单，运行维护方便，在能够满足要求的前提下宜采用最简单的保护。

2）对相邻设备和线路有配合要求的保护，前后两级之间的灵敏性和动作时间应相互配合。

3）当被保护设备或线路范围内发生故障时，应具有必要的灵敏系数。

4）保护装置应能尽快地切除短路故障。当需要加速切除短路故障时，可允许保护装置无选择性地动作，但应利用自动重合闸或备用电源自动投入装置，缩小停电范围。

（4）保护装置的灵敏系数，应根据不利正常运行方式和不利故障类型进行计算，必要时，应计及短路电流衰减的影响。各类继电保护的最小灵敏系数，应符合表11－2的要求。

表11－2　　继电保护的最小灵敏系数

保护分类	保护类型	组成元件	计算条件	最小灵敏系数
主保护	带方向的电流保护或电压保护	零序负序方向元件	按被保护区末端金属性短路计算	2
	发电机、变压器、线路及电动机纵联差动保护	差电流元件	按被保护区末端金属性短路计算	2
	平行线路横差方向和电流平衡保护	电流或电压起动元件	线路两侧均未断开前，其中一侧保护按线路中点金属性短路计算	2
	母线完全差动保护	差电流元件	按金属性短路计算	2
	距离保护	距离起动元件	按被保护区末端金属性短路计算	1.5
		距离测量元件		1.3
	电流保护和电压保护	电流元件和电压元件	按被保护区末端金属性短路计算	1.5
	母线不完全差动保护	差电流元件	按金属性短路计算	1.5
	平行线路横差方向和电流平衡保护	电流元件	线路自一侧断开后，按另一侧对端金属性短路计算	1.5
主保护的个别元件	中性点非直接接地保护	电流元件	按被保护区末端金属性短路计算	1.5
	距离保护	负序和零序增量（或实变量）起动元件	按被保护区末端金属性短路计算	4
	平行线路横差方向保护	零序方向元件	线路两侧均未断开前，其中一侧保护按线路中间金属性短路计算	4
			线路一侧断开后，另一侧保护按对侧金属性短路计算	2.5
后备保护	电流保护和电压保护	电流元件、电压元件	按相邻电力设备和线路末端金属性短路计算	1.2

(5) 装有管型避雷器的线路，保护装置的动作时间不应大于0.08s；保护装置起动元件的返回时间不应小于0.02s。

(6) 在正常运行情况下，当电压互感器二次回路断线或其他故障能使保护装置误动作时，应装设断线闭锁装置；当保护装置不致误动作时，应装设电压回路断线信号装置。

(7) 在保护装置内应设置由信号继电器或其他元件等构成的指示信号。指示信号应符合下列要求：

1) 在直流电压消失时不自动复归，或在直流恢复时仍能维持原动作状态。

2) 能分别显示各保护装置的动作情况。

3) 对复杂保护装置，能分别显示各部分及各段的动作情况。根据装置具体情况，可设置能反应装置内部异常的信号。

(8) 保护装置采用的电流互感器及中间电流互感器的稳态比误差，不应大于10%对35kV及以下的线路和设备，当技术上难以满足要求且不致使保护装置误动作时，可允许有较大的误差。

11.2.2 6～35kV变压器的保护

11.2.2.1 电力变压器的保护要求

(1) 对电力变压器的下列故障及异常运行方式，应装设相应的保护装置：

1) 绕组及其引出线的相间短路和在中性点直接接地侧的单相接地短路；

2) 绕组的匝间短路；

3) 外部相间短路引起的过电流；

4) 中性点直接接地电力网中外部接地短路引起的过电流及中性点过电压；

5) 过负荷；

6) 油面降低；

7) 变压器温度升高或油箱压力升高或冷却系统故障。

(2) 0.8MVA及以上的油浸式变压器和0.4MVA及以上的车间内油浸式变压器，均应装设瓦斯保护。当壳内故障产生轻微瓦斯或油面下降时，应瞬时动作于信号；当产生大量瓦斯时，应动作于断开变压器各侧断路器。当变压器安装处电源侧无断路器或短路开关时，可作用于信号。

(3) 对变压器引出线、套管及内部的短路故障，应装设相应的保护装置，并应符合下列规定：

1) 10MVA及以上的单独运行变压器和6.3MVA及以上的并列运行变压器，应装设纵联差动保护。6.3MVA及以下单独运行的重要变压器，亦可装设纵联差动保护。

2) 10MVA以下的变压器可装设电流速断保护和过电流保护。2MVA及以上的变压器，当电流速断灵敏系数不符合要求时，宜装设纵联差动保护。

3) 0.4MVA及以上，一次电压为10kV及以下，线圈为三角—星形连接的变压器，可采用两相三继电器式的过流保护。

4) 本条规定的各项保护装置，应动作于断开变压器的各侧断路器。

(4) 变压器的纵联差动保护应符合下列要求：

1) 应能躲过励磁涌流和外部短路产生的不平衡电流。

2) 差动保护范围应包括变压器套管及其引出线。如不能包括引出线时，应采取快

速切除故障的辅助措施。但在63kV或110kV电压等级的终端变电所和分支变电所，以及具有旁路母线的电气主接线，在变压器断路器退出工作由旁路断路器代替时，纵联差动保护可利用变压器套管内的电流互感器，引出线可不再采取快速切除故障的辅助措施。

(5) 对由外部相间短路引起的变压器过电流，应装设相应的保护装置。保护装置动作后，应带时限动作于跳闸，并应符合下列规定：

1) 过电流保护宜用于降压变压器。

2) 复合电压起动的过电流保护或低电压闭锁的过电流保护，宜用于升压变压器、系统联络变压器和过电流不符合灵敏性要求的降压变压器。

(6) 外部相间短路保护应符合下列规定：

1) 双绕组变压器，应装于主电源侧。根据主接线情况，保护装置可带一段或两段时限，以较短的时限动作于缩小故障影响范围，以较长的时限动作于断开变压器各侧断路器。

2) 三绕组变压器，宜装于主电源侧及主负荷侧。主电源侧的保护应带两段时限，以较短的时限断开未装保护侧的断路器。当不符合灵敏性要求时，可在所有各侧装设保护装置。各侧保护装置应根据选择性的要求装设方向元件。

(7) 三绕组变压器的外部相间短路保护，可按下列原则进行简化：

1) 除主电源侧外，其他各侧保护可仅作本侧相邻电力设备和线路的后备保护；

2) 保护装置作为本侧相邻电力设备和线路保护的后备时，灵敏系数可适当降低，但对本侧母线上的各类短路应符合灵敏性要求。

(8) 高压侧为单电源，低压侧无电源的降压变压器，不宜装设专门的零序保护。

(9) 0.4MVA及以上，绕组为星形—星形连接低压侧中性点直接接地的变压器，对低压侧单相接地短路应选择下列保护方式，保护装置应带时限动作于跳闸。

1) 利用高压侧的过电流保护时，保护装置宜采用三相式。

2) 接于低压侧中性线上的零序电流保护。

3) 接于低压侧的三相电流保护。

(10) 0.4MVA及以上，一次电压为10kV及以下，绕组为三角—星形连接，低压侧中性点直接接地的变压器，对低压侧单相接地短路，当灵敏性符合要求时，可利用高压侧的过电流保护。

保护装置带时限动作于跳闸。

(11) 0.4MVA及以上变压器，当数台并列运行或单独运行并作为其他负荷的备用电源时，应根据可能过负荷的情况装设过负荷保护。对三绕组变压器，保护装置应能反应各侧过负荷的情况。

过负荷保护采用单相式，带时限动作于信号。在无经常值班人员的变电所，过负荷保护可动作于跳闸或断开部分负荷。

(12) 对变压器温度升高和冷却系统故障，应按现行电力变压器标准的要求，装设可作用于信号或动作于跳闸的装置。

11.2.2.2　6～35kV变压器的保护配置

电力变压器的继电保护配置见表11－3。

表 11－3　　电力变压器的继电保护配置

变压器容量（kVA）	保护装置名称							备注
	带时限的①过电流保护	电流速断保护	纵联差动保护	单相低压侧接地保护②	过负荷保护	瓦斯保护	温度保护	
<400	—	—	—	—	—	≥315kVA的车间内油浸变压器装设	—	一般用高压熔断器保护
400～630	高压侧采用断路器时装设	高压侧采用断路器且过电流保护时限 > 0.5s时装设	—	装设	并联运行的变压器装设，作为其他备用电源的变压器根据过负荷的可能性装设③	车间内变压器装设	—	一般采用GL型继电器兼作过电流及电流速断保护
800			—			装设	—	
1000～1600	装设	过电流保护时限 > 0.5s时装设	—				装设	
2000～5000			当电流速断保护不能满足灵敏性要求时装设	—				
6300～8000		单独运行的变压器或负荷不太重要的变压器装设	并列运行的变压器或重要变压器或当电流速断保护不能满足灵敏性要求时装设	—				≥5000kVA的单相变压器宜装设远距离测温装置 ≥8000kVA的三相变压器宜装设远距离测温装置
≥10000	装设	—	装设	—		装设	装设	

①当带时限的过电流保护不能满足灵敏性要求时，应采用低电压闭锁的带时限过电流保护。

②当利用高压侧过电流保护及低压侧出线断路器保护不能满足灵敏性要求时，应装设变压器中性线上的零序过电流保护。

③低压电压为230/400V的变压器，当低压侧出线断路器带有过负荷保护时，可以装设专用的过负荷保护。

11.2.2.3　6～35kV变压器保护的整定计算

电力变压器的各种整定计算见表11－4。

表 11－4　　电力变压器的电流保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电流保护	保护装置的动作电流（应躲过可能出现的过负荷电流） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{K_{ol}I_{1nT}}{K_r n_1}$ A 保护装置的灵敏系数［按电力系统最小运行方式下，低压侧两相短路时流过高压侧（保护安装处）的短路电流①校验］ $K_{sen}=\frac{I_{2k2.min}}{I_{op}}\geqslant 1.5$ 保护装置的动作时限（应与下一级保护动作时限相配合），一般取 0.5～0.7s	K_{rel}——可靠系数，用于过电流保护时 DL 型和 GL 型继电器分别取 1.2 和 1.3，用于电流速断保护时分别取 1.3 和 1.5，用于低压侧单相接地保护时（在变压器中性线上装设的）取 1.2，用于过负荷保护时取 1.05～1.1； K_c——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取$\sqrt{3}$； K_r——继电器返回系数，取 0.85； K_{ol}——过负荷系数②，包括电动机自起动引起的过电流倍数，一般取 2～3，当无自起动电动机时取 1.3～1.5； n_1——电流互感器变比； I_{1nT}——变压器高压侧额定电流，A； $I_{2k2.min}$——最小运行方式下变压器低压侧两相短路时流过高压侧（保护安装处）的稳态短路电流 A； I_{op}——保护装置一次动作电流　A，$I_{op}=I_{opK}\frac{n_1}{K_c}$；
电流速断保护	保护装置的动作电流（应躲过低压侧短路时，流过保护装置的最大短路电流） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I''_{2k3.max}}{n_1}$ A 保护装置的灵敏系数（按系统最小运行方式下，保护装置安装处两相短路电流校验） $K_{sen}=\frac{I''_{1k2.min}}{I_{op}}\geqslant 2$	$I''_{2k3.max}$——最大运行方式下变压器低压侧三相短路时，流过高压侧（保护安装处）的超瞬变电流，A； $I''_{1k2.min}$——最小运行方式下保护装置安装处两相短路超瞬变电流③，A； $I_{2k1.min}$——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地短路时，流过高压侧（保护安装处）的稳态电流，A； （△/Y_0）　$I_{2k1.min}=\frac{\sqrt{3}}{3}I_{22k1.min}/n_T$ （Y/Y_0）　$I_{2k1.min}=\frac{2}{3}I_{22k1.min}/n_T$ $I_{22k1.min}$——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流，A； n_T——变压器变比； K_{ph}——配合系数，取 1.1； $I_{op.brs}$——低压分支线上零序保护的动作电流，A； I_{2nT}——变压器低压侧额定电流；
低压侧单相接地保护（利用高压侧三相式过电流保护）	保护装置的动作电流和动作时限与过电流保护相同。 保护装置的灵敏系数［按最小运行方式下，低压侧母线或母干线末端单相接地时，流过高压侧（保护安装处）的短路电流①校验］ $K_{sen}=\frac{I_{2k1.min}}{I_{op}}\geqslant 1.5$	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
低压侧单相接地保护④。（采用在低压侧中性线上装设专用的零序保护）	保护装置的动作电流（应躲过正常运行时，变压器中性线上流过的最大不平衡电流，其值按国家标准 GB1094.1～5《电力变压器》规定，不超过额定电流的 25%） $I_{opK}=K_{rel}\frac{0.25I_{2nT}}{n_1}$ A 保护装置的动作电流尚应与低压出线上的零序保护相配合 $I_{opK}=K_{ph}\frac{I_{op.brs}}{n_1}$ A 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流校验） $K_{sen}=\frac{I_{2k1.min}}{I_{op}}>1.5$ 保护装置的动作时限一般取 0.5s	
过负荷保护	保护装置的动作电流（应躲过变压器额定电流） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I_{1nT}}{K_r n_1}$ A 保护装置的动作时限（应躲过允许的短时工作过负荷时间，如电动机起动或自起动的时间）一般定时限取 9～15s	
低电压起动的带时限过电流保护	保护装置的动作电流（应躲过变压器额定电流） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I_{1nT}}{K_r n_1}$ A 保护装置的动作电压 $U_{opK}=\frac{U_{min}}{K_{rel}K_r n_{TV}}$ V 保护装置的灵敏系数（电流部分）与过电流保护相同。保护装置的灵敏系数（电压部分） $K_{sen}=\frac{U_{op}}{U_{sh.max}}=\frac{U_{opK}n_{TV}}{U_{sh.max}}$ 保护装置动作时限与过电流保护相同	K_{rel}——可靠系数，取 1.2； K_r——继电器返回系数，取 1.15； n_{TV}——电压互感器变比； U_{min}——运行中可能出现的最低工作电压（如电力系统电压降低，大容量电动机起动及电动机自起动时引起的电压降低），一般取 0.5～0.7U_{nT}（变压器高压侧母线额定电压）； $U_{sh.max}$——保护安装处的最大剩余电压，V； U_{op}——保护装置一次动作电压，V

①Y，d11、Y，yn0、D，yn0 接线变压器高压侧的短路电流分布，见“配电手册”。

②带有自起动电动机的变压器，其过负荷系数按电动机的自起动电流确定。当电源侧装设自动重合闸或备用电源自动投入装置时，可近似地用下式计算

$$K_{ol}=\frac{1}{u_k+\frac{S_{nT}}{K_{st}S_{M\Sigma}}\times\left(\frac{380}{400}\right)^2}$$

式中 u_k——变压器的阻抗电压相对值；

S_{nT}——变压器的额定容量，kVA；

$S_{M\Sigma}$——需要自起动的全部电动机的总容量，kVA；

K_{st}——电动机的起动电流倍数，一般取 5。

③两相短路超瞬变电流 I''_{k2}等于三相短路超瞬变电流 I''_{k3}的 0.866 倍。

④Y，yn0 接线变压器采用在低压侧中性线上装设专用零序互感器的低压侧单相接地保护，而 D，yn11 接线变压器可不装设。

11.2.3 6～10kV 电力电容器的保护

11.2.3.1 电力电容器的保护要求

(1) 对 3kV 及以上的并联补偿电容器组的下列故障及异常运行方式,应装设相应的保护装置:

1) 电容器内部故障及其引出线短路;

2) 电容器组和断路器之间连接线短路;

3) 电容器组中某一故障电容器切除后所引起的过电压;

4) 电容器组的单相接地;

5) 电容器组过电压;

6) 所连接的母线失压。

(2) 并联补偿电容器组应按下列规定装设保护装置:

1) 对电容器组和断路器之间连接线的短路,可装设带有短时限的电流速断和过电流保护,动作于跳闸。速断保护的动作电流,应按最小运行方式下,电容器端部引线发生两相短路时,有足够灵敏系数整定。过电流保护装置的动作电流,应按躲过电容器组长期允许的最大工作电流整定。

2) 对电容器内部故障及其引出线的短路,宜对每台电容器分别装设专用的熔断器。熔丝的额定电流可为电容器额定电流的 1.5～2.0 倍。

3) 当电容器组中故障电容器切除到一定数量,引起电容器端电压超过 110%额定电压时,保护应将整组电容器断开。对不同接线的电容器组,可采用下列保护之一:

a. 单星形接线的电容器组可采用中性线对地电压不平衡保护。

b. 多段串联单星形接线的电容器组,也可采用段间电压差动或桥式差电流保护。

c. 双星形接线的电容器组,可采用中性线不平衡电压或不平衡电流保护。

4) 电容器组单相接地故障,可利用电容器组所连接母线上的绝缘监察装置进行检出:

当电容器组所连接母线有引出线路时,可按 GB50062—1992《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》第 5.0.5 条二款规定装设保护,但安装在绝缘支架上的电容器组,可不再装设单相接地保护。

5) 对电容器组的过电压应装设过电压保护,带时限动作于信号或跳闸。

6) 对母线失压应装设低电压保护,带时限动作于信号或跳闸。

(3) 对于电网中出现的高次谐波有可能导致电容器过负荷时,电容器组宜装设过负荷保护,带时限动作于信号或跳闸。

11.2.3.2 6～10kV 电力电容器的保护配置

6～10kV 电力电容器的继电保护配置见表 11－5。

表 11－5　　6～10kV 电力电容器的继电保护配置

被保护设备	保护装置名称									备注
	带有短延时的速断保护	过电流保护	过负荷保护	横差保护	中性线不平衡电流保护	开口三角电压保护	过电压保护	低电压保护	单相接地保护	
电容器组	装设	装设	宜装设	对电容器内部故障及其引出线短路采用专用的熔断器保护时，可不装设			当电压可能超过110%额定值时，宜装设	宜装设	电容器与支架绝缘时可不装设	当电容器组的容量在 400kvar 以内时，可以用带熔断器的负荷开关进行保护

11.2.3.3 6～10kV 电力电容器继电保护的整定计算

6～10kV 电力电容器继电保护的整定计算见表 11－6。

表 11－6　　6～10kV 电力电容器组的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符　号　说　明
带有短延时的速断保护	保护装置的动作电流（应按电容器组端部引线发生两相短路时，保护的灵敏系数应符合要求整定） $I_{opK} \leqslant \frac{I''_{k2.min}}{2n_1} K_c$ 保护装置的动作时限应大于电容器组合闸涌流时间，0.2s 以上	K_c——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取$\sqrt{3}$； n_1——电流互感器变比； $I''_{k2.min}$——最小运行方式下，电容器组端部两相短路时，流过保护安装处的超瞬变电流①，A； K_{rel}——可靠系数，取 1.2； K_r——继电器返回系数，取 0.85； K_{ol}——过负荷系数，取 1.3； I_{nC}——电容器组额定电流，A； K_{sen}——保护装置的灵敏系数。 I_{op}——保护装置一次动作电流，A； $I_{op} = I_{opK} \frac{n_1}{K_c}$ I_{unb}——最大不平衡电流，A，由测试决定； Q_n——单台电容器额定容量，kvar； β_c——单台电容器击穿相对数，取 0.5～0.75； U_{nC}——电容器额定电压，kV
过电流保护	保护装置的动作电流（应按大于电容器组允许的长期最大过电流整定） $I_{opK} = K_{rel} K_c \frac{K_{ol} I_{nC}}{K_r n_1}$ 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下电容器组端部两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验） $K_{sen} = \frac{I''_{k2.min}}{I_{op}} \geqslant 1.5$ 保护装置的动作时限应较电容器组短延时速断保护的时限大一个时限阶段，一般大 0.5～0.7s	
过负荷保护	保护装置的动作电流（应按电容器组负荷电流整定） $I_{opK} = K_{rel} K_c \frac{I_{nC}}{K_r n_1}$ 保护装置的动作时限应较过电流保护大一时限阶段，一般大 0.5s	
横联差动保护（双三角形接线）	保护装置的动作电流（应躲过正常时，电流互感器二次侧差动回路中的最大不平衡电流，当单台电容器内部 50%～70%串联元件击穿时，使保护装置有一定的灵敏系数，即 $K_{sen} \geqslant 1.5$） $I_{opK} \geqslant K_{rel} I_{unb}$　　A $I_{opK} \leqslant \frac{Q_n \beta_c}{U_{nC}(1-\beta_c)} \cdot \frac{1}{n_1 K_{sen}}$	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
中性线不平衡电流保护（双星形接线）	保护装置的动作电流（应躲过正常时，中性线上电流互感器二次回路中的最大不平衡电流，及当单台电容器内部 50%～70%串联元件击穿时，使保护装置有一定的灵敏系数，即 $K_{sen}\geqslant 1.5$） $I_{opK}\geqslant K_{rel}I_{unb}$ A $I_{opK}\leqslant \frac{1}{K_{sen}n_1}\cdot\frac{3m\beta_c I_{nC}}{\{6n[m(1-\beta_c)+\beta_c]-5\beta_c\}}$ A	m——每相各串联段电容器并联台数； n——每相电容器的串联段数； U_{unb}——最大不平衡零序电压，V，由测试决定； U_{nph}——电容器组的额定相电压，V； n_{TV}——电压互感器变比； U_{n2}——电压互感器二次额定电压，V，其值为 100V； K_{min}——系统正常运行母线电压可能出现的最低电压系数，一般取 0.5； $I_{c\Sigma}$——电网的总单相接地电容电流，A
开口三角电压保护（单星形接线）	保护装置的动作电压（应躲过正常时，所存在的不平衡零序电压，及当单台电容器内部 50%～70%串联元件击穿时，使保护装置有一定的灵敏系数，即 $K_{sen}\geqslant 1.5$） $U_{opK}\geqslant K_k U_{unb}$ V $U_{opK}\leqslant \frac{1}{K_{sen}n_{TV}}\cdot\frac{3\beta_c U_{nph}}{\{3n[m(1-\beta_c)+\beta_c]-2\beta_c\}}$ V	
过电压保护	保护装置的动作电压（按母线电压不超过 110%额定电压值整定） $U_{opK}=1.1U_{n2}$ V 保护装置动作于信号或带 3～5min 时限动作于跳闸	
低电压保护	保护装置的动作电压（按母线电压可能出现的低电压整定） $U_{opK}=K_{min}U_{n2}$ V	
单相接地保护	保护装置的一次动作电流（按最小灵敏系数 1.5 整定） $I_{op}\leqslant\frac{I_{c\Sigma}}{1.5}$ A	

①两相短路超瞬变电流 I''_{k2}等于三相短路超瞬变电流 I''_{k3}的 0.866 倍。

11.2.4 6～10kV 电动机的保护

11.2.4.1 电动机的保护要求

（1）对电压为 3kV 及以上的异步电动机和同步电动机的下列故障及异常运行方式，应装设相应的保护装置：

1）定子绕组相间短路；

2）定子绕组单相接地；

3）定子绕组过负荷；

4）定子绕组低电压；

5）同步电动机失步；

6）同步电动机失磁；

7）同步电动机出现非同步冲击电流。

（2）对电动机绕组及引出线的相间短路，装设相应的保护装置，应符合下列规定：

1）2MW 以下的电动机，宜采用电流速断保护，保护装置宜采用两相式。

2）2MW 及以上的电动机，或电流速断保护灵敏系数不符合要求的 2MW 以下电动机，应装设纵联差动保护。

3）保护装置应动作于跳闸。对于具有自动灭磁装置的同步电动机，保护装置尚应动作于灭磁。

（3）对单相接地故障，当接地电流大于 5A 时，应装设有选择性的单相接地保护；当接地电流小于 5A 时，可装设接地检测装置。

单相接地电流为 10A 及以上时，保护装置动作于跳闸；单相接地电流为 10A 以下时，保护装置可动作于跳闸或信号。

（4）对电动机的过负荷应装设过负荷保护，并应符合下列规定：

1）生产过程中易发生过负荷的电动机应装设过负荷保护。保护装置应根据负荷特性，带时限作用于信号或跳闸。

2）起动或自起动困难，需要防止起动或自起动时间过长的电动机，应装设过负荷保护，保护装置应动作于跳闸。

（5）对母线电压短时降低或中断，应装设电动机低电压保护，并应符合下列规定：

1）当电源电压短时降低或短时中断后又恢复时，需要断开的次要电动机和有备用自动投入机械的电动机，应装设低电压保护。

2）根据生产过程不允许或不需要自起动的电动机，应装设低电压保护。

3）在电源电压长时间消失后须从电力网中自动断开的电动机，应装设低电压保护。

4）保护装置应动作于跳闸。

（6）对同步电动机失步，应装设失步保护。失步保护带时限动作，对于重要电动机，动作于再同步控制回路；不能再同步或根据生产过程不需要再同步的电动机，应动作于跳闸。

（7）对同步电动机失磁可引起母线电压严重降低，宜装设专用失磁保护。失磁保护应带时限动作于跳闸。

（8）2MW 及以上以及不允许非同步冲击的同步电动机，应装设防止电源短时中断再恢复时造成非同步冲击的保护。

保护装置应确保在电源恢复前动作。重要电动机的保护装置，应作用于再同步控制回路；不能再同步或根据生产过程不需要再同步的电动机，保护装置应动作于跳闸。

11.2.4.2　6～10kV 电动机的保护配置

（1）3～10kV 电动机的继电保护配置见表 11－7，3～10kV 电动机的继电保护整定计算见表 11－8。

表 11－7　　3～10kV 电动机的继电保护配置

电动机容量（kW）	保护装置名称						
	电流速断保护	纵联差动保护	过负荷保护	单相接地保护	低电压保护	失步保护①	防止非同步冲击的断电失步保护②
异步电动机	装设	当电流速断保护不能满足灵敏性要求时装设	生产过程中易发生过负荷时，或起动、自起动条件严重时应装设	单相接地电流 > 5A 时装设，≥ 10A 时一般动作于跳闸，5～10A 时可动作于跳闸或信号	根据需要装设		
异步电动机 ≥2000		装设					
同步电动机 <2000	装设	当电流速断保护不能满足灵敏性要求时装设				装设	根据需要装设
同步电动机 ≥2000		装设					

①下列电动机可以利用反应定子回路的过负荷保护兼作失步保护：短路比在 0.8 以上且负荷平稳的同步电动机，负荷变动大的同步电动机，但此时应增设失步保护。

②大容量同步电动机当不允许非同步冲击时，宜装设防止电源短时中断再恢复时，造成非同步冲击的保护。

表 11－8　　3～10kV 电动机的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
电流速断保护	保护装置的动作电流： 异步电动机（应躲过电动机的起动电流） $I_{opK} = K_{rel}K_c\frac{K_{st}I_{nM}}{n_{TA}}$ A 同步电动机（应躲过电动机的起动电流或外部短路时电动机的输出电流） $I_{opK} = K_{rel}K_c\frac{K_{st}I_{nM}}{n_{TA}}$ A 和 $I_{opK} = K_{rel}K_c\frac{I''_{k3M}}{n_{TA}}$ A 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，电动机接线端两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验） $K_{sen} = \frac{I''_{k2.min}}{I_{op}} \geqslant 2$	K_{rel}——可靠系数，用于电流速断保护时，DL 型和 GL 型继电器分别取 1.4～1.6 和 1.8～2.0，用于差动保护时取 1.3，用于过负荷保护时动作于信号取 1.05，动作于跳闸取 1.2； K_c——接线系数，接于相电流时取 1.0，接于相电流差时取$\sqrt{3}$； n_{TA}——电流互感器变比； I_{nM}——电动机额定电流，A； K_{st}——电动机起动电流倍数①； I''_{k3M}——同步电动机接线端三相短路时，输出的超瞬变电流②，A $I_{k2.min}$——最小运行方式下电动机接线端两相短路时，流过保护安装处的超瞬变电流③，A； I_{op}——保护装置一次动作电流，A； $I_{op} = I_{opK}\frac{n_{TA}}{K_c}$ K_{tx}——电流互感器的同型系数，取 0.5； Δf——电流互感器的允许误差，取 0.1； AW_0——继电器的动作安匝，应采用实测值，如无实测值，则可取 60； W_c——差动继电器线圈计算匝数； $W_{\mathrm{I}.bal.sy}$——第一平衡线圈的实用匝数； $W_{c.sy}$——差动线圈的实用匝数； $W_{\mathrm{II}.bal.sy}$——第二平衡线圈的实用匝数； K_r——继电器返回系数，取 0.85； t_{stM}——电动机实际起动时间，s； t_{op}——保护装置动作时限，一般选为 10～15s，应在实际起动时校验其能否躲过起动时间； I_{CM}——电动机的电容电流，A，除大型同步电动机外，可忽略不计，大型同步电动机的电容电流计算见“配电设计手册”第七章第六节之六； $I_{C\Sigma}$——电网的总单相接地电容电流，A
纵联差动保护（用 BCH—2 型差动继电器时）	保护装置的动作电流（应躲过以下三种情况最大不平衡电流）： （1）电动机起动电流； （2）电流互感器二次回路断线； （3）外部短路时同步电动机输出的超瞬变电流 1）$I_{opK} = K_{rel}K_cK_{tx}\Delta f\frac{K_{st}I_{nM}}{n_{TA}}$ 2）$I_{opK} = K_{rel}K_c\frac{I_{nM}}{n_{TA}}$ A 3）$I_{opK} = K_{rel}K_c\Delta fK_{tx}\frac{I''_{k3M}}{n_{TA}}$ A 确定继电器的差动线圈及平衡线圈的匝数 $W_c = \frac{AW_0}{I_{opK}}$ $W_c \geqslant W_{\mathrm{I}.bal.sy} + W_{c.sy}$ $W_{\mathrm{II}.bal.sy} = W_{\mathrm{I}.bal.sy}$ 确定短路线圈的抽头：一般选取抽头 3—3 或 2—2，对大容量电动机（如容量≥5000kW）可选取 2—2 或 1－1。 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，电动机接线端两相短路时，流过保护装置的短路电流校验） $K_{sen} = \frac{W_{\mathrm{I}.bal.sy} + W_{c.sy}}{AW_0}\cdot\frac{K_cI''_{k2.min}}{n_{TA}} \geqslant 2$	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
纵联差动保护（用 DL－11 型电流继电器）	保护装置的动作电流（应躲过电动机的最大不平衡电流） $I_{opK}=(1.5\sim2)\frac{I_{nM}}{n_{TA}}$ 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，电动机接线端两相短路时，流过保护装置的短路电流校验） $K_{sen}=\frac{I''_{k2.min}}{I_{op}}\geqslant2$	
过负荷保护	保护装置的动作电流（应躲过电动机的额定电流） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I_{nM}}{K_r n_{TA}}$ A 保护装置的动作时限④（躲过电动机起动及自起动时间，即 $t_{op}>t_{stM}$）对于一般电动机为 $t_{op}=(1.1\sim1.2)\ t_{stM}$ s 对于传动风机负荷的电动机为 $t_{op}=(1.2\sim1.4)\ t_{stM}$ s	
单相接地保护	保护装置的一次动作电流（应按被保护元件发生单相接地故障时最小灵敏系数 1.25 整定） $I_{op}\leqslant\frac{I_{C\Sigma}-I_{CM}}{1.25}$ A	
失步保护	过负荷保护兼作失步保护，保护装置的动作电流和动作时限与过负荷保护相同。专用失步保护见“配电手册”第七章第六节的四条	
低电压保护	低电压保护见“配电手册”第七章第六节的五条	

①如为降压电抗器起动及变压器—电动机组，其起动电流倍数 K_{st} 改用 K'_{st} 代替

$$K'_{st}=\frac{1}{\frac{1}{K_{st}}+\frac{u_k S_{nM}}{S_{nT}}} \tag{11-6}$$

式中 u_k——电抗器或变压器的阻抗电压相对值；

S_{nM}——电动机额定容量，kVA；

S_{nT}——电抗器或变压器额定容量，kVA。

②同步电动机接线端三相短路时，输出的超瞬变电流为

$$I''_{k3M}=\left(\frac{1.05}{x''_k}+0.95\sin\varphi_n\right)I_{nM}\ \text{A} \tag{11-7}$$

式中 x''_k——同步电动机超瞬变电抗，相对值；

φ_n——同步电动机额定功率因数角；

I_{nM}——同步电动机额定电流，A。

③两相短路超瞬变电流 I''_{k2} 等于三相短路超瞬变电流 I''_{k3} 的 0.866 倍。

④实际应用中，保护装置的动作时限 t_{op}，可按两倍动作电流及两倍动作电流时允许过负荷时间 t_{ol}，在继电器特性曲线上查出 10 倍动作电流时的动作时间。t_{ol} 可按下式计算

$$t_{ol}=\frac{150}{\left(\frac{2I_{opK}n_1}{K_c I_{nM}}\right)^2-1}\ \text{s} \tag{11-8}$$

式中符号含义同上。

(2) 同步电动机失步保护：

1) 同步电动机在运行过程中不可避免地会遇到以下三种失步事故：

a. 由于供电电源或与电网的联系短暂中断而导致的“断电失步”。其危害主要是使同步电动机遭受非同期冲击。

b. 由于供电系统或电网内近处短路、振荡或电动机负荷的大幅度突变，导致电动机失去动态稳定而失步，称为“带励失步”。其危害主要使电动机遭受强烈脉振，产生疲劳效应而损坏，甚至引起电气或机械共振而扩大事故。

c. 由于电动机励磁系统或励磁电源故障以及某些不正常状态，导致电动机失励或严重欠励，失去静态稳定而滑出同步，称为“失励失步”。其危害主要是导致电动机绕组，尤其是起动绕组的损伤、损坏。

2) 当同步电动机不允许非同期冲击时，宜装设防止电源短时中断再恢复时造成非同期冲击的断电失步保护装置（每段母线装一套）。保护装置可反应功率方向、频率降低、两段母线同名相电压相量之间相位比较。保护装置应确保在电源恢复前动作。重要同步电动机的保护装置宜作用于再整步控制回路；不能再整步或根据生产过程不需要再整步的电动机，保护装置应动作于跳闸。

成套保护装置有 DSB 型断电失步保护装置。

3) 当同步电动机带励失步或失励失步时，其显著特征是在励磁回路中出现不衰减的交变电流分量，其频率与电动机的滑差频率相一致，对此失步保护装置应正确动作。而在同步电动机运行中，由于系统中出现各种扰动引起同步振荡（未失步）；由冲击性负荷引起相应振荡；由脉动性负荷所引起的正常脉动等。虽在励磁回路内出现具有各自不同特征的交流感应电流分量，但因同步电动机未失步，失步保护不应动作，保护装置应能正确检测和区分这些分量的波形特征，并准确可靠地判断电动机是否失步。

保护的定型产品有 LSB－30 系列带励、失励失步保护装置，该装置通过串接在同步电动机励磁回路内的分流器，测取不失真的励磁电流波形信号，同时输入“失步判别专用插件”，对所测取的电流波形进行相应的分析和逻辑处理，从波形特性上作出正确判断。确认电动机失步时，经出口继电器 KSB 发出信号，根据需要，保护装置可动作于“跳闸停机”或“灭磁再整步”。

(3) 低电压保护：下列电动机应装设低电压保护，保护装置应动作于跳闸：

1) 当电源电压短时降低或短时中断后又恢复时，为了保证重要电动机自起动而需要断开的次要电动机，保护装置的电压整定值一般为电动机额定电压的 60%～70%，时限一般约为 0.5s。

2) 当电源电压短时降低或短时中断后，根据生产过程不允许或不需要自起动的电动机。保护装置的电压整定值一般为电动机额定电压的 40%～50%或略高；时限一般较上一级主保护大一时限阶段，取 0.5～1.5s，必要时保护可无选择地动作。

3) 需要自起动，但为保证人身和设备安全，在电源电压长时间消失后需从配电网中自动断开的电动机。保护装置的电压整定值一般为电动机额定电压的 40%～50%，时限一般为 5～10s。

低电压保护的接线应尽可能满足以下要求：

1) 当电压互感器一次侧及二次侧发生各种断线故障时，保护装置不应动作。

2) 当电压互感器一次侧隔离开关因误操作被断开时，保护装置不应动作。

3）0.5s 和 9～10s 低电压保护的动作电压应分别整定。

4）应采用能长期耐受电压的时间继电器。

11.2.5 6～35kV 线路继电保护配置、整定计算和设备选型的原则

11.2.5.1 6～35kV 线路的继电保护要求

（1）对 3～63kV 线路的下列故障或异常运行，应装设相应的保护装置：

1）相间短路；

2）单相接地；

3）过负荷。

（2）对 3～10kV 线路装设相间短路保护装置，应符合下列要求：

1）由电流继电器构成的保护装置，应接于两相电流互感器上，同一网络的所有线路均应装在相同的两相上；

2）后备保护应采用远后备方式；

3）当线路短路使发电厂厂用母线或重要用户母线电压低于额定电压的 60%时，以及线路导线截面过小，不允许带时限切除短路时，应快速切除故障；

4）当过电流保护的时限不大于 0.5～0.7s 时，且没有 3）款所列的情况，或没有配合要求时，可不装设瞬动的电流速断保护。

（3）在 3～10kV 线路装设的相间短路保护装置，应符合下列规定：

1）对单侧电源线路可装设两段过电流保护：第一段为不带时限的电流速断保护；第二段为带时限的过电流保护。可采用定时限或反时限特性的继电器。对单侧电源带电抗器的线路，当其断路器不能切断电抗器前的短路时，不应装设电流速断保护，此时，应由母线保护或其他保护切除电抗器前的故障。

保护装置仅在线路的电源侧装设。

2）对双侧电源线路，可装设带方向或不带方向的电流速断和过电流保护。对 1～2km 双侧电源的短线路，当采用上述保护不能满足选择性、灵敏性或速动性的要求时，可采用带辅助导线的纵差保护作主保护，并装设带方向或不带方向的电流保护作后备保护。

对并列运行的平行线路宜装设横联差动保护作为主保护，并应以接于两回线电流之和的电流保护，作为两回线同时运行的后备保护及一回线断开后的主保护及后备保护。

（4）对 35～63kV 线路，可按下列要求装设相间短路保护装置：

1）对单侧电源线路可采用一段或两段电流速断或电流闭锁电压速断作主保护，并应以带时限过电流保护作后备保护。

当线路发生短路，使发电厂厂用母线电压或重要用户母线电压低于额定电压的 60%时，应能快速切除故障。

2）对双侧电源线路可装设带方向或不带方向的电流电压保护。

当采用电流电压保护不能满足选择性、灵敏性和速动性要求时，可采用距离保护装置。

双侧电源或环形网络中，不超过 3～4km 的短线路，当采用电流电压保护不能满足要求时，可采用带辅助导线的纵差保护作主保护，并应以带方向或不带方向的电流电压保护作后备保护。

3）对并列运行的平行线路，可装设横联差动保护作主保护，并应以接于两回线电流之和的阶段式保护或距离保护作为两回线同时运行的后备保护及一回线断开后的主保护及后备

保护。

(5) 对3~63kV中性点非直接接地电力网中的单相接地故障，应装设接地保护装置，并应符合下列规定：

1) 在发电厂和变电所母线上，应装设接地监视装置，动作于信号。

2) 线路上宜装设有选择性的接地保护，并动作于信号。当危及人身和设备安全时，保护装置应动作于跳闸。

3) 在出线回路数不多，或难以装设选择性单相接地保护时，可采用依次断开线路的方法，寻找故障线路。

(6) 对可能时常出现过负荷的电缆线路，应装设过负荷保护。保护装置宜带时限动作于信号；当危及设备安全时，可动作于跳闸。

11.2.5.2 继电保护配置

6~10kV线路的继电保护配置见表11-9。

表11-9　　6~10kV线路的继电保护配置

被保护线路	保护装置名称				备注
	无时限电流速断保护①	带时限速断保护	过电流保护	单相接地保护	
单侧电源放射式单回线路	自重要配电所引出的线路装设	当无时限电流速断不能满足选择性动作时装设	装设	根据需要装设	当过电流保护的时限不大于0.5~0.7s，且没有保护配合上的要求时，可不装设电流速断保护

①无时限电流速断保护范围，应保证切除所有使该母线残压低于50%~60%额定电压的短路。为满足这一要求，必要时保护装置可无选择地动作，并以自动装置来补救。

11.2.5.3 整定计算

(1) 6~10kV线路的继电保护整定计算见表11-10。

表11-10　　6~10kV线路的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电流保护	保护装置的动作电流（应躲过线路的过负荷电流） $$I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I_{ol}}{K_r n_{TA}}\quad A$$ 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下线路末端两相短路电流校验） $$K_{sen}=\frac{I_{k2.min}}{I_{op}}\geqslant 1.5$$ 保护装置的动作时限，应较相邻元件的过电流保护大一时限阶段，一般大0.5~0.7s	K_{rel}——可靠系数，用于过电流保护时DL型和GL型继电器分别取1.2和1.3，用于电流速断保护时分别取1.2和1.5，用于单相接地保护时，无时限取4~5，有时限取1.5~2； K_c——接线系数，接于相电流时取1，接于相电流差时取$\sqrt{3}$； K_r——继电器返回系数，取0.85； n_{TA}——电流互感器变比； I_{ol}③——线路过负荷（包括电动机起动引起的）电流，A； $I_{k2.min}$——最小运行方式下，线路末端两相短路稳态电流，A；

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
无时限电流速断保护	保护装置的动作电流（应躲过线路末端短路时最大三相短路电流①②） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I''_{2k3.max}}{n_{TA}}$ A 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下线路始端两相短路电流校验） $K_{sen}=\frac{I_{1k2.min}}{I_{op}}\geqslant 2$	I_{op}——保护装置一次动作电流，A，$I_{op}=I_{opK}\frac{n_{TA}}{K_c}$； $I''_{2k3.max}$——最大运行方式下线路末端三相短路超瞬变电流，A； $I''_{1k2.min}$——最小运行方式下线路始端两相短路超瞬变电流④，A； K_{ph}——配合系数，取 1.1； I_{op3}——相邻元件的电流速断保护的一次动作电流，A； I_{3k3max}——最大运行方式下相邻元件末端三相短路稳态电流，A； I_{Cx}——被保护线路外部发生单相接地故障时，从被保护元件流出的电容电流，A； $I_{C\Sigma}$——电网的总单相接地电容电流⑤，A；
带时限电流速断保护	保护装置的动作电流（应躲过相邻元件末端短路时的最大三相短路电流或与相邻元件的电流速断保护的动作电流相配合，按两个条件中较大者整定） $I_{opK}=K_{rel}K_c\frac{I_{3k3max}}{n_{TA}}$ A 或 $I_{opK}=K_{ph}K_c\frac{I_{dz3}}{n_{TA}}$ A 保护装置的灵敏系数与无时限电流速断保护的公式相同 保护装置的动作时限，应较相邻元件的电流速断保护大一个时限段，一般大 0.5～0.7s	
单相接地保护	保护装置的一次动作电流（按躲过被保护线路外部单相接地故障时，从被保护元件流出的电容电流或按最小灵敏系数 1.25 整定） $I_{op}\geqslant K_{rel}I_{Cx}$ A 或 $I_{op}\leqslant\frac{I_{C\Sigma}-I_{Cx}}{1.25}$ A	

①如为线路变压器组，应按配电变压器整定计算；

②当保证母线上具有规定的残余电压时，线路的最小允许长度按下式计算

$$K_x=\frac{-\beta K_1+\sqrt{1+\beta^2-K_1^2}}{\sqrt{1+\beta^2}} \tag{11-9}$$

$$l_{min}=\frac{X_{x.min}}{R_1}\cdot\frac{-\beta+\sqrt{\frac{K_{rel}^2\alpha^2}{K_x^2}(1+\beta^2)-1}}{1+\beta^2} \tag{11-10}$$

式中 K_x——计算运行方式下电力系统最小综合电抗 $X_{x\cdot min}$上的电压与额定电压之比；

β——每千米线路的电抗 X_1 与有效电阻 R_1 之比；

K_1——每线上残余相间电压与额定相间电压之比，其值等于母线上最小允许残余电压与额定电压之比，取 0.6；

R_1——每千米线路的有效电阻，Ω/km；

$X_{x\cdot min}$——按电力系统在最大运行方式下，在母线上的最小综合电抗，Ω；

K_{rel}——可靠系数，一般取 1.2；

α——表示电力系统运行方式变化的系数，其值等于电力系统最小运行方式时的综合电抗 $X_{x\cdot max}$与最大运行方式时的综合电抗 $X_{x\cdot min}$之比。

③电动机自起动时的过负荷电流按下式计算

$$I_{ol}=K_{ol}K_{g.xl}=\frac{I_{g.xl}}{u_k+Z_{*T}+\frac{S_{nT}}{K_{st}S_{M\Sigma}}} \tag{11-11}$$

式中 $I_{g.xl}$——线路工作电流，A；

K_{ol}——需要自起动的全部电动机，在起动时所引起的过电流倍数；

u_k——变压器阻抗电压相对值；

Z_{*T}——以变压器额定容量为基准的线路阻抗标么值；

S_{nT}——变压器额定容量，kVA；

$S_{M\Sigma}$——需要自起动的全部电动机容量，kVA；

K_{st}——电动机起动时的电流倍数。

④两相短路超瞬变电流 I''_{k2}等于三相短路超瞬变电流 I''_{k3}的 0.866 倍；

⑤电网单相接地电容电流计算，详见“配电手册”第四章。

(2) 线路纵联差动保护

线路纵联差动保护的特点是动作速度快；不受单侧电源运行方式的限制和影响；不受电力系统振荡的影响；能正确反映被保护线路上发生的任何类型短路故障；装置构成简单，运行可靠，维护工作量少，投运率高。在中压电网中，短线路的一般电流保护不能满足动作的快速性和灵敏性要求时，则应采用纵联差动保护。

11.2.6 继电保护选型原则

11.2.6.1 继电保护和安全自动装置应符合可靠性（信赖性和安全性）、选择性、灵敏性和速动性的要求。当确定其配置和构成方案时，应综合考虑以下几个方面：

(1) 电力设备和电力网的结构特点和运行特点；

(2) 故障出现的概率和可能造成的后果；

(3) 电力系统的近期发展情况；

(4) 经济上的合理性；

(5) 国内和国外的经验。

11.2.6.2 继电保护和安全自动装置是电力系统的重要组成部分。确定电力网结构、厂站主接线和运行方式时，必须与继电保护和安全自动装置的配置统筹考虑，合理安排。

继电保护和安全自动装置的配置方式，要满足电力网结构和厂站主接线的要求，并考虑电力网和厂站运行方式的灵活性。

对导致继电保护和安全自动装置不能保证电力系统安全运行的电力网结构形式、厂站主接线形式、变压器接线方式和运行方式，应限制使用。

11.2.6.3 应根据审定的电力系统设计或审定的系统接线图及要求，进行继电保护和安全自动装置的系统设计。在系统设计中，除新建部分外，还应包括对原有系统继电保护和安全自动装置不符合要求部分的改造设计。

为便于运行管理和有利于性能配合，同一电力网或同一厂站内的继电保护和安全自动装置的型式，不宜品种过多。

11.2.6.4 电力系统中，各电力设备和线路的原有继电保护和安全自动装置，凡能满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性要求的，均应予以保留。凡是不能满足要求的，应逐步进行改造。

11.2.6.5 继电保护和安全自动装置的新产品，应按国家规定的要求和程序进行鉴定，合格后，方可推广使用。设计、运行单位应积极创造条件支持新产品的试用。

11.2.7 变配电所交流电流电压回路及互感器的选择方法

11.2.7.1 电流互感器及二次电流回路

11.2.7.1.1 电流互感器

(1) 保护用电流互感器的选择：

1) 保护用电流互感器除应满足一次回路的额定电压、额定电流和短路时的动、热稳定要求外，还应按照电流互感器的10%误差曲线进行校验，使在保护装置动作时，误差不超过10%。

2) 保护装置和测量表计一般分别由单独的电流互感器绕组供电。

3) 保护装置（过电流保护及差动保护装置）应采用准确度为B级的电流互感器。

为了减小差动保护装置的不平衡，可采用下述方法尽量降低电流互感器的负荷阻抗：

a. 电流互感器二次回路内应尽量不接其他继电器和仪表。

b. 连接导线应尽量缩短。

c. 两组电流互感器的型号尽可能相同，并且负荷应对称。

d. 在同一准确等级下，电流互感器的允许二次负荷，当电流互感器两个二次绕组串联时比单个绕组时加大一倍；并联时减小一半。

(2) 按照10%误差曲线校验电流互感器的步骤：

1) 按照保护装置类型计算流过电流互感器的一次电流倍数。

2) 根据电流互感器的型号、变比和一次电流倍数，在10%误差曲线上确定电流互感器的允许二次负荷。

3) 按照对电流互感器二次负荷最严重的短路类型计算电流互感器的实际二次负荷，计算公式见“配电手册”表7-21。

4) 比较实际二次负荷与允许二次负荷。如实际二次负荷小于允许二次负荷，表示电流互感器的误差不超过10%；如实际二次负荷大于允许二次负荷，则应采取下述措施，使其满足10%误差。

a. 增大连接导线截面或缩短连接导线长度，以减小实际二次负荷；

b. 选择变比较大的电流互感器，减小一次电流倍数，增大允许二次负荷；

c. 将电流互感器的二次绕组串联起来，使允许二次负荷增大一倍。

(3) 电流互感器允许误差的计算步骤：

1) 各种保护装置的电流互感器一次电流倍数 m。

a. 定时限过电流保护和电流速断保护

$$m = \frac{K_{rel} I_{op}}{I_{1n}} = \frac{1.1 I_{op.K}}{I_{2n} K_{fp.K}} \tag{11-12}$$

式中 I_{op}——保护装置一次动作电流，A；

I_{1n}——电流互感器的一次额定电流，A；

K_{rel}——可靠系数，考虑到电流互感器10%误差，一般取1.1；

$I_{op.K}$——继电器动作电流，A；

I_{2n}——电流互感器的二次额定电流，A；

$K_{fp.K}$——继电器分配系数，见“配电手册”表7-21。

b. 反时限过电流保护

$$m = \frac{K_{rel} I_{2k.max}}{I_{1n}} = \frac{1.1 I_{op·K}}{I_{2n} K_{fp.K}} \tag{11-13}$$

式中 $I_{2k.max}$——按选择性配合整定的计算点（通常为下一段出口处）故障时，流经电流互感器的最大短路电流，A；

其他符号含义同式（11-12）。

c. 差动保护

$$m = \frac{K_{rel} I_{3k.max}}{I_{1n}} \tag{11-14}$$

式中 $I_{3k.max}$——外部短路时，流经电流互感器的最大短路电流，A；

I_{1n}——电流互感器的一次额定电流，A；

K_{rel}——可靠系数，对于采用带速饱和变流器的继电器（如BCH-1、BCH-2型等）

取 1.3，对于采用不带速饱和变流器的继电器（如 DL－10 型）取 2.0。

2）电流互感器实际二次负荷的计算。各种短路类型的电流互感器实际二次负荷的计算公式列于“配电手册”表 7－21。

3）连接导线的最小允许截面或最大允许长度的计算。连接导线的最小允许截面可按下式计算

$$S_{min} = \rho \frac{l}{R_{dx}} \quad mm^2 \tag{11-15}$$

连接导线的最大允许长度可按下式计算

$$l_{max} = S \frac{R_{dx}}{\rho} \quad m \tag{11-16}$$

以上式中 S——连接导线的截面，mm^2；

l——连接导线的长度，m；

R_{dx}——连接导线的电阻，Ω；

ρ——电阻系数，铜为 $0.0184 \times 10^{-6}\Omega \cdot m$。

11.2.7.1.2 测量与计量用电流互感器的选择

电流互感器的选择除应满足一次回路的额定电压、最大负荷电流及短路时的动、热稳定电流要求外，还应满足二次回路测量仪表、自动装置的准确度等级和保护装置 10% 误差特性曲线的要求。

各种测量与计量仪表对电流互感器准确度的要求见本设计原则中的有关规定。

当一个电流互感器的回路内有几个不同型式的仪表时，电流互感器的准确度等级应按对准确度要求高的仪表选择。

电流互感器在不同二次负荷时准确度也不同。制造厂给出的电流互感器二次负荷数据，通常以欧表示，也有用伏安表示，两者关系为

$$I_{2n}^2 Z_{L.ry} = S_2 \quad VA \tag{11-17}$$

式中 I_{2n}——电流互感器的二次额定电流，A；

$Z_{L.ry}$——电流互感器的二次回路允许负荷，Ω；

S_2——电流互感器的二次负荷，VA。

一般电流互感器的二次额定电流为 5A，所以

$$S_2 = 25 Z_{L.ry} \quad VA \tag{11-18}$$

校验电流互感器的准确度时，电流互感器的实际二次负荷按下式计算

$$Z_L = K_{c2} Z_{cj} + K_{c1} R_{dx} + R_{jc} \quad \Omega \tag{11-19}$$

式中 K_{c1}、K_{c2}——导线接线系数、仪表或继电器接线系数，见“配电手册”表 8－13；

Z_{cj}——测量与计量仪表线圈的阻抗，Ω，见“配电手册”表 8－14；

R_{jc}——接触电阻，一般取 0.05～0.1Ω；

R_{dx}——连接导线的电阻，Ω。

11.2.7.1.3 电流互感器二次回路的设计要求

（1）当测量仪表与保护装置共用一组电流互感器时，宜分别接于电流互感器的不同的二次绕组。若受条件限制需共用电流互感器同一个二次绕组时，应按下述原则配置：

1）保护装置接在仪表之前，避免校验仪表时影响保护装置工作；

2）电流回路开路能引起保护装置不正确动作，而又未设有效的闭锁和监视时，仪表应经中间电流互感器连接。当中间互感器二次回路开路时，保护用电流互感器误差应不大于10%。

（2）当几种仪表接在电流互感器的同一个二次绕组时，其接线顺序宜先接指示和积算式仪表，再接记录仪表，最后接发送仪表。

（3）电流互感器的二次回路不宜进行切换，当需要时，应采取防止开路的措施。

（4）电流互感器的二次回路只应有一个接地点，宜在配电装置处经端子接地。

11.2.7.2 电压互感器及二次电压回路

11.2.7.2.1 电压互感器的选择

（1）按照型式和接线选择。企业变、配电所常用的几种电压互感器接线如下：

1）采用一个单相电压互感器（1×JDJ）的接线，供仪表和继电器接于同一个线电压，如用作备用电源进线的电压监视；

2）采用两个单相电压互感器（2×JDJ）接成V形的接线，供仪表和继电器接于a－b、b－c两个线电压，用于主接线较简单的变、配电所；

3）采用一个三相五铁芯三绕组电压互感器（1×JSJW）或三个单相三绕组电压互感器（3×JDJJ）或（3×JDZJ）接成Y—Y—⏢的接线，供仪表和继电器接于三个线电压，辅助二次绕组接成开口三角形，构成零序电压过滤器，用于需要绝缘监视的变、配电所。

（2）按照准确度和容量选择，测量与计量仪表对电压互感器准确度的要求见本节设计原则中的有关规定。

为了保证电压互感器的准确度，其二次负荷不应大于制造厂给出的数据。

在企业变电所中供测量、计量和保护用的电压互感器，其二次负荷较小，一般能够满足仪表对电压互感器准确度的要求。只有在利用电压互感器作为控制电源（如交流操作），或当电压互感器二次侧接有经常通电的事故照明灯时，才需校验电压互感器的准确度。校验电压互感器准确度时，应计算出互感器的二次回路负荷。电压互感器在不同接线时，二次侧的负荷计算见“配电手册”表8－15。常用测量与计量仪表的线圈负荷见“配电手册”表8－14。继电器的负荷见产品样本。

11.2.7.2.2 电压互感器二次回路的设计要求

（1）电压互感器负荷的分配应尽量使三相负荷平衡，以免因一相负荷过大而影响仪表和继电器的准确度。

（2）电压互感器的二次侧中性点或绕组引出端子之一应接地。

当电压互感器二次绕组引出端子之一接地时，其接地点一般在熔断器（或低压断路器）的出线侧，此时在中性点侧应通过击穿保险接地。

（3）电压互感器的二次侧一般在配电装置处经端子接地，或在控制室屏内经端子接地。

（4）电压互感器的二次侧各相（接地除外），应该用本身隔离开关的辅助触点来防止电压反馈。

（5）变、配电所采用单母线分段运行时，其不同母线段的电压互感器二次侧电压干线，应通过母线分段断路器及其隔离开关的辅助触点进行联络，以便更换熔断器时电压回路不致断电。

11.3 变配电所自动装置及综合自动化的设计要求

11.3.1 自动重合闸装置

(1) 3~110kV 电力网中，在下列情况下，应装设自动重合闸装置：

1) 3kV 及以上的架空线路和电缆与架空的混合线路，当用电设备允许且无备用电源自动投入时；

2) 旁路断路器和兼作旁路的母联或分段断路器。

(2) 对单侧电源线路的自动重合闸方式的选择应符合下列规定：

1) 采用一次重合闸；

2) 当电力网由几段串联线路构成时，宜采用重合闸前加速保护动作或顺序自动重合闸。

(3) 对双侧电源线路的自动重合闸方式的选择应符合下列规定：

1) 并列运行的发电厂或电力系统之间，具有四条及以上联系的线路或三条紧密联系的线路，可采用不检查同步的三相自动重合闸。

2) 并列运行的发电厂或电力系统之间具有两条联系的线路或三条联系不紧密的线路，可采用下列重合闸方式：

a. 当非同步合闸的最大冲击电流超过 GB50062—1992《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》附录二中规定的允许值时，可采用同步检定和无电压检定的三相重合闸。

b. 当非同步合闸的最大冲击电流不超过上述规范附录二中规定的允许值时，可采用不检查同步的三相重合闸。

c. 没有其他联系的并列运行双回线路，当不能采用非同步重合闸时，可采用检查另一回线路有电流的自动重合闸。

3) 双侧电源的单回线路，可采用下列重合闸方式：

a. 可采用解列重合闸。

b. 当水力发电厂条件许可时，可采用自同步重合闸。

c. 可采用一侧无电压检定，另一侧同步检定的重合闸。

(4) 自动重合闸装置，应符合下列要求：

1) 手动或通过遥控装置将断路器断开或将断路器投入故障线路上而随即由保护装置将其断开时，自动重合闸均不应动作。

2) 自动重合闸装置在装置的某些元件损坏以及继电器触点粘住或拒动等情况下，均不应使断路器多次重合。

3) 当断路器处于不正常状态不允许实现自动重合闸时，应将自动重合闸装置闭锁。

11.3.2 备用电源和备用设备的自动投入装置

(1) 下列情况可装设备用电源或备用设备的自动投入装置（以下简称自动投入装置）：

1) 由双电源供电的变电所和配电所，其中一个电源经常断开作为备用；

2) 发电厂、变电所和配电所内有互为备用的母线段；

3) 发电厂、变电所内有备用变压器；

4) 变电所内有两台所用变压器；

5) 生产过程中某些重要机组有备用机组。

(2) 自动投入装置，应符合下列要求：

1) 保证备用电源有电压、工作回路断开后才投入备用回路；

2）工作回路上的电压，不论因何原因消失时，自动投入装置均应延时动作；

3）手动断开工作回路时，不起动自动投入装置；

4）保证自动投入装置只动作一次；

5）备用电源自动投入装置动作后，如投到故障上，必要时，应使保护加速动作；

6）备用电源自动投入装置中，可设置工作电源的电流闭锁回路。

11.3.3 变配电所综合自动化的设计原则及远方监测的接口要求

11.3.3.1 变配电所综合自动化的设计原则

（1）提高电网的安全、经济运行水平，减少基建投资，并为推广变电站（配电所）无人值班提供条件。

（2）随着电网发展，各级调度中心要求更多的信息，以便及时掌握电网及变电站（配电所）的运行情况。

（3）提高变电站（配电所）的可控性，采用远方集中控制、集中操作和反事故措施。

（4）利用现代计算机技术，通信技术、自动化技术等，提供先进的技术装备，改变传统的二次设备模式，实现信息共享，简化系统，减少电缆，减少占地面积。

（5）对变电站（配电所）进行全面的技术改造，使其具有功能综合化，结构微机化，操作监视屏幕化、运行管理智能化。

11.3.3.2 变配电所综合自动化监测内容

（1）测量：对全所主要设备（变压器、电容器、全部配电线路）的电压、电流、有功功率、无功功率、主变压器温度进行采集和处理。

（2）监视：对所采集的电压、电流、功率、主变压器温度等不断地进行越限判断。若有越限，则发警告信号，同时对全站断路器状态进行监视。

（3）记录：记录继电保护动作信息，并记录保护动作前、后的短路电流值。

（4）显示：通过 CRT 显示器显示全所的实时主接线图和开关状态，并以不同画面显示全部巡回检测的量，自动显示保护动作性质和保护动作前后的电流值。

（5）制表打印：可定时打印报表，可召唤打印实时检测数据，自动打印越限值和越限时刻，事故记录打印。

（6）中央信息系统：由各子系统直接发出报警信号和预告信号，直接触发发光管，显示故障性质和发出故障音响。

11.3.3.3 远方监测接口

（1）模拟量输入接口：电量输入量接口（电流量电压量引自电流电压互感器）、非电量输入量接口（变压器温度）。

（2）开关量输入接口：变压器分接头位置，电容器开关位置，断路器及隔离开关位置。

（3）输出接口：出口继电器接口（报警信号及控制信号遥测信号）。

（4）外部通信接口。

（5）人机接口。

12 变配电所操作电源

12.1 直流操作电源设计要求

12.1.1 直流系统设计要求

蓄电池的直流系统采用220、110、48V三种电压。

（1）变电所的直流母线，宜采用单母线或分段单母线的接线。采用分段单母线时，蓄电池应能切换至任一母线。

（2）重要变电所的操作电源，宜采用一组110V或220V固定铅酸蓄电池组或镉镍蓄电池组。作为充电、浮充电用的硅整流装置宜合用一套。其他变电所的操作电源，宜采用成套的小容量镉镍电池装置或电容储能装置。

（3）供一级负荷的配电所或大型配电所，当装有电磁操动机构的断路器时，应采用220V或110V蓄电池组作为合、分闸直流操作电源；当装有弹簧储能操动机构的断路器时，宜采用小容量镉镍电池装置作为合、分闸操作电源。

（4）中型配电所当装有电磁操动机构的断路器时，合闸电源宜采用硅整流，分闸电源可采用小容量镉镍电池装置或电容储能。对重要负荷供电时，合、分闸电源宜采用镉镍电池装置。当装有弹簧储能操动机构的断路器时，宜采用小容量镉镍电池装置或电容储能式硅整流装置作为合、分闸操作电源。

采用硅整流作为电磁操动机构合闸电源时，应校核该整流合闸电源能保证断路器在事故情况下可靠合闸。

（5）蓄电池组的容量，应满足下列要求：

1）全所事故停电1h的放电容量；

2）事故放电末期最大的冲击负荷容量。

小容量镉镍电池装置中的镉镍电池容量，应满足分闸、信号和继电保护的要求。

（6）当采用蓄电池组作直流电源时，由浮充电设备引起的波纹系数不应大于5%；电压允许波动应控制在额定电压的5%范围内。放电末期直流母线电压下限不应低于额定电压的85%，充电后期直流母线电压上限不应高于额定电压的115%。

（7）交流整流电源作为继电保护直流电源时，应符合下列要求：

1）直流母线电压，在最大负荷时保护动作不应低于额定电压的80%，最高电压不应超过额定电压的115%，并应采取稳压、限幅和滤波的措施。电压允许波动应控制在额定电压的5%范围内，波纹系数不应大于5%。

2）当采用复式整流时，应保证在各种运行方式下，在不同故障点和不同相别短路时，保护装置均能可靠动作。

3）对采用电容储能电源的变电所和水电厂，电力设备和线路应具有可靠的远后备保护；在失去交流电源情况下，当有几套保护同时动作时，或在其他情况下消耗直流能量最大时，应保证保护与断路器可靠动作同一厂所的电源储能电容的组数应与保护的级数相适应。

12.1.2 蓄电池选择及容量计算方法

12.1.2.1 蓄电池选择

12.1.2.2 蓄电池容量计算

蓄电池组容量的选择，应满足持续放电容量和冲击电流两个条件，镉镍电池可按下列公式计算。

（1）按持续放电容量计算

$$C_{el} \geqslant \frac{(I_k + I_{sg})}{K_{ur} - K_s} t_s \tag{12-1}$$

式中 C_{el}——按事故时持续放电容量条件计算的蓄电池容量，Ah；

I_k——正常直流负载电流，A；

I_{sg}——事故时直流负载电流，A；

t_s——事故持续时间，一般取 1h；

K_{ur}——浮充时运行容量系数，一般取0.85～0.95；

K_s——放电后容量保留系数，事故放电终了时，$K_s = 0.25 \sim 0.5$，全容量核对终了时，$K_s = 0$。

（2）按冲击电流计算

$$C_{e2} \geqslant \frac{(I_k + I_{sg} + I_{ch})}{K_{ch}} \tag{12-2}$$

式中 C_{e2}——按冲击条件计算出的蓄电池容量，Ah；

I_{ch}——断路器合闸冲击电流，A；

K_{ch}——蓄电池允许冲击电流倍数，一般取 6～12 倍。

（3）蓄电池数量的选择，应保证直流母线电压在事故放电终了和充电末期均能比额定电压高出 5%计算。蓄电池总数可按下式计算

$$N = \frac{U_m}{U_{fm}} \tag{12-3}$$

式中 N——蓄电池总数；

U_m——母线电压，为额定电压的 1.05 倍；

U_{fm}——事故放电末期每个蓄电池的电压，一般取 1.95V。

基本蓄电池数可按下式计算

$$N_0 = \frac{U_m}{U_{cm}} \tag{12-4}$$

式中 U_{cm}——充电末期每个蓄电池电压，取平均值 2.6V。

浮充时接于直流母线上的蓄电池数

$$N_{fc} = \frac{U_m}{U_{fc}} \tag{12-5}$$

式中 U_{fc}——单个蓄电池浮充电时电压，取 2.15V。

蓄电池组的容量通常按冲击电流条件选择。

12.1.3 直流设备选择方法和布置

12.1.3.1 直流设备选择

(1) 直流电源成套装置的选择。

1) 阀控式铅酸蓄电池，容量在 300Ah 及以下的可组成成套装置。

2) 高倍率镉镍碱性蓄电池，容量在 40Ah 及以下的应组成成套装置。

3) 直流电源成套装置宜按蓄电池、充电装置和馈线分别设屏（柜）。

(2) 充电装置选择。

1) 蓄电池的充电装置宜选用高频开关整流装置或晶闸管式整流装置，应满足蓄电池充电和浮充电要求。

充电装置应具有稳压、稳流及限流性能，宜采用微机型。具有浮充电、自动均衡充电和手动稳流充电等功能，应为长期连续工作制。

充电装置的交流输入宜为三相制，额定频率为 50Hz，额定电压为 380V ± 10%。小容量充电装置的交流输入可采用单相 220V ± 10%。

充电装置的主要技术参数见表 12-1。

表 12-1 不同类型充电装置技术参数

项 目	类 别	
	晶闸管型	高频开关模块
稳压精度（%）	≤ ±1	≤ ±0.5
稳流精度（%）	≤ ±2	≤ ±0.5
纹波系数（%）	≤2	≤1
效率（%）	≥75	≥88
噪声（dB）	<60	<55

2) 充电装置的选择（见附录 A.2）。充电装置的额定电流的选择应满足下列条件：

a. 满足浮充电流要求；

b. 大于初充电电流；

c. 大于均衡充电电流。

浮充电的输出电流应按经常负荷电流与蓄电池自放电流之和选择。

3) 充电装置的输出电压调节范围应满足蓄电池放电末期和充电末期电压的要求。

浮充电装置直流侧的长期工作电压对于 220V 和 110V 蓄电池组分别为 230V 和 115V。

4) 高频开关充电装置的谐波干扰、电磁兼容、均流系数、功率因数等指标应符合有关标准。

(3) 直流屏上的设备及导体选择。

1) 直流屏和充电装置屏宜采用柜式加强型结构，其防护等级不低于 IP20。

直流屏正面仪表板应能开启，屏后宜开门，前门下部和后门上部宜设百叶窗。外形尺寸宜采用 800mm × 600mm × 2200mm（宽 × 深 × 高）。

2) 直流屏主母线宜采用阻燃绝缘铜母线，应按 1h 放电率或充电设备的额定电流计算长期允许载流量，并应进行短路电流热稳定校验和按短时最大负荷，校验其温度不超过绝缘体的允许事故过负荷温度。单体蓄电池之间宜采用绝缘软导线连接。

3) 蓄电池出口回路的保护电器的额定电流，应按蓄电池 1h 放电率电流再加大一级选择，并应与直流馈线回路保护电器相配合。

4）操作电器应按回路额定电压和额定电流选择。

5）直流馈线的自动开关和熔断器的选择应符合下列规定：

a. 额定电压应大于或等于回路的工作电压。

b. 对于直流电动机馈线应考虑电动机启动电流；对于控制、信号馈线应按短时最大工作电流选择。

c. 电磁型操动机构合闸线圈回路的自动开关或熔断器熔件，可按 0.2～0.3 倍的额定合闸电流选择，但自动开关过载脱扣时间或熔件的熔断时间应大于断路器固有合闸时间。

d. 自动开关应选择直流空气开关，其过载保护应满足干线较支线大 2～4 级的要求；依据短路电流计算，还应保证短路时的选择性及可靠动作。

（4）电缆。

1）当蓄电池引出线为电缆时，正负极引出线应采用单独电缆。当选用多芯电缆时允许载流量可按同截面单芯电缆计算。电缆截面选择计算参见附录 B。

2）蓄电池与直流屏之间的联络电缆及动力馈线的电缆截面选择应符合下列规定：

a. 蓄电池与直流屏之间的联络电缆长期允许载流量的选择应按蓄电池 1h 放电率电流或事故放电初期 1min 放电电流二者取大者。电压降应不大于计算允许值，宜取额定电压的 1%。

b. 直流动力馈线电缆截面应根据最大负荷电流，并按直流母线计算的最低电压和用电设备的允许电压选择。

c. 直流屏与直流分电屏电缆截面应根据最大负荷电流选择。电压降宜取额定电压的 0.5%。

3）合闸回路电缆截面的选择应符合下列规定：

a. 当蓄电池浮充运行时，应保证最远 1 台断路器可靠合闸所需的电压（合闸网络为环状供电时，应按任一电源侧电缆断开的条件）。

b. 当事故放电直流母线电压在最低电压值时，应保证恢复供电的断路器能可靠合闸所需的电压。

4）由直流屏引出的控制、信号馈线应选择铜芯电缆，其截面不宜小于 $4mm^2$。电压降不应超过直流母线额定电压的 5%。

5）直流电缆的选择和敷设应符合 GB50217《电力工程电缆设计规范》的规定。

直流电源屏（柜）间距离和通道宽度，见附录表 B.3，防酸及阀控式密封铅酸蓄电池安装距离见附录表 B.4。

12.1.3.2 直流设备布置

（1）蓄电池组宜布置在电气控制楼底层或电气控制室附近。不同容量、不同电压的蓄电池可以同室布置，但酸性蓄电池和碱性蓄电池不应在同一室内。

（2）直流系统充电装置和直流屏（柜）宜布置在控制室内，也可布置在专用的电源室内。

（3）蓄电池室内应有运行检修通道。通道一侧装设蓄电池时，通道宽度不应小于 800mm；两侧均装设蓄电池时，通道宽度不应小于 1000mm。

（4）直流屏（柜）的布置，应考虑运行维护及调试方便。通道宽度可参见表 B.3、B.4 确定。

（5）碱性镉镍蓄电池可安装在屏（柜）内，也可在室内成架式排列，应保证蓄电池组的绝缘性能，并便于观察液面，便于维护与检修。

阀控式密封铅酸蓄电池应根据出厂要求，采用立放或卧放方式安装在蓄电池屏（柜）或架上。

12.1.4 直流系统绝缘监测装置的选择及配置要求

12.1.4.1 直流绝缘监测装置

为防止由于直流系统两点接地造成继电保护和自动装置的误动作，直流系统中必须装设能连续工作且足够灵敏的绝缘状态监视装置。

直流系统的绝缘监察装置采用直流绝缘监视继电器，当直流系统中任一极绝缘降低到允许值以下时，继电器动作发出信号。

12.1.4.2 电压监察装置

电压监察装置由两只电压继电器组成，当直流系统出现低电压或过电压时，发出信号。

12.2 交流操作电源的设计要求

（1）小型配电所宜采用弹簧储能操动机构合闸和去分流分闸的全交流操作。

（2）当采用交流操作的保护装置时，短路保护可由被保护元件的电流互感器取得操作电源。变压器的瓦斯保护和中性点非直接接地电力网的接地保护，可由电压互感器或变电所所用变压器取得操作电源，亦可增加电容储能电源作为跳闸的后备电源。

（3）保护装置由在线式 UPS 装置取得操作电源。

附录 A 直流回路主要设备选择

A.1 蓄电池回路设备选择

蓄电池回路设备选择见表 A.1 和表 A.2。

表 A.1 铅酸蓄电池回路设备选择

蓄电池容量（Ah）	100	200	300	400	500	600
熔断器及刀开关额定电流（A）	200			400		
自动开关额定电流（A）	225		400		630	
电流测量范围（A）	200 ~ 0 ~ 200			300 ~ 0 ~ 300	500 ~ 0 ~ 500	
主母线铜导体截面（mm^2）	50 × 4			60 × 6		

表 A.2 镉镍蓄电池回路设备选择

蓄电池容量（Ah）	10	20	30	50	60	80	100
隔离电器额定电流（A）	63			100		160	
保护电器额定电流（A）	63			100		125	
电流测量范围（A）	30 ~ 0 ~ 30			100 ~ 0 ~ 100			

A.2 充电装置选择

A.2.1 充电装置额定电流选择

(1) 满足浮充电要求

$$I_c = 0.01 I_{10} + I_{jc} \qquad (A.1)$$

(2) 满足初充电要求：

铅酸蓄电池 $I_c = (1 \sim 1.25) I_{10}$ (A.2)

高倍率镉镍蓄电池 $I_c = (1 \sim 1.25) I_5$ (A.3)

(3) 满足均衡充电要求：

铅酸蓄电池 $I_c = (1 \sim 1.25) I_{10} + I_{jc}$ (A.4)

高倍率镉镍蓄电池

$$I_c = (1 \sim 1.25) I_5 + I_{jc} \qquad (A.5)$$

以上式中 I_c——充电装置额定电流，A；

I_{jc}——直流系统的经常负荷电流，A；

I_{10}（I_5）——蓄电池 10h（5h）放电电流，A。

A.2.2 充电装置输出电压选择

$$U_c = nU_{cm}$$

式中 U_c——充电装置的额定电压，V；

n——蓄电池组单体个数；

U_{cm}——充电末期单体蓄电池电压，V，（防酸式铅酸蓄电池为 2.70V，阀控式铅酸蓄电池为 2.35～2.4V，高倍率镉镍蓄电池为 1.70V）。

蓄电池充电装置参数选择，见表 A.3。

表 A.3 蓄电池充电装置参数选择

交流输入	相数		三相（单相）	
	额定频率（Hz）		50	
	额定电压（V）		380 ± 10%（220 ± 10%）	
直流输出	额定值	电压（V）	220/230	110/115
		电流（A）	(3) 5 (8) 10 (15) 20 (30) (40) 50 (80) 100	
	充电	电压（V）	300（360）	150（180）
		电压调节范围（V）	180～315（360）	90～160（180）
		稳流精度（%）	—	
		负荷变动范围（%）	10～100	
	浮充电	电压（V）	230	115
		电压调节范围（V）	220～240	110～120
		稳压精度（%）	—	
		负荷变动范围（%）	0～100	
	均衡充电	电压（V）	246	123
		电压调节范围（V）	230～264	115～130
		稳压精度（%）	—	
		负荷调节范围（%）	0～100	
	手动调压范围（V）		0～315（360）	0～60（180）
	纹波系数（%）		—	

注 1. 括号内为非推荐值。

2. 稳压精度、稳流精度、纹波系数的值，见表 12－1。

A.3 蓄电池组个数选择

浮充电运行时，按直流母线电压为 $1.05U_n$ 来选择，即

$$n = 1.05U_n / U_f$$

校验均衡充电时，不大于直流母线允许电压最高值，即

$$U_c \leqslant 1.10U_n / n$$

校验事故放电末期，不小于直流母线允许电压最低值，即

$$U_m \geqslant (0.85 \sim 0.875)\ U_n/n$$

对于断路器合闸线圈的最低电压要求不小于85%时，U_m 应取 $0.875U_n/n$。

以上式中 U_n——直流系统额定电压，V；

U_f——每个蓄电池浮充电压，V；

U_c——每个蓄电池均衡充电电压，V；

U_m——每个蓄电池放电末期电压，V；

n——蓄电池组个数。

附录B 电缆截面选择计算

B.1 电缆截面按长期允许载流量和允许电压降的要求计算

其计算公式如下

$$S_c = \rho \times 2LI_c/\Delta U$$

式中 I_c——回路计算电流，A；

S_c——电缆计算截面，mm^2；

ρ——电阻系数，对于铜导体 $\rho = 0.0184 \times 10^{-3}\Omega \cdot mm$；对于铝导体 $\rho = 0.031\Omega \cdot mm \times 10^{-3}$；

L——电缆长度，m；

ΔU——回路允许电压降，V。

B.2 计算参数

不同性质的回路计算电流，见表B.1。

不同回路允许电压降参考值，见表B.2。

表B.1 不同性质回路的计算电流（I_c）

回路名称		回路计算电流 I_c（A）
蓄电池回路		蓄电池1h放电率电流或事故放电初期（1min）放电电流的大者
充电装置输出回路		1.2倍充电装置输出额定电流
直流负荷馈线	电磁操动机构回路	0.5倍合闸线圈额定电流
	直流电动机回路	电动机额定电流
	交流不停电电源	额定容量下逆变器输入直流电流
	控制、照明回路	最大持续电流或0.8倍计算电流

表B.2 不同回路允许电压降（ΔU）参考值

回路名称		允许电压降 ΔU（V）
蓄电池回路		$\leqslant 1\% U_n$
充电器输出回路		$\leqslant 1\% U_n$
直流负荷馈线	电磁操动机构回路	$\leqslant 4\% U_n$
	直流电动机回路	$\leqslant 9\% U_n$
	交流不停电电源	$\leqslant 4\% U_n$
	控制、照明回路	$\leqslant 5\% U_n$

注 严格的说，不同回路允许电压降（ΔU）应根据蓄电池容量，选择中电压水平计算的结果来确定。

表 B.3 直流电源屏（柜）间距离和通道宽度

距离名称	采用尺寸（mm）	
	一般	最小
屏正面—屏正面	1800	1400
屏正面—屏背面	1500	1200
屏背面—屏背面	1500	1000
屏正面—墙	1500	1200
屏背面—墙	1200	1000
边屏—墙	1200	800
主要通道	1600～2000	1400

表 B.4 防酸及阀控式密封铅酸蓄电池安装距离

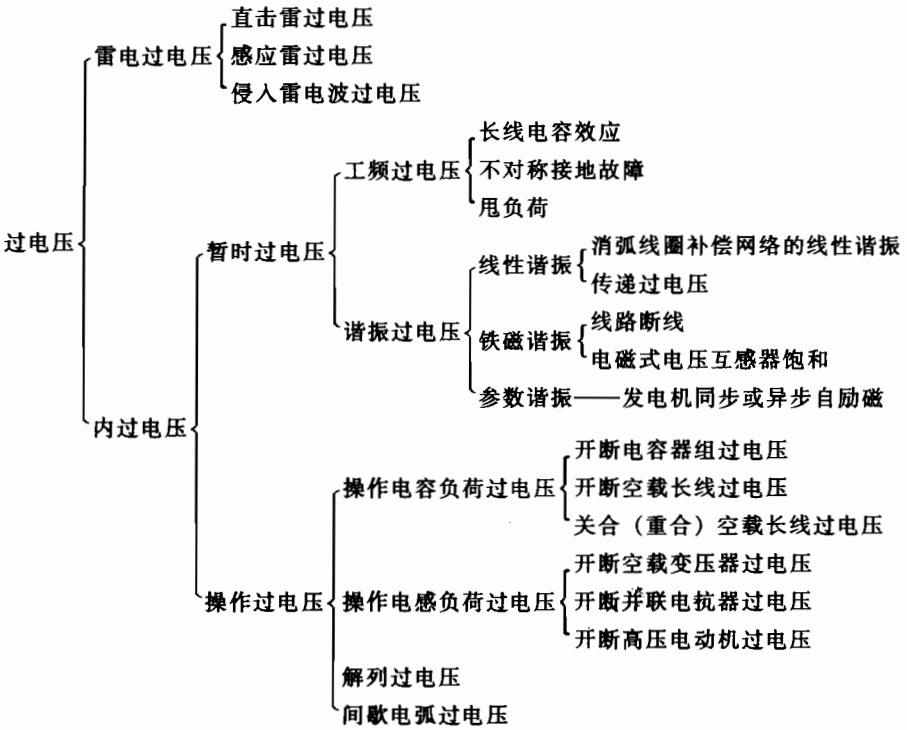
距离名称	采用尺寸（mm）	
	一般	最小
蓄电池前—墙	1500	1200
蓄电池后—墙	1000	800
蓄电池侧—墙	1000	800
主要通道	1600～2000	1400

13 防雷及过电压保护

13.1 电力系统过电压的种类和过电压水平

13.1.1 电力系统过电压种类

13.1.1.1 过电压产生的原因及其分类：电气设备在运行中承受的过电压，有来自外部的雷电过电压和由于系统参数产生变化时电磁能产生振荡、积聚而引起的内部过电压两种类型。按其产生原因，它们又可分为以下几类：



13.1.1.2 电力系统的作用电压：

（1）电力系统运行中出现于设备绝缘上的电压，按其起因及持续时间，可分为：

1）正常运行时的工频电压；

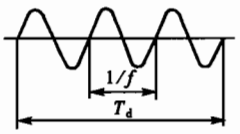
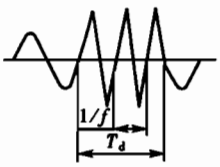
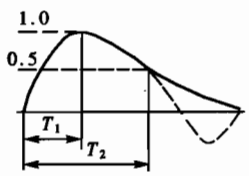
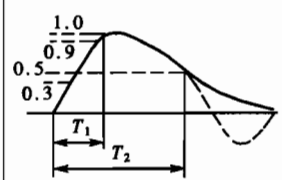
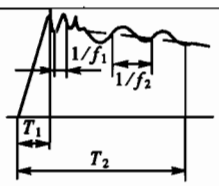
2）暂时过电压（工频过电压、谐振过电压）；

3）操作过电压；

4）雷电过电压。

（2）在电器设备绝缘试验中规定的各类作用电压的典型波形见表 13－1。

表 13－1　　各类作用电压的典型波形

分　类	低　频　电　压		
	持续（工频）	暂　时	
电压波形			
电压波形范围	f = 50Hz 或 60Hz　$T_d \geqslant 1h$	10Hz < f < 500Hz　0.03 < T_d < 3600s	
标准电压波形	f = 50 或 60Hz　T_d 在有关设备标准中规定	48Hz ≤ f ≤ 62Hz	
标准耐受试验	在有关设备标准中规定	短时工频试验	
分　类	瞬　态　电　压		
	缓波前（操作）	快波前（雷电）	陡波前
电压波形			
电压波形范围	20s < T_1 < 5000s　T_2 < 20ms	0.1μs < T_1 < 20μs　T_3 < 300μs	3ns < T_1 < 100ns 0.1MHz < f_1 < 100MHz 30kHz < f_2 < 300kHz　$T_d \leqslant 30$ms
标准电压波形	T_1 = 250μs　T_3 = 2500μs	T_1 = 1.2μs　T_3 = 50μs	在考虑中
标准耐受试验	操作冲击试验	雷电冲击试验	在考虑中

13.1.2　相对地暂时过电压和操作过电压的标么值

（1）工频过电压的

$$1.0\text{p.u.} = U_m/\sqrt{3} \qquad (13-1)$$

（2）谐振过电压和操作过电压的

$$1.0\text{p.u.} = \sqrt{2}U_m/\sqrt{3} \qquad (13-2)$$

式中　U_m——系统最高电压；

p.u.——过电压标么值。

系统的标称电压（U_n）和系统最高工作电压（U_m）见表 13－2。

表 13－2　　系统标称电压和系统最高工作电压　　单位：kV（有效值）

U_n	3	6	10	20	35	66	110	220	330	500
U_m	3.6	7.2	12	24	40.5	72.5	126	252	363	550

13.1.3　系统最高电压的范围

系统最高电压范围分Ⅰ、Ⅱ两种：

1）范围Ⅰ，3.6kV ≤ U_m ≤ 252kV；

2）范围Ⅱ，U_m > 252kV。

13.2 交流电气装置过电压保护设计要求及限制措施

13.2.1 暂时过电压、操作过电压及保护

13.2.1.1 暂时过电压（工频过电压、谐振过电压）及保护：工频过电压、谐振过电压与系统结构、容量、参数、运行方式以及各种安全自动装置的特性有关。工频过电压、谐振过电压除增大绝缘承受电压外，还对选择过电压保护装置有重要影响。

（1）工频过电压。

1）系统中的工频过电压一般由线路空载、接地故障和甩负荷等引起。对范围Ⅱ的工频过电压，在设计时应结合实际条件加以预测。根据这类系统的特点，有时需综合考虑这几种因素的影响。

通常可取正常送电状态下甩负荷和在线路受端有单相接地故障情况下甩负荷作为确定系统工频过电压的条件：

对工频过电压应采取措施加以降低。一般主要采用在线路上安装并联电抗器的措施限制工频过电压。在线路上架设良导体避雷线降低工频过电压时，宜通过技术经济比较加以确定。系统的工频过电压水平一般不宜超过下列数值：

线路断路器的变电所侧为 1.3p.u.；

线路断路器的线路侧为 1.4p.u.。

2）对范围Ⅰ中的 3～10kV 和 35～66kV 系统，一般分别不超过 $1.1\sqrt{3}$p.u. 和$\sqrt{3}$p.u.。

（2）谐振过电压。谐振过电压包括线性谐振和非线性（铁磁）谐振过电压，一般因操作或故障引起系统元件参数出现不利组合而产生。应采取防止措施，避免出现谐振过电压的条件；或用保护装置限制其幅值和持续时间。

1）为防止发电机电感参数周期性变化引起的发电机自励磁（参数谐振）过电压，一般可采取下列防止措施：

a. 使发电机的容量大于被投入空载线路的充电功率。

b. 避免发电机带空载线路起动或避免以全电压向空载线路合闸。

c. 快速励磁自动调节器可限制发电机同步自励过电压。发电机异步自励过电压，仅能用速动过电压继电保护切机以限制其作用时间。

2）应该采用转子上装设阻尼绕组的水轮发电机，以限制水轮发电机不对称短路或负荷严重不平衡时产生的谐振过电压。

3）范围Ⅱ的系统当空载线路上接有并联电抗器，且其零序电抗小于线路零序容抗时，如发生非全相运行状态（分相操动的断路器故障或采用单相重合闸时），由于线间电容的影响，断开相上可能发生谐振过电压。

上述条件下由于并联电抗器铁芯的磁饱和特性，有时在断路器操作产生的过渡过程激发下，可能发生以工频基波为主的铁磁谐振过电压。

在并联电抗器的中性点与大地之间串接一接地电抗器，一般可有效地防止这种过电压。该接地电抗器的电抗值宜按补偿并联电抗器所接线路的相间电容选择，同时应考虑以下因素：

a. 并联电抗器、接地电抗器的电抗及线路容抗的实际值与设计值的变异范围；

b. 限制潜供电流的要求；

c. 连接接地电抗器的并联电抗器中性点绝缘水平。

4）范围Ⅱ的系统中，当空载线路（或其上接有空载变压器时）由电源变压器断路器合闸、重合闸或由只带有空载线路的变压器低压侧合闸、带电线路末端的空载变压器合闸以及系统解列等情况下，如由这些操作引起的过渡过程的激发使变压器铁心磁饱和，电感作周期性变化，回路等值电感在2倍工频下的电抗与2倍工频下线路入口容抗接近相等时，可能产生以2次谐波为主的高次谐波谐振过电压。

应尽量避免产生2次谐波谐振的运行方式、操作方式以及防止在故障时出现该种谐振的接线；确实无法避免时，可在变电所线路继电保护装置内增设过电压速断保护，以缩短该过电压的持续时间。

5）范围Ⅰ的系统中有可能出现下列谐振过电压：

a.3～66kV不接地系统或消弧线圈接地系统偶然脱离消弧线圈的部分，当连接有中性点接地的电磁式电压互感器的空载母线（其上带或不带空载短线路），因合闸充电或在运行时接地故障消除等原因的激发，使电压互感器过饱和则可能产生铁磁谐振过电压。为限制这类过电压，可选取下列措施：

a）选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器；

b）减少同一系统中电压互感器中性点接地的数量，除电源侧电压互感器高压绕组中性点接地外，其他电压互感器中性点尽可能不接地；

c）个别情况下，在10kV及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 X_{C0}，使 $X_{C0}<0.01X_m$（X_m为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗；X_{C0}为系统容抗）；

d）在互感器的开口三角形绕组装设 $R_\Delta \leqslant 0.4$（X_m/K_{13}^2）的电阻（K_{13}为互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比）或装设其他专门消除此类铁磁谐振的装置；

e）10kV及以下互感器高压绕组中性点经 $R_{p.n} \geqslant 0.06X_m$（容量大于600W）的电阻接地。

b.3～66kV不接地及消弧线圈接地系统，应采用性能良好的设备并提高运行维护水平，以避免在下述条件下产生铁磁谐振过电压：

a）配电变压器高压绕组对地短路；

b）送电线路一相断线且一端接地或不接地。

c.有消弧线圈的较低电压系统，应适当选择消弧线圈的脱谐度，以便避开谐振点；无消弧线圈的较低电压系统，应采取增大其对地电容等措施（如安装电力电容器等），以防止零序电压通过电容，如变压器绕组间或两条架空线路间的电容耦合，由较高电压系统传递到中性点不接地的较低电压系统，或由较低电压系统传递到较高电压系统，或回路参数形成串联谐振条件，产生高幅值的转移过电压。

13.2.1.2 操作过电压及保护：

（1）线路合闸和重合闸过电压。空载线路合闸时，由于线路电感一电容的振荡将产生合闸过电压。线路重合时，由于电源电动势较高以及线路上残余电荷的存在，加剧了这一电磁振荡过程，使过电压进一步提高。

1）范围Ⅱ中，线路合闸和重合闸过电压对系统中设备绝缘配合有重要影响，应该结合系统条件预测空载线路合闸、单相重合闸和成功、非成功的三相重合闸（如运行中使用时）的相对地和相间过电压。

预测这类操作过电压的条件如下：

a.对于发电机一变压器一线路单元接线的空载线路合闸，线路合闸后，电源母线电压

为系统最高电压；对于变电所出线则为相应运行方式下的实际母线电压。

b. 成功的三相重合闸前，线路受端曾发生单相接地故障；非成功的三相重合闸时，线路受端有单相接地故障。

限制这类过电压的最有效措施是在断路器上安装合闸电阻。对范围Ⅱ，当系统的工频过电压符合（配电线路应装设短路保护、过负载保护和接地故障保护，作用于切断供电电源或发出报警信号）要求，且符合以下参考条件时，可仅用安装于线路两端（线路断路器的线路侧）上的金属氧化物避雷器（MOA），将这类操作引起的线路的相对地统计过电压限制到要求值以下。

在其他条件下，可否仅用金属氧化物避雷器限制合闸和重合闸过电压，需经校验确定。

2）范围Ⅰ的线路合闸和重合闸过电压：一般不超过3.0p.u.，通常无需采取限制措施。

(2) 空载线路分闸过电压。空载线路开断时，如断路器发生重击穿，将产生操作过电压。

对范围Ⅱ的线路断路器，应要求在电源对地电压为1.3p.u.条件下开断空载线路不发生重击穿。

1）为此，开断空载架空线路宜采用不重击穿的断路器；开断电缆线路应该采用不重击穿的断路器。

2）对范围Ⅰ，60kV及以下系统中，开断空载线路断路器发生重击穿时的过电压一般不超过3.5p.u.。开断前系统已有单相接地故障，使用一般断路器操作时产生的过电压可能超过4.0p.u.。为此，选用操作断路器时，应该使其开断空载线路过电压不超过4.0p.u.。

(3) 线路非对称故障分闸和振荡解列过电压。系统送受端联系薄弱，如线路非对称故障导致分闸，或在系统振荡状态下解列，将产生线路非对称故障分闸或振荡解列过电压。

对范围Ⅱ的线路，宜对这类过电压进行预测。预测前一过电压的条件，可选线路受端存在单相接地故障，分闸时线路送受端电势功角差应按实际情况选取。

(4) 隔离开关操作空载母线的过电压。隔离开关操作空载母线时，由于重击穿将会产生幅值可能超过2.0p.u.，频率为数百千赫至兆赫的高频振荡过电压。这对范围Ⅱ的电气装置有一定危险。为此，宜符合以下要求：

1）隔离开关操作由敞开式配电装置构成的变电所空载母线时的过电压，可能使电流互感器一次绕组进出线之间的套管闪络放电，宜采用金属氧化物避雷器对其加以保护。

2）隔离开关操作气体绝缘全封闭组合电器（GIS）变电所的空载母线时，会产生频率更高的过电压，它可能对匝间绝缘裕度不高的变压器构成威胁。为此，宜对采用的操作方式加以校核，尽量避免可能引起危险的操作方式。

(5) 3～66kV系统开断并联电容补偿装置如断路器发生单相重击穿时，电容器高压端对地过电压可能超过4.0p.u.。开断前电源侧有单相接地故障时，该过电压将更高。开断时如发生两相重击穿，电容器极间过电压可能超过$2.5\sqrt{2}U_{nC}$（U_{nC}为电容器额定电压）。

操作并联电容补偿装置，应采用开断时不重击穿的断路器。对于需频繁投切的补偿装置，宜按图13－1（a）装设并联电容补偿装置金属氧化物避雷器（F1或F2），作为限制单相重击穿过电压的后备保护装置。在电源侧有单相接地故障不要求进行补偿装置开断操作的条件下，宜采用F1。

(6) 操作空载变压器和并联电抗器等的过电压。

1）开断空载变压器由于断路器强制熄弧（截流）产生的过电压，与断路器型式、变压器铁心材料、绕组型式、回路元件参数和系统接地方式等有关。

当开断具有冷轧硅钢片的变压器时，过电压一般不超过2.0p.u.，可不采取保护措施。66kV及以下变压器一般不超过4.0p.u.。

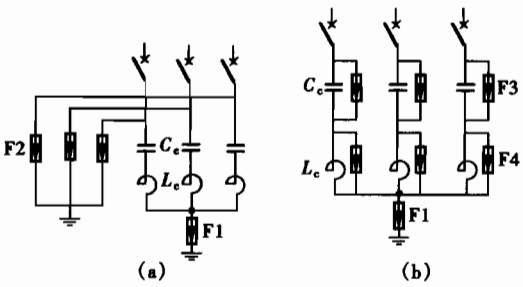


图13-1 并联电容补偿装置的避雷器保护接线
(a) 单相重击穿过电压的保护接线；
(b) 单、两相重击穿过电压的保护接线

采用熄弧性能较强的断路器开断激磁电流较大的变压器以及并联电抗补偿装置产生的高幅值过电压，可在断路器的非电源侧装设阀式避雷器加以限制。保护变压器的避雷器可装在其高压侧或低压侧。但高低压侧系统接地方式不同时，低压侧宜装设操作过电压保护水平较低的避雷器。

2）在可能只带一条线路运行的变压器中性点消弧线圈上，宜用阀式避雷器限制切除最后一条线路两相接地故障时，强制开断消弧线圈电流在其上产生的过电压。

3）空载变压器和并联电抗补偿装置合闸产生的操作过电压一般不超过2.0p.u.，可不采取保护措施。

(7) 在开断高压感应电动机时，因断路器的截流、三相同时开断和高频重复重击穿等会产生过电压（后两种仅出现于真空断路器开断时）。过电压幅值与断路器熄弧性能、电动机和回路元件参数等有关。开断空载电动机的过电压一般不超过2.5p.u.。开断起动过程中的电动机时，截流过电压和三相同时开断过电压可能超过4.0p.u.，高频重复重击穿过电压可能超过5.0p.u.。采用真空断路器或采用的少油断路器截流值较高时，宜在断路器与电动机之间装设旋转电机金属氧化物避雷器或R—C阻容吸收装置。

高压感应电动机合闸的操作过电压一般不超过2.0p.u.，可不采取保护措施。

(8) 66kV及以下系统发生单相间歇性电弧接地故障时，可产生过电压，过电压的高低随接地方式不同而异。一般情况下最大过电压不超过下列数值：

不接地系统为3.5p.u.；

消弧线圈接地系统为3.2p.u.；

电阻接地系统为2.5p.u.。

具有限流电抗器、电动机负荷，且设备参数配合不利的3～10kV某些不接地系统，发生单相间歇性电弧接地故障时，可能产生危及设备相间或相对地绝缘的过电压。对这种系统根据负荷性质和工程的重要程度，可进行必要的过电压预测，以确定保护方案。

(9) 采用无间隙金属氧化物避雷器限制各类操作过电压时，其持续运行电压和额定电压不应低于表13-5所列数值。避雷器应能承受操作过电压作用的能量。

(10) 所安装过电压波形或幅值的自动记录装置，并妥为收集实测结果。

(11) 操作过电压倍数。实际出现的操作过电压幅值与系统最高相电压幅值之比，称为操作过电压倍数。它是随机变量，与系统接线、容量及参数、中性点接地方式、断路器性能、母线出线回路数以及系统运行操作方式等有关。

电力系统设计中采用的计算用最大操作过电压倍数，见表13-3。

表 13－3　　设计计算用操作过电压倍数

	系统标称电压（kV）	过电压倍数（p.u.）①
相对地绝缘	35 及以下（低电阻接地系统）	3.2
	66 及以下（除低电阻接地系统以外）	4.0
	110～220（有效接地系统）	3.0
	330（有效接地系统）	2.2②
	500（有效接地系统）	2.0②
相间绝缘	3～220	1.3～1.4 相对地操作过电压倍数
	330～500	1.5 相对地操作过电压倍数

注　当采用金属氧化物避雷器限制操作过电压时，计算用最大操作过电压倍数需要研究确定。

① 表中操作过电压倍数标么值 1.0p.u. $=\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$，U_m 为系统最高电压。

② 表中所列数值为 330～500kV 系统设计控制值，在绝缘设计中可按采用的避雷器保护水平或操作过电压预测值（无避雷器保护）确定。

13.2.2　雷电过电压和保护装置

13.2.2.1　雷电过电压：设计和运行中应考虑直接雷击、雷电反击和感应雷电过电压对电气装置的危害。

（1）架空线路上的雷电过电压。

1）距架空线路距离 $S>65$m 处，雷云对地放电时，线路上产生的感应过电压最大值可按下式计算：

$$U_i \approx 25\frac{h_c}{S} \tag{13-3}$$

式中　U_i——雷击大地时感应过电压最大值，kV；

h_c——导线平均高度，m；

S——雷击点与线路的距离，m。

线路上的感应过电压为随机变量，其最大值可达 300～400kV，一般仅对 35kV 及以下线路的绝缘有一定威胁。

2）雷击架空线路导线产生的直击雷过电压，可按下式确定：

$$U_g \approx 100I \tag{13-4}$$

式中　U_g——雷击点过电压最大值，kV；

I——雷电流幅值（一般不超过 100），kA。

雷直击导线形成的过电压易导致线路绝缘闪络。架设避雷线可有效地减少雷直击导线的概率。

3）因雷击架空线路避雷线、杆顶形成作用于线路绝缘的雷电反击过电压，与雷电参数、杆塔型式、高度和接地电阻等有关。

宜适当选取杆塔接地电阻，以减少雷电反击过电压的危害。

4）输电线路雷电过电压保护的主要措施有：

a. 采用避雷线保护，尽量减少导线受直击雷的次数；

b. 减少避雷线的接地电阻或适当加强线路绝缘或架设耦合地线，以避免导线反击闪络；

c. 采用自动重合闸装置或采用双回路（或环网）供电；

d. 在线路进线段、交叉段，大跨越段等杆塔处，适当装设排气式避雷器或保护间隙。

不同电压等级送电线路的雷电过电压保护方式见表 13－4。

表 13－4　　架空输电线路的雷电过电压保护方式

电压等级（kV）	保　护　方　式	避雷线保护角
500	应沿全线架设双避雷线	15°
330	应沿全线架设双避雷线	20°左右
220	宜沿全线架设双避雷线，少雷区宜架设单避雷线	双避雷线宜用 20°单避雷线可用 25°
110	一般沿全线架设避雷线，在山区和雷电活动特别强烈地区，宜架设双避雷线，在少雷区可不全线架设避雷线，但应装自动重合闸装置，并装设进线段保护	双避雷线宜用 20°
66	负荷重要且所经地区平均雷暴日数在 30 天以上的地区，宜沿全线架设避雷线	20°～30°
≤35	一般不沿全线架设避雷线，但必须考虑进（出）线段保护	
3～10	钢筋混凝土杆配电线路，宜采用瓷或其他绝缘材料的横担；如用铁横担，对供电要求较高的线路宜采用高一级电压等级的绝缘子	

注　1. 有避雷线的线路，在土壤电阻率为 100～2000Ω·m 地区，每基杆塔的工频接地电阻不宜超过 10～30Ω。

2. 有避雷线的线路，在一般土壤电阻率地区，耐雷水平：35kV，≤20～30kA；66kV，≤30～60kA；110kV，≤40～75kA；220kV，≤75～110kA；330kV，≤100～150kA；500kV，≤125～175kA。

电缆线路一般不会遭到直击雷，雷电过电压只能从连接的架空线侵入，故只需考虑对雷电侵入波的保护，如装设避雷器。

（2）发电厂和变电所内的雷电过电压来自雷电对配电装置的直接雷击、反击和架空进线上出现的雷电侵入波。

1）应该采用避雷针或避雷线对高压配电装置进行直击雷保护并采取措施防止反击。

2）应该采取措施防止或减少发电厂和变电所近区线路的雷击闪络并在厂、所内适当配置阀式避雷器以减少雷电侵入波过电压的危害。

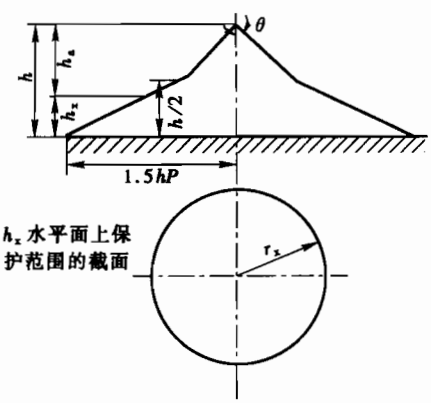


图 13－2　单支避雷针的保护范围（$h \leqslant 30$m 时；$\theta = 45°$）

3）按本节要求对采用的雷电侵入波过电压保护方案校验时，校验条件为保护接线一般应该保证 2km 外线路导线上出现雷电侵入波过电压时，不引起发电厂和变电所电气设备绝缘损坏。

13.2.2.2　避雷针和避雷线

（1）单支避雷针的保护范围（图 13－2）。

1）避雷针在地面上的保护半径，应按下式计算

$$r = 1.5hP \tag{13-5}$$

式中　r——保护半径，m；

h——避雷针的高度，m；

P——高度影响系数，$h \leqslant 30\text{m}$，$P=1$，$30\text{m} < h \leqslant 120\text{m}$，$P=\dfrac{5.5}{\sqrt{h}}$，当 $h > 120\text{m}$ 时，暂按 $h=120\text{m}$ 计算。

2）在被保护物高度 h_x 水平面上的保护半径应按下列方法确定

a. 当 $h_x \geqslant 0.5h$ 时

$$r_x = (h - h_x)P = h_a P \tag{13-6}$$

式中 r_x——避雷针在 h_x 水平面上的保护半径，m；

h_x——被保护物的高度，m；

h_a——避雷针的有效高度，m。

b. 当 $h_x < 0.5h$ 时

$$r_x = (1.5h - 2h_x)P \tag{13-7}$$

（2）两支等高避雷针的保护范围（图 13-3）。

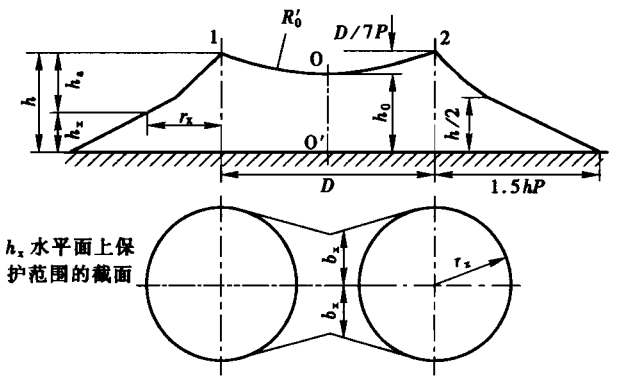


图 13-3 高度为 h 的两等高避雷针的保护范围

1）两针外侧的保护范围应按单支避雷针的计算方法确定。

2）两针间的保护范围应按通过两针顶点及保护范围上部边缘最低点 O 的圆弧确定，圆弧的半径为 R'_0。O 点为假想避雷针的顶点，其高度应按下式计算：

$$h_0 = h - \frac{D}{7P} \tag{13-8}$$

式中 h_0——两针间保护范围上部边缘最低点高度，m；

D——两避雷针间的距离，m。

两针间 h_x 水平面上保护范围的一侧最小宽度应按图 8-4 确定。当 $b_x > r_x$ 时，取 $b_x = r_x$。

求得 b_x 后，可按图 13-3 绘出两针间的保护范围。

两针间距离与针高之比 D/h 不宜大于 5。

（3）多支等高避雷针的保护范围（图 13-5）。

1）三支等高避雷针所形成的三角形的外侧保护范围应分别按两支等高避雷针的计算方法确定。如在三角形内被保护物最大高度众水平面上，各相邻避雷针间保护范围的一侧最小宽度 $b_x \geqslant 0$ 时，则全部面积受到保护。

2）四支及以上等高避雷针所形成的四角形或多角形，可先将其分成两个或数个三角形，

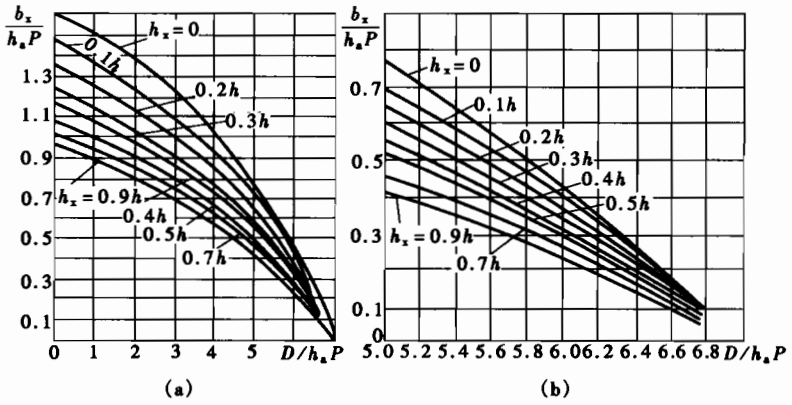


图 13－4　两等高（h）避雷针间保护范围的一侧最小宽度（b_x）与 D/h_aP 的关系

（a）$D/h_aP=0\sim7$；（b）$D/h_aP=5\sim7$

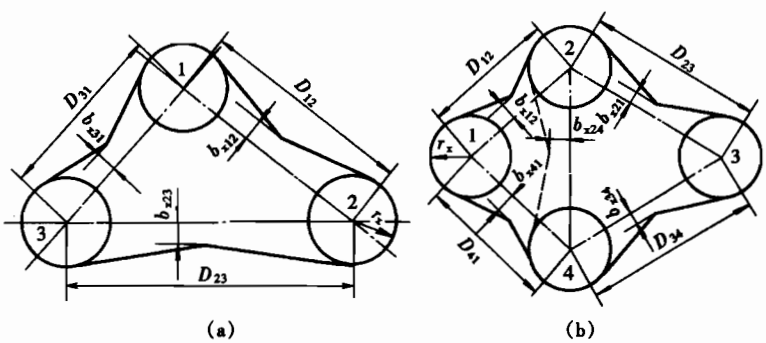


图 13－5　三、四支等高避雷针在众水平面上的保护范围

（a）三支等高避雷针在 h_x 水平面上的保护范围；（b）四支等高避雷针在众水平面上的保护范围

然后分别按三支等高避雷针的方法计算。如各边的保护范围一侧最小宽度 $b_x\geqslant0$，则全部面积即受到保护。

（4）单根避雷线在 h_x 水平面上每侧保护范围的宽度（图 13－6）：

a. 当 $h_x\geqslant\frac{h}{2}$时

$$r_x=0.47(h-h_x)P \qquad (13-9)$$

式中　r_x——每侧保护范围的宽度，m。

b. 当 $h_x<\frac{h}{2}$时

$$r_x=(h-1.53h_x)P \qquad (13-10)$$

（5）两根等高平行避雷线的保护范围（图 13－7）：

1）两避雷线外侧的保护范围应按单根避雷线的计算方法确定。

2）两避雷线间各横截面的保护范围应由通过两避雷线 1、2 点及保护范围边缘最低点 O 的圆弧确定。O 点的

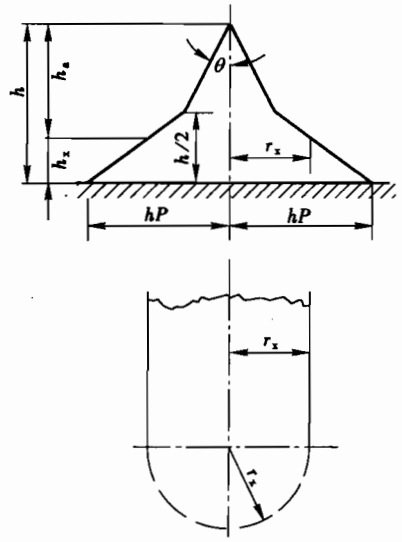


图 13－6　单根避雷线的保护范围

（$h\leqslant30$m 时，$\theta=25°$）

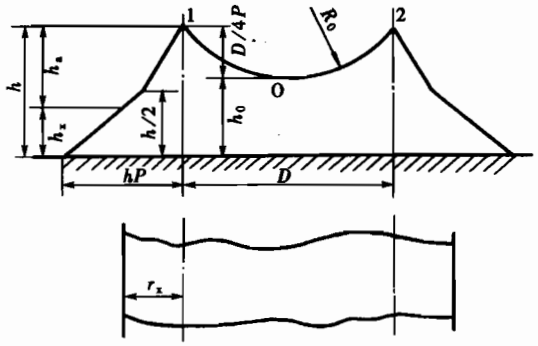


图 13－7　两根平行避雷线的保护范围

高度应按下式计算

$$h_0 = h - \frac{D}{4P} \qquad (13-11)$$

式中　h_0——两避雷线间保护范围上部边缘最低点的高度，m；

D——两避雷线间的距离，m；

h——避雷线的高度，m。

3）两避雷线端部的两侧保护范围仍按单根避雷线保护范围计算。两线间保护最小宽度（参见图 13－8）按下列方法确定：

a. 当 $h_x \geqslant \frac{h}{2}$ 时

$$b_x = 0.47(h_0 - h_x)P \qquad (13-12)$$

b. 当 $h_x < \frac{h}{2}$ 时

$$b_x = (h_0 - 1.53h_x)P \qquad (13-13)$$

（6）不等高避雷针、避雷线的保护范围（图 13－8）。

1）两支不等高避雷针外侧的保护范围应分别按单支避雷针的计算方法确定。

2）两支不等高避雷针间的保护范围应按单支避雷针的方法，先确定较高避雷针 1 的保护范围，然后由较低避雷针 2 的顶点，作水平线与避雷针 1 的保护范围相交于点 3，取点 3 为等效避雷针的顶点，再按两支等高避雷针的计算方法确定避雷针 2 和 3 间的保护范围。通过避雷针 2、3 顶点及保护范围上部边缘最低点的圆弧，其弓高应按下式计算

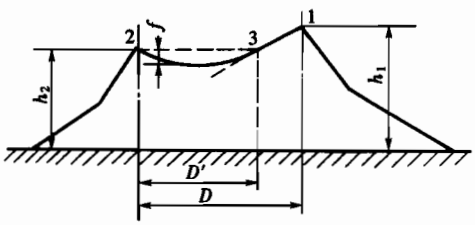


图 13－8　两支不等高避雷针的保护范围

$$f = \frac{D'}{7P} \qquad (13-14)$$

式中　f——圆弧的弓高，m；

D'——避雷针 2 和等效避雷针 3 间的距离，m。

3）对多支不等高避雷针所形成的多角形，各相邻两避雷针的外侧保护范围按两支不等高避雷针的计算方法确定；三支不等高避雷针，如在三角形内被保护物最大高度 h_x 水平面上，各相邻避雷针间保护范围一侧最小高度 $b_x \geqslant 0$，则全部面积即受到保护；四支及以上不等高避雷针所形成的多角形，其内侧保护范围可仿照等高避雷针的方法确定。

4）两根不等高避雷线各横截面的保护范围，应仿照两支不等高避雷针的方法，按式（13－10）计算。

（7）山地和坡地上的避雷针，由于地形、地质、气象及雷电活动的复杂性，避雷针的保护范围应有所减小。避雷针的保护范围可按式（13－5）～式（13－7）的计算结果和依图 13－4确定的 b_x 等乘以系数 0.75 求得；式（13－8）可修改为 $h_0 = h - \frac{D}{5P}$；式（13－14）可

修改为 $f=\frac{D'}{5P}$。

利用山势设立的远离被保护物的避雷针不得作为主要保护装置。

(8) 相互靠近的避雷针和避雷线的联合保护范围可近似按下列方法确定（图 13－9）；避雷针、避雷线外侧保护范围分别按单针、线的保护范围确定。内侧首先将不等高针、线划为等高针、等高线，然后将等高针、等高线视为等高避雷线计算其保护范围。

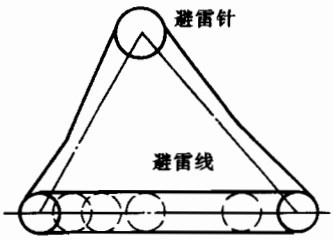


图 13－9 避雷针和避雷线的联合保护范围

13.2.2.3 阀式避雷器

(1) 采用阀式避雷器进行雷电过电压保护时，除旋转电机外，对不同电压范围、不同系统接地方式的避雷器选型如下：

1) 有效接地系统，范围Ⅱ应该选用金属氧化物避雷器；范围Ⅰ宜采用金属氧化物避雷器。

2) 气体绝缘全封闭组合电器（GIS）和低电阻接地系统应该选用金属氧化物避雷器。

3) 不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统，根据系统中谐振过电压和间歇性电弧接地过电压等发生的可能性及其严重程度，可任选金属氧化物避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

(2) 旋转电机的雷电侵入波过电压保护，宜采用旋转电机金属氧化物避雷器或旋转电机磁吹阀式避雷器。

(3) 有串联间隙金属氧化物避雷器和碳化硅阀式避雷器的额定电压，在一般情况下应符合下列要求：

1) 3～10kV 和 35、66kV 系统分别不低于 $1.1U_m$ 和 U_m；3kV 及以上具有发电机的系统不低于 $1.1U_{m\cdot g}$（$U_{m\cdot g}$为发电机最高运行电压）。

2) 中性点避雷器的额定电压，对 3～20kV 和 35、66kV 系统，分别不低于 $0.64U_m$ 和 $0.58U_m$；对 3～20kV 发电机，不低于 $0.64U_{m\cdot g}$。

(4) 采用无间隙金属氧化物避雷器作为雷电过电压保护装置时，应符合下列要求：

1) 避雷器的持续运行电压和额定电压力应不低于表 13－2 所列数值。

2) 避雷器能承受所在系统作用的暂时过电压和操作过电压能量。

(5) 阀式避雷器标称放电电流下的残压，不应大于被保护电气设备（旋转电机除外）标准雷电冲击全波耐受电压的 71%。

(6) 发电厂和变电所内 35kV 及以上避雷器应装设简单可靠的多次动作记录器或磁钢记录器。

13.2.2.4 排气式避雷器

(1) 在选择排气式避雷器时，开断续流的上限，考虑非周期分量，不得小于安装处短路电流的最大有效值；开断续流的下限，不考虑非周期分量，不得大于安装处短路电流的可能最小值。

(2) 如按开断续流的范围选择排气式避雷器，最大短路电流应按雷季电力系统最大运行方式计算，并包括非周期分量的第一个半周短路电流有效值。如计算困难，对发电厂附近，可将周期分量第一个半周的有效值乘以 1.5；距发电厂较远的地点，乘以 1.3。最小短路电

流应按雷季电力系统最小运行方式计算，且不包括非周期分量。

（3）排气式避雷器外间隙的距离，在符合保护要求的条件下，应采用较大的数值。排气式避雷器外间隙的距离一般采用表 13－5 所列数值。

表 13－5　　无间隙金属氧化物避雷器持续运行电压和额定电压

系统接地方式		持续运行电压（kV）		额定电压（kV）	
		相　地	中性点	相　地	中性点
有效接地	110kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.45U_m$	$0.75U_m$	$0.75U_m$
	220kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.13U_m$ $(0.45U_m)$	$0.75U_m$	$0.17U_m$ $(0.57U_m)$
	330、500kV	$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$ $(0.59U_m)$	$0.13U_m$	$0.75U_m$ $(0.8U_m)$	$0.17U_m$
不接地	3～20kV	$1.1U_m$，$U_{m\cdot g}$	$0.64U_m$ $U_{m\cdot g}/\sqrt{3}$	$1.38U_m$ $1.25U_{m\cdot g}$	$0.8U_m$ $0.72U_{m\cdot g}$
	35、66kV	U_m	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
消弧线圈		U_m，$U_{m\cdot g}$	$U_m/\sqrt{3}$ $U_{m\cdot g}/\sqrt{3}$	$1.25U_m$ $1.25U_{m\cdot g}$	$0.72U_m$ $0.72U_{m\cdot g}$
低电阻		$0.8U_m$	—	U_m	—
高电阻		$1.1U_m$，$U_{m\cdot g}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$ $U_{m\cdot g}/\sqrt{3}$	$1.38U_m$ $1.25U_{m\cdot g}$	$0.8U_m$ $0.72U_{m\cdot g}$

注　1. 220kV 括号外、内数据分别对应变压器中性点经接地电抗器接地和不接地。

2. 330、500kV 括号外、内数据分别与工频过电压 1.3p.u. 和 1.4p.u. 对应。

3. 220kV 变压器中性点经接地电抗器接地和 330、500kV 变压器或高压并联电抗器中性点经接地电抗器接地时，接地电抗器的电抗与变压器或高压并联电抗器的零序电抗之比不大于 1/3。

4. 110、220kV 变压器中性点不接地且绝缘水平低于规定的耐受电压时，避雷器的参数需另行研究确定。

为减少排气式避雷器在反击时动作，应降低与避雷线的总接地电阻，并增大外间隙距离，一般可增大到表 13－6 所列的外间隙最大距离。

表 13－6　　排气式避雷器外间隙的距离

系统标称电压（kV）	3	6	10	20	35
最小距离（mm）	8	10	15	60	100
最大距离（mm）	—	—	—	150～200	250～300

（4）排气式避雷器的设置应符合下列要求：

1）应避免各避雷器排出的电离气体相交而造成短路。但在开口端固定避雷器，则允许其排出的电离气体相交。

2）为防止在排气式避雷器的内腔积水，宜垂直安装，开口端向下或倾斜安装，与水平线的夹角不应小于 15°。在污秽地区，应增大倾斜角度。

3）排气式避雷器应安装牢固，并保证外间隙稳定不变。

4）标称电压 10kV 及以下系统中用的排气式避雷器，为防止雨水造成短路，外间隙的电极不应垂直布置。

5）外间隙电极宜镀锌，或采取避免锈水沾污绝缘子的措施。

（5）排气式避雷器应装设简单可靠的动作指示器。

13.2.2.5 保护间隙

（1）如排气式避雷器的灭弧能力不能符合要求，可采用保护间隙，并应尽量与自动重合闸装置配合，以减少线路停电事故。保护间隙的主间隙距离不应小于表 13－7 所列数值。

表 13－7　　保护间隙的主间隙距离最小值

系统标称电压（kV）	3	6	10	20	35
间隙距离（mm）	8	15	25	100	210

（2）除有效接地系统和低电阻接地系统外，应使单相间隙动作时有利于灭弧，并宜采用角形保护间隙。

保护间隙宜在其接地引下线中串接一个辅助间隙，以防止外物使间隙短路。辅助间隙的距离可采用表 13－8 所列数值。

表 13－8　　辅助间隙的距离

系统标称电压（kV）	3	6、10	20	35
辅助间隙距离（mm）	5	10	15	20

13.2.3　高压架空线路的雷电过电压保护

13.2.3.1 一般线路的保护：

（1）送电线路的雷电过电压保护方式，应根据线路的电压等级、负荷性质、系统运行方式、当地原有线路的运行经验、雷电活动的强弱、地形地貌的特点和土壤电阻率的高低等条件，通过技术经济比较确定。

各级电压的送、配电线路，应尽量装设自动重合闸装置。35kV 及以下的市区内的短线路，可按需要确定。

（2）各级电压的线路，一般采用下列保护方式：

1）35kV 及以下线路，一般不沿全线架设避雷线。

2）除少雷区外，3～10kV 钢筋混凝土杆配电线路，宜采用瓷或其他绝缘材料的横担；如果用铁横担，对供电可靠性要求高的线路宜采用高电压等级的绝缘子，并应尽量以较短的时间切除故障，以减少雷击跳闸和断线事故。

（3）有避雷线的线路，在一般土壤电阻率地区，其耐雷水平不宜低于表 13－9 所列数值。

表 13－9　　有避雷线线路的耐雷水平

标称电压（kV）		35	66	110
耐雷水平（kA）	一般线路	20～30	30～60	40～75
	大跨越档中央和发电厂、变电所进线保护段	30	60	75

（4）有避雷线的线路，每基杆塔不连避雷线的工频接地电阻，在雷季干燥时，不宜超过表 13－10 所列数值。

表 13－10　　有避雷线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率（Ω·m）	≤100	>100～500	>500～1000	>1000～2000	>2000
接地电阻（Ω）	10	≤15	20	25	30

注　如土壤电阻率超过2000Ω·m，接地电阻很难降低到30Ω时，可采用6～8根总长不超过500m的放射形接地体，或采用连续伸长接地体，接地电阻不受限制。

雷电活动强烈的地方和经常发生雷击故障的杆塔和线段，应改善接地装置、架设避雷线、适当加强绝缘或架设耦合地线。

（5）杆塔上避雷线对边导线的保护角，一般采用20°～30°左右，山区宜采用较小的保护角。杆塔上两根避雷线间的距离不应超过导线与避雷线间垂直距离的5倍。

（6）有避雷线的线路应防止雷击档距中央反击导线。15℃无风时，档距中央导线与避雷线间的距离宜符合下式

$$s_1 = 0.012l + l \tag{13-15}$$

式中　s_1——导线与避雷线间的距离，m；

l——档距长度，m。

当档距长度较大，按式（13－15）计算出的s_1大于表13－12的数值时，可按后者要求。

（7）中雷区及以上地区35kV无避雷线线路宜采取措施，减少雷击弓t起的多相短路和两相异点接地引起的断线事故，钢筋混凝土杆和铁塔宜接地，接地电阻不受限制，但多雷区不宜超过30Ω。钢筋混凝土杆和铁塔应充分利用其自然接地作用，在土壤电阻率不超过100Ω·m或有运行经验的地区，可不另设人工接地装置。

（8）钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担线路的避雷线支架、导线横担与绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间，宜有可靠的电气连接并与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋如上下已用绑扎或焊接连成电气通路，则可兼作接地引下线。

利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆，其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

（9）与架空线路相连接的长度超过50m的电线，应在其两端装设阀式避雷器或保护间隙；长度不超过50m的电线，只在任何一端装设即可。

（10）绝缘避雷线的放电间隙，其间隙值应根据避雷线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的动作条件确定，一般采用10～40mm。在海拔1000m以上的地区，间隙应相应加大。

13.2.3.2　线路交叉部分的保护：

（1）线路交叉档两端的绝缘不应低于其邻档的绝缘。交叉点应尽量靠近上下方线路的杆塔，以减少导线因初伸长、覆冰、过载温升、短路电流过热而增大弧垂的影响，以及降低雷击交叉档时交叉点上的过电压。

（2）同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路避雷线间的垂直距离，当导线温度为40℃时，不得小于表13－11所列数值。

表 13－11　　同级电压线路相互交叉或与较低电压线路通信线路交叉时的交叉距离

系统标称电压（kV）	3～10	20～110
交叉距离（m）	2	3

（3）3kV 及以上的同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，交叉档一般采取下列保护措施：

1）交叉档两端的钢筋混凝土杆或铁塔（上、下方线路共 4 基），不论有无避雷线，均应接地。

2）3kV 及以上线路交叉档两端为木杆或木横担钢筋混凝土杆且无避雷线时，应装设排气式避雷器或保护间隙。

3）与 3kV 及以上电力线路交叉的低压线路和通信线路，当交叉档两端为木杆时，应装置保护间隙。

门型木杆上的保护间隙，可由横担与主杆固定处沿杆身敷设接地引下线构成。单木杆针式绝缘子的保护间隙，可在距绝缘子固定点 750mm 处绑扎接地引下线构成。通信线的保护间隙，可由杆顶沿杆身敷设接地引下线构成。

如交叉距离比表 13－12 所列数值大 2m 及以上，则交叉档可不采取保护措施。

（4）如交叉点至最近杆塔的距离不超过 40m，可不在此线路交叉档的另一杆塔上装设交叉保护用的接地装置、排气式避雷器或保护间隙。

13.2.3.3 大跨越档的雷电过电压保护：

（1）大跨越档的绝缘水平不应低于同一线路的其他杆塔。全高超过 40m 有避雷线的杆塔，每增高 10m，应增加一个绝缘子。接地电阻不应超过表 13－10 所列数值的 50%，当土壤电阻率大于 2000Ω·m 时，也不宜超过 20Ω。全高超过 100m 的杆塔，绝缘子数量应结合运行经验，通过雷电过电压的计算确定。

（2）未沿全线架设避雷线的 35kV 及以上新建线路中的大跨越段，宜架设避雷线。对新建无避雷线的大跨越档，应装设排气式避雷器或保护间隙，新建线路并应比规定线路绝缘子每串最少片数要求增加一个绝缘子。

（3）根据雷击档距中央避雷线时防止反击的条件，大跨越档导线与避雷线间的距离不得小于表 13－12 的要求。

表 13－12　　防止反击要求的大跨越档导线与避雷线间的距离

系统标称电压（kV）	35	66	110
距离（m）	3.0	6.0	7.5

13.2.4 发电厂和变电所的雷电过电压保护

13.2.4.1 发电厂和变电所的直击雷过电压保护：

（1）发电厂和变电所的直击雷过电压保护可采用避雷针或避雷线。下列设施应装设直击雷保护装置：

1）屋外配电装置，包括组合导线和母线廊道；

2）火力发电厂的烟囱、冷却塔和输煤系统的高建筑物；

3）油处理室、燃油泵房、露天油罐及其架空管道、装卸油台、易燃材料仓库等建筑物；

4）乙炔发生站、制氢站、露天氢气罐、氢气罐储存室、天然气调压站、天然气架空管道及其露天储罐；

5）多雷区的列车电站。

（2）发电厂的主厂房、主控制室和配电装置室一般不装设直击雷保护装置。为保护其他设备而装设的避雷针，不宜装在独立的主控制室和 35kV 及以下变电所的屋顶上。但采用钢

结构或钢筋混凝土结构等有屏蔽作用的建筑物的车间变电所可不受此限制。

雷电活动特殊强烈地区的主厂房、主控制室和配电装置室宜设直击雷保护装置。

主厂房如装设避直击雷保护装置或为保护其他设备而在主厂房上装设避雷针，应采取加强分流、装设集中接地装置、设备的接地点尽量远离避雷针接地引下线的入地点、避雷针接地引下线尽量远离电气设备等防止反击的措施，并宜在靠近避雷针的发电机出口处装设一组旋转电机阀式避雷器。

主控制室、配电装置室和35kV及以下变电所的屋顶上如装设直击雷保护装置时，若为金属屋顶或屋顶上有金属结构，则将金属部分接地；若屋顶为钢筋混凝土结构，则将其焊接成网接地；若结构为非导电的屋顶时，则采用避雷带保护，该避雷带的网格为8～10m，每隔10～20m设引下线接地。

上述接地引下线应与主接地网连接，并在连接处加装集中接地装置。

峡谷地区的发电厂和变电所宜用避雷线保护。

已在相邻高建筑物保护范围内的建筑物或设备，可不装设直击雷保护装置。

屋顶上的设备金属外壳、电线金属外皮和建筑物金属构件均应接地。

(3) 露天布置的GIS的外壳不需装设直击雷保护装置，但应接地。

(4) 发电厂和变电所有爆炸危险且爆炸后可能波及发电厂和变电所内主设备或严重影响发供电的建构筑物（如制氢站、露天氢气储罐、氢气罐储存室、易燃油泵房、露天易燃油储罐、厂区内的架空易燃油管道、装卸油台和天然气管道以及露天天然气储罐等），应用独立避雷针保护，并应采取防止雷电感应的措施。

避雷针与易燃油储罐和氢气天然气等罐体及其呼吸阀等之间的空气中距离，避雷针及其接地装置与罐体、罐体的接地装置和地下管道的地中距离应符合13.2.4.1条（10）款中1)2)项的要求。避雷针与呼吸阀的水平距离不应小于3m，避雷针尖高出呼吸阀不应小于3m。避雷针的保护范围边缘高出呼吸阀顶部不应小于2m。避雷针的接地电阻不宜超过10Ω。在高土壤电阻率地区，如接地电阻难于降到10Ω，允许采用较高的电阻值，但空气中距离和地中距离必须符合13.1.4.1条（10）款的要求。避雷针与5000m^{3}以上储罐呼吸阀的水平距离不应小于5m，避雷针尖高出呼吸阀不应小于5m。

露天储罐周围应设闭合环形接地体，接地电阻不应超过30Ω（无独立避雷针保护的露天储罐不应超过10Ω），接地点不应小于两处，接地点间距不应大于30m。架空管道每隔20～25m应接地一次，接地电阻不应超过30Ω。易燃油储罐的呼吸阀、易燃油和天然气储罐的热工测量装置应进行重复接地，即与储罐的接地体用金属线相连。不能保持良好电气接触的阀门、法兰、弯头等管道连接处应跨接。

(5) 13.2.4.1条（1）款中所述设施上的直击雷保护装置包括兼作接闪器的设备金属外壳、电缆金属外皮、建筑物金属构件等，其接地可利用发电厂或变电所的主接地网，但应在直击雷保护装置附近装设集中接地装置。

(6) 独立避雷针（线）宜设独立的接地装置。在非高土壤电阻率地区，其接地电阻不宜超过10Ω。当有困难时，该接地装置可与主接地网连接，但避雷针与主接地网的地下连接点至35kV及以下设备与主接地网的地下连接点之间，沿接地体的长度不得小于15m。

独立避雷针不应设在人经常通行的地方，避雷针及其接地装置与道路或出入口等的距离不宜小于3m，否则应采取均压措施，或铺设砾石或沥青地面，也可铺设混凝土地面。

(7) 110kV及以上的配电装置，一般将避雷针装在配电装置的架构或房顶上，但在土壤

电阻率大于1000Ω·m的地区，宜装设独立避雷针。否则，应通过验算，采取降低接地电阻或加强绝缘等措施。

35kV及以下高压配电装置架构或房顶不宜装避雷针。

装在架构上的避雷针应与接地网连接，并应在其附近装设集中接地装置。装有避雷针的架构上，接地部分与带电部分间的空气中距离不得小于绝缘子串的长度；但在空气污秽地区，如有困难，空气中距离可按非污秽区标准绝缘子串的长度确定。

除水力发电厂外，装设在架构（不包括变压器门型架构）上的避雷针与主接地网的地下连接点至变压器接地线与主接地网的地下连接点之间，沿接地体的长度不得小于15m。

(8) 除水力发电厂外，在变压器门型架构上和在离变压器主接地线小于15m的配电装置的架构上，当土壤电阻率大于350 Ω·m时，不允许装设避雷针、避雷线；如不大于350 Ω·m，则应根据方案比较确有经济效益，经过计算采取相应的防止反击措施，并至少遵守下列规定，方可在变压器门型架构上装设避雷针、避雷线。

1) 装在变压器门型架构上的避雷针应与接地网连接，并应沿不同方向引出3～4根放射形水平接地体，在每根水平接地体上离避雷针架构3～5m处装设一根垂直接地体。

2) 直接在3～35kV变压器的所有绕组出线上或在离变压器电气距离不大于5m条件下装设阀式避雷器。

高压侧电压35kV变电所，在变压器门型架构上装设避雷针时，变电所接地电阻不应超过4Ω（不包括架构基础的接地电阻）。

35kV配电装置，在土壤电阻率不大于500Ω·m的地区，允许将线路的避雷线引接到出线门型架构上，但应装设集中接地装置。在土壤电阻率大于500Ω·m的地区，避雷线应架设到线路终端杆塔为止。从线路终端杆塔到配电装置的一档线路的保护，可采用独立避雷针，也可在线路终端杆塔上装设避雷针。

(9) 火力发电厂烟囱附近的引风机及其电动机的机壳应与主接地网连接，并应装设集中接地装置，该接地装置宜与烟囱的接地装置分开。如不能分开，引风机的电源线应采用带金属外皮的电缆，电缆的金属外皮应与接地装置连接。机械通风冷却塔上电动机的电源线、装有避雷针和避雷线的架构上的照明灯电源线，均必须采用直接埋入地下的带金属外皮的电缆或穿入金属管的导线。电缆外皮或金属管埋地长度在10m以上，才允许与35kV及以下配电装置的接地网及低压配电装置相连接。

严禁在装有避雷针、避雷线的构筑物上架设未采取保护措施的通信线、广播线和低压线。

(10) 独立避雷针、避雷线与配电装置带电部分间的空气中距离以及独立避雷针、避雷线的接地装置与接地网间的地中距离。

1) 独立避雷针与配电装置带电部分、发电厂和变电所电气设备接地部分、架构接地部分之间的空气中距离，应符合下式的要求

$$S_a \geqslant 0.2R_i + 0.1h \tag{13-16}$$

式中 S_a——空气中距离，m；

R_i——避雷针的冲击接地电阻，Ω；

h——避雷针校验点的高度，m。

2) 独立避雷针的接地装置与发电厂或变电所接地网间的地中距离，应符合下式的要求

$$S_e \geqslant 0.3R_i \tag{13-17}$$

式中　S_e——地中距离，m。

3）避雷线与配电装置带电部分、发电厂和变电所电气设备接地部分以及架构接地部分间的空气中距离，应符合下列要求。

对一端绝缘另一端接地的避雷线

$$S_a \geqslant 0.2R_i + 0.1(h + \Delta l) \tag{13-18}$$

式中　h——避雷线支柱的高度，m；

Δl——避雷线上校验的雷击点与接地支柱的距离，m。

对两端接地的避雷线

$$S_a \geqslant \beta'[0.2R_i + 0.1(h + \Delta l)] \tag{13-19}$$

式中　β'——避雷线分流系数；

Δl——避雷线上校验的雷击点与最近支柱间的距离，m。

避雷线分流系数可按下式计算

$$\beta' = \frac{l + \dfrac{\tau_t R_i}{12.4(l_2 + h)}}{l + \dfrac{\Delta l + h}{l_2 + h} + \dfrac{\tau_t R_i}{6.2(l_2 + h)}} \approx \frac{l_2 + h}{l_2 + \Delta l + 2h} \tag{13-20}$$

式中　l_2——避雷线上校验的雷击点与另一端支柱间的距离，$l_2 = l' - \Delta l$，m；

l'——避雷线两支柱间的距离，m；

τ_t——雷电流波头长度，一般取 2.6μs。

4）避雷线的接地装置与发电厂或变电所接地网间的地中距离，应符合下列要求：

对一端绝缘另一端接地的避雷线，应按式（13-17）校验。对两端接地的避雷线应按下式校验

$$S_e \geqslant 0.3\beta' R_i \tag{13-21}$$

5）除上述要求外，对避雷针和避雷线，S_a 不宜小于 5m，S_e 不宜小于 3m。

对 66kV 及以下配电装置，包括组合导线、母线廊道等，应尽量降低感应过电压，当条件许可时，S_a 应尽量增大。

13.2.4.2　范围Ⅰ发电厂和变电所高压配电装置的雷电侵入波过电压保护：

（1）35～110kV 架空送电线路，应在变电所 1～2km 的进线段架设避雷线。

220kV 架空送电线路，在 2km 进线保护段范围内以及 35～110kV 线路在 1～2km 进线保护段范围内的杆塔耐雷水平应该符合表 13-9 的要求。

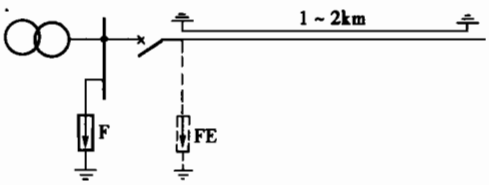


图 13-10　35～110kV 变电所的进线保护接线

FE—阀型避雷器

进线保护段上的避雷线保护角宜不超过 20°，最大不应超过 30°。

（2）未沿全线架设避雷线的 35～110kV 线路，其变电所的进线段应采用图 13-10 所示的保护接线。

在雷季，如变电所 35～110kV 进线的隔离开关或断路器可能经常断路运行，同时线路侧又带电，必须在靠近隔离开关或断路器处装设一组排气式避雷器 FE。FE 外间隙距离的整定，应使其在断路运行时，能可靠地保护隔离开关或断路器，而在闭路运行时不动作。如 FE 整定有困难，或无适当参数的排气式避雷器，则可用阀式避雷器代替。

全线架设避雷线的35～220kV变电所，其进线的隔离开关或断路器与上述情况相同时，宜在靠近隔离开关或断路器处装设一组保护间隙或阀式避雷器。

(3) 发电厂、变电所的35kV及以上电缆进线段，在电缆与架空线的连接处应装设阀式避雷器，其接地端应与电缆金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应直接接地［图13－11（a)］；对单芯电缆，应经金属氧化物电缆护层保护器（FC）或保护间隙（FG）接地［图13－11（b)］。

如电缆长度不超过50m或虽超过50m，但经校验，装一组阀式避雷器即能符合保护要求，图13－11中可只装F1或F2。

如电缆长度超过50m，且断路器在雷季可能经常断路运行，应在电线末端装设排气式避雷器或阀式避雷器。

连接电缆段的1km架空线路应架设避雷线。

全线电缆—变压器组接线的变电所内是否需装设阀式避雷器，应视电缆另一端有无雷电过电压波侵入的可能，经校验确定。

1）三芯电缆段的变电所进线保护接线；

2）单芯电缆段的变电所进线保护接线。

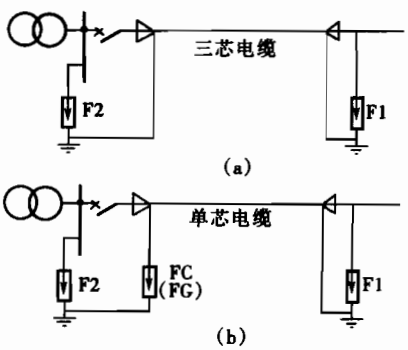


图13－11 具有35kV及以上电缆段的变电所进线保护接线

(a) 末端金属外皮直接接地；

(b) 末端金属外皮经FG接地

(4) 具有架空进线的35kV及以上发电厂和变电所敞开式高压配电装置中阀式避雷器的配置。

1）每组母线上应装设阀式避雷器与主变压器及其他被保护设备的电气距离超过表13－13的考值时，可在主变压器附近增设一组阀式避雷器。

表13－13 普通阀式避雷器至主变压器间的最大电气距离 单位：m

系统标称电压 (kV)	进线长度 (km)	进线路数			
		1	2	3	≥4
35	1	25	40	50	55
	1.5	40	55	65	75
	2	50	75	90	105

注 1. 全线有避雷线进线长度取2km，进线长度在1～2km间时的距离按补插法确定，表13－15同此。

2. 35kV也适用于有串联间隙金属氧化物避雷器的情况。

变电所内所有阀式避雷器应以最短的接地线与配电装置的主接地网连接，同时应在其附近装设集中接地装置。

2）35kV及以上装有标准绝缘水平的设备和标准特性阀式避雷器且高压配电装置采用单母线、双母线或分段的电气主接线时，碳化硅普通阀式避雷器与主变压器间的最大电气距离可参照表13－13确定。对其他电器的最大距离可相应增加35%。

(5) 有效接地系统中的中性点不接地的变压器，如中性点采用分级绝缘且未装设保护间隙，应在中性点装设雷电过电压保护装置，且宜选变压器中性点金属氧化物避雷器。如中性点采用全绝缘，但变电所为单进线且为单台变压器运行，也应在中性点装设雷电过电压保护装置。

不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统中的变压器中性点，一般不装设保护装置，但

多雷区单进线变电所且变压器中性点引出时，宜装设保护装置；中性点接有消弧线圈的变压器，如有单进线运行可能，也应在中性点装设保护装置。该保护装置可任选金属氧化物避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

(6) 自耦变压器必须在其两个自耦合的绕组出线上装设阀式避雷器，该阀式避雷器应装在自耦变压器和断路器之间，并采用图 13－12 的保护接线。

(7) 35～220kV 开关站，应根据其重要性和进线路数等条件，在母线上或进线上装设阀式避雷器。

(8) 与架空线路连接的三绕组自耦变压器、变压器（包括一台变压器与两台电机相连的三绕组变压器）的低压绕组，如有开路运行的可能和发电厂双绕组变压器当发电机断开由高压侧送厂用电时，应在变压器低压绕组三相出线上装设阀式避雷器，以防来自高压绕组的雷电波的感应电压危及低压绕组绝缘；但如该绕组连有 25m 及以上金属外皮电缆段，则可不必装设避雷器。

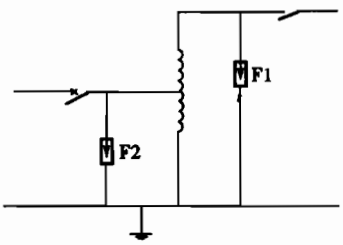


图 13－12　自耦变压器的典型保护接线

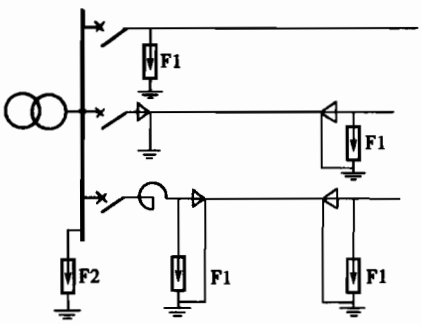


图 13－13　3～10kV 配电装置雷电侵入波的保护接线

(9) 变电所的 3～10kV 配电装置（包括电力变压器），应在每组母线和架空进线上装设阀式避雷器（分别采用电站和配电阀式避雷器），并应采用图 13－13 所示的保护接线。母线上阀式避雷器与主变压器的电气距离不宜大于表 13－14 所列数值。

表 13－14　　阀式避雷器至 3～10kV 主变压器的最大电气距离

雷季经常运行的进线路数	1	2	3	≥4
最大电气距离（m）	15	20	25	30

架空进线全部在厂区内，且受到其他建筑物屏蔽时，可只在母线上装设阀式避雷器。

有电缆段的架空线路，阀式避雷器应装设在电缆头附近，其接地端应和电缆金属外皮相连。如各架空进线均有电缆段，则阀式避雷器与主变压器的最大电气距离不受限制。

阀式避雷器应以最短的接地线与变电所、配电所的主接地网连接（包括通过电缆金属外皮连接）。阀式避雷器附近应装设集中接地装置。

3～10kV 配电所（配电所指所内仅有起开闭和分配电能作用的配电装置，而母线上无主变压器），当无所用变压器时，可仅在每路架空进线上装设阀式避雷器。

13.2.4.3　配电系统的雷电过电压保护：

(1) 3～10kV 配电系统中的配电变压器应装设阀式避雷器保护。阀式避雷器应尽量靠近变压器装设，其接地线应与变压器低压侧中性点（中性点不接地时则为中性点的击穿保险器的接地端）以及金属外壳等连在一起接地。

（2）3～10kV Y，yn 和 Y，y（低压侧中性点接地和不接地）接线的配电变压器，宜在低压侧装设一组阀式避雷器或击穿保险器，以防止反变换波和低压侧雷电侵入波击穿高压侧绝缘。但厂区内的配电变压器可根据运行经验确定。

低压侧中性点不接地的配电变压器，应在中性点装设击穿保险器。

（3）35～0.4kV 配电变压器，其高低压侧均应装设阀式避雷器保护。

（4）3～10kV 柱上断路器和负荷开关应装设阀式避雷器保护。经常断路运行而又带电的柱上断路器、负荷开关或隔离开关，应在带电侧装设阀式避雷器，其接地线应与柱上断路器等的金属外壳连接，且接地电阻不应超过 10Ω。

装设在架空线路上的电容器宜装设阀式避雷器保护。

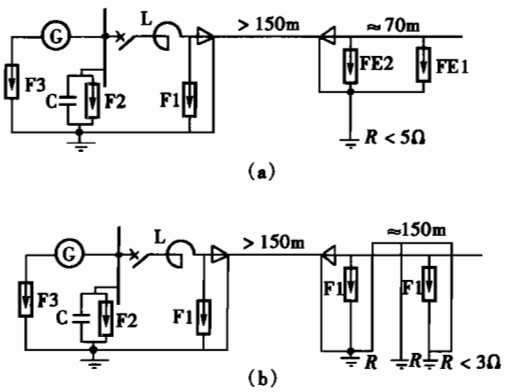


图 13－14　25000～60000kW 直配电机的保护接线

（a）进线段采用耦合地线的保护接线；

（b）进线段采用避雷线的保护接线

F1—配电阀式避雷器；F2—旋转电机阀式避雷器；F3—旋转电机中性点阀式避雷器；FE1、FE2—排气式避雷器；G—发电机；L—限制短路电流用电抗器；C—电容器

13.2.5　旋转电机的雷电过电压保护

13.2.5.1　与架空线路直接连接的旋转电机（发电机、同步调相机、变频机和电动机，简称直配电机）的保护方式，应根据电机容量、雷电活动的强弱和对运行可靠性的要求确定。

13.2.5.2　单机容量为 25000～60000kW 的直配电机，宜采用图 13－14（a）所示的保护接线。60000kW 以上的电机，不应与架空线路直接连接。

排气式避雷器 FE1 和 FE2 的冲击放电电压不应超过表 13－15 所列的数值。

表 13－15　　排气式避雷器 FE1 和 FE2 的冲击放电电压

系统标称电压（kV）	3	6	10
预放电时间为 2μs 的冲击放电电压（kV）	40	50	60

FE1 和 FE2 的接地端应用钢绞线连接。钢绞线架设在导线下方，距导线应小于 3m 但大于 2m，并应与电缆首端的金属外皮在装设 FE2 杆塔处连在一起接地，工频接地电阻 R 不应大于 5Ω。

进线电缆段应直接埋设在土壤中，以充分利用其金属外皮的分流作用。如受条件限制不能直接埋设，可将电缆金属外皮多点接地，即除两端接地外，再在两端间的 3～5 处接地。

如电缆首端的短路电流较大，按图 13－14（a）所示的保护接线无适当参数的排气式避雷器可用时，可改用图 13－14（b）所示的保护接线。

进线段上的阀式避雷器的接地端，应与电缆的金属外皮和避雷线连在一起接地，接地电阻 R 不应大于 3Ω。

13.2.5.3　单机容量为 6000～25000kW（不含 25000kW）的直配电机，宜采用图 13－15（a）所示的保护接线。在多雷区，也可采用图 13－14 所示的保护接线。

如电缆首端的短路电流较大，按图 13－15（a）所示的保护接线无适当参数的排气式避雷器可用时，可改用图 13－15（b）所示的保护接线。

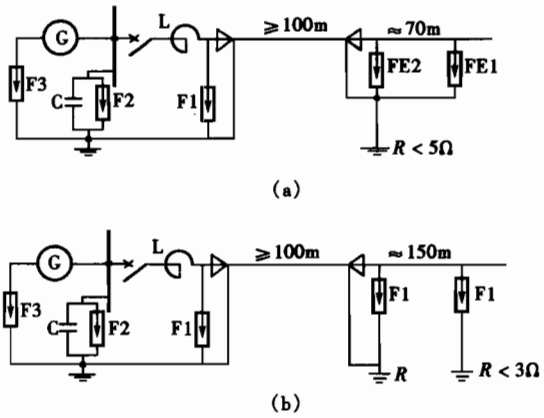


图 13－15　6000～25000kW（不含 25000kW）直配电机的保护接线

（a）进线段采用耦合地线的保护接线；

（b）进线段无耦合地线的保护接线

13.2.5.4　单机容量为 6000～12000kW 的直配电机，如出线回路中无限流电抗器，可采用图 13－16 所示的保护接线。在雷电活动特殊强烈地区，宜采用有电抗线圈的图 13－16（a）所示的保护接线。

13.2.5.5　单机容量为 1500～6000kW（不含 6000kW）或少雷区 60000kW 及以下的直配电机，可采用图 13－17 所示的保护接线。

在进线保护段长期 l_0 内，应装设避雷针或避雷线。

进线保护段长期与排气式避雷器接地电阻的关系应符合下列要求：

对 3kV 和 6kV 线路

$$\frac{l_0}{R} \geqslant 200 \qquad (13-22)$$

对 10kV 线路

$$\frac{l_0}{R} \geqslant 150 \qquad (13-23)$$

式中　l_0——进线保护段长度，m；

R——接地电阻，Ω。

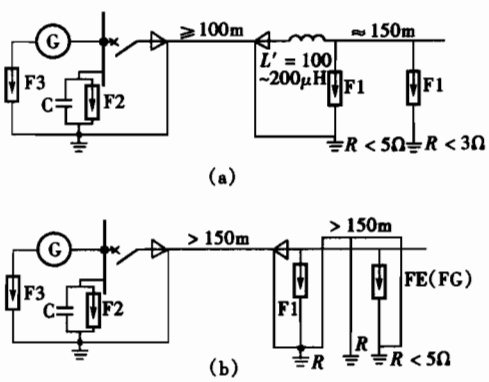


图 13－16　6000～12000kW 直配电机的保护接线

（a）进线段采用耦合地线的保护接线；

（b）进线段无耦合地线的保护接线

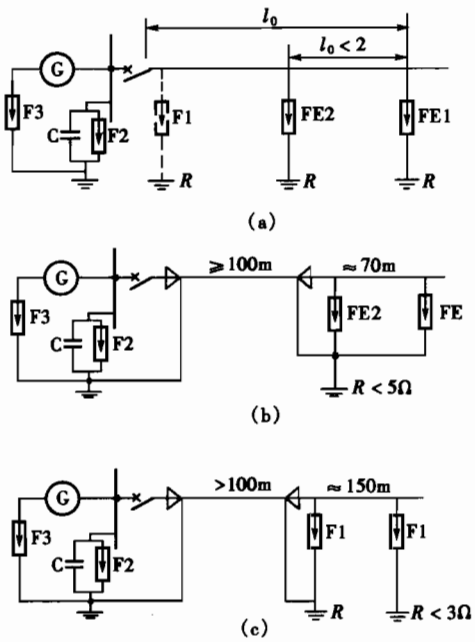


图 13－17　1500～6000kW（不含 6000kW）直配电机和少量地区 60000kW 及以下直配电机的保护接线

（a）进线段采用 FE 的保护接线；（b）进线段采用耦合地线的保护接线；（c）进线段采用 F 的保护接线

进线保护段长期一般采用 450～600m。

在进线保护段上如有排气式避雷器 FE2，接地电阻 r 可取两组排气式避雷器 FE1 和 FE2 接地电阻的并联值。

图 13－17（a）中的阀式避雷器 F1 主要用来保护断路器或隔离开关。

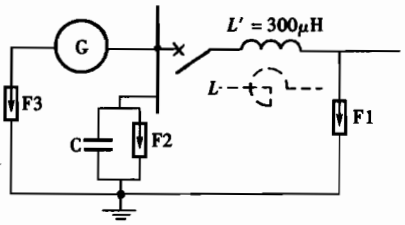


图 13－18　1500～6000kW 直配电机或列车电站直配电机的保护接线

13.2.5.6　单机容量为 1500～6000kW 或列车电站的直配电机，可采用图 13－18 有电抗线圈或限流电抗器的保护接线。

单机容量为 1500kW 以下的直配电机，采用 13.2.5.7，13.2.5.8 条规定的保护方式有困难时，也可采用图 13－18 所示的保护接线。

13.2.5.7　单机容量为 1500kW 及以下的直配电机，宜采用图 13－19 所示的保护接线。

13.2.5.8　容量为 25000kW 及以上的直配电机，应在每台电机出线处装设一组旋转电机阀式避雷器。25000kW 以下的直配电机，避雷器也应尽量靠近电机装设，在一般情况下，避雷器可装在电机出线处；如接在每一组母线上的电机不超过两台，避雷器也可装在每一组母线上。

13.2.5.9　如直配电机的中性点能引出且未直接接地，应在中性点上装设旋转电机中性点阀式避雷器。

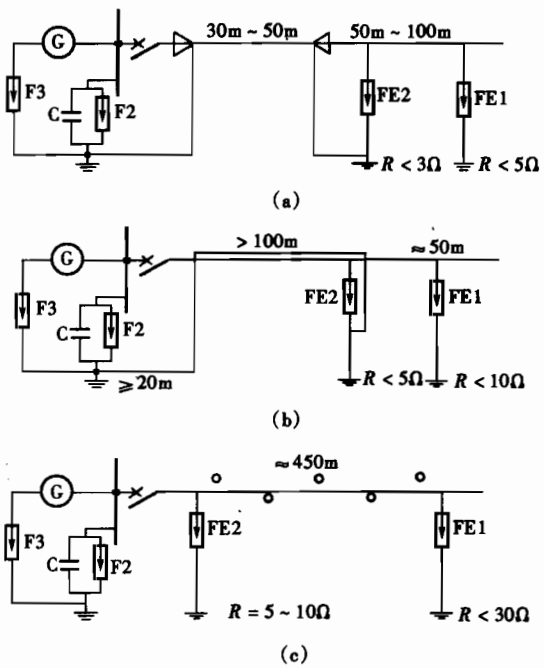


图 13－19　1500kW 及以下直配电机的保护接线

（a）进线段采用 FE 的保护接线；（b）进线段采用避雷线的保护接线；（c）进线段采用避雷针的保护接线

13.2.5.10　保护直配电机用的避雷线，对边导线的保护角不应大于 30°。

13.2.5.11　为保护直配电机匝间绝缘和防止感应过电压，装在每相母线上的电容器，包括电缆段电容在内应为 0.25～0.5μF；对于中性点不能引出或双排非并绕绕组的电机，应为 1.5～2μF（图 13－14～图 13－19）。

电容器宜有短路保护。

13.2.5.12　无架空直配线的发电机，如发电机与升压变压器之间的母线桥或组合导线无金属屏蔽部分的长度大于 50m，应采取防止感应过电压的措施，在发电机回路或母线的每相导线上装设不小于 0.15μF 的电容器或旋转电机阀式避雷器。如已按 13.2.4.2 条（8）款要求装设避雷器，则可不再采取措施，但该避雷器应选用旋转电机阀式避雷器。

13.2.5.13　在多雷区，经变压器与架空线路连接的非直配电机，如变压器高压侧的系统标称电压为 66kV 及以下时，为防止雷电过电压经变压器绕组的电磁传递而危及电机的绝缘，宜在电机出线上装设一组旋转电机阀式避雷器。变压器高压侧的系统标称电压为 110kV 及以上时，电机出线上是否装设避雷器可经校验确定。

13.3 建筑物防雷分类及保护措施

13.3.1 建筑物防雷分类的原则

13.3.1.1 遇下列情况之一时，应划为一类防雷建筑物：

（1）凡制造、使用或贮存炸药、火药、起爆药、火工品等大量爆炸物质的建筑物，因电火花而引起爆炸，会造成巨大破坏和人身伤亡者。

（2）具有0区或10区爆炸危险环境的建筑物。

（3）具有1区爆炸危险环境的建筑物，因电火花而引起爆炸，会造成巨大破坏或人身伤亡者。

13.3.1.2 遇下列情况之一时，应划为二类防雷建筑物：

（1）国家重点文物保护的建筑物。

（2）国家级的会堂、办公建筑物、大型展览和博览建筑物、大型火车站、国宾馆、国家级档案馆、大型城市的重要给水水泵房等特别重要的建筑物。

（3）国家级计算中心、国际通信枢纽等对国民经济有重要意义且装有大量电子设备的建筑物。

（4）制造、使用或贮存爆炸物质的建筑物，且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。

（5）具有1区爆炸危险环境的建筑物，且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。

（6）具有2区或11区爆炸危险环境的建筑物。

（7）工业企业内有爆炸危险的露天钢质封闭气罐。

（8）预计雷击次数大于0.06次/a的部、省部办公建筑物及其他重要或人员密集的公共建筑物。

（9）预计雷击次数大于0.3次/a的住宅、办公楼等一般性民用建筑物。

13.3.1.3 遇下列情况之一时，应划为三类防雷建筑物：

（1）省级重点文物保护的建筑物及省级档案馆。

（2）预计雷击次数大于或等于0.012次/a，且小于或等于0.06次/a的部、省级办公建筑物及其他重要或人员密集的公共场所。

（3）预计雷击次数大于或等于0.06次/a，且小于或等于0.3次/a的住宅、办公楼等一般性民用建筑物。

（4）预计雷击次数大于或等于0.06次/a的一般性工业建筑物。

（5）根据雷击后对工业生产的影响及产生的后果，并结合当地气象、地形、地质及周围环境等因素，确定需要防雷的21、22、23区火灾危险环境。

（6）在平均雷暴日大于15d/a的地区，高度在15m及以上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物；在平均雷暴日小于或等于15d/a地区，高度在20m及以上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物。

13.3.2 第一类防雷建筑物的防雷措施

13.3.2.1 第一类防雷建筑物防直击雷的措施应符合下列要求：

（1）应设独立避雷针或架空避雷线（网），使被保护的建筑物及风帽、放散管等凸出屋面的物体均处于接闪器的保护范围内。架空避雷网的网格尺寸不应大于5m×5m或6m×4m。

（2）排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等的管口外的以下空间应处于接闪器的保护范围内：当有管帽时应按表 13－16 确定；当无管帽时，应为管口上方半径 5m 的半球体，接闪器与雷闪的接触点应设在上述空间之外。

表 13－16　　有管帽的管口外处于接闪器保护范围内的空间

装置内的压力与周围空气压力的压力差（kPa）	排放物的比重	管帽以上的垂直高度（m）	距管口处的水平距离（m）
<5	重于空气	1	2
5～25	重于空气	2.5	5
≤25	轻于空气	2.5	5
>25	重或轻于空气	5	5

（3）排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等，当排放物达不到爆炸浓度、长期点火燃烧、一排放就点火燃烧时，及发生事故时排放物才达到爆炸浓度的通风管、安全阀，接闪器的保护范围可仅保护到管帽，无管帽时可仅保护到管口。

（4）独立避雷针的杆塔、架空避雷线的端部和架空避雷网的各支柱处应至少设 1 根引下线。对金属制成或有焊接、绑扎连接钢筋网的杆塔、支柱，宜利用其作为引下线。

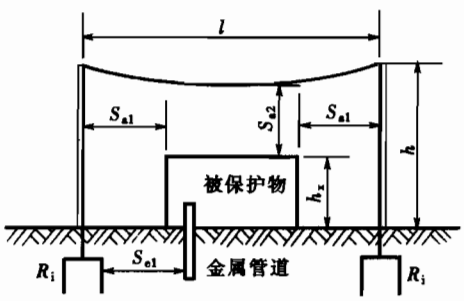


图 13－20　防雷装置至被护物的距离

（5）独立避雷针和架空避雷线（网）的支柱及其接地装置至被保护建筑物及与其有联系的管道、电缆等金属物之间的距离（见图13－20），应符合式（13－24）～式（13－26）的要求，但不得小于 3m。

1）地上部分：当 $h_x < 5R_i$ 时

$$S_{a1} \geqslant 0.4\ (R_i + 0.1h_x) \tag{13-24}$$

当 $h_x \geqslant 5R_i$ 时

$$S_{a1} \geqslant 0.1\ (R_i + h_x) \tag{13-25}$$

2）地下部分

$$S_{e1} \geqslant 0.4R_i \tag{13-26}$$

式中　S_{a1}——空气中距离，m；

S_{e1}——地中距离，m；

R_i——独立避雷针或架空避雷线（网）支柱处接地装置的冲击接地电阻，Ω；

h_x——被保护物或计算点的高度，m。

（6）架空避雷线至屋面或各种凸出屋面的风帽、放散管等物体间的距离（见图13－20），应符合下列表达式的要求，但不应小于 3m。

1）当（$h + l/2$）$< 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geqslant 0.2R_i + 0.03(h + l/2)$$

2）当（$h + l/2$）$\geqslant 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geqslant 0.05R_i + 0.06(h + l/2)$$

式中 S_{a2}——避雷线（网）至被保护物的空气中距离，m；

h——避雷线（网）的支柱高度，m；

l——避雷线的水平长度，m。

（7）架空避雷网至屋面和突出屋面的风帽、放散管等物体间的距离，应符合下列表达式的要求，但不应小于3m。

当（$h + l_1$）$< 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geqslant 1/n\ [0.4R_i + 0.06\ (h + l_1)]$$

当（$h + l_1$）$\geqslant 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geqslant 1/n\ [0.1R_i + 0.12\ (h + l_1)]$$

式中 l_1——从避雷线中间最低点沿导体至最近支柱的距离，m；

n——从避雷线中间最低点沿导体至最近不同支柱并有同一距离 l_1 的个数。

（8）独立避雷针、架空避雷线或架空避雷网应有独立的接地装置，每一引下线的冲击接地电阻不宜大于10Ω。在土壤电阻率高的地区，可适当增大冲击接地电阻。

（9）当建筑物太高或其他原因难以装设独立避雷针、架空避雷线、避雷网时，可将避雷针或避雷网或二者混合组成的接闪器直接装在建筑物上，避雷网应沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设。并应符合下列要求：

1）所有避雷针应采取避雷带互相连接。

2）引下线不应少于2根，并应沿建筑物四周均匀或对称布置，其间距不应大于12m。

3）排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的管道应符合第13.3.2.1条之（2）、（3）款的要求。

4）建筑物应设均压环，环间垂直距离不应大于12m，所有引下线、建筑物的金属结构和金属设备均应连到环上。均压环可利用电气设备的接地干线环路。

5）防直击雷的接地装置应环绕建筑物设成环形接地体，每根引下线的冲击接地电阻不应大于10Ω，并应和电气设备接地装置及所有进入建筑物的金属管道相连，此接地装置可兼作防雷电感应之用。

6）当建筑物高于30m时，尚应采取以下防侧击雷的措施：

a. 从30m起，每隔不大于6m沿建筑物四周设水平避雷带并与引下线相连。

b.30m及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物应与防雷装置相连。

7）在电源引入的总配电箱处宜装设过电压保护器。

13.3.2.2 第一类防雷建筑物防雷电感应的措施应符合下列要求：

（1）建筑物内的设备、管道、构架、电缆金属外皮、钢屋架、钢窗等较大金属物和凸出屋面的放散管、风道等金属物，均应接到防雷电感应的接地装置上。

金属屋面周边每隔18～24m应采用引下线接地一次。

(2) 平行敷设的管道、构架和电缆金属外皮等长金属物，其净距小于100mm时应采用金属线跨接，跨接点的间距不应大于30m；交叉净距小于100mm时，其交叉处亦应跨接。

当长金属物的弯头、阀门、法兰盘等连接处的过渡电阻大于0.03Ω时，连接处应用金属线跨接。对有不少于5根螺栓连接的法兰盘，在非腐蚀环境下，可不跨接。

(3) 防雷电感应的接地装置应和电气设备接地装置共用，其工频接地电阻不应大于10Ω。防雷电感应的接地装置与独立避雷针或架空避雷网的接地装置之间的距离应符合13.3.2.1 (5) 款的要求。

室内接地干线与防雷电感应接地装置的连接，不应少于两处。

13.3.2.3 第一类防雷建筑物防止雷电波侵入的措施，应符合下列要求：

(1) 低压线路宜全线采用电缆直接埋地敷设，在入户端应将金属的外皮、钢管接到防雷电感应的接地装置上。当全线采用电缆有困难时，可采用钢筋混凝土杆和铁横担的架空线，并应使用一段金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入，其埋地长度 l 应符合下列表达式的要求，但不应小于15m。

$$l \geqslant 2\sqrt{\rho} \tag{13-27}$$

式中 l——金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直埋于地中的长度，m；

ρ——埋电缆处的土壤电阻率，Ω·m。

在电缆与架空线连接处，尚应装设避雷器。避雷器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子钢脚、金具等应连在一起，其冲击接地电阻不应大于10Ω。

(2) 架空金属管道，在进出建筑物处，应与防雷电感应的接地装置相连。距离建筑物100m内的管道，应每隔25m连地一次，其冲击接地电阻不应大于20Ω，并宜利用金属支架或钢筋混凝土支架的焊接、绑扎钢筋作为引下线，其钢筋混凝土基础宜作为接地装置。

埋地或地沟内的金属管道，在进出建筑物处亦应与防雷电感应的接地装置相连。

13.3.3 第二类防雷建筑物的防雷措施

13.3.3.1 第二类防雷建筑物防直击雷的措施应符合下列要求：

(1) 宜采用装设在建筑物上的避雷网（带）或避雷针或这二者混合组成的接闪器。避雷网（带）应沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设，并应在整个屋面组成不大于10m×10m或12m×8m的网格。所有避雷针应采用避雷带互相连结。

(2) 凸出屋面的放散管、风管、烟囱等物体，应按下列方式保护：

1) 排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等管道应符合第13.3.2.1条之 (2) 款的要求。

2) 排放无爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、烟囱，1、11区和2区爆炸危险环境的自然通风管、装有阻火器的排放爆炸危险气体、蒸汽或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管，第13.3.2.1条之 (3) 款规定的管、阀及煤气放散管等，其防雷保护应符合下列要求：

a. 金属物体可不装接闪器，但应和屋面防雷装置相连。

b. 在屋面接闪器保护范围之外的非金属物体应装接闪器，并和屋面防雷装置相连。

(3) 引下线不应少于2根，并应沿建筑物四周均匀或对称布置，其间距不应大于18m。当仅利用建筑物四周的钢柱或柱子钢筋作为引下线时，可按跨度设引下线，但引下线的平均间距不应大于18m。

(4) 每根引下线的冲击接地电阻不应大于10Ω，防直击雷宜和防雷电感应、电气设备、信息系统等接地共用同一接地装置，并宜与埋地金属管道相连；当不共用、不相连时，两者

间在地中的距离符合下式的要求，但不应小于2m。

$$S_{e2} \geqslant 0.3 k_c R_i$$

式中 S_{e2}——地中距离，m；

k_c——分流系数。

分流系数，单根引下线应为1，两根引下线及接闪器不成闭合环的多根引下线应为0.66，接闪器成闭合环或网状的多根引下线应为0.44。

在共用接地装置与金属管道相连的情况下，接地装置宜围绕建筑物敷设成环形接地体。

(5) 利用建筑物的钢筋作为防雷装时应符合下列要求：

1) 建筑物宜利用钢筋混凝土屋面、梁、柱、基础内的钢筋作引下线，13.3.1.2条(2)、(3)、(8)、(9)款规定的建筑物，尚宜利用其作为接闪器。

2) 当基础采用硅酸盐水泥和周围土壤的含水量不低于4%及基础的外表无防腐层或有沥青质的防腐层时，宜利用基础内的钢筋作接地装置。

3) 敷设在混凝土中作为防雷装置的钢筋或圆钢，当仅一根时，其直径不应小于10mm。被利用作为防雷装置的混凝土构件内有箍筋连接的钢筋，其截面积总和不应小于一根直径为10mm钢筋的截面积。

4) 利用基础内钢筋网作为接地体时，在周围地面以下距地面不小于0.5m，每根引下线所连接的钢筋表面积总和应符合下式的要求

$$S \geqslant 4.24 k_c^2$$

式中 S——钢筋表面积总和，m^2。

5) 当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时，接地体的规格尺寸不应小于表13-17的规定。

表13-17　　第二类防雷建筑物环形人工基础接地体的规格尺寸

闭合条形基础的周长（m）	扁钢（mm）	圆钢，根数×直径（mm）
≥60	4×25	2×ϕ10
≥40周长<60	4×50	4×ϕ10或3×ϕ12
<40	钢筋表面积总和≥4.24m^2	

6) 构件内有箍筋连接的钢筋或成网状的钢筋，其箍筋与钢筋的连接，钢筋与钢筋的连接应采用土建施工的绑扎法连接或焊接。单根钢筋或圆钢或外引预埋连接板、线与上述钢筋的连接应焊接或采用螺栓紧固的卡夹器连接。构件之间必须连接成电气通路。

(6) 当土壤电阻率ρ小于或等于3000Ω·m时，在防雷的接地装置同其他接地装置和进出建筑物的管道相连的情况下，防雷的接地装置可不计及接地电阻值，但其接地体应符合GB50057—1994（2000年版）《建筑物防雷设计规范》3.3.6条的有关规定。

13.3.3.2 有爆炸危险的建筑物，其防雷电感应的措施应符合下列要求：

(1) 建筑物内的设备、管道、构架等主要金属物，应就近接至防直击雷接地装置或电气设备的保护接地装置上，可不另设接地装置。

(2) 平行敷设的管道、构架及电缆金属外皮等长金属物应符合13.3.2.2(2)款的要求，但长金属物连接处可不跨接。

(3) 建筑物内防雷电感应的接地干线与接地装置的连接不应少于两处。

13.3.3.3 防止雷电流经引下线和接地装置产生的高电位对附近金属物或电气线路的反击，应符合下列要求：

（1）当金属物或电气线路与防雷的接地装置之间不相连时，其与引下线之间的距离应按下列表达式确定：

当 $l_x < 5R_i$ 时

$$S_{a3} \geqslant 0.3k_c\ (R_i + 0.1l_x) \tag{13-28}$$

当 $l_x \geqslant 5R_i$ 时

$$S_{a3} \geqslant 0.075k_c\ (R_i + l_x) \tag{13-29}$$

式中 S_{a3}——空气中距离，m；

R_i——引下线的冲击接地电阻，Ω；

l_x——引下线计算点到地面的长度，m。

当金属物或电气线路与防雷的接地装置之间相连或通过过电压保护器相连时，其与引下线之间的距离应按下列表达式确定

$$S_{a4} \geqslant 0.075k_c l_x \tag{13-30}$$

式中 S_{a4}——空气中距离，m；

l_x——引下线计算点到地面的长度，m。

当利用建筑物的钢筋或钢结构作为引下线，同时建筑物的大部分钢筋、钢结构等金属物与被利用的部分连成整体时，金属物或线路与引下线之间的距离可不受限制。

当金属物或线路与引下线之间有自然接地或人工接地的钢筋混凝土构件、金属板、金属网等静电屏蔽物隔开时，金属物或线路与引下线之间的距离可不受限制。

当金属物或线路与引下线之间有混凝土墙或砖墙隔开时，混凝土墙的击穿强度应与空气击穿强度相同；砖墙的击穿强度应为空气击穿强度 1/2。当距离不能满足式（13－28）～式（13－30）的要求时，金属物或线路应与引下线直接相连或通过过电压保护器相连。

（2）在电气接地装置与防雷接地装置共用或相连的情况下：当低压电源线路用全长电缆或架空线换电缆引入时，宜在电源线路引入的总配电箱处装设过电压保护器；当 Y，yn0 或 D，yn11 接线的配电变压器设在本建筑物内或附设于外墙处时，在高压侧采用电缆进线的情况下，宜在变压器高、低压侧各相上装设避雷器；在高压侧采用架空进线的情况下，除按国家现行有关规范的规定在高压侧装设避雷器外，尚宜在低压侧各相上装设避雷器。

13.3.3.4 防雷电波侵入的措施，应符合下列要求：

（1）当低压线路全长采用埋地电缆或敷设在架空金属线槽内的电缆引入时，在入户端应将电缆金属外皮、金属线槽接地；对于 13.3.1.2 之（4）、（5）、（6）款规定的建筑物，上述金属物尚应与防雷的接地装置相连。

（2）对于 13.3.1.2（4）、（5）、（6）款规定的建筑物，其低压电源线路应符合下列要求：

1）低压架空线路应改换一段埋地金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入，其埋地长度应符合式（13－27）的要求，但电缆的埋地长度不应小于 15m。入户端电缆的金属外皮、钢管应与防雷的接地装置相连。在电缆与架空线的连接处尚应装设避雷器。避雷器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子铁脚、金具等应连接在一起接地，其冲击接地电阻不应大于 10Ω。

2）平均雷暴日少于 30d/a 地区的建筑物，可采用低压架空线直接引入建筑物内，但应

符合下列要求：

a. 在入户处应装设避雷器或设 2～3mm 的空气间隙，并应与绝缘子铁脚、金具连在一起接到防雷接地装置上，防雷接地电阻不应大于 5Ω。

b. 入户处的三基电杆绝缘子铁脚、金具应接地，靠近建筑物的电杆，其接地电阻不应大于 10Ω，其余两基电杆不应大于 20Ω。

（3）对于 13.3.1.2 之（1）、（2）、（3）、（8）、（9）款规定的建筑物，其低压电源线路应符合下列要求：

1）当低压架空线转换金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入时，其埋地长度应大于或等于 15m，尚应符合 13.3.3.4 之（2）款 1）项的要求。

2）当架空线直线引入时，在入户处应加装避雷器。并将其与绝缘子铁脚、金具连在一起接到电气装置的接地装置上，靠近建筑物的两基电杆的绝缘子铁脚应接地，其冲击接地电阻不应大于 30Ω。

（4）架空和直接埋地的金属管道在进出建筑物处应就近与防雷接地装置相连；当不相连时，架空管道应接地，其冲击接地电阻不应大于 10Ω。对于 13.3.1.2 之（4）、（5）、（6）款规定的建筑物，引入、引出该建筑物的金属管道在进出处应与防雷接地装置相连；对架空金属管道尚应在距建筑物约 25m 处接地一次，其冲击接地电阻不应大于 10Ω。

13.3.3.5 高度超过 45m 的钢筋混凝土结构、钢结构建筑物，尚应采取以下防侧击雷和等电位的保护措施：

（1）钢构架和混凝土的钢筋应互相连接，钢筋的连接应符合 13.4.3.1 条（5）款的要求；

（2）应利用钢柱或柱子钢筋作为防雷引下线；

（3）应将 45m 及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物与防雷装置相连；

（4）竖直敷设的金属管道及金属物的顶端和底端与防雷装置连接。

13.3.3.6 有爆炸危险的露天钢制封闭气罐，当其壁厚不小于 4mm 时，可不装设接闪器，但应接地，且接地点不应少于两处；两接地点间距离不宜大于 30m，冲击接地电阻不应大于 30Ω。当防雷的接地装置符合 13.4.3.1 条（6）款的规定时，可不计及接地电阻值，放散管和呼吸阀的保护应符合 13.4.3.1 条（2）款的要求。

13.3.4 第三类防雷建筑物的防雷措施

13.3.4.1 第三类防雷建筑物防直击雷的措施应符合下列要求：

（1）宜采用装设在建筑物上的避雷网（带）或避雷针或由这二者混合组成的接闪器。避雷网（带）应沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设。并应在整个屋面组成不大于 20m×20m 或 24m×16m 的网格。

平屋面的建筑物，当其宽度不大于 20m 时，可仅沿周边敷设一圈避雷带。

（2）每根引下线的冲击接地电阻不宜大于 30Ω，但对于第 13.3.1.2 条之（2）款规定的建筑不宜大于 10Ω。其接地装置宜与电气设备等接地装置共用。防雷的接地装置宜与埋地金属管道相连。当不共用、不相连时，两者间在地中的距离不应小于 2m。

在共用接地装置与埋地金属管道相连情况下，接地装置宜围绕建筑物敷设成环形接地体。

（3）建筑物宜利用钢筋混凝土屋面板、梁、柱和基础的钢筋作为接闪器、引下线和接地装置，并应符合 13.3.3.1（5）条之 2）、3）、6）款和下列的规定：

1）利用基础内钢筋网作接地体时，在周围地面以下距地面不小与0.5m，每根引下线所连接的钢筋表面积总和应符合下列表达式的要求

$$S \geqslant 1.89k_c^2$$

式中　S——钢筋表面积总和，m^2。

2）当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础中敷设人工基础接地体时，接地体的规格尺寸不应小于表13－18的规定。

表13－18　　第三类防雷建筑物环形人工基础接地体的规格尺寸

闭合条形基础的周长（m）	扁钢（mm）	圆钢，根数×直径（mm）
≥60		1×φ10
≥40～<60	4×20	2×φ8
<40	钢筋表面积总和≥1.89mm²	

（4）当土壤电阻率 ρ 小于或等于3000Ω·m时，在防雷的接地装置同其他接地装置和进出建筑物的管道相连的情况下，防雷的接地装置可不计及接地电阻值，但其接地体应符合GB50057—1994（2000年版）《建筑物防雷设计规范》3.3.6条及3.4.3条的有关规定。

（5）凸出屋面的物体的保护方式应符合13.3.3.1条（2）款的规定。

（6）砖烟囱、钢筋混凝土烟囱，宜在烟囱上装设避雷针或避雷环保护。多支避雷针应连接在闭合环上。

当非金属烟囱无法采用单支或双支避雷针保护时，应在烟囱口设环形避雷带，并应对称布置三支高出烟囱口不低于0.5m的避雷针。

钢筋混凝土烟囱的钢筋应在其顶部和底部与引下线和贯通连接的金属爬梯相连，当符合13.3.4.1条（3）款的要求时，宜利用钢筋作引下线和接地装置，可不另设专用引下线。

高度不超过40m的烟囱，可只设一根引下线，超过40m时，应设两根引下线。可利用螺栓连接或焊接的一座金属爬梯作为两根引下线使用。

金属烟囱应作为接闪器和引下线。

（7）引下线不应少于两根，但周长不超过25m且高度不超过40m的建筑物可只设一根引下线。引下线应沿建筑物四周均匀或对称布置，其间距不应大于25m。当仅利用建筑物四周的钢柱或柱子钢筋作为引下线时，可按跨度设引下线，但引下线的平均间距不应大于25m。

13.3.4.2　防止雷电流经引下线和接地装置产生的高电位对附近金属物或电气线路的反击，应符合13.3.3.3条的要求，并按下列表达式计算：

当 $l_x < 5R_i$ 时

$$S_{a3} \geqslant 0.2k_c\ (R_i + 0.1l_x)$$

当 $l_x \geqslant 5R_i$ 时

$$S_{a3} \geqslant 0.05k_c\ (R_i + l_x)$$

$$S_{a4} \geqslant 0.05k_c l_x$$

式中的符号含义同13.3.3.3条。

13.3.4.3　防雷电波侵入的措施，应符合下列要求：

（1）对电缆进出线，应在进出端将电缆的金属外皮、钢管等与电气设备接地装置相连，

当电缆转换为架空线时，应在转换处装设避雷器；避雷器、电缆金属外皮和绝缘子铁脚，金具等应连接在一起接地，其冲击接地电阻大不宜大于30Ω。

（2）对低压架空进出线，应在进出线处装设避雷器并与绝缘子铁脚、金具连在一起接到电气设备的接地装置上，当多回路架空进出线时，可仅在母线或总配电箱处装设一组避雷器或其他型式的过电压保护器，但绝缘子铁脚、金具等仍应连接到接地装置上。

（3）进出建筑物的架空金属管道，在进出处应就近接到防雷或电气装置的接地装置上或独自接地，其冲击接地电阻不宜大于30Ω。

13.3.4.4 第三类防雷建筑物防侧击雷的措施应符合下列要求：

当建筑物高于60m时，防侧击雷和等电位的保护措施应符合13.4.3.2条1）、2）款的规定，并应将60m及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物与防雷装置相连。

13.3.5 其他防雷措施

13.3.5.1 当建筑物中兼有第一、二、三类防雷建筑物时，其防雷分类和防雷措施宜符合下列规定：

（1）当第一类防雷建筑物的面积占建筑物总面积的30%及以上时，该建筑物宜确定为第一类防雷建筑物。

（2）当第一类防雷建筑物的面积占建筑物总面积的30%以下，且第二类防雷建筑物的面积占建筑物总面积的30%及以上时，或当这两类防雷建筑的面积均小于建筑物总面积的30%，但面积之和又大于30%时，该建筑物宜确定为二类防雷建筑物。但对第一类防雷建筑物的防雷电感应和防雷电波侵入，应采用第一类防雷建筑物的保护措施。

（3）当第一、二类防雷建筑物的面积之和小于建筑物总面积的30%，且不可能遭直接雷击时，该建筑物可确定为第三类防雷建筑物；但对第一、二类防雷建筑物的防雷电感应和防雷电波侵入，应采取各自类别的防雷措施；当可能遭直接雷击时，宜按各自类别采取防雷措施。

13.3.5.2 当建筑物中仅有一部分第一、二、三类防雷建筑物时，其防雷措施宜符合下列规定：

（1）当建筑物可能遭受直接雷击时，宜按各自类别采取防雷措施。

（2）当建筑物不可能遭受直接雷击时，可不采取防直击雷措施，仅按各自类别采取防感应雷和防雷电波侵入的措施。

（3）当防雷建筑物的面积占建筑物总面积的50%以上时，该建筑物宜按第13.3.5.1条规定采取防雷措施。

13.3.5.3 固定在建筑物的节日彩灯、航空障碍信号灯及其他用电设备的电路，应根据建筑物的重要性采取防雷电波侵入的措施，并应符合下列要求：

（1）无金属外壳或保护网罩的用电设备宜处在接闪器的保护范围内，不宜布置在避雷网之外，并不高于避雷网。

（2）从配电盘引出线路宜穿钢管。钢管的一端宜与配电盘外壳相连；另一端宜与用电设备外壳、保护罩相连，并宜就近与屋顶防雷装置相连。当钢管因连接设备而中间断开时宜设跨接线。

（3）在配电盘内，宜在开关的电源测与外壳之间装设过电压保护器。

13.3.5.4 粮、棉及易燃物大量集中的露天堆场，宜采取防直击雷措施。当年计算雷击次数大于或等于0.06时，宜采用独立避雷针或架空避雷线防直击雷。独立避雷针和架空避雷线

保护范围的滚球半径 h_r 可取 100m。

13.4 建筑物防雷设计的计算方法和设计要求

13.4.1 雷击次数计算

(1) 建筑物年预计雷击次数应按下式确定

$$N = kN_gA_e$$

式中 N——建筑物预计雷击次数，次/a；

k——校正系数，在一般情况下取 1，在下列情况下取相应数值：位于旷野孤立的建筑物取 2，金属屋面的砖木结构建筑物取 1.7，位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物，以及特别潮湿的建筑物取 1.5；

N_g——建筑物所处地区雷击大地的年平均密度，次/（$km^2 \cdot a$）；

A_e——与建筑物截收相同雷击次数的等效面积，km^2。

(2) 雷击大地的年平均密度应按下式确定：

$$N_g = 0.024T_d^{1.3}$$

式中 T_d——年平均雷暴日，根据当地气象台、站资料确定，d/a。

(3) 建筑物等效面积 A_e 应为其实际平面积向外扩大后的面积。其计算方法应符合下列规定。

1) 当建筑物的高 H 小于 100m 时，其每边的扩大宽度和等效面积应按下列公式计算确定（图 13-20）

$$D = \sqrt{H(200 - H)}$$

$$A_e = [LW + 2(L + W) \cdot \sqrt{H(200 - H)} + \pi H(200 - H)] \times 10^{-6}$$

式中 D——建筑物每边的扩大宽度，m；

L、W、H——分别为建筑物的长、宽、高，m。

2) 当建筑物的高 H 等于或大于 100m 时，其每边的扩大宽度应按等于建筑物的高 H 计算；建筑物的等效面积应按下式确定

$$A_e = [LW + 2H(L + W) + \pi H^2] \times 10^{-6}$$

3) 当建筑物各部位的高不同时，应沿建筑物周边逐点算出最大扩大宽度，其等效面积 A_e 应按每点最大扩大宽度外端的连接线所包围的面积计算。

13.4.2 滚球法确定接闪器的保护范围

(1) 单支避雷针的保护范围应按下列方法确定（图 13-22）。

1) 当避雷针高度 h 小于或等于 h_r 时：

a. 距地面 h_r 处作一平行于地面的平行线；

b. 以针尖为圆心，h_r 为半径，作弧线交于平行线的 A、B 两点；

c. 以 A、B 为圆心，h_r 为半径作弧线，该弧线与针尖相交并与地面相切。从此弧线起到地面止就是保护范围。保护范围是一个对称的锥体；

d. 避雷针在 h_x 高度的 xx′平面上和在地面上的保护半径，按下列计算式确定

$$r_x = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h_x)} \tag{13-31}$$

$$r_0 = \sqrt{h(2h_r - h)} \tag{13-32}$$

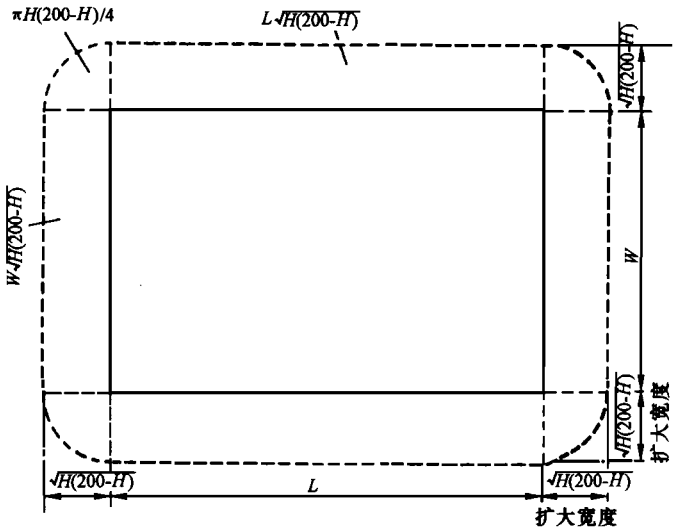


图 13－21　建筑物的等效面积

注：建筑物平面积扩大后的面积 A_e 如图 13－21 中周边虚线所包围的面积。

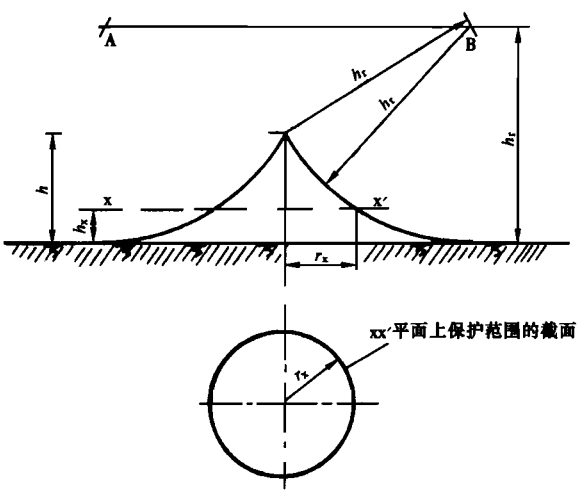


图 13－22　单支避雷针的保护范围

式中　r_x——避雷针在 h_x 高度的 xx′平面上的保护半径，m；

h_r——滚球半径，m；

h_x——被保护物的高度，m；

r_0——避雷针在地面上的保护半径，m。

2）当避雷针高度 h 大于 h_r 时，在避雷针上取高度 h_r 的一点代替单支避雷针针尖作为圆心。其余的作图法同本款 1）项，式（13－31）和式（13－32）中的 h 用 h_r 代入。

（2）双支等高避雷针的保护范围，在避雷针高度 h 不大于 h_r 的情况下，当两支避雷针的距离 D 不小于 $2\sqrt{h(2h_r-h)}$ 时，应各按单支避雷针的方法确定；当 D 小于

$2\sqrt{h(2h_r-h)}$时，应按下列方法确定（图 13－23）。

1）AEBC 外侧的保护范围，按照单支避雷针的方法确定。

2）C、E 点位于两针间的垂直平分线上。在地面每侧的最小保护宽度 b_0 按下式计算

$$b_0 = CO = EO = \sqrt{h(2h_r-h) - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \tag{13-33}$$

在 AOB 轴线上，距中心线任一距离 x 处，其在保护范围上边线上的保护高度 h_x 按下式确定

$$h_x = h_r - \sqrt{(h_r-h)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 - x^2} \tag{13-34}$$

该保护范围上边线是以中心线距地面 h_r 的一点 O′为圆心，以$\sqrt{(h_r-h)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2}$为半径所作的圆弧$\overset{\frown}{AB}$。

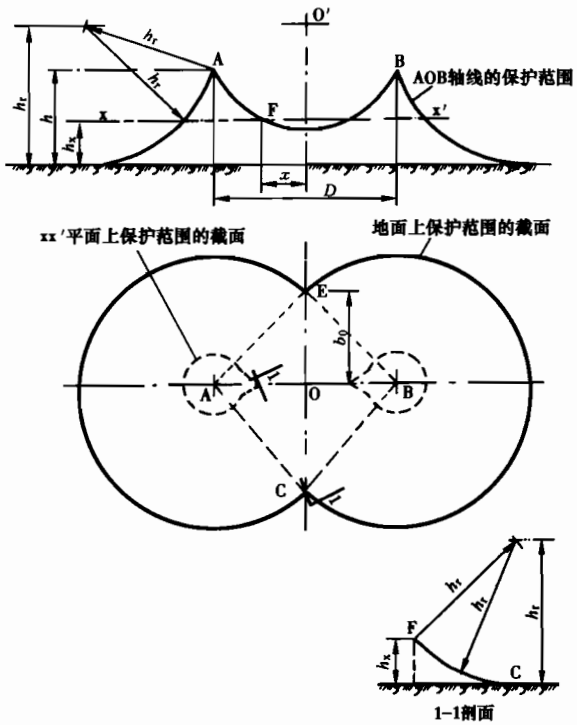


图 13－23　双支等高避雷针的保护范围

3）两针间 AEBC 内的保护范围，ACO 部分的保护范围按以下方法确定：在任一保护高度 h_x 和 C 点所处的垂直平面上，以 h_x 作为假想避雷针，按单支避雷针的方法逐点确定（见图 13－23 的 1—1 剖面图）。确定 BCO、AEO、BEO 部分的保护范围的方法与 ACO 部分的相同。

4）确定 xx′平面上保护范围截面的方法。以单支避雷针的保护半径 r_x 为半径，以 A、B 为圆心作弧线与四边形 AEBC 相交；以单支避雷针的（r_0-r_x）为半径，以 E、C 为圆心作

弧线与上述弧线相接，见图 13－23 中的粗虚线。

（3）双支不等高避雷针的保护范围，在 h_1 不大于 h_r 和 h_2 不大于 h_r 的情况下，当 D 不小于 $\sqrt{h_1\ (2h_r - h_1)} + \sqrt{h_2\ (2h_r - h_2)}$ 时，应各按单支避雷针所规定的方法确定；当 D 小于 $\sqrt{h_1\ (2h_r - h_1)} + \sqrt{h_2\ (2h_r - h_2)}$ 时，应按下列方法确定（图 13－24）。

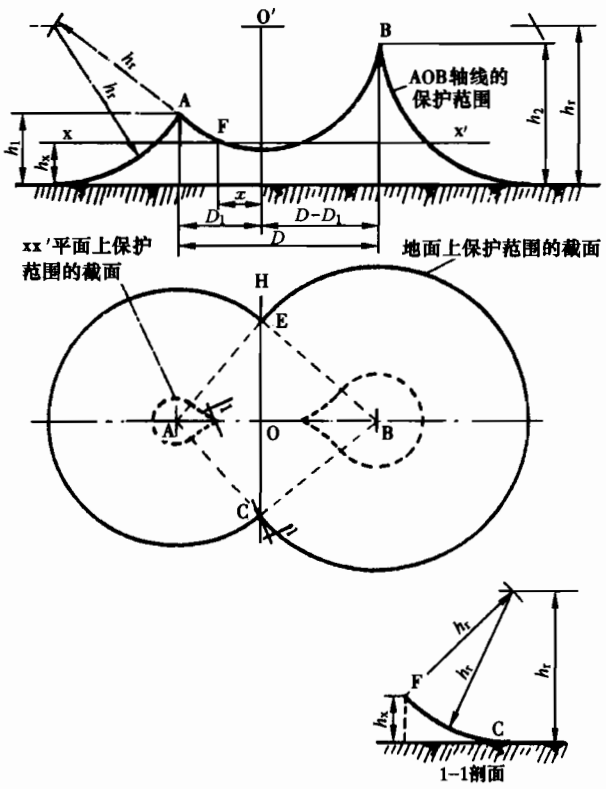


图 13－24　双支不等高避雷针的保护范围

1）AEBC 外侧的保护范围，按照单支避雷针的方法确定。

2）CE 线或 HO′线的位置按下式计算

$$D_1 = \frac{(h_r - h_2)^2 - (h_r - h_1)^2 + D^2}{2D} \tag{13-35}$$

3）在地面上每侧的最小保护宽度 b_0 按下式计算

$$b_0 = CO = EO = \sqrt{h_1\ (2h_r - h_1)\ - D_1^2} \tag{13-36}$$

在 AOB 轴线上，A、B 间保护范围上边线按下式确定

$$h_x = h_r - \sqrt{(h_r - h_1)^2 + D_1^2 - x^2} \tag{13-37}$$

式中　x——距 CE 线或 HO′线的距离。

该保护范围上边线是以 HO′线上距地面 h_r 的一点 O′为圆心，以 $\sqrt{(h_r - h_1)^2 + D_1^2}$ 为半径所作的圆弧 $\overset{\frown}{AB}$。

4）两针间 AEBC 内的保护范围，ACO 与 AEO 是对称的，BCO 与 BEO 是对称的，ACO 部分的保护范围按以下方法确定：在 h_x 和 C 点所处的垂直平面上，以 h_x 作为假想避雷针，按单支避雷针的方法确定（见图 13－24 的 1—1 剖面图）。确定 AEO、BCO、BEO 部分的保护范围的方法与 ACO 部分的相同。

5）确定 xx′平面上保护范围截面的方法与双支等高避雷针相同。

（4）矩形布置的四支等高避雷针的保护范围，在 h 不大于 h_r 的情况下，当 D_3 不小于 $2\sqrt{h\ (2h_r-h)}$时，应各按双支等高避雷针的方法确定；当 D_3 小于$2\sqrt{h\ (2h_r-h)}$时，应按下列方法确定（图 13－25）。

1）四支避雷针的外侧各按双支避雷针的方法确定。

2）B、E 避雷针连线上的保护范围见图 13－25 的 1—1 剖面图，外侧部分按单支避雷针的方法确定。两针间的保护范围按以下方法确定：以 B、E 两针针尖为圆心、h_r 为半径作弧相交于 O 点，以 O 点为圆心、h_r 为半径作圆弧，与针尖相连的这段圆弧即为针间保护范围。保护范围最低点的高度 h_0 按下式计算

$$h_0=\sqrt{h_r^2-\left(\frac{D_3}{2}\right)^2}+h-h_r \tag{13-38}$$

3）图 13－25 的 2—2 剖面的保护范围，以 P 点的垂直线上的 O 点（距地面的高度为 h_r+h_0）为圆心，h_r 为半径作圆弧与 B、C 和 A、E 双支避雷针所作出在该剖面的外侧保护范围延长圆弧相交于 F、H 点。F 点（H 点与此类同）的位置及高度可按下列计算式确定

$$(h_r-h_x)^2=h_r^2-\ (b_0+x)^2 \tag{13-39}$$

$$(h_r+h_0-h_x)^2=h_r^2-\left(\frac{D_1}{2}-x\right)^2 \tag{13-40}$$

4）确定图 13－25 的 3—3 剖面保护范围的方法与本款 3）项相同。

5）确定四支等高避雷针中间在 h_0 至 h 之间于 h_y 高度的 yy′平面上保护范围截面的方法：以 P 点为圆心、$\sqrt{2h_r\ (h_y-h_0)\ -\ (h_y-h_0)^2}$为半径作圆或圆弧，与各双支避雷针在外侧所作的保护范围截面组成该保护范围截面，见图 13－25 中的虚线。

（5）单根避雷线的保护范围，当避雷线的高度 h 不小于 $2h_r$ 时，无保护范围；当避雷线的高度 h 小于 $2h_r$ 时，应按下列方法确定（图13－26）。确定架空避雷线的高度时应计及弧垂的影响。在无法确定弧垂的情况下，当等高支柱间的距离小于 120m 时架空避雷线中点的弧垂宜采用 2m，距离为 120～150m 时宜采用 3m。

1）距地面 h_r 处作一平行于地面的平行线；

2）以避雷线为圆心、h_r 为半径，作弧线交于平行线的 A、B 两点；

3）以 A、B 为圆心，h_r 为半径作弧线，该两弧线相交或相切并与地面相切，从该弧线起到地面止就是保护范围；

4）当 h 小于 $2h_r$ 且大于 h_r 时，保护范围最高点的高度 h_0 按下式计算

$$h_0=2h_r-h \tag{13-41}$$

5）避雷线在 h_x 高度的 xx′平面上的保护宽度，按下式计算

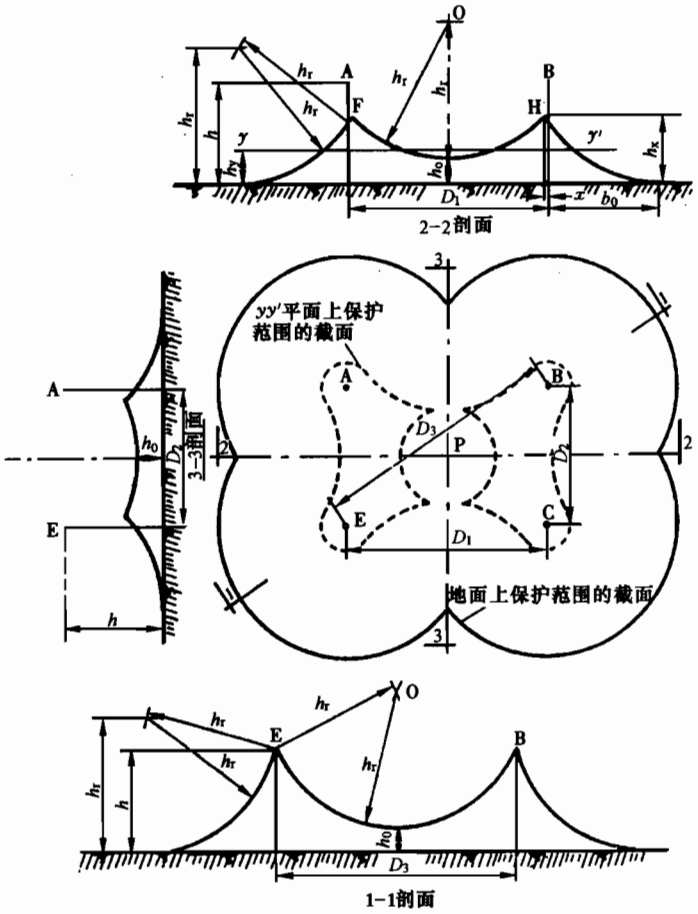


图 13－25　四支等高避雷针的保护范围

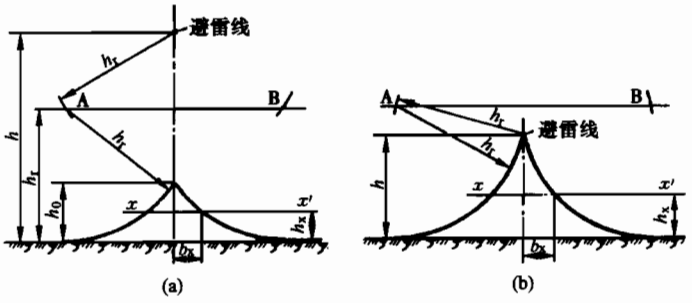


图 13－26　单根架空避雷线的保护范围

(a) 当 h 小于 $2h_r$ 但大于 h_r 时；(b) 当 h 小于或等于 h_r 时

$$b_x = \sqrt{h\ (2h_r - h)} - \sqrt{h_x\ (2h_r - h_x)} \tag{13-42}$$

式中　b_x——避雷线在 h_x 高度的 xx′ 平面上的保护宽度，m；

h——避雷线的高度，m；

h_r——滚球半径，m；

h_x——被保护物的高度，m。

6）避雷线两端的保护范围按单支避雷针的方法确定。

（6）两根等高避雷线的保护范围，应按下列方法确定。

1）在避雷线高度 h 小于或等于 h_r 的情况下，当 D 不小于 $2\sqrt{h(2h_r-h)}$ 时，各按单根避雷线所规定的方法确定；当 D 小于 $2\sqrt{h(2h_r-h)}$ 时，按下列方法确定（图 13－27）：

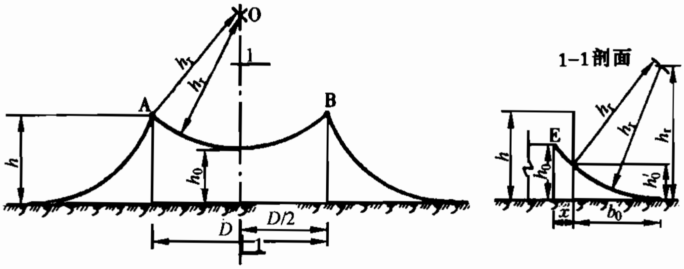


图 13－27　两根等高避雷线在 h 不大于 h_r 时的保护范围

a. 两根避雷线的外侧，各按单根避雷线的方法确定；

b. 两根避雷线之间的保护范围按以下方法确定：以 A、B 两避雷线为圆心，h_r 为半径作圆弧交于 O 点，以 O 点为圆心、h_r 为半径作圆弧交于 A、B 点；

c. 两避雷线之间保护范围最低点的高度 h_0 按下式计算

$$h_0=\sqrt{h_r^2-\left(\frac{D}{2}\right)^2}+h-h_r \quad (13-43)$$

d. 避雷线两端的保护范围按双支避雷针的方法确定，但在中线上 h_0 线的内移位置按以下方法确定（图 13－27 的 1—1 剖面）：以双支避雷针所确定的保护范围中点最低点的高度 $h_0'=h_r-\sqrt{(h_r-h)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2}$ 作为假想避雷针，将其保护范围的延长弧线与 h_0 线交于 E 点。内移位置的距离 x 也可按下式计算

$$x=\sqrt{h_0\ (2h_r-h_0)}-b_0 \quad (13-44)$$

式中　b_0——按式（13－33）确定。

2）在避雷线高度 h 小于 $2h_r$ 且大于 h_r，而且避雷线之间的距离 D 小于 $2h_r$ 且大于 $2\left[h_r-\sqrt{h\ (2h_r-h)}\right]$ 的情况下，按下列方法确定（图13－28）。

a. 距地面 h_r 处作一与地面平行的线；

b. 以避雷线 A、B 为圆心，h_r 为半径作弧线相交于 O 点并与平行线相交或相切于 C、E 点；

c. 以 O 点为圆心、h_r 为半径作弧线交于 A、B 点；

d. 以 C、E 为圆心，h_r 为半径作弧线交于 A、B 并与地面相切；

e. 两避雷线之间保护范围最低点的高度 h_0 按下式计算

$$h_0=\sqrt{h_r^2-\left(\frac{D}{2}\right)^2}+h-h_r \quad (13-45)$$

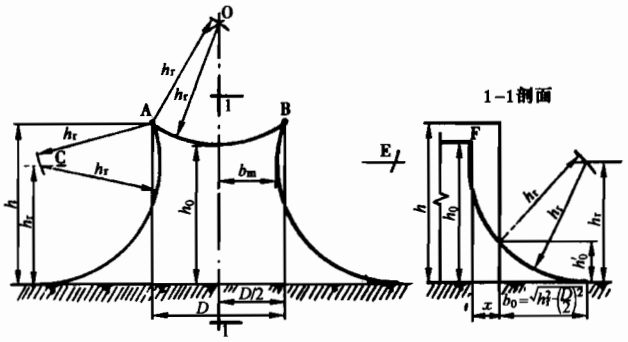


图 13－28　两根等高避雷线在高度 h 小于 $2h_r$ 且大于 h_r 时的保护范围

f. 最小保护宽度 b_m 位于 h_r 高处，其值按下式计算

$$b_m = \sqrt{h\ (2h_r - h)} + \frac{D}{2} - h_r \tag{13-46}$$

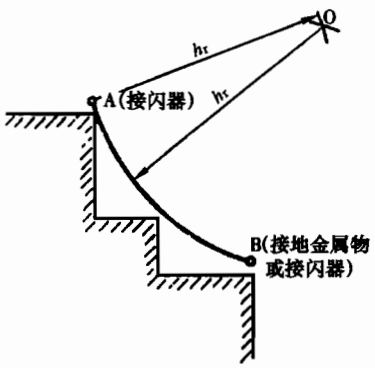


图 13－29　确定建筑物上任两接闪器在所需断面上的保护范围

注：当接闪器在“地面上保护范围的截面”的外周线触及的是屋面时，各图的保护范围仍有效，但外周线触及的屋面及其外部得不到保护，内部得到保护。

g. 避雷线两端的保护范围按双支高度 h_r 的避雷针确定，但在中线上 h_0 线的内移位置按以下方法确定（图 13－28的 1—1 剖面）：以双支高度 h_r 的避雷针所确定的中点保护范围最低点的高度 $h_0' = \left(h_r - \frac{D}{2}\right)$ 作为假想避雷针，将其保护范围的延长弧线与 h_0 线交于 F 点。内移位置的距离 x 也可按下式计算

$$x = \sqrt{h_0\ (2h_r - h_0)} - \sqrt{h_r^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \tag{13-47}$$

（7）本节各图中所画的地面也可以是位于建筑物上的接地金属物、其他接闪器。当接闪器在“地面上保护范围的截面”的外周线触及接地金属物、其他接闪器时，各图的保护范围均适用于这些接闪器；当接地金属物、其他接闪器是处在外周线之内且位于被保护部位的边沿时，应按以下方法确定所需断面的保护范围（见图 13－29）：

1）以 A、B 为圆心，h_r 为半径作弧线相交于 O 点；

2）以 O 为圆心，h_r 为半径作弧线$\overset{\frown}{AB}$，弧线$\overset{\frown}{AB}$就是保护范围的上边线。

13.4.3　环路中感应电压、电流和能量的计算

（1）在不同的线路结构和敷设路径（图 13－30）以及不同的外部防雷装置下，当雷击建筑物的防雷装置时，在该等线路中预期的最大感应电压和能量可近似地按表 13－19 中的计算式计算。

（2）格栅形屏蔽建筑物附近遭雷击时，在 LPZ1 区内环路的感应电压和电流在 LPZ1 区 V_s 空间内的磁场强度看成是均匀的情况下，图 13－31 所示为无屏蔽线路构成的环路，其开路最大感应电压 $U_{oc/max}$ 宜按下式确定

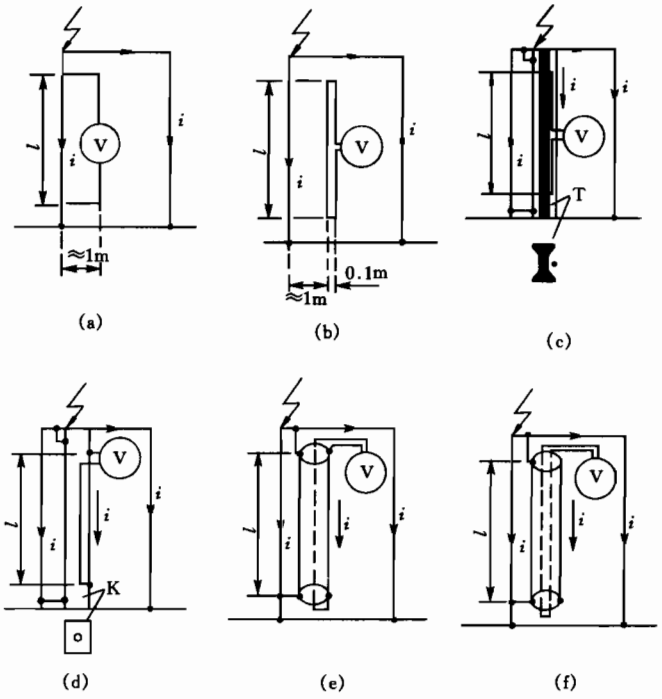


图 13－30　应用于表 13－19 的环路布置

(a) 包围一大面积并与引下线不绝缘的环路；(b) 包围一小面积并与引下线不绝缘的环路；(c) 布置相似于 (a)，但环路所包围的面积是小的，装置极靠近引下线并与其接触；(d) 布置相似于 (a)，但环路安装在封闭型金属电缆管道内；(e) 布置相似于 (a)，电路由屏蔽电缆组成，屏蔽层是引下线的一部分；(f) 布置相似于 (b)，电路由两芯线的屏蔽电缆组成，电缆屏蔽层是引下线的一部分，所考虑的环路与防雷装置绝缘

i—流经引下线的分雷电流；*T*—作引下线用的金属结构立柱；

K—作自然引下线用的金属电缆管道；*l*—电气装置平行于引下线的长度

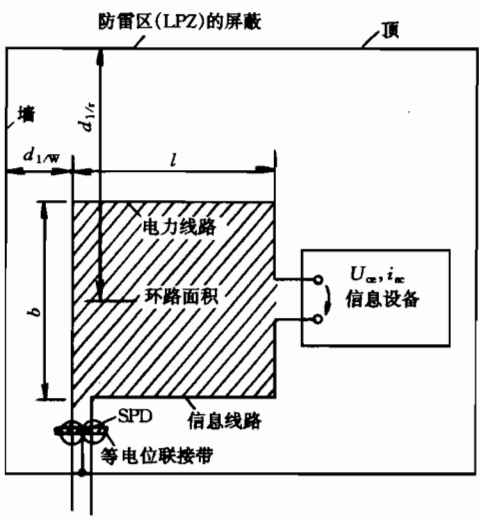


图 13－31　环路中的感应电压和电流

注：1. 当环路不是矩形时，应转换为相同环路面积的矩形环路；

2. 图中的电力线路或信息线路也可以是邻近的两端做了等电位连接的金属物。

表 13－19　　闪电击中安装在第一类防雷建筑物上的防雷装置时所感应的电压和能量的近似计算式

外部防雷装置的型式	在图 13－30 以下分图中的环路形状									
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(a)	(b)	(c)	(d)
	开路环中感应的峰值电压						短路环中感应的最大能量			
引下线（至少四根）间距 10～20m 钢构架或钢筋混凝土柱	$\frac{U_i}{l}$ (kV/m)	$\frac{U_i}{l}$ (kV/m)	$\frac{U_i}{l}$ (kV/m)	$\frac{U_i}{l}$ (kV/m)	$\frac{U_k}{R_M}$ (kV/Ω)	$\frac{U_q}{l}$ (kV/m)	$\frac{W}{l}$ (J/m)	$\frac{W}{l}$ (J/m)	$\frac{W}{l}$ (J/m)	$\frac{W}{l}$ (J/m)
	$100\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	$2\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	$4\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	≈0	$100\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	≈0	$2000\times\frac{a}{h}$	$\frac{a}{h}$	$10\times\frac{a}{h}$	≈0
	$40\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	$2\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	$4\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	≈0	$100\times\sqrt{\frac{a}{h}}$	≈0	$500\times\frac{a}{h}$	$\frac{a}{h}$	$10\times\frac{a}{h}$	≈0
有窗的金属立面①	$10\times\frac{1}{\sqrt{h}}$	$0.4\times\frac{1}{h}$	$0.4\times\frac{1}{\sqrt{h}}$	≈0	$10\times\frac{1}{\sqrt{h}}$	≈0	$30\times\frac{1}{h}$	$0.03\times\frac{1}{h^2}$	$0.1\times\frac{1}{h}$	≈0
无窗的钢筋混凝土结构	$2\times\frac{1}{\sqrt{h}}$	$0.1\times\frac{1}{h}$	$0.1\times\frac{a}{\sqrt{h}}$	≈0	$2\times\frac{1}{\sqrt{h}}$	≈0	$1.5\times\frac{1}{h}$	$0.002\times\frac{1}{h^2}$	$0.005\times\frac{1}{h}$	≈0

注　1. U_i—采用首次以后的雷击电流参量时预期的最大感应电压；U_k—采用首次雷击电流参量时，在电缆内导体与屏蔽层之间预期的最大共模电压（$R_M/l<0.1\Omega/m$）；U_q—屏蔽电缆内导体之间预期的最大差模电压；W—当采用首次雷击电流参量及环路由于产生火花放电而成闭合环路时，预期产生于环路内的最大能量；l—与引下线平行的电气装置的长度(m)；R_M—电缆总长的电缆屏蔽层电阻(Ω)；a—引下线之间的平均距离(m)；h—防雷装置接闪器的高度(m)。

2. 表 13－19 适用于第一类防雷建筑物的雷电流参量。对第二类防雷建筑物，表中的感应电压计算式应乘以 0.75（因第二类防雷建筑物的雷电流为第一类的 75%），能量计算式应乘以 0.56（即 $0.75^2=0.56$，因能量与电流的平方成正比）。对第三类防雷建筑物，表中的感应电压计算式应乘以 0.5（因第三类防雷建筑物的雷电流为第一类的 50%），能量计算式应乘以 0.25（即 $0.5^2=0.25$）。

①如金属窗框架与建筑物互相连接的钢筋在电气上有连接时本栏也适用于这类钢筋混凝土建筑物。

$$U_{oc/max}=\mu_0\cdot b\cdot l\cdot H_{1/max}/T_1 \tag{13-48}$$

式中　μ_0——真空的磁导系数，其值等于 $4\pi\times10^{-7}$[V·s/(A·m)]；

b——环路的宽，m；

l——环路的长，m；

$H_{1/max}$——LPZ1 区内最大的磁场强度，A/m，按规范 GB 50057—1994（2000 年版）中式（6.3.2－2）确定；

T_1——雷电流的波头时间，s。

若略去导线的电阻（最坏情况），最大短路电流 $i_{sc/max}$ 可按下式确定

$$i_{sc/max}=\mu_0\cdot b\cdot l\cdot H_{1/max}/L \tag{13-49}$$

式中　L——环路的自电感，H。

矩形环路的自电感可按下式计算

$$L=\{0.8\sqrt{l^2+b^2}-0.8(l+b)+0.4\cdot l\cdot\ln[(2b/r)/(1+\sqrt{1+(b/l)^2})]$$
$$+0.4\cdot b\cdot\ln[(2l/r/(1+\sqrt{1+(l/b)^2})]\}\times10^{-6} \tag{13-50}$$

式中　r——环路导线的半径，m。

（3）格栅形屏蔽建筑物遭直接雷击时在 LPZ1 区内环路的感应电压和电流。在 LPZ1 区 V_s 空间内的磁场强度 H_1 应按规范 GB 50057—1994（2000 年版）式（6.3.2－4）确定。根据图 13－32 所示环路，其开路最大感应电压 $U_{oc/max}$ 宜按下式确定

$$U_{oc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{1/w}) \cdot k_H \cdot (W/\sqrt{d_{1/r}}) \cdot i_{o/max}/T_1 \qquad (13-51)$$

式中 $d_{1/w}$——环路至屏蔽墙的距离，m，根据规范 GB 50057—1994（2000 年版）式（6.3.2-5）$d_{1/w} \geqslant d_{s/2}$；

$d_{1/r}$——环路至屏蔽顶的平均距离，m；

$i_{o/max}$——$LPZ0_A$ 区内的雷电流最大值，A；

k_H——形状系数（$1/\sqrt{m}$），取 $k_H = 0.01$（$1/\sqrt{m}$）；

W——格栅形屏蔽的网格宽，m。

若略去导线的电阻（最坏情况），最大短路电流 $i_{sc/max}$可按下式确定

$$i_{sc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln(1 + l/d_{1/w}) \cdot k_H \cdot (W/\sqrt{d_{1/r}}) \cdot i_{o/max}/L \qquad (13-52)$$

（4）在 LPZ$n+1$ 区（n 不小于 1）内的感应电压和电流。在 LPZ$n+1$ 区 V_s 空间内的磁场强度 H_{n+1}看成是均匀的情况下，图 13-31 所示环路，其最大感应电压和电流可按式（13-48）和式（13-49）确定，该两式中的 $H_{1/max}$应根据规范 GB 50057—1994（2000 年版）式（6.3.2-2）或式（6.3.2-6）计算出的 $H_{n+1/max}$代入。式（6.3.2-2）中的 H_1 用 $H_{n+1/max}$代入，H_0 用 $H_{n/max}$代入。

14 接　地

14.1 电气装置接地的一般规定

14.1.1 功能接地与保护接地

电气装置接地涉及两个主要方面：一方面是电源功能接地，如电源系统接地，多指发电机组、电力变压器等中性点的接地，一般称为系统接地，或称系统工作接地。另一方面是电气装置外露可导电部分接地，起保护作用，故习惯称为保护接地。

系统接地的主要作用：

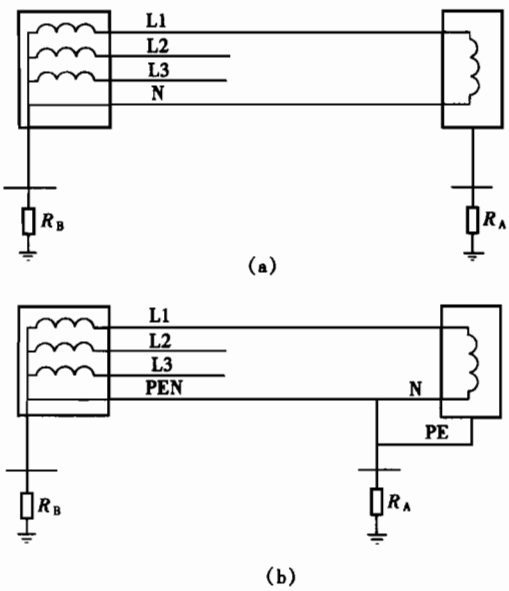


图 14－1　电气装置功能接地与保护接地
（a）功能接地；（b）保护接地

a. 为大气或操作过电压提供对地泄放的回路，避免电气设备绝缘被击穿；

b. 提供接地故障回路，当发生接地故障时，产生较大的接地故障电流，迅速切断故障回路；

c. 中性点不接地系统，当发生接地故障时，虽能保证供电连续性，但非故障相对地电压升高 1.73 倍，因此系统中的设备及线路绝缘均较中性点接地系统绝缘水平高，要增加投资费用；

d. 中性点不接地系统，需大量安装绝缘监察装置。

保护接地的主要作用：

a. 降低预期接触电压；

b. 提供工频或高频泄漏回路；

c. 为过电压保护装置提供安装回路；

d. 等电位联结。

电气装置功能接地和保护接地见图 14－1。

根据电气装置的要求，接地配置可以兼容或分别地承担保护和功能两种目的。对于保护的目的要求，始终应当予以优先地考虑。

接地配置的设施的选择和安装应满足下列条件：

a. 接地电阻值符合电气装置的功能和保护要求，并预计长期有效；

b. 能承受接地故障电流和对地泄漏电流而无危险，特别是热的、热—机械应力、电机械应力引起的危害；

c. 有足够的强度或有附加的机械保护，以适应所在场所的外部的影响；

d. 应采取措施，防止由于电腐蚀作用对接地配置的设施和其他金属部分造成危害。

14.1.2 变电所的接地配置

10kV 系统中性点接地可分为：

（1）中性点不接地系统（包括经消弧线圈接地）；

（2）中性点接地系统经电阻接地，即低电阻接地或高电阻接地。

14.1.2.1 中性点不接地系统

（1）接地故障特点。配电系统在正常运行时，三相基本平衡电压作用下，各相对地电容电流 $\dot{I}_{CL1}$、$\dot{I}_{CL2}$、$\dot{I}_{CL3}$相等，分别超前相电压 90°，$\dot{I}_{CL1} = \dot{I}_{CL2} = \dot{I}_{CL3} = \dot{U}_{ph}\omega C$，其 $\dot{I}_{CL1} + \dot{I}_{CL2} + \dot{I}_{CL3} = 0$，系统中性点与地有相同电位。如 L1 相发生接地故障，忽略接地过渡电阻，视为金属性接地，10kV 系统各支路的电容电流的流向如图 14－2 虚线所示。

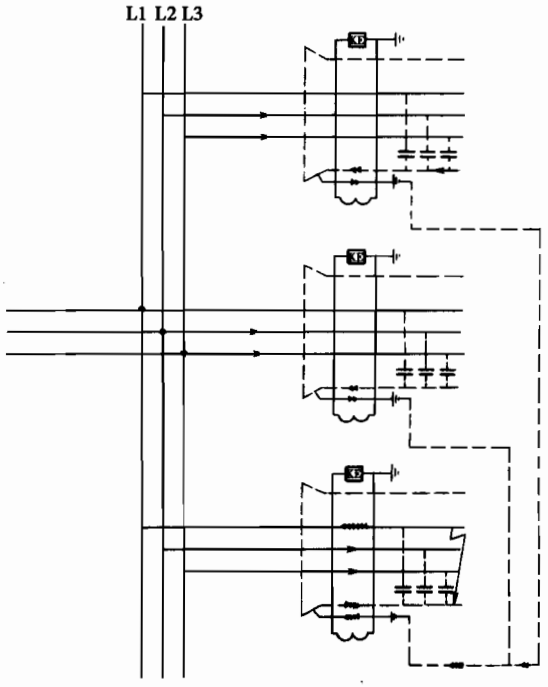


图 14－2　10kV 系统接地故障示意

KE—接地继电器

从 10kV 系统接地故障示意图可以得出结论：

1）全系统所有非故障的各支路，故障相的电容电流均为零，非故障相均有电容电流；

2）在故障支路，故障相流过所有各支路的电容电流的总和；

3）故障支路的电容电流的方向由负载流向电源，非故障各支路的电容电流其方向由电源流向负载；

4）故障支路检测的零序电流为各非故障支路电容电流总和；

5）接地故障电流大小与接地故障点的位置无关，只与接地故障点的过渡电阻有关。

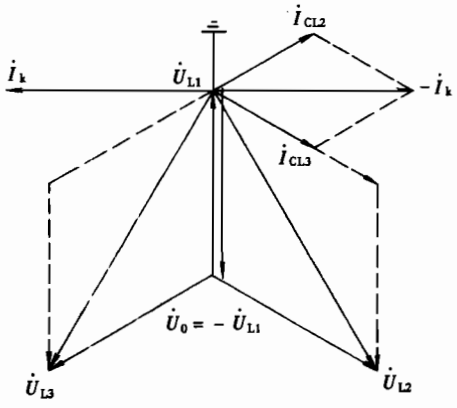


图 14－3　10kV 系统接地故障相量图

10kV 系统接地故障，电压与电流相量关系如图 14－3 所示。

L1 相发生接地故障，相当于在 L1 相上加上 $\dot{U}_0 = -\dot{U}_{L1}$，L2 相 L3 相也加上 $\dot{U}_0 = -\dot{U}_{L1}$，非故障相对地电压升高$\sqrt{3}$倍，其夹角由 120°变成 60°，合成的电容电流增大$\sqrt{3}$倍，接地故障电流为单相电容电流的 3 倍，$\dot{I}_k = 3\dot{U}_{ph}\omega C$。

（2）优缺点：

1）接地故障引起系统内部过电压可达 3.5～4 倍相电压，易使设备和线路绝缘被击穿。

2）油浸纸绝缘电力电缆达 20A，聚乙烯绝缘电力电缆达 15A，交联聚乙烯绝缘电力电缆达 10A，接地故障电流引燃电弧则不能自熄，引起间歇电弧产生过电压，易产生相间短路或火灾。

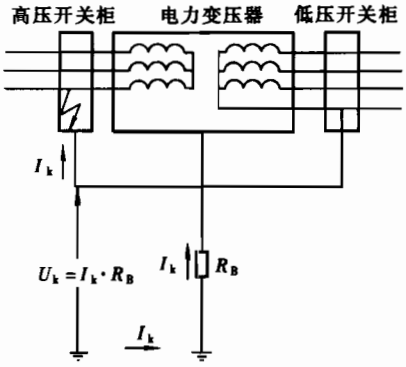


图 14－4　高压接地故障电压传导到低压侧

3）非故障相对地电压升高$\sqrt{3}$倍，系统内设备或电缆绝缘等级相应提高，例如，10kV 电力电缆应选用 8.7/10kV 而不是 6/10kV；无间隙氧化锌避雷器，提高持续运行电压数值或加串联保护间隙等。

4）发生接地故障时，报警而不切断故障支路，保证供电的连续性。

5）接地故障在一段时间内存在，接地故障电压 U_k 易使人遭受电击或引起火灾，如图 14－4 所示。

14.1.2.2　中性点低电阻接地系统

根据接地故障电流大小，划分低电阻或高电阻接地。当接地故障电流大于或等于 100A 而小于或等于 1000A 时，为低电阻接地方式；接地故障电流小于 10A 时，为高电阻接地方式。低电阻接地方式的接地故障电流一般情况下选择为 300～800A，10kV 系统低电阻接地方式接地电阻不同地区选择为 10Ω 或 16Ω。

为了将系统内谐振过电压倍数限制在 2.5 以下，流过中性点电阻性电流 I_R 要大于或等于系统电容性电流 I_C 的 1.5 倍。低电阻接地方式，增大接地故障电流 I_k。

系统内发生接地故障时的接地故障电流 I_k 与接地故障点位置无关，不能采用零序电流速断保护来实现保护的选择性，而应采用不同时限的零序电流保护来实现保护的选择性。机械式继电器延时时限：出线为 0.5s，母联为 1.0s，主进线为 1.5～2.0s。采用电子式保护器延时时限选定为 0.2～0.3s，整定值范围大且整定精确，建议采用电子式保护器作为零序电流保护。

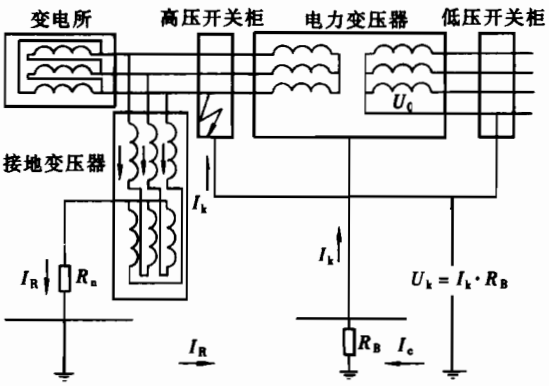


图 14－5　高压系统的接地故障电压传导到 TN 系统内

中性点经低电阻接地方式，接地故障电流 I_k 较大，切断故障回路时间内，有较大的接地故障电压 U_k。低压系统接地型式为 TN 系统时，外露可导电部分与变压器低压中性点共用接地体，接地故障电压 U_k 传导到低压侧，易引起人身电击或火灾，如图 14－5所示，低压系统接地型式为 TT 系统时，外露可导电部分与变压器低压中性点有相互独立的接地体，接地故障电压 U_k 传导到低压侧，易引起工频过电压如图 14－6 所示。IEC 标准规定，一般低压电气设备允许工频过电压与故障电路切断时间要求：允许承受的工频过电压为 U_0 + 250V 时，切断故障电路时间大于 5s；允许承受的工频过电压为 U_0 + 1200V 时，切断故障电路时间不大于 5s。

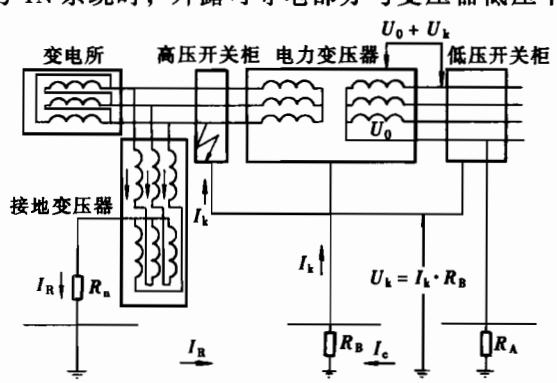


图 14－6　高压系统的接地故障电压引起 TT 系统工频过电压

中性点经低电阻接地方式，系统内发生接地故障，立即切断故障电路，供电的连续性得不到保证。

根据以上的所述，10kV 不接地系统中，发生接地故障时的故障电压幅值不高，但存在时间很长。低压采用 TN 系统供电时，故障电压沿 PEN 线或 PE 线传导，采取总等电位联结措施降低预期接触电压。

10kV 经低电阻接地系统中，发生接地故障时的故障电压虽时间不长，但幅值很高。低压采用 TN 系统供电时，应采取以下措施：变电所内设置两组接地极；采用总等电位联结措施；在总等电位联结范围外供电时，采用局部 TT 系统供电。低压采用 TT 系统供电时，变电所的外露可导电部分的接地电阻不超过 1Ω 或带有已接地的合适的有金属护层的高压电缆和低压电缆总长度超过 1km。

14.1.3 特低电压

用特低电压（Extra-Low Voltage）供电，是防电击措施之一。IEC 将用特低电压分为三类，简述如下。

14.1.3.1 SELV（Self-sufficient ELV）电路：SELV 电路与地是绝缘的，如图 14－7 所示。PE 线带有故障电压 U_k 及发生接地故障时，其用电设备外露可导电部分对地电压均为零。不需要其他辅助措施，可满足防电击引起。

14.1.3.2 PELV（Protective ELV）电路：PELV 电路一根导体是接地的，用电设备外露可导电部分不接地，如图 14－8 所示。

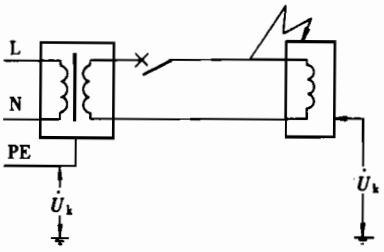


图 14－7　SELV 电路图

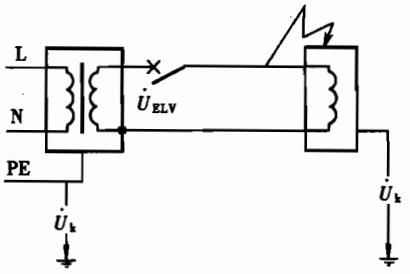


图 14－8　PELV 电路图（一）

PE 线带有故障电压 $\dot{U}_k$ 时，用电设备外露可导电部分对地电压为零。既 PE 线带有故障电压 $\dot{U}_k$ 时，又发生用电设备接地故障，用电设备外露可导电部分对地电压为 $\dot{U}_k$ 与 $\dot{U}_{ELV}$相量和，用电设备务必布置在等电位联结有效范围内，以防止用电设备外露可导电部分对人身产生电击危险。

PELV 电路用电设备外露可导电部分接地，如图 14－9 所示。

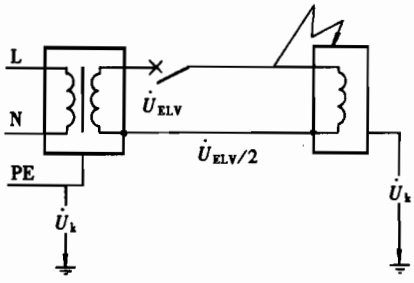


图 14－9　PELV 电路图（二）

用电设备外露可导电部分对地有连接，PE 线带有故障电压 $\dot{U}_k$ 时，用电设备外露可导电部分对地电压为 $\dot{U}_k$，即 PE 线带有故障电压 $\dot{U}_k$ 时，又发生用电设备接地故障，用电设备外露可导电部分对地电压为 $\dot{U}_k$ 与 $\dot{U}_{ELV}/2$ 相量和，用电设备务必布置在等电位联结有效范围内及保护电器切

断电源，以防止用电设备外露可导电部分对人身产生电击危险。

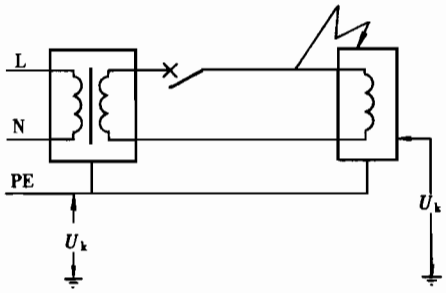


图 14－10　FELV 电路图

14.1.3.3　FELV（Functional ELV）电路：由于功能上的原因采用了特低电压，SELV 或 PELV 的所有要求不能满足时，或不需要 SELV 或 PELV 时，保证直接和间接接触两者兼有的防护，这种方法的组合称为 PELV，如图 14－10 所示。

FELV 回路的用电设备绝缘不能耐受一次回路所要求的试验电压时，则设备的可触及的非导电部分的绝缘应在安装时加强，使其能耐受交流方均根值为 1500V，时间 1min 的试验电压。

将 FELV 回路中的用电设备外露可导电部分与一次回路的保护导体连接，此时 FELV 回路中的带电导体不排除与该一次回路保护导体的连接，用电设备务必布置在等电位联结有效范围内及保护电器切断电源，以防止用电设备外露可导电部分对人身产生电击危险。

电气隔离防护时，将 FELV 回路中的设备外露可导电部分与一次回路的不接地等电位联结导体连接。

14.2　电气装置保护接地的范围

需保护接地的范围：

下列电气装置外露可导电部分，除另有规定者外，均应保护接地。

（1）电机、变压器、电器、携带式及移动式用电器具等的底座和外壳；

（2）电气设备传动装置；

（3）互感器的二次绕组；

（4）配电屏（箱）、控制屏（箱）、各类箱体操作台等金属的框架；

（5）户内外配电装置的金属构架和钢筋混凝土构架以及靠近带电部分的金属围栏和金属门等；

（6）封闭式组合电器和箱式变电站的金属箱体；

（7）电力电缆和控制电缆的金属护套，穿线的金属管；

（8）电气用各类金属构架、支架等；

（9）电缆桥架、电缆线槽及金属支架；

（10）电涌保护器；

（11）发电机中性点外壳、发电机出线柜和封闭式母线（密集型或空气绝缘型）金属外护层；

（12）装有避雷线的电力线路杆塔；

（13）在非沥青地面的居民区，无避雷线小接地电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔；

（14）安装在配电线路杆塔上的开关设备、电容器等电力设备。

14.3　电气装置接地电阻的要求

14.3.1　高压电力设备

中性点非直接接地的电力设备，其接地装置接地电阻，应符合下列公式的要求：

1）高压与低压电力设备共用的接地装置

$$R \leqslant 120/I$$

式中 R——考虑到季节变化的最大接地电阻，Ω；

I——计算用的接地故障电流，A。

接地电阻不应大于4Ω。

当并列运行的变压器等电力设备总容量不超过100kVA时，接地电阻不宜超过10Ω。

2）仅用于高压电力设备的接地装置

$$R \leqslant 250/I$$

接地电阻不宜超过10Ω。

中性点经消弧线圈接地的电力网中，接地故障电流按下列规定取值：

对装有消弧线圈的变电所或电力设备的接地装置，接地故障电流等于接在同一接地装置中同一电力网各消弧线圈额定电流总和的1.25倍。

对不装消弧线圈的变电所或电力设备的接地装置，接地故障电流等于电力网中断开最大一台消弧线圈时的最大可能残余电流值，但不得小于30A。

14.3.2 低压电力设备

低压电力设备接地装置的接地电阻，不得超过4Ω。

使用同一接地装置的并列运行的发电机、变压器等电力设备，当其总容量不超过100kVA时，接地电阻不宜大于10Ω。

架空线路的干线和分支线的终端以及沿线每1km处、电缆和架空线在建筑物的引入处、PEN线都应重复接地（但距接地点不超过50m者除外），其重复接地的接地电阻不应大于10Ω。

在电力设备接地装置的接地电阻允许达到10Ω的电力网中，每一重复接地装置的接地电阻不应超过30Ω，但重复接地不应少于三处。

（1）TT系统。受同一保护器保护的所有外露可导电部分应连同其保护导体一起接至这些部分共同的接地极上。当几个保护电器串联使用时，上述要求分别适用于被每个保护器保护的所有外露可导电部分。应满足以下条件

$$R_A \cdot I_a \leqslant 50V$$

式中 R_A——外露可导电部分的保护导体和接地极电阻之和，Ω；

I_a——使保护电器自动动作的电流，A。

当保护电器是剩余电流保护器时，I_a是额定剩余动作电流$I_{\Delta n}$，为实施选择性目的，S型剩余电流保护器可与普通型剩余电流保护器串联使用。为得到S型剩余电流保护器的选择性，在配电回路中允许剩余电流保护器动作时间不超过1s。

当保护电器是过电流保护电器时，它应在以下二者取一：

反时限特性的电器，I_a应是保证5s内自动动作的电流，或瞬动特性的电器，I_a应是保证瞬时动作的最小电流。

（2）IT系统。在IT系统中，装置应与地绝缘或通过足够大的阻抗接地。接地点或是系统的中性点，或是一个人工中性点。如果零序阻抗足够高，人工中性点可直接接地。当不存在中性点时，可将一个相导体通过一个阻抗接地。因此在发生对外露可导电部分或对地的单一故障时，故障电流小，切断电源并不是必需的。但是应采取措施，以避免同时存在两个故障时，人体同时触及不同的可导电部分，出现有害的病理生理效应。外露可导电部分应单独

地、成组地或集中地接地。

应满足以下条件

$$R_A I_k \leqslant 50V$$

式中 R_A——外露可导电部分的接地极电阻，Ω；

I_k——相导体和外露可导电部分之间第一次出现阻抗可忽略的故障时的故障电流，A，I_k 的值计及了泄漏电流和装置的总接地阻抗的影响。

14.4 电气装置的接地装置设计要求

14.4.1 接地装置配置

接地装置一般是由接地极、接地导体和总接地端子（总接地母排）等构成的。总接地端子（总接地母排）通过接地导体与诸多接地极连接，实现电气装置需接地部分与地的连接，又可通过保护导体、保护连接导体与电气装置内外露可导电部分、电气装置外可导电部分的连接，实现总等电位联结。总接地端子（总接地母排）是建筑物内电气装置参考电位点。

接地装置配置、保护导体及保护连接导体连接方式见图 14－11。

14.4.2 接地极

（1）对接地极的材料和尺寸的选择，应使其既耐腐蚀又具有适当的机械强度。接地极的最小尺寸表 14－1 中给出。

表 14－1　　接地极的最小尺寸

材　料	表　面	形　状	最小尺寸		
			直　径 (mm)	截面积 (mm^2)	厚　度 (mm)
钢	镀锌①或不锈钢①,②	板　条③		90	3
		切　片		90	3
		深接地极用的圆棒	16		
		表层电极用的圆线⑥	10		
		管	25		2
	铜护套	深接地极用的圆棒	15		
	电积镀铜护层	深接地极用的圆棒	14		
铜	裸露①	板　条		50	2
		表层电极用的圆线⑥		25⑤	
		绳	单股 1.8	25	
		管	20		2
	镀锡	绳	单股 1.8	25	
	镀锌	板条④		50	2

①能用作埋在混凝土中的电极；

②不适于电镀；

③例如，带圆边的轧制板条或切割的板条；

④带圆边的板条；

⑤经验表明，在腐蚀性和机械损伤极低的场所，16mm^2 的圆线是可以用的；

⑥当埋设深度不超过 0.5m 时，被认为是表层电极。

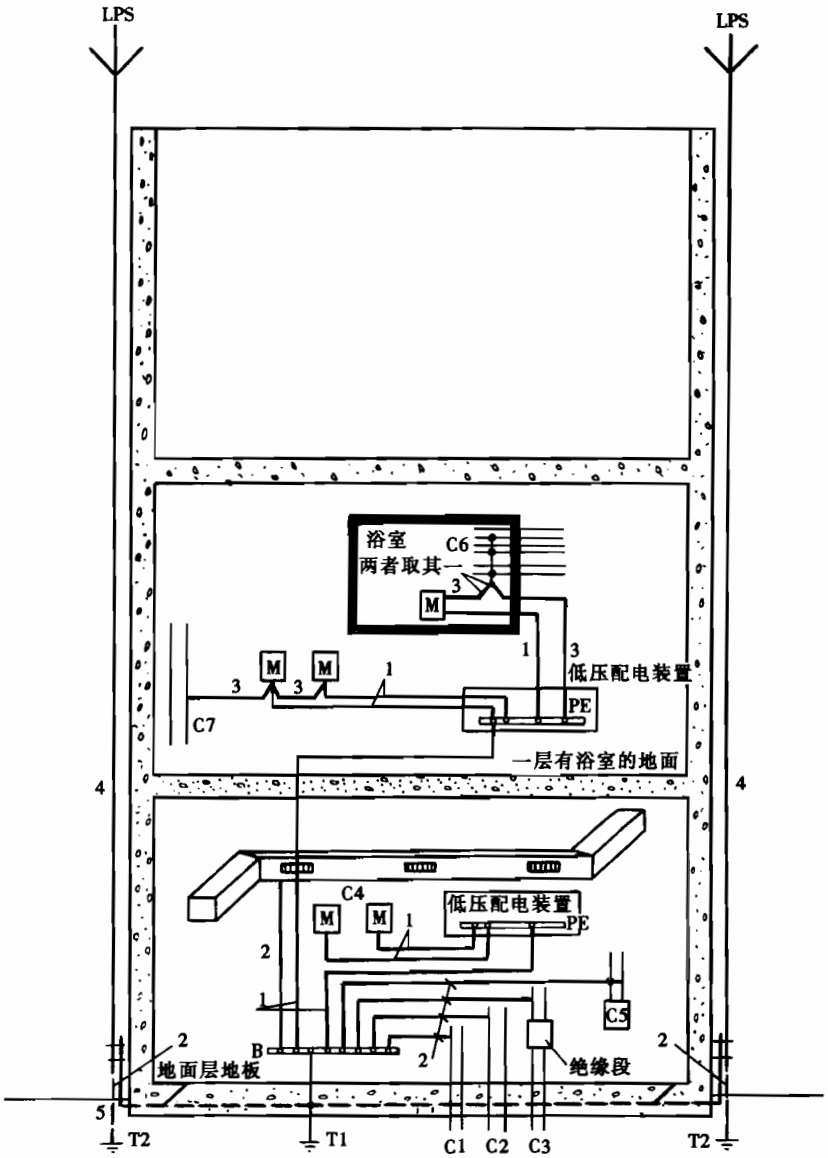


图 14－11　接地装置配置示意图

M—外露可导电部分；C1—金属的水管；C2—金属的排废弃物、排水管道；C3—金属带绝缘衬里的气体管道；C4—空调；C5—供热系统；C6—水管，比如浴室里的金属水管；C7—在外露可导电部分的伸臂范围内的外部可导电部分；B—总接地端子（总接地母线）；T1—基础接地；T2—LPS 的接地极（如果需要）；1—保护导体；2—保护连接导体；3—作为辅助连接用的保护连接导体；4—防雷保护系统（LPS）的引下线；5—接地导体

（2）任何一种接地极，其功效都取决于当地的土壤条件。对给定的土壤条件和所要求的接地电阻值，应选择一个或多个接地极以满足接地要求。

（3）可采用的接地极举例如下：

1）埋在基础里的地下结构金属网（基础接地）；

2）金属板；

3）埋在地下的钢筋混凝土（预应力的混凝土除外）的金属加强筋；

4）金属棒或管；

5）金属带或线；

6）根据当地条件或要求所设电缆的金属护套和其他金属护层；

7）根据当地条件或要求所设置的其他适用的地下金属网。

（4）在选择接地极类型和确定其埋地深度时，应考虑到当地的条件和相关规程，以便在土壤干燥和冻结的情况下，接地极的接地电阻不致增加到会有损电击防护措施的阻值。

（5）应注意在接地配置中采用不同材料时的电解腐蚀问题。

（6）用于输送可燃性液体或气体的金属管道，不应用作接地极。

14.4.3 接地导体

（1）对于埋入土壤里的接地导体，其截面积应按表 14－2 确定。

表 14－2　　埋在土壤中的接地导体的最小截面积

保护方式	有防机械损伤保护（mm^2）	无防机械损伤保护（mm^2）
有防腐蚀保护	铜 2.5 铁 10	铜 16 铁 16
无防腐蚀保护	铜 25 铁 50	

（2）接地导体与接地极的连接应牢固，且有良好的导电性能。这种连接应采用热熔焊、压力连接、夹具或其他的机械连接。机械接头应按厂家的说明书安装。若采用夹具，则不得损伤接地极或接地导体。

14.4.4 总接地端子（总接地母排）

（1）在采用保护连接的每个装置中都应配置有总接地端子（总接地母排），并应将下列导体与其连接：

1）保护连接导体；

2）接地导体；

3）保护导体；

4）功能接地导体（如果适当的话）。

（2）接到总接地端子上的每根导体，都应能被单独地拆开。这种连接应当牢固可靠，而且只有用工具才能拆开。

14.4.5 保护导体

（1）保护导体最小截面积。保护导体的截面积都应满足关于自动切断电源所要求的条件，而且能承受预期的故障电流。

保护导体的截面积可按式（14－1）计算，也可按表 14－3 进行选择。这两种方法都应考虑机械强度的要求。

表 14－3　　保护导体的最小截面积

线路导体截面积 S（mm^2）	相应保护导体的最小截面积（mm^2）	
	保护导体与线路导体使用相同材料	保护导体与线路导体使用不同材料
$S \leqslant 16$	S	$\frac{k_1}{k_2} \times S$
$16 < S \leqslant 35$	16*	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$

线路导体截面积 S (mm^2)	相应保护导体的最小截面积 (mm^2)	
	保护导体与线路导体使用相同材料	保护导体与线路导体使用不同材料
$S > 35$	$\frac{S^*}{2}$	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S}{2}$

式中 k_1 是线路导体的 k 值，它是导体的材料、绝缘和其他部件以及初始和最终温度决定的系数；

k_2 是保护导体的 k 值，它是导体的材料、绝缘和其他部件以及初始和最终温度决定的系数。

* 对于 PEN 导体，其截面积仅在全部符合以下确定原则的前题下，才允许减小。

—中性线导体预期电流（包括谐波电流）小于中性线导体截面减小的载流量；

—中性线导体设置过电流保护；

—中性线导体截面不小于 $16mm^2$（铜）或 $25mm^2$（铝）。

（2）保护导体的截面积不应小于对切断时间不超过 5s 下列公式确定的值：

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \tag{14-1}$$

式中 S——截面积，mm^2；

I——通过保护电器可忽略阻抗的故障产生的预期故障电流交流方均根值，A；

t——保护器自动切断时的动作时间，s；

k——由保护导体的材料、绝缘和其他部件以及初始和最终温度决定的系数。

若用公式求得的尺寸是非标准的，则应采用较大标准截面积的导体。

（3）不属于电缆的一部分或不与线路导体共处于同一外护物之内的每根保护导体，其截面积不应小于下述相应尺寸：

1）有防机械损伤保护，铜为 $2.5mm^2$，铝为 $16mm^2$；

2）没有防机械损伤保护，铜为 $4mm^2$，铝为 $16mm^2$。

（4）保护导体类型。保护导体由下列的一种或多种导体组成：

1）多芯电缆中的导体；

2）与带电导体共用的外护物的绝缘的或裸露的导体；

3）固定安装的裸露的或绝缘的导体；

4）属于以下 a 中的 a）项和 b）项所规定条件的金属的电缆护套、电缆屏蔽、电缆铠装、金属丝纺织物、同轴导体、电缆的金属导管。

a. 如果装置包括带金属外护物的设备，例如低压开关柜、控制设备组件或母线系统，若其金属外护物或框架同时满足以下三项要求，则可用作保护导体：

a）应能利用结构或适当的连接，使对机械、化学或电化学损伤的防护性能得到保证，从而保证它们的电气连续性；

b）它们应符合保护导体最小截面积的要求；

c）在每个预留的分接点上，它们应允许其他保护导体的连接。

b. 下列金属部分不允许用作保护导体或保护连接导体：

a）金属水管；

b）含有可燃性气体或液体的金属管道；

c）正常使用中承受机械应力的结构部分；

d）可伸缩的或可弯曲的金属导管（用于保护或保护连接目的而特别设计的除外）；

e）可伸缩的金属部件；

f）吊线。

（5）保护导体的电气连续性。

1）保护导体对机械伤害、化学或电化学损伤、电动力和热动力等应具有适当的防护性能。

2）为便于检验和测试，除如下所列各项外，保护导体的接头都应是可接近的。

a. 充填绝缘膏的接头；

b. 封装的接头；

c. 在金属导管内和封闭在管里的接头；

d. 按设备标准，已成为设备的一部分的接头。

3）在保护导体中，不应串入开关器件。但为了测试，可提供能用工具拆开的接头。

4）在采用接地电气监测时，不应将专用部件（如动作传感器、线圈）串接在保护导体中。

5）电器的外露可导电部分不应用于构成其他设备保护导体的一部分。

（6）PEN 导体。

1）PEN 导体只能在固定的电气装置中采用，考虑到结构原因，其截面积不应小于：铜为 $10mm^2$ 或铝为 $16mm^2$。

2）PEN 导体应满足它可能遭受的最高电压的绝缘要求。

3）如果从装置的任一点起，中性导体和保护导体分别采用单独的导体，则不允许将该中性导体再连接到装置的任何其他的接地部分（例如，由 PEN 导体分接出的保护导体）。然而，允许由 PEN 导体分接出的保护导体和中性导体都超过一根以上。对保护导体和中性导体，可分别设置单独的端子或汇流条。在这种情况下，PEN 导体应接到为保护导体预设的端子或汇流条上。

4）外部可导电部分不应用作 PEN 导体。

14.5 各种接地型式的适用范围

14.5.1 低压系统的接地型式

低压系统接地型式以拉丁字母作代号，其意义如下：

第一个字母表示电源端与地的关系：

T——电源端有一点直接接地；

I——电源端所有带电部分不接地或有一点通过高阻抗接地。

第二个字母表示电气装置的外露可电导部分与地的关系：

T——电气装置的外露可电导部分直接接地，此接地点在电气上独立于电源端的接地点；

N——电气装置的外露可电导部分与电源端接地点有直接电气连接。

横线后的字母用来表示中性导体与保护导体的组合情况：

S——中性导体和保护导体是分开的；

C——中性导体和保护导体是合一的。

14.5.2 TN 系统

电源端有一点直接接地，电气装置的外露可电导部分通过中性导体或保护导体连接到此接地点。

根据中性导体和保护导体的组合情况，TN 系统的有以下三种型式：

(1) TN－S 系统：整个系统的中性导体和保护导体是分开的，见图 14－12。

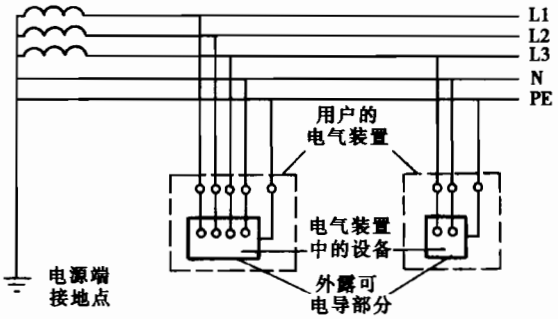


图 14－12　TN—S 系统

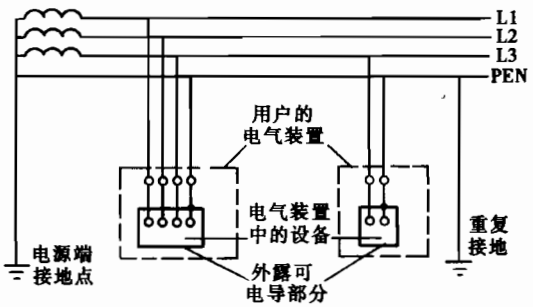


图 14－13　TN—C 系统

(2) TN—C 系统：整个系统的中性导体和保护导体是合一的，见图 14－13。

(3) TN—C—S 系统：系统中一部分线路的中性导体和保护导体是合一的，见图 14－14。

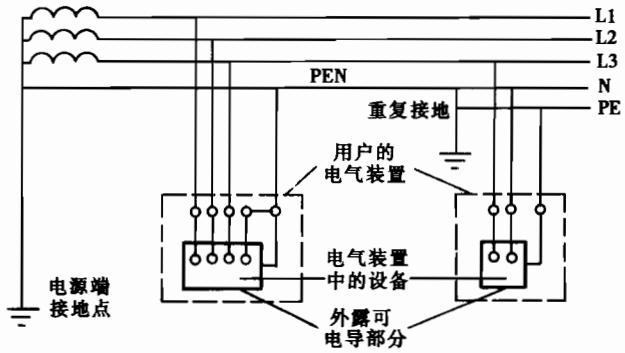


图 14－14　TN—C—S 系统

14.5.3　TT 系统

电源端有一点直接接地，电气装置的外露可电导部分直接接地，此接地点在电气上独立于电源端的接地点，见图 14－15。

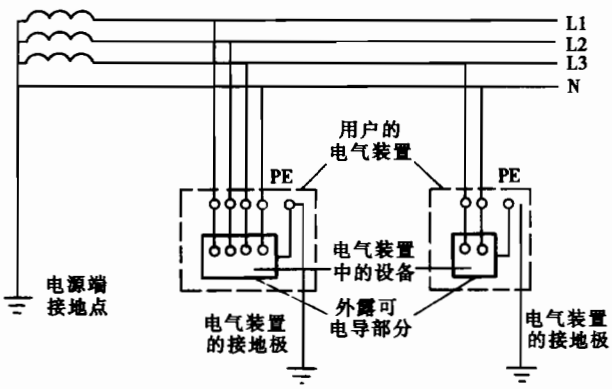


图 14－15　TT 系统

14.5.4　IT 系统

电源端的带电部分不接地或有一点通过高阻抗接地，电气装置的外露可电导部分直接接

地，见图 14－16。

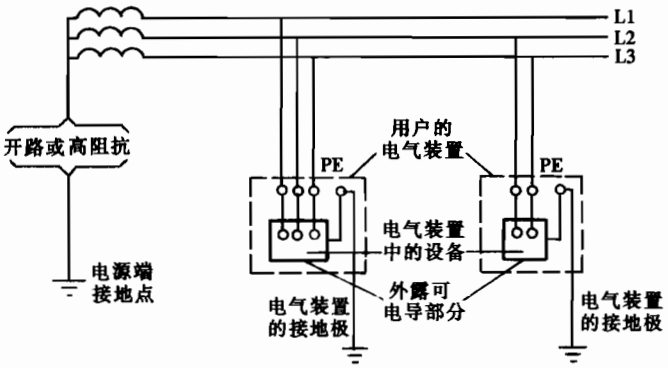


图 14－16　IT 系统

14.5.5　适用范围

TN—C 系统特点：

1）PEN 线兼有 N 线和 PE 线的作用，节省一根导线；

2）重复接地，减小系统总的接地电阻；

3）PEN 线产生电压降，外露可导电部分对地有电压；

4）PEN 线在系统内传导故障电压；

5）过电流保护兼作接地故障保护。

使用场所：三相负载均衡，并有熟练的维修技术人员。

TN－S 系统特点：

1）PE 线与 N 线分开，PE 线非故障时不流过电流，外露可电导部分不带电压，比较安全，但多一根导线；

2）PE 线在系统内传导故障电压。

使用场所：防电击要求高、爆炸和有火灾危险的环境以及建筑物装有大量信息技术设备。

TT 系统特点：

1）外露可电导部分有独立的接地保护，不传导故障电压；

2）由于电源系统有两个独立接地体，发生接地故障时接地故障电流较小，不能采用过电流保护兼作接地故障保护，而采用剩余电流保护器；

3）因采用剩余电流保护器保护线路，故双电源（双变压器、变压器与柴油发电机组）转换时采用四极开关；

4）易产生工频过电压。

使用场所：等电位连接有效范围外的户外用电场所、城市公共用电、高压中性点经低电阻接地的变电所。

IT 系统特点（不引出中性线）：

1）发生第一次接地故障时，接地故障电流仅为非故障相对地的电容电流，其值很小，外露可导电部分对地电压不超过 50V，不需要立即切断故障回路，保证供电的连续性；

2）发生接地故障时，对地电压升高 1.73 倍；

3）220V 负载需配降压变压器，或由系统外电源专供；

4）安装绝缘监察器。

使用场所：供电连续性要求较高，如应急电源、医院手术室等。

14.6 接触电压、跨步电压计算方法

14.6.1 接触电位差与跨步电位差

电力设备发生接地故障时，接地故障电流流过接地装置，在大地表面形成分布电位，地面上距设备水平距离0.8m处与沿设备外壳垂直距离1.8m处两点间的电位差，称为接触电位差；人体接触该两点时所承受的电压，称为接触电压。地面上水平距离0.8m的两点间的电位差，称为跨步电位差；人体两脚接触该两点时承受的电压，称为跨步电压。

确定发电厂、变电所接地装置的型式和布置时，考虑保护接地的要求，应降低接触电位差和跨步电位差，并应符合下列要求：

（1）在110kV及以上有效接地系统和6～35kV低电阻接地系统发生单相接地或同点两相接地时，发电厂、变电所接地装置的接触电位差和跨步电位差不应超过下列数值

$$U_t = \frac{174 + 0.17\rho_f}{\sqrt{t}}$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7\rho_f}{\sqrt{t}}$$

式中 U_t——接触电位差，V；

U_s——跨步电位差，V；

ρ_f——人脚站立处地表面的土壤电阻率，Ω·m；

t——接地短路（故障）电流的持续时间，s。

（2）3～66kV不接地、经消弧线圈接地和高电阻接地系统，发生单相接地故障后，当不迅速切除故障时，此时发电厂、变电所接地装置的接触电位差和跨步电位差不应超过下列数值

$$U_t = 50 + 0.05\rho_f$$

$$U_s = 50 + 0.2\rho_f$$

（3）在条件特别恶劣的场所，例如水田中，接触电位差和跨步电位差的允许值宜适当降低。

14.6.2 接触电位差和跨步电位差的计算

14.6.2.1 发生接地故障时接地装置的电压可按下式计算

$$U_g = IR$$

式中 U_g——接地装置的电压，V；

I——计算用入地短路电流，A；

R——接地装置（包括人工接地网及与其连接的所有其他自然接地极）的接地电阻，Ω。

14.6.2.2 均压带等间距布置时接地网（见图14－17）地表面的最大接触电位差、跨步电位差的计算。

（1）接地网地表面的最大接触电位差，即网孔中心对接地网接地极的最大电位差，可按下式计算

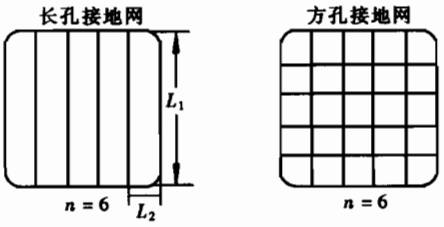


图 14-17　接地网的形状

$$U_{tmax} = K_{tmax} U_g$$

式中　U_{tmax}——最大接触电位差，V；

K_{tmax}——最大接触电位差系数。

当接地极的埋设深度 $h = 0.6 \sim 0.8$m 时，K_{tmax}可按下式计算

$$K_{tmax} = K_d K_L K_n K_s$$

式中　K_d、K_L、K_n、K_s——系数。

对 30m × 30m ≤ S ≤ 500m × 500m 的接地网，其系数可按下式计算

$$K_d = 0.841 - 0.225\lg d$$

$$K_L = 1.0 \qquad \text{方孔接地网}$$

$$= 1.1\sqrt[4]{L_2/L_1} \qquad \text{长孔接地网}$$

$$K_n = 0.076 + 0.776/n$$

$$K_s = 0.234 + 0.414\lg\sqrt{S}$$

式中　n——均压带计算根数；

d——均压带等效直径，m；

L_1、L_2——接地网的长度和宽度，m；

S——接地网总面积，m^2。

(2) 接地网外的地表面最大跨步电位差可按下式计算

$$U_{smax} = K_{smax} U_g$$

式中　U_{smax}——最大跨步电位差，V；

K_{smax}——最大跨电位差系数。

正方形接地网最大跨步电位差系数可按下式计算

$$K_{smax} = (1.5 - \alpha_2)\ln\frac{h^2 + (h + T/2)^2}{h^2 + (h - T/2)^2}/\ln\frac{20.4S}{dh}$$

$$\alpha_2 = 0.35\left(\frac{n-2}{n}\right)^{1.14}\left(\frac{\sqrt{S}}{30}\right)^{\beta}$$

$$\beta = 0.1\sqrt{n}$$

而 $T = 0.8$m，即跨步距离。

对于矩形接地网，n 值由下式计算：

$$n = 2\left(\frac{L}{L_0}\right)\left(\frac{L_0}{4\sqrt{S}}\right)^{1/2}$$

式中　L_0——接地网的外缘边线总长度，m；

L——水平接地极的总长度，m。

14.6.2.3　均压带非等间距布置时接地网地表面的最大接触电位差、跨步电位差的计算从略。

15 室内布线

15.1 一般场所布线的有关规定

15.1.1 一般规定

本节适用于民用建筑室内（包括与建筑物、构筑物相关联的外部位）绝缘电线、电缆和封闭式母线的布线。适用电压范围，除电缆布线、电缆桥架布线及竖井布线中的电缆线路可应用在10kV及以下线路外，其余布线均适用于500V以下电压。

（1）布线及敷设方式应根据建筑的性质、要求、用电设备的分布及环境特征等因素确定。应避免因外部热源、灰尘聚集及腐蚀或污染物存在对布线系统带来的影响。并应防止在敷设及使用过程中因受冲击、振动和建筑物伸缩、沉降等各种外界应力作用而带来的损害。

（2）敷设方式可分为：

1）明敷。导线直接或者在管子、线槽等保护体内，敷设于墙壁、顶棚的表面及桁架、支架等处；

2）暗敷。导线在管子、线槽等保护体内，敷设于墙壁、顶棚、地坪及楼板等内部，或者在混凝土板孔内敷线等。

（3）金属管、塑料管及金属线槽、塑料线槽等布线，应采用绝缘电线和电缆。在同一根管或线槽内有几个回路时，所有绝缘电线和电缆都应具有与最高标称电压回路绝缘相同的绝缘等级。

（4）布线工程中所有外露可导电部分的接地要求，应符合关规定。

（5）布线用塑料管（硬质塑料管、半硬塑料管）、塑料线槽及附件，应采用氧指数为27以上的难燃型制品。

15.1.2 线夹和绝缘子布线

（1）瓷（塑料）线夹布线一般适用于正常环境的室内场所和挑檐下室外场所。鼓形绝缘子、针式绝缘子布线一般适用于室内、外场所。在建筑物顶棚内，严禁采用瓷（塑料）线夹、鼓形绝缘子及针式绝缘子布线。

（2）采用瓷（塑料）线夹、鼓形绝缘子、针式绝缘子在室内、外布线时，绝缘电线至地面的距离应不小于表15－1所列数值。

表15－1 绝缘电线至地面的最小距离

布线方式	最小距离（m）
电线水平敷设时：室内	2.5
室外	2.7
电线垂直敷设时：室内	1.8
室外	2.7

表15－2 室内沿墙、顶棚布线的绝缘电线固定点最大间距

布线方式	电线截面（mm^2）	固定点最大间距（m）
瓷（塑料）线夹布线	1～4	0.6
	6～10	0.8
鼓形绝缘子布线	1～4	1.5
	6～10	2.0
	16～25	3.0

（3）采用瓷（塑料）线夹、鼓形绝缘子在室内沿墙壁、顶棚布线时，绝缘电线固定点的间距不应大于表 15－2 所列的值。

（4）采用鼓形绝缘子、针式绝缘子在室内、外布线时，绝缘电线的间距不应小于表 15－3所列数值。

表 15－3　室内、外布线的绝缘电线最小间距

绝缘子类型	固定点间距 L（m）	电线最小间距（m）	
		室内布线	室外布线
鼓形绝缘子	$L<1.5$	50	100
鼓形或针式绝缘子	$1.5<L<3$	75	100
针式绝缘子	$3<L<6$	100	150
针式绝缘子	$6<L<10$	150	200

表 15－4　绝缘电线至建筑物的最小间距

布线方式	最小间距（mm）
水平敷设时的垂直间距	
距阳台、平台、屋顶	2500
距下方窗户	300
距上方窗户	800
垂直敷设时至阳台、窗户的水平间距	750
电线至墙壁、构架的间距（挑檐下除外）	50

（5）在与建筑物相关联的室外部位布线时，绝缘电线至建筑物的间距不应小于表15－4所列数值。

15.1.3　直敷布线

（1）直敷布线一般适用于正常环境室内场所和挑檐下室外场所。建筑物顶棚内，严禁采用直敷布线。

（2）直敷布线应采用护套绝缘电线，其截面不宜大于 6mm^2。

（3）直敷布线的护套绝缘电线，应采用线卡沿墙壁、顶棚或建筑物构件表面直接敷设，固定点间距不应大于 0.30m。不得将护套绝缘电线直接埋入墙壁、顶棚的抹灰层内。

（4）直敷布线电线至地面的距离不应小于表 15－1 所列数值。导线垂直敷设至地面低于 1.80m 部分，应穿管保护。

（5）护套绝缘电线与接地导体及不发热的管道紧贴交叉时，应加绝缘管保护，敷设在易受机械损伤的场所应用钢管保护。

15.1.4　金属管布线

（1）金属管布线一般适用于室内、外场所，但对金属管有严重腐蚀的场所不宜采用。建筑物顶棚内，宜采用金属管布线。

（2）明敷于潮湿场所或埋地敷设的金属管布线，应采用水、煤气钢管。明敷或暗敷于干燥场所的金属管布线可采用电线管。

（3）三根及以上绝缘导线穿于同一根管时，其总截面积（包括外护层）不应超过管内截面积的 40%。

两根绝缘导线穿于同一根管时，管内径不应小于两根导线外径之和的 1.35 倍（立管可取 1.25 倍）。

（4）穿金属管的交流线路，应将同一回路的所有相线和中性线（如果有中性线时）穿于同一根管内。

（5）不同回路的线路不应穿于同一根金属管内，但下列情况可以除外：

1）电压为 50V 及以下的回路。

2）同一设备或同一联动系统设备的电力回路和无防干扰要求的控制回路。

3）同一照明花灯的几个回路。

4）同类照明的几个回路，但管内绝缘导线的根数不应多于 8 根。

（6）金属管明敷时，其固定点的间距，不应大于表 15－5 所列数值。

表 15－5　金属管明敷时的固定点最大间距

金属管种类	金属管公称直径（mm）			
	15～20	25～32	40～50	70～100
	最大间距（m）			
钢　管	1.5	2.0	2.5	3.5
电线管	1.0	1.5	2.0	

（7）电线管路与热水管、蒸汽管同侧敷设时，应敷设在热水管、蒸汽管的下面。有困难时，可敷设在其上面。相互间的净距不宜小于下列数值：

1）当管路敷设在热水管下面时为0.20m，敷设在上面时为0.30m。

2）当管路敷设在蒸汽管下面时为0.50m，敷设在上面时为1m。

当不能符合上列要求时，应采取隔热措施。对有保温措施的蒸汽管，上下净距均可减至0.20m。

电线管路与其他管道（不包括可燃气体及易燃、可燃液体管道）的平行净距不应小于0.10m。当与水管同侧敷设时，宜敷设在水管的上面。

当管路互相交叉时的距离，不宜小于相应上列情况的平行净距。

（8）金属管布线的管路较长或有弯时，宜适当加装拉线盒，两个拉线点之间距离应符合以下要求：

1）对无弯的管路，不超过30m。

2）两个拉线点之间有一个弯时，不超过20m。

3）两个拉线点之间有两个弯时，不超过15m。

4）两个拉线点之间有三个弯时，不超过8m。

当加装拉线盒有困难时，也可适当加大管径。

（9）暗敷于地下的管路不宜穿过设备基础，在穿过建筑物基础时，应加保护管保护；在穿过建筑物伸缩、沉降缝时，应采取保护措施。

（10）绝缘电线不宜穿金属管在室外直接埋地敷设。必要时对于次要用电负荷且线路较短（15m以下），可穿金属管埋地敷设，但应采取可靠的防水、防腐蚀措施。

15.1.5　硬质塑料管布线

（1）硬质塑料管布线一般适用于室内场所和有酸碱腐蚀性介质的场所，但在易受机械损伤的场所不宜采用明敷设。

建筑物顶棚内，可采用难燃型硬质塑料管布线。

表 15－6　塑料管明敷时固定点最大间距

公称直径（mm）	20及以下	25～40	50及以上
最大间距（m）	1.00	1.50	2.00

（2）硬质塑料管暗敷或埋地敷设时，引出地（楼）面不低于0.50m的一段管路，应采取防止机械损伤的措施。

（3）当采用硬质塑料管布线时，绝缘导线在管内的填充率应符合15.1.4条（3）款的规定。

（4）硬质塑料管明敷时，其固定点间距不应大于表15－6所列数值。

（5）不同回路的线路穿硬质塑料管，应符合15.1.4条（3）款的规定。

（6）硬质塑料管布线的管路与热水管、蒸汽管同侧敷设时，应符合15.1.4条（7）款的规定。

（7）硬质塑料管布线，当管路较长或有弯时，应符合15.1.4条（8）款的规定。

15.1.6　半硬塑料管及混凝土板孔布线

（1）半硬塑料管及混凝土板孔布线适用于正常环境一般室内场所，潮湿场所不应采用。

（2）半硬塑料管布线应采用难燃平滑塑料管及塑料波纹管。建筑物顶棚内，不宜采用塑料波纹管。

（3）混凝土板孔布线应采用塑料护套电线或塑料绝缘电线穿半硬塑料管敷设。

（4）塑料护套电线及塑料绝缘电线在混凝土板孔内不得有接头，接头应在接线盒内进行。

（5）不同回路的线路穿半硬塑料管或混凝土板孔时应符合 15.1.4 条（5）款的规定。

（6）半硬塑料管布线宜减少弯曲，当线路直线段长度超过 15m 或直角弯超过三个时，均应装设拉线盒。

（7）在现浇钢筋混凝土中敷设半硬塑料管时，应采取预防机械损伤措施。

15.1.7 金属线槽布线

（1）金属线槽布线一般适用于正常环境的室内场所明敷，但对金属线槽有严重腐蚀的场所不应采用。

具有槽盖的封闭式金属线槽，可在建筑顶棚内敷设。

（2）同一回路的所有相线和中性线（如果有中性线时），应敷设在同一金属线槽内。

（3）同一路径无防干扰要求的线路，可敷设于同一金属线槽内。线槽内电线或电缆的总截面（包括外护层）不应超过线槽内截面的 20%，载流导线不宜超过 30 根。

控制、信号或与其相类似的线路，电线或电缆的总截面不应超过线槽内截面的 50%，电线或电缆根数不限。

注：①控制、信号等线路可视为非载流导线。

②三根以上载流电线或电缆在线槽内敷设，当乘以各类所规定的载流量校正系数时，电线或电缆根数不限，但其在线槽内的总截面仍不应超过线槽内截面的 20%。

（4）电线或电缆在金属线槽内不宜有接头。但在易于检查的场所，可允许在线槽内有分支接头，电线、电缆和分支接头的总截面（包括外护层）不应超过该点线槽内截面的 75%。

（5）金属线槽布线，在线路连接、转角、分支及终端处应采用相应的附件。

（6）金属线槽垂直或倾斜敷设时，应采取措施防止电线或电缆在线槽内移动。

（7）金属线槽敷设时，吊点及支持点的距离，应根据工程具体条件确定，一般应在下列部位设置吊架或支架：

1）直线段不大于 3m 或线槽接头处。

2）线槽首端、终端及进出接线盒 0.50m 处。

3）线槽转角处。

（8）金属线槽布线，不得在穿过楼板或墙壁等处进行连接。

（9）由金属线槽引出的线路，可采用金属管、硬质塑料管、半硬塑料管、金属软管或电缆等布线方式。电线或电缆在引出部分不得遭受损伤。

15.1.8 塑料线槽布线

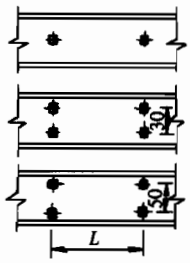
（1）塑料线槽布线一般适用于正常环境的室内场所，在高温和易受机械损伤的场所不宜采用。

（2）强、弱电线路不应同敷于一根线槽内。线槽内电线或电缆的总截面及根数应符合 15.1.7 条（3）款的规定。

（3）电线、电缆在线槽内不得有接头，分支接头应在接线盒内进行。

（4）塑料线槽敷设时，槽底固定点间距应根据线槽规格而定，一般不应大于表 15－7 所列数值。

表 15－7　塑料线槽明敷时固定点最大间距

固定点型式	线槽宽度（mm）		
	20～40	60	80～120
	固定点最大间距 L（m）		
	0.8	—	—
	—	1.0	—
	—	—	0.8

（5）塑料线槽布线，在线路连接、转角、分支及终端处应采用相应附件。

15.1.9　地面内暗装金属线槽布线

（1）地面内暗装金属线槽布线，适用于正常环境下大空间且隔断变化多、用电设备移动性大或敷有多种功能线路的场所，暗敷于现浇混凝土地面、楼板或楼板垫层内。

（2）同一回路的所有导线应敷设在同一线槽内。

（3）同一路径无防干扰要求的线路可敷设于同一线槽内。线槽内电线或电缆的总截面（包括外护层）不应超过线槽内截面的 40%。

（4）强、弱电线路应分槽敷设，两种线路交叉处应设置有屏蔽分线板的分线盒。

（5）地面内暗装金属槽内，电线或电缆不得有接头，接头应在分线盒或线槽出线盒内进行。

（6）线槽在交叉、转弯或分支处应设置分线盒，线槽的直线长度超过 6m 时，宜加装分线盒。

（7）由配电箱、电话分线箱及接线端子箱等设备引至线槽的线路，宜采用金属管布线方式引入分线盒，或以终端连接器直接引入线槽。

（8）线槽出线口和分线盒不得突出地面且应做好防水密封处理。

（9）地面内暗装金属线槽布线，在设计时应与土建专业密切配合，以便根据不同的结构型式和建筑布局，合理确定线路路径和设备选型。

15.1.10　电缆布线

（1）室内电缆布线，包括电缆在室内沿墙及建筑构件明敷设、电缆穿金属管埋地暗敷设。

（2）电缆在室内宜采用明敷。电缆不应有黄麻或其他易延燃的外护层。

（3）无铠装的电缆在室内明敷时，水平敷设至地面的距离不应小于 2.50m，垂直敷设至地面的距离不应小于 1.80m，否则应有防止机械损伤的措施。但明敷在电气专用房间（如电气竖井、配电室、技术层等）内的除外。

（4）相同电压的电缆并列明敷时，电缆的净距不应小于 35mm，并不应小于电缆外径。1kV 及以下电力电缆及控制电缆与 1kV 以上电力电缆宜分开敷设。

（5）电缆明敷设时，电缆支架间或固定点间的距离不应大于表 15－8 所列数值。

（6）电缆明敷设时，电缆与热力管道的净距不应小于 1m，否则应采取隔热措施。电缆与非热力管道的净距不应小于 0.50m，否则应在与管道接近的电缆段上，以及由接近段两端向外延伸不小于 0.50m 以内的电缆段上，采取防止机械损伤的措施。

表 15－8　电缆支架间或固定点间的最大间距　　单位：m

电缆种类 / 敷设方式	塑料护套、铝包钢带铠装		钢丝铠装
	电力电缆	控制电缆	
水平敷设	1.0	0.8	3.0
垂直敷设	1.5	1.0	6.0

（7）在有腐蚀性介质的房屋内明敷的电缆，宜采用塑料护套电缆。

(8) 电缆水平悬挂在钢索上时，电力电缆固定点的间距不应大于0.75m，控制电缆固定点的间距不应大于0.60m。

(9) 电缆在室内埋地敷设或电缆通过墙、楼板时，应穿钢管保护，穿管内径不应小于电缆外径的1.5倍。

15.1.11 电缆桥架布线

(1) 电缆桥架布线适用于电缆数量较多或较集中的场所。

(2) 在室内采用电缆桥架布线时，其电缆不应有黄麻或其他易延燃材料外护层。

(3) 在有腐蚀或特别潮湿的场所采用电缆桥架布线时，应根据腐蚀介质的不同采取相应的防护措施，并宜选用塑料护套电缆。

(4) 电缆桥架（梯架、托盘）水平敷设时的距地高度一般不宜低于2.50m，垂直敷设时距地1.80m以下部分应加金属盖板保护，但敷设在电气专用房间（如配电室、电气竖井、技术层等）内时除外。

(5) 电缆桥架水平敷设时，宜按荷载曲线选取最佳跨距进行支撑，跨距一般为1.50～3m。垂直敷设时，其固定点间距不宜大于2m。

(6) 电缆桥架多层敷设时，其层间距离一般为：控制电缆间不应小于0.20m；电力电缆间不应小于0.30m；弱电电缆与电力电缆间不应小于0.50m，如有屏蔽盖板可减少到0.30m；桥架上部距顶棚或其他障碍物不应小于0.30m。

(7) 几组电缆桥架在同一高度平行敷设时，各相邻电缆桥架间应考虑维护、检修距离。

(8) 在电缆桥架上可以无间距敷设电缆，电缆在桥架内横断面的填充率：电力电缆不应大于40%；控制电缆不应大于50%。

(9) 下列不同电压、不同用途的电缆，不宜敷设在同一层桥架上：

1) 1kV以上和1kV以下的电缆。

表15－9　　电缆桥架与各种管道的最小净距

管道类别		平行净距(m)	交叉净距(m)
一般工艺管道		0.4	0.3
具有腐蚀性液体（或气体）管道		0.5	0.5
热力管道	有保温层	0.5	0.5
	无保温层	1.0	1.0

2) 同一路径向一级负荷供电的双路电源电缆。

3) 应急照明和其他照明的电缆。

4) 强电和弱电电缆。

如受条件限制需安装在同一层桥架上时，应用隔板隔开。

(10) 电缆桥架与各种管道平行或交叉时，其最小净距应符合表15－9的规定。

(11) 电缆桥架不宜敷设在腐蚀性气体管道和热力管道的上方及腐蚀性液体管道的下方，否则应采取防腐、隔热措施。

(12) 电缆桥架内的电缆应在下列部位进行固定：

1) 垂直敷设时，电缆的上端及每隔1.50～2m处。

2) 水平敷设时，电缆的首、尾两端、转弯及每隔5～10m处。

(13) 电缆桥架内的电缆应在首端、尾端、转弯及每隔50m处，设有编号、型号及起、止点等标记。

(14) 电缆桥架在穿过防火墙及防火楼板时，应采取防火隔离措施。

15.1.12 封闭式母线布线

(1) 封闭式母线布线适用于干燥和无腐蚀性气体的室内场所。

(2) 封闭式母线水平敷设时，至地面的距离不应小于 2.20m。垂直敷设时，距地面 1.80m 以下部分应采取防止机械损伤措施。但敷设在电气专用房间内（如配电室、电机室、电气竖井、技术层等）时除外。

(3) 封闭式母线水平敷设的支持点间距不宜大于 2m。垂直敷设时，应在通过楼板处采用专用附件支承。

垂直敷设的封闭式母线，当进线盒及末端悬空时，应采用支架固定。

(4) 封闭式母线终端无引出、引入线时，端头应封闭。

(5) 当封闭式母线直线敷设长度超过制造厂给定的数值时，宜设置伸缩节。在封闭式母线水平跨越建筑物的伸缩缝或沉降缝处，也宜采取适当措施。

(6) 封闭式母线的插接分支点应设在安全及安装维护方便的地方。

(7) 封闭式母线的连接不应在穿过楼板或墙壁处进行。

(8) 封闭式母线在穿过防火墙及防火楼板时，应采取防火隔离措施。

15.1.13 竖井内布线

(1) 竖井内布线一般适用于多层和高层建筑内强电及弱电垂直干线的敷设。可采用金属管、金属线槽、电缆、电缆桥架及封闭式母线等布线方式。

(2) 竖井的位置和数量应根据建筑物规模、用电负荷性质、供电半径、建筑物的沉降缝设置和防火分区等因素确定。

选择竖井位置时，应考虑下列因素：

1) 宜靠近用电负荷中心，减少干线电缆沟道的长度。

2) 不得和电梯井、管道井共用同一竖井。

3) 避免邻近烟道、热力管道及其他散热量大或潮湿的设施。

4) 在条件允许时宜避免与电梯并及楼梯间相邻。

(3) 竖井的井壁应是耐火极限不低于 1h 的非燃烧体。竖井在每层楼应设维护检修门并应开向公共走廊，其耐火等级不应低于丙级。楼层间应做防火密封隔离，隔离措施如下：

1) 封闭式母线、电缆桥架及金属线槽在穿过楼板处采用防火隔板及防火堵料隔离。

2) 电缆和绝缘电线穿钢管布线时，应在楼层间预埋钢管，布线后两端管口空隙应做封闭隔离。

(4) 竖井大小除满足布线间隔及端子箱、配电箱布置所必须尺寸外，并宜在箱体前留有不小于 0.80m 的操作、维护距离。

(5) 竖井内垂直布线时，应考虑以下因素：

1) 顶部最大变位和层间变位对干线的影响。

2) 电线、电缆及金属保护管、罩等自重所带来的荷重影响及其固定方式。

3) 垂直干线与分支干线的连接方法。

(6) 竖井内高压、低压和应急电源的电气线路，相互之间应保持 0.30m 及以上距离或采取隔离措施，并且高压线路应设有明显标志。强电和弱电线路，有条件时宜分别设置在不同竖井内。如受条件限制必须合用时，强电与弱电线路应分别布置在竖井两侧或采取隔离措施以防止强电对弱电的干扰。

(7) 竖井内应敷有接地干线和接地端子。

(8) 竖井内不应有与其无关的管道等通过。

(9) 竖井内各种布线应符合本章相应的有关规定。

15.1.14 电话管线的系统设计

15.1.14.1 电话线路和进户设计：电话线路的进户设计主要包括进户线设计、交接间的设置以及建筑物内的配线设计三部分。

(1) 进户管线设计主要有两种方式：地下进户和外墙进户。

根据建筑物是否设有地下层，地下进户管线又分为地下进户管线直接进入地下层，采用的直进户管。另一种是建筑物无地下层时，地下进户管只能直接引入设在首层的配线间或分线箱。

外墙进户方式是在建筑物的地上二层预埋进户管至配线设备间，线路的引入位置应选择在便于连接户内电话线路汇接集中的地方（如交换机房、交接间等），使内外线路的长度最短。

(2) 交接间的设置：每幢住宅建筑内必须设置一专用电话交接间，该间宜设在建筑物底层进出线方便的地方。交接间使用的面积高层不宜小于 $6m^2$，多层不宜小于 $3m^2$，并要符合下列要求：

1) 配置照明灯和 220V 市电插座；

2) 有良好地保护接地线；

3) 房间通风要良好；

4) 室内净高不宜小于 2.4m，外开门宽不宜小于 1m。

5) 有保安措施。

(3) 建筑物内的配线设计：它包括路由（尤其是垂直及水平干线部分）及其敷设方式的选择，缆材及管材的选用，分线箱、用户盒的选择等。

15.1.14.2 公共建筑及住宅建筑（包括高层）电话电缆的配线方式：在不采用综合布线的情况下，通常采用单独式、复接式、递减式、交接式和合用式，如图 15－1 所示。

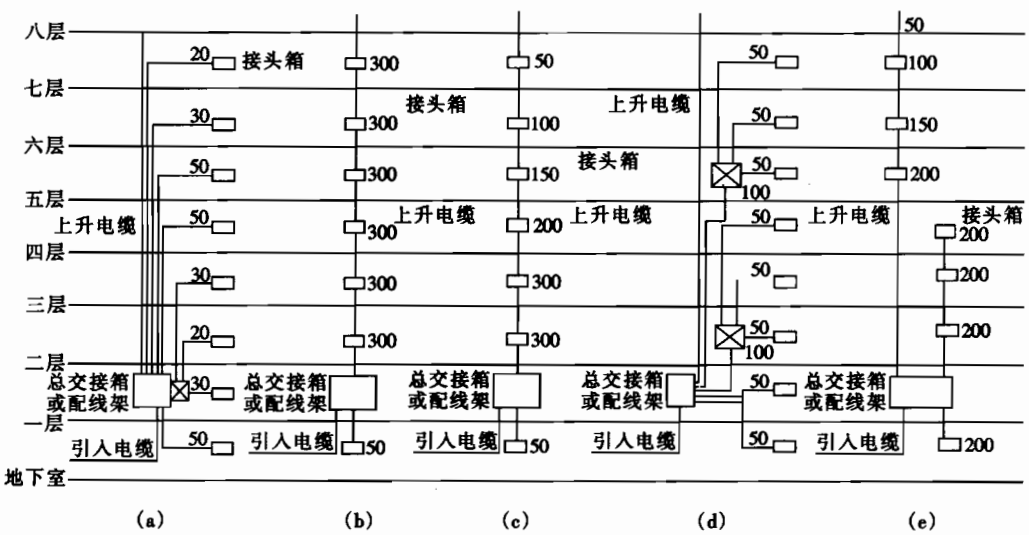


图 15－1 高层建筑电话电缆的配线方式

(a) 单独式；(b) 复接式；(c) 递减式；(d) 交接式；(e) 合用式

(1) 单独式。采用这种配线方式时，各个楼层的电话电缆采取分别独立的直接供线，因

此各个楼层的电话电缆线对之间毫无连接关系。各个楼层所需的电缆对数根据需要来定，可以相同或不相同。

1）优点：①各楼层的电缆线路互不影响，如发生障碍涉及范围较小，只是一个楼层；②由于各层都是单独供线，发生故障容易判断和检修；③扩建或改建较为简单，不影响其他楼层。

2）缺点：①单独供线，缆线长度增加，工程造价较高；②电缆线路网的灵活性差，各层的线对无法高度使用，线路利用率不高。

3）适用范围：适用于各层楼需要的电缆线对较多且较为固定不变的场合，如高级宾馆的标准层或办公大楼的办公室等。

（2）复接式。采用这种配线方式时，各个楼层之间的电缆线对部分复接或全部复接，复接线对根据各层需要来决定。每对线的复接次数一般不得超过两次。各个楼层的电话电缆由同一条上升电缆接出，不是单独供线。

1）优点：①电缆线路网的灵活性较高，各层的线对因有复接关系，可以适当调度；②电缆长度较短，且对数集中，工程造价较低。

2）缺点：①各个楼层电缆线对复接后会互相影响，如发生故障，涉及范围较广，对各个楼层都有影响；②各个楼层不是单独供线，如发生障碍不易判断和检修；③扩建或改建时，对其他楼层有所影响。

3）适用范围：适用于各层需要的电缆线对数量不均匀，变化比较频繁的场合，如大规模的大楼、科技贸易中心或业务变化较多的办公大楼等。

（3）递减式。这种配线方式各个楼层线对互相不复接，各个楼层之间的电缆线对引出使用后，上升电缆逐段递减。

1）优点：①各个楼层虽由同一上升电缆引出，但因线对互不复接，故发生故障时容易判断和检修；②电缆长度较少，且对数集中，工程造价较低。

2）缺点：①电缆线路网的灵活性较差，各层的线对无法高度使用，线路利用率不高；②护建或改建时较为复杂，要影响其他楼层。

3）适用范围：适用各层所需的电缆线对数量不均匀且无变化的场合，如规模较小的宾馆、办公楼及高级公寓等。

（4）交接式。这种配线方式将整个高层建筑的电缆线路网分为几个交接配线区域，除离总交接箱或配线架较近的楼层采用单独式供线外，其他各层电缆均分别经过有关交接箱与总交接箱（或配线架）连接。

1）优点：①各个楼层电缆线路互不影响，如发生障碍，则涉及范围较小，只是相邻楼层，线对可以调度使用；③发生障碍容易判断、测试和检修。

2）缺点：①增加了交接箱和电缆长度，工程造价较高；②对施工和维护管理等要求较高。

3）适用范围：适用于各层需要线对数量不同且变化较多的场合，例如规模较大、变化较多的办公楼、高级宾馆、科技贸易中心等。

（5）合用式。这种方式是将上述几种不同配线方式混合应用而成，因而适用场合较多，尤其适用于规模较大的公共建筑等。

15.1.14.3 建筑物内的电话线路配线方式：建筑物场内的电话线路敷线方式，视建筑物的类别、部位及投资条件等不同可分为：

（1）明配线；

（2）暗配线（包括地面下线槽配线）；

（3）主干电缆或分支电缆暗配线，用户线为明配线的混合方式；

（4）室内桥架和封闭线槽配线；

（5）电缆竖井配线等。

15.1.14.4 建筑物室内配线原则：

（1）室内配线宜避免穿越沉降缝，不应穿越易燃、易爆、高温、高电压、高潮湿及有强震动的地段或房间，若不可避免时，应采取保护措施。

（2）配线区域宜按楼层划分，特殊情况个别用户可跨越两个楼层。

（3）配线区域内分线箱（盒）应位于负荷中心，容量不宜大于50对。

（4）配线区域内宜采用直接配线为主，特殊情况部分用户采用复接配线。

（5）室内配线电缆不宜在楼板内作横向敷设，特殊情况下需作横向敷设时，电缆容量以不超过50对为宜。

15.1.14.5 电缆竖井垂直布设干线：

（1）选择电缆竖井位置时，应考虑下列因素：①宜靠近信息点负荷中心，减少水平干线及支线的长度。②不得各电梯井、管道井共同一竖井。③避免与干扰源邻近（如电梯井及其他大电流设施），如实在不能远离，应采用屏蔽措施。④避免邻近烟道、热力管道及其他散热量大或潮湿的设施。⑤宜设置弱电专用竖井，最好不与强电合用，如合用时需满足距离要求并做好防护。

（2）电缆竖井应综合考虑弱电设施的不同要求，如布线长度的规定、检修距离等。

（3）从电话站或交接箱出来的分支电缆，可采用电缆桥架、线槽或进管敷设并引至弱电竖井。分支电缆在竖井内应穿管或桥架、线槽沿墙明敷设至各层的分线箱。分线箱可安装在竖井内。

（4）电缆竖井的宽度不宜小于800mm（综合性竖井还应加大）深度不宜小于500mm（综合性竖井还应加大），门向外开，高度不要小于1.8m。竖井应根据防火要求，满足相应规定。

（5）竖井内的弱电设施要做好接地处理。

15.1.14.6 建筑内的配管选择：在房屋内的暗管一般采用薄壁钢管，在外干扰源影响小的地方亦可采用塑料管；在易重压的地方应采用厚壁钢管。在易受电磁干扰影响的场合采用钢管并做好接地。

在房屋内的明布线，可采用明管或线槽。

有条件的地方，根据信息点的分布，可采用地面下线横槽布线。

15.1.14.7 建筑物电话通信的暗配线的选择：

（1）建筑物内暗配线电缆宜采用铝塑综合护套结构的全塑电缆。

（2）分线设备的接续元件，宜为卡接式或旋转卡接式等定型产品。

（3）用户电话引线宜采用0.5mm或0.6mm线径的多对电话线。

15.1.14.8 电话分线箱及出线盒安装要求：分线箱是连接配线电缆和用户线的设备。在竖井内装设的分线箱可明装或挂墙方式；其他情况下的分线箱大多采用墙上暗装方式，以适应用户暗管的引入及美观要求。分线箱安装高度底边距地0.5～1m。话机出线盒暗装距地0.2～0.3m。

15.2 特殊场所布线的有关规定

15.2.1 爆炸和火灾危险场所布线

15.2.1.1 爆炸性气体环境：

（1）电气线路应在爆炸危险性较小的环境或远离释放源的地方敷设。

1）当易燃物质比空气重时，电气线路应在较高处敷设或直接埋地；架空敷设时宜采用电缆桥架；电缆沟敷设时沟内应充砂，并宜设置排水措施。

2）当易燃物质比空气轻时，电气线路宜在较低处敷设或电缆沟敷设。

3）电气线路宜在有爆炸危险的建、构筑物的墙外敷设。

（2）敷设电气线路的沟道、电缆或钢管，所穿过的不同区域之间墙或楼板处的孔洞，应采用非燃性材料严密堵塞。

（3）当电气线路沿输送易燃气体或液体的管道栈桥敷设时，应符合下列要求：

1）沿危险程度较低的管道一侧；

2）当易燃物质比空气重时，在管道上方；比空气轻时，在管道的下方。

（4）敷设电气线路时宜避开可能受到机械损伤、振动、腐蚀以及可能受热的地方，不能避开时，应采取预防措施。

（5）在爆炸性气体环境内，低压电力、照明线路用的绝缘导线和电缆的额定电压，必须不低于工作电压，且不应低于500V。工作中性线的绝缘的额定电压应与相线电压相等，并应在同一护套或管子内敷设。

（6）在1区内单相网络中的相线及中性线均应装设短路保护，并使用双极开关同时切断相线及中性线。

（7）在1区内应采用铜芯电缆；在2区内宜采用铜芯电缆，当采用铝芯电缆时，与电气设备的连接应有可靠的铜—铝过渡接头等措施。

（8）选用电缆时应考虑环境腐蚀、鼠类和白蚁危害以及周围环境温度及用电设备进线盒方式等因素。在架空桥架敷设时宜采用阻燃电缆。

（9）对3～10kV电缆线路，宜装设零序电流保护；在1区内保护装置宜动作于跳闸；在2区内宜作用于信号。

（10）本质安全系统的电路应符合下列要求：

1）当本质安全系统电路的导体与其他非本质安全系统电路的导体接触时，应采取适当预防措施。不应使接触点处产生电弧或电流增大、产生静电或电磁感应。

2）连接导线当采用铜导线时，引燃温度为T1～T4组时，其导线截面与最大允许电流应符合表15－10的规定。

表15－10　　铜导线截面与最大允许电流（适用于T1～T4组）

导线截面（mm^2）	0.017	0.03	0.09	0.19	0.28	0.44
最大允许电流（A）	1.0	1.65	3.3	5.0	6.6	8.3

3）导线绝缘的耐压强度应为2倍额定电压，最低电压为500V。

（11）除本质安全系统的电路外，在爆炸性气体环境1区、2区内电缆配线的技术要求，应符合表15－11的规定。

明设塑料护套电缆，当其敷设方式采用能防止机械损伤的电缆槽板、托盘或桥架方式

时，可采用非铠装电缆。

在易燃物质比空气轻且不存在会受鼠、虫等损害情形时，在2区电缆沟内敷设的电缆可采用非铠装电缆。

表 15－11　　爆炸性气体环境电缆配线技术要求

技术要求 / 项目 / 爆炸危险区域	电缆明设或在沟内敷设时的最小截面			接线盒	移动电缆
	电　力	照　明	控　制		
1　区	铜芯 2.5mm² 及以上	铜芯 2.5mm² 及以上	铜芯 2.5mm² 及以上	隔爆型	重　型
2　区	铜芯 1.5mm² 及以上，或铝芯 4mm² 及以上	铜芯 1.5mm² 及以上，或铝芯 2.5mm² 及以上	铜芯 1.5mm² 及以上	隔爆、增安型	中　型

铝芯绝缘导线或电缆的连接与封端应采用压接、熔焊或钎焊，当与电气设备（照明灯具除外）连接时，应采用适当的过渡接头。

在1区内电缆线路严禁有中间接头，在2区内不应有中间接头。

（12）除本质安全系统的电路外，在爆炸性气体环境1区、2区内电压为1000V以下的钢管配线的技术要求，应符合表15－12的规定。

表 15－12　　爆炸危险环境钢管配线技术要求

技术要求 / 项目 / 爆炸危险区域	钢管明配线路用绝缘导线的最小截面			接线盒分支盒挠性连接管	管子连接要求
	电　力	照　明	控　制		
1　区	铜芯 2.5mm² 及以上	铜芯 2.5mm² 及以上	铜芯 2.5mm² 及以上	隔爆型	对 Dg25mm 及以下的钢管螺纹旋合不应少于5扣，对 Dg32mm 及以上的不应少于6扣并有锁紧螺母
2　区	铜芯 1.5mm² 及以上，铝芯 4mm² 及以上	铜芯 1.5mm² 及以上，铝芯 2.5mm² 及以上	铜芯 1.5mm² 及以上	隔爆、增安型	对 Dg25mm 及以下的螺纹旋合不应少于5扣，对 Dg32mm 及以上的不应少于6扣

钢管应采用低压流体输送用镀锌焊接钢管。

为了防腐蚀，钢管连接的螺纹部分应涂以铅油或磷化膏。

在可能凝结冷凝水的地方，管线上应装设排除冷凝水的密封接头。

与电气设备的连接处宜采用挠性连接管。

（13）在爆炸性气体环境1区、2区内钢管配线的电气线路必须作好隔离密封，且应符合下列要求。

1）爆炸性气体环境1区、2区内，下列各处必须作隔离密封：

a. 当电气设备本身的接头部件中无隔离密封时，导体引向电气设备接头部件前的管段处；

b. 直径50mm以上钢管距引入的接线箱450mm以内处，以及直径50mm以上钢管每距15m处；

c. 相邻的爆炸性气体环境1区、2区之间；爆炸性气体环境1区、2区与相邻的其他危

险环境或正常环境之间。

进行密封时，密封内部应用纤维作填充层的底层或隔层，以防止密封混合物流出，填充层的有效厚度必须大于钢管的内径。

2）供隔离密封用的连接部件，不应作为导线的连接或分线用。

（14）在爆炸性气体环境1、2区内，绝缘导线和电缆截面的选择，应符合下列要求：

1）导体允许载流量，不应小于熔断器熔体额定电流的1.25倍，也不应小于自动开关长延时过电流脱扣器整定电流的1.25倍［本款2）项情况除外］。

2）引向电压为1000V以下鼠笼型感应电动机支线的长期允许载流量，不应小于电动机额定电流的1.25倍。

（15）10kV及以下架空线路严禁跨越爆炸性气体环境，架空线路与爆炸性气体环境的水平距离，不应小于杆塔高度的1.5倍。在特殊情况下，采用有效措施后，可适当减少距离。

（16）爆炸性气体环境接地设计应符合下列要求。

1）按有关电力设备接地设计技术规程规定不需要接地的下列部分，在爆炸性气体环境内仍应进行接地：

a. 在不良导电地面处，交流额定电压为380V及以下和直流额定电压为440V及以下的电气设备正常不带电的金属外壳；

b. 在干燥环境，交流额定电压为127V及以下，直流电压为110V及以下的电气设备正常不带电的金属外壳；

c. 安装在已接地的金属结构上的电气设备。

2）在爆炸危险环境内，电气设备的金属外壳应可靠接地。爆炸性气体环境1区内的所有电气设备以及爆炸性气体环境2区内除照明灯具以外的其他电气设备，应采用专门的接地线。该接地线若与相线敷设在同一保护管内时，应具有与相线相等的绝缘。此时爆炸性气体环境的金属管线，电缆的金属包皮等，只能作为辅助接地线。

爆炸性气体环境2区内的照明灯具，可利用有可靠电气连接的金属管线系统作为接地线，但不得利用输送易燃物质的管道。

3）接地干线应在爆炸危险区域不同方向不少于两处与接地体连接。

4）电气设备的接地装置与防止直接雷击的独立避雷针的接地装置应分开设置，与装设在建筑物上防止直接雷击的避雷针的接地装置可合并设置；与防雷电感应的接地装置亦可合并设置。接地电阻值应取其中最低值。

15.2.1.2 爆炸性粉尘环境：

（1）电气线路应在爆炸危险性较小的环境处敷设。

（2）敷设电气线路的沟道、电缆或钢管，在穿过不同区域之间墙或楼板处的孔洞，应采用非燃性材料严密堵塞。

（3）敷设电气线路时宜避开可能受到机械损伤、振动、腐蚀以及可能受热的地方，如不能避开时，应采取预防措施。

（4）爆炸性粉尘环境10区内高压配线应采用铜芯电缆；爆炸性粉尘环境11区内高压配线除用电设备和线路有剧烈振动者外，可采用铝芯电缆。

爆炸性粉尘环境10区内全部的和爆炸性粉尘环境11区内有剧烈振动的，电压为1000V以下用电设备的线路，均应采用铜芯绝缘导线或电缆。

（5）爆炸性粉尘环境10区内绝缘导线和电缆的选择应符合下列要求：

1）绝缘导线和电缆的导体允许载流量不应小于熔断器熔体额定电流的 1.25 倍，和自动开关长延时过电流脱扣器整定电流的 1.25 倍（本款第 2 项情况除外）；

2）引向电压为 1000V 以下鼠笼型感应电动机的支线的长期允许载流量，不应小于电动机额定电流的 1.25 倍；

3）电压为 1000V 以下的导线和电缆，应按短路电流进行热稳定校验。

（6）在爆炸性粉尘环境内，低压电力、照明线路用的绝缘导线和电缆的额定电压，必须不低于网络的额定电压，且不应低于 500V。工作中性线绝缘的额定电压应与相线的额定电压相等，并应在同一护套或管子内敷设。

（7）在爆炸性粉尘环境 10 区内，单相网络中的相线及中性线均应装设短路保护，并使用双极开关同时切断相线和中性线。

表 15－13　　爆炸性粉尘环境电缆配线技术要求

技术要求 / 项目 / 爆炸危险区域	电缆的最小截面	移动电缆
10 区	铜芯 2.5mm² 及以上	重型
11 区	铜芯 1.5mm² 及以上 铝芯 2.5mm² 及以上	中型

注　铝芯绝缘导线或电缆的连接与封端应采用压接。

（8）爆炸性粉尘环境 10 区、11 区内电缆线路不应有中间接头。

（9）选用电缆时应考虑环境腐蚀、鼠类和白蚁危害以及周围环境温度及用电设备进线盒方式等因素。在架空桥架敷设时宜采用阻燃电缆。

（10）对 3～10kV 电缆线路应装设零序电流保护；保护装置在爆炸性粉尘环境 10 区内宜动作于跳闸，在爆炸性粉尘环境 11 区内宜作用于信号。

（11）电压为 1000V 以下的电缆配线技术要求见表 15－13。

（12）严禁采用绝缘导线或塑料管明设。当采用钢管配线时，电压为 1000V 以下的钢管配线的技术要求，应符合表 15－14 规定。

表 15－14　　爆炸性粉尘环境钢管配线技术要求

技术要求 / 项目 / 爆炸危险区域	绝缘导线的最小截面	接线盒、分支盒	管子连接要求
10 区	铜芯 2.5mm² 及以上	尘密型	螺纹旋合应不少于 5 扣
11 区	铜芯 1.5mm² 及以上 铝芯 2.5mm² 及以上	尘密型，也可采用防尘型	螺纹旋合应不少于 5 扣

注　尘密型规定标志为 DT 的粉尘防爆类型；防尘型规定标志为 DP 的粉尘防爆类型。

钢管应采用低压流体输送用镀锌焊接钢管。为了防腐蚀，钢管连接的螺纹部分应涂以铅油或磷化膏。在可能凝结冷凝水的地方，管线上应装设排除冷凝水的密封接头。

（13）在 10 区内敷设绝缘导线时，必须在导线引向电气设备接头部件，以及与相邻的其他区域之间作隔离密封。供隔离密封用的连接部件，不应作为导线的连接或分线用。

15.2.1.3　火灾危险环境电气线路的设计和安装应符合下列要求：

（1）在火灾危险环境内，可采用非铠装电缆或钢管配线明敷设。在火灾危险环境 21 区或 23 区内，可采用硬塑料管配线。在火灾危险环境 23 区内，当远离可燃物质时，可采用绝缘导线在针式或鼓形瓷绝缘子上敷设。

沿未抹灰的木质吊顶和木质墙壁敷设的以及木质闷顶内的电气线路应穿钢管明设。

（2）在火灾危险环境内，电力、照明线路的绝缘导线和电缆的额定电压，不应低于线路的额定电压，且不低于500V。

（3）在火灾危险环境内，当采用铝芯绝缘导线和电缆时，应有可靠的连接和封端。

（4）在火灾危险环境21区或22区内，电动起重机不应采用滑触线供电；在火灾危险环境23区内，电动起重机可采用滑触线供电，但在滑触线下方不应堆置可燃物质。

（5）移动式和携带式电气设备的线路，应采用移动电缆或橡套软线。

（6）在火灾危险环境内，当需采用裸铝、裸铜母线时，应符合下列要求：

1）不需拆卸检修的母线连接处，应采用熔焊或钎焊。

2）母线与电气设备的螺栓连接应可靠，并应防止自动松脱。

3）在火灾危险环境21区和23区内，母线宜装设保护罩，当采用金属网保护罩时，应采用IP2X结构；在火灾危险环境22区内母线应有IP5X结构的外罩。

4）当露天安装时，应有防雨、雪措施。

（7）10kV及以下架空线路严禁跨越火灾危险区域。

15.2.2 绝缘电线明敷在高温辐射或对绝缘有腐蚀的场所

绝缘电线明敷在高温辐射或对绝缘有腐蚀的场所时，电线间及电线至建筑物表面最小净距，不应小于表15－15所列数值。

表15－15 高温或腐蚀性场所绝缘电线间及导线至建筑物表面最小净距

电线固定点间距 L（m）	最小净离（mm）
$L \leqslant 2$	75
$2 < L \leqslant 4$	100
$4 < L \leqslant 6$	150
$6 < L \leqslant 10$	200

推荐采用穿硬（半硬）塑料管布线。如采用绝缘导线明敷，导线间及导线至建筑物表面的最小间距按裸导线考虑。如采用电缆布线，推荐采用塑料护套电缆，否则在电缆外层涂以防腐剂。明敷的铜排、接线盒及绝缘线的支架，都应涂防腐剂。

15.2.3 高洁净场所及特定医疗场所布线

高洁净场所布线主要应防止积聚灰尘，推荐暗敷，最好暗埋，不用地沟，出线盒、插座均应暗装。如采用暗插座，其插孔应在插头取下时能自动盖住。

在医疗单位的手术间等要求高度洁净的地方，也按上述要求进行布线，同时还要考虑防静电措施。对于一些对电击敏感的病员区，为了使漏电流最小，采用高绝缘电阻导线穿不延燃的非金属管以最短距离布线。还应设置漏电报警装置，能在漏电流超过2mA时发出报警，以便及时处理。

15.2.4 要求电磁屏蔽场所及真空室布线

一般采用水、煤气钢管配线或用金属屏蔽层的电缆暗敷。建筑物内的馈电线及控制线尽可能埋地敷设，并采用辅助性等电位措施，对于要求电磁屏蔽的场所，电源线必须用埋地不少于10m的电缆引入室内。建筑物四周用环形接地或利用基础钢筋连接起来作为接地网。电缆的金属屏蔽层及金属门、窗均应以最短距离与接地网相连。室外线路杆塔的金属部件应接地。真空室的电源线及外部送来的控制线都必须经过气密性插座送入真空室内，以免破坏真空，真空室内照明电压不应超过36V，否则将影响灯泡寿命。

15.2.5 电子计算机及其他数据处理设备房间布线

电子计算机及数据处理设备内大多以装设集成电路块的金属底板作为逻辑地，该逻辑地用金属编织带与设备外壳相连，通过外壳上的保护接地线连到配电柜的接地母排上。数据线采用金属屏蔽层的信号电缆，最好远离电力线路或与电力线路交叉敷设。如电力线路采用钢

管配线或用金属屏蔽层电缆布线，两者也可平行敷设。为了人身安全和防止聚集静电，主机室地板的表面电阻要在 $10^5 \sim 10^9\Omega$ 之间。如采用活动地板，其支架必须接地。

15.2.6 火灾自动报警系统

（1）火灾自动报警系统的传输线路和 50V 以下供电的控制线路，应采用电压等级不低于交流 250V 的铜芯绝缘导线或铜芯电缆。采用交流 220/380V 的供电和控制线路应采用电压等级不低于交流 500V 的铜芯绝缘导线或铜芯电缆。

表 15－16　铜芯绝缘导线和铜芯电缆的线芯最小截面面积

序号	类　别	线芯的最小截面面积(mm^2)
1	穿管敷设的绝缘导线	1.00
2	线槽内敷设的绝缘导线	0.75
3	多芯电缆	0.50

（2）火灾自动报警系统的传输线路的线芯截面选择，除应满足自动报警装置技术条件的要求外，还应满足机械强度的要求。铜芯绝缘导线、铜芯电缆线芯的最小截面面积不应小于表 15－16 的规定。

（3）火灾自动报警系统的传输线路应采用穿金属管、经阻燃处理的硬质塑料管或封闭式线槽保护方式布线。

（4）消防控制、通信和警报线路采用暗敷设时，宜采用金属管或经阻燃处理的硬质塑料管保护，并应敷设在不燃烧体的结构层内，且保护层厚度不宜小于 30mm。当采用明敷设时，应采用金属管或金属线槽保护，并应在金属管或金属线槽上采取防火保护措施。

采用经阻燃处理的电缆时，可不穿金属管保护，但应敷设在电缆竖井或吊顶内有防火保护措施的封闭式线槽内。

（5）火灾自动报警系统用的电缆竖井，宜与电力、照明用的低压配电线路电缆竖井分别设置。如受条件限制必须合用时，两种电缆应分别布置在竖井的两侧。

（6）从接线盒、线槽等处引到探测器底座盒、控制设备盒、扬声器箱的线路均应加金属软管保护。

（7）火灾探测器的传输线路，宜选择不同颜色的绝缘导线或电缆。正极“＋”线应为红色，负极“－”线应为蓝色。同一工程中相同用途导线的颜色应一致，接线端子应有标号。

（8）接线端子箱内的端子宜选择压接或带锡焊接点的端子板，其接线端子上应有相应的标号。

（9）火灾自动报警系统的传输网络不应与其他系统的传输网络合用。

15.3 建筑物内综合布线设计要求

15.3.1 综合布线的基本构成

15.3.1.1 工作区

（1）一个独立的需要设置终端设备的区域宜划分为一个工作区。工作区应由配线（水平）布线系统的信息插座延伸到工作站终端设备处的连接电缆及适配器组成。一个工作区的服务面积可按 5～10m^2 估算，或按不同的应用场合调整面积的大小。

每个工作区信息插座的数量应按本节 15.3.2.2 条规定配置。

（2）工作区适配器的选用宜符合下列规定：

1）设备的连接插座与连接电缆的插座匹配，不同的插座与插头应加装适配器；

2）当开通 ISDN 业务时，应采用网络终端或终端适配器；

3）在连接使用不同信号的数/模转换或数据速率转换等相应的装置时，宜采用适配器；

4）对于不同网络规程的兼容性，可采用协议转换适配器；

5）各种不同的终端设备或适配器均安装在信息插座之外，工作区的适当位置。

15.3.1.2 配线子系统

（1）配线子系统应由工作区的信息插座、信息插座至楼层配线设备（FD）的配线电缆或光缆，楼层配线设备和跳线等组成。

（2）配线子系统设计应符合下列要求：

1）根据工程提出的近期和远期的终端设备要求；

2）每层需要安装的信息插座的数量及其位置；

3）终端将来可能产生移动、修改和重新安排的预测情况；

4）一次性建设或分期建设的方案。

（3）配线子系统应采用4对对绞电缆，在需要时也可采用光缆。配线子系统根据整个综合布线系统的要求，应在交接间或设备间的配线设备上进行连接。配线子系统的配线电缆或光缆长度不应超过90m。在能保证链路性能时，水平光缆距离可适当加长。

（4）配线电缆可选用普通的综合布线铜芯对绞电缆，在必要时应选用阻燃、低烟、低毒等电缆。

（5）信息插座应采用8位模块式通用插座或光缆插座。

（6）配线设备交叉连接的跳线应选用综合布线专用的插接软跳线，在电话应用时也可选用双芯跳线。

（7）1条4对对绞电缆应全部固定终接在1个信息插座上。

15.3.1.3 干线子系统

（1）干线子系统应由设备间的建筑物配线设备（BD）和跳线以及设备间至各楼层交接间的干线电缆组成。

（2）干线子系统所需要的电缆总对数和光纤芯数，其容量可按最低配置、基本配置和综合配置的要求确定。对数据应用应采用光缆或5类对绞电缆，对绞电缆的长度不应超过90m，对电话应用可采用3类对绞电缆。

（3）干线子系统应选择干线电缆较短、安全和经济的路由，且宜选择带门的封闭型综合布线专用的通道敷设干线电缆，也可与弱电竖井合用。

（4）干线电缆宜采用点对点端接，也可采用分支递减端接。

（5）如果设备间与计算机机房和交换机房处于不同的地点，而且需要将话音电缆连至交换机房，数据电缆连至计算机房，则宜在设计中选取不同的干线电缆，或干线电缆的不同部分来分别满足话音和数据的需要。当需要时，也可采用光缆系统予以满足。

（6）缆线不应布放在电梯、供水、供气、供暖、强电等竖井中。

15.3.1.4 设备间

（1）设备间是在每一幢大楼的适当地点设置电信设备和计算机网络设备，以及建筑物配线设备，进行网络管理的场所。对于综合布线工程设计，设备间主要安装建筑物配线设备(BD)。电话、计算机等各种主要设备及引入设备可合装在一起。

（2）设备间内的所有总配线设备宜采用色标区别各类用途的配线区。

（3）设备间位置及大小应根据设备的数量、规模、最佳网络中心等因素，综合考虑确定。

(4) 建筑物的综合布线系统与外部通信网连接时，应遵循相应的接口标准，并预留安装相应接入设备的位置。

15.3.1.5 管理

(1) 管理应对设备间、交接间和工作区的配线设备、缆线、信息插座等设施，按一定的模式进行标识和记录，并宜符合下列规定：

1) 规模较大的综合布线系统宜采用计算机进行管理，简单的综合布线系统宜按图纸资料进行管理，并应做到记录准确、及时更新、便于查阅；

2) 综合布线的每条电缆、光缆、配线设备、端接点、安装通道和安装空间均应给定唯一的标志。标志中可包括名称、颜色、编号、字符串或其他组合；

3) 配线设备、缆线、信息插座等硬件均应设置不易脱落和磨损的标识，并应有详细的书面记录和图纸资料；

4) 电缆和光缆的两端均应标明相同的编号。

(2) 配线机架应留出适当的空间，供未来扩充之用。

15.3.1.6 建筑群子系统

(1) 建筑群子系统应由连接各建筑物之间的综合布线缆线、建筑群配线设备（CD）和跳线等组成。

(2) 建筑物之间的缆线宜采用地下管道或电缆沟的敷设方式，并应符合相关规范的规定。

(3) 建筑群干线电缆、光缆、公用网和专用网电缆、光缆（包括天线馈线）进入建筑物时，都应设置引入设备，并在适当位置终端转换为室内电缆、光缆。引入设备还包括必要的保护装置。引入设备宜单独设置房间，如条件合适也可与 BD 或 CD 合设。引入设备的安装应符合相关规范的规定。

(4) 建筑群和建筑物的干线电缆、主干光缆布线的交接不应多于两次。从楼层配线架（FD）到建筑群配线架（CD）之间，只应通过一个建筑物配线架（BD）。

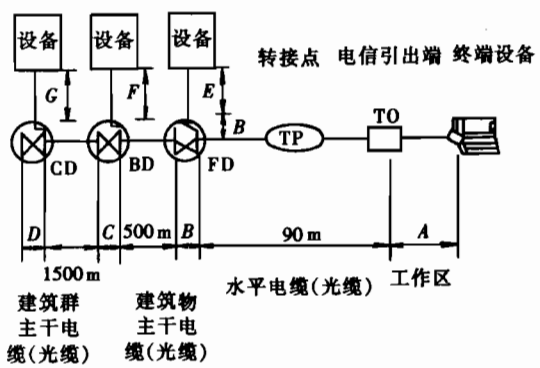


图 15－2 综合布线系统组网和缆线长度限值

注：*A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*G* 表示相关区段缆线或跳线的长度。

其中 $A+B+E \leqslant 10$m；

C 和 $D \leqslant 20$m；

F 和 $G \leqslant 30$m。

15.3.2 综合布线系统的设计方法

15.3.2.1 综合布线系统设计原则与等级选择

(1) 综合布线系统（GCS）应是开放式星型拓扑结构，应能支持电话、数据、图文、图像等多媒体业务的需要。

(2) 综合布线系统宜接下列六个部分进行设计：

1) 工作区；

2) 配线子系统；

3) 干线子系统；

4) 设备间；

5) 管理；

6) 建筑群子系统。

(3) 综合布线系统的组网和各段缆线的长度限值应符合图 15－2 所示的规定。

(4) 综合布线系统的分级和传输距离限值应符合表 15－17 的规定。

表 15－17　　系统分级和传输距离限值

系统分级	最高传输频率	对绞电缆传输距离 (m)		光缆传输距离 (m)		应用举例
		100Ω 3 类	100Ω 5 类	多模	单模	
A	100kHz	2000	3000	—	—	PBX X.21/V.11
B	1MHz	200	260	—	—	N－ISDN CSMA/ CDIBASE5
C	16MHz	100①	160③	—	—	CSMA/ CD10BASE－T TokenRing 4Mbit/s Token Ring 16Mbit/s
D	100MHz	—	100①	—	—	Token Ring 16Mbit/s B－ISDN (ATM) TP－PMD
光缆	—	—	—	2000	3000②	CSMA/ CD/FOIRL CSMA/CD 10BASE－F Token Ring FDDI LCF FDDI SM FDDI HIPPI ATM FC

①100m 的信道长度中包括 10m 软电缆长度，分配给接插软线或跳线，工作区和设备连接用软电缆，其中工作区电缆和设备电缆的总电气长度不超过 7.5m（指电气长度 7.5m，相当于物理长度 5m）。

②3000m 是标准范围规定的极限，不是介质极限。

③信道长度超过 100m 时，应核对具体的应用标准。

15.3.2.2　系统配置

建筑与建筑群的工程设计，应根据实际需要，选择适当配置的综合布线系统。当网络使用要求尚未明确时，宜按下列规定配置：

(1) 最低配置：适用于综合布线系统中配置标准较低的场合，用铜芯对绞电缆组网。

1) 每个工作区有 1 个信息插座。

2) 每个信息插座的配线电缆为 1 条 4 对对绞电缆。

3) 干线电缆的配置，对计算机网络宜按 24 个信息插座配 2 对对绞线，或每一个集线器 (HUB)，或集线器群 (HUB 群) 配 4 对对绞线；对电话至少每个信息插座配 1 对对绞线。

（2）基本配置：适用于综合布线系统中中等配置标准的场合，用铜芯对绞电缆组网。

1）每个工作区有 2 个或 2 个以上信息插座。

2）每个信息插座的配线电缆为 1 条 4 对对绞电缆。

3）干线电缆的配置，对计算机网络宜按 24 个信息插座配 2 对对绞线，或每一个 HUB 或 HUB 群配 4 对对绞线；对电话至少每个信息插座配 1 对对绞线。

（3）综合配置：适用于综合布线系统中配置标准较高的场合，用光缆和铜芯对绞电缆混合组网。

1）以基本配置的信息插座量作为基础配置。

2）垂直干线的配置：每 48 个信息插座宜配 2 芯光纤，适用于计算机网络；电话或部分计算机网络，选用对绞电缆，按信息插座所需线对的 25% 配置垂直干线电缆，或按用户要求进行配置，并考虑适当的备用量。

3）当楼层信息插座较少时，在规定长度的范围内，可几层合用 HUB，并合并计算光纤芯数，每一楼层计算所得的光纤芯数还应按光缆的标称容量和实际需要进行选取。

4）如有用户需要光纤到桌面（FTTD），光缆可经或不经 FD 直接从 BD 引至桌面，上述光纤芯数不包括 FTTD 的应用在内。

5）楼层之间原则上不敷垂直干线电缆，但在每层的 FD 可适当预留一些接插件，需要时可临时布放合适的缆线。

（4）配线设备交接硬件的选用，宜符合下列规定：

1）用于电话的配线设备，宜选用 IDC 卡接式模块；

2）用于计算机网络的配线设备，宜选用 RJ45 或 IDC 插接式模块。

15.3.2.3 设备间要求

（1）设备间应符合下列规定：

1）设备间宜处于干线子系统的中间位置；

2）设备间宜尽可能靠近建筑物电缆引入区和网络接口；

3）设备间的位置宜便于接地；

4）设备间室温应保持在 10 ~ 30℃之间，相对湿度保持 20% ~ 80%，并应有良好的通风；

5）设备间内应有足够的设备安装空间，其面积最低不应小于 $10m^2$。

（2）设备间应防止有害气体（如 SO_2、H_2、S、NH_3、NO_2 等）侵入，并应有良好的防尘措施，尘埃含量限值宜符合表 15 - 18 规定。

表 15 - 18　　尘　埃　限　值

灰尘颗粒的最大直径（μm）	0.5	1	3	5
灰尘颗粒的最大浓度（粒子数/m^3）	1.4×10^7	7×10^5	2.4×10^5	1.3×10^5

注　灰尘粒子应是不导电的、非铁磁性和非腐蚀性的。

（3）在地震区的区域内，设备安装应按规定进行抗震加固，并符合《通信设备安装抗震设计规范》YD5059—1998 的相应规定。

（4）设备安装宜符合下列规定：

1）机架或机柜前面的净空不应小于 800mm，后面的净空不应小于 600mm；

2）壁挂式配线设备底部离地面的高度不宜小于 300mm；

3）在设备间安装其他设备时，设备周围的净空要求，按该设备的相关规范执行。

（5）设备间应提供不少于两个220V、10A带保护接地的单相电源插座。

（6）设备间的安装工艺要求除上述规定外，应满足《电信专用房屋设计规范》YD5003—1994中有关配线设备的规定。如果安装电信设备或其他应用设备时，应符合相应的设计规定。

15.3.2.4 交接间要求

（1）交接间的数目，应从所服务的楼层范围来考虑。如果配线电缆长度都在90m范围以内时，宜设置一个交接间，当超出这一范围时，可设两个或多个交接间，并相应地在交接间或紧邻处设置干线通道。

（2）交接间的面积不应小于$5m^2$，如覆盖的信息插座超过200个时，应适当增加面积。

（3）交接间的设备安装和电源要求，应符合15.3.2.3条（4）和（5）款的相关规定。

（4）交接间应有良好的通风。安装有源设备时，室温宜保持在10～30℃，相对湿度宜保持在20%～80%。

15.3.2.5 电缆敷设要求

（1）配线子系统电缆宜穿管或沿金属电缆桥架敷设，当电缆在地板下布放时，应根据环境条件选用地板下线槽布线、网络地板布线、高架（活动）地板布线、地板下管道布线等安装方式。

（2）干线子系统垂直通道有电缆孔、管道、电缆竖井三种方式可供选择，宜采用电缆竖井方式。水平通道可选择预埋暗管或电缆桥架方式。

（3）管内穿放大对数电缆时，直线管路的管径利用率应为50%～60%，弯管路的管径利用率为40%～50%。管内穿放4对对绞电缆时，截面的利用率应为25%～30%。线槽的截面利用率不应超过50%。

15.3.2.6 工作区要求

（1）工作区信息插座的安装宜符合下列规定：

1）安装在地面上的信息插座应采用防水和抗压的接线盒；

2）安装在墙面上或柱子上的信息插座底部离地面的高度宜为300mm；

3）安装在墙面或柱子上的多用户信息插座模块，或集合点配线模块，底部离地面的高度宜为300mm。

（2）工作区的电源应符合下列规定：

1）每1个工作区至少应配置1个220V交流电插座；

2）工作区的电源插座应选用带保护接地的单相电源插座，保护接地与零线应严格分开。

15.3.3 综合布线系统的主要技术指标及测试方法

15.3.3.1 综合布线系统主要技术指标

（1）综合布线系统链路传输的最大衰减限值，包括配线电缆和两端的连接硬件、跳线在内，应符合表15－19的规定。

（2）综合布线系统任意两线对之间的近端串音衰减限值，包括配线电缆和两端的连接硬件、跳线、设备和工作区连接电缆在内（但不包括设备连接器），应符合表15－20的规定。

（3）综合布线系统中任一电缆接口处的回波损耗限值，应符合表15－21的规定。

表 15－19　链路传输的最大衰减限值

频率 (MHz)	最大衰减限值（dB）			
	A 级	B 级	C 级	D 级
0.1	16	5.5	—	—
1.0		5.8	3.7	2.5
4.0	—	—	6.6	4.8
10.0	—	—	10.7	7.5
16.0	—	—	14.0	9.4
20.0	—	—	—	10.5
31.25	—	—	—	13.1
62.5	—	—	—	18.4
100.0	—	—	—	23.2

注　1. 要求将各点连成曲线后，测试的曲线全部应在标准曲线的限值范围之内。

2. 测量衰减时，如包括链路两端的设备电缆和工作区电缆在内，应扣除设备电缆和工作区电缆的衰减。

表 15－20　线对间最小近端串音衰减限值

频率 (MHz)	最小近端串音衰减限值（dB）			
	A 级	B 级	C 级	D 级
0.1	27	40	—	—
1.0	—	25	39	54
4.0	—	—	29	45
10.0	—	—	23	39
16.0	—	—	19	36
20.0	—	—	—	35
31.25	—	—	—	32
62.5	—	—	—	27
100.0	—	—	—	24

注　1. 所有其他音源的噪声应比全部应用频率的串音噪声低 10dB。

2. 在主干电缆中，最坏线对的近端串音衰减值，应以功率和来衡量。

3. 桥接分岔或多组合电缆，以及连接到多重信息插座的电缆，任一对称电缆单元之间的近端串音衰减，至少要比单一组合的 4 对电缆的近端串音衰减提高一个数值 Δ，其计算式为

$$\Delta = 6\text{dB} + 10\lg(n+1)\ \text{dB}$$

式中　n——电缆中相邻的对称电缆单元数。

表 15－21　电缆接口处最小回波损耗限值

频率 f (MHz)	最小回波损耗限值（dB）		频率 f (MHz)	最小回波损耗限值（dB）	
	C 级	D 级		C 级	D 级
$1 \leqslant f < 10$	18	18	$16 \leqslant f < 20$	—	15
$10 \leqslant f < 16$	15	15	$20 \leqslant f \leqslant 100$	—	10

（4）综合布线系统链路衰减与近端串音衰减的比率（*ACR*），应符合表 15－22 的规定（对于 A、B、C 级链路，其 *ACR* 值可由表 15－20 与表 15－19 给出的值相减得出）。

表 15－22　最小 *ACR* 限值

频　率 (MHz)	最大衰减限值（dB）	频　率 (MHz)	最大衰减限值（dB）
	D 级		D 级
0.1	—	20.0	28
1.0	—	31.25	23
4.0	40	62.5	13
10.0	35	100.0	4
16.0	30		

注　$ACR\ (\text{dB}) = a_N\ (\text{dB}) - a\ (\text{dB})$

式中　a_N——任意两线对间的近端串音衰减值；

a——链路传输的衰减值。

（5）综合布线系统线对的直流环路电阻限值，当系统分级和传输距离在表 15－17 规定的情况下，应符合表 15－23 的规定。

表 15－23　直流环路电阻限值

链路级别	A 级	B 级	C 级	D 级
最大环路电阻（Ω）	560	170	40	40

(6) 综合布线系统线对的传播时延限值，应符合表 15－24 的规定。

表 15－24　　最大传播时延限值

级　别	测量频率（MHz）	时　延（μs）	级　别	测量频率（MHz）	时　延（μs）
A	0.01	20	C	10	1
B	1	5	D	30	1

注　配线（水平）子系统中的最大传播时延不得超过 1μs。

(7) 综合布线系统光缆波长窗口的各项参数，应符合表 15－25 的规定。

表 15－25　　光缆波长窗口参数

光纤模式，标称波长（nm）	下限（nm）	上限（nm）	基准试验波长（nm）	谱线最大宽度 FWHM（nm）
多模 850	790	910	850	50
多模 1300	1285	1330	1300	150
单模 1310	1288	1339	1310	10
单模 1550	1525	1575	1550	10

注　1. 多模光纤，芯线标称直径为 62.5/125μm 或 50/125μm，并应符合《通信用多模光纤系列》GB/T12357 规定的 A1b 或 A1a 光纤。

850nm 波长时最大衰减为 3.5dB/km（20℃）；最小模式带宽为 200MHz（20℃）。

1300nm 波长时最大衰减为 1dB/km（20℃）；最小模式带宽为 500MHz（20℃）。

2. 单模光纤：芯线应符合《通信用单模光纤系列》GB/T9771 标准的 B1.1 类光纤。

1310nm 和 1550nm 波长时最大衰减为 1dB/km；截止波长应小于 1280nm。

1310nm 时色散应≤6PS/（km·nm）；1550nm 时色散应≤20PS/（km·nm）。

3. 光纤连接硬件：最大衰减 0.5dB；最小回波损耗：多模为 20dB，单模为 26dB。

(8) 综合布线系统的光缆布线链路，在表 15－25 规定各项参数的条件下的衰减限值，应符合表 15－26 的规定。

表 15－26　　光缆布线链路的最大衰减限值

光缆应用类别	链路长度（m）	多模衰减值（dB）		单模衰减值（dB）	
		850（nm）	1300（nm）	1310（nm）	1550（nm）
配线（水平）子系统	100	2.5	2.2	2.2	2.2
干线（垂直）子系统	500	3.9	2.6	2.7	2.7
建筑群子系统	1500	7.4	3.6	3.6	3.6

注　表中规定的链路长度，是在采用符合表 15－25 规定的光缆和光纤连接硬件的条件下，允许的最大衰减。

(9) 综合布线系统多模光纤链路的最小光学模式带宽，应符合表 15－27 的规定。

表 15－27　多模光缆布线链路的最小模式带宽

标称波长（nm）	最小模式带宽（MHz）
850	100
1300	250

表 15－28　最小的光回波损耗限值

光纤模式，标称波长（nm）	最小的光回波损耗限值（dB）
多模 850	20
多模 1300	20
单模 1310	26
单模 1550	26

(10) 综合布线系统光缆布线链路任一接口的光回波损耗限值，应符合表 15－28 的规定。

（11）综合布线系统的缆线与设备之间的相互连接应注意阻抗匹配和平衡与不平衡的转换适配。特性阻抗应符合 100Ω 标准，在频率大于 1MHz 时偏差值应为 ±15Ω。

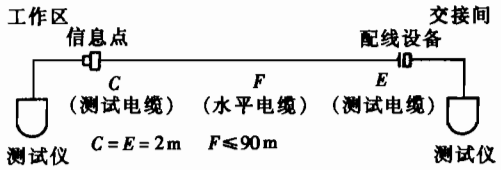


图 15－3　基本链路测试连接

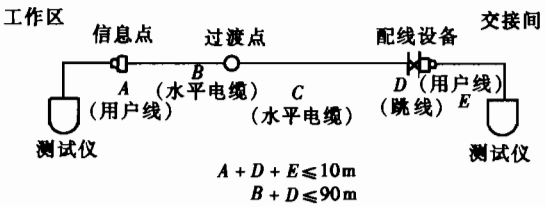


图 15－4　信道测试

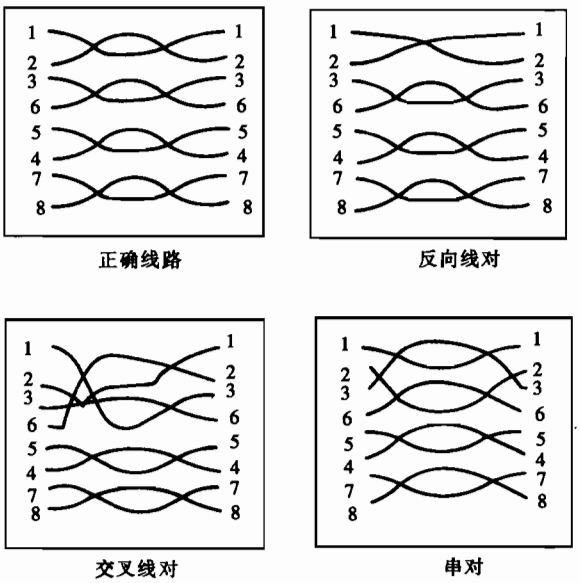


图 15－5　接线图

15.3.3.2　综合布线系统的测试方法

（1）测试按下图进行连接。

1）基本链路连接应符合图 15－3 方式。

2）信道连接应符合图 15－4 方式。

（2）测试包括以下内容：

1）接线图的测试，主要测试水平电缆终接工作区 8 位模块式通用插座及交接间配线设备接插件接线端子间的安装连接正确或错误，具体如图 15－5 所示。

2）测试长度应在测试连接图所要求的范围之内。

3）在选定的某一频率上信道和基本链路衰减量应符合表 15－29 和表 15－30 的要求，信道的衰减包括 10m（跳线、设备连接线之和）及各电缆段、接插件的衰减量的总和。

表 15－29　信道衰减量

频率（MHz）	3 类（dB）	5 类（dB）
1.00	4.2	2.5
4.00	7.3	4.5
8.00	10.2	6.3
10.00	11.5	7.0
16.00	14.9	9.2
20.00	—	10.3
25.00	—	11.4
31.25	—	12.8
62.50	—	18.5
100.00	—	24.0

注　总长度为 100m 以内。

表 15－30　基本链路衰减量

频率（MHz）	3 类（dB）	5 类（dB）
1.00	3.2	2.1
4.00	6.1	4.0
8.00	8.8	5.7
10.00	10.0	6.3
16.00	13.2	8.2
20.00	—	9.2
25.00	—	10.3
31.25	—	11.5
62.50	—	16.7
100.00	—	21.6

注　1. 总长度为 94m 以内。

2. 以上测试是以 20℃为准，在 3 类对绞电缆时，每增加 1℃则衰减量增加 1.5%，对 5 类对绞电缆，则每增加 1℃会有 0.4%的变化。

4）近端串音是对绞电缆内，二条线对间信号的感应。对近端串音的测试，必须对每对线在两端进行测量。某一频率上，线对间近端串音应符合表 15－31 和表 15－32 的要求。

表 15－31　信道近端串音（最差线间）

频率（MHz）	3 类（dB）	5 类（dB）
1.00	39.1	60.0
4.00	29.3	50.6
8.00	24.3	45.6
10.00	22.7	44.0
16.00	19.3	40.6
20.00	—	39.0
25.00	—	37.4
31.25	—	35.7
62.50	—	30.6
100.00	—	27.1

注　最差值限于 60dB。

表 15－32　基本链路近端串音（最差线间）

频率（MHz）	3 类（dB）	5 类（dB）
1.00	40.1	60.0
4.00	30.7	51.8
8.00	25.9	47.1
10.00	24.3	45.5
16.00	21.0	42.3
20.00	—	40.7
25.00	—	39.1
31.25	—	37.6
62.50	—	32.7
100.00	—	29.3

注　最差值限于 60dB。

15.3.3.3　光纤链路测试方法

（1）测试前应对所有的光连接器进行清洗，并将测试接收器校准至零位。

（2）测试包括以下内容：

1）对整个光纤链路（包括光纤和连接器）的衰减进行测试；

2）光纤链路的反射测量以确定链路长度及故障点位置。

（3）测试按图 15－6 和图 15－7 进行连接。

1）在两端对光纤逐根进行测试，连接方式见图 15－6 所示。

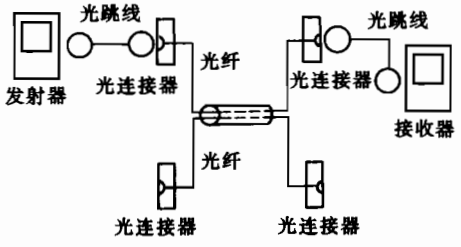


图 15－6　光纤链路测试连接图（一）

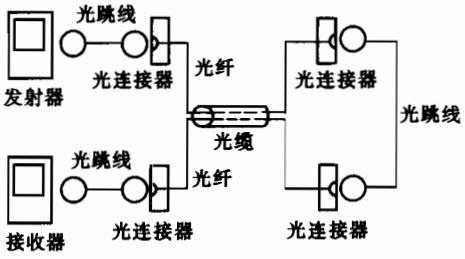


图 15－7　光纤链路测试连接图（二）

2）在一端对 2 根光纤进行环回测试，连接方式见图 15－7。

（4）光缆布线链路在规定的传输窗口测量出的最大光衰减（介入损耗）应不超过表 15－33的规定，该指标已包括链路接头与连接插座的衰减在内。

表 15－33　光缆布线链路的衰减

布线	链路长度（m）	衰减（dB）			
		单模光缆		多模光缆	
		1310nm	1550nm	850nm	1300nm
水平	100	2.2	2.2	2.5	2.2
建筑物主干	500	2.7	2.7	3.9	2.6
建筑群主干	1500	3.6	3.6	7.4	3.6

（5）光缆布线链路的任一接口测出的光回波损耗应大于表 15－34 给出的值。

表 15－34　　最小光回波损耗

类　别	单模光缆		多模光缆	
波　长（nm）	1310	1550	850	1300
光回波损耗（dB）	26	26	26	26

16 照　明

概论：照明设计是建筑工程设计的重要组成部分，理解其与建筑的相互作用，是照明设计不可缺少的一方面。一项照明工程，从生理角度上考虑照度水平、灯具布置是需要的，但还要考虑人的主观感知、人的需求和个性化这方面的重要性。有人提出，照明的基本功能应当是：环境照明、重点照明和装饰照明三个方面，营造最佳的视觉空间是建筑师和照明设计师共同的创作目标。

在照明工程设计讲课时，首先明确电气照明设计的一般规定：

（1）在照明设计时，应根据视觉要求、工作性质和环境条件，使工作区获得良好的视觉效果、合理的照度和显色性，以及适宜的亮度分布；

（2）在确定照度方案时，应考虑不同建筑对照明的不同要求，处理好电气照明与天然采光、建筑资金及能源消耗与照明效果的关系；

（3）照明设计应重视清晰度、消除阴影、控制光热、限制眩光；

（4）照明设计时，应合理选择照明方式和控制方式，以降低电能消耗指标。

16.1 照明基础知识

16.1.1 物体的发光

16.1.1.1 光的本质：物体发出的波长约在 380 ~ 760nm 范围的辐射波，可在人眼里产生光的感觉。

16.1.1.2 波长约在 380 ~ 760nm 直接引起视觉的辐射称可见辐射；波长约在 1 ~ 380nm 范围的辐射称紫外辐射；波长约在 760nm ~ 1mm 范围的辐射称红外辐射。

16.1.1.3 发光方式：物体的发光方式有热辐射发光、放电发光、光致发光（蓄能式）、阴极发光、场致发光和激光（包括气体激光、固体激光、半导体激光）。

16.1.2 光谱、显色指数、色温

16.1.2.1 光谱：将辐射分解成单色光成分而产生的图像。固体或液体发射出的热辐射光谱是连续光谱；由电子能级跃迁发出的辐射谱线则很少能完整地覆盖全部光谱区域，故其他发光方式发出的光大多是断续光谱（CIE）①。

16.1.2.2 显色指数：在规定条件下，由某一光源照明的物体色与由标准光源照明时相比较，表示物体色在视觉上的变化程度的参数（CIE）。两者完全一致时，被测光源的显色指数为 100。显色指数越大，失真就越小。影响显色性的主要因素有两个，一个是光源的光谱分布，另一个是适应性色偏移。

① 为国际照明委员会法文缩写，（CIE）表示引自 CIE 的标准定义。

16.1.2.3 显色性：与参考光源相比较时，光源显现物体颜色的特性。

16.1.2.4 色温：某一光线的色度与完全辐射体在某一绝对温度时的色度相同或近似相等，则该绝对温度称作这光线的色温度，单位是 K（CIE）。注意，条件等色一致时，对应的相对光谱分布并不一定相似。

16.1.2.5 用色品坐标或主波长和纯度来表示的颜色性质称色品；与色刺激和材料质地有关的颜色的主观表现称色表；除黑、白、灰以外呈现彩色的颜色范围的名称称为色调。

16.1.3 亮度、亮度对比、光通量、发光强度、照度、等效球照度

16.1.3.1 亮度：光从发射面上任意一点向观测方向的光强对这一点的微小面积元素向观测方向的正投影面上的单位面积的比率（CIE）。符号是 L，单位是 $1nt = 1cd/m^2$，表达式为 $L = dI/dA\cos\theta$。

式中 L——亮度，nt；

I——发光强度，cd；

dA——微小面积元素，m^2。

16.1.3.2 亮度对比：物体及其背景的亮度差与背景亮度之比。

16.1.3.3 光通量：对于具有与标准光谱光视效率成比例的光谱光视效率的物理受光器辐射发生作用，根据它评价辐射通量而得到的量。符号是 Φ，单位是 lm（CIE）。

16.1.3.4 发光强度：由点光源发射出来进入包含观测方向的微小立方体角内光通量对单位立体角的比率。符号是 I，单位是 cd（CIE），cd 称坎（德拉）。

16.1.3.5 照度：入射到包含注视点的微小面积元素上的光通量对单位面积的比率。符号是 E，单位是 lx（CIE）。

16.1.3.6 等效球照度：在球照明条件下，作业可见度与在给定条件下该作业的可见度相等时，球照明条件下的照度水平。

16.1.4 视觉、视野、视觉作业、视觉适应、视觉环境眩光

16.1.4.1 视觉：由于进入眼内的辐射的刺激作用而产生的包括感觉印象或知觉过程在内的意识上的体验（CIE）。

16.1.4.2 视野：头部和眼睛静止时可以觉察的空间的角度范围（CIE）。

16.1.4.3 视觉作业：在工作和活动中必须观察的呈现在背景前的细节或目标。

16.1.4.4 视觉适应：视觉适应是反映与光刺激或色刺激相对应的视觉器官的特性的变化过程。视觉器官的感受性降低过程或降低状态称为明适应；视觉器官的感受性提高过程或提高状态称为暗适应；视觉器官对成为视场内主要色光的适应过程或适应状态称为色适应（CIE）。

16.1.4.5 视觉环境：视野中处于视觉作业以外的所有部分。

16.1.4.6 眩光：由于在时间上空间上不适当的亮度分布、亮度范围或极端对比等，以致视觉不舒适或存在着降低对重要对象的知觉能力的视觉条件。仅产生不舒适感觉而不降低视觉的眩光称不舒适眩光；产生不舒适感觉而在不同程度降低视觉的眩光称失能眩光；在一定时间内完全看不到视觉对象的强烈的眩光称失明眩光（CIE）。

16.1.4.7 由视野内未曾充分遮蔽的高亮度光源所产生的眩光称直接眩光；由视野内光泽表面反射所产生的眩光称间接眩光。在视觉作业上镜面反射与漫反射重叠出现的现象称光幕反射，光幕反射降低作业固有的亮度对比，只是部分或全部看不清作业的细节。

16.1.5 其他照明术语

16.1.5.1 可见度（能见度）：指眼睛辨认物体存在或物体形状的难易程度。在室内以标准条件下恰可感知的标准视标的对比或大小定义，称可见度。在室外以眼睛恰可看到标准目标的距离定义，称能见度。

16.1.5.2 对比显现因数：评价照明装置所产生的光幕反射对作业可见度影响的因数，是一个作业在给定照明条件下的可见度与该作业在参考照明条件下的可见度之比。

16.1.5.3 绿色照明："绿色照明"是美国1991年在照明工程中倡导节约能源、减少污染、提高工作和生活质量的一种标志性称谓。是建立在以节约照明用电、优质高效、安全舒适、有益健康、改善照明质量和保护身心健康的一项全面计划。

我国的绿色照明工程计划预期目标是：

（1）节约电力；

（2）减少环境污染；

（3）逐步建立起节电照明器的市场推广体系，使照明节能纳入正常的市场运行轨道；

（4）大力提高节电照明器具的产品质量，完善质量标准和设计体系。

16.2 照度标准及照明质量要求

16.2.1 照度标准的一般规定

16.2.1.1 照度标准应按以下系列分级：

0.5、1、2、3、5、10、15、20、30、50、75、100、150、200、300、500、750、1000、1500、2000lx。

16.2.1.2 照度标准值是指工作或生活场所参考平面上的平均照度值。

16.2.1.3 照度维护系数表见表16－1。

表16－1　　照度维护系数

环境维护特征	工作房间或场所	维护系数	
		白炽灯、荧光灯、高光强气体放电灯	卤钨灯
清　洁	住宅卧室、办公室、餐厅、阅览室、绘图室	0.75	0.80
一　般	商店营业厅、候车室、影剧院观众厅	0.70	0.75
污染严重	厨房、锅炉房	0.65	0.70
室外	庭园、体育场	0.55	0.60

注　维护系数＝灯的流明衰减系数×房间表面光损失系数。

16.2.2 常用照度标准

16.2.2.1 图书馆建筑照度标准见表16－2。

表16－2　　图书馆建筑照度标准

类　别	参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
		低	中	高
一般阅览室、研究室、美工室、装裱修整间	0.75水平面	150	200	300

续表

类　别	参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
		低	中	高
老年阅览室、善本书和舆图阅览室	0.75 水平面	200	300	500
陈列室、目录厅、出纳厅、视听室、缩微阅览室	0.75 水平面	75	100	150
读者休息室	0.75 水平面	30	50	75
书　库	0.25 垂直面	20	30	50
开敞式运输传送设备	0.75 水平面	50	75	100

16.2.2.2　办公楼建筑照度标准见表 16－3。

表 16－3　　办公楼建筑照度标准

类　别	参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
		低	中	高
办公室、报告厅、会议室、接待室、营业厅	0.75 水平面	100	150	200
有视觉显示屏的作业	工作台水平面	150	200	300
设计室、绘图室、打字室	实际水平面	200	300	500
装订、复印、晒图、档案室	0.75 水平面	75	100	150
值班室	0.75 水平面	50	75	100
门厅	地　面	30	50	75

注　1. 有视觉显示屏的作业，屏幕上的垂直照度不应大于 150lx。

2. 目前高档综合楼的办公室、报告厅、会议室推荐的照度值 200（低）、300（中）、500（高）lx。

16.2.2.3　商业建筑照明标准见表 16－4。

表 16－4　　商业建筑照明标准

类　别		参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
			低	中	高
一般商店营业厅	一般区域	0.75 水平面	75	100	150
	柜　台	柜台面上	100	150	200
	货　架	1.50 垂直面	100	150	200
	陈列柜、橱窗	货物所处平面	200	300	500
室内菜市场营业厅		0.75 水平面	50	75	100
自选商场营业厅		0.75 水平面	150	200	300
试衣间		试衣位置 1.50 高处垂直面	150	200	300
收款台		收款台面	150	200	300
库　房		0.75 水平面	30	50	75

注　陈列柜和橱窗是指展出重点、时新商品的展柜和橱窗。

16.2.2.4 旅馆建筑照度标准见表 16－5。

表 16－5　　旅馆建筑照度标准

类别		参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
			低	中	高
客房	一般活动区	0.75 水平面	20	30	50
	床头	0.75 水平面	50	75	100
	写字台	0.75 水平面	100	150	200
	卫生间	0.75 水平面	50	75	100
	会客间	0.75 水平面	30	50	75
梳妆台		1.5 高处垂直面	150	200	300
主餐厅、客房服务台、酒吧柜台		0.75 水平面	50	75	100
西餐厅、酒吧间、咖啡厅、舞厅		0.75 水平面	20	30	50
大宴会厅、总服务台、主餐厅柜台、外币兑换处		0.75 水平面	150	200	300
门厅、休息厅		0.75 水平面	75	100	150
理发		0.75 水平面	100	150	200
美容		0.75 水平面	200	300	500
邮电		0.75 水平面	75	100	150
健身房、器械室、蒸汽浴室、游泳池		0.75 水平面	30	50	75
游艺厅		0.75 水平面	50	75	100
台球		台面	150	200	300
保龄球		地面	100	150	200
厨房、洗衣房、小卖部		0.75 水平面	100	150	200
食品准备、烹调、配餐		0.75 水平面	200	300	500
小件寄存处		0.75 水平面	30	50	75

注　1. 客房无台灯等局部照明时，一般活动区的照度可提高一级；

2. 理发栏的照度值适用于普通招待所和旅馆的理发厅。

16.2.2.5 住宅建筑照度标准见表 16－6。

表 16－6　　住宅建筑照度标准

类别		参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
			低	中	高
起居室、卧室	一般活动区	0.75 水平面	20	30	50
	书写、阅读	0.75 水平面	150	200	300
	床头阅读	0.75 水平面	75	100	150
	精细作业	0.75 水平面	200	300	500
餐厅、方厅、厨房		0.75 水平面	20	30	50
卫生间		0.75 水平面	10	15	20
楼梯间		地面	5	10	15

16.2.2.6 体育建筑照度标准见表 16－7。

表 16－7　　体育建筑照度标准

运动项目			参考平面及其高度	照度标准值（lx）					
				训练			比赛		
				低	中	高	低	中	高
篮球、排球、羽毛球、网球、手球、田径（室内）、体操、艺术体操、技巧、武术			地面	150	200	300	300	500	750
棒球、垒球			地面	—	—	—	300	500	750
保龄球			地面	150	200	300	200	300	500
举重			地面	100	150	200	300	500	750
击剑			台面	200	300	500	300	500	750
柔道、中国摔跤、国际摔跤			地面	200	300	500	300	500	750
拳击			地面	200	300	500	1000	1500	2000
乒乓球			台面	300	500	750	500	750	1000
游泳、跳水、水球			水面	150	200	300	300	500	750
花样游泳			水面	200	300	500	300	500	750
冰球、速度滑冰、花样滑冰			冰面	150	200	300	300	500	750
围棋、中国象棋、国际象棋			台面	—	—	—	500	750	1000
桥牌			桌面	—	—	—	100	150	200
射击		靶心	靶心垂直面	1000	1500	2000	1000	1500	2000
		射击房	地面	75	100	150	75	100	150
足球曲棍球	观看距离	120m	地面	—	—	—	150	200	300
		160m		—	—	—	200	300	500
		200m		—	—	—	300	500	750
观众席			座位面	—	—	—	50	75	100
健身房			地面	100	150	200	—	—	—
消除疲劳用房			地面	50	75	100	—	—	—

注　1. 篮球等项目的室外比赛应比室内比赛照度标准值降低一级；

2. 乒乓球赛区其他部分不应低于台面照度的一半；

3. 跳水区的照明设计应使观众和裁判员视线方向上的照度不低于 200lx；

4. 足球和曲棍球的观看距离是指观众席最后一排到场地边线的距离。

16.2.2.7 运动场地彩电转播照明的照度标准见表 16－8。

表 16－8　　运动场地彩电转播照明的照度标准

项目分组	参考平面及其高度（m）	最大摄影距离的照度标准值（lx）		
		25m	75m	150m
A 组：田径、柔道、游泳、摔跤等项目	1.0 垂直面	500	750	1000
B 组：篮球、排球、羽毛球、网球、手球、体操、花样滑冰、速滑、垒球、足球等项目	1.0 垂直面	750	1000	1500
C 组：拳击、击剑、跳水、乒乓球、冰球等项目	1.0 垂直面	1000	1500	—

16.2.2.8 公共场所的照度标准见表 16－9。

表 16－9　　公共场所的照度标准

类　别	参考平面及高度（m）	照度标准值（lx）		
		低	中	高
走廊、厕所	地　面	15	20	30
楼梯间	地　面	20	30	50
盥洗室	0.75 水平面	20	30	50
贮藏室	0.75 水平面	20	30	50
电梯前室	地　面	30	50	75
吸烟室	0.75 水平面	30	50	75
浴室	地　面	20	30	50
开水房	地　面	15	20	30

16.2.3　照明质量的主要内容

16.2.3.1　照度均匀度：

（1）办公室、阅览室一般照明，最低照度与平均照度之比，其数值不应小于 0.7。

（2）局部照明与一般照明共用时，工作面上一般照明的照度值宜为工作面总照度值的 1/3～1/5，且不宜低于 50lx。

（3）体育场地内的主要摄像方向，垂直照度最小值与最大值之比不宜小于 0.4，平均垂直照度与平均水平照度之比不宜小于 0.25；场地水平照度最小值与最大值之比不宜小于 0.5。

观众席的垂直照度不宜小于场地垂直照度的0.25。

16.2.3.2　眩光限制：

（1）直接眩光限制的质量等级分为三级，见表 16－10。

表 16－10　　直接眩光限制的质量等级

眩光限制质量等级	眩光程度	视觉要求和适用场所举例
Ⅰ	无眩光感	有特殊要求的高质量照明房间，如手术室、计算机房、绘图室等
Ⅱ	有轻微眩光	照明质量要求一般的房间，如办公室、候车室等
Ⅲ	有眩光感	照明质量要求不高的房间，如仓库、厨房等

（2）直接型灯具的遮光角不应小于表 16－11 的规定。

表 16－11　　直接型灯具的遮光角

灯具出光口平均亮度 L（10^3cd/m^2）	直接眩光限制等级遮光角			应用光源举例
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	
$L \leqslant 20$	20°	10°		荧光灯管
$20 < L \leqslant 500$	25°	20°	15°	涂荧光粉或漫射光玻璃壳的气体放电灯
$L > 500$	30°	25°	20°	透明玻璃壳的气体放电灯、透明玻璃壳的白炽灯、卤钨灯

（3）直接眩光限制等级为Ⅰ级的房间，当采用发光天棚时，发光面的亮度在眩光角范围内不应大于 500cd/m^2。

（4）室内一般照明直接眩光的限制，应从光源亮度、光源和灯具的表观面积、背景亮度以及灯具位置等因素综合进行考虑。通常应控制 γ 角（最远灯具和视线的连线与该灯具下垂

线间的夹角）在45°～85°范围内的灯具亮度，并采用灯具亮度限制曲线进行校验。

（5）在眩光限制质量等级为Ⅰ、Ⅱ级时，对于损害对比降低可见度的光幕反射和反射眩光应有效地加以限制，通常采取下列措施：

1）使视觉工作对象不处在也不接近任何照明光源同眼睛形成的镜面反射角内，或是在确定照明方式和选择布灯方案时，力求使照明光源处于适宜的方位。

2）使用发光表面面积大、亮度低、光扩散性能好的灯具。

3）视觉工作对象和工作房间内，采用浅色无光泽的表面。

4）在视线方向采用特殊配光（反射光通小）灯具，或采用间接照明方式。

5）采用局部照明。

16.2.3.3 表色及显色性：

（1）一般照明光源根据其相关色温分为三类，其适用场所可按表16－12选取。

表16－12　　光源相关色温分类

光源颜色分类	相关色温（K）	颜色特征	适用场所示例
Ⅰ	＜3300	暖	居室、餐厅、宴会厅、多功能厅、酒吧、咖啡厅、重点陈列厅
Ⅱ	3300～5300	中间	教室、办公室、会议室、阅览室、营业厅、一般休息厅、普通餐厅、洗衣房
Ⅲ	＞5300	冷	设计室、计算机房

（2）光源显色分类及其适用场所参见表16－13。

表16－13　　光源显色分类及其适用场所

光源显色分类	一般显色指数 Ra	适用场所示例	
		民用建筑	工业建筑
Ⅰ	$Ra \geqslant 90$		颜色匹配、颜色检验等
	$Ra \geqslant 80$	美术展厅、化妆室、餐厅、宴会厅、多功能厅、酒吧、高级商店营业厅、手术室	印刷、食品分检、油漆等
Ⅱ	$80 > Ra \geqslant 60$	办公室、休息厅、普通餐厅、厨房、普通报告厅、教室、阅览室、自选商店、室外比赛场地	机电装配、表面处理、控制室等
Ⅲ	$60 > Ra \geqslant 40$	行李房、库房、室外门廊	机械加工、热处理、铸造等
Ⅳ	$40 > Ra \geqslant 20$	辨色要求不高的库房、室外道路	仓库、大件金属库等

（3）对颜色识别有要求的工作场所，当使用照度在500lx及以下、采用光源的显色指数较低时，宜提高其照度标准值，其系数见表16－14。

表16－14　　相对照度系数表

一般显色指数	使用照度 E（lx）	
	$300 \leqslant E \leqslant 500$	$E < 300$
$80 > Ra \geqslant 60$	1.20	1.25
$60 > Ra \geqslant 40$	1.30	1.40

表16－15　办公室、阅览室长时间工作的表面反射比及照度比

表面分类	反射比	照度比
顶　棚	0.7～0.8	0.25～0.9
墙面、隔断	0.5～0.7	0.4～0.8
地　面	0.2～0.4	0.7～1.0

注　照度比：指装修或家具表面的照度与工作面水平照度之比。

16.2.3.4 反射比与照度比：在办公室、阅览室等长时间连续工作的房间，其表面反射比与照度比宜按表 16－15 选取。

16.3 光源选用和灯具选型的有关规定

16.3.1 常用光源的电气参数

16.3.1.1 照明光源的主要光电参数应包括：额定电压、额定功率、额定频率、工作电流、起动电流、寿命（平均寿命指光源的有效寿命的平均值）、起动时间、再起动时间、光通量、显色指数、色温、光束角、灯头型号、外形尺寸、燃点位置、光源表面温度、配件损耗、功率因数、谐波含量等。

16.3.1.2 常用光源的电气参数可参见表 16－16。

表 16－16　　常用光源电气参数

光源种类	普通白炽灯	卤钨灯	直管荧光灯	紧凑型荧光灯	钠灯、汞灯、金卤灯	发光二极管
发光类型	热辐射	热辐射	低压放电	低压放电	高压放电	载流注入
发光效率（lm/W）	6.5～19	19～21	60～94	40～85	65～130	6～14
显色指数 *Ra*	95～99	95～99	70～84	60～80	20～94	70
色温（K）	2800～3200	3200～3600	3800～6500	3800～6500	2200～6600	3600～11000
起动时间（s）	瞬　时	瞬　时	1～3	1～3	4～10min	瞬　时
再起动时间	瞬　时	瞬　时	瞬　时	瞬　时	10～20min	瞬　时
功率因数	1	1	0.35～0.7	0.45～0.7	0.44～0.8	
平均寿命（h）	1000	1500	4000	3500	6000	10000
电压变化对光通的影响	大	大	较　大	较　大	较　大	小
环境温度对光通的影响	小	小	大	大	较　小	大
光源附件	无	无	镇流器	镇流器	镇流器 触发器	整流器

16.3.1.3 管形荧光灯镇流器的能效因数 *BEF*：镇流器流明系数与线路功率的比值作为评定镇流器和灯的组合体的能效水平参数 *BEF*，称为能效因数。其计算公式如下

$$BEF = \mu / P$$

式中　μ——镇流器流明系数；

　　P——线路功率，W。

可以看出，在同一流明系数下，能效因数高，镇流器自身功耗就小，因而也就节省电能。根据 GB17896—1999《管形荧光灯镇流器能效限定值及节能评价》的规定，将管形荧光灯镇流器能效限定值和节能评价值列出，见表 16－17 及表 16－18。

表 16－17　　镇流器能效限定值

标称功率（W）		18	20	22	30	32	36	40
BEF	电感型	3.154	2.952	2.770	2.232	2.146	2.030	1.992
	电子型	4.778	4.370	3.998	2.870	2.678	2.402	2.270

表 16－18　　镇流器节能评价值表

标称功率（W）		18	20	22	30	32	36	40
BEF	电感型	3.686	3.458	3.248	2.583	2.461	2.271	2.152
	电子型	5.518	5.049	4.619	3.281	3.043	2.681	2.473

注　1. 各类镇流器能效因数应不小于表 16－17 和表 16－18 的规定。

2. 对于电子镇流器，其电源中谐波含量还应符合 GB17625.1 中的规定，无线电干扰特性应符合 GB17743 中的规定。

16.3.2　灯具的特性

16.3.2.1　灯具的配光特性：灯具按配光特性可分为直接型配光、半直接型配光、漫射型配光、半间接型配光、间接型配光五类。

16.3.2.2　直接型配光灯具的光强分布可分为：窄配光灯具，灯具允许距高比不低于 0.5；中配光灯具，灯具允许距高比 0.5～1.0；宽配光灯具，灯具允许距高比大于 1.0。

16.3.2.3　灯具的防护特性：IEC 防护等级分类及其含义（IP－－）见表 16－19。

表 16－19　　IEC 防护等级分类及其含义（IP－－）

第一特征数字		第二特征数字	
防止人接触或靠近带电部位以及接触外壳内的活动部件，并防止外界固体物质进入设备		防止外壳内的设备受侵入水的危害	
数值	含　义	数值	含　义
0	无防护	0	无防护
1	防止大于 50mm 的固体物进入	1	滴水（垂直滴水）无有害影响
2	防止大于 12.5mm 的固体物进入	2	当外壳从正常位置倾斜在 15°以内时，垂直滴水无有害影响
3	防止大于 2.5mm 的固体物进入	3	与垂直成 60°范围内的淋水无有害影响
4	防止大于 1.0mm 的固体物进入	4	任何方向溅水无有害影响
5	防　尘	5	任何方向喷水无有害影响
6	密封防尘	6	猛烈海浪或强烈喷水时进入外壳的水量不致达到有害程度
		7	浸入规定压力的水中经规定时间后进入外壳的水量不致达到有害程度
		8	能按制造厂规定的条件长期潜水

16.3.2.4　灯具的散热量可参考表 16－20 估算。

表 16－20　　不同光源的散热量参考值

光源类型	散热量参考值
热辐射光源灯具（白炽灯、卤钨灯等）	230kJ/1000（lm·h）
气体放电光源灯具（荧光灯、金卤灯等）	230kJ/1000（lm·h）

注　kJ—千焦（热量单位）；lm—流明（光通量单位）；h—小时（时间单位）。

16.3.3　光源和灯具的选型要点

16.3.3.1　室内照明光源的确定，应根据使用场所的不同，合理地选择光源的光效、显色性、寿命、起动点燃和再起动时间等光电特性指标，以及环境条件对光源光电参数的影响。

16.3.3.2　民用建筑室内照明无特殊要求的场所，宜采用光效高的光源和高效灯

具。

16.3.3.3 在有连续调光、瞬时起动、开关频繁要求或限制电磁波干扰的场所，可选用白炽灯或卤钨灯光源。

16.3.3.4 光源色温应随照度的增加而提高，当照度低于 100lx 时宜采用低于 3300K 的光源。

16.3.3.5 高大空间场所的照明，宜选用气体放电灯等高效长寿命光源。

16.3.3.6 作为备用的应急照明必须选用能瞬时起动的光源。当应急照明作为正常照明的一部分，并且应急照明和正常照明不会同时断电时，应急照明可选用其他光源。

16.3.3.7 灯具的遮光隔栅的反射表面应选用难燃材料，其反射系数不应低于 80%，遮光角宜为 25°～45°。

16.3.3.8 在选择灯具时，应考虑灯具的允许距高比。

16.3.3.9 潮湿场所应采用防潮防水密闭型灯具。在可能受滴水侵蚀的场所，宜选用带防水灯头的开敞式灯具。

16.3.4 自然光的利用与限制

16.3.4.1 在进行天然采光计算时，一般选取太阳高度角为 10°以上的时间带作为采光时间。

16.3.4.2 由于直射阳光变化大、眩光、亮度分布不均匀，因而在天然采光设计时应视为限制的主要对象。

16.3.4.3 当天然采光方式为侧窗时，各类房间的采光系数参见表 16－21。

表 16－21　　天然采光各类房间的采光系数

房间类别	采光系数（%）	天然光照度（lx）		
		明朗天空	平常天空	阴暗天空
缝纫、精密制图、精细工作	5	1500	750	250
长时间阅读、一般制图、打字	3	900	450	150
办公室、普通教室、诊疗室	2	600	300	100
会议、接待、一般病房	1.5	450	225	75
美术展览、书库、值班室	1	300	150	50
门厅、起居室、影院休息室	0.7	300	150	50
走廊、楼梯间、小型库房	0.5	210	105	35
大型仓库、住宅储藏室	0.2	60	30	10

当天然采光方式为天窗时，建议将表 16－21 中采光系数标准提高一倍。

16.3.4.4 当天然采光方式为单侧窗且房间进深较大时，房间内各表面宜选用明亮色反射率高的材料，必要时建议将侧窗的上半部分加设白色折光百叶或选用定向玻璃砖。

16.3.4.5 有电视转播要求的体育馆不宜设置采光天窗或须加装遮挡直射阳光的帘幕。

16.4 照明供电的有关规定

16.4.1 电气照明的电源质量

16.4.1.1 正常运行情况下照明设备端子处电压偏差允许值（额定电压的百分比）：

（1）一般工作场所为 ±5%；

（2）视觉要求较高的场所为 +5%，－2.5%；

（3）远离变电所的小面积一般工作场所，难以满足上述要求时为 +5%，－10%；

（4）应急照明、道路照明和警卫照明为 +5%，－10%。

16.4.1.2 当电压偏差或波动不能保证照明质量或光源寿命时，在技术经济合理的条件下，可采用有载自动调压电力变压器、调压器或照明专用变压器供电。

16.4.2 有关照明供电的部分规定

16.4.2.1 照明负荷应根据其中断供电可能造成的影响及损失，合理地确定负荷等级，并应正确地选择供电方案。

16.4.2.2 特别重要的照明负荷，宜在负荷末级配电盘采用自动切换电源的方式，也可采用由两个专用回路各带约50%的照明灯具的配电方式。

16.4.2.3 三相照明线路各相负荷的分配，宜保持平衡，在每个照明配电箱内最大与最小相的负荷电流不宜超过30%。

16.4.2.4 在照明分支回路中应避免采用三相低压断路器对三个单相分支回路进行控制和保护。

16.4.2.5 照明系统中，每一单相回路不宜超过16A，灯具数量不宜超过25个。大型建筑组合灯具每一单相回路不宜超过25A，光源数量不宜超过60个。

16.4.2.6 插座宜由单独的回路配电，每一回路插座数量不宜超过10个。一个房间内的插座宜由同一回路供电。

16.4.2.7 普通插座回路应装设剩余电流动作保护。当电源电压偏差较大时应优先选用电磁式剩余电流动作保护电器。

16.4.2.8 一般照明系统线路的中性线截面宜与相线截面相等。带有可控硅调光回路或数字开关电源的照明系统，采用三相四线配电，其中性线截面宜为相线截面的1.7~2倍。

16.4.2.9 为改善气体放电光源的频闪效应，宜将相邻的灯具分接在不同相别的线路上。或同一具灯具装多根荧光灯管时，可采用多相供电。

16.4.2.10 不应将线路敷设在高温灯具的上部。接入高温灯具的线路应采用耐热导线或采取其他隔热措施。

16.5 照明工程应用

16.5.1 住宅照明设计要点

16.5.1.1 住宅照明设计应使室内光环境适用和舒适。卧室和餐厅宜采用低色温光源，餐厅和厨房光源显色指数不宜低于80。

16.5.1.2 起居室的照明宜考虑多功能使用要求，并考虑设置局部照明。

16.5.1.3 厨房灯具宜选用易于清洁的防潮型灯具。

16.5.1.4 卫生间的灯具位置应避免安装在便器或浴缸的上面及其背后；灯开关如为跷板式宜设于卫生间门外。卫生间的电源插座应安装在2区以外。

16.5.1.5 照明插座宜设置在不少于两个对称墙面上，插座间距应不超过3m。

16.5.1.6 住宅电气设计要满足住宅照明质量的要求，满足住户家用电器的使用要求。电度表出户、进户线截面不小于10mm^2。

16.5.2 办公照明设计要点

16.5.2.1 对有长时间连续工作的办公室、阅览室、计算机显示屏等工作区域，宜将灯具布置在工作台两侧，避免将灯具布置在平行与工作台的正前方，以控制光幕反射和反射眩光。

16.5.2.2 会议室、接待室照明设计应注重垂直照度。有放映要求的会议室，其一般照明宜采用调光控制。

16.5.2.3 出租办公室的照明和插座，宜按建筑的开间或根据智能大楼办公室基本单元进行布置，以不影响分隔出租使用。

16.5.2.4 在可能的情况下，有吊顶的办公室应将照明灯具与空调风口结合设置，以保证最佳的光通量输出。

16.5.2.5 大部分照明长时间处于点亮状态，光源灯具的散热以及运行维护工作应予以充分考虑。

16.5.3 学校照明设计要点

16.5.3.1 教室照明推荐选用 T5、T8 型直管荧光灯。布灯原则应与学生主视线平行，并尽可能安装在课桌间通道的上方，距桌面垂直距离不小于1.7m。

16.5.3.2 当装设黑板照明时，黑板上的垂直照度宜高于水平照度值。黑板上的照度均匀度不低于0.7。

16.5.3.3 光学实验台、生物实验台以及设有简易天象仪的地理教学课桌宜设置局部照明。

16.5.3.4 教室的照明控制宜按平行于采光窗方式分组，黑板照明应单独设置控制开关。

16.5.3.5 大阅览室当有吊顶时，宜采用暗装的荧光灯具；供长时间阅览的阅览室宜设置局部照明。

16.5.3.6 书库照明宜采用配光适当的灯具。灯具与书架位置应正确配合。灯具与图书等易燃物的距离应大于 0.50m。书库地面宜采用反射系数较高的建筑材料，以确保书架下层的必要照度。

16.5.3.7 存放或阅读善本书、舆图、图件等珍贵图书资料的场所，不宜采用具有紫外光、紫光和蓝光等短波辐射的光源。

16.5.4 商业照明设计要点

16.5.4.1 商业照明应选用显色性高、光束温度低、寿命长的光源。

16.5.4.2 营业厅照明宜由一般照明、功能性照明和重点照明组合而成。不宜将商品陈列用照明兼作一般照明。

16.5.4.3 应注意防止货架、柜台的直接眩光和反射眩光。

16.5.4.4 橱窗照明宜采用带有格栅或漫射型灯具。当采用带有遮光格栅的灯具安装在橱窗顶部距地高度大于 3m 时，灯具的遮光角不宜小于 30°；如安装高度低于 3m，则灯具遮光角宜为 45°以上。

16.5.4.5 室外橱窗照明的设置应避免出现镜像，陈列品的亮度应大于室外亮度的 30%。展览橱窗的照度宜为营业厅的 2～4 倍。

16.5.4.6 商店营业厅照明装置的位置和方向宜考虑变化的可能，以适应柜台布局的变动。

16.5.4.7 大营业厅照明应采用分组、分区或集中控制方式。大营业厅和贵重物品的营业厅应设值班照明和备用照明。

16.5.5 体育照明设计要点

16.5.5.1 体育场地照明光源宜选用高效金属卤化物气体放电灯。照明灯具宜为带防眩光格栅的直接配光型灯具，并应附有安装角度指示器。

16.5.5.2 比赛场地照明宜满足使用的多样性要求。在达到规定照度水平的同时，还应有效地控制眩光、消除阴影和避免频闪效应。

16.5.5.3 室内排球、羽毛球、网球、体操等运动项目宜采用侧向投光照明；而篮球、手球、冰球等项目宜在场地上空均匀布灯再配以侧向投光照明。

16.5.5.4 游泳场地照明灯具的布置宜沿游泳池长边的两侧排列；花样游泳照明应增设水下照明装置，可按水面 1200lm/m² 设计。

16.5.5.5 拳击、摔跤、柔道等项目的场地宜增设局部照明，并采用可吸收光源辐射热的灯具。

16.5.5.6 在比赛场地的主摄像方向上，水平照度最大值与最小值之比不宜小于 0.5；垂直照度最大值与最小值之比不宜小于 0.4；平均垂直照度与平均水平照度之比不宜小于 0.25。

16.5.5.7 体育馆（场）观众席的垂直照度不宜小于场地垂直照度的 0.25 倍。

16.5.5.8 室外综合性体育场照明宜采用光带式布灯或光带式与塔式组成的混合式布灯形式；光源色温宜为 4000～6000K，光源显色指数不低于 65。

16.5.6 博展照明设计要点

16.5.6.1 博展馆的照明设计应考虑的主要因素：

（1）接近日光色的高显色性光源；

（2）室内表面宜为无光泽且接近于无色彩；

（3）防止在画框、展柜玻璃表面和部分展品表面形成镜面反射；

（4）注意阴影对立体展品的造型作用以及对平面展品可能造成的不良影响；

（5）限制紫外光线对展品的不利影响。

16.5.6.2 壁挂式展品照明，在保证必要照度（一般为 150～300lx）的前提下，应使展品表面的亮度在 25cd/m² 以上；同时应使展品表面的照度保持一定的均匀性，通常最低照度与最高照度之比应大于 0.75。

16.5.6.3 对于有光泽或放在玻璃画框内的展品，应慎重选择采光窗或照明光源的位置以避免反射眩光；为防止镜面映像，应使参观者面向展品方向的亮度与展品表面亮度之比小于 0.5。

16.5.6.4 对于具有立体造型的展品，为获得实体质感效果，最好设置大面积的顶部采光窗；一般情况下可在侧前上方 40°～60°处设置指向性聚光灯，其照度宜为一般照度的 3～5 倍，当展品为暗色时则为 5～10 倍。

16.5.6.5 必须考虑照明光线对展品产生的伤害，各种光源的损伤系数见表 16－22。

表 16－22　　各种光源的损伤系数

光源种类	自然光			人工光源			
	晴空、天顶的天空光	薄云的天空光	太阳直射光	普通荧光灯	防紫外线荧光灯	白炽灯 3200K	白炽灯 2800K
损伤系数（%）	100	31.7	16.5	4.5～6.3	3.0	5.1	3.1

16.5.7 医疗照明设计要点

16.5.7.1 医疗照明设计应合理选择光源和光色，诊室、检查室和病房等场所应采用高显色性光源。

16.5.7.2 诊室、护理单元通道和病房的照明设计，宜避免卧床病人视野内产生直射眩光。

16.5.7.3 病房的照明设计宜以病房床头照明为主，另设置一般照明（灯具亮度不宜大于 2000cd/m²），可选用高显色管形荧光灯（但精神病房不宜选用荧光灯）。病房内宜设夜间照明，但在病床床头部位的照度不宜大于 0.1lx，儿童病房可为 1.0lx。

16.5.7.4 手术室除设有专用手术无影灯外，宜另设有一般照明。其光源色温应与无影灯光

源相适应，水平照度不宜低于500lx，垂直照度不宜低于水平照度的1/2，宜采用调光控制。

16.5.7.5 进行神经外科手术时，应减少光谱区在800～1000nm的辐射能照射在病人身上。

16.5.7.6 候诊室、传染病院的诊室和厕所、呼吸器科、血库、穿刺、妇科冲洗、手术室等场所应设置紫外线杀菌灯。如为固定安装时应避免直接照射到病人的视野范围之内。

16.5.8 旅馆照明设计要点

16.5.8.1 旅馆建筑照明设计在满足视觉功效的同时，还应考虑引导人流、划分空间、创造气氛、增强建筑表现力等非视觉功效的要求。

16.5.8.2 门厅照明设计应考虑强调垂直照度，并应设置控制系统以使人工照明灯光与不断变化的自然光相适应。

16.5.8.3 客房、餐厅、休息厅、酒吧、咖啡厅等场所宜采用低色温的光源，并宜设置调光控制。

16.5.8.4 客房照明应防止不舒适眩光和光幕反射，设置在写字台上的灯具亮度应在170～510cd/m^2范围内。

16.5.8.5 客房宜设置床头控制板。在控制板上可设置床头灯调光开关，房灯、通道灯、落地灯、夜灯的开关，电视电源开关、风机盘管调速开关及音响开关等。

16.5.8.6 旅馆的公共大厅、门厅、休息厅、公共走道、客房层走道以及室外庭院等场所的照明宜集中控制。

16.5.8.7 室外网球场或游泳池宜设正常照明，同时应设置杀虫灯（灭蝇灯）或杀虫器。

16.5.8.8 地下车库出入口处应设置适应区照明。

16.5.9 道路、广场照明设计要点

16.5.9.1 道路照明光源宜采用高效金属卤化物气体放电灯。路灯安装高度不宜低于4.5m，灯杆间距25～30m，伸入路面0.6～1.0m，路面亮度不宜低于1cd/m^2，路面照度均匀度（最小照度与最大照度之比）宜为1:10～1:15。

16.5.9.2 庭院照明光源宜采用小功率气体放电灯。庭院柱灯高度宜为路面宽度的0.6～1.2倍，但不宜高于3.5m；间距15～25m。草坪灯间距宜为其光源距地安装高度的3.5～10倍。

16.5.9.3 广场照明应采用光源寿命长、高显色性及高光效的气体放电灯。灯杆宜沿广场长向布置，当广场宽度超过30m时宜采用双侧或多列布置。灯杆高度单侧时应大于广场宽度的0.4倍，双侧时大于广场宽度的0.2倍，间距宜为灯杆高度的1.6～2.7倍。

16.5.9.4 高杆照明应采用轴对称配光灯具，灯具安装高度应大于被照范围半径的1/2。安装高度在20m以上时宜选用电动升降灯盘。

16.5.9.5 室外照明宜在每个灯杆处设置单独的短路保护。

16.5.9.6 室外照明应集中控制并可在深夜关掉部分灯光。

16.5.10 景观照明设计要点

景观照明包括建筑景观照明、街区与植被灯光以及喷泉灯光等三大部分。景观照明型式又可概括为外照明、轮廓光、窗透光、装饰光4种型式。用于景观照明的光源有白炽灯、气体放电灯、霓红灯、感应灯、导管灯、光纤、激光等。

16.5.10.1 灯光的设置应能表现建筑物或构筑物的特征，并能显示出建筑艺术立体感。

16.5.10.2 外立面泛光照明应完整，但要避免单调平淡和在端部产生浓重的阴影。

16.5.10.3 应注意相邻建筑或建筑群以及周围环境的照明特点，恰当地突出建筑主体在光环境中的地位。

16.5.10.4 在确定设计方案后，应根据受照面的材料表面反射系数、颜色选配灯具及确定安装位置，应注意使建筑物上半部的平均亮度高于下半部。

16.5.10.5 景观照明灯具应安装在适当位置或加装格栅，避免产生导致视觉降低的直射眩光和反射眩光。

16.5.10.6 喷水的照明应根据喷水的形状进行设计。灯具安装在水中时应注意水深对减光的影响；灯具安装在水面上时应注意避免眩光。

16.5.10.7 喷水端部的照度可根据环境明暗情况按表 16－23 选取。

表 16－23 不同环境的喷水端部照度值

环境状况	喷水端部照度值（lx）
明	100～150～200
暗	50～75～100

16.5.10.8 当采用彩色照明时，应考虑彩色滤光片的透光系数。

16.6 照度计算的基本方法

16.6.1 配光与光通计算

16.6.1.1 光源在空间各个方向上的光强分布称为配光，表示配光的分布状态的曲线称为配光曲线。而表示装有光源的灯具的出射光强分布状态特性的曲线，称为该灯具的配光曲线。

16.6.1.2 一个实际光源的总光通量，可通过测量各个方向上的光强值进行换算并求和得到。较精密的计算可采用球带系数法或山内法，非对称配光的光源可采用等光强作图法，简易计算可采用山内公式以及荧光灯三照度法等。

16.6.2 直射照度的计算

16.6.2.1 圆型发光体的直径小于其至受照面距离的 1/5 或线型发光体的长度小于照射距离的 1/4 时，可视为点光源。

16.6.2.2 当发光体的宽度小于计算高度的 1/4，长度大于计算高度的 1/2，发光体间隔较小且等距的成行排列时，可视为连续线光源。

16.6.2.3 单位容量法（负荷密度法）等简化计算方法适用于方案或初步设计时的近似计算。

16.6.2.4 点照度计算适用于室内外照明的直射光对任意平面上一点照度的计算。其中：

点光源点照度计算可采用平方反比法；

线光源点照度计算可采用方位系数法；

面光源点照度计算可采用形状因数法。

当室内反射特性较好时，还应采用数值解法求出相互反射产生的间接照度。

16.6.2.5 点光源点照度计算，通常使用三种方法之一求得结果。

（1）逐点法：

水平面照度

$$E_h = \frac{\phi I_\theta \cos^2\theta D_f}{1000h^2} \tag{16-1}$$

垂直面照度

$$E_v = \frac{\phi I_\theta \cos^2\theta \sin\theta D_f}{1000h^2} \tag{16-2}$$

倾斜面照度

$$E_\varphi = (\cos\theta \pm \frac{d}{h}\sin\theta)\ E_h = \varphi E_h \tag{16-3}$$

以上式中 E_h——点光源照射在水平面上一点产生的照度，lx；

E_v——点光源照射在垂直面上一点产生的照度，lx；

E_φ——点光源照射在倾斜面上一点产生的照度，lx；

ϕ——每盏灯具内光源的总光通量，lm；

I_θ——照射方向的光强，cd；

h——光源至水平面的垂直高度，m；

d——光源在水平面上的投影至倾斜面与水平面交线的垂直距离，m；

D_f——维护系数；

φ——因数，$\varphi = \cos\theta \pm \frac{d}{h}\sin\theta$。

式（16－3）中，正号（＋）表示图 16－1（a）的情况，负号（－）表示图 16－1（b）的情况。

（2）空间等照度计算法。点光源照度计算还可采用空间等照度曲线进行计算。曲线图表示以光源光通为1000lm为基础而预先编制的，因此可避免许多不必要的重复计算工作量。当利用空间等照度曲线图表进行计算时，公式如下：

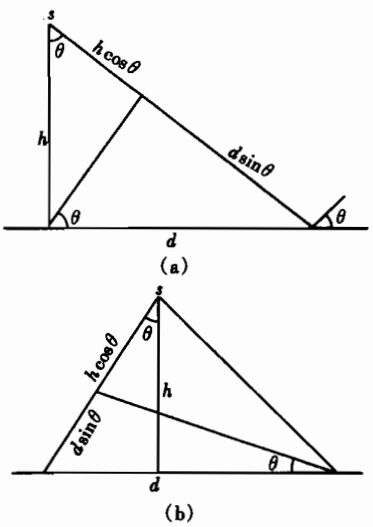


图 16－1　倾斜面照度计算用图

（a）式（16－3）正号表示图；

（b）式（16－3）负号表示图

水平面照度　　$E_h = \frac{\phi e D_f}{1000}$　　（16－4）

垂直面照度　　$E_v = \frac{d}{h}E_h$　　（16－5）

倾斜面照度　　$E_\varphi = \varphi E_h$　　（16－6）

式中　e——空间等照度，可从对应灯具的空间等照度曲线中查得，$e = \frac{I_\theta \cos^3\theta}{h^2}$。

（3）作图计算法（略）。

16.6.2.6　线光源点照度计算主要采用平面方位系数法，是以角坐标为基础编制的。

（1）连续线光源的照度计算。线光源在平面上一点的照度可由下式计算：

水平面照度

$$E_{hA} = \frac{\phi I'_\theta \cos^2\theta D_f}{1000h}(AF)　　(16-7)$$

垂直面照度

$$E_{vA} = \frac{\phi I'_\theta \cos\theta \sin\theta D_f}{1000h}(AF)　　(16-8)$$

$$E_{va} = \frac{\phi I'_\theta \cos\theta D_f}{1000h}(af)　　(16-9)$$

垂直面相对光源方向旋转 ε 角时

$$E_{v\varepsilon} = E_{va}\cos\varepsilon + E_{va}\sin\varepsilon　　(16-10)$$

倾斜面照度

$$E_\varphi = E_h \frac{\cos(\theta - \delta)}{\cos\theta}　　(16-11)$$

倾斜面相对光源方向旋转 ε 角时

$$E_{\varphi\varepsilon} = E_{\varphi}\cos Z + E_{va}\sin Z \tag{16-12}$$

以上各式中 ϕ——光源光通量，lm；

I'_{θ}——线光源光通量为 1000lm 时，在 θ 角平面上垂直于轴线的单位长度光强，cd/m；

h——线光源至水平面的垂直高度，m；

D_f——维护系数；

AF——水平面平面方位系数，根据灯具类别 A、B、C、D、E 查表确定；

af——垂直面平面方位系数，查表确定。

方位系数的确定，需要判断实际灯具归属五种理论灯具配光类型中的哪一类，方法是先画出灯具光强分布曲线并计算出相对光强值 $I_{\alpha}/I_{\circ}$，再与理论灯具配光类型的典型曲线比较，找出最接近的一种，即可得出类属 A、B、C、D、E 曲线中的某一类型理论配光。

在确定方位系数时，还应计算出 α 角，其公式如下

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \tag{16-13}$$

式中 d——线光源在水平面上的投影至计算点的距离，m；

l——线光源长度，m。

(2) 非连续线光源点照度计算：计算非连续线光源与计算连续线光源的照度计算式相同，只是线光源单位长度应乘以修正系数 c，计算式为

$$c = \frac{Nl_1}{N(l_1 + s) - s} \tag{16-14}$$

式中 N——整列线光源中的各段光源（灯具）数量；

l_1——每段线光源的长度，m；

s——每段线光源的间距，m。

(3) 计算点不在线光源端部的照度计算：计算点位于线光源的端内时

$$E_h = E_{BC} + E_{CD}$$

计算点位于线光源的端外时

$$E_h = E_{AD} + E_{AB}$$

上两式中 E_{AB}、E_{BC}、E_{CD}、E_{AD}——AB、BC、CD、AD 各段线光源在计算点上产生的照度，lx，见图 16-2。

(4) 线光源等照度曲线计算：线光源等照度曲线是根据灯具类型、线光源光通量为 1000lm、h = 1m 时编制的计算图表。应用此计算图表可查得相对照度（ε），计算水平面一点照度时，其公式如下

$$E_h = \frac{\phi\sum\varepsilon D_f}{1000h} \tag{16-15}$$

式中 ε——相对照度，可由所选灯具编制的等照度曲线中查得。

16.6.2.7 面光源点照度可根据下述不同情况，分别进行计算。

(1) 矩形等亮度发光面的点照度计算（略）；

(2) 矩形非等亮度面的点照度计算（略）；

(3) 圆形等亮度面的点照度计算（略）；

（4）面光源表面亮度计算（略）。

16.6.3 平均照度的计算

16.6.3.1 平均照度计算适用于房间长度小于宽度的4倍、灯具为均匀布置以及使用对称或近似对称光强分布灯具时的照度计算，可采用利用系数法（也称流明法）。利用系数是光强分布、灯具效率、房间形状、室内表面反射比等的函数，通常是根据灯具测光数据的假定条件编制灯具利用系数表，供设计计算应用。

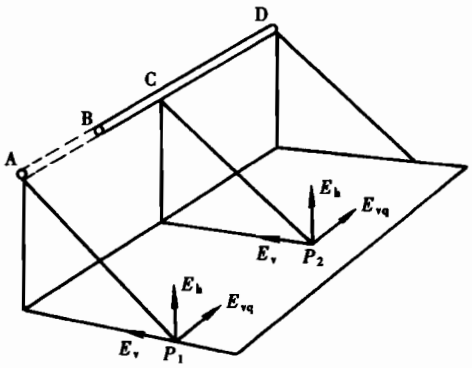


图 16－2 线光源在各点的照度

当室形指数或反射比不为利用系数表中所列数值时，可用内插法求算；当室形指数大于5时，仍可使用 $R_I = 5$ 时的利用系数值。

室形指数可通过如下方式求取：

矩形房间

$$R_I = \frac{LW}{H\ (L + W)} \tag{16-16}$$

正方形房间

$$R_I = \frac{a}{2H} \tag{16-17}$$

圆形房间

$$R_I = \frac{r}{h} \tag{16-18}$$

式中 R_I——室形指数；

L——房间长度，m；

W——房间宽度，m；

H——灯具出光口距工作面的高度，m；

r——圆形房间的半径，m；

a——正方形房间的边长，m。

为便于计算，一般将室形指数划分为0.6、0.8、1.0、1.25、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0 10个级数值。采用室形指数—利用系数法进行平均照度计算是国际上较通用的方法。

室空间比系数用于计算利用系数时，表示室内空间比例关系的参数。主要应用于北美地区，其计算方法如下。

室空间比

$$R_{CR} = \frac{5h\ (L + W)}{LW} \tag{16-19}$$

顶棚空间比

$$R_{CC} = \frac{5h_c\ (L + W)}{LW} \tag{16-20}$$

地板空间比

$$R_{fc} = \frac{5h_f\ (L + W)}{LW} \tag{16-21}$$

式中 h——灯具出光口至工作面高度，m；

h_c——灯具出光口至顶棚的高度，m；

h_f——工作面至地板面的高度，m。

室空间比亦分为1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 10个级。

室形指数 R_I 与室空间比 R_{CR} 的关系可由下式表示

$$R_{CR} = \frac{5}{R_I} \tag{16-22}$$

或
$$R_1 = \frac{5}{R_{CR}} \tag{16-23}$$

16.6.3.2 在专业生产厂商的产品目录中一般会提供每种灯具在不同室形指数和室内各表面反射率下求得的利用系数表。在不需要精密计算时，也可采用 K.Stolzenberg，E.Wittig 提供的固有利用系数表，其中固有利用系数 U_0 乘以灯具的效率 η，即为该灯的利用系数 U。

16.6.3.3 平均球面照度和平均柱面照度计算，适用于大门厅、大休息厅、候车室、营业厅等场所的照明计算。当照度精确度要求不高时，可由水平面照度导出。

16.6.3.4 由于光源的光通衰减、灯具积尘和房间表面污染而引起的照度值降低，在计算照度时应计入表 16-1 所列的维护系数。各种场所不同灯具的维护系数见表 16-1。

16.6.3.5 平均照度计算。

(1) 点光源平均照度计算：采用利用系数法计算平均照度公式如下

$$E_{av} = \frac{N\phi U D_f}{A} \tag{16-24}$$

在工程应用中，由于照度值已选定，主要是确定光源的功率和数量，因此式 (16-24) 又可以写成

$$\phi = \frac{EA}{NUD_f} \text{或} \sum\phi = \frac{EA}{UD_f} \tag{16-25}$$

以上式中 E_{av}——工作面上的平均照度，lm；

N——灯具数量；

ϕ——每盏灯具内的光通量，lm；

$\Sigma\phi$——光源的总光通量，lm；

U——利用系数，可从表 16-24 中查得；

D_f——维护系数；

A——房间或工作面面积，m^2；

E——所选取的照度值，lx。

(2) 面光源平均照度计算：面光源平均照度计算公式如下

$$E_{av} = \frac{N\phi U U_0 D_f}{A} \tag{16-26}$$

式中 U——利用系数，可从表 16-25 中查得；

U_0——装置系数，可取 0.8～0.9。

表 16-24　　面光源照明利用系数 U

反射比 (%)	顶	80			反射比 (%)	顶	80		
	墙	50	30	10		墙	50	30	10
室形指数 R_1		利用系数 U			室形指数 R_1		利用系数 U		
0.6		0.22	0.16	0.12	2.0		0.46	0.42	0.39
0.8		0.27	0.22	0.19	2.5		0.49	0.46	0.43
1.0		0.33	0.28	0.24	3.0		0.52	0.49	0.46
1.25		0.38	0.32	0.29	4.0		0.55	0.52	0.50
1.5		0.41	0.37	0.33	5.0		0.57	0.55	0.53

16.7 照明与环境的关系

16.7.1 都市夜景照明的意义和重要性

随着城市的发展、经济的繁荣、社会的进步和人们对提高环境和生活质量的要求，都市夜景照明已成为城市规划建设和管理的一项重要工作，夜景照明的重要作用：

16.7.1.1 美化城市形象，反映城市文化底蕴和特色；

16.7.1.2 丰富群众生活，创造更加安全、方便、舒适的城市环境；

16.7.1.3 促进城市的经济发展，提高环境、社会和经济效益。

16.7.2 夜景照明工程的设计

16.7.2.1 夜景照明工程的设计原则：

（1）城市夜景照明工程首先要严格按照城市总体规划进行夜景照明的建设；

（2）夜景照明要紧扣本城市或建筑物的形象特征、功能特点，按照以人为本、和谐统一、简洁大气、重视文化和艺术品位；

（3）夜景照明要突出重点，各建筑物要有特点，不能一般化，照明方式应多元化；

（4）注意夜景照明新技术、新光源的使用，提高新技术的含量。

16.7.2.2 夜景照明的表现方式：建筑物的夜景照明设计中，首先对建筑物的特征进行研究、分析，然后结合光、色等各种表现手法，对建筑物的点、线、面或体进行淡化或亮化，使得自然风光与灯光景观相得益彰。做到色温选择合理、点线光源处理得当，整体效果理想、色彩搭配合理，明暗处理和谐。

夜景照明方式多种多样，在工程实践中常常结合多种照明方式，现分述如下：

（1）建筑轮廓照明。建筑轮廓照明就是用点光源每隔 30～50cm 连续安装形成光带，或用串灯、导光管、通体发光光纤等线形灯饰器材直接勾画建筑轮廓，一般采用霓虹灯、冷阴极管、通体发光光纤、LED 灯，将建筑物较为突出的特征勾勒出来。

（2）建筑立面投光照明。建筑立面的投光照明是将投光灯直接照射在建筑立面上，在夜间重塑其建筑形象。投光灯可安装在建筑物本身上，也可以在附近的地面或单独架设灯杆安装。若能利用建筑裙房和辅助建筑的屋顶安装更理想。投光灯与建筑物距离要适当，避免产生眩光。

（3）内透光照明。内透光照明方式就是利用室内光线向外透射形成夜景照明效果，创造由内而外的“灯笼”意像，强调建筑物的结构特征和穿透性，象征能量由建筑内释放出来。内透光又分为整体内透、线光内透、点光内透等形式。内透照明方式适用于玻璃窗较多或大面积玻璃幕墙、标志广告等，光源宜采用荧光灯、白炽灯和小型金属卤物灯。

（4）绿地、喷泉和雕塑照明。城市道路两旁的绿化带（草坪、绿树）、雕塑小品、围墙的夜景照明是城市景观照明的重要组成部分。在街道沿线设置草坪灯、雕塑小品灯、围墙灯、围栏灯、绿树照明、人行道低杆灯，形成几条灯饰线，表现竖向流畅感，营造幽静和典雅的氛围。若在这些灯饰线的两端或中间有特色的建筑和喷泉为依托，形成整条道路的亮点，则整体效果更完美、理想。

（5）特种照明。采用激光、光纤、电脑技术等高科技手段应用于夜景照明中已屡见不鲜。它表现城市的繁荣和浓重的商业气息。光纤照明是近年发展起来的高科技照明技术，它利用光导纤维把光送到人们需要的任何部位进行照明。其分为点光源和整条光缆两种型式。北京世纪坛展览厅上部大圆顶上星空中的星星闪闪发光是光纤点光源一个典型例子。而上海

东方明珠塔是成功应用光纤点线结合的好型式，在夜空的衬托下，有如“玉珠临空、满天星斗”。

(6) 开发利用光触媒技术。将二氧化钛涂在光源或灯具表面形成防污和净化环境的膜层，利用它在光线的照射下对有机物产生分解作用，即光催化作用的原理，实现灯具和光源防污和净化环境的技术。此技术在日本开始应用，效果良好。

16.7.3 照明电器的选择及照度计算

16.7.3.1 光源：夜景照明光源按工作原理可分两类，一类是固体发光光源，如白炽灯、卤钨灯；另一类是气体放电光源，如荧光灯、汞灯、高压钠灯、金属卤化物灯、霓虹灯等(16.7.2 中夜景照明的表现型式中已有叙述)。

综合考虑光效、寿命、环境等因素，立面照明很少采用白炽灯、碘钨灯，比较多的采用全卤灯和钠灯。

16.7.3.2 灯具：灯具的主要参数有额定光通、最大光强、光束角。灯具的最大光强大小主要取决于光源。灯具重要的参数是光束角。它表示光束照射的范围，窄光束角的瞄准点远、光束利用率高。适用于远距离、大面积的照明；宽光束角的瞄准点达到一定距离后，光强就减弱了，只用于近距离、小范围的照明。具体设计时，要根据建筑物特征，照度水平、表现手法、布灯位置来选择灯具。此外，由于夜景照明灯具大多位于室外，一般应选择防护等级 IP55 以上的密闭型灯具，且有良好的防腐性。

16.7.3.3 照度计算：立面照明所需照度的大小，应根据建筑物墙面材料的反射率和周围亮度条件而定。如果被照建筑物的背景较亮，则需要更多的灯光才能获得所要求的对比效果。反之，用较少的灯光便能获得要求的光照效果。我国目前还没有制定室外装饰照明照度的标准。可借鉴 CIE/TC5－06 技术委员会对室外装饰照明的照度建议值（略）。一般分低、中、高三档，照度从 20～360lx。表面材料当油漆面层彩色挂板者照度建议值的低、中、高三档分别为 200、300、600lx。

建筑物立面照明计算一般分两步进行：

(1) 用流明计算法估算投光灯台数，计算公式为

$$N = E \cdot A / U_p \cdot K \cdot F$$

式中 N——投光灯台数；

E——水平平均照度；

A——被照面积，m^2；

U_p——所用灯光的照度系数，通常取 0.3～0.5；

K——减光系数，一般取 0.5～0.8；

F——灯具的光通量，lm。

(2) 用逐点计算法来核算照度（略）。

通常一个大型建筑物高度较高，立面面积较大，因此布灯方案有多种、灯数又较多，靠人工计算工作量大且误差较大，目前各照明公司大多采用计算机进行计算，并出效果图；能进行多方案比较，使设计者感到真实可信。

16.7.4 夜景照明设计应注意的问题

16.7.4.1 城市夜景照明要加强规划、突出城市的历史、文化底蕴和特色；

16.7.4.2 实施城市光亮工程，要防止光污染，尽量减少对城市环境和气候的影响；

16.7.4.3 景观照明不能破坏原建筑或新建建筑的造型和环境；

16.7.4.4 城市亮起来了，耗能也是可观的，必须重视节能措施。选择合理的照明方案，选用节能光源和灯具，加强夜景照明管理，实现平日和节日照明两种管理控制机制。

16.7.4.5 便于维护、操作安全、运行可靠。

16.8 照明控制与节能技术应用

16.8.1 照明的控制方式

16.8.1.1 合理选择照明控制方式，充分利用天然光并根据天然光的照度变化，决定电气照明点亮的范围。单侧采光窗的教室、办公室等的照明宜平行外窗分组控制，依次设置灯开关。

16.8.1.2 根据照明使用特点，可采用分区控制灯光或适当增加照明开关点。大型多功能宴会厅、体育馆、场等宜设置专用照明控制台，并可预设多个照明方案。

16.8.1.3 采用各类接点开关和管理措施，如延时开关、调光开关、光电自动控制器、节点控制器、限电器、电控门锁节电器以及照明自控系统等。住宅的门厅、楼梯间、走道宜采用声控或延时开关（安全疏散通道除外）。

16.8.1.4 有电子显示、电视或幻灯的房间，一般照明宜采用调光方式或集中控制方式。

16.8.1.5 道路、庭院及景观照明宜采用集中遥控管理方式并应考虑设置深夜减光控制方案。

16.8.1.6 低压照明配电系统的设计，应便于按经济核算单位装表计量。

16.8.2 常用照明节能技术

16.8.2.1 合理地选取照度水平，有效地控制单位面积安装电功率或单位面积照明功率密度限值。

16.8.2.2 正确选择照明方案，优先采用分区照明方式。

16.8.2.3 一般照明应优先选用技术先进的新型高效光源，如 T8、T5 直管荧光灯，紧凑型荧光灯，高效金卤灯等。

16.8.2.4 除装饰需要外，应优先选用直射光通比例高、控光性能合理的高效灯具。灯具的结构和材质应易于维护清洁和更换光源。

16.8.2.5 采用适合眩光质量等级的照明灯具。

16.8.2.6 采用功率损耗低、性能稳定的灯用附件，如电子镇流器等。

16.8.2.7 宜采用照明灯具与空调风口结合的形式，以使灯具处于更好的工作状态。

16.8.2.8 合理选用照明控制方式。根据使用特点，分区和分时段进行照明控制。

16.8.2.9 充分利用天然光和太阳能等绿色能源，根据室内照明条件采用自动调控方式。

16.9 应急照明设计原则

16.9.1 应急照明设计原则

16.9.1.1 应急照明包括备用照明（供继续和暂时继续工作的照明）、疏散照明和安全照明。

16.9.1.2 应急照明的照度和设置应符合下列规定：

(1) 疏散照明的地面水平照度不宜低于 0.5lx；

(2) 工作场所内安全照明的照度不宜低于该场所一般照明照度的 5%；

(3) 备用照明（不包括消防控制室、消防水泵房、配电室和自备发电机房等场所）的照

度不宜低于一般照明照度的10%；

（4）影院、剧场、体育馆和多功能礼堂等场所的安全出口和疏散出口应装设指示灯。

（5）消防控制室、消防水泵房、防烟排烟机房、配电室和自备发电机房、电话总机房以及发生火灾时仍需坚持工作的其他房间的应急照明，仍应保持正常照明的照度。

16.9.1.3 公共建筑内的疏散走道和居住建筑内走道长度超过20m的内走道应设置应急照明。

16.9.1.4 疏散照明灯具宜设在墙面或顶棚上。安全出口指示标志宜设在出口的上部或两侧不低于2m处。疏散走道的指示标志宜设在疏散走道及其转角处距地面1.0m以下的墙面上；走道疏散标志灯的间距不应大于20m。

16.9.1.5 应急照明灯具不应直接安装在可燃装修和可燃构件上。

16.9.1.6 应急照明必须选用能瞬时起动的光源，当应急照明作为正常照明的一部分，并且应急照明和正常照明不出现同时断电时，应急照明可选用其他光源。

16.9.1.7 超高层建筑避难层应设有应急照明，其供电时间不应小于1.00h，照度不应低于1.00lx。

16.9.2 应急照明的供电与控制

16.9.2.1 应急照明在正常电源断电后，其电源转换时间应满足：

1）疏散照明15s；

2）备用照明15s（金融商业交易场所1.5s）；

3）安全照明0.5s。

16.9.2.2 疏散照明平时应处于点亮状态，但下列情况可以例外：

（1）在假日、夜间定期无人工作或使用，而仅由值班或警卫人员负责管理时；

（2）可由外来光线识别的安全出口和疏散方向；

（3）当采用带有蓄电池的应急照明灯时，在上述例外情况下应采用三线式配线，以使蓄电池处于经常充电状态。

16.9.2.3 应急照明和疏散指示标志灯当采用蓄电池组作为备用电源时，其持续工作时间为多层、高层建筑不少于20min；超高层建筑不少于30min。

16.9.2.4 当应急照明作为正常照明的一部分时，可由消防控制系统或安防控制系统对其单独控制。

16.10 特殊照明的应用

16.10.1 广告照明

16.10.1.1 内照式广告牌（灯箱）：通常采用直管荧光灯作为光源，其表面亮度宜为50～400cd/m^2，并应根据画面大小调整亮度。

16.10.1.2 装设泛光照明的广告牌：照明灯具宜设在广告牌的下侧或上下两侧，可采用小功率高显色金卤灯，表面照度宜为200～500lx。

16.10.2 航空障碍灯

16.10.2.1 障碍标志灯的水平、垂直距离不宜大于45m。

16.10.2.2 障碍标志灯应装设在建筑物或构筑物的最高部位。等制高点平面面积较大或为建筑群时，除在最高端装设障碍标志灯外，还应在其外侧转角的顶端分别设置。

16.10.2.3 在烟囱顶上设置障碍标志灯时，宜将其安装在低于烟囱口1.5～3m的部位，并

成三角形水平排列。

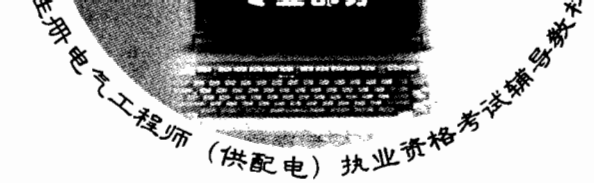
16.10.2.4 航空障碍标志灯技术标准应符合表 16－25 的功能。

表 16－25　　航空障碍标志灯技术参数

航空障碍标志灯类型	低光强	中光强	高光强
灯光颜色	航空红色	航空红色	航空白色
控光方式	恒定光或闪光 (60～90 次/min)	闪光 (20～60 次/min)	闪光 (20～60 次/min)
有效光强（cd）	＞10	＞2000	＞7500
可视范围	光源中心垂线 15°以上全方位	光源中心垂线 15°以上全方位	光源中心垂线 15°以上全方位
适用高度（m）	高出地面 60 时	高出地面 90 时	高出地面 150 时

16.10.2.5 航空障碍标志灯应采用自动控制，并便于更换光源。

16.10.2.6 航空障碍标志灯电源应按主体建筑中最高负荷等级要求供电。



17 电气传动

电气传动（又称电力拖动）的任务，是合理地使用电动机并通过控制，使被拖动的机械按照某种预定的要求运行。大多数机械，包括生产机械、牵引机械、计算机和仪器的外围设备、家用电器（如洗衣机、电冰箱、空调、电风扇）等，都是由电动机拖动的。在中国大约有60%的发电量是由电动机消耗掉的。因此，电气传动是一个非常重要的领域。

17.1 电气传动系统的组成及分类

17.1.1 电气传动系统的组成

电气传动控制系统通常由电动机、电源装置和信息、控制装置三部分组成。它们各自有多种设备或线路可供选用。

电气传动控制系统应能按照规定的指令，及时地控制电动机的起动、制动、运转方向、位置、速度、加速度和加加速度等，以满足工作机械及生产过程的要求。因此，其性能（控制精度、响应速度、可靠性、效率、装置的体积、自动化程度及经济性等）直接影响到工作机械的性能，产品的产量、质量、生产成本以及设备的维修，劳动条件等各个方面。

随着电动机、传感器、控制器件、变流技术和控制理论的发展，电气传动控制系统也得到了很大的发展。目前，所用电动机的单机容量从几百瓦发展到数万千瓦；变流设备（电源装置）从旋转式电机变流机组发展到大功率晶闸管静止变流装置、中小功率自关断器件静止变频装置；控制单元从模拟量触发器、调节器、给定积分器发展到以微处理器芯片为核心的交、直流通用的数字量控制模板；系统的控制方式从手动操作的开环控制发展到闭环多变量控制；电气传动已从单纯的调速系统扩展为实现位置、速度、加速度以至加加速度控制的全方位的运动控制系统。电气传动与其他传动方式相结合，可以组成具有某些特点的传动系统，如具有快速响应的电—液传动系统和在某些条件下具有一定优越性的机—电一体化系统。

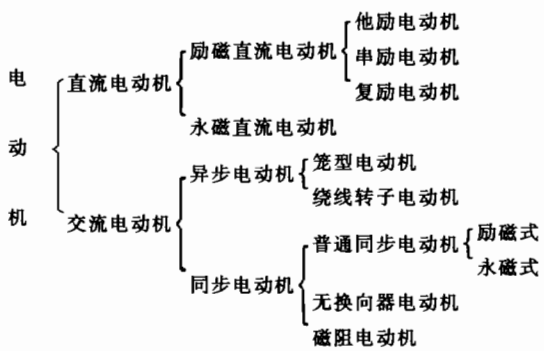


图 17－1 常用的驱动用电动机分类

17.1.2 电气传动的分类与比较

（1）按是否调速来划分，电气传动可分为不调速和调速两大类型。不调速电动机直接由电网供电。调速电动机由各种变流器（主要是各种电力电子变流器）供电。随着电力电子技术的发展，将有越来越多的调速传动取代不调速传动，以节约电能（对于风机、泵类负载，平均可节电15%～20%），改善机械性能。

（2）按照电动机的类型不同来划分。目

前常用的驱动用电动机其分类大致可用图 17－1 表示。

因此，电气传动又可分为交流传动与直流传动两大类。当然，也可以按图 17－1 的分类细分为各种传动的小类别，如永磁直流电动机传动、无换向器电动机传动等。

17.2 电动机的选择

17.2.1 选择电动机的原则

传动电动机的选择主要是确定电动机的类型及规格。一般选择的步骤见图 17－2。在校验电动机的发热、最小起动转矩、允许的最大飞轮力矩以及过载转矩等项目时，应从生产机械所需要的各种负载图和工作制中选择其中最繁重的条件来计算。若均能符合要求，且有适当的容量裕度（10%左右），则所选的电动机可以采用。否则，应另选定额重新计算。

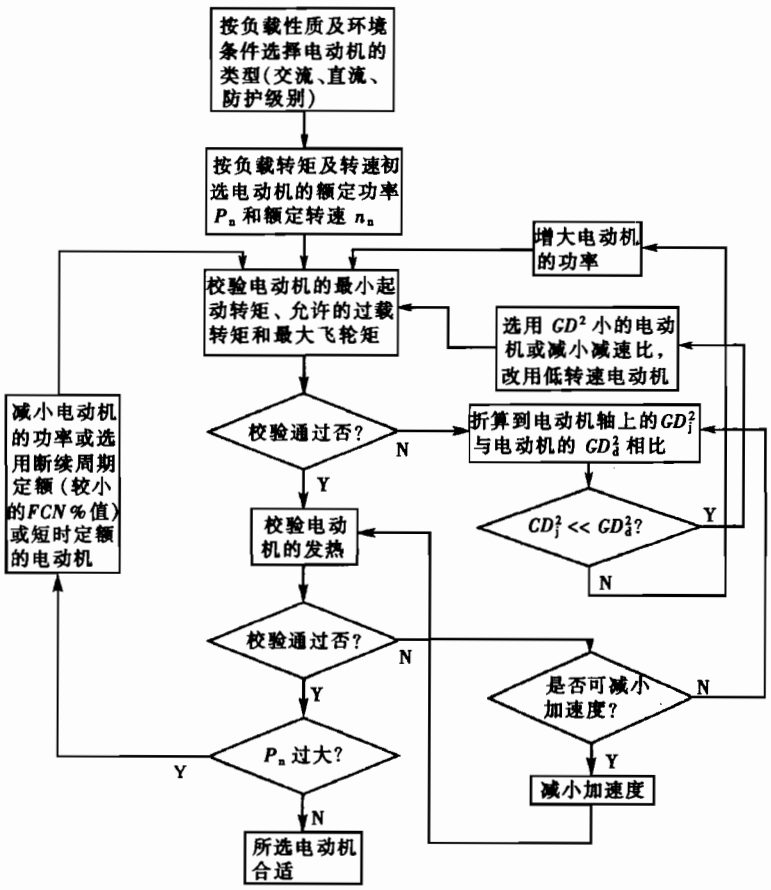


图 17－2 选择电动机的步骤

选择电动机时通常应考虑以下几项原则：

(1) 要从供电电网的质量（电网容量、允许的电压波动范围、功率因数）、起制动特性（起动时的负载转矩、GD^2 的大小、起制动时间的限制、是否要求快速正反转、允许对电网的冲击、起制动的频繁程度、制动时是否要回馈能量），调速性能（要求的调速范围及精度、调速平滑程度、低速工作时间的长短），控制特性等几个方面综合考虑，选择适当类型的电动机及其控制方式。

(2) 额定功率要满足负载需要，但不宜过大。过大会使投资增高，而且会造成轻载运行

时损耗大、效率低、功率因数低、起动时冲击大等问题。

（3）根据温升和使用环境条件，选择合适的通风方式、结构型式和防护等级。

（4）按照现场使用状况和被传动机械的要求，选择结构和安装方式（如轴的方向和轴伸，采用底座安装还是凸缘安装，挂在墙上还是吊装），与传动机械的连接方式（直接连接、齿轮箱、带传动和链条传动等），传动机构有无振动和冲击以及安装基础的牢固程度等。

（5）尽量选用可靠性高、互换性好、维护方便，且有标准定额的电动机。

（6）考虑初期投资和运行费用，要从电动机及其控制设备的总投资、效率、功率因数和费用以及全部设备的年维修费用等因素加以选择。

17.2.2 选择电动机的步骤

选择电动机的步骤见图 17－2。

17.2.3 电动机类型的选择

（1）根据环境条件选择电动机的类型。不同的使用环境条件对电动机的结构、通风及类型均有不同的要求，见表 17－1。

表 17－1　　电动机类型的选择

环境条件		要求的防护型式	可选用的电动机类型举例
正常环境条件		一般防护型	各类普通型电动机
湿热带或潮湿场所		湿热带型	（1）湿热带型电动机 （2）普通型电动机加强防潮处理
干热带或高温车间		干热带型	（1）干热带型电动机 （2）采用高温升等级绝缘材料的电动机或外加管道通风
粉尘较多的场所		封闭型或管道通风型	
户外，露天场所		气候防护型，外壳防护等级不低于 IP45②，接线盒应为 IP55。封闭型电动机外壳防护等级应为 IP65	
户外，有腐蚀性及爆炸性气体		户外、防腐、防爆型防护等级不低于 IP67	YBDF－WF
有腐蚀性气体或游离物		化工防腐型或采用管道通风	
有爆炸危险的场所①	0 级区域（0 区）	隔爆型、防爆通风充气型	YB、IJB、JBJ 等
	1 级区域（1 区）	任意防爆类型	
	2 级区域（2 区）	防护等级不低于 IP56	
	10 级区域（10 区）	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	
	11 级区域（1 区）	防护等级不低于 IP55③	
有火灾危险的场所①	21 区	防护等级至少应为 IP44④	
	22 区	防护等级至少应为 IP54	
	23 区	防护等级至少应为 IP54	
水中		潜水型	YLB、YQSZ、JQS、JQB、QY、JQSY

①爆炸和火灾危险场所的分级详见《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》。

②IP 的分级及定义详见 GB4208—1993《外壳防护等级（IP 代码）》。

③电动机正常发生火花部件（如集电环）应装在下列类型之一的罩子内：任意一级隔爆型、防爆通风型、充气型以及防护等级为 IP68 的罩子。

④具有正常工作发生火花部件（如集电环）的电动机最低级应为 IP55。

在常见情况下对电动机结构形式的选择可归纳为如下几点：

1）在采暖的干燥厂房中，采用开启式、防护式电动机。

2）在不采暖的干燥厂房，或潮湿而无潮气凝结的厂房中，采用开启式和防护式电动机。但需要能耐潮的绝缘。

3）在特别潮湿的厂房中，由于空气中的水蒸气经常饱和，并可能凝成水滴，需用防滴式、防溅式或封闭式电动机，并带耐潮的绝缘。

4）在无导电灰尘的厂房中

a. 当灰尘易除掉，且对电机无影响，及电机采用滚珠轴承时，可采用开启式或防护式电动机。

b. 当灰尘不易除掉对绝缘有害时，采用封闭式电动机。

c. 当落在电机绕组上的灰尘或纤维妨碍电机正常冷却时，宜采用封闭式电动机。

5）在有导电灰尘或不导电灰尘，但同时有潮气存在的厂房中，应采用封闭式电动机。

6）当对电动机绝缘有害的灰尘或化学成分不多时，如果通风良好，可不用封闭式电动机。

7）在有腐蚀性蒸气或气体的厂房中，应采用密闭式电动机或耐酸绝缘的封闭风冷式电动机。

8）在21区及22区有着火危险的厂房中，至少应采用防护式笼型电动机。

在21区厂房中，当其湿度很大时，应采用封闭式电动机。

有可燃但难发火的液体的21区厂房中，最低应采用防滴、防溅式笼型电动机，在含有发火液体的21区厂房中，应采用封闭式电动机。

9）在0级、1级区域厂房中，需采用防爆式电动机。

10）电动机安装在室外时：

a. 直接露天装设；

b. 装在棚子下面。

在这两种情况下，必须保护电动机的绝缘不受大气、潮气的破坏。在露天装设时，为防止潮气变为水滴而直接落入电动机内部，应采用封闭式电动机。装在棚子下时，可采用防护式或封闭式电动机。

（2）根据负载性质选择电动机的类型。表17－2列举出各类电动机适用的传动特性。

表17－2　　各类电动机适用的传动特性

电动机类型		适用的传动特性	传动机械举例
笼型异步电动机	普通型	1. 不需要调速 2. 采用变频、调压、加转差离合器等调速方式，不仅可得到较好的调速性能，而且可获得较好的节能效果	泵、风机、阀门、各种普通机床、运输机、起重机等
	深槽型 双笼型	起动时静负载转矩或飞轮力矩大，要求有较高的起动转矩	压缩机、粉碎机、球磨机等
	高转 差型	周期性波动负载长期工作制，要求利用飞轮的储能作用	锤击机、剪断机、冲压机、活塞压缩机、绞车等
	变极	1. 只需要几种转速，而不需要连续调速，节能效果好 2. 配上转差离合器，可实现在大范围内有级变同步转速，而小范围内得到平滑调速	纺织机械、印染机、风机、木工机床、高频发电机组等

续表

电动机类型		适用的传动特性	传动机械举例
绕线转子异步电动机		电网容量小，对起动有要求，负载起动转矩较大，起、制动频繁而用笼型电动机不能满足要求时，要求的调速范围不大，可以利用变转差率调速的场合	输送机、压缩机、风机、泵、起重机、轧机、提升机、带飞轮的机组等
同步电动机		需要稳定的转速①，或者为了要补偿电网功率因数的场合	轧机、风机、泵、压缩机、电动机－发电机组等
直流电动机	他励	要求有宽调速范围②以及对起、制动有较高要求时	轧机、造纸机、重型机床、卷扬机、电梯、机床的进给机构、纺织机械等
	复励	负载变化范围较大而又需要宽调速	提升机、电梯、剪断机等
	串励	起、制动频繁，要求较大的起动转矩，具有恒功率负载的机械	电车、起重机、牵引机车等

①由于交流调速技术的发展，在某些要求调速的场合，特别是大功率、低转速和特殊环境条件下亦可用同步电动机。

②对要求调速范围很宽（如100:1以上）的机械，最好从机械变速和电气调速两者结合起来考虑，以便获得技术经济指标都高的效果。

（3）直流与交流电动机的比较：交流电动机结构简单，价格便宜，维护工作量小，但起制动及调速性能不如直流电动机。因此在交流电动机能满足生产需要的场合都应采用交流电动机，仅在起制动和调速等方面不能满足需要时才考虑直流电动机。近年来，随着电力电子及控制技术的发展，交流调速装置的性能与成本已能和直流调速装置竞争，越来越多的直流调速应用领域被交流调速占领。在选择电动机种类时应从以下几方面考虑选用交流电动机还是直流电动机。

1）不需调速的机械包括长期工作制、短时工作制和重复短时工作制机械，应采用交流电动机。

仅在某些操作特别频繁、交流电动机在发热和起制动特性不能满足要求时，才考虑直流电动机，只需几级固定速度的机械可采用多极交流电动机。

2）需要调速的机械：

a. 转速与功率之积受换向器换向能力限制，按目前的技术水平，直流机最大的转速与功率之积约为10^6（kW·r）/min，当接近或超过该值时，宜采用交流电动机，这问题不仅对大功率设备存在，对某些中小功率设备在要求转速特别高时也存在。

b. 飞轮力矩：为改善换向器换向条件，要求直流电动机电枢漏感小，电机转子短粗，因而造成飞轮力矩GD^2大。交流电动机（无换向器电动机除外）无此限制，转子细长，GD^2小，电动机转速越高，交直流电动机GD^2之差越大，当直流电动机的GD^2不能满足生产机械要求时，宜采用交流电动机。在表17－3中列出几台实际电动机的GD^2值，供参考。

表17－3　　交直流电动机的GD^2值

功率（kW）	转速（r/min）	GD^2（kN·m²）	
		交流	直流
9500	70、140	441	794
9000（交流）2×4500（直流双电枢）	250、578	42	188

c. 为解决直流机 CD^2 大和功率受限制的问题，过去许多机械采用双电枢或三电枢直流电动机传动，但电机造价高，占地面积大，易产生轴扭振，随着交流调速技术的发展，上述方案已不可取，应考虑改用单台交流电动机。

d. 在环境恶劣场合，例如高温、多尘、多水气、易燃、易爆等场合，宜采用无换向器、无火花、易密闭的交流电动机。

e. 交直流电动机调速性能差不多，目前高性能系统的转矩响应时间都是 10～20ms，速度响应时间都在 100ms 左右，交流电动机 GD^2 小，略快一些，为获得同样的性能，交流调速系统比直流调速系统复杂，要求较高调整维护水平。

f. 成本：交流调速用变流装置比直流调速用整流装置贵，因为交流调速用交流装置按电机的电压电流峰值选器件，当三相电流中某一相电流处于峰值时，另两相电流只有一半，器件得不到充分利用，交流电机比直流电机便宜，可以补偿变流装置增加的成本，目前：

a）一般用途的 GTR 中小功率（100kW 以下）PWM 变频调速装置的成本与直流可逆传动装置成本相当（包括电机），但高性能的四象限交流调速装置比直流的贵。

b）大中功率（500～1000kW 以上）的交—交变频调速装置的成本与单电枢直流可逆传动装置相当（包括电动机），比双电枢或三电枢直流装置便宜。

c）不可逆及不对称可逆直流调速装置比交流调速装置便宜。

g. 对电网的影响：

a）可控整流直流调速装置存在输入功率因数低及输入电流中存在 5、7、11、13、……高次谐波问题。

b）晶闸管交—直—交变频交流调速装置的输入部分仍是可控整流，对电网的影响和直流调速时相同。

c）晶闸管交—交变频交流调速也基于移相控制，输入功率因数和直流调速时差不多，输入电流中除 5、7、11、13…等次谐波外，还有旁频，谐线数目增加，但幅值减少。

d）GTR 和 GTO 的 PWM 变频交流调速装置输入功率因数好，挨近“1”，高性能 PWM 变频器可以做到输入功率因数等于“1”，且输入电流为正弦。

h. 损耗与冷却通风：

a）采用直流电动机时，主回路功率流入转子，散热困难，需要通风功率大，冷却水多。

b）采用交流同步电动机时，主回路功率流入定子，散热条件好，通风功率小，比直流电动机节能、节水一半左右。

c）采用交流异步电动机时，主回路功率虽也流入定子，但功率因数低，效率与直流电动机差不多。

（4）交流电动机的选择：

1）普通励磁同步电动机。

a. 优点：

a）电动机功率因数高；

b）用于变频传动时，电机功率因数等于“1”，使变频装置容量最小，变频器输入功率因数改善；

c）效率比异步电动机的高；

d）气隙比异步电动机的大，大容量电动机制造容易。

b. 缺点：

a）需附加励磁装置；

b）变频调速控制系统比异步电动机的复杂；

c. 应用场合：

a）大功率不调速传动；

b）600r/min 以下大功率交—交变频传动，例如轧机、卷扬、船舶驱动、水泥磨机等。

2）永磁同步电动机。永磁同步电动机与 PWM 变频装置配合使用，电流为正弦波。目前一般容量在几十千瓦以下，但容量正在逐渐扩大，个别已做到几十千瓦。在纺织工业中常配锁频系统，以保证速度精度，在伺服系统中配按转子位置定向矢量控制系统，性能优于其他电动机（直流、异步或永磁无换向器电机）的系统，但成本略高，适用于高性能场合。

3）无换向器电动机。

a. 特点：

a）输入电流为 120°方波，带来转矩脉动及低速性能差缺点，设计电机磁路时需考虑如何减少该影响；

b）电路设计时需计及谐波电流带来的附加损耗；

c）大中功率无换向器电动机由晶闸管变频器供电。为实现换相，要求电动机工作在功率因数超前区，加大了变频器容量及励磁电流；电动机过载能力差（1.5～2），欲降低上述影响，要求电动机定子绕组漏感小，致使电动机短粗，GD^2 大。

d）无转速和频率上限。

b. 应用场合：

a）大中功率用于负载平稳、过载不多场合，例如风机、泵等，一般 600r/min 以上；

b）小功率与 GTR 的 PWM 变频器配合，用于性能一般的伺服系统。

4）异步电动机。

a. 特点：

a）笼型电动机结构简单，制造容易，价格便宜；

b）绕线转子电动机可以通过在转子回路中串电阻、频敏电阻或通过双馈改变电机特性，改善起动性能或实现调速；

c）功率因数及效率低，在采用变频调速时加大变频器容量；

d）气隙小，大功率电动机制造困难；

e）调速控制系统比同步电动机的简单。

b. 应用场合：

a）2000～3000kW 以下、不调速、操作不频繁场合，宜用于笼型电动机；

b）2000～3000kW 以下、不调速，但要求起动力矩大或操作较频繁场合，宜用于绕线转子电动机；

c）环境恶劣场合宜采用笼型电动机；

d）2000～3000kW 以下的交流调速系统。

5）磁阻电动机是一种与小功率笼型电动机竞争的新型调速电动机，转子为实心铁心，d、q 轴磁路不对称，定子有多相绕组，利用大功率晶体管轮流接通定子各绕组，靠反应力矩使电动机旋转。这种电动机调速装置简单，不用逆变器，无逆变失败故障，可靠性高，它的结构比笼型电动机简单，而功率因数和效率两者差不多。目前容量范围在几千瓦以下，个别达几十千瓦，用于小功率调速装置。

(5) 直流电动机的选择：

1) 需要较大起动转矩和恒功率调速的机械，如电车、牵引机车等，用直流串励电动机。

2) 其他使用直流机场合一般均用他励直流电动机。注意要按生产机械的恒转矩和恒功率调速范围，合理地选择电动机的基速及弱磁倍数。

17.2.4 电动机转速的选择

合理地选择电动机的转速，必须从技术及经济指标全面考虑。

(1) 对于一般的高（或中）转速机械（如泵、压缩机和鼓风机等），宜选用相应转速的电动机，直接与机械连接。

(2) 对于不调速的低转速机械（如球磨机、水泥旋窑，轧机等），宜选用适当转速的电动机通过减速机传动。但对大功率机械，电动机的转速不能太高，要考虑大型减速机（尤其是大减速比）加工困难及维修不便等因素。

(3) 对于要调速的机械，电动机允许的最高工作转速应与生产机械要求的最高速度相适应。如果选用直流电动机，则采用变电压调速还是变励磁调速，以及基速的确定都应从充分、合理地利用功率的角度考虑。

(4) 对于频繁起、制动的断续周期工作制机械，电动机的转速除应满足机械所需要的最高稳定工作速度之外，还应从保证生产机械具有最大的加、减速度而选择最合适的传动比，以使生产机械获得最高的生产率。

(5) 对于某些低速重复短时工作的机械，如果电机制造上可能，宜采用无减速机直接传动。这样从电动机的制造方面虽然增加了一定的困难，但是对于提高生产机械的生产率；提高传动系统的动态性能（减小机械传动系统的飞轮力矩，缩短正、反转过渡过程时间）；提高效率，节省能量消耗；减少机械制造的困难及维修费用；减少初期投资及运行的噪声等方面考虑是有利的。因此，像某些轧机的主传动和辅助传动、矿山卷扬机的传动、电梯传动等机械多趋向于用无减速机的直接传动。

(6) 自扇冷式电动机的散热效能随电动机转速而变，不宜长期在低速下运行。如果由于调速的需要，长期低速运行而又超过电动机允许的条件时，应增设外通风设施，以免损坏电动机。

17.2.5 电动机功率、转矩的选择（电动机的容量校验）

传动电动机的规格（功率、电压、转速）一般是由机械设计部门选定的。这里只着重按照生产机械的不同工作制出发来校验所选择的电动机的容量是否满足机械及工艺的要求。

(1) 恒定负载连续工作制下电动机的容量校验。

1) 计算电动机的额定功率：选择电动机的额定功率 P_n 略大于折算到电动机轴上的负载功率 P_L

$$P_n \geqslant P_L = T_L n_n / 9550 \quad \text{kW} \tag{17-1}$$

式中 T_L——折算到电动机轴上的静负载转矩，N·m；

n_n——电动机的额定转速，r/min。

负载转矩恒定，需从基速向上调速时，其额定功率应按要求的最高工作转速 n_{max} 计算

$$P_n \geqslant T_L n_{max} / 9550 \quad \text{(kW)} \tag{17-2}$$

2) 校验起动过程中的最小转矩及允许的最大飞轮力矩

对起动条件沉重（静负载转矩大或带有较大的飞轮力矩）而采用笼型异步电动机或同步电动机传动时，在选定 P_n 后还要按下面两式分别校验电动机的最小起动转矩 T_{Mmin} 和允许的

最大飞轮矩 GD^2_{xm}

$$T_{Mmin} \geqslant T_{Lmax} K_{st} / K_u^2 \quad \text{N·m} \tag{17-3}$$

式中 T_{Lmax}——起动过程中可能出现的最大负载转矩，N·m；

K_{st}——保证起动时有足够加速转矩的系数，一般取 $K_{st} = 1.15 \sim 1.25$；

K_u——电压波动系数，起动时电动机端电压与额定电压之比，全压起动时，取 $K_u = 0.85$。允许的最大飞轮力矩 GD^2_{xm} 为

$$GD^2_{xm} = GD^2_0 (1 - T_{Lmax} / T_{stav} K_u^2) - GD^2_M \quad \text{N·m}^2$$

$$GD^2_{xm} \geqslant GD^2_{mec} \tag{17-4}$$

式中 GD^2_{mec}——折算到电动机轴上传动机械的最大飞轮力矩，N·m²；

GD^2_0——包括电动机在内的整个传动系统允许的最大飞轮力矩，N·m²，由电动机资料中查取；

GD^2_M——电动机转子的飞轮力矩，N·m²；

T_{stav}——电动机的平均起动转矩，N·m，见表 17-4。

表 17-4　　交流电动机的平均起动转矩

电动机类型		平均起动转矩	备　注
同步电动机	$T_{st} > T_{pi}$时	$T_{stav} = 0.5 (T_{st} + T_{pi})$	T_{stav}—平均起动转矩； T_{st}—最初起动转矩（$s = 1$时）； T_{pi}—牵入转矩； T_{cr}—临界转矩
	$T_{st} \leqslant T_{pi}$时	$T_{stav} = 1.0 \sim 1.1 T_{st}$	
笼型异步电动机（一般用途）		$T_{stav} = 0.45 \sim 0.5 (T_{st} + T_{cr})$	

若上述两项校验通过，则所选电动机按起动条件的校验可以通过。

对于直流电动机和绕线转子异步电动机，因其起动转矩可以在规定范围内任意调节，因此不必做此两种校验。

(2) 短时工作制下电动机的容量校验。对短时工作的机械，应尽量选用短时定额电动机。如果工作周期远小于电动机的发热时间常数，且停歇时间长到足以使电动机完全冷却到环境温度，则其额定功率还可以按过载能力来选择。可选用断续定额电动机，对于异步电动机

$$P_n \geqslant P_{Lmax} / 0.75\lambda \quad \text{kW} \tag{17-5}$$

式中 P_{Lmax}——短时负载功率的最大值，kW；

λ——电动机允许的转矩过载倍数，见表 17-5。

表 17-5　　交流电动机的转矩过载倍数 λ

电动机类别	工　作　制		$\lambda = T_{Mmax} / T_n$
笼型异步电动机	一般用途，连续工作制		≥1.6
	高起动转矩，连续工作制		≥2.0
	起重、冶金型	10kW 及以下	≥2.5
		10kW 以上	≥2.8
绕线转子异步电动机	一般用途，连续工作制		≥1.8
	起重、冶金型	10kW 及以下	≥2.5
		10kW 以上	≥2.8
同步电动机	$\cos\varphi = 0.8$（超前）		≥1.65
	强励时		3～3.5

(3) 变动负载连续周期工作制下电动机的容量校验

1) 发热校验。对于图 17-3 所示的变动负载连续周期工作制下电动机的功率计算，可先按等效（方均根）转矩或等效电流法，计算出一个周期 T 内的等效转矩 T_e或等效电流 I_e。选取额定转矩 $T_n \geqslant T_e$或额定电流 $I_n > I_e$。

$$T_n \geqslant T_e = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3 \cdots T_n^2 t_n}{T}} \text{ N·m}$$

或

$$I_n \geqslant I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 \cdots I_n^2 t_n}{T}} \text{ A} \qquad (17-6)$$

式中 $T_1 \sim T_n$——各分段时间内的转矩值，N·m；

$I_1 \sim I_n$——各分段时间内的电流值，A；

T——一个周期的总时间，s，$T = t_1 + t_2 + t_3 \cdots + t_n$。

当负载波形不是矩形，而是如图 17-3（b）所示的三角形或梯形时，则应将每一个相应的时间间隔内的转矩或电流值换算成等效平均值后，同样可用上面两式计算 T_e或 I_e。

对应时间 t_2 内转矩或电流的等效平均值为

$$T_{av2} = \sqrt{(T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2)/3}$$

$$I_{av2} = \sqrt{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)/3}$$

对应时间 t_1 内三角形曲线转矩或电流的等效平均值为

$$T_{av1} = \sqrt{T_1^2/3} = 0.578 T_1$$

$$I_{av1} = \sqrt{I_1^2/3} = 0.578 I_1$$

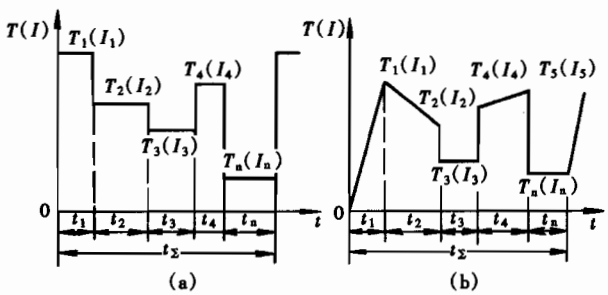


图 17-3 变动负载连续周期工作制下电动机的负载图

(a) 矩形负载；(b) 梯形或三角形负载

2) 校验最大过载转矩按 T_e或 I_e选取电动机的额定功率以后，还要用最大负载转矩 T_{Lmax}校验电动机的过载能力。

$$T_n \geqslant T_{Lmax} / (0.9 K_u \lambda) \text{ N·m} \qquad (17-7)$$

式中 K_u——电网电压波动系数，一般对于同步电动机，$K_u = 0.85$，对于异步电动机，$K_u = 0.72$；对于直流电动机，$K_u = 1.0$；

λ——转矩过载倍数（见表 17-5 和表 17-6）；

0.9——考虑计算误差和参数波动而取的安全系数。

表 17-6　　直流电动机的过载能力

电动机类型		工作条件	允许的工作过载		转矩过载电流倍数
			电流倍数	时间（s）	
一般用途中小型电动机（如 Z2 系列）		基速及以下	1.5	120	
起重、冶金用电动机（如 ZZ、ZZY 系列）	并励	基速及以下	2.5	60	2.8
	复励		2.7		3.0
中型无补偿变速电动机（ZD 系列）		基速及以下	1.5	60	

3）校验起动过程中的最小转矩及允许的最大飞轮力矩，参见17.2.5之（1）、2）项。

（4）断续周期工作制下电动机的容量校验。断续周期工作制下电动机的典型负载变化见图17－4。

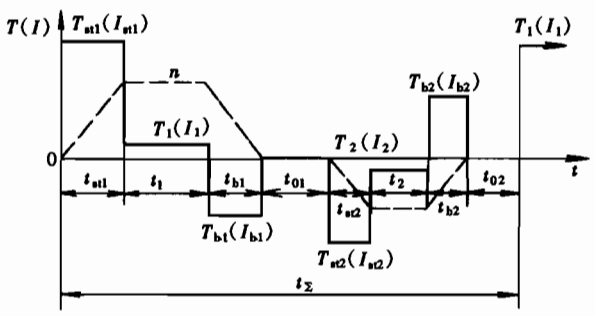


图17－4　断续周期工作制下电动机的典型负载

这类机械通常多选用断续定额电动机（如JZ、JZR系列等），为合理利用电动机的容量，规定在不同的负载持续率 FC_N 时有不同的定额（指电动机的额定功率、电流、转速等）。如JZ、JZR系列起重冶金用电动机的标准负载持续率 FC_N（%）分为25%、40%、60%三种，并采用10min作为周期计算时间。因此，所选用的 FC_N 值应尽可能与实际工作的 FC 值相近。当实际工作的 FC 值大于60%时，可采取强迫通风或选用连续定额电动机，其功率可按下面四式所示的等效转矩（或等效电流）法或平均损耗法进行校验。

1）按等效转矩（或等效电流）法校验发热：

a. 选用断续定额电动机时，对于图17－3所示的负载图，电动机在一个工作周期内的等效（方均根）转矩 T_e 或等效（方均根）电流 I_e 为

$$T_e = \sqrt{\frac{\sum T_{st}^2 t_{st} + \sum T^2 t + \sum T_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_{st} + \sum t_b) + \sum t}} \quad \text{N·m} \tag{17-8}$$

$$T_e = \sqrt{\frac{\sum I_{st}^2 t_{st} + \sum I^2 t + \sum I_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_{st} + \sum t_b) + \sum t}} \quad \text{A} \tag{17-9}$$

b. 选用连续定额电动机时

$$T_e = \sqrt{\frac{\sum T_{st}^2 t_{st} + \sum T^2 t + \sum T_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_{st} + \sum t_b) + \sum t + C_\beta \sum t_0}} \quad \text{N·m} \tag{17-10}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{\sum I_{st}^2 t_{st} + \sum I^2 t + \sum I_b^2 t_b}{C_\alpha (\sum t_{st} + \sum t_b) + \sum t + C_\beta \sum t_0}} \quad \text{A} \tag{17-11}$$

式中　T_{st}——起动转矩，N·m；

T_b——制动转矩，N·m；

T——稳态运转转矩，N·m；

I_{st}——起动电流，A；

I_b——制动电流，A；

I——稳态运转电流，A；

$\sum t_b$——一个周期中制动时间的总和，s；

$\sum t_0$——一个周期中停歇时间的总和，s；

$\sum t_{st}$——一个周期中起动时间的总和，s；

$\sum t$——一个周期中稳态运转时间的总和，s；

C_α——起制动过程中电动机散热恶化系数，$C_\alpha = (1 + C_\beta)/2$；

C_β——停止时电动机散热恶化系数，见表 17－7。

表 17－7　　C_β 值

电动机的冷却方式	C_β 值	电动机的冷却方式	C_β 值
封闭式电动机（无冷却风扇）	0.95～0.98	封闭式电动机（自带内冷风扇）	0.45～0.55
封闭式电动机（强迫通风）	0.9～1.0	防护式电动机（自带内冷风扇）	0.25～0.35

实际负载持续率为

$$FC = \frac{\sum t_{st} + \sum t_b + \sum t}{t_\Sigma} \times 100\% \qquad (17-12)$$

当实际负载持续率 FC 值与所选的电动机的额定负载持续率 FC_n 值不相等（但相差不多）时，应将上面式（17－8）～式（17－11）所计算出的 T_e 或 I_e 值折算到对应于电动机的 FC_n 值相等效的值，即

$$T'_e = \sqrt{FC/FC_n}\,T_e \qquad \text{N·m}$$

$$I'_e = \sqrt{FC/FC_n}\,I_e \qquad \text{A}$$

当所选电动机的额定转矩 $T_n > T_e$ 或额定电流 $I_n > I_e$ 时，则表示电动机的发热校验通过。

2）校验最大过载转矩，参见 17.2.5 之（1）、（2）项，只有当发热校验和最大过载转矩校验两项都通过以后，电动机的容量校验才算通过。

17.3　交、直流电动机的起动方式及起动校验

17.3.1　交流电动机的起动

（1）全压起动（直接起动）：笼型异步电动机和同步电动机满足下列条件时，可以采用全压起动。

1）起动时对电网造成的电压降不超过规定的数值。一般需要经常起动时，其电压降不得超过 10%，偶尔起动时不超过 15%。在保证生产机械所要求的起动转矩而又不致影响其他用电设备的正常工作时，其电压降可允许为 20% 或更大一些。

表 17－8　按电源容量允许直接起动的笼型异步电动机功率

电　源	允许直接起动的笼型异步电动机功率
小容量发电厂	每 1kVA 发电机容量为 0.1～0.12kW
变电所	经常起动时，不大于变压器容量的 20% 不经常起动时，不大于变压器容量的 30%
高压线路	不超过电动机连接线路上的短路容量的 3%
变压器电动机组	电动机功率不大于变压器容量的 80%

2）起动功率不超过供电设备和电网的过载能力。笼型异步电动机允许全压起动的功率和电源容量之间的关系见表 17－8。

3）起动时的稳定电流和热稳定电流应符合电动机起动设备规定的要求。

不能满足上述条件时，应采用减压起动。

（2）减压起动。表 17－9 列举了各种减压起动方式的比较。此时，为保证电动机有足够的起动转矩，其端电压应为

$$U_{*M} \geqslant \sqrt{1.1\,T_{*L}/T_{*st}} \qquad (17-13)$$

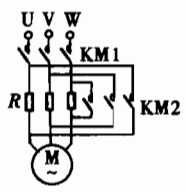
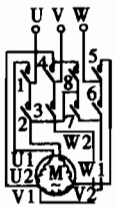
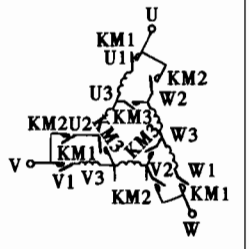
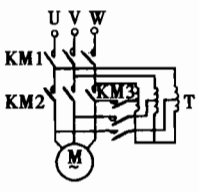
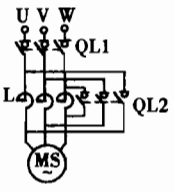
式中 U_{*M}——电动机端电压对额定电压的标么值；

T_{*L}——电动机负载转矩对额定转矩的标么值；

T_{*st}——电动机起动转矩对额定转矩的标么值。

1）绕线转子异步电动机转子串电阻分级起动。某些大功率传动装置要求重载起动，而某些小功率装置要求频繁起、制动，为减小起动损耗与冲击电流，以及满足某些机械对加、减速度的特定要求，可采用电阻分级起动的绕线转子异步电动机。电阻分级起动的特性及电阻值计算见表 17－10。与采用恒定直流电源供电的直流电动机串电阻分级起动时，其电阻值计算方法相同，并可采用图解法直接求出。

表 17－9　　各种减压起动方式的比较

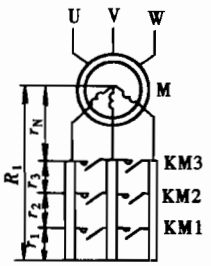
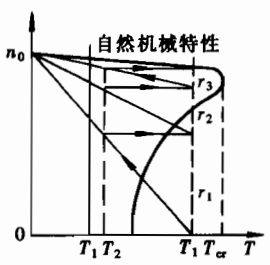
起动方式		笼型异步电动机						同步电动机	
		电阻减压起动	Y－△起动	延边三角形起动				自耦变压器减压起动	电抗器减压起动
				抽头比 $K=a/b$①					
				1:1	1:2	1:3	3:5		
接线方式									
起动性能	起动电压	αU_n	$\frac{1}{\sqrt{3}}U_n$	$0.69U_n$	$0.75U_n$	$0.8U_n$	$0.73U_n$	αU_n	αU_n	αU_n
	起动电流	αI_{st}	$\frac{1}{3}I_{st}$	$0.5I_{st}$	$0.6I_{st}$	$0.67I_{st}$	$0.57I_{st}$	$\alpha^2 I_{st}$	$\alpha^2 I_{st}$	αI_{st}
	起动转矩	$\alpha^2 T_{st}$	$\frac{1}{3}T_{st}$	$0.5T_{st}$	$0.6T_{st}$	$0.67T_{st}$	$0.57T_{st}$	$\alpha^2 T_{st}$	$\alpha^2 T_{st}$	$\alpha^2 T_{st}$
适用的电动机类型		低压电动机	具有六个出线头的低压电动机	具有 9 个出线头的低压电动机				高压、低压电动机		高压电动机
起动特点		起动电流较大，起动转矩较小，起动时电阻消耗能量较大	起动电流小，起动转矩较小	起动电流电压降小，起动转矩较大，兼有自耦变压器及 Y－△两种减压起动方式的优点				起动电流较小，起动转矩较大		起动电流较大，起动转矩较小

①延边三角形数据根据下面公式及抽头比 $K=\frac{a}{b}$估算。

$$\frac{U_{st}}{U_n}=\frac{1+\sqrt{3}K}{1+3K}\quad\frac{I'_{st}}{I_{st}}=\frac{1+K}{1+3K}\quad\frac{T'_{st}}{T_{st}}=\frac{1+K}{1+3K}$$

式中 I'_{st}——延边三角形抽头起动时起动电流；T'_{st}—延边三角形抽头起动时起动转矩；U_n—电动机额定电压；α—降压系数$\left(\alpha=\frac{U'_{st}}{U_n}\right)$；$I_{st}$—全压起动时的起动电流；$T_{st}$—全压起动时的起动转矩；$U'_{st}$—起动电压；$U_n$—额定电压。

表 17－10　　转子串电阻分级起动的特性及电阻值计算

电动机类型	接线方式	起动特性	电动机功率（kW）	起动级数 q
绕线转子异步电动机			0.75～7.5 10～20 20～35 35～55 60～95 100～200 200～370	1 2 2～3 3 4～5 4～5 6

T_1、T_2 的取值	起动电阻计算	符号
一般取 $T_1 \leqslant 0.9T_{cr}$ $T_2 = T_1/\lambda$	$\lambda = \dfrac{T_1}{T_2} = \sqrt[q]{\dfrac{1}{s_n T_{*1}}}$ $r_3 = r_n(\lambda - 1)$ $r_2 = r_3\lambda$ $r_1 = r_2\lambda$ $r_n = s_n R_{2n}$	s_n——电动机的额定转差率； R_{2n}——转子额定电阻，Ω，$R_{2n} = \dfrac{U_{2n}}{\sqrt{3}I_{2n}}$ T_{*1}——最大起动转矩对额定转矩的标么值，$T_{*1} = T_1/T_n$ U_{2n}——电动机转子额定电压，V I_{2n}——电动机转子额定电流，A

2）绕线转子异步电动机转子串频敏变阻器起动。利用绕线转子异步电动机在起动过程中转子电流频率随转差率的变化而变化的特点，在转子回路中接入频敏变阻器［见图 17－5（a）、（b）］时，其等效阻抗随转差率的减小（转速增高）而相应地减小，从而起到减小起动电流并得到起动转矩近似恒定的起动特性。它具有不需要改变外接阻抗而可以很容易地实现电动机的反接制动的特点。对要求工作特性软的机械（如轧机的辊道等），亦可将频敏变阻器常接在转子回路中。

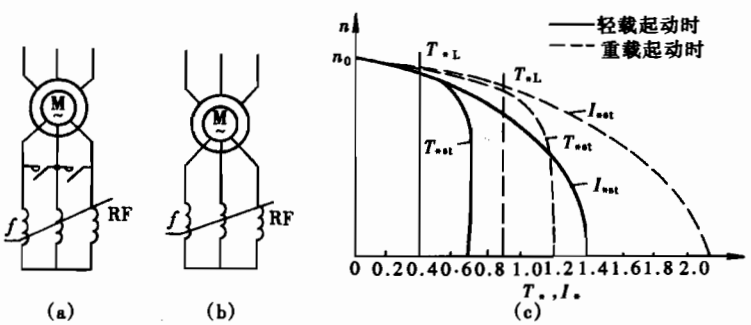


图 17－5　绕线转子异步电动机采用频敏变阻器起动

（a）经过开关的频敏变阻器；（b）没有开关的频敏变阻器；（c）特性曲线

T_{*L}—负载转矩标么值；T_{*st}—起动转矩标么值；I_{*st}—起动电流标么值

采用频敏变阻器起动，其优点是可省去庞大的起动电阻器，线路简单，维修简便。但因其功率因数低、起动转矩小，对要求在低速下运转和起动转矩大的场合，不宜采用。

3）笼型异步电动机减压起动。鼠笼转子异步电动机转子电路在内部闭合，不能外串起动设备，只能在定子电路中采取措施。其减压起动方法主要有定子电路串电阻起动、Y－△

起动、延边三角形起动和自耦变压器减压起动等。这些起动方法的接线图，起动时的电压、电流及转矩特性，适用电动机类型、起动特点等详见表 17－6。

4）同步电动机减压起动。同步电动机可以采用自耦变压器减压起动或定子电路串电抗起动方法实现减压起动，详见表 17－9。

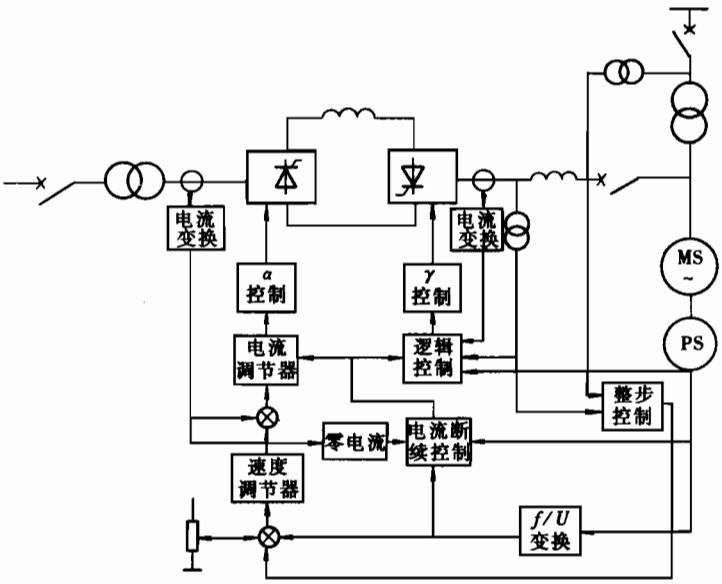


图 17－6　用晶闸管变频装置起动同步电动机原理框图

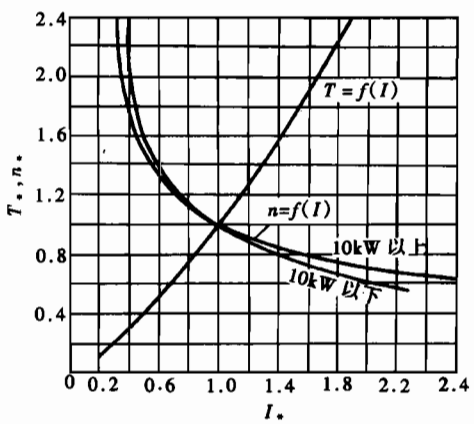


图 17－7　ZZ 系列串励直流电动机的通用特性曲线

（3）变频起动。对大功率同步电动机和大型蓄能电站发电电动机组，可以采用静止变频装置实现平滑起动，其特点是：起动平稳，对电网冲击小；不必考虑对被起动电动机的加强设计；起动装置功率适度，一般只为被起动电动机功率的 5%～25%（视起动时间、飞轮力矩和静阻转矩而异）；几台电动机可公用一套起动装置，较为经济；便于维护。图 17－6 为采用晶闸管变频装置起动大功率同步电动机的原理框图。采用交—直—交电路，通过电流控制实现恒加速起动。当电动机接近同步转速时进行同步协调控制，直至达到同步转速后，通过开关切换使电动机直接投入电网运转。用此方法可起动功率为数千千瓦至数万千瓦的同步电动机或大型蓄能电站发电电动机组。

17.3.2　直流电动机的起动

（1）直流他（并）励电动机的起动。当直流他励电动机作为闭环调速系统的拖动电动机时，通常采用晶闸管调压装置为电枢供电。对于这样的系统，电动机的起动是不成问题的，无需特殊考虑。

直流并励电动机如果采用电枢串电阻分级起动，其计算方法与绕线转子异步电动机转子串电阻分级起动的分析计算方法完全一样。

（2）直流串励电动机串电阻起动。对于直流串励电动机，由于其机械特性为非线性，采用分析法计算较困难，通常多采用图解法，其计算步骤如下：

1）绘制电动机的自然机械特性曲线。根据电动机的特性数据绘制 $I=f(n)$ 特性曲线。如果得不到电动机数据，可采用图 17－7 的通用特性曲线。

2）根据传动装置允许的最大起动电流 I_1，确定电动机电枢回路的总起动电阻

$$R_s=\frac{U_n}{I_1}\quad \Omega \tag{17-14}$$

3）根据已定的起动级数及假定的切换电流 I_2，求出电动机接入总起动电阻时的转速 n_2（图 17－8（b）中的 b 点）

$$n_2=n_1\frac{U_n-I_2R_s}{U_n-I_2r_\Sigma}\quad \text{r/min} \tag{17-15}$$

式中 n_1——自然机械特性曲线上 h 点的转速，r/min；

U_n——外加直流额定电压，V；

r_Σ——电动机电枢回路总内阻，Ω，$r_\Sigma=r_a+r_{cq}$；

r_a——电动机电枢和补偿极以及电刷电阻之和，Ω；

r_{cq}——电动机串励绕组电阻，Ω，$r_{cq}=r_1+r_2+r_3$。

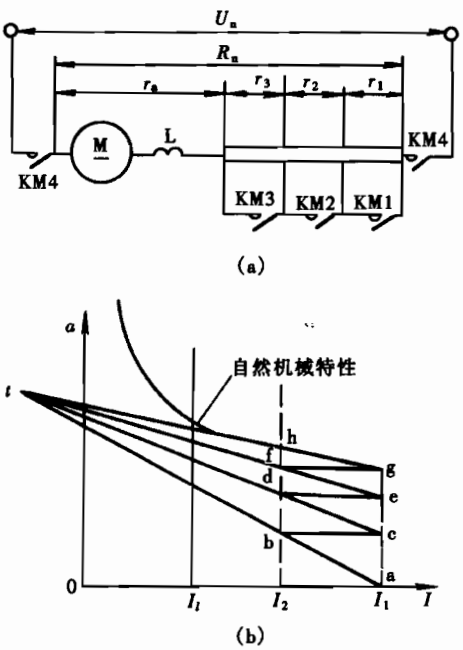


图 17－8　直流串励电动机起动特性

（a）起动电路简图；（b）起动特性

4）根据已定的 I_1 和 I_2 值，在自然机械特性曲线上找出相应的 g 点和 h 点，并在人工机械特性曲线上找出相应的 a 点与 b 点。通过 g、h 点与 a、b 点分别画两条直线交于 t 点。

5）在 I_1 与 I_2 之间绘制三级起动曲线，如果作出的起动特性与自然机械特性的交点正合适，则表明所取的 I_1、I_2 值合适，否则应改变 I_1 值，重新绘制起动特性，直到合适为止。

6）求起动时的外接电阻及各级电阻值

$$R_{st}=R_s-r_n$$

$$\left.\begin{aligned} r_1&=\frac{ac}{ga}R_{st}\quad \Omega\\ r_2&=\frac{ce}{ga}R_{st}\quad \Omega\\ r_3&=\frac{eg}{ga}R_{st}\quad \Omega \end{aligned}\right\} \tag{17-16}$$

式中 R_{st}——起动时外接的总电阻，Ω；

r_1、r_2、r_3——分别为各级的起动电阻值，Ω。

17.3.3　起动的校验

电动机起动的校验可以参考 17.2.5 之（1）、（2）款。

17.4 交、直流电动机调速技术

17.4.1 直流电动机调速技术

直流调速是指人为地或自动地改变直流电动机转速以满足工作机械的要求。从机械特性上看就是通过改变电动机的参数或外加电压等方法来改变电动机的机械特性，从而改变电动机机械特性和工作机械机械特性的交点使电动机的稳定运行速度发生变化。

调速通常通过给定环节、中间放大、校正环节、反馈环节和保护环节等来实现。电动机的转速能自动纠正与给定转速的偏差的调速系统称为开环控制系统。这种调速系统电动机的转速要受到负载波动及电网电压波动等外界扰动的影响。电动机的转速能自动纠正与给定转速的偏差不受负载及电网电压波动等外界扰动的影响，使电动机的转速始终与给定转速保持一致的调速系统称为闭环控制系统。闭环控制系统具有反馈环节。

(1) 调速系统的静态特性。

1) 调速的分类：

a. 无级调速和有级调速。无级调速又称连续调速，指电动机的转速可以平滑地调节。其特点是转速变化均匀适应性强，而且容易实现自动调速，因而在工业中被广泛应用。

有级调速又称间断调速或分级调速，它的转速只有有限的几级，调速范围有限且不容易实现自动调速。

b. 向上调速和向下调速。电动机未作调速时的固有转速，通常就是电动机额定负载时的额定转速，称为基本转速或基速。从基速提高转速的调速称为向上调速。例如直流电动机改变磁通进行调速，其调速极限受电动机的换向条件和机械强度的限制。从基速降低转速的调速称为向下调速。例如，直流电动机改变电枢电压进行调速，调速的极限转速即最低转速，受转速稳定性的限制。

c. 恒转矩调速和恒功率调速。恒转矩调速，对于某些工作机械其负载性质属于恒转矩类型，即在不同的稳定速度下要求电动机的转矩不变。如果所用的调速方法能使电动机的转矩与电动机的电枢电流之比为一常数，则在恒转矩负载下电动机无论在高速或低速下运行，其发热情况始终是一样的，这将能充分利用电动机。这种调速方法称为恒转矩调速。例如保持电动机磁通不变，改变电动机电枢电压或电枢回路串电阻来调速的方法就属于恒转矩调速。

恒功率调速，对于某些工作机械其负载性质属于恒功率类型，即在不同的稳定速度下，要求电动机的功率不变，故要求电动机的转矩与转速成反比。这时如仍采用上述恒转矩调速方法，则在不同转速时电动机电流将不同（与转速成反比），在低速时电动机将过载（电流太大）。因此若仍希望在调速过程中电动机电流不变，就应使电动机的功率与电动机的电枢电流之比为一常数。这种调速方式称为恒功率调速。例如，保持电动机电枢电压不变，改变电动机磁通的调速方法就属于恒功率调速。用恒功率调速去带动具有恒转矩性质的负载是不合理的，在高速时电动机也将会过载。

因此对于恒功率负载，应尽量采用恒功率调速方式；对于恒转矩负载应尽量采用恒转矩调速方式。只有这样，电动机才能得到充分利用。

2) 调速系统的静态指标：

a. 调速范围。生产机械要求电动机能提供的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比叫做调速范围，常用 D 表示，即

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \tag{17-17}$$

式中 n_{max}和 n_{min}一般都指额定负载时的转速。闭环调速系统的调速范围可达 100:1 或更大。

b. 静差率。电动机在某一转速下运行时，负载由理想空载变到额定负载时所产生的转速降落，与额定负载时的转速之比称为静差率（又称转速变化率）s，常用百分数表示，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n} \times 100\% \tag{17-18}$$

式中 n_0——电动机理想空载转速；

n——电动机额定负载时的转速。

闭环调速系统的静差率一般为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$。

c. 稳速精度。在稳速系统中常用稳速精度的概念，即在规定的电网质量和负载扰动的条件下，在规定的运行时间（如 1h 或 8h）内，在某一指定的转速下，t 时间（通常 t 取 1s）内平均转速最大值 n_{max}和另一个 t 时间内平均转速最小值 n_{min}的相对误差的百分值，来表明稳速系统的性能

$$\text{稳速精度} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100\% \tag{17-19}$$

数字稳速系统的稳速精度可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$。

（2）直流电动机的调速方案。

1）直流电动机的调速原理：直流电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_0 + R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \frac{R_0 + R}{C_e C_T \Phi^2} T \tag{17-20}$$

式中 n_0——理想空载转速，$n_0 = U/C_e\Phi$；

U——加在电枢回路上的电压；

Φ——电动机磁通；

R_0——电动机电枢回路的电阻；

R——电动机电枢回路外串电阻；

C_e——电动势常数；

C_T——转矩常数；

T——电动机转矩。

由式（17-20）可知，改变 R、U 及 Φ 中的任何一个参数，都可以改变电动机的机械特性，从而对电动机进行调速。

2）改变电枢回路电阻调速：从式（17-20）可知，当电枢回路串联附加电阻 R 时（见图 17-9），其特性方程式变为

$$n = n_0 - \frac{R_0 + R}{C_e C_T \Phi^2} T \tag{17-21}$$

式中 R_0——电动机电枢电阻；

R——电枢回路串联附加电阻。

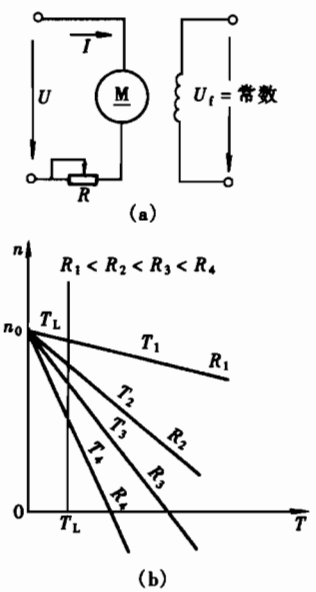


图 17-9 直流电动机电枢回路串联电阻调速图

(a) 电路图；(b) 机械特性

即电动机电枢回路中串联附加电阻时特性的斜率增加。在一定负载转矩下，电动机的转速下降增加，因而电动机的实际转速降低了。图 17-9 所示为附加电阻值不同时的一组特殊曲线。如果负载转矩 T_L 为

常数，则

$$n = n_0 - \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R_0 - \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R = A - BR \tag{17-22}$$

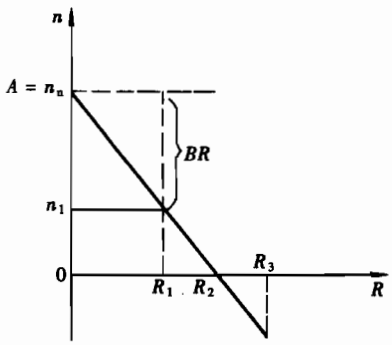


图 17-10　电枢串联电阻时的调速特性

式中　$A = n_0 - \dfrac{T_L}{C_e C_T \Phi^2} R_0$

$$B = \frac{T_L}{C_e C_T \Phi^2}$$

式（17-22）表明了控制量 R 与被控制量 n 之间的关系，其特性如图 17-10 所示。

由图 17-10 可知，当 $R=0$ 时，电动机工作在额定转速 n_n（当外加电压及励磁电流均为额定值时）；当 $R=R_1$ 时，转速为 n_1，并且 $n_1 < n_n$；当 $R=R_2$ 时，电动机堵转（$n=0$），这时

$$R_2 = \frac{U}{I_L} - R_0 \tag{17-23}$$

式中　I_L——产生足以平衡负载转矩 T_L 所需要的电流，$I_L = \dfrac{T_L}{C_T \Phi}$。　(17-24)

当 $R > R_2$ 时，转速变为负值，即电动机将要反转，这种情况称为负载倒拉反转制动（如为了平稳而缓慢地下放重物）。这时可以加大 R，使电动机产生的转矩小于 T_L，电动机减速，直到停止，在重物的作用下电动机又反向转动，重物以低速下放。但要注意，这时不能断开电动机的电源，否则由于没有电动机的制动转矩，会使重物越降越快，容易发生事故。

用这种方法调速，因其机械特性变软，系统转速受负载的影响较大，轻载时达不到调速的目的，重载时还会产生堵转；而且在串联电阻中流过的是电枢电流，长期运行损耗也大，所以在使用上有一定的局限性。

电枢回路串电阻的调速方法，属于恒转矩调速，并且只能在需要向下调速时使用。在工业生产中，小容量时，可串联一台手动或电动变阻器来调速；容量较大时，多用继电器—接触器系统来切换电枢串联电阻，故属于有级调速。

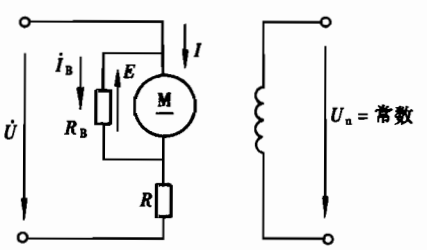


图 17-11　电枢回路串并联电阻的调速电路

由于电枢回路中串电阻调速，其特性很软，故在实践中还有一种在电枢回路中串并联电阻的调速方法，其电路如图 17-11 所示。

这时电动机的机械特性方程式为

$$n = Kn_0 - \frac{R_0 + KR}{C_e C_T \Phi^2} T \tag{17-25}$$

式中　K——系数，$K = R_B/(R_B + R)$；

R_B——与电枢并联的电阻；

R——与电枢串联的电阻。

由式（17-25）可见，串并联电阻后，理想空载转速降低了（$K<1$），机械特性的斜率较只串电阻时的小，如图 17-12 所示。

3）改变电枢电压调速：当改变电枢电压时，理想空载转速 n_0 也将改变，但机械特性的斜率不变，这时机械特性方程为

$$n = \frac{U'}{C_e\Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n'_0 - K_m T \tag{17-26}$$

式中 U'——改变后的电枢电压；

n'_0——改变电压后的理想空载转速，$n'_0 = U'/C_e\Phi$；

K_m——特性曲线的斜率，$K_m = R/(C_e C_T \Phi^2)$。

其特性曲线是一族以 U' 为参数的平行直线，见图 17－13。由图 17－13 可见，在整个调速范围内均有较大的硬度，在允许的转速变化率范围内可获得较低的稳定转速。这种调速方式的调速范围较宽，一般可达 10～12，如果采用闭环控制系统，调速范围可达几百至几千。

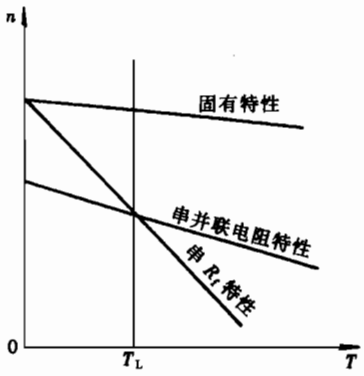


图 17－12 电枢回路串并联电阻后的机械特性

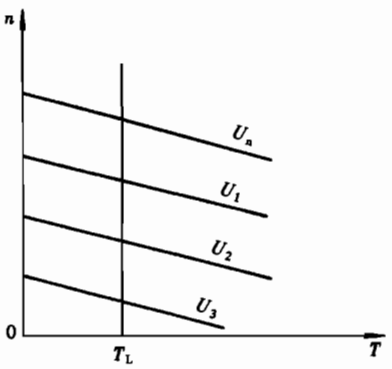


图 17－13 改变电枢电压调速时的机械特性

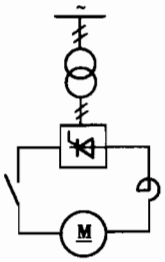
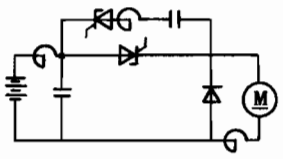
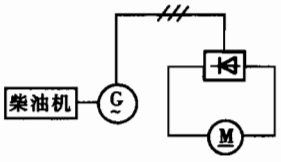
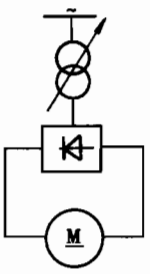
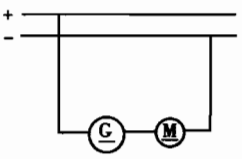
改变电枢电压调速方式属于恒转矩调速，并在空载或负载转矩时也能得到稳定转速，通过电压正反向变化，还能使电动机平滑地起动和四个象限工作，实现回馈制动。这种调速方式控制功率较小，效率较高，配上各种调节器可组成性能指标较高的调速系统，因而在工业中得到了广泛的应用。

为了改变电动机的电枢电压，需要有独立的可调压的电源，一般采用的有直流发电机、晶闸管变流器和各种电力电子器件构成的直流电源等，采用不同电源的各种方案比较见表 17－11。

表 17－11　　直流电动机改变电压调速的方法

变压方法	原理电路	装置组成	性能及适用场合
电动机—发电机组（旋转变流机组）	~ M 3～ — G — M	原动机可用同步电动机、绕线转子异步电动机（包括带飞轮和转差调节的机组）、笼型异步电动机、柴油机等。励磁方式有励磁机、电机扩大机、磁放大器和晶闸管励磁装置等。控制方式有继电器—接触器、磁放大器和半导体控制装置等	输出电流无脉动，带飞轮的机组对冲击负载有缓冲作用，采用同步电动机的机组能提供无功功率，改善功率因数。 因为有旋转机组，效率较低，噪声、振动大。继电器—接触器和电机扩大机控制时，控制功率大，构成闭环系统一般动态指标较差，用晶闸管励磁可提高动态指标。此种方法已很少采用

续表

变压方法	原理电路	装置组成	性能及适用场合
晶闸管变流器		包括变流变压器、晶闸管变流装置、平波电抗器和半导体控制装置等	效率高，噪声、振动小，控制功率小，构成闭环系统动态指标好。但输出电流有脉动，深控时功率因数低，对电网的冲击和高次谐波影响大
直流斩波器		包括晶闸管（或其他电力电子器件）、换相电感电容、输入滤波电感电容及半导体控制装置等	适用于由公共直流电源或蓄电池及恒定电压直流电源供电的场合，如电机车、蓄电池车等电动车辆
柴油交流发电机—硅整流器		柴油交流发电机、硅整流装置及相应的控制装置等	改变交流发电机电压，经硅整流装置整流得到可变直流电压，用于电动轮车等独立电源场合
交流调压器、硅整流器		调压变压器、硅整流装置等	效率高，噪声、振动小，输出电流脉动较小，比晶闸管供电功率因数有改善，但实现自动调速较困难。适用于不经常调速的小功率（＜15kW）手动开环控制场合
升压机组		与公共直流电源串联的直流发电机或晶闸管变流装置及相应的控制装置	适用于公共直流电源供电场合，设备较经济，但调速范围不大

4）改变磁通调速：在电动机励磁回路中，改变其串联电阻 R_f 的大小，见图 17－14（a），或采用专门的励磁调节器来控制励磁电压，见图 17－14（b），都可以改变励磁电流和磁通。这时电动机的电枢电压通常保持为额定值 U_n，因为

$$n=\frac{U_n}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_eC_T\Phi^2}T=\frac{U_n}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_e\Phi}I \tag{17-27}$$

所以，理想空载转速（$U_n/C_e\Phi$）与磁通（Φ）成反比；电动机机械特性的斜率与磁通

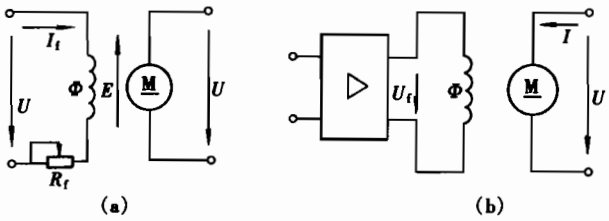


图 17－14　直流电动机改变磁通的调速电路

(a) 励磁回路串联电阻调速；(b) 用放大器控制励磁电压调速

的二次方成反比。此时，转矩和电流与转速的关系见图 17－15。

在调速过程中，为使电动机容量得到充分利用，应该使电枢电流一直保持在额定电流 I_n 不变，见图 17－15（b）中垂直虚线。这时，$\Phi \propto 1/n$，由于 $T = C_T \Phi I \propto \Phi$，因此磁通与转速成双曲线关系，即 $T \propto 1/n$，见图 17－15（a）中的虚线。在虚线左边各点工作时，电动机没有得到充分利用；在虚线右边各点工作时，电动机过载，不能长期工作。因此，改变磁通调速适合于带恒功率负载，即属于恒功率调速。

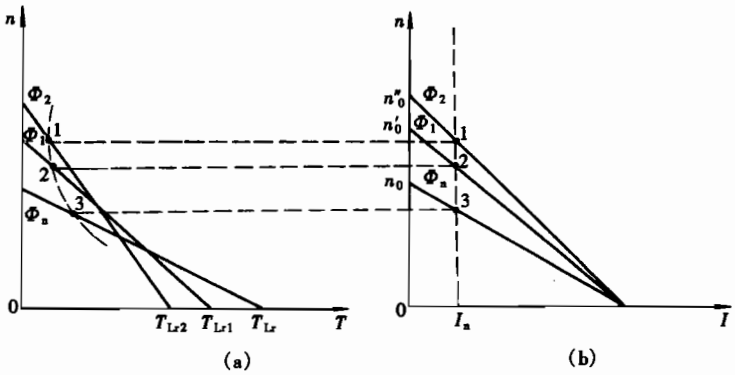


图 17－15　调磁通时 $n = f(T)$ 与 $n = f(I)$ 曲线

(a) $n = f(T)$ 曲线；(b) $n = f(I)$ 曲线

采用改变励磁进行调速时，在高速下由于电枢电流去磁作用增大，使转速特性变得不稳定，换向性能也会下降。因此，采用这种方法的调速范围很有限。无换向极电动机的调速范围为基速的 1.5 倍左右，有换向极电动机的调速范围为基速的 3～4 倍，有补偿绕组电动机的调速范围为基速的 4～5 倍。

三种调速方式的性能比较见表 17－12。

表 17－12　　调速方式的性能比较

调速方式和方法		控制装置	调速范围	转速变化率	平滑性	动态性能	恒转矩或恒功率	效率
改变电枢电阻	串电枢电阻	变阻器或接触器、电阻器	2:1	低速时大	用变阻器较好，用接触器和电阻器较差	无自动调节能力	恒转矩	低

续表

调速方式和方法		控制装置	调速范围	转速变化率	平滑性	动态性能	恒转矩或恒功率	效率
改变电枢电压	电动机—发电机组	发电机组或电动机扩大机（磁放大器）	1:10～1:20	小	好	较好	恒转矩	60%～70%
	静止变流器	晶闸管变流器	1:50～1:100	小	好	好	恒转矩	80%～90%
	斩波器（脉冲调制）	晶体管或晶闸管开关电路	1:50～1:100	小	好	好	恒转矩	80%～90%
改变磁通	串联电阻或用可变直流电源	直流电源变阻器	1:3～1:5	较大	较好	差	恒功率	80%～90%
		电动机扩大机或磁放大器			好	较好		
		晶闸管变流器				好		

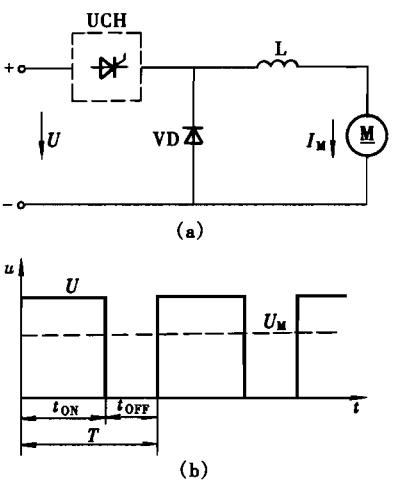


图 17－16　简单的斩波器调速系统
（a）系统结构；（b）斩波后波形

（3）电动机—发电机组调速系统。该系统采用电动机—发电机组作为直流电源，其能量经过两次转换，运行效率较低。随着电力电子变流设备的发展，该方案已很少采用，趋于淘汰，本文不予介绍。

（4）斩波器调速系统。斩波器是一种电力电子开关，它能从恒定的直流电源产生出经过斩波的可变直流电压，从而达到调速的目的。图 17－16 示出了一个简单的斩波器调速系统和斩波后的电压波形。

在图 17－16（a）中，UCH 是斩波器，E 是一个恒压的直流电源，VD 是续流二极管，L 是平波电抗器。在 t_{ON}期间内 UCH 导通，电源 E 和直流电动机 M 接通；在 t_{OFF}期间内 UCH 关断，电动机电枢电流 I_M 经 VD 流通。加在电动机 M 上的平均电压为

$$U_M = U\frac{t_{ON}}{t_{ON}+t_{OFF}} = U\frac{t_{ON}}{T} = \alpha U \qquad (17-28)$$

式中　t_{ON}——导通时间；

t_{OFF}——关断时间；

U——恒压电源电压值；

T——斩波周期，$T = t_{ON} + t_{OFF}$；

α——工作率，$\alpha = t_{ON}/T$。

由式（17－28）可知，改变 α 就可以改变 U_M，从而实现对直流电动机的调压调速。α 的改变可以有以下两种方法：

1）恒频系统。T 保持不变（即频率不变），只改变 t_{ON}，即脉宽调制（PWM）方式。

2）变频系统。改变 T（即改变频率），但同时保持 t_{ON}不变或者保持 t_{OFF}不变，即频率调制（FM）方式。

变频系统的频率变化范围必须与调压（即调速）范围相适应。因而在调压范围较大时，频率变化范围也必须大，这就给滤波器的设计带来困难，同时对信号传输和通信的干扰可能性也加大。另外，在输出电压很低时，其频率也低，较长的关断时间容易使电动机电流断续。所以，斩波器调速应优先选用恒频系统。

图 17－16（a）所示的调速系统只有一个斩波器，电动机只能在一个象限内运行（电动运行）。若需要制动或可逆运行，必须采用两个或更多的斩波器。图 17－17 示出了可以多象限运行的斩波器调速系统。

在图 17－17（a）的系统中用了两个斩波器 UCH1 和 UCH2。当 UCH1 和 VD2 参与工作时，电动机 M 为电动运行（工作在第一象限）；当 UCH2 和 VD1 参与工作时，电动机 M 为再生制动运行（工作在第二象限）。

而在图 17－17（b）的系统中用了四个斩波器 UCH1～UCH4，当 UCH4 始终导通 UCH3 总是关断的情况下，UCH1 和 UCH2 的工作将使电动机可以在第一和第二象限内工作，即电动机正转而电流可逆；当 UCH2 始终导通而 UCH1 总是关断的情况下，UCH3 和 UCH4 的工作将使电动机可以在第三和第四象限工作，即电动机反转而电流可逆。

斩波器通常由晶闸管与相应的换相电路组成。由于晶闸管具有必须首先将电流降到零，然后才能被关断的特性，所以其换相电路比较复杂，功率消耗也大，在一定程度上限制了斩波器调速的应用范围。近年来，由于 GTO 晶闸管、IGBT 等新型电力电子器件的出现和应用，使换相电路大为简化，功耗也大大降低，从而扩大了斩波器调速的应用范围。

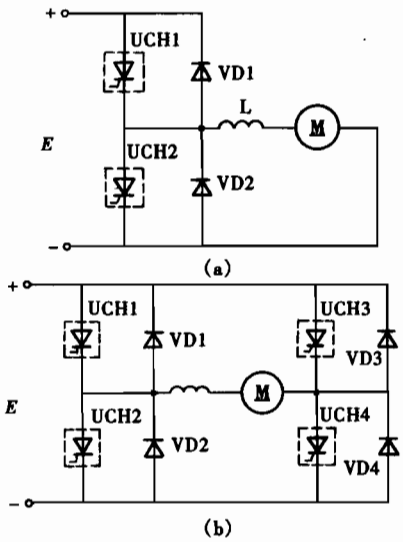


图 17－17　多象限运行的斩波器调速系统

(a) 二象限运行；(b) 四回象限运行

斩波器调速的缺点是电流中有谐波分量，会对电网产生不良影响，另外，在电流小时容易产生电流断续现象，电流断续会对电动机的运行带来不良影响。因此，在实际应用中要注意采取适当的谐波抑制和滤波的措施。

(5) 晶闸管变流器调压调速系统。晶闸管变流器供电的直流调速系统，已广泛地用于要求控制性能好的调速系统中。它和使用电动机—发电机组供电的系统相比，控制性能好，效率高，而且是静止装置，因而调试和维修方便。图 17－18 所示是一个典型的晶闸管变流器控制的直流电动机不可逆调速。

该系统中包括两个环，内环是电流控制环，外环是转速控制环。每个环都含有一个调节器（速度调节器 ASR 及电流调节器 ACR），它们是比例—积分（PI）环节或比例—积分—微分（PID）环节，用来综合输入和反馈信号改善系统的静态和动态特性。

当电网或电动机负载发生变化或有其他扰动时，通过转速控制环，系统能起自动调节和稳定的作用。

电流控制环在系统中是一个从属环。速度调节器的输出作为电流调节器的给定值，速度调节器输出的最大值，通常和系统允许的最大工作电流值相适应。从而在突加给定时，起动电流保持在最大值，并使系统有最大的加速度，起动时间最短。由于电流控制环中不包括电

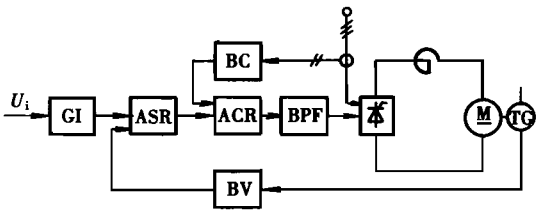


图 17－18　不可逆双环调速系统

GI—给定积分器；ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；BPF—触发器；BV—速度变换器；BC—电流变换器；TG—测速发电机

动机机械惯量，因此，其快速性较好。当电网电压突变或机械负载突变时，能迅速实施控制，恢复时间较短；当负载电流超过允许最大电流时，电流调节器使变流器的输出迅速下降，起到了限流保护作用。

图 17－18 中 GI 为给定积分器，其输出电压是按一定速率变化的电压，用于要求有恒定加减速度的场合。

在不可逆系统中，由于晶闸管整流桥只能在一个方向导电，故在制动时不能提供制动转矩，只能靠摩擦阻力或机械负载转矩制动。如果要加快制动，可以在电动机主回路中加入动力制动环节。

对调速范围要求较低的场合，可用电压负反馈或电动势负反馈代替转速负反馈来构成自动调速系统。

（6）调压调磁控制系统。在很多应用场合，为了进一步扩大调速范围，除采用调压调速外，同时还采用弱磁调速。为此，需要将调压与调磁两者结合起来，并能在两种调速方式的分界线上（基速）实行自动切换。图 17－19 所示为同时采用两种调速方法时在整个调速范围内的电动机的调速特性。

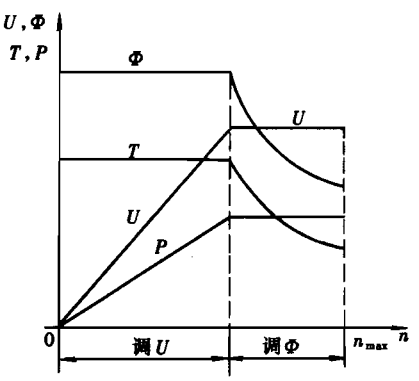


图 17－19　调压与调磁时电动机的调速特性

1）调压调磁独立控制系统。所谓独立控制系统，是指在这种系统中电动机的励磁不受电枢电压的控制。这种方案一般多用在由直流发电机供电的晶闸管励磁系统中，本文不予介绍。

2）调压调磁非独立控制系统。在非独立控制系统中，电动机的励磁与其电枢电压之间有一定的联系，并受电枢电压的控制。图 17－20（a）是一个非独立控制系统的例子。

在基速以下，电动机的调速是用恒磁调压来实现的，在基速以上的调速，则是用恒压调磁来实现的。系统的给定信号是统一的，从调压到调磁的转换是通过由两个二极管 VD1、VD2 组成的比较器自动进行切换的。磁通调节器的给定值为一个恒定的电压，而它的反馈则有两路：一路是代表电动机励磁磁通的反馈电压；另一路是代表电动机反电动势的反馈电压（也可用电压反馈代替）。它们之间通过比较器（也称极大值选择）进行比较后，自动取其较大的一个作为励磁调节器的反馈值。起动时，由于电动机的反电动势近似为零，故电动机励磁调节系统在给定信号的作用下，很快建立起励磁电流，经过磁通变换器后，反馈电压也很快上升，使二极管 VD1 导通，励磁调节器自动调节电动机的励磁电流，使之维持在额定值不变。在基速以下，电动势反馈电压始终小于励磁电流反馈电压（$U_{fE} < U_{f\Phi}$），故一直维持 VD1 导通、VD2 截止状态。当速度给定增大，要求电动机在基速以上运行时，$U_{fE} > U_{f\Phi}$，VD1 截止，VD2 导通，此时磁通调节器的给定信号和 U_{fE} 进行比较，故磁通调节器实际上已作为一个电动机电动势调节器进行工作，保持电动机反电动势不变，而电动机转速则由速度

调节器进行调节。转速反馈电压随给定值的增大而相应增加。因为 $E_M = C_e\Phi_e n$，故电动机的磁通（即励磁电流）将随电动机转速的升高而下降，以维持反电动势恒定。因此，调磁调速通常都是弱磁升速。一般整定弱磁升速的开始点为95%额定电动势，到100%额定电动势时完成弱磁升速过程。

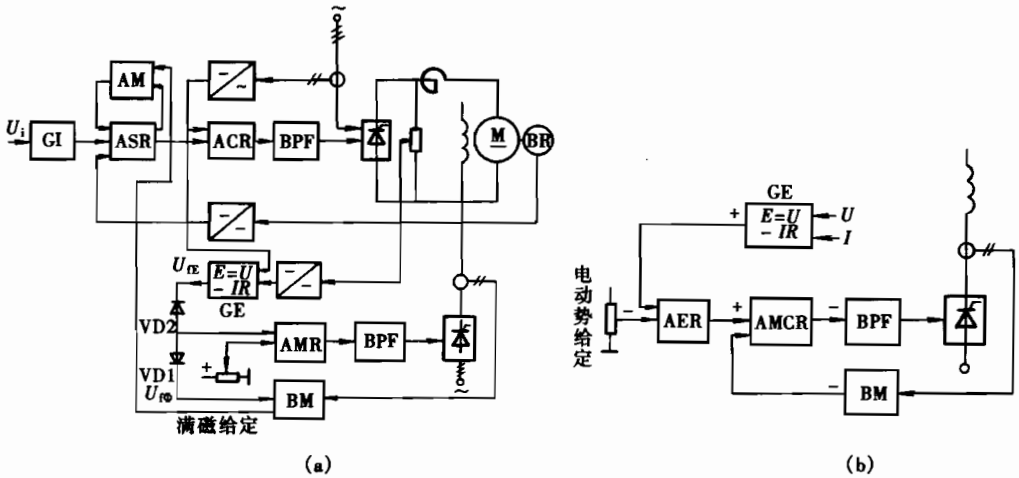


图 17－20　调压调磁非独立控制系统

（a）用比较器的系统；（b）用电动势调节器的系统

GI—给定积分器；ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；AM—乘法器；AMR—磁通调节器；BM—磁通变换器；GE—电动势运算器；AER—电动势调节器；AMCR—励磁电流调节器；BPF—触发器；BR—测速装置

弱磁后由于电动机磁通减小，使电动机的机电时间常数 T 发生变化，即转速调节器的调节对象的参数发生变化。为了适应这种变化，在速度调节器的反馈回路中串入乘法器AM，AM的输入信号为磁通实际值（从BM得到）和电枢电流给定值（从ASR输出得到），这样，速度调节器的动态放大系数随磁通的减小也作相应的变化，以补偿 T_M 变化的影响，使系统在满磁和弱磁时都具有相同的动态性能。

自动弱磁也可以采用图17－20（b）所示的方案，即基速以下电动势给定值大于电动势运算器的输出值，电动势调节器AER处于饱和状态，其输出限幅值就是满磁给定值，并加到励磁电流调节器AMCR上，靠AMCR来保证额定励磁电流不变。当电动机转速升高到95%基速时，GE的输出增加到使AER退出饱和，从而减小了励磁电流的给定值，实现弱磁调速。在弱磁阶段内，电动势环起调节作用。只要电动机的转速还没有达到给定值，电枢电流中仍存在加速电流分量，电动机反电动势就要上升；再经过AER的作用，使励磁电流继续减小，使转速继续上升，同时维持电动势恒定，直到转速与给定值相同为止。这种系统比前者多用了一个调节器，但电动势和励磁电流可以分别控制，容易调整。目前工程上大多采用此种调速方案。

（7）晶闸管供电可逆调速系统。很多生产机械要求其传动电动机能在两个方向旋转，并能产生两个方向的转矩。因此，要求电动机的电枢电压（或励磁电流）、电枢电流必须能在两个方向工作。但晶闸管只能单方向流过电流，因此，要满足上述要求，就要正反向各设一套整流器组成双变流器连接，或通过开关切换电动机与整流器的连接来实现。这时电动机就能在四个象限内工作，如图17－21所示。

所谓一象限运行，就是指在①或③象限运行。这时，只能整流运行，而不能靠逆变进行

制动。因此，一象限运行亦可采用半控桥式整流连接。一象限运行时，电动机的电流和转速都不能反向。

所谓两象限运行，就是在①和④象限，或②和③象限内运行。这时应采用可以逆变的单变流器连接。在图 17－22 中，当卷扬机提升重物时，电动机工作在电动状态，变流器整流运行；下放重物时，即使不向电动机提供能量，在重物作用下亦能自行下放。为了制动，电动机应工作在发电状态，变流器逆变运行，但变流器电流方向不变。两象限运行时，电动机的转速可逆，但电流不可逆。

图 17－21　四象限运行工作图

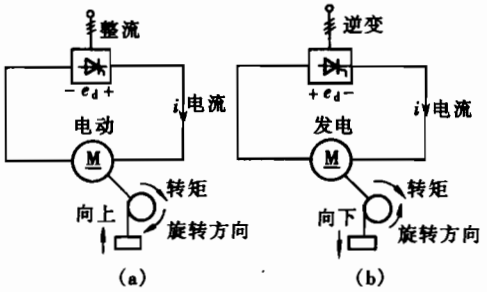


图 17－22　两象限运行工作图

所谓四象限运行，就是可以在所有四个象限内工作，电动机的转速与电流都可逆。直流电动机可逆方式的比较见表 17－13。

表 17－13　　直流电动机可逆方式的比较

比较项目	电枢用一套变流装置 开关切换	电枢用一套变流装置 磁场反向	电枢用两套变流装置 电枢反向
设　备	1. 电枢变流装置一套 2. 电枢回路切换开关 3. 切换逻辑	1. 电枢变流装置一套 2. 励磁变流装置两套 3. 切换逻辑	1. 电枢变流装置两套 2. 无环流切换逻辑或环流电抗器
性　能	有触点开关快速性差，正反转开关切换死区时间为 0.2～0.5s，减速时开关要切换两次采用晶闸管开关可将切换死区时间减少到 0.1s	快速性差，正反转磁通反向时间为几百毫秒到 1s，减速时磁通要切换两次	快速性好，切换死区时间零到几十毫秒
可靠性	主回路不产生环流，有触点开关，维护工作量大，寿命低	主回路不产生环流，无触点切换，要求有可靠的可逆励磁回路	要求触发器、逻辑切换可靠及抗干扰能力强
投　资	系统简单，投资少	系统复杂，但投资较少	系统较简单，但投资大
适用场合	正反转调速不频繁，受开关容量限制，一般在几十千瓦以下，如起重机等	正反转调速不频繁，对调速精度要求不高，容量为几十到几千千瓦，如卷扬机等	正反转调速频繁，容量从几到几千千瓦，如轧机主、辅传动，可逆运转机床等

1）电枢用一套晶闸管整流装置供电，用有触点开关切换的可逆系统。电枢用一套晶闸管整流器供电，由接触器切换的系统如图 17－23 所示。该系统采用了带电流内环的转速调节双环系统，并设了一个指令单元，它可根据调节回路所需要的电流及转矩方向（ASR 输出电压的正或负）来控制相应的方向接触器（KMF、KMR）。在切换期间，电枢电流应为零。为防止切换后电流冲击，指令单元在发出切换信号的同时，应向电流调节器 ACR 输入一个 β_{min} 信号，该信号通过 ACR 将触发脉冲推到最小 β 处。由于只用一套整流装置，电流方向不能改变，故无论正向或反向工作，加到 ACR 的给定信号的极性亦应不变。为此，系统还设有反号器和切换单元，使电流给定信号的极性与速度调节器 ASR 输出信号的极性无关。系统的切换过程如图 17－24 所示。其过程如下：在 t_1 时刻，速度给定信号改变，因而 ASR 输出极性改变，同时给电流调节器 ACR 输入一个 β_{min} 信号，使触发脉冲移至逆变区域。在 $t_1 \sim t_2$ 期间内，电流快速降低，到 t_2 时电流为零。在 t_2 时刻，接触器 KMF 断开。在 t_3 时刻，接触器 KMR 接通。在 $t_4 \sim t_5$ 时间内，先解除推 β 信号，使 ASR 和触发脉冲恢复正常工作（t_4 时刻），然后电动机开始制动，直到反向稳定运转（t_5 时刻）。

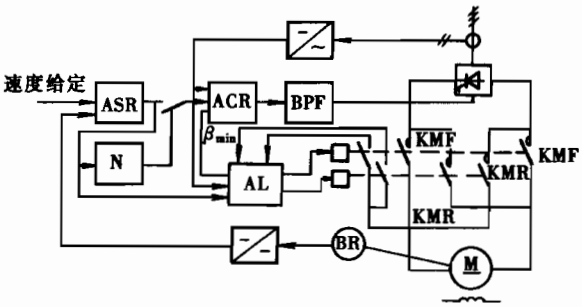


图 17－23　电枢用切换开关反向的可逆系统
N—反号器；AL—逻辑装置；ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；BPF—触发器；BR—测速装置

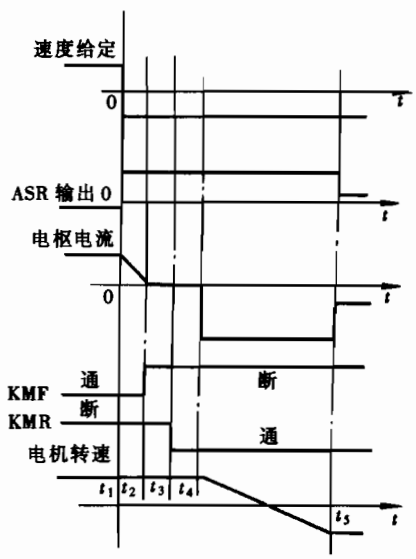


图 17－24　正向到反向的切换过程
t_1—给出反转信号；t_2—电枢电流到零，正向接触器断开；t_3—反向接触器闭合；t_4—解除封锁，电动机开始制动和反向起动；t_5—电动机反向稳定运转

这种系统利用了接触器触头切换，维护工作量大，寿命较短，切换零电流死区约为 0.2～0.5s 亦较大，适用于小功率、不需要频繁切换的场合，目前已很少使用。

2）电枢用一套晶闸管整流器供电的磁场反向可逆系统。图 17－25 是一种磁场反向的可逆调速系统，电动机电枢回路由带有电流内环的单方向转速系统的晶闸管整流器供电，励磁回路用两套晶闸管整流器组成的可逆系统供电。

磁场可逆系统的特点是，电动机的反转或降速是用改变其励磁电流的方向，使电动机产生制动转矩来实现的。因此，在励磁电流反向期间，制动转矩很小，使系统的响应很慢。特别是在电动机降速（不反转）的场合，电动机的励磁电流先要从正向到反向切换一次。当转速降到所要求的转速时，电动机的励磁电流又要从反向到正向再切换一次。磁场要切换两次，响应更慢。

因为励磁绕组时间常数很大，为了缩短转矩反向时间，需要对励磁绕组加一个很大的强励电压，一般为 3～5 倍额定励磁电压。

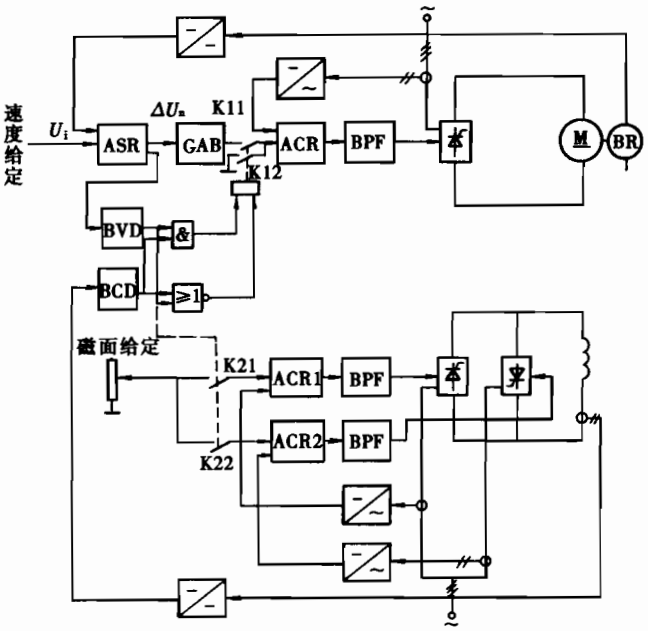


图 17－25　磁场反向的可逆调速系统

ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；BVD—速度偏差极性鉴别器；
BCD—磁场电流极性鉴别器；ACR1、ACR2—励磁电流调节器；
GAB—绝对值发生器；BPF—触发器

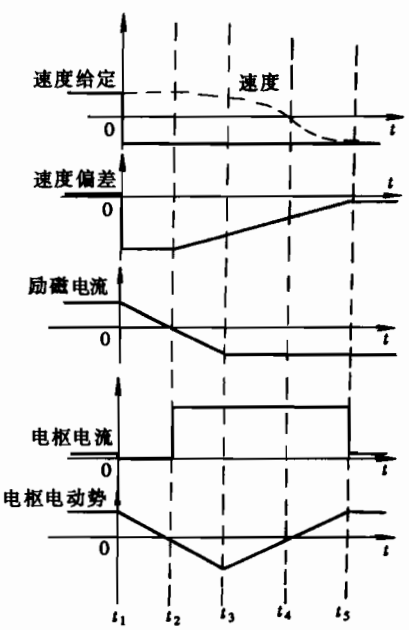


图 17－26　磁场反向的反转过程图

在磁场反向系统中，电枢回路只有一组整流器，电枢电流不可逆。因此，作为 ACR 给定值的 ASR 输出信号，通过一个绝对值发生器 GAB 后再供给 ACR，不管速度偏差 ΔU_n 的极性如何变化，GAB 的输出极性始终不变。

在 ΔU_n 的极性改变后，直到磁场电流反向以前的这一段时间内，应使电动机电枢电流立即降到零，否则就会在弱磁过程中，因为存在电枢电流，产生转矩，使电动机转速上升。因此，在系统中设了一套逻辑电路，包括 BVD、BCD 以及或非门和与门。当速度偏差极性与励磁电流极性一致时，逻辑电路与门的输出为“1”，K11 闭合，允许电枢电流指令加入。如果不一致，与门输出为“0”，K12 闭合，K11 断开，使电流给定为零，电流很快减到零。

电动机从正基速到负基速的反向过程如图 17－26 所示。

a. 改变速度给定指令电压 U_i，使之从正到负（t_1 时刻），使速度偏差极性鉴别器 BVD 输出变为负值（“0”态）。这时励磁电流仍为正值，磁场电流极性鉴别器 BCD 输出仍为正值（“1”态），使逻辑电路给出电枢电流为零的指令，

K11 断开，K12 闭合，电枢电流快速降到零。同时，因为 K21 断开，K22 闭合，励磁电流给定电压的极性也反向，励磁电流开始反向。

b. 在 $t_1 \sim t_2$ 时间内，励磁装置产生最大的反向强迫励磁电压，励磁电流快速减小到 t_2 时刻，励磁电流降低到零。

c. 在 $t_2 \sim t_3$ 时间内，励磁电流过零后向负方向增加，励磁电流变负。这时速度偏差的极性与励磁电流的方向一致，逻辑电路使 K12 断开，K11 闭合。电枢电流由 ASR 的输出决定，为最大值。电动机的制动转矩随励磁电流在反方向增加而增大，直到 t_3 时才不变。

d. 在 $t_3 \sim t_4$ 时间内，电动机在制动力矩的作用下，转速降低到零为止。

e. 在 $t_4 \sim t_5$ 时间内，电动机反向加速直到给定值，整个反向过程结束。

在 $t_2 \sim t_4$ 期间，由于电动机电动势反向，电动机处于发电运行状态，电枢回路可控整流器处于逆变状态，将能量返回电网。

磁场反向可逆系统的主要优点是，可省去一套电枢回路的变流装置，投资较少，但系统快速性差，磁场反向时间需要几百毫秒到 1s。因此，一般只用在正反转调速不频繁或调速精度要求不高的场合，容量范围从几十到几千千瓦。

3）电枢用两套晶闸管整流装置供电的可逆系统：通常两套晶闸管整流装置有反并联连接、交叉连接和直接反并联连接三种方式。其中，反并联连接如图 17－27 所示。它是将两组整流器反向并联，交流侧接在同一个变压器二次绕组上，可以向电动机提供可逆的电枢电流。

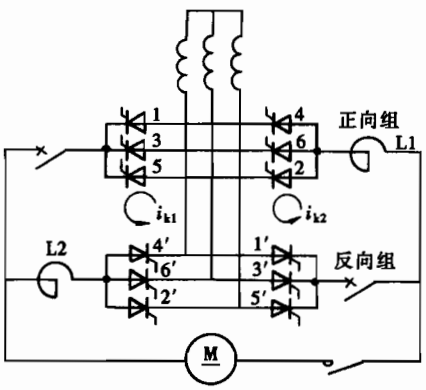


图 17－27　反并联可逆电路

按照是否有环流，可分为有环流和无环流两种方式。在有环流方式时，若一组整流器处于整流状态时，另一组则处于逆变状态，但两组的输出电压平均值相等。当整流器输出电压比电动机反电动势高时，电动机处于电动状态；若电动机反电动势比整流器输出电压高时，电动机就向处于逆变状态的整流器提供功率，电动机再生制动。尽管整流组和逆变组的电压平均值相等，但它们的瞬时值并不相等，因而在晶闸管 1、3、5 和 2′、4′、6′构成一个环流回路，在晶闸管 2、4、6 和 1′、3′、5′构成另一个环流回路。在无环流方式时，在任何情况下只允许一组整流器工作，而另一组必须被封锁，或者把另一组的触发脉冲移到不可能出现环流的区域内，因而不出现环流。

这种线路的特点如下：

a. 由于正反两组整流器都用同一台变压器供电，所以变压器的利用率最高。

b. 由于有两个环流回路，至少需要两台电抗器。电抗器除了能限制环流外，还应在正常工作时满足电动机允许的最小电流连续程度和纹波的要求，并且在故障时能限制电流上升率，使直流快速断路器在快速熔断器熔断前先跳闸。

c. 反并联的两组整流器接在同一台变压器的二次绕组上，相互之间有影响。特别是在作为有环流电路运行时影响更大，可靠性较差。

这种方案一般都用在无环流可逆线路中。对于有环流可逆系统，一般不采用这种电路，

而采用交叉连接方式。

交叉连接是将两组整流器分别由一台变压器的两个二次绕组供电的，如图 17－28 所示。

交叉连接可逆电路的特点如下：

a. 由于有环流及变压器有两个二次绕组，故变压器的利用率较低，初期投资较大。

b. 由于只有一个环流回路，故可用一台空心电抗器或两台铁芯电抗器限制环流。这种电路的环流比反并联线路的小，因而电抗器的体积亦小。

c. 环流要通过四个晶闸管，而且只有一个环流回路，不像反并联线路那样两桥之间相互有影响，因此，可靠性较高。

直接反并联是将正反向两个晶闸管压在一套散热器上，组成一个可逆单元后再组成一个直接反并联系统，如图 17－29 所示。这种系统只能采用无环流控制方式。

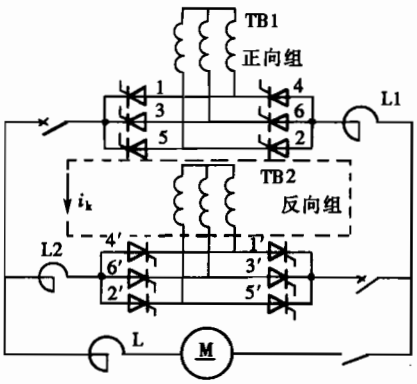


图 17－28　交叉连接可逆电路图

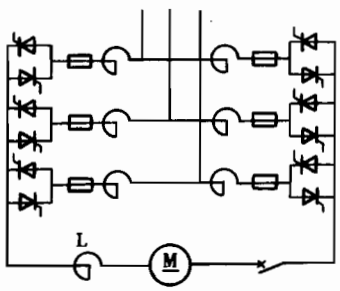


图 17－29　直接反并联可逆电路

直接反并联可逆电路的特点如下：

a. 由于正反向器件不同时导电，因此，散热器的体积增加不多，从而缩小了装置的体积。

b. 正反向组共用一个桥臂电抗器和快速熔断器，可节约成本。

c. 由于主回路只用一台直流电抗器和一台直流快速断路器，因而使主回路得到简化。

这种可逆方式是优先采用的方式。

4）逻辑无环流可逆系统：逻辑无环流可逆系统是指在电动机运行过程中，通过一个逻辑单元选择某一组变流器投入工作，另一组被封锁，两组反并联连接的变流器之间完全没有环流的可逆系统。图 17－30 所示是一种带模拟开关的逻辑无环流系统。系统正向工作时 U_i 为负，ASR 输出为正，一路送到 AL 的转矩极性鉴别器，使 AL 切换，模拟开关 K11 和 K12 闭合；另一路经 K11 送到电流调节器 ACR 的输入端，ACR 的输出为负，正向组脉冲向 α 方向移动小于 90°，电动机正转。

变流器的切换是在电动机转矩的极性需要反向时进行的，其切换顺序如下：

a. 改变给定电压 U_i，使其极性为正，或由于负载转矩变化引起电动机转矩变化，使 ASR 输出变负，并通过 ACR 使工作组处于逆变状态。

b. 逻辑装置接受转矩变化的指令。

c. 工作组电流下降到零，逻辑装置的零电流检测器确认电流实际值为零，断开 K11、

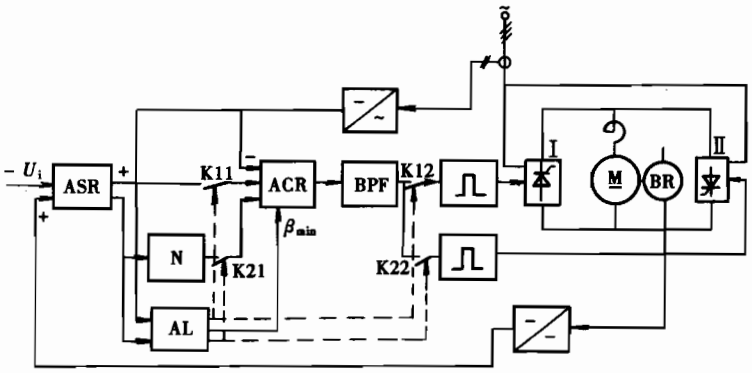


图 17－30　带模拟开关的逻辑无环流系统

ASR—速度调节器；ACR—电流调节器；N—反号器；AL—逻辑单元

K12。

d. 正向触发脉冲被封锁。

e. 经过一段延时，K21、K22 接通，反向组有触发脉冲，同时 ASR 输出通过 N 送到 ACR，使反向组变流器工作在逆变状态，电动机进行再生制动。

为了保证系统的性能，应尽量缩短切换时间。在切换时间中，电流换向死时占主要成分。一般该死时在 10ms 以下时，不会对系统的性能有影响；当死时在 20～30ms 之内时，对系统的动态性能稍有影响；当死时超过 30ms 很多时，将对系统的性能有较大的影响。

在切换时还应保证不发生换相失败，两组变流器在任何时刻都不能同时工作。因此，在逻辑无环流系统中还要注意以下几点：

a. 对于电流实际值为零的检测，要有足够的关断等待时间。在确认电流确实为零时，才能切除工作组的触发脉冲。如果在还有电流的状态下，而且工作组正处于逆变状态，这时若将工作组的触发脉冲切除，会引起换相失败。因此，在零电流检测器动作后，必须经过一定的延时才能关断原来导通的晶闸管。这段延时称为关断等待时间，它由电源频率、电压、回路电感和控制角等因素决定，但主要是防控制角的变化而变化。在最大控制角时，关断时间最长。因此，最好应按最大控制角设定等待时间（一般可取 1～3ms）。此外，在给出转矩反向指令时，应将原工作组的触发脉冲移到 α_{max}（即 β_{min}）处，以便迅速使电流下降到零。

b. 要有触发等待时间，即使原工作组的触发脉冲被封锁后，原工作组的晶闸管还不能立刻关断，因此，待工作组变流器还不能立刻投入工作，否则将会因两组变流器同时导通而造成电源短路的故障。为此，从逻辑装置向工作组发出封锁脉冲信号，到向待工作组给出解除脉冲封锁信号之前要有一段延时，称为触发等待时间，该时间一般取 5～6ms。

c. 要有对电流调节器“拉 β_{min}”的信号。在待工作组刚开放时，为了避免此时因整流电压和电动机反电动势相加而造成很大的电流冲击，应使待工作组投入工作时处于逆变状态。为此，在工作组脉冲被封锁，待工作组还未开放时，先向电流调节器输入一个“拉 β_{min}”信号，即将待工作组触发装置的移相器处于 β_{min}位置。当待工作组脉冲封锁被解除后，将“拉 β_{min}”信号亦取消。在调节系统的作用下，待工作组的触发脉冲就从 β_{min}点向工作点移动，使电枢电流逐步建立，电动机被减速或反向起动，直到稳定工作点为止。

从以上分析可知，逻辑无环流可逆系统反向的过零死时主要由两部分决定：一部分是由

逻辑电路本身决定的，即关断等待时间和触发等待时间；另一部分是因为电流调节器有积分作用，当“拉 β_{min}”信号取消后，变流器的电压从最大逆变电压降到与电动机电动势相对应的电压需要一定的时间，在低速工作时，这段时间更长。例如，在采用串联式 PI 调节器［见图 17－31（a)］系统中，可能达到 100～200ms。这时，不仅会产生较大的转速和电流超调，甚至还会使转速振荡。改变电流调节器的方式可减少死时。例如，将电流调节器改用并联式 PI 调节器［见图 17－31（b)］时，可将平均死时降到 35ms 左右；若采用带电流斜率内环控制的 PI 调节器［见图 17－31（c)］时，死时可减小到 10～15ms，而且还能改善电流断续后系统的性能。

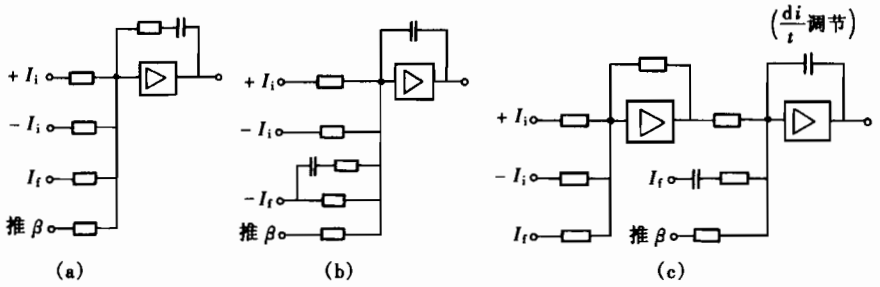


图 17－31　几种不同的电流调节器

(a) 串联式 PI 调节器；(b) 并联式 PI 调节器；(c) 带 di/dt 控制的 PI 调节器

I_i—电流给定；I_f—电流反馈；推 β—“拉 β_{min}”信号

17.4.2　交流电动机调速技术

交流电动机构造简单，运行可靠，在单机容量、供电电压和转速极限等方面均优于直流电动机，在国民经济各部门中广泛应用。

随着电力电子器件、微电子技术、电动机和控制理论的发展，交流电动机调速系统近年来有了很大发展。在我国，电磁调速异步电动机、晶闸管串级调速及变压调速系统已获得广泛应用；用晶闸管、大功率晶体管组成的，容量从几十到几千千瓦的异步电动机变频调速系统已经投入工业运行；具备了设计制造几千千瓦乃至上万千瓦无换向器电动机的能力；微型计算机及矢量控制技术在高性能交流传动系统应用中取得了根本性的突破。以恒速传动的风机、泵类等负载，从节约电能的需要出发，已大量采用交流调速系统；传统上采用直流调速系统的轧钢、造纸和提升机械，以及加工机床、机器人所用的伺服系统等，也已经用高性能交流调速代替直流调速。应用逆变器的高性能交流调速系统必将取代直流调速系统，成为调速传动系统的主流。

（1）交流调速系统方案。交流电动机转速为

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \tag{17-29}$$

式中　f——供电电源频率；

p——极对数；

s——转差率（同步电动机时，$s = 0$)。

因此，交流电动机有以下三种基本调速方式：

a. 改变极对数 p；

b. 改变转差率 s；

c. 改变供电电源频率 f。

1）变极调速：变换异步电动机绕组极对数从而改变同步转速进行的调速称为变极调速。其转速是按阶跃方式变化的，而不是连续变化的。变极调速主要用于笼型异步电动机。

变换绕组极对数的方法有：

a. 将一套绕组中部分线圈按一定规律改接，以改变其电流方向或相号来改变极对数，常用于倍极比双速或三速异步电动机。

b. 在定子上设置两套不同极对数的独立绕组。

c. 在定子上设置不同极对数的独立绕组，且每个独立绕组又有不同的接线组合，适用于三速以上的多速电动机。

然而，单绕组变极对数不仅出线少，用铜量省，而且可以实现双速、三速及倍极比，非倍极比的变极调速，应用较广泛。

单绕组多速电动机变极对数时，由于输出转矩和功率的不同，一般有恒功率、恒转矩和变转矩三种型式。表 17－14 为单绕组倍极比双速电动机工作特性。表 17－15 为单绕组非倍极比双速电动机工作特性。

表 17－14　　单绕组倍极比双速电动机工作特性

序号	极数（$2p$） Ⅰ连接方法	极数（$2\times 2p$） Ⅱ连接方法	转矩比 $T_{Ⅱ}/T_{Ⅰ}$	功率比 $P_{Ⅱ}/P_{Ⅰ}$	特　性
1	2Y	Y	1	0.5	恒转矩
2	2Y	2Y	2	1	恒功率
3	2Y	△	1.732	0.866	可变转矩
4	△	2Y	2.3	1.15	可变转矩
5	2△	Y	0.577	0.288	可变转矩

表 17－15　　单绕组非倍极比双速电动机工作特性

序号	极数Ⅰ 连接方法	极数Ⅱ 连接方法	转矩比 $T_{Ⅱ}/T_{Ⅰ}$	功率比 $P_{Ⅱ}/P_{Ⅰ}$	特　性
1	2Y	Y		0.5	可变转矩
2	2Y	2Y		1	恒功率
3	2Y	△		0.86	可变转矩
4	△	2Y		1.154	可变转矩
5	2△	Y		0.288	可变转矩

2）转子串电阻调速：异步电动机机械特性的临界转差率 s_{cr}和临界转矩 T_{cr}，在忽略定子电阻时为

$$s_{cr}\approx \pm r'_2/(x_1+x'_2) \tag{17-30}$$

$$T_{cr}\approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_0 (x_1+x_2)} \tag{17-31}$$

由式（17－30）和式（17－31）可知，在电动机各参数、电源电压和频率不变时，临界转矩与 r'_2 无关，保持不变；而临界转差率与 r'_2 成正比地变化。在绕线转子异步电动机转子回路串入不同电阻时的机械特性如图 17－32 所示，随着外接电阻的加大，电动机的特性变软，从而实现了调速。

转子回路串固体电阻，通过接触器切换可以实现有级调速；串接液体电阻，可以实现连续调速。用转子电阻斩波法调节转子等效电阻，也可实现连续调速。转子电阻斩波调速的基本电路如图 17－33 所示。

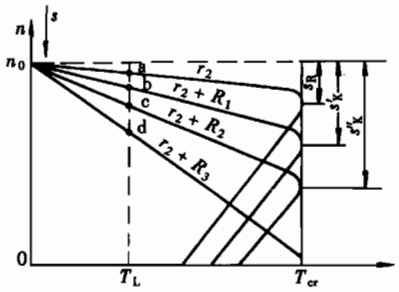


图 17－32　绕线转子异步电动机

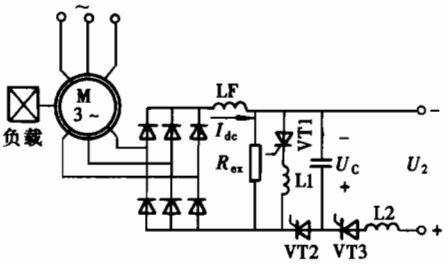


图 17－33　转子电阻斩波调速的基本电路

转子绕组接不可控整流桥，经滤波电抗器后，接外部电阻 R_{ex}，R_{ex}两端并联一个斩波器，改变斩波器的导通和开断比，即可改变整流电路的有效电阻，从而可达到改变转子电阻而调速的目的。

转子串电阻时的机械特性其等效电阻为

$$R_{dx} = (1-\alpha)\ R_{ex}$$

$$R_{ex} = 2R_{ad} \tag{17-32}$$

式中　α——斩波器的导通率，$\alpha = t_{ON}/T$；

t_{ON}——主晶闸管的导通时间；

T——周期；

R_{ad}——串电阻调速时每相应串入的附加电阻。

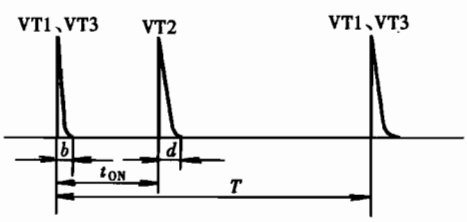


图 17－34　斩波器触发脉冲

图 17－33 为晶闸管斩波电路。主晶闸管 VT1 和辅助晶闸管 VT3 同时导通。VT1 导通使并联电阻 R_{ex}短路，VT3 导通使辅助电源对电容器 C 充电。当 $U_C = U_2$ 时，VT3 自行关断。经过时间 t_{ON}后，控制电路送出另一个触发脉冲，使 VT2 导通，电容器 C 经 VT2 放电，使 VT1 关断，整流回路电阻为 R_{ex}，直到 VT1、VT3 再次导通，见图 17－34。

在控制过程中，VT2 和 VT3 是不允许同时导通的，因此，t_{ON}的变化范围应为

$$b < t_{ON} < (T-d)$$

式中，b 应大于电容器 C 的充电时间，d 应大于 C 的放电和反向充电时间。

斩波器调速有较好的无级调速性能，斩波器如果用门极关断晶闸管，则电路更简单可靠。同转子回路串电阻调速一样，调速时的转差功率消耗于外电路，效率不高。

3）串级调速：在绕线转子异步电动机转子回路中引入外加电动势，以改变电动机运行转差率而获得不同转速。为使外加电动势的频率与转子电动势的频率相同，转子电动势可通

过三相桥式整流变为直流，用直流电动机作为外加电动势的称为机组串级。在机组串级中，直流电动机与异步电动机同轴，为机械回馈式，如图 17－35 所示。直流电动机驱动一台接电网的交流发电机则称为电回馈式，如图 17－36 所示。用晶闸管逆变器作为外加电动势，则为晶闸管串级调速，如图 17－37 所示。图 17－37 电路只能在同步转速以下调速运行，故又称为低同步串级调速。如果在绕线转子回路中，接入一个交—交变频器，代替原来的整流器和逆变器，如图 17－38 所示，则可在同步转速上下调速运行，称之为超同步串级调速。与低同步串级调速相比，其变流装置小，能产生制动转矩，可作高速运行。

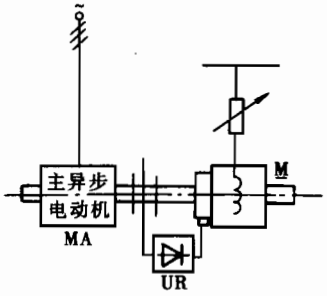


图 17－35　机械回馈式图

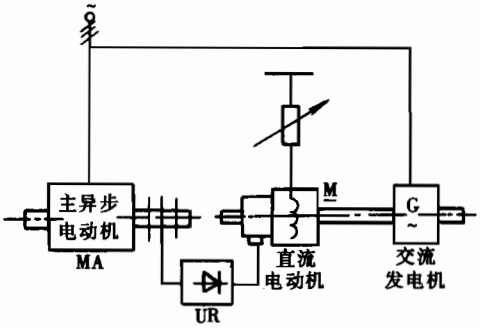


图 17－36　电回馈式

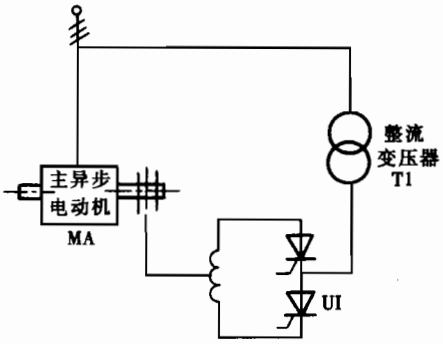


图 17－37　低同步串级调速

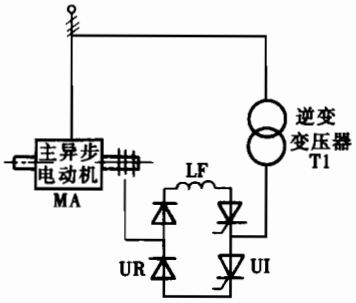


图 17－38　超同步串级调速

4）调压调速：如图 17－39 所示，在恒定交流电源与电动机之间接入晶闸管作为电压控制器，改变异步电动机输入电压进行调速的，称为调压调速。

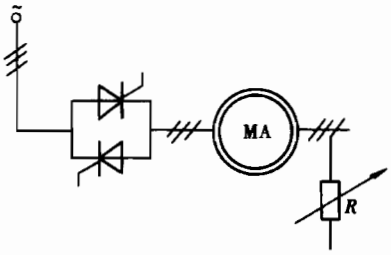


图 17－39　调压调速

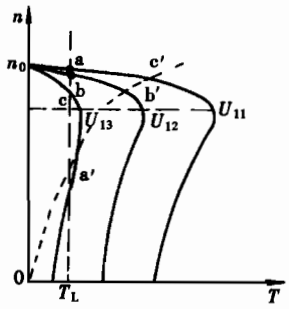


图 17－40　不同 U1 时的机械特性

调压调速也是一种变转差率调速，如图 17－40 所示。普通笼型异步电动机机械特性工作段的转差率 s 很小，对于恒转矩负载而言，调速范围很小；但对风机、泵类等变转矩负载，则有较大的调速范围，而且在 a、b、c 各点都能稳定工作。

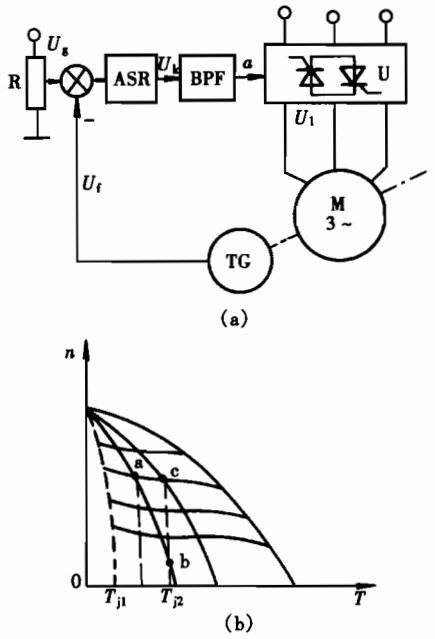


图 17－41　具有转速闭环的调压调速系统
(a) 原理图；(b) 闭环控制特性
U—晶闸管调压器；ASR—速度调节器；
BPF—触发器；RP—给定电位器；TG—测速发电机

为提高调压调速特性硬度，扩大调速范围，常采用闭环控制系统，如图 17－41 所示。它可以克服例如负载变化引起的转速大幅度变化。如果负载由 T_{j1} 变到 T_{j2}，系统开环工作时，U_1 不变，工作点沿同一机械特性由 a 到 b；而当系统闭环工作时，过大的转速降使闭环系统作用而提高 U_1，使系统稳定工作于另一特性曲线的 c 点，转速变化很小，调速范围可达 1∶10。

调压调速系统的效率

$$\eta \leqslant 1 - s \tag{17-33}$$

转差功率为

$$P_s = sP_1 = \frac{s}{1-s}KT_L n \tag{17-34}$$

式中　P_1——输入功率；

T_L——负载转矩；

n——运行转速。

不同负载特性用下式表示

$$T_L = Cn^{\alpha} \tag{17-35}$$

式中　C——常数；

$\alpha = 0$、1、2——恒转矩负载、转矩与转速成比例的负载以及转矩与转速二次方成比例的负载。

不同特性负载时转差功率损耗系数为

$$P_s / P_{2max} = s\ (1-s)^{\alpha} \tag{17-36}$$

式中　P_{2max}——$s = 0$ 时负载电动机输出的最大机械功率。

产生最大转差功率损耗系数时转差率为

$$s = \frac{1}{1+\alpha} \tag{17-37}$$

不同负载特性时的转差功率损耗系数曲线如图 17－42 所示。由图 17－42 可见，当 $\alpha = 2$ 时，电动机转差功率损耗系数最小，所以调压调速用于风机、泵类负载是合适的。对于恒转矩负载，则不宜长时间在低速下工作。

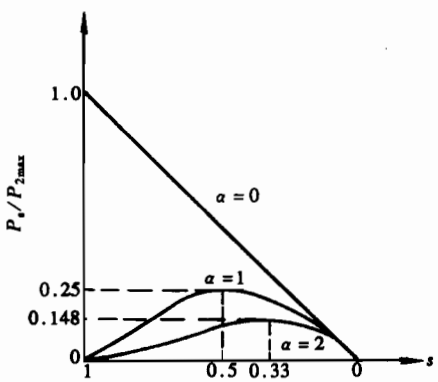


图 17－42　不同负载特性时的转差功率损耗曲线

由于晶闸管调压装置采用相位控制，输出电压、电流均含有丰富的高次谐波，影响电动机的出力，在配用电动机时，要适当增加容量。

5）电磁调速异步电动机：如图 17－43 所示，电磁调速异步电动机由笼型异步电动机、电磁转差离合器和晶闸管励磁电源及其控制部分组成。励磁电源功

率较小，常用单相半波或全波电路控制离合器的励磁电流。

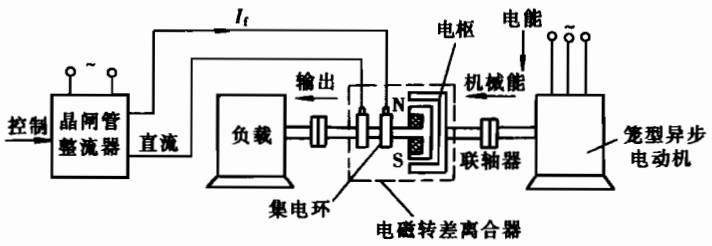


图 17－43　电磁转差调速电动机系统的组成

一般情况下，电磁调速电动机的机械特性就是转差离合器的机械特性，如图 17－44 所示。空载转速 n_0 不变时，随负载转矩的增加，转速下降较多，是软特性。励磁电流 I_f 越小，特性越软，且在 $T<10\%T_n$ 时有一个失控区。

采用转速反馈闭环控制系统可以得到如图 17－44（b）所示的机械特性。转速负反馈的作用是使励磁增加来补偿由于负载增加而引起的转速降低，从而使转速保持稳定。在图 17－44a 中，当系统工作于 n_1（$I_f=I_{f4}$，$T=T_1$）时，负载增至 T_2，开环控制时，转速由 n_1 降至 n_2；而闭环控制时，则系统自动使 I_{f4}增大至 I_{f5}，从而使转速又上升至接近 n_1，使转速稳定。

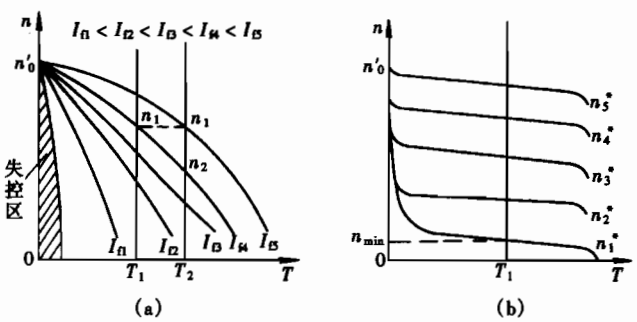


图 17－44　电磁调速电动机开环和闭环调速机械特性

（a）开环；（b）闭环

T_j—负载转矩

注：＊表示转速给定值。

这种调速电动机的主要优点是控制电路简单、运行可靠、价格低、对电网和电动机均无谐波影响。闭环控制调速范围可达 1:10，转速稳定度为 2%左右。它适用于功率不大，不需要制动转矩，以及要求不高的一般传动系统。

6）变频调速：它是利用电动机的同步转速随外加电源频率而变化的特性，通过改变电动机供电频率进行调速的方法。用普通晶闸管、GTR、GTO 晶闸管、IGBT 等电力电子器件组成的静止变频装置对异步电动机进行调速已广泛采用。静止变频电源大体上可分为如图 17－45 所示的间接变频方式和直接变频方式两种。

a. 间接变频方式（交－直－交变频）。把交流电通过整流器变为直流电，再用逆变器把直流电变为频率、电压可变的交流电供给异步电动机。这种变频方式又可以分为以下三种类型。

a）电压型变频调速如图 17－46 所示，整流输出经电感、电容滤波，以电容为主，具有恒压源特性；逆变器具有反馈二极管，是一种方波电压逆变器。这种方法若不设置与整流器反向

并联的再生逆变器，则不能实现再生制动。电压型逆变器一般适合于单方向运转、不要求快速调节及要求多台电动机协调运转的场合使用。

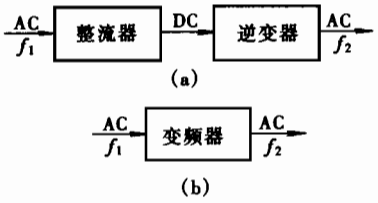


图 17－45　静止变频电源图

(a) 间接变频方式；(b) 直接变频方式

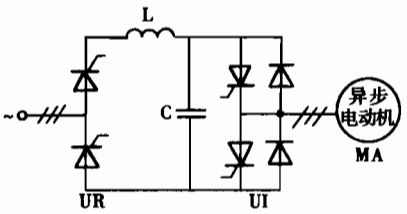


图 17－46　电压型变频调速

b) PWM（脉冲宽度调制）变频调速如图 17－47（a）所示，其电路结构与电压型变频调速相似，只是用不可控整流器代替了原来的可控整流器。逆变器可以用普通晶闸管，但更多的是用 GTR（大功率晶体管）、GTO（门极关断）晶闸管或 IGBT 等。

如图 17－47（b）所示，PWM 变频是将一个周期的逆变电压分割成若干个脉冲，改变脉冲宽度和脉冲数量，使供给电动机的基波电压与频率成比例变化。PWM 变频调速具有电源侧功率因数高、谐波成分少，调速范围宽和响应快等特点，使用非常广泛。

c) 电流型变频调速如图 17－48 所示，整流器输出靠电抗器滤波，具有恒流源特性，输出电流为方波。只要改变整流电压极性，就能实现回馈制动，适用于四象限运行和要求快速调节的场合。

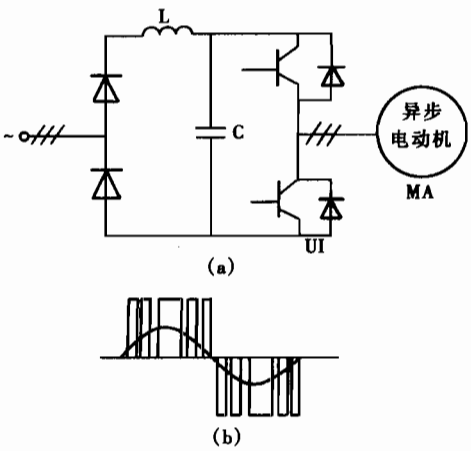


图 17－47　PWM 变频调速

(a) PWM 变频器线路；(b) PWM 波形

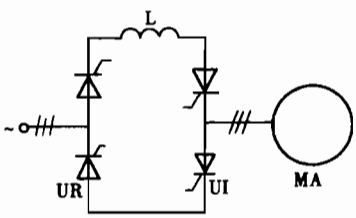


图 17－48　电流型变频调速

电压型变频调速与电流型变频调速的主要特点见表 17－16。

表 17－16　　电流型变频调速与电压型变频调速的主要特点

比较项目	电　流　型	电　压　型
直流回路滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形	决定于负载，当负载为异步电动机时，为近似正弦波	矩形
输出电流波形	矩形	决定于逆变器电压与电动机的电动势，具有较大的谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动（发电制动）	方便，不需附加设备	需要附加电源侧反并联逆变器

续表

比较项目	电　流　型	电　压　型
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢，用 PWM 则快
对晶闸管要求	耐压高，对关断时间无严格要求	一般耐压可较低，关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机，多机	多机，变频或稳频电源

* 指三相桥式逆变器，既不采用脉冲宽度调制，也不进行多重叠加。

b. 直接变频方式（交—交变频器）：如图 17－49 所示，它是利用晶闸管的开关作用，直接从固定频率的交流电源变换为频率、电压可调的交流电供给异步电动机实现调速的一种方法。其最高输出频率仅为电源频率的 1/2～1/3。由于直接变换效率高，使输出波形得到改善，直接变频器（交—交变频器）调速，已在中低速领域内，作为驱动大中容量电动机的调速方法而被广泛采用。

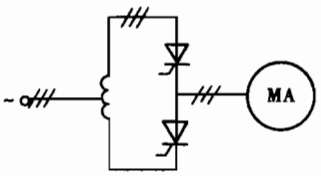


图 17－49　交—交变频器

间接变频调速与直接变频调速的主要特点见表 17－17。

表 17－17　　交—交变频与交—直—交变频的主要特点

比较项目	交—交变频	交—直—交变频
换能型式	一次换能，效率较高	两次换能，效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
装置器件数量	器件较多，器件利用率较低	器件较少，器件利用率较高
调频范围	最高频率为电源频率的 1/3～1/2	频率调节范围宽，不受电源频率限制
电网功率因数	较低	移相调压、低频低压时功率因数低，用斩波或 PWM 调压，则功率因数高

7）无换向器电动机调速。它是用与电动机旋转频率同步的交流电源来驱动同步电动机，改变交流电源的频率和电压实现调速的一种方法。如图 17－50 所示，位置检测器 PS 检测同步电动机 MS 的转子位置，并给出可调变频器的触发信号。电动机转速与变频器输出频率始终保持同步、无转差、不失步。因此，无换向器电动机相当于一台直流电动机，将其电刷和换向器组成的机械换向装置换成位置检测器和晶闸管，而控制特性本质上与直流电动机的相同。它兼有直流电动机的控制性能和同步电动机易于维护的优点。无换向器电动机的变频器也可分为直接变频（交—交）和间接变频两种，被广泛用于矿井卷扬机、轧机、水泥管磨机的调速传动和一般风机、泵、压缩机的调速传动及大型同步电动机的软起动。

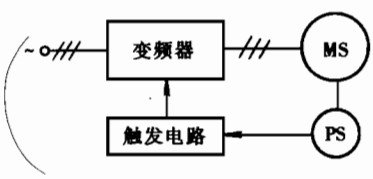


图 17－50　无换向器电动机的基本结构

MS—同步电动机；PS—位置检测器

（2）变频调速的控制方式。

1）基本控制方式。电动机调速时，一个重要的原则是保持每极磁通量为额定值不变。在交流电动机中，磁通是由定子和转子磁动势合成产生的，要保持磁通恒定，控制上较为复杂。

三相异步电动机定子每相电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{\omega 1} \Phi_m \tag{17-38}$$

式中 f_1——定子频率；

N_1——定子每相绕组串联匝数；

$K_{\omega 1}$——基波绕组系数；

Φ_m——每极气隙磁通量。

由式（17－38）可知，只要控制 E_1、f_1 就可以控制磁通 Φ_m。

当 f_1 由额定频率 f_{1n}下调时，要保持 Φ_m 不变，必须同时降低 E_1，否则就会造成 Φ_m 的增大，使定子电流中的励磁电流分量迅速增加，造成电动机过热；而只要保持 E_1/f_1 = 常值，Φ_m 就可为常值。这就是恒定电动势/频率比的控制方式。

然而，感应电动势 E_1 难以控制，当电动势较高时，可认为 $U_1 \approx E_1$，则得

$$U_1/f_1 = 常值 \tag{17-39}$$

这就是恒压/频比的控制方式。

低频时，U_1、E_1 都较小，定子阻抗压降不能忽略，可以人为地将 U_1 升高，以补偿定子压降，如图 17－51 所示。

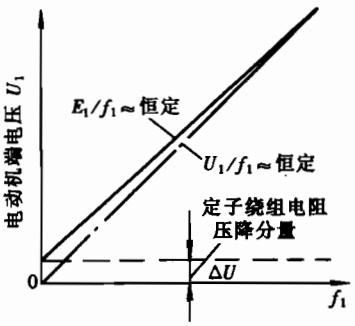


图 17－51　恒压频比控制特性

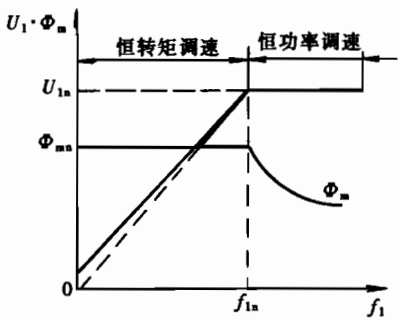


图 17－52　异步电动机变频调速控制特性

当 f_1 由 f_{1n}上调时，由于电机绝缘的限制，电压 U_1 不能超过 U_{1n}而随之增大，只能保持额定值不变，由式（17－38）可知，这将使 Φ_m 与 f_1 成反比地降低，相当于弱磁升速的情况。

综合上述两种情况，异步电动机变频调速控制特性如图 17－52 所示。额定频率 f_{1n}以下为恒转矩调速，f_{1n}以上基本上属于恒功率调速。

2）异步电动机在电压、频率协调控制下的机械特性。

a. U/f 恒定控制时的稳态机械特性：异步电动机的稳定特性可以由图 17－53 所示的等效电路中求出，定子电流 I_1、转矩 T 和转速 n 分别用下列各式表示

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + A_f)^2 + (Bf)^2}} \tag{17-40}$$

$$T = \frac{mp}{2\pi} A I_1^2 \tag{17-41}$$

$$n = \frac{f - f_s}{p} \tag{17-42}$$

$$A = \frac{(R'_2/f_s)(X_0/f_n)^2}{(R'_2/f_s)^2 + (X'_2/f_n + X_0/f_n)}$$

$$B = (X_1/f_n) + \left[\frac{(R'_2/f_s)^2 + (X'_2/f_n)(X'_2/f_n + X_0/f_n)}{(R'_2/f_s)^2 + (X'_2/f_n + X_0/f_n)}\right]$$

式中 m——相数；

p——极对数；

n——转速；

f——输入频率；

f_n——额定频率；

f_s——转子频率。

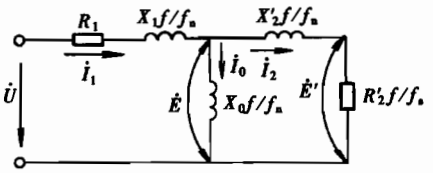


图 17－53 异步电动机的 T 型等效电路

图 17－54 是用上述公式计算得出的 U/f 恒定控制情况下的转矩－转速特性曲线。由图 17－54 可见，在低速范围内，由于 I_1R_1 相对增加，气隙磁通减少，转矩特性下垂使得最大转矩明显下降，以致不能承受负载。它只适用于调速范围不大的风机、泵类负载。

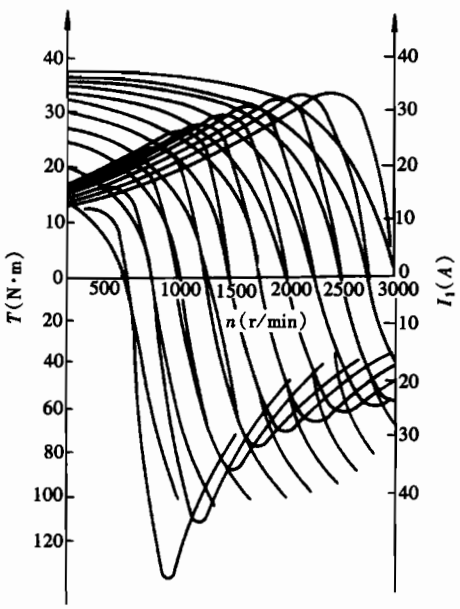


图 17－54 U/f 恒定控制时转矩、定子电流—转速特性示例

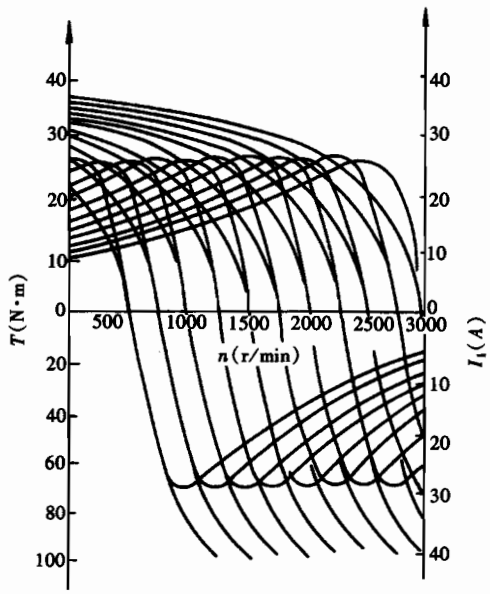


图 17－55 E/f 恒定控制时转矩、电流－转速特性

b. E/f 恒定控制时稳态机械特性：根据上述等效电路，把转矩表达成 E/f 的函数，则有

$$T = \frac{mp}{2\pi}\left[\frac{R'_2/f_s}{(R'_2/f_s)^2 + (X'_2/f_n)^2}\right](E/f)^2 \tag{17-43}$$

最大转矩 T_{max} 和最大转差频率 f_{smax} 分别由下式给出：

$$\left.\begin{aligned} T_{max} &= \frac{mp}{2\pi}\frac{1}{2(X'_2/f_n)}(E/f)^2 \\ f_{smax} &= \frac{R'_2}{(X'_2/f_n)} \end{aligned}\right\} \tag{17-44}$$

因此，在 E/f 恒定控制的情况下，T_{max} 保持恒定，与 f 大小无关。图 17－55 是其转矩、电流—转速特性，低速范围内无转矩下垂情况。

c. E'/f 恒定控制：根据图 17－53 所示的等效电路，如果将电压再提高一些，把转子漏抗上的压降抵消掉，就得到 E'/f 恒定控制。这时转子全磁通 Φ'_m 就对应于 E'，则

$$E' = 4.44 f_1 N_1 K_{\omega 1} \Phi'_m \tag{17-45}$$

按照 E'/f 恒定控制时的稳态性能与直流电动机的一样。图 17－56 所示为不同的电压—频率协调控制时的机械传性。

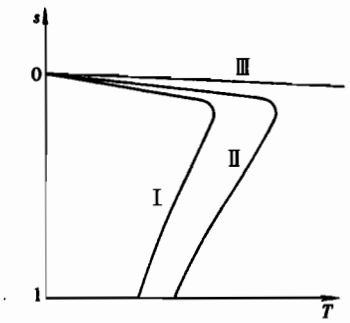


图 17－56　不同的电压－频率协调控制时的机械特性
Ⅰ—恒 U/f 控制；Ⅱ—恒 E/f；
Ⅲ—恒 E'/f 控制

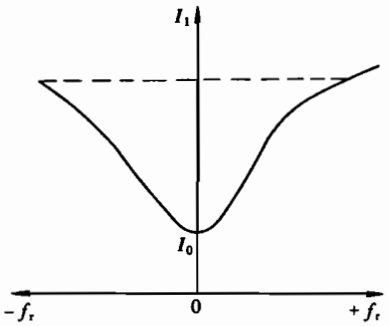


图 17－57　保持 Φ_m 恒定时 $I_1 = f(f_r)$ 的函数曲线

总之，异步电动机变频调速时有两个独立的变量 U_1 和 f_1，需要进行协调控制。

U/f、E/f 恒定控制机械特性基本上是平行下移的，稳态性能尚可，能满足一般要求。但因都没考虑动态过程中 Φ_m 的变化，动态性能较差。E'/f 恒定控制是保证全磁通恒定的控制，其动态、静态性能可与直流传动的一样，但线路较复杂。

3）转差频率控制。以上所述的控制方式简单，能满足一般调速要求，但动、静态性能较差。要提高动、静态性能，无疑要用转速闭环控制。提高动态性能，主要是控制转速的变化率 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$，由基本运动方程 $T - T_L = \frac{J\,\mathrm{d}\omega}{p\,\mathrm{d}t}$ 可知，控制转矩 T 就能控制 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$。因此，系统的动态性能就归结为控制其转矩的能力。

在交流电机中，电动机的转矩方程为

$$T = K_m \Phi_m I_2 \cos\varphi_2 \tag{17-46}$$

可见，气隙磁通、转子电流和转子功率因数都会影响转矩。

根据等效电路，且令 $f_r = sf_0$ 并定义为转差频率；当 f_r 较小时，$\cos\varphi_2 \approx 1$，从而

$$T \approx K_m \Phi_m I_2 \tag{17-47}$$

$$I_2 \approx \frac{sE}{R_2} = \frac{f_r}{f_0} \frac{E}{R_2} \tag{17-48}$$

式中　f_r——转差频率；

f_0——定子供电频率；

E——电动机反电动势；

R_2——转子电阻。

将式（17－47）和式（17－48）合并整理后有

$$T \approx K'_m \Phi_m^2 \frac{f_r}{R_2} \tag{17-49}$$

这表明，在 s 很小范围内，只要 Φ_m 保持恒定，控制 f_r 就能达到直接控制转矩的目的。控制转差频率，就意味着控制了转矩。

当忽略饱和与铁损耗时，Φ_m 与励磁电流 I_0 成正比，而 I_0 与定、转子电流之间相量关系为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 \tag{17-50}$$

而定子电流与 I_0 及其他参数之间的关系为

$$I_1 = I_0 \sqrt{\frac{R_2^2 + f_r^2 (L_m + L_2)^2}{R_2^2 + f_r^2 L_2^2}} \tag{17-51}$$

当 Φ_m 或 I_0 不变时，I_1 与转差频率 f_r 的函数关系见式（17-51），函数曲线如图 17-57 所示。可以看出：

a）当 $f_r = 0$ 时，$I_1 = I_0$，即在理想空载时定子电流等于励磁电流。

b）当 f_r 增大时，由于式（17-51）分子中含 f_r 项大于分母中含 f_r 项，所以 I_1 也增大。

c）f_r 为正、负时，I_1 均为正，$I_1 = f(f_r)$ 左右对称。

以上表明，只要 I_1 与 f_r 符合上述关系，就能保持 Φ_m 恒定；在 $f_r < f_{rmax}$ 的范围内，T 与 f_r 成正比，控制 f_r 就控制了转矩 T。这就是转差频率控制的基本规律。

转差频率控制加入了速度闭环，较之恒压频比控制的动、静态性能要好。然而上述“保持 Φ_m 恒定”仍只在稳态下成立，没有考虑在动态中 Φ_m 如何变化，电流只控制了幅值而没涉及到相位，函数发生器存在误差，转速检测信号也有误差或干扰等，这些都会在一定程度上影响系统性能的进一步提高。

4）脉冲宽度调制（PWM）控制技术。在变频调速控制系统中，通常采用脉宽调制（PWM）技术来改善变频器的输出波形，减少高次谐波。

a. 单极性与双极性 PWM 模式：从调制脉冲的极性看，PWM 又可分为单极性与双极性控制模式两种。

a）单极性 PWM 模式。产生单极性 PWM 模式的基本原理如图 17-58 所示。首先由同极性的三角波调制电压 $u_\triangle$ 与参考电压 u_R 比较，产生单极性的 PWM 脉冲［图 17-58（b）］；然后将单极性的 PWM 脉冲信号与图 17-58（c）所示的倒相信号 u_1 相乘，从而得到正负半波对称的 PWM 脉冲信号 u_P，如图 17-58（d）所示。

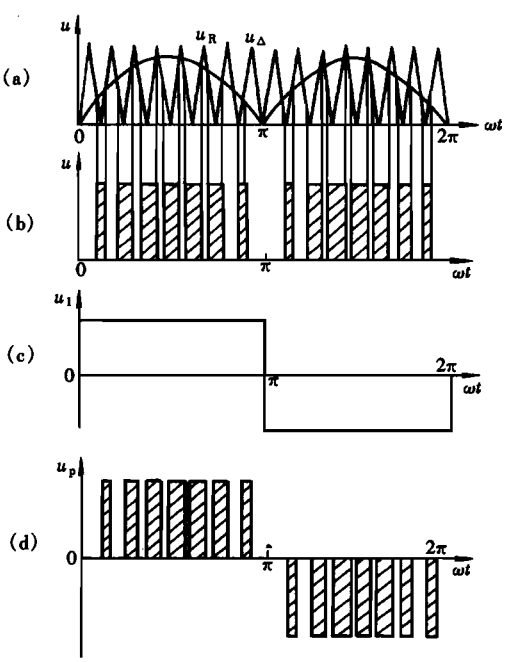


图 17-58　单极性 PWM 模式（单相）

b）双极性 PWM 模式。双极性 PWM 控制模式采用的是正负交变的双极性三角载波 $u_\triangle$ 与参考波 u_R，如图 17-59 所示，可通过 $u_\triangle$ 与 u_R 的比较直接得到双极性的 PWM 脉冲，而不需要倒相电路。

与单极性模式相比，双极性 PWM 模式控制电路和主电路比较简单，然而对比图 17-58 和图 17-59 可看出，单极性 PWM 模式要比双极性 PWM 模式输出电压中高次谐波分量小得

多，这是单极性模式的一个优点。

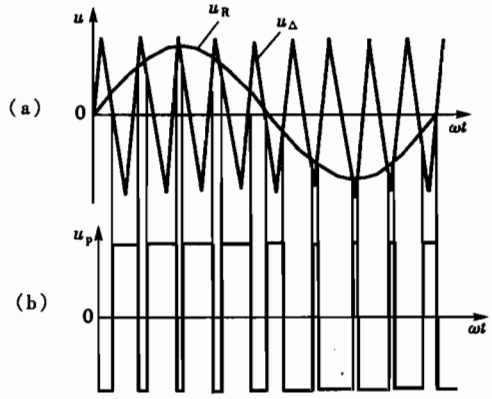


图 17－59　双极性 PWM 模式调制原理

b. 同步式、异步式和分段同步式。从三角波电压与参考电位（一般为正弦波）的频率来看，PWM 控制方式可分为同步式、异步式和分段同步式，它们各有利弊。

a）同步控制方式。三角波电压的频率 $f_\triangle$ 与参考电压的频率 f_R（即逆变器的输出频率）之比 $f_\triangle/f_R$ = 常数时称为同步控制方式。

同步控制方式在逆变器输出电压每个周期内所采用的三角波电压数目是固定的，因而所产生的 PWM 脉冲数是一定的。其优点是在逆变器输出频率变化的整个范围内，皆可保持输出波形的正、负半波完全对称，只有奇次谐波存在。而且能严格保证逆变器输出三相波形之间具有 120°相位移的对称关系。然而，同步控制方式的一个严重缺点是：当逆变器低频输出时，每个周期内的 PWM 脉冲数过少，低次谐波分量较大，使负载电动机产生转矩脉动和噪声。

b）异步控制方式。异步控制方式与同步控制方式不同，采用的是固定不变的三角载波频率。低速运行时，逆变器输出电压每个周期内的 PWM 脉冲数相应增多，因而可减少负载电动机的转矩脉动和噪声，使调速系统具有较好的低频特性。然而，异步控制方式也有其缺点。由于三角波调制频率 $f_\triangle$ 为定值，当参考电压频率 f_R 连续变化时，则难以保证 $f_\triangle/f_R$ 为一整数，特别是能被 3 整除的数，因而不能保证逆变器输出正负半波以及三相之间的严格对称关系，将会导致负载电动机运行的不够平稳。

c）分段同步控制方式。实际应用中，多采用分段同步控制方式，集同步和异步控制方式之所长，而克服了两者的不足。在低频运行时，使三角载波与参考波的频率比 $f_\triangle/f_R$ 有级地增大，在有级地改变逆变器输出电压半波内 PWM 脉冲数目的同时，仍保持其半波和三相对称关系，从而改善了系统的低频运行特性，并可消除由于逆变器输出电压波形不对称所产生的不良影响。

采用分段同步控制方式，需要增加调制脉冲切换电路，从而增加了控制电路的复杂性。

5）矢量控制与坐标变换。前两节论述的变频调速控制方法，基本上解决了异步电动机的平滑调速问题，转差频率控制已起到了直流电动机双闭环调速系统的作用。但是上述方法的主要问题是电压、电流和频率等控制量都是标量，即只能按电动机稳态运行规律进行控制，不能同时控制其大小和相对位置，转矩控制性能较差。

要改善转矩控制性能，使系统完全达到直流传动系统的动、静态指标，必须对定子电压或电流实施矢量控制，既控制大小，又控制方向。由于交流电动机的所有矢量（电压、电流和磁通等）都在空间以同步速度旋转，它们在定子绕组上的物理量都是交流量。因此，控制、计算十分不便，所以必须设法变成直流量。

矢量控制的关键在于坐标变换。

a. 坐标变换的原则：如果能将交流电动机的模型等效地变换成直流电动机的模型，然后按直流电动机进行控制，即可解决问题。坐标变换的等效原则是使在不同坐标系下的电机模型产生相同的磁动势。

众所周知，交流电动机三相对称静止绕组 U、V、W，通以三相平衡的正弦电流 i_U、i_V、i_W 时，就会产生合成旋转磁动势 F。它在空间呈正弦分布，并以同步转速 ω_1，沿 U－V－W 相序旋转，如图 17－60（a）所示。

在空间互差 90°的两相静止绕组 α 和 β，通以时间上差 90°的两相平衡交流电流，也会产生旋转磁动势 F，如图 17－60（b）所示。当图 17－60（a）、（b）两个旋转磁动势 F 的大小和转速都相等时，即认为图 17－60（b）的两相绕组和图 17－60（a）的三相绕组等效。

在图 17－60（c）中，有两个匝数相等互相垂直的绕组 M 和 T，分别通以直流电流 i_M 和 i_T，产生合成磁动势 F，F 相对于绕组而言位置是固定的。如果使铁心与绕组整体以 ω_1 转速旋转，则 F 自然成为旋转磁动势。如果把这个磁动势的大小和转速也控制得与图 17－60（a）、（b）中的磁动势一样，则旋转的直流绕组同图 17－60（a）、（b）的三相绕组和两相绕组等效。如果站在铁芯上和绕组一起旋转来看 M、T 绕组，则两者是通以直流电且相互垂直的静止绕组。如果控制磁通 Φ 的位置在 M 轴上，则 M 相当于直流电动机的励磁绕组，T 相当于电枢绕组。

因此，可以说，在三相坐标系下的 i_U、i_V、i_W，在两相坐标系下的 i_α、i_β 和在旋转坐标系下的 i_M、i_T 是等效的，它们能产生同样的磁动势。

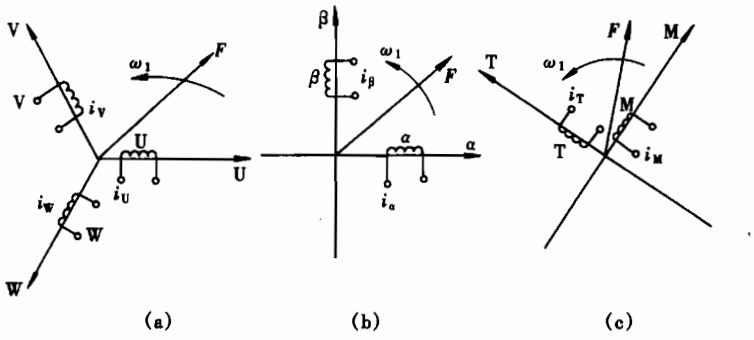


图 17－60　等效的交流电机绕组和直流电机绕组

（a）三相交流绕组；（b）两相交流绕组；（c）旋转直流绕组

b. 三相/二相交换：图 17－61 示出了三相静止坐标系 U、V、W 和两相静止坐标系 α、β 之间的变换。为方便起见，取 α 轴与 U 轴重合。设三相系统每相绕组有效匝数为 N_3，而两相系统为 N_2，各相磁动势均为有效匝数与其瞬时电流的乘积，其空间矢量均位于有关相的坐标轴上。

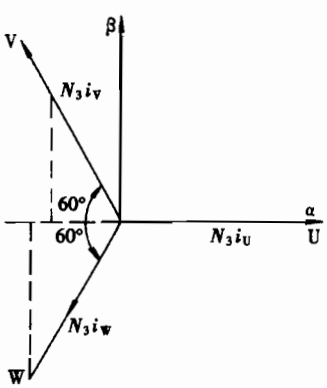


图 17－61　三相、二相坐标系与相应的电流时间变量

设磁动势波形是正弦分布的，当三相总磁动势与两相总磁动势相等时，两者的瞬时磁动势在 α、β 轴上的投影都相等，故

$$N_2 i_\alpha = N_3 i_U - N_3 i_V \cos 60° - N_3 i_W \cos 60°$$

$$= N_3 \left(i_U - \frac{1}{2} i_V - \frac{1}{2} i_W \right)$$

$$N_2 i_\beta = N_3 i_U \cos 90° + N_3 i_V \sin 60° - N_3 i_W \sin 60°$$

$$= N_3 \frac{\sqrt{3}}{2} (i_V - i_W)$$

将以上两式写成矩阵形式，得

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = (N_3/N_2) \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \tag{17-52}$$

经变换得

$$N_3/N_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

因此，实际的电流变换式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \tag{17-53}$$

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{17-54}$$

电压，磁链的变换式均与电流的变换式相同。

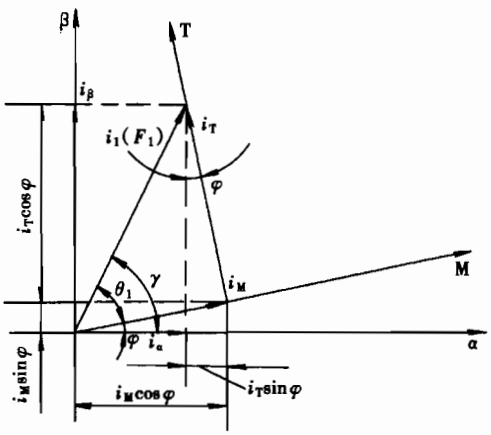


图 17－62　两相旋转变换
（α、β 轴与 M、T 轴之间的变换）

c. 两相旋转变换（矢量坐标变换）：在图 17－60（b）、（c）中，两相静止坐标系 α 和 β 与两相旋转坐标系 M、T 之间的变换称为两相旋转变换，如图 17－62 所示。图中 i_1（F_1）为 i_α、i_β 和 i_M、i_T 产生的均以同步转速；旋转的合成磁动势。以旋转坐标轴的旋转磁通量 Φ 为基准，把电流 i_1 分解成与 M 轴重合或正交的两个分量 i_M、i_T，称为 i_1 的励磁分量和转矩分量。i_1、i_M、i_T 以同步转速 ω_1 旋转，大小不变。α 轴、β 轴是静止的，α 轴与 M 轴夹角 φ 是变化的，因此，i_1 在 α、β 轴上的分量 i_α、i_β 也是随时间变化的，相当于 α、β 轴绕组交流磁动势的瞬时值。由图 17－62 可知，i_α、i_β 和 i_M、i_T 之间存在下列关系

$$i_\alpha = i_M\cos\varphi - i_T\sin\varphi$$

$$i_\beta = i_M\sin\varphi + i_T\cos\varphi$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} \tag{17-55}$$

而逆变换为

$$\begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{17-56}$$

图 17－63 为矢量旋转变换器的原理图。

d. 直角坐标/极坐标变换：

在图 17－62 中，令相量 i_1 和 M 轴夹角为 θ_1，求 i_1、θ_1，这是直角坐标/极坐标变换。其变换式为

$$i_1 = \sqrt{i_M^2 + i_T^2}$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{i_T}{i_M} \qquad (17-57)$$

当 θ_1 在 0°～90°之间变化时，$\tan\theta_1 = 0 \sim \infty$，变化幅度太大，很难在实际变换器中实现，因此，常用下式表示 θ_1 值

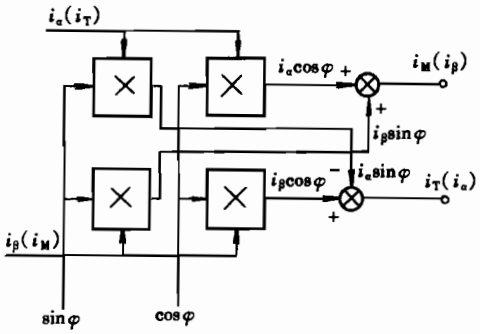


图 17－63 矢量旋转变换器的原理

$$\theta_1 = 2\arctan \frac{i_T}{i_M + i_1} \qquad (17-58)$$

变换器电路如图 17－64 所示。

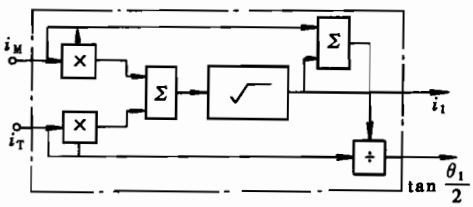


图 17－64 直角坐标－极坐标变换器电路

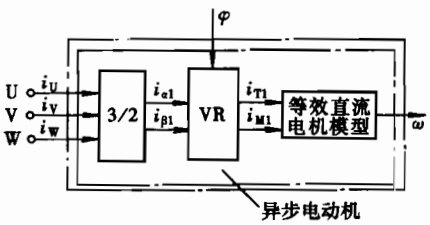


图 17－65 异步电动机的坐标变换结构

e. 异步电动机的坐标变换结构图和等效直流电动机模型：如前所述，以产生同样的旋转磁动势为原则，三相坐标系下的交流电流 i_U、i_V、i_W，通过三相/两相变换，等效成两相静止坐标系下的交流电流 i_α、i_β；再通过按转子磁场定向的旋转变换，等效成同步旋转坐标系下的直流电流 i_M、i_T。如果观察者站在铁芯上与坐标系一起旋转，看到的是一台直流电动机，原交流电动机的总磁通 Φ_2 就是等效直流电动机的磁通，M 绕组相当于直流励磁绕组，i_{M1}相当于励磁电流；T 绕组相当于电枢绕组，i_{T1}相当于与转矩成正比的电枢电流。其变换结构如图 17－65 所示。

异步电动机经过坐标变换后可以等效成直流电动机，模仿直流电动机的控制方法，再经过相应的反变换，就可以控制异步电动机。交流电动机的这种以电流（代表磁动势）的空间矢量为依据，通过坐标变换实现的控制系统，是矢量变换控制系统，或称为矢量控制系统。

实际上，按转子磁场定向的矢量控制系统，转子磁链 Ψ_2 仅由 i_{M1}产生，两者之间的传递函数是一阶惯性环节，与直流电动机励磁绕组的惯性作用是一致的。Ψ_2 的稳态值由 i_{M1} 唯一决定。定子电流的 i_{T1}和转子电流的 i_{T2}之间没有惯性。当 i_{M1}不变，即 Ψ_2 不变时，如果 i_{T1}变化，转矩 T 立即随之成正比地变化，无滞后。矢量控制系统从本质上解决了转差频率系统中的许多问题，控制性能更好。

（3）变频调速系统。

1）恒压频比控制的转速开环电压型变频调速系统。图 17－66 示出恒压频比控制的转速开环交—直—交电压型变频调速系统框图，该系统可以用于对调速性能要求不高的不可逆传

动中，如风机、水泵等。

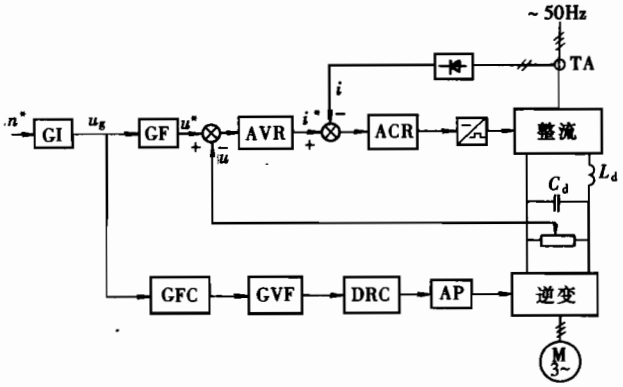


图 17－66　恒压频比控制的转速开环交—直—交电压型变频调速系统

GI—给定积分器；GF—函数发生器；AVR—电压调节器；ACR—电流调节器；GFC—频率给定动态校正器；GVF—电压频率变换器；DRC—环形分配器；AP—脉冲放大器

*　电压、电流给定值。

该系统的主电路由可控整流器和电压型逆变器组成，逆变电路采用 180°导电型，负载为 Y 接三相异步电动机。

在控制方式上，额定频率以下采用恒磁通调速（$\Phi_m = \Phi_{mn}$），保持 U_1/f_1 恒定，并在低频段补偿定子漏阻抗压降；在额定频率以上则保持 $U_1 = U_{1n}$，为近似恒功率调速，其控制特性见图 17－52。

在控制系统中，为保证电压、频率按比例协调变化，由给定积分器 GI 的输出信号 u_g 分为两路同时控制电压和频率变化。电压控制部分用来调节可控整流器的输出电压，主要由电压外环和电流内环组成。外环设电压调节器 AVR，用以调节输出电压，使其始终跟随给定电压变化。内环设电流调节器 ACR，用以限制动态电流，同时也能起到抑制故障电流的作用。频率控制部分主要由电压频率变换器 GVF、环形分配器 DRC 和脉冲放大器 AP 组成，以便送出与电压成正比的频率信号，用来控制逆变器的输出频率。

各环节的功能如下：

a. 给定积分器。将阶跃变化的转速给定信号 n^* 转换为斜坡信号 u_g，以避免阶跃信号直接加到控制系统上造成相当于直接起动的冲击电流，可保证转速开环状态下的电动机电压和转速能够平稳上升，故又称软起动器。

b. 函数发生器。在低频段用来提供定子压降补偿特性，以使低频时仍能近似地保持恒磁通调速；在额定频率以上则使输出限幅，以保证电动机在额定电压下实现近似恒功率调速。

c. 电压调节器、电流调节器。皆为比例积分（PI）调节器，将检测到的电压（或电流）作为负反馈信号与给定信号比较，根据实际需要，实现对电压（或电流）的自动控制。

d. 电压频率变换器。将输入电压信号转换成相应频率的脉冲信号，要求输出频率与输入电压之间有良好的线性关系，以确保恒压频比的条件得到满足。

e. 环形分配器。将输入脉冲信号转换为六个一组、依次间隔 60°电角度并具有一定宽度的脉冲信号，分配给逆变桥中相应晶闸管以决定其通、断。

f. 脉冲放大器。对环形分配器的输出脉冲进行功率放大并拓宽到需要的宽度，确保触发信号满足逆变桥的要求。

g. 频率给定动态校正器。用来协调动态过程中的频率变化速率，使其减慢一些以便能与具有大惯性环节的电压变化速率保持一致。

上述各环节的作用，以前都采用模拟电子电路及少量数字电路实现，组成模拟控制系统。

将微处理机引入控制系统后，以单片微机为核心，配备必要的硬件：如输入/输出接口

电路、A/D 与 D/A 转换电路、完成人机对话的键盘、显示电路等，就可以借助软件实现调速系统中的各种测试、控制功能。对于上述比较简单的系统，只需利用两片 8 位单片机 8031 加上必要的外围芯片就可以满足调速要求。给定积分器、函数发生器、PI 调节器的功能皆可由软件实现；对于相控整流桥的触发，可由微机生成间隔 60°的触发脉冲，并使控制角的变化满足 U_1/f_1 恒定的要求；180°导电型的逆变桥控制信号及防止上、下桥臂直通的死区时间也是由微机生成的，逆变器输出频率的调节，则可以根据给定频率信号改变定时器初值来实现。采用功能更强的单片微机，可以实现复杂的矢量控制技术，并具有自诊断、自测试功能。目前，调速系统正在由模拟控制向模拟—数字混合控制，向全数字控制的方向发展。

h. 电压闭环系统的近似动态结构图。上述转速开环系统中的电压控制部分是一个电压、电流双闭环系统，为导出这个双闭环系统的动态结构图，首先要找出电压型逆变器和异步电动机的传递函数。

由于异步电动机是个多变量、强耦合的非线性系统，必须先作出一些假定：忽略励磁电流，忽略异步电动机旋转电动势对动态的影响，认为磁通在动态过程中保持不变，假定各环节输入输出关系为线性等。然后才能导出近似的动态结构图。

该系统的近似动态结构图请参阅 17.10 节。

2）转差频率控制的变频调速系统。

a. 转差频率控制变频调速系统的组成。图 17－67 示出转差频率控制的转速闭环电流型变频调速系统结构原理图。

该系统主电路由可控整流器和电流型逆变器组成，逆变电路采用 120°导电型，负载为 Y 接三相异步电动机。

控制系统由转速外环和电流内环组成。转速调节器的输出即为转差频率给定值 ω_s^*，它也代表了转矩给定值。由 ASR 单元输出的 ω_s^* 分为两路，一路输入 $I_1 = f(\omega_s)$ 函数发生器 GF，其输出作为电流调节器的给定值，通过电流调节能作用到可控整流器上，去控制定子电流 I_1，使 I_1 始终跟随给定值 I_1^*，从而保持气隙磁通 Φ_m 恒定。另一路则与转速正反馈信号 ω 合成定子频率给定信号 $\omega_1 = \omega_s^* + \omega$，经过电压频率变换器、环形分配器、脉冲放大器去控制电流型逆变器的输出频率。这样，一方面使电流、频率控制得以协调；另一方面又通过转差频率 ω_s 将定子频率给定信号 ω_1^* 与电动机实际转速角频率 ω 联系起来，这种包含实际转速在内的定子频率给定信号，和 1）中仅由恒压频比确定而与转速无关的定子频率给定信号相比，性能要优越得多。

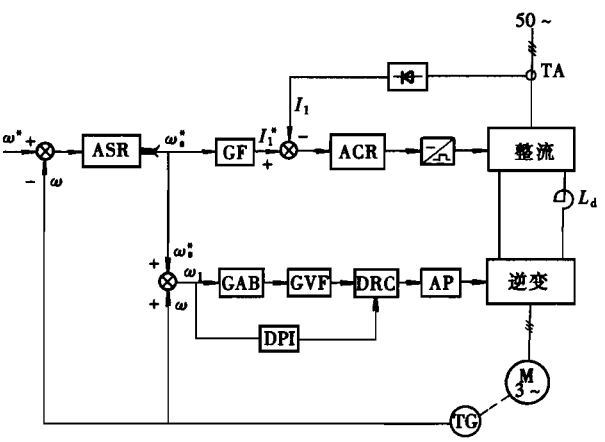


图 17－67　转差频率控制的交—直—交电流型变频调速系统结构原理图

ASR—转速调节器；GF—函数发生器；ACR—电流调节器；GAB—绝对值变换器；GVF—电压频率变换器；DRC—环形分配器；AP—脉冲放大器；DPI—极性鉴别器

*　角频率给定值。

为使该系统实现可逆传动，在频率控制部分增加了两个环节：绝对值变换器 GAB 和极性鉴别器 DPI。这是因为，在可逆传动中，转速给定信号 ω^* 可正可负，相应地 ω_1 也是可正

可负，而在决定频率大小时，并不需要这种正、负极性，故用绝对值变换器将其变换为绝对值表示的频率给定信号；但是，在控制电机转向时，又必须检测出 ω_1 的极性，故用极性鉴别器的输出来决定环形分配器的输出相序，以实现正、反转。

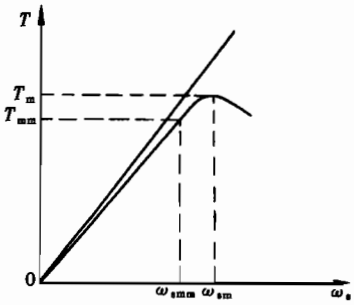


图 17－68　恒通磁时的 $T=f(\omega_s)$ 曲线

为了确保电磁转矩 T 与转差频率 ω_s 的正比关系，应使电动机运行于 $T=f(\omega_s)$ 曲线（见图 17－68）的近似直线段。为此，设置转速调节器的限幅值 $\omega_{smm}<\omega_{sm}$，以保证 T 与 ω_s 基本上成正比。

b. 近似动态结构图。在讨论转差频率控制系统的动态过程时，还须作出假定：不计异步电动机的铁损耗，忽略旋转电动势对动态的影响，认为在动态过程中不变，并且假定每个环节的输入输出关系是线性的。

该系统的近似动态结构图请参阅 17.10 节。

3）电压型逆变器旋转矢量控制系统。图 17－69 给出了电压型逆变器旋转矢量控制系统框图。

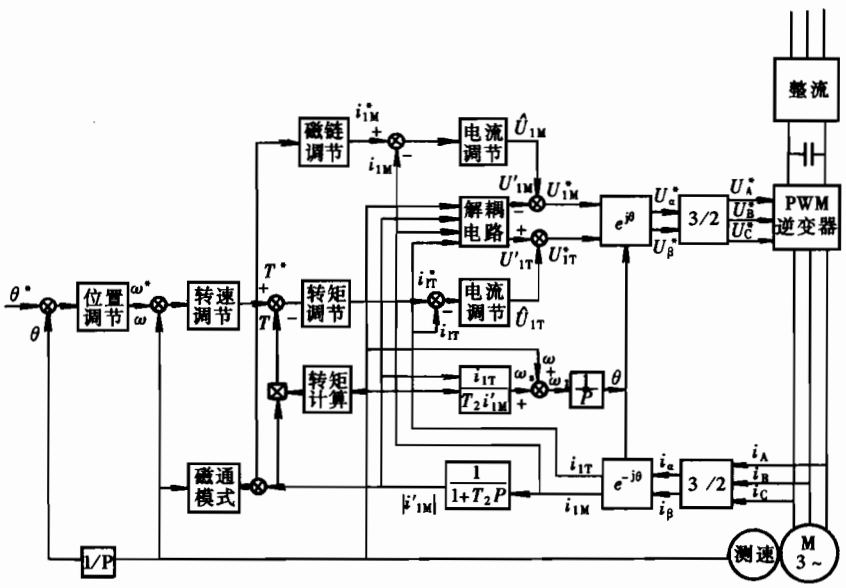


图 17－69　电压型逆变器旋转矢量控制框图

*　各参数给定值。

其他各种变频调速系统请参阅有关资料。

17.5　交、直流电动机的电气制动方式及计算方法

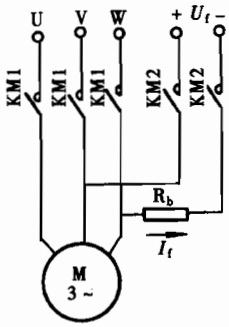
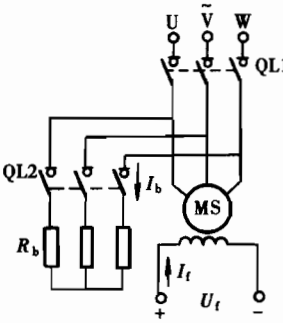
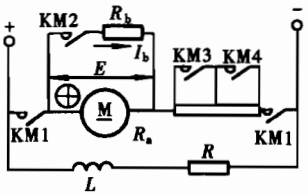
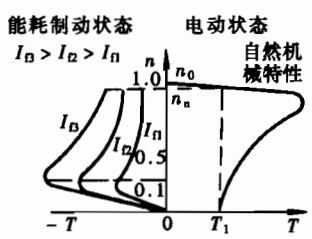
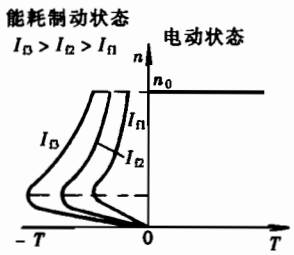
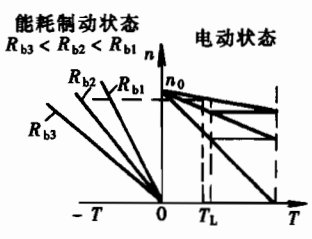
电动机需要迅速而准确地停机时，尤其是对于某些位能负载（如电梯、提升机、起重机等），为防止需要停止的机械产生滑动，应采用利用摩擦阻力的机械制动方式。常用的机械制动设备主要有：电磁制动器、电动－液压制动器、带式制动器和圆盘制动器。

在需要迅速减速、准确停车以及限制重物下放速度的场合，经常使用方便、灵活的电气制动方案。

17.5.1 能耗制动

能耗制动是将运转中的电动机从电源断开，并改接为发电机，使电能在其绕组中消耗（必要时还可消耗在外接电阻中）的一种电制动方式。各种电动机能耗制动的性能见表17－18。

表 17－18　　各种电动机能耗制动的性能

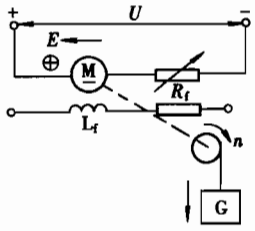
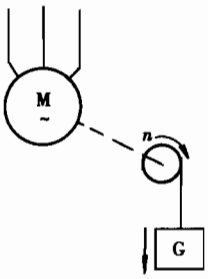
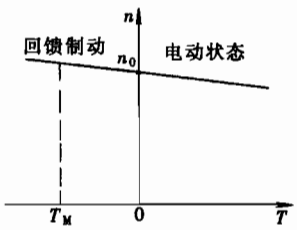
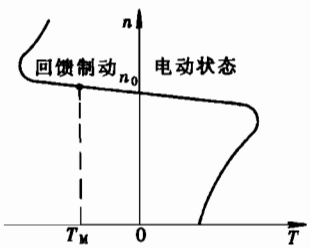
电动机类型	异步电动机	同步电动机	直流电动机
接线方式			
制动特性			
参数	一般取 $I_f = (1 \sim 2)\ I_{sn}$，I_f 越大，制动转矩越大	$Z_s = \dfrac{U_n}{\sqrt{3} I_s}$ $R_b = K_1 Z_s - R_m$ $I_s = I_{sn}$ 一般取 $I_f = 1 \sim 2 I_{fn}$	$R_b = \dfrac{E}{I_b} - R_a$ 一般取　$I_b \leqslant 1.5 \sim 2.0 I_n$
特点	1. 制动转矩较平滑，可方便地改变制动转矩 2. 制动转矩随转速的降低而减小 3. 可使生产机械较可靠地停止 4. 能量不能回馈电网，效率较低 5. 直流串励电动机因其励磁电流随制动电流的减小而减小，低速时不能得到需要的制动转矩，不宜采用能耗制动		
适用的场所	1. 适用于经常起动、频繁逆转并要求迅速准确停车的机械，如轧钢车间升降台等 2. 直流并励电动机一般采用能耗制动 3. 同步电动机和大容量笼型异步电动机因反接制动冲击电流太大，功率因数低，亦多采用能耗制动 4. 交流高压绕线转子异步电动机为防止集电环上感应高电压，亦多采用能耗制动 5. 采用单变流器的不可逆晶闸管供电系统，为获得电制动，亦多用能耗制动		

注　I_{sn}—定子额定电流，A；I_f—励磁电流，A；I_{fn}—转子额定励磁电流，A；I_b—初始制动电流，A；K_1—制动时阻抗与额定阻抗的比值；U_n—定子额定电压，V；E—制动时电枢反电动势，V；R_b—制动电阻，Ω；R_a—电枢电阻，Ω；R_m—电动机定子绕组电阻 Ω。

17.5.2 回馈制动

回馈制动是使电动机转速大于理想空载转速，将电能返回电源系统的一种电制动方式。各类电动机采用回馈制动时的接线方式、制动特性以及适用的场所见表 17－19。

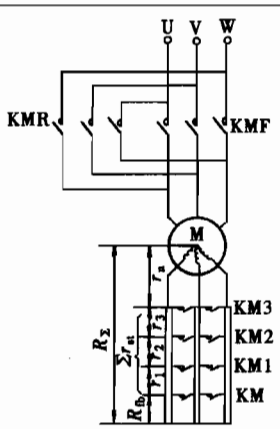
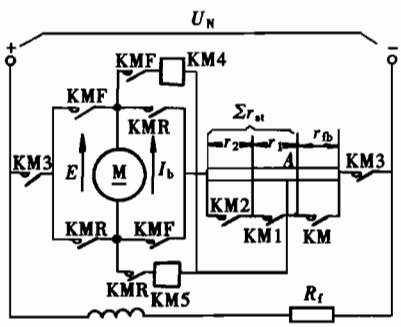
表 17－19　　回馈制动的性能

电动机类型	直流电动机	异步电动机
接线方式		
制动特性		
特点	1. 能量可回馈电网，效率高，经济 2. 只能在 $n > n_0$ 时得到制动转矩 3. 低速时不宜采用回馈制动	
适用的场所	适用于位能负载场合，高速下放重物，获得稳定制动，如起重机下放负载等	

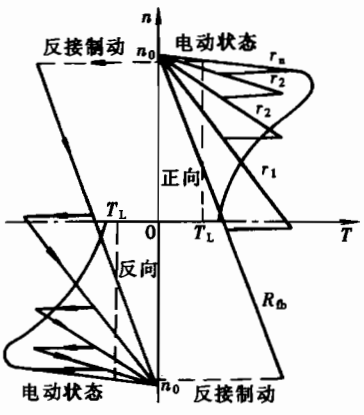
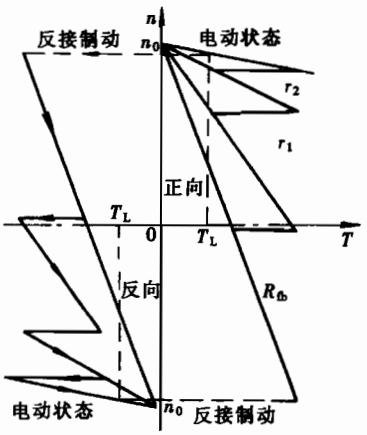
17.5.3 反接制动

反接制动是将异步电动机的电源相序反接或将直流电动机的电源极性反接而产生制动转矩的一种电制动方式。各类电动机采用反接制动时的接线方式、制动特性及适用的场所见表 17－20。

表 17－20　　反接制动的接线方式和制动特性

电动机类型	异步电动机	直流电动机
接线方式		

续表

电动机类型	异 步 电 动 机	直 流 电 动 机
制动特性		
制动电阻计算	$R_\Sigma = \frac{s_{fj}}{T_{*fj}} R_m$ $R_{fb} = R_\Sigma - \Sigma r_{st} - r_n$ $R_m = \frac{U_m}{\sqrt{3} I_m}$ $r_n = s_n R_m$ 一般取 $T_{*fj} = 1.5 \sim 2.0$	$R_{fb} = \frac{U_n + E_{max}}{I_{bmax}} - (R_a + \Sigma r_{st})$ 一般取 $I_{bmax} = (1.5 \sim 2.5) I_n$
特点	1. 有较强的制动效果 2. 制动转矩较大且基本恒定 3. 制动开始时，直流电动机电枢或交流电动机定子上相当于施加两倍额定电压，为防止初始制动电流过大，应串入较大阻值的电阻，能量损耗较大，不经济 4. 绕线转子异步电动机采用频敏变阻器进行反接制动最为理想，因反接开始时，$s_{fj} = 2$，频敏变阻器阻抗增大一倍，可以较好地限制制动电流，并得到近似恒定的制动转矩 5. 制动到零时应切断电源，否则有自动反向起动的可能	
适用的场所	1. 适用于经常正、反转的机械，如轧钢车间辊道及其他辅助机械 2. 串励电动机多用反接制动 3. 笼型异步电动机因转子不能接入外接电阻，为防止制动电流过大而烧毁电动机，只有小功率（10kW以下）电动机才能采用反接制动	

注 R_Σ—反接制动时，转子回路总电阻，Ω；T_{*fj}—反接制动转矩的标么值，$T_{*fj} = \frac{T_{fj}}{T_n}$；$s_{fj}$—反接制动开始时，电动机的转差率，一般取 $s_{fj} = 2$；s_n—电动机的额定转差率；Σr_{st}—起动电阻之和，Ω；R_{fb}—反接制动电阻，Ω；I_{bmax}—允许最大的反接制动电流，A；E_{max}—电动机最大反电动势，V；R_a—电动机电枢电阻，Ω；I_m—转子额定电流；R_m—转子额定电阻。

17.5.4 变频器传动中的制动状态

在通用变频器、异步电动机和机械负载所组成的变频调速传动系统中，当电动机减速或者所传动的位能负载下放时，异步电动机将处于再生发电制动状态。传动系统中所储存的机械能经异步电动机转换成电能。逆变器的六个回馈二极管将这种电能回馈到直流侧，此时的逆变器处于整流状态。如果在标准型的变频器（网侧变流器为不控的二极管整流桥）中不采

取另外的措施，这部分能量将导致中间回路的储能电容器的电压上升。当电动机的制动并不太快，电容器电压升高的值并不十分明显，一旦电动机恢复到电动状态，这部分能量又被负载所重新利用。当制动较快，电容器电压升得过高。装置中的“制动过电压保护”将动作，以保护变频装置的安全。所以，当制动过快或机械负载为提升机时，这部分再生能量的处理问题就应认真地对待了。

在通用变频器中，对再生能量的处理方式有三种：①耗散到直流回路中人为设置的与电容器并联的“制动电阻”中；②由并联在直流回路上的其他传动系统吸收；③使之回馈到电网。如果属于前两种工作状态，称为动力制动状态；如果属于后一种工作状态，则称为回馈制动状态（又称再生制动状态）。应该注意，这是从整个系统角度视再生电能是否能回馈到交流电网而定义的两种工作状态。在这两种状态下，异步电动机自身均处于再生发电制动状态。

（1）动力制动。利用设置在直流回路中的制动电阻吸收电动机的再生电能的方式称为动力制动，如图 17－70 所示。制动单元中包括晶体管 V_B、二极管 VD_B 和制动电阻 R_B。如果回惯能量较大或要求强制动，还可以选用接于 H、G 两点上外制动电阻 R_{EB}。当电动机制动，能量经逆变器回馈到直流侧时，直流回路电容器的电压将升高，当该值超过设定值时，给 V_B 施加基极信号使之导通，将 R_B（R_{EB}）与电容器并联起来，存储在电容中的回馈能量经 R_B（R_{EB}）消耗掉。

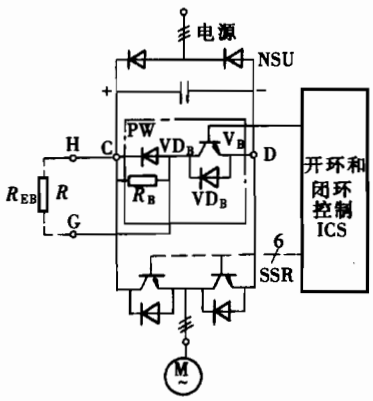


图 17－70　动力制动单元

基于这一事实，有的资料又称这种制动为“能耗制动”。

（2）回馈制动。如图 17－71（a）所示，接入 SCR 有源逆变器（桥Ⅱ）可以将电动机再生制动时回馈到直流侧的有功能量回馈到交流电网。本小节用到的各种符号的意义如图 17－71 中所示。

图 17－71（a）中的 SCR 有源逆变器的控制角 $\alpha > 90°$（即 $\beta < 90°$）时，可使电动机的制动能量回馈到交流电网。电动状态与回馈状态的转换是有条件的，回馈制动的实现，可以通过控制 β 角来实现。

负载电动机电动时，图 17－71（a）中整流桥Ⅰ应导通。由于Ⅰ桥是不可控的二极管桥，为了防止电源经Ⅰ、Ⅱ两个桥短路而出现直流环流，则应将 $U_{d\text{Ⅱ}} > U_C$ 作为控制条件。这就要求必须设置升压变压器 T。

负载电动机制动时，直流回路电容器上的电压 U_C 升高，当 $U_C > \sqrt{3}U_{n1}$（电容器上直流脉动电压的最大可能值）时，桥Ⅰ便截止，这时将 SCR 有源逆变器“投入”，可以产生逆变电流，将能量回馈到电网，并且因桥Ⅰ截止，不会出现直流环流而导致有源逆变的失败（颠覆）。

以上所述的情况，需要接入升压变压器和限环流电抗器，装置体积变大，成本提高。图 17－72 中的“再生回馈”部分属于这种控制方式。

应该注意，只有在不易发生故障的稳定电网电压下（电网压降不大于 10%），才可以采用这种回馈制动方式。在发电制动运行时，电网电压故障时间大于 2ms，则可能发生换相失败，烧坏熔断器，对于接触式供电的电机车，应特别防止接触的间断，如果不能保证这一

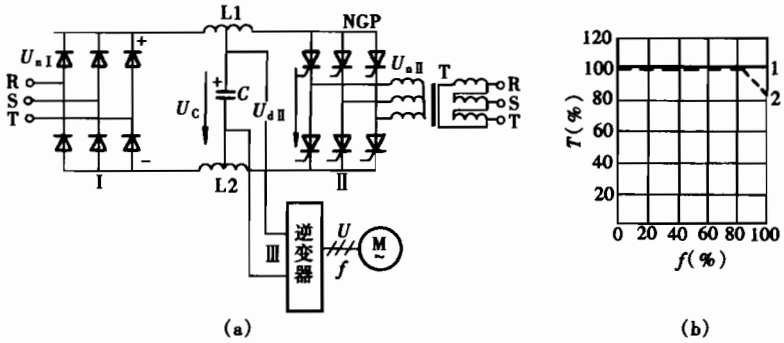


图 17－71　再生能量回馈的原理图和转矩特性

(a) 带变压器的 SCR 有源逆变回馈电路；(b) 转矩特性 $T=F(f)$

1—矢量控制电动运行；2—矢量控制制动运行和 U/f 控制电动、制动运行

点，建议采用脉冲电阻制动方式，以保证可靠性。

(3) 采用共用直流母线的多逆变器传动。有些生产工艺，例如拉伸机，是一种多电动机传动系统，但每台电动机都要由一台变频器单独传动。其中每台电动机既可以单独处于电动状态，又可以单独处于制动状态，这是由生产工艺决定的。

采用通用变频器传动时，必须考虑再生能量的处理问题，除了前面所述的对每台单机都可以采用标准的制动电阻单元 PW 或再生能量回馈 (NGP) 方式以外，在特定的情况下，共用直流母线方式可以用于多机传动系统。

图 17－72 示出了共用直流母线的两种方式。图 17－72 (a) 的方式为共用直流均衡母线 (Common DC Equalizing Bus)；图 17－72 (b) 为共用直流回路母线 (Common DC Link Bus)。

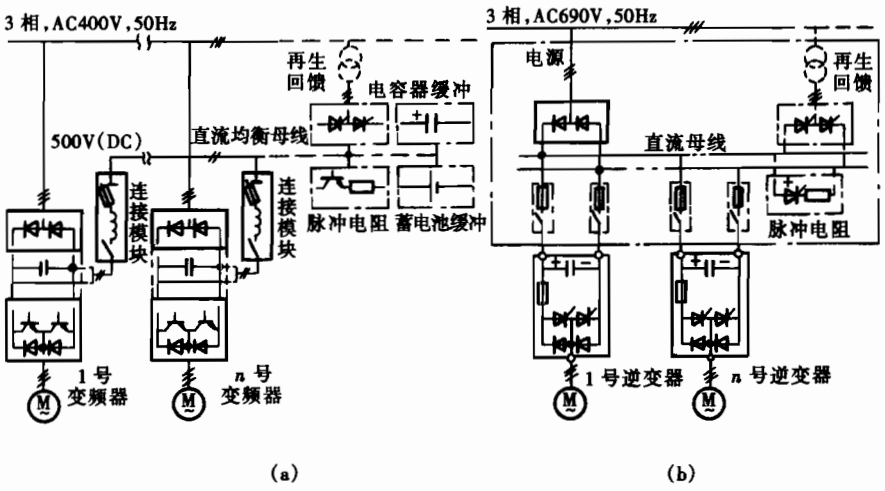


图 17－72　共用母线方式

(a) 多台变频器在共用直流均衡母线上控制多台电动机运行；

(b) 多台变频器用共用直流母线方式控制多台电动机运行

共用直流均衡母线方式是利用连接模块连到直流回路母线上，连接模块中包括电抗器、熔断器和接触器，它必须根据具体情况单独设计。每台变频器具有相对的独立性，按需要可接入或切离直流母线。

共用直流回路母线方式，是仅将逆变器部分连接到一个公共的直流回路上。

由于 PWM 逆变器的中间直流电压是恒定的，所以上述方案是可行的。

共用直流均衡母线方式有如下的优点：

1）多机传动系统中每台单机的再生能量可以被充分利用，多台逆变器一般不会同时处于制动状态下，少数制动的逆变器回馈到直流侧的能量，可以被正处于电动状态下的另一些逆变器所吸收。

2）制动引起的再生能量可以耗散于集中的制动电阻上，也可以通过集中的 NGP 回馈给电网。

3）利用蓄电池或者电容器实现对电源瞬时停电的集中缓冲是可能的。

对于这种设计方案，制造厂家只提供各单独的部分，总体的设计不得不由用户自己完成。

共用母线方式，又称为“直流配电式”传动方式。

（4）直流制动。上面谈到的情况，制动中电动机均处于再生发电制动状态。下面说明电动机处于能耗制动状态的情况。通用变频器向异步电动机的定子通直流电时（这意味着逆变器中某 3 个桥臂短时间内连续导通，不再换相），异步电动机便处于能耗制动状态。这种情况下，变频器的输出频率为零，异步机的定子磁场不再旋转，转动着的转子切割这个静止磁场而产生制动转矩。旋转系统存储的动能转换成电能消耗于异步电动机的转子回路中。

这种变频器输出直流的制动方式，在通用变频器的资料中称为“DC 制动”（即“直流制动”）。

这种 DC 制动方式的用途主要有两种：一是用于准确停车控制；二是用于制止在起动前电动机由外因引起的不规则自由旋转。

一种可能的准确停车方案如图 17－73 所示。图 17－73（a）表示通用变频器的输出频率和 DC 制动中电动机转速随时间的变化规律，图 17－73（b）为与图 17－73（a）相对应的异步电动机的静态机械特性。如图 17－73（a）所示，在运行信号的作用下，变频器首先开始连续降频，达到 f_{DB}后则开始直流制动，使输出频率变为零。电动机则经历再生发电制动和能耗制动后最终停止。如果调整得当，生产机械将准确地停止在预定位置上。

通用变频器中对直流制动功能的控制，主要通过设定 DC 制动起始频率 f_{DB}、制动电流 I_{DB}和制动时间 t_{DB}来实现，f_{DB}、I_{DB}和 t_{DB}的意义如图 17－73（a）所示。

通常情况下，起始制动频率不宜设定得太高。例如图 17－73（a）中的 f_{DB}是比较合适的。在这个 f_{DB}下，电动机的运行情况如图 17－73（b）所示，经历了 A→B→C→D→0 的减速停车过程。其中，B→C 的连续降频过程中，电动机处于再生发电制动状态；而频率小于 f_{DB}的 D～0 阶段，电机处于能耗制动状态（即所谓 DC 制动状态）。

如果起始制动频率取得太高，例如取成图 17－73 中的 f_1，则不合理。由于制动直流电流 I_{DB}可以人为设定在一个恰当的值，使逆变器输出电流可以被限制在允许的范围内，单纯就逆变器而言，似乎是合理的；但是，对电动机而言，制动一开始的运行工作点将由图 17－73（b）中的 A 点过渡到 E 点。而在 E 点，异步电动机的转子电流的频率和幅值都会很高，转子铁损耗也很大，导致电动机发热严重；但得到的制动转矩却并不太大，显然这是不合理的。如果生产机械要求频繁制动停车，更不宜将 f_{DB}设定得太高，不然电动机将过热。

I_{DB}的设定，实际上是对异步电动机定子电流的设定。I_{DB}不同，异步电动机 DC 制动状态下的转矩特性亦不同。图 17－73（b）中的两条转矩特性相比较，显然虚线所示的特性所

对应的 I_{DB}比较小。

电动机由 f_{DB}所对应转速减速到零所用的时间由旋转系统的 GD^2、生产机械的静阻力矩和变频器 I_{DB}设定值共同决定。如果这个时间大于变频器的最大可能的 t_{DB}，见图 17－73(a)，电动机可能进入自由停车的滑行状态，这一点应当注意。

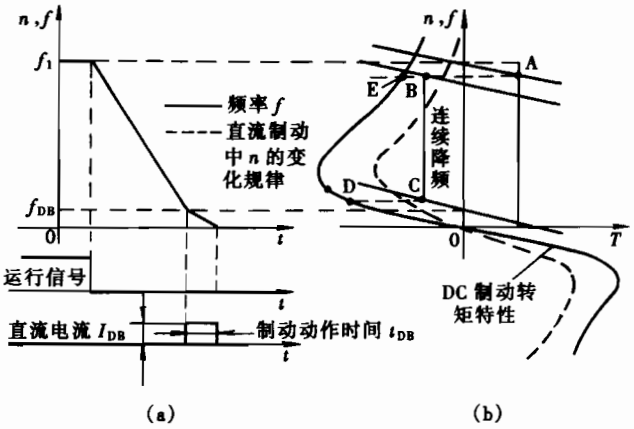


图 17－73　利用 DC 制动实现准确停车

(a) 时序关系；(b) 静态机械特性

对于风机类负载，当处于停车状态时，电动机可能由于风筒中风压的作用而自由旋转，有时还可能反转。因此，对于这种情况，可以利用直流制动功能在起动前使其迅速静止下来，保证设备从零速开始起动。这就是有些资料中所说的 DC 制动功能在起动时的应用。

17.6　电动机保护配置及计算方法

电动机的保护应根据电动机的类型、功率大小、使用场所以及所拖动的生产机械的重要程度等因素而定。通常，对于每台电动机至少应装设短路保护，对于功率为 3kW 以上连续运转的电动机还应该加设过载保护，频繁起、制动的电动机难以用热继电器实现过载保护，可用过电流继电器实现过电流保护，以防止电动机因堵转而损坏。

17.6.1　交流电动机的保护

交流电动机应装设短路保护，并根据不同情况分别装设防止电动机过载、两相运行、低电压运行等保护装置。

(1) 短路保护。交流电动机的短路保护应满足下述要求：

1) 当电动机端子处发生相间短路，或者对于中性点直接接地系统中发生单相接地短路时，保护装置应尽快切断故障电路。

2) 当电动机正常起、制动及自起动时，保护装置不应误动作。

短路保护宜采用熔断器或具有瞬时动作（或短延时）脱扣器的低压断路器；对个别功率较大的重要电动机，也可采用过电流继电器，作用于低压断路器。

如果采用由过电流继电器作用于接触器的短路保护装置，应校验接触器的最大分断能力，不能满足要求时不宜采用。

由低压断路器和接触器组成的电动机供电线路，当短路电流大于接触器的“弹开电流”（接触器触头因短路电流产生的电动力而自动弹开时的电流）时，即使低压断路器在接触器

释放前断开，接触器的触头仍会因短路电流电动力的作用而弹开，发生强烈电弧，灼伤触头，产生熔焊，使接触器不能继续工作。在这种情况下，对操作不频繁的电动机，可采用带电动操作机构的低压断路器代替上述低压断路器和接触器组成的线路。对频繁操作的电动机，应尽量将接触器放在供电线路的末端，以减小接触器后端的短路电流，使其小于“弹开电流”。

在短路电流小于接触器“弹开电流”时，由于有些接触器的失压动作时间比低压断路器全断开时间短，可能在低压断路器还未断开前，由接触器断开短路电流，因而仍然达不到装设保护装置的目的。而 CT12 型接触器的失压释放时间比低压断路器全断开时间长，发生短路时，接触器比低压断路器后断开，从而可避免上述危险。

电动机短路保护的元件可按下述要求装设：

1）在中性点直接接地的系统中，应在每相上装设。

2）在中性点不接地的系统中，以熔断器作保护时，应在每相上装设；用低压断路器作保护时，应在不少于两相上装设。此时，要注意同一系统中的保护装置应装在相同的两相上。

原则上，每台电动机应装设单独的保护装置。只有在总电流不超过 20A 时，才允许数台电动机共用一套保护装置。

经常有人操作的绕线转子电动机采用过电流继电器保护时，宜采用自动复归的过电流继电器。经常无人操作的场所，宜选用手动复归的过电流继电器。

采用低压断路器作短路保护时，脱扣器的整定电流可按下式确定

$$I_{cst} = K_{rel1} I_{st} \tag{17-59}$$

式中 I_{cst}——低压断路器瞬时（短延时）过电流脱扣器整定电流，A；

I_{st}——被保护电动机的起动电流，A；

K_{rel1}——可靠系数，短延时及瞬时动作时间大于 20ms 的低压断路器，一般取 1.35，瞬时动作时间小于 20ms 的低压断路器，一般取 1.7～2。

校验灵敏度为

$$K_l = K_{lx} \frac{I^{(3)}_{kmin}}{I_{cst}} \tag{17-60}$$

式中 K_{lx}——两相短路时的相对灵敏系数，一般取 0.87；

$I^{(3)}_{kmin}$——电动机端子上三相短路电流的最小值，A。

采用熔断器作短路保护时，其熔体电流可由下式计算确定

$$I_{rn} \geq \frac{I_{st}}{\alpha} \tag{17-61}$$

式中 I_{st}——电动机起动电流；

α——决定于起动状况和熔断器类型的系数，其值为 2～4。

（2）过载保护。电动机的过载保护装置可按下列要求装设：

1）容易过载或堵转的电动机，以及由于起动或自起动条件沉重而需要限制起动时间或防止起动失败的电动机，必须装设过载保护装置。

2）重复短时和短时工作制的电动机及 3kW 以下长期工作的电动机可不装设。

3）同步电动机应装设过载保护，并作为失步保护。

过载保护一般采用热继电器或带长延时脱扣器的低压断路器，对大功率的重要的电动

机，应采用反时限特性的过电流继电器，过载保护一般用以切断电动机电源实现保护。必要时可采用发出警告信号或使电动机自动减载。

有堵转可能的电动机（如电动闸阀等），当短路保护装置不能适用其堵转要求时，应装设定时限过电流保护，其时限应保证电动机起动时保护装置不动作。

连续运转和移动设备应装设防止两相运行的保护装置，但符合下列情况之一者可不装设：

1）运行中定子为星形联结，且装有过载保护者。

2）经常有人监督，能及时发现断相故障者。

3）用低压断路器作线路保护者。

防止两相运行的保护，可采用带断相保护的三相热继电器或其他专用保护器件。

当采用长延时脱扣器低压断路器做过载保护时，脱扣器的整定电流可按下式计算

$$I_{cst} = K_{rel2} I_n \tag{17-62}$$

式中 I_{cst}——低压断路器长延时脱扣器整定电流，A；

I_n——电动机的额定电流，A；

K_{rel2}——可靠系数，一般取 $K_{rel2} = 1.1$。

根据起动时间的长短，选择长延时脱扣器的安秒特性。按规定，脱扣器额定电流在50A以下时，通过6倍动作电流的可返回时间有大于1s和大于3s两种；当脱扣器额定电流为50A以上时，通过6倍动作电流的可返回时间有大于3s及大于8s或大于15s三种。

（3）欠电压保护。

1）电动机的欠电压保护可按下列要求装设：

a. 电动机一般应装设瞬时动作的欠电压保护元件；但对功率不超过10kW的电动机，当工艺和保安条件允许自起动时，可不装设。

b. 不需要和不允许自起动的重要电动机，应装设短延时的欠电压保护，其延时的时限应比自动重合闸和备用电源自动合闸的时限大一级。

c. 需要随时自起动的重要电动机，不装设欠电压保护；但按保安条件，在停转后不允许自起动时，或因分级自起动而要切除时，应设长延时的失电压保护，其延时时间应根据机组的全部惰行时间决定，一般为5～10s。

d. 具有备用设备时，为了在电源被取消后能及时断开电动机而投入备用设备，可装设瞬时动作的失电压保护或短延时的欠电压保护元件。

2）欠电压保护一般由起动器或接触器来实现。当控制回路与主回路不是接在同一电源电路时，应在主回路装设欠电压继电器。当主回路电压过低时，通过欠电压继电器自动切断控制回路。对b和c项所述的重要电动机，当采用起动器或接触器作为控制设备时，应在控制回路中采取措施，防止起动器或接触器在电压瞬时降低或中断时自行释放。

3）欠电压保护的动作电压整定值 U_{cst} 可按下述要求整定：

a. 对于一般三相交流感应电动机，当负载转矩为100%额定转矩时，取 $U_{cst} = 0.7U_n$（U_n 为电源额定电压），当负载转矩为50%额定转矩时，取 $U_{cst} = 0.5U_n$。

b. 对于同步电动机分为：

无强励时 $U_{cst} = 0.7 \sim 0.75U_n$

有强励时 $U_{cst} = 0.5U_n$

动作时限为10s。

强励装置的动作电压　$U_{cst}=0.85\sim0.9U_n$

4）整定时间一般要求延时的时限大于备用电源自动合闸装置的动作时间，通常可取1～10s。

需要自起动的电动机，应分别视生产工艺要求的重要程度来整定欠电压保护的时间。越是重要的电动机其时限越长。

17.6.2　直流电动机的保护

直流电动机应装设短路保护装置，并应根据不同情况分别装设过载、弱磁、欠电压、过电压、超转速等保护元件。

直流电动机的短路保护应满足下述要求：

（1）当电动机端子处发生短路时，保护装置应尽快切断电源。

（2）当电动机正常起动时，保护装置不应误动作。

电动机的短路保护可采用熔断器、带瞬时动作脱扣器的低压断路器，也可以采用作用于接触器动作的过电流继电器。对于大功率电动机和采用晶闸管变流器供电的电动机，应采用快速断路器。

短路保护所用器件，可以只在一个极上装设，但同一系统中均应装在同一极上。

每台电动机应装设单独的短路保护装置，采用过电流继电器保护时，对于经常有人操作的场所，宜选用自动复归的过电流继电器，而对于经常无人操作的场所，则宜选用手动复归的过电流继电器。过电流继电器或低压断路器脱扣器的动作整定值，一般按电动机最大工作电流的110%～115%进行整定。

除串励电动机外，均需装设弱磁保护。复励电动机的弱磁保护，应考虑电动机在起动过程中的电枢反应的去磁作用，此时应选用带短延时的欠电流继电器。弱磁保护动作整定值，一般按电动机最小励磁工作电流值的80%进行整定。

对有可能出现超速运转的电动机，如卷扬机、轧机等机械传动用的电动机，应装设超速保护元件。通常超速保护采用离心式转速继电器，超速保护动作整定值，按电动机最高工作转速的110%～115%进行整定。

采用发电机供电时，应装设过电压保护装置。过电压保护的动作整定值，一般按发电机额定电压（单独发电机供电时，则按电动机端的额定电压）的110%～115%进行整定。

电动机一般应具有瞬时动作的失电压保护，由接触器来实现。当控制回路与主回路由不同电源供电时，应在主回路装设低电压继电器，以保证当主回路断电时能自动切断控制回路电源。

17.7　低压电动机控制电器的选择

17.7.1　隔离器的选择

隔离器主要用来隔离电源，一般不用于直接接通或断开负载，选择时应重点考虑：

（1）额定电压。隔离器的工作电压应大于或等于线路的工作电压。

（2）额定电流。隔离器的额定电流应大于或等于线路（计算）的工作电流。

（3）分断负载能力。刀开关的分断电流能力与操作方式、工作电压和有无灭弧室等有关，其值与额定电流 I_n 的关系见表17－21。

（4）最大短时（1s）耐受电流能力。当线路发生短路时，过大的短路电流峰值将可能使刀开关的触点弹出，或者由于短时过大的热容量而使其触点被熔焊。因此，刀开关允许的最

大短时（1s）耐受电流，见表 17－22，必须大于或等于线路最大预期短路电流。如果不能满足此条件，亦可选用 F5 或 F6 等熔断器式刀开关，见表 17－23。

表 17－21　　刀开关的分断能力

刀开关的结构类型		断开电流值			
		交流 $\cos\varphi=0.7$		直流 $T=0.1s$	
		380V	500V	220V	440V
中央手柄		无负载时切断电路			
中央杠杆 侧面杠杆 侧面手柄	未装灭弧室	$0.3I_n$		$0.2I_n$	
	装有灭弧室	I_n	$0.5I_n$	I_n	$0.5I_n$

表 17－22　　F11～F14 单投刀开关及 F11～F13 双投刀开关的技术数据

额定电流（A）		100	200	400	600	1000	1500	3000
机械寿命（次）		10000	10000	10000	5000	5000	5000	
电寿命（次）		1000	1000	1000	500	500		
最大短时耐受电流（有效值，kA）		6	10	20	25	30	40	60
最大短时耐受电流峰值（kA）	手柄式	15	20	30	40	50		
	杠杆式	20	30	40	50	60	80	125

表 17－23　　F5 或 F6 熔断器式刀开关的技术数据

型号	约定发热电流（A）	接通和分断能力			额定熔断短路电流 $\cos\varphi=0.25$（最大预期峰值电流，kA）	机械寿命接通次数	电寿命接通次数
		～380V $\cos\varphi=0.35$ 接通（A）	～380V $\cos\varphi=0.35$ 分断（A）	～660V $\cos\varphi=0.65$ 接通、分断（A）			
HR5－100	100	1000	800	300	50（100）	3000	600
HR5－200	200	1600	1200	600	50（100）	3000	600
HR5－400	400	3200	2400	1200	50（100）	1000	200
HR5－630	630	5040	3780	1890	50（100）	1000	200
HR6－160	160/100*	1280	960	480	50（100）		
HR6－250	250/200	2000	1500	750			
HR6－400	400/315	3200	2400	1200			
HR6－630	630/425	5040	3780	1890			

* 分母为额定电压 660V 时的工作电流，分子为额定电压 380V 时的工作电流。

17.7.2　断路器的选择

断路器主要用于线路的过载、短路、逆电流、欠电压及漏电保护。按用途的不同，低压断路器的分类见表 17－24。

表 17－24　　按用途分类的低压断路器

名　称	电流种类和范围①	保　护　特　性			主要用途	可选用的断路器类型
配电用断路器	交流 200～4000A	选择型 B 类	两段保护，瞬时，短延时		作电源总开关和靠变压器近电源端支路开关	DW15M，F 系列，AH 系列，DZ20、NS、S 系列
			三段保护，瞬时，短延时，长延时			
		非选择型 A 类	限流型	长延时，瞬时	靠变压器近端支路开关	
			一般型		支路末端开关	
	直流 800～8000A	快速型	有极性，无极性		保护硅整流设备	
		一般型	长延时，瞬时		保护一般直流设备	
电动机保护用断路器	交流 60～630A	直接起动	一般型	过电流瞬时动作倍数：(8～15) I_n	保护笼型异步电动机	NS、S 系列，DZ20 系列，CM1 系列，TO、TG 系列
			限流型	过电流瞬时动作倍数：$12I_n$	同上，还可装在近变压器端	
		间接起动	间接起动	过电流脱扣器瞬动倍数：(3～8) I_n	保护笼型和绕线转子异步电动机	
导线保护用、照明用断路器	交流 6～125A 常用 6～63A	过载长延时，短路瞬时			用于生活建筑内电气设备和信号二次电路，多为单极	CM1 系列，C45N 系列，C65 系列
漏电保护断路器	交流 20～200A	电磁式	漏电动作灵敏度按使用目的不同分档，如 15，30，50，75，100mA，0.1s 分断		确保人身安全，防止因漏电而引起火灾或触电死亡	DZ15L 系列，GS250S 系列
		集成电路式				
灭磁断路器	直流 200～2500A	瞬时动作，与发电机组配套			当发电机发生内、外部故障时，切断励磁回路，用作灭磁开关、闭合开关等	DM2，DM3

①电流范围根据需要可以超出。

（1）额定电流与额定电压。断路器的额定电流和额定电压应大于或等于线路的计算电流和最大工作电压。

（2）瞬时动作过电流脱扣器整定值 I_{cst}，I_{cst}应大于尖峰电流，即

$$I_{cst} > KI_{st} \quad A \tag{17-63}$$

式中　I_{st}——电动机的起动电流，A；

K——考虑整定误差和起动电流容许变化的可靠系数，对动作时间在 20ms 以内的断路器，不需考虑非周期分量的影响，对动作时间大于 0.02s 的断路器，K 一般取 1.2～1.35，对动作时间小于 0.02s 的断路器，K 取 1.7～2。

保护电动机用的断路器，其可调式瞬时过电流脱扣器的整定电流调节范围为 3～6 倍或 8～12 倍脱扣器额定电流；其不可调式瞬时过电流脱扣器的整定电流为 5（或 10）倍脱扣器

额定电流，动作电流值与整定电流值的误差不大于±10%。

(3) 长延时动作的过电流脱扣器整定值

$$I_{cst} > KI_c \quad A \tag{17-64}$$

式中 I_c——线路计算电流，A。

长延时动作的过电流脱扣器在电动机长期过载（<20min）20%时应动作，而在电动机起动时不应动作。

延时可调式过电流脱扣器的整定电流调节范围为0.7~1.0倍脱扣器额定电流，返回电流值为其整定值的100%。不可调式过电流脱扣器的返回电流值亦为整定值的100%。

17.7.3 熔断器的选择

熔断器的熔断电流，取决于流过熔体的工作电流、周围介质的温度、熔断器的预热情况和电动机的起动时间等。熔断器一般不作过载保护用，而是作长期工作制电动机的起动和短路保护。

(1) 对于减压起动的交流电动机，选用熔断器熔体的额定电流等于或略大于电动机的额定电流。

(2) 对于直接起动的笼型异步电动机，若熔断器的熔体选得过小，造成某一相熔断，会发生电动机单相运转烧毁事故。所以熔体额定电流值 I_{Rn}与起动电流及起动时间应适当配合，即

$$I_{Rn} = KI_{st} \tag{17-65}$$

式中 I_{st}——起动电流，A；

K——随起动时间而定的系数，见表17-25。

(3) 熔断器熔体的熔断时间与起动设备的动作时间要配合好，当短路电流超过起动设备的极限分断电流时，要求熔体的熔断时间小于起动设备的分断时间，以免损坏起动设备。如果不能满足此条件，可以采用下列方法之一：

1) 改用快速动作的低压断路器。

2) 选用较大分断电流的起动设备。

表17-25 K 值

起动时间（s）	K值
<3	0.25~0.35
3~8	0.4~0.5
>8或起动频繁或带反接制动	0.5~0.6

17.7.4 接触器的选择

接触器用途广泛，在不同的使用场合，其差别很大，即其额定工作电流或额定控制功率是一个随使用条件（额定工作电压、使用类别和操作频率等）不同而变化的参数。因此，应根据不同的使用条件，正确地选择产品的类型及容量等级，才能保证接触器在控制系统中长期可靠地运行。选用原则如下：

(1) 按使用类别选用，见表17-26和表17-27。通常交流接触器的电寿命指标大都是指AC3负载下的参数。由于其电寿命几乎与实际断开电流的二次方成反比，如在AC3下电寿命为100万次的接触器用于AC4时，其电寿命降低到不足3万次。因此，用于AC4时，必须降容使用。通常视AC4负载所占比重的大小而确定降容的多少。如小于10%时降容一个等级，大于10%时降容两个等级。

(2) 按电动机的额定功率或负载的计算电流选择接触器的容量等级，并适当留有裕量。

(3) 按主回路的工作电压选择接触器的额定电压。

(4) 根据控制电源要求，选择吸引线圈电压。

（5）按联锁触头的数目和所需分断的电流大小确定辅助触头。

（6）用接触器控制电容负载时，必须考虑接通瞬间的浪涌电流峰值，应尽量选用专用于容性负载的接触器。如果用普通接触器，一般应按该电容支路的最大工作电流加大一级容量选用，可以在回路中增加限流电抗或限流电阻来限制涌流。

表 17－26　　交流接触器的使用类别及控制对象

使用类别代号	负载性质	接通条件			分断条件			可选用的接触器
		电流（A）	电压（V）	功率因数①	电流（A）	电压（V）	功率因数①	
AC1	无感或微感负载，电阻炉	I_n	U_n	0.5	I_n	U_n	0.95	各类接触器均可选用
AC2	绕线转子异步电动机起动和运转中断开	2.5 I_n	U_n	0.65	I_n	0.4U_n	0.65	CJ12 系列
	绕线转子异步电动机的起动、反接制动、反向与频繁通断	2.5 I_n	U_n	0.65	2.5I_n	U_n	0.65	
AC3	笼型异步电动机的起动和运转中断开	6I_n	U_n	$I_n \leqslant 16A$ 0.55 $I_n > 16A$ 0.35	I_n	0.17 U_n	$I_n \leqslant 16A$ 0.55 $I_n > 16A$ 0.35	CJ20、B 系列、LC 等
AC4	笼型异步电动机的起动、反接制动、反向与频繁通断	6I_n	U_n	$I_n \leqslant 16A$ 0.55 $I_n > 16A$ 0.35	6I_n	U_n	$I_n \leqslant 16A$ 0.55 $I_n > 16A$ 0.35	各类接触器均可选用，但应降容使用

①功率因数误差为 ±0.05。

表 17－27　　直流接触器的使用类别及控制对象

使用类别代号	负载性质	接通条件			分断条件			可选用的接触器
		电流（A）	电压（V）	时间常数①（ms）	电流（A）	电压（V）	时间常数①（ms）	
DC3	起动和运转中断开的并励电动机	2.5 I_n	U_n	20	I_n	0.1 U_n	7.5	CZ0 等系列
	起动、反接制动、反向与密接通断的并励电动机	2.5 I_n	U_n	2	2.5 I_n	U_n	2	
DC5	起动和运转中断开的串励电动机	2.5 I_n	U_n	15	I_n	0.3 U_n	20	CZ0 系列，但应降容使用②
	起动、反接制动、反向与密接通断的串励电动机	2.5 I_n	U_n	15	2.5 I_n	U_n	15	

①时间常数误差为 ±15%。

②由于直流接触器一般均采用磁吹灭弧结构，存在断开临界电流问题，若电流太小将不能灭弧，故降容后的额定工作电流不应低于产品的临界熄弧电流。

17.7.5　保护继电器的选择

有关保护用继电器的选用可参考表 17－28。

表 17-28　　主要的保护用继电器的选用

类　型	功　能　说　明	选　用　方　法
热继电器	作长期或间断长期工作制交流异步电机的过载保护和起动过程的过热保护，不宜作重复短时工作制的笼型和绕线转子异步电动机的过载保护	按电动机额定电流 I_{Mn}选择热元件额定电流 I_{Kn}，即 $I_{Kn}=(0.95\sim1.05)\ I_{Mn}$ 在长期过载 20%时应可靠动作，此外，热继电器的动作时间必须大于电动机起动或长期过载时间
过电流继电器	用于频繁操作的电动机起动及短路保护	1. 继电器额定电流 I_{Kn}应大于电动机额定电流 I_{Mn}，即 $I_{Kn}>I_{Mn}$ 2. 动作电流整定值 I_{Kset}对交流保护电器，按电动机起动电流 I_{st}，$I_{Kset}=(1.1\sim1.3)\ I_{st}$。对直流继电器，按电动机最大工作电流 I_{Mmax}，$I_{Kset}=(1.1\sim1.15)\ I_{Mmax}$
过电压继电器	用于直流电动机（或发电机）端电压保护	1. 继电器线圈额定电压 U_{Kn}按系统过电压时线圈两端承受的电压不超过继电器额定电压来选择，一般线圈必须串接附加电阻 R_{ad}，其阻值计算方法（假定继电器整定电压 U_{Kset}为额定值 U_{Kn}的 40%及线圈电阻为 R_j时）取 $$R_{ad}=(2.75\sim2.9)\frac{U_{Mn}}{U_{Kn}}R_j-R_j$$ 式中　U_{Mn}—电动机的额定电压 2. 过电压动作整定值 U_{Kset}按电动机额定电压 U_{Mn}选取，$U_{Kset}=(1.1\sim1.15)\ U_{Mn}$
失磁保护	选用欠电流继电器，接于直流电动机励磁回路，以防止电动机失磁超速	1. 继电器额定电流 I_{Kn}应大于电动机的额定励磁电流 I_{Ln}，即 $I_{Kn}>I_{Ln}$ 2. 继电器释放电流整定值 I_{Kf}按电动机的最小励磁电流 I_{Lmin}整定 $I_{Kf}=(0.8\sim0.85)\ I_{Lmin}$
欠电压保护	在交流电源电压降低或消失而使电动机切断后，为防止电源电压恢复时可能引起的电动机自起动，亦用于保护电动机因长时间低电压而过载运行	继电器额定电压 U_{Kn}按回路额定电压 U_n选定，对释放值一般系统无特殊要求
超速保护	作电动机或工作机械的最高转速保护	动作整定值 n_{set}按最高工作转速 n_{max}整定，选取 $n_{set}=(1.1\sim1.15)\ n_{Mmax}$

17.8　电动机调速系统性能指标

17.8.1　调速系统的静态指标

(1) 调速范围。生产机械要求电动机能提供的最高转速 n_{max}最低转速 n_{min}之比叫做调速范围。常用 D 表示，即

$$D=\frac{n_{max}}{n_{min}} \tag{17-66}$$

式中 n_{max}和 n_{min}一般都指额定负载时的转速。闭环调速系统的调速范围可达 100:1 或更大。

(2) 静差率。电动机在某一转速下运行时，负载由理想空载变到额定负载时所产生的转速降落与额定负载时的转速之比称为静差率（又称转速变化率）s，常用百分数表示，即

$$s=\frac{n_0-n}{n}\times100\% \tag{17-67}$$

式中 n_0——电动机理想空载转速；

n——电动机额定负载时的转速。

闭环调速系统的静差率一般为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$。

(3) 稳速精度。在稳速系统中常用稳速精度的概念，即在规定的电网质量和负载扰动的条件下，在规定的运行时间（如 1h 或 8h）内，在某一指定的转速下，t 时间（通常 t 取 1s）内平均转速最大值 n_{max}和另一个 t 时间内平均转速最小值 n_{min}的相对误差的百分值，来表明稳速系统的性能

$$\text{稳速精度} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100\% \tag{17-68}$$

数字稳速系统的稳速精度可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$。

17.8.2 调速系统的动态指标

直流传动系统的动态指标是指在控制信号或扰动信号的作用下，系统输出在动态响应中的各项指标。

(1) 控制信号作用下的动态指标。电气传动系统中常用的控制信号通常有以下两种：

1) 单位阶跃信号，见图 17-74 (a)

$$C(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geqslant 0 \end{cases}$$

2) 斜坡平顶信号，见图 17-74 (b)

$$C(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ At & 0 \leqslant t \leqslant t_0 \\ 1 & t > t_0 \end{cases}$$

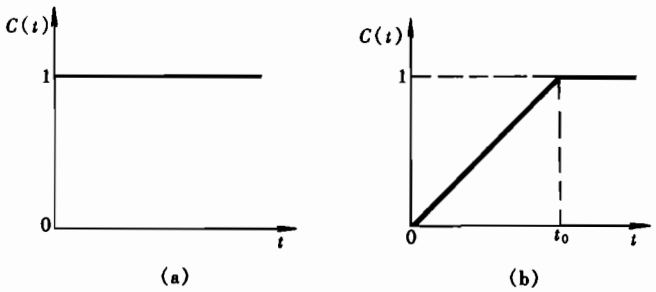


图 17-74 系统控制信号

(a) 阶跃信号；(b) 斜坡平顶信号

对直流传动系统，在阶跃信号 $C(t)$ 的作用下，输出量 $Y(t)$ 的动态响应如图 17-75 所示。

通常用下述指标来衡量系统的动态指标：

1) 起调时间 t_a，又称响应时间，是指输出量 $Y(t)$ 第一次达到稳态值的时间。

2) 调节时间 t_r，是指 $Y(t)$ 进入稳态值的 ± (2% ~ 5%) 区域内，而不再逸出的时间又称为过渡过程时间。

3) 超调量 $\sigma\%$，是指 $Y(t)$ 超过其稳态值的最大数值与稳态值之比，用百分数表示

$$\sigma\% = \frac{Y(t_m) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\% \tag{17-69}$$

4）振荡次数 N，是指 $Y(t)$ 在整个调节过程中围绕稳态值摆动的次数。

5）误差绝对值的时间积分 S_1，是指 $Y(t)$ 与期望值误差 $e(t)$ 的绝对值，在调节时间内的积分值

$$S_1 = \int_0^{t_r} |e(t)|\,dt \tag{17-70}$$

6）误差二次方的时间积分 S_2，是指 $Y(t)$ 与期望值误差 e (t) 的二次方，在调节时间内的积分值

$$S_2 = \int_0^{t_r} e^2(t)\,dt \tag{17-71}$$

7）时间误差绝对值积分 S_3，是指 $Y(t)$ 与期望值误差 e (t) 的绝对值与时间的乘积，在调节时间内的积分值

$$S_3 = \int_0^{t_r} t|e(t)|\,dt \tag{17-72}$$

当控制信号为斜坡信号时的动态指标，主要用跟随误差来衡量，即

$$\varepsilon(t) = C(t) - Y(t) \tag{17-73}$$

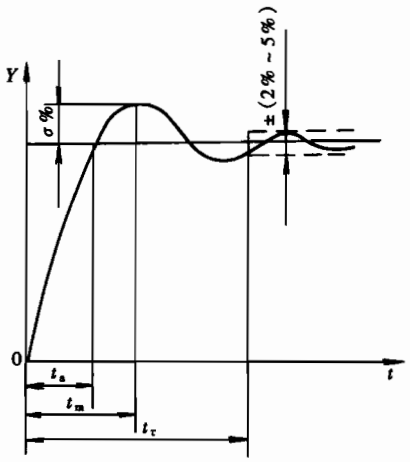


图 17-75　直流传动系统在阶跃信号作用下的动态响应

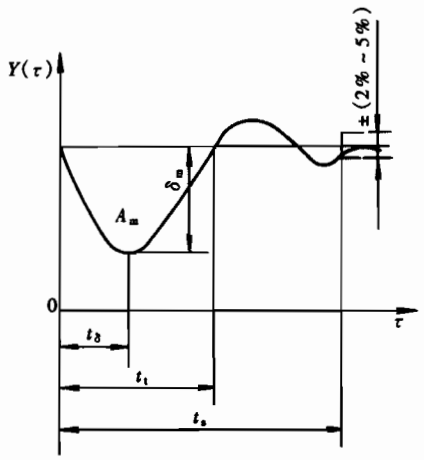


图 17-76　系统对阶跃扰动信号的动态响应

（2）扰动信号作用下的动态指标。系统的扰动特性是指在扰动信号 $F(t)$ 的作用下，系统输出量 $Y(t)$ 的动态性能。在直流调速系统中，常遇到的也是最严重的扰动为单位阶跃扰动。阶跃扰动通常表示为

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ -1 & t\geqslant 0 \end{cases}$$

在该扰动信号的作用下，系统输出量 $Y(t)$ 通常具有如图 17-76 所示的过渡特性，并用下述指标来衡量。

1）动态波动量（动态偏差）δ_m，是指输出量偏离原来稳态值的最大偏差与原来稳态值之比 $\delta_m = \dfrac{Y(t_\delta) - Y(0)}{Y(0)}$。

2）回升时间 t_1，是指输出量第一次回到扰动信号作用前输出值时对应的时间。

3）恢复时间 t_s，是指输出量进入原稳态值 $Y(0)$ 的 95%～98%范围内，并不再逸出的

时间。

以上三个指标是衡量系统对扰动响应的主要指标。

4）动态偏差面积 A_m，是指在 $Y(t)$ 过渡过程中，从 $0 \sim t_t$ 这段时间内，$Y(0)$ 与 $Y(t)$ 差值的积分，即

$$A_m = \int_0^{t_t} [Y(0) - Y(t)] \, dt$$

在很多情况下，因 A_m 用积分计算比较麻烦，且不直观，而用恢复时间 t_s 与动态偏差 δ_m 的乘积，即 $\delta_m t_s$ 来取代 A_m 表示扰动下系统的动态指标。

17.9 传动系统动态指标的运用

17.9.1 调节器的传递函数

将一个环节或系统，在零初始条件下，输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比定义为这个环节或系统的传递函数。传递函数是研究、分析、设计控制系统动态性能的重要数学工具。

现代的交、直流调速系统都不外乎由电动机、晶闸管变流装置、触发装置和电子调节器等环节组成。下面将分别讨论各环节的传递函数。

在电气传动系统中，广泛使用的各种具有运算功能的线性电子调节器，运算放大器 N 是其核心部分。根据其输入和反馈的阻容元件接法的不同，可构成不同的调节器。电子调节器的一般型式如图 17－77 所示。

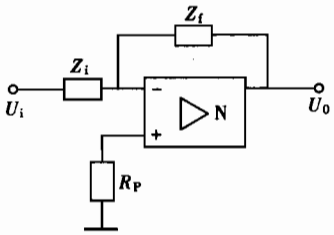


图 17－77 电子调节器一般型式

电子调节器通常采用比例（P）、积分（I）、微分（d）组合，比例积分（PI）调节器能消除系统的偏差，实现无差调节；比例微分（PD）调节器能够增加调节系统的响应速度。综合比例积分和比例微分调节器的特点，可以构成比例积分微分（PID）调节器，它是一种比较理想的调节器，既能提高响应速度，又能实现无差调节，对滞后及惯性较大的调节对象（如温度）具有较好的调节效果。

17.9.2 系统简化与系统动态结构图

本节内容参阅 17.10.1。

17.10 调节理论在电气传动工程中的运用

17.10.1 电气传动系统结构框图的简化

（1）系统简化条件。在实际工程中，为了便于分析和设计系统，往往进行近似处理。

1）系统中多个小时间常数的近似处理。在直流调速系统中，所谓小时间常数是指该时间常数所决定的频率大于系统的中频上限频率。在系统中往往存在多个小时间常数，如晶闸管变流装置的等效时间常数和滤波时间常数等，且大都分布在高频段，形成小惯性群。这部分的传递函数为

$$F_i(s) = \prod_{i=1}^{n} \frac{1}{\tau_i s + 1} \tag{17-74}$$

对上式一般用一个等效的惯性环节代替，其时间常数如下：

a. 如果各小时间常数的数值相差甚远，或它们决定的频率比系统中频上限频率高许多，

则它们等效时间常数可取为

$$\tau_x = \sum_{i=1}^{n} \tau_i = \tau_\Sigma \tag{17-75}$$

b. 如果各小时间常数数值接近，相差不超过一倍，等效时间常数可取为

$$\tau_x = 1.2\tau_\Sigma \tag{17-76}$$

c. 如果有一些小时间常数数值相近，而与另一些相差较远，则可分别处理。即对数值接近的按式（17－77）等效，再加上与之相差较远的时间常数，其总和作为等效时间常数 τ_x。

2）大惯性环节的近似处理。在系统中大惯性环节是指由它的时间常数决定的频率远小于系统对数幅额特性的交界频率。这种环节仅影响频率特性的低频段，即只影响系统的相角裕度和静差。图 17－78 绘出了大惯性的时间常数对系统的影响。计算证明，当大惯性时间常数大于小惯性环节时间常数 10 倍以上时，可将它近似看作是积分环节，积分时间常数等于大惯性环节的时间常数。

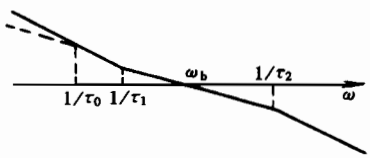


图 17－78　低频大时间常数的影响

3）电动势扰动的近似处理。在具有电流内环的转速和张力等系统中，讨论电流环时，电动机的反电动势扰动的变化率比电流的变化率小得多。一般在分析动态过程中，只要 $\tau_m > 10 \sim 20$ 倍系统未被补偿的小时间常数时，电动势扰动可忽略不计。

4）电源内阻的近似处理。在整流电源中，由于电源内阻的存在，给系统分析带来不便。当晶闸管变流装置给小容量电动机供电，且供电变压器的内阻和电抗与电动机电枢和电抗器阻抗相近时，分析系统时要考虑内阻的影响。当电动机容量与其配套的整流变压器容量相比较大时，一般可不考虑电源内阻的影响。

5）内环等效处理。求系统内环等效传递函数的目的，是为了进行外环设计和调整。求内环等效传递函数的原则是：看外环与内环中频区频带的相互关系。内环中频区处在外环中频区之右，且距离越远越好简化。

在工程设计中，当内环频率特性峰值较低，及内环与外环中频区相差较远时，就可将内环简化成一阶惯性环节。当内外环中频区较接近，甚至有一段重叠时，内环就要考虑用二阶振荡环节来近似。

（2）典型直流调速系统的简化。

1）电枢电压控制系统。该系统结构框图如图 17－79 所示。由图可知，系统为多环控制系统，其中 AUR 为电压调节器，BPF＋U 为晶闸管触发装置及整流器。对电枢电压控制系统而言，控制对象是以 U_{ur}为输入，U_{uf}为输出的关系，其传递函数如下

$$F_{Mu}(s) = \frac{U_{*uf}(s)}{U_{*ur}(s)} = \frac{E_{*av}(s)}{U_{*ur}(s)} \frac{U_u(s)}{E_{av}(s)} \frac{U_{uf}(s)}{U_M(s)}$$

$$= \frac{K_s}{\tau_a s + 1} \frac{\beta\tau_{Ma}\tau_a s^2 + \beta\tau_{Ma} s + 1}{\tau_{Ma}\tau_{ai} s^2 + \tau_{Ma} s + 1} \frac{\alpha_u}{\tau_f s + 1} \tag{17-77}$$

a. 首先将小时间常数 τ_s、τ_f 进行近似处理后得出 τ_x，如果 $\beta\tau_{Ma} > 10\tau_x$，可忽略电动势扰动影响，并忽略分子分母中相加的 1，则式（17－77）可写成

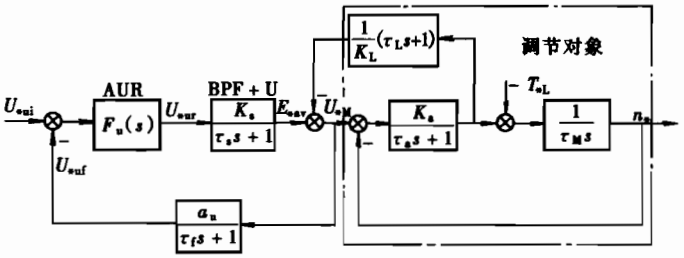


图 17－79　电枢电压控制结构框图

$$F_{\mathrm{Mu}}(s)=\frac{K_{\mathrm{s}}}{\tau_{\mathrm{s}}s+1}\cdot\frac{\beta(\tau_{\mathrm{a}}s+1)}{\tau_{\mathrm{ai}}s+1}\cdot\frac{\alpha_{\mathrm{u}}}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} \tag{17-78}$$

上式在忽略电源内部阻抗时，$\beta=1$，$\tau_{\mathrm{a}}=\tau_{\mathrm{ai}}$，则可写成

$$F_{\mathrm{Mu}}(s)=\frac{K_{\mathrm{s}}}{\tau_{\mathrm{s}}s+1}\cdot\frac{\alpha_{\mathrm{u}}}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} \tag{17-79}$$

b. 对小时间常数近似处理，得等效中频小时间常数

$$\tau_{\mathrm{x1}}=1.2(\tau_{\mathrm{s}}+\tau_{\mathrm{f}})$$

经上述近似处理后，电枢电压控制系统在忽略电动势扰动的情况下，由图 17－79 简化成图 17－80，再忽略电源内阻抗时，又简化成图 17－81。电枢电压控制的调节对象等效传递函数为

$$F_{\mathrm{Mu}}(s)=\frac{K_{\mathrm{s}}\alpha_{\mathrm{u}}}{\tau_{\mathrm{x1}}s+1} \tag{17-80}$$

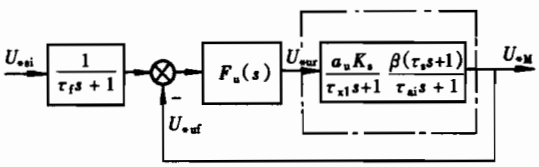


图 17－80　忽略电动势扰动后电枢电压控制结构框图

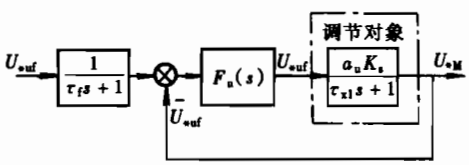


图 17－81　忽略电动势扰动及电源内阻抗后电枢电压控制结构框图

2）电枢电流控制系统。其结构框图如图 17－82 所示。对电枢电流控制系统而言，控制对象是以 U_{cr}为输入，U_{cf}为输出的关系

$$\begin{aligned}F_{\mathrm{Mc}}(s)&=\frac{E_{\mathrm{av}}^{*}(s)\,I_{\mathrm{a}}^{*}(s)\,U_{\mathrm{cf}}^{*}(s)}{U_{\mathrm{cr}}^{*}(s)\,E_{\mathrm{av}}^{*}(s)\,I_{\mathrm{a}}^{*}(s)}\\&=\frac{K_{\mathrm{s}}}{\tau_{\mathrm{s}}s+1}\cdot\frac{K_{\mathrm{ai}}\tau_{\mathrm{Ma}}s}{\tau_{\mathrm{Ma}}\tau_{\mathrm{ai}}s^{2}+\tau_{\mathrm{Ma}}s+1}\cdot\frac{\alpha_{\mathrm{c}}}{\tau_{\mathrm{f}}s+1}\\&\approx\frac{K_{\mathrm{s}}}{\tau_{\mathrm{s}}s+1}\cdot\frac{K_{\mathrm{ai}}\tau_{\mathrm{Ma}}s}{(\tau_{\mathrm{Ma}}s+1)(\tau_{\mathrm{ai}}s+1)}\frac{\alpha_{\mathrm{c}}}{\tau_{\mathrm{f}}s+1}\end{aligned} \tag{17-81}$$

根据简化条件，在忽略电动势扰动时，式（17－81）可简化为

$$F_{\mathrm{Mc}}(s)=\frac{K_{\mathrm{s}}}{\tau_{\mathrm{s}}s+1}\cdot\frac{K_{\mathrm{ai}}}{\tau_{\mathrm{ai}}s+1}\cdot\frac{\alpha_{\mathrm{c}}}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} \tag{17-82}$$

将小时间常数合并，忽略内阻得

$$F_{Mc}(s)=\frac{K_s}{\tau_{x1}s+1}\frac{K_a\alpha_c}{\tau_a s+1} \tag{17-83}$$

当 $\alpha_c=1$ 时

$$F_{Mc}(s)=\frac{K_s}{\tau_{x1}s+1}\frac{K_a}{\tau_a s+1} \tag{17-84}$$

根据式（17-84），将图 17-82 简化成图 17-83。

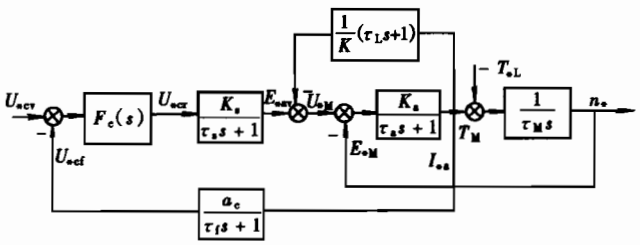


图 17-82　电枢电流控制系统结构框图

3）电流转速控制系统。当内环电流调节器参数选定并调整后，可用一等值的 $F_c(s)$ 代之。由于转速外环的过渡过程比内环慢得多，因而 $F_c(s)$ 一般是一个一阶惯性环节，其比例系数为电流反馈系数 α_c 的倒数，即

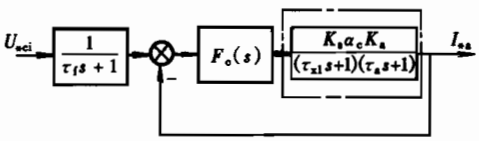


图 17-83　忽略电动势扰动和电源内阻抗后电枢电流控制结构框图

$$F_c(s)=\frac{1}{\gamma\tau_{x1}s+1}\cdot\frac{1}{\alpha_c} \tag{17-85}$$

式中　τ_{x1}——电流环等效时间常数；

α_c——电流反馈系数，$\alpha_c=I_a/I_{an}$；

γ——系数，与内环设计成不同型式有关。

电流转速控制系统结构框图如图 17-84（a）所示。

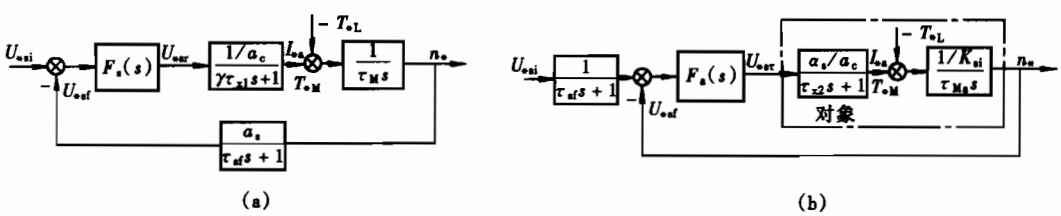


图 17-84　电流转速控制系统

（a）系统结构框图；（b）简化的系统结构框图

将图中 τ_{sf}和 $\gamma\tau_{x1}$小时间常数，等效为等效时间常数 τ_{x2}，$\tau_M/K_{ai}\approx\tau_{Ma}$，则可简化为图 17-84（b）的结构框图。由图 17-84 可见，电流转速控制系统的传递函数为

$$F_{Ms}(s)=\frac{U_{*sr}(s)}{U_{*sf}s}=\frac{1}{(\tau_{x2}s+1)\ \tau_{Ma}s}\cdot\frac{\alpha_s}{\alpha_c K_{ai}} \tag{17-86}$$

当 α_s、α_c 均为 1 时，其传递函数为

$$F_{\mathrm{Ms}}(s)=\frac{1}{(\tau_{\mathrm{x2}}s+1)}\cdot\frac{1}{\tau_{\mathrm{Ma}}s}\cdot\frac{1}{K_{\mathrm{ai}}} \tag{17-87}$$

(3) 交流调速系统的近似动态结构图。

1) 图 17-85 是图 17-66 所示恒压频比控制的转速开环交—直—交电压型变频调速系统近似动态结构图。

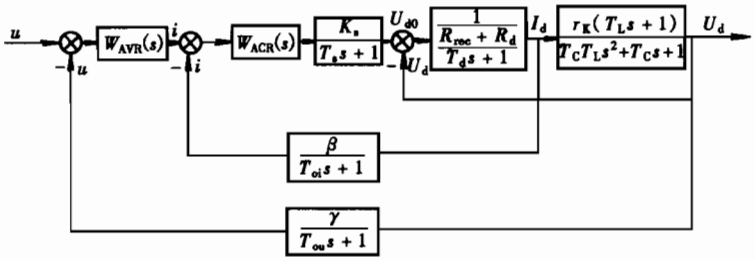


图 17-85 交—直—交电压型变频调速系统中电压、电流双闭环系统的近似动态结构图

* 为给定值。

2) 转差频率控制系统的近似动态结构图。图 17-86 是图 17-67 所示的转差频率控制的交—直—交电流型变频调速系统近似动态结构图。

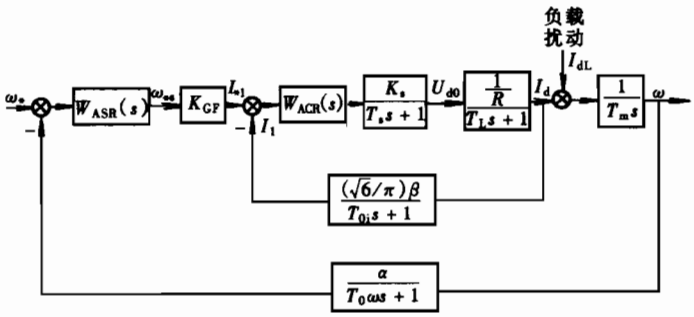


图 17-86 转差频率控制系统的近似动态结构图

* 为给定值。

17.10.2 工程实际校正方法

(1) 典型调节对象。直流调速系统虽然种类繁多，但从控制系统的设计而言，其控制对象基本可以归为四类，见表 17-29。

(2) 模型系统设计。工程实际校正方法的基本原则是简单实用。基本思路是根据生产机械和工艺的要求，确定系统的静动态性能指标，再求出相应的开环对数频率特性；将其与系统固有的控制对象的频率特性相比较，得出系统中调节器应有的特性和参数。在实际工程中，经过许多系统的设计调整分析表明，满足一般生产机械要求的预期系统（也称模型系统）的伯德图（对数频率特性）应具备下述条件：

1) 对数幅频特性的交越频率附近（中频段附近）的斜率为 -20dB/十倍频程，为了保证系统的稳定性，应具有足够宽度。

2) 交越频率 ω_b 应尽可能高一些，以提高系统的快速性。

3) 为了保证系统的稳态精度，低频段增益应尽可能大。低频段频率特性决定了系统的

静差，对于阶跃给定无差系统应为 -20dB/十倍频程，对斜坡给定无差系统应为 -40dB/十倍频程。

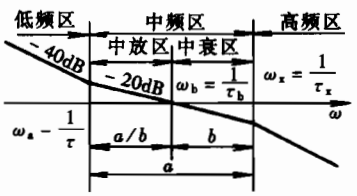
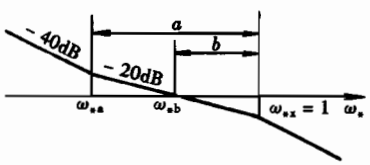
表 17-29　　典型控制对象汇总表

名　称	控制对象传递函数	代表性系统	说　明
积分-惯性型	$\dfrac{1}{\tau_{Ma}s\ (\tau_x s+1)\ \dfrac{1}{K_{ai}}}$	有电流内环的转速控制系统	有转速外环调速系统的调节对象及转速-位置系统的位置环及活套控制系统均可视作为积分-惯性型
双惯性型	$\dfrac{K_a K_{ai}}{(\tau_{ai}s+1)\ (\tau_x s+1)}$ $\tau_{ai}>\tau_x$	忽略电动势扰动情况下的电枢电流控制系统	磁通控制系统，转速-位置系统的转速环，直接张力控制系统的转速环、张力环等
双惯性超前型	$\dfrac{K_a K_f\ (\tau_r s+1)}{[\ (\tau_{fi}+\tau_r)\ s+1]\ (\tau_x s+1)}$	励磁电流控制系统	电枢电压控制系统
二惯性微分型	$\dfrac{K_{ai}K_a\tau_{Ma}s}{(\tau_{ai}s+1)(\tau_{Ma}s+1)(\tau_x s+1)}$	考虑电动势扰动情况下的电枢电流控制系统	励磁电流-转速系统的转速环

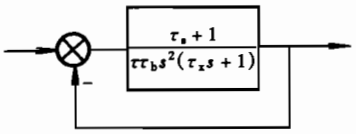
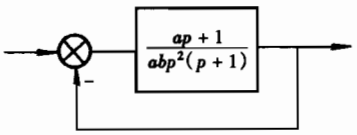
4）为了提高系统抗干扰能力和加快系统响应，高频衰减要快些。

根据上述条件，可做成模型系统，表 17-30 列出了模型系统及参数之间的关系。

表 17-30　　模型系统及参数之间的关系

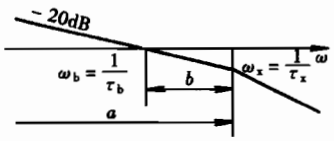
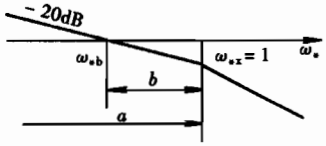
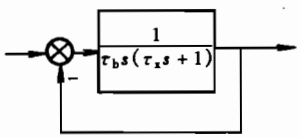
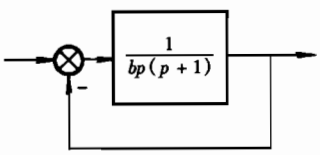
项　目	真实时间区形式	标么形式
对数频率特性（伯德图）		
开环传递函数与参数之间的关系	$F(s)=\dfrac{K_p K_r(\tau s+1)}{\tau\tau_p s^2(\tau_x s+1)}=\dfrac{K(\tau s+1)}{\tau\tau_p s^2(\tau_x s+1)}$ 式中　K_p—调节对象放大系数； K_r—调节器放大系数； K—系统开环放大系数； τ_x—系统未做补偿的小时间常数，s； 令　$\tau_b=\tau_p/K$，系统开环传递函数可写成 $F(s)=\dfrac{\tau s+1}{\tau\tau_b s^2(\tau_x s+1)}$	$a=\dfrac{\tau}{\tau_x}=\dfrac{1}{\omega_{*a}}=\dfrac{1}{\omega_a\tau_x}$ $b=\dfrac{\tau_b}{\tau_x}=\dfrac{\tau_p}{K_p K_r\tau_x}=\dfrac{1}{\omega_{*b}}=\dfrac{1}{\omega_b\tau_x}$ $\omega_{*x}=\dfrac{\tau_x}{\tau_x}=1=\tau_x\omega_x$ $F(p)=\dfrac{ap+1}{abp^2(p+1)}$ 式中　a—中频宽度； b—中衰宽度； p—标么复变数，$p=\tau_x s$； ω_*—标么角频率 $\omega_*=\tau_x\omega$ ω_{*b}—标么交越频率，$\omega_{*b}=\tau_x\omega_b$；

续表

项　目	真实时间区形式	标 么 形 式
系统闭环框图		
闭环传递函数	$F_{co}(s)=\dfrac{\tau s+1}{\tau\tau_b\tau_x s^3+\tau\tau_b s^2+\tau s+1}$	$F_{co}(p)=\dfrac{ap+1}{abp^3+abp^2+ap+1}$

在模型系统中，中频宽度为∞（$a=\infty$）时，称为宽中频模型系统，或称最佳系统，也有称为品质最佳或Ⅰ型系统。表 17-31 列出了宽中频模型系统参数之间的关系。

表 17－31　　宽中频模型系统及参数之间的关系

项　目	真实时间区形式	标 么 形 式
对数频率特性(伯德图)		
开环传递函数及参数之间的关系	$\dfrac{1}{\tau_b s(\tau_x s+1)}$	$\dfrac{1}{bp(p+1)}$ $b=\dfrac{\tau_b}{\tau_x}\quad \omega_{*x}=\dfrac{\tau_x}{\tau_x}=1$ $\omega_{*b}=\dfrac{\tau_x}{\tau_b}=\dfrac{1}{b}$
闭环系统框图		
闭环传递函数	$F_{co}(s)=\dfrac{\dfrac{1}{\tau_b\tau_x}}{s^2+\dfrac{1}{\tau_x}s+\dfrac{1}{\tau_b\tau_x}}$	$F_{co}(p)=\dfrac{\dfrac{1}{b}}{p^2+p+\dfrac{1}{b}}$

1）宽中频模型系统的设计。表 17－32 示出了宽中频模型系统与典型二阶系统的参数对比。

表 17－32　　宽中频模型系统与典型二阶系统的参数对比

项　目	真实时间区中典型二阶系统	标么形式的宽中频模型系统　$a=\infty$ $c=0$
开环传递函数	$\dfrac{K}{s(\tau_x s+1)}$	$\dfrac{1}{bp(p+1)}$
闭环传递函数	$\dfrac{K/\tau_x}{s^2+\dfrac{1}{\tau_x}s+\dfrac{K}{\tau_x}}$	$\dfrac{1/b}{p^2+p+1/b}$

续表

项　　目		真实时间区中典型二阶系统	标么形式的宽中频模型系统 $\begin{matrix}a=\infty\\c=0\end{matrix}$
固定频率 ω_n		$\sqrt{\frac{K}{\tau_x}}$	$\frac{1}{\tau_x\sqrt{b}}$
交越频率 ω_b		K	$\frac{1}{b\tau_x}$
阻尼系数 ζ		$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{K\tau_x}}$	$\sqrt{b}/2$
动态指标	起调时间 t_s	$\frac{\pi-\arccos\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}2\zeta\tau_x$	$\sqrt{\frac{b}{4-b}}\left[\pi+2\arccos\left(\frac{1}{2}\sqrt{4-b}\right)\right]\tau_x$
	超调量 $\sigma(\%)$	$\exp\left(-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi\right)$	$\exp\left(-\pi\sqrt{\frac{b}{4-b}}\right)$
	相角稳定裕量 φ	$\arctan\frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4}-2\zeta^2}}$	$\approx\arctan b$
谐振峰值 M_p		$M_p=1\quad\zeta>0.707$ $M_p=\frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}\quad 0\leqslant\zeta\leqslant 0.707$	$M_p=1\quad b>2$ $M_p=\frac{2}{\sqrt{b(4-b)}}\quad 0\leqslant b\leqslant 2$

表 17－33 示出了在阶跃输入信号作用下，宽中频模型系统的参数和动态指标之间的关系。由表可见，该系统对控制信号为一阶无差系统，具有响应快、超调小和相角裕量大等特点。但该系统抗干扰性能略差，因而适用在轧钢机辅传动系统和对抗干扰性能无严格要求的系统中。

当知道系统的调节对象传递函数的情况下，可根据表 17－34 来选择调节器的类型和参数。

表 17－33　在阶跃输入信号作用下宽中频模型系统的参数和动态指标之间的关系

中衰宽度 b	4	2.56	2	1.45	1.0
阻尼系数 ζ	1.0	0.8	0.707	0.6	0.5
超调量 $\sigma\%$	0	1.5	4.3	9.5	16.3
谐振峰值 M_p	1	1	1	1.04	1.15
相角稳定裕量 φ	76.3°	69.9°	65.5°	59.2°	51.8°
起调时间 $t_s(s)$	∞	$6.67\tau_x$	$4.72\tau_x$	$3.34\tau_x$	$2.41\tau_x$
交越频率 ω_b	$0.25/\tau_x$	$0.39\tau_x$	$0.5\tau_x$	$0.69\tau_x$	$1\tau_x$
调节时间 $t_r(s)$	$=\left(\frac{3}{\zeta\Omega_2}\sim\frac{4}{\zeta\Omega_2}\right)\tau_x\approx(6\sim8)\tau_x$				

表 17-34　　为校正成宽中频模型系统选择调节器的类型和参数

调节对象 / 调节器	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$	$\frac{K_p}{\tau_x s+1}$	$\frac{K_p}{(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_p>\tau_x$	$\frac{K_p}{(\tau_1 s+1)(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_p>\tau_1>\tau_x$
类　　型	P	I	PI	PID
传递函数	K_r	$\frac{1}{\tau_p s}$	$K_r\frac{\tau s+1}{\tau s}$	$K_r\frac{(\tau_0 s+1)(\tau s+1)}{\tau s}$

续表

调节对象 / 调节器	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$	$\frac{K_p}{\tau_x s+1}$	$\frac{K_p}{(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_p > \tau_x$	$\frac{K_p}{(\tau_1 s+1)(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_p > \tau_1 > \tau_x$
时间常数		$\tau_p = bK_p\tau_x$	$\tau = \tau_p$	$\tau_0 = \tau_1 \quad \tau = \tau_p$
放大系数	$K_r = \frac{\tau_p}{bK_p\tau_x}$			
$a/b/c$ 推荐值	$\infty/1 \sim 2/0$			
校正后系统的开环传递函数	$\frac{K_pK_r}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$ 或 $\frac{1}{bp(p+1)}, b = \frac{\tau_p}{K_rK_p\tau_x} = \frac{\tau_b}{\tau_x}, p = \tau_x s$			

2）按谐振峰值法设计。系统在模型系统中取 $c=0$，$b=2a/(a+1)$ 时，系统的闭环幅频特性谐振峰值最小，在已知系统要求的最小 M_p 谐振峰值时，可按

$$a = \frac{M_p + 1}{M_p - 1} \tag{17-88}$$

求得 a 值，再查表 17－35 得到系统的 b 值、超调量 σ（%）和调节时间 t_r；也可根据表 17－36，由 a、b 值查得应选择的调节器及参数。表 17－37 列出了在 $a=5$ 时，用谐振峰值法设计的系统的性能。用此方法设计的系统具有较好的控制和扰动特性，缺点是超调量较大。

表 17－35　　用谐振峰值法设计模型系统的参数与动态性能

M_p	2	1.67	1.5	1.4	1.33	1.29	1.25	1.22
a	3	4	5	6	7	8	9	10
b	1.5	1.6	1.67	1.71	1.75	1.78	1.80	1.82
a/b	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
超调量 σ(%)	52.6	45.6	37.6	33.2	29.8	27.2	25	23.3
调节时间 t_r			$9\tau_x$	$10\tau_x$	$11\tau_x$	$12\tau_x$	$13\tau_x$	$14\tau_x$
振荡次数	3	2	2	1	1	1	1	1

表 17－36　　模型系统的调节器选择

调节对象 / 调节器	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_1 s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_1 > \tau_x$ 或 $\tau_1\tau_x$ 相近	$\frac{K_p}{(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ 在 $\tau_p \gg \tau_x$ 时近似为 $\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$
类　型	PI	PID	PI
传递函数	$K_r\frac{\tau_s+1}{\tau_s}$	$K_r\frac{(\tau s+1)(\tau_0 s+1)}{\tau s}$	$K_r\frac{\tau s+1}{\tau s}$
时间常数	$\tau = a\tau_x$	$\tau_0 = \tau_1$ $\tau = a\tau_x$	$\tau = a\tau_x$
放大系数	$K_r = \frac{\tau_p}{bK_p\tau_x}$		

续表

调节对象 / 调节器	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$	$\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_1 s+1)(\tau_x s+1)}$ $\tau_1 > \tau_x$ 或 $\tau_1 \tau_x$ 相近	$\frac{K_p}{(\tau_p s+1)(\tau_x s+1)}$ 在 $\tau_p \gg \tau_x$ 时近似为 $\frac{K_p}{\tau_p s(\tau_x s+1)}$
控制信号滤波时间常数	$c\tau_x$		
$a/b/c$ 推荐值	4.8/1.3/3.0 （对称最佳 4/2/4）		
校正后系统开环传递函数	$\frac{K_p K_r(\tau s+1)}{\tau\tau_p s^2(\tau_x s+1)}$ 或 $\frac{ap+1}{abp^2(p+1)}$ $a=\tau/\tau_x$ $b=\frac{\tau_p}{K_p K_R \tau_x}=\frac{\tau_b}{\tau_x}$ $p=s\tau_x$		

3）对称最佳系统的设计。在模型系统中，当 $a=b^2$，系统频率特性中频放大宽度等于中频衰减宽度时，称该系统为对称最佳系统。该系统在阶跃控制信号作用下，超调量可达 43%。因而常引入对控制信号的滤波环节，滤波环节的传递函数为

$$F_f(s)=\frac{1}{\tau_f s+1}$$

标么化后得

$$F_f(p)=\frac{1}{cp+1} \tag{17-89}$$

式中 $c=\tau_f/\tau_x$ $p=s\tau_x$

系统的超调量与 c 成正比地减小到 3.6%。在对称最佳系统中，当参数 $a/b/c$ 取 4/2/4 时，又称为三阶最佳系统。由表 17－37 可根据调节对象的传递函数选择调节器。表 17－37 给出了这种系统的性能指标。这种系统的特点是抗干扰能力较宽中频模型系统的好，对这种系统一般推荐 $a=c=4\sim5$。

4）三变数模型系统设计。当系统中 a、b、c 三个参数都分别独立变化时，称该系统为三变数模型系统。实践和分析、计算证明，取 $a=4\sim10$，$b=1\sim2$，$c=2\sim4$ 时，系统具有

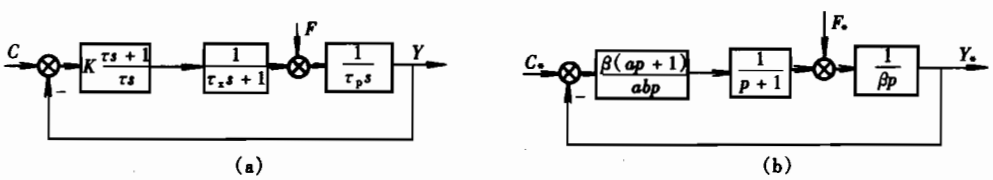


图 17－87 扰动作用结构框图

(a) 结构框图；(b) 标么化后的结构框图

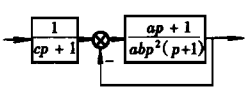
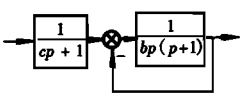
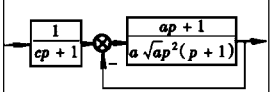
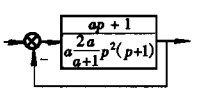
良好的控制和扰动性能。对于要求较高的生产机械的调速系统尤为适用。如前所述，查表 17－36 和表 17－37 可得调节器的类型、参数及推荐值 $a/b/c=4.8/1.3/3$ 时系统的各项指标。

在图 17－86（b）中，$p=\tau_x s$，$b=\tau_p/K\tau_x$，$a=\tau/\tau_x$，$\beta=\tau_p/\tau_x$。为了使设计者便于比较，表 17－38 列出了具有给定滤波的模型系统及特殊形式，表中给出了 a、b、c 值的变化范围和推荐值。

表 17－37　　用各种设计方法得到的系统性能指标

项　　目	模型系统法	对称最佳法	三阶最佳法	谐振峰值法
a	4.8	5	4	5
b	1.3	2.24	2	1.67
c	3	5	4	0
相角稳定裕量 φ	37.28°	41.81°	36.87°	40.62°
起调时间 t_s	$5.7\tau_x$	$9.5\tau_x$	$7.3\tau_x$	$2.8\tau_x$
调节时间 t_r	$10.3\tau_x$	$15\tau_x$	$13.3\tau_x$	$9\tau_x$
超调量 σ（%）	5.8	3.6	8.1	37.6
回升时间 t_t	$8.2\tau_x$	$10.8\tau_x$	$8.4\tau_x$	$9.6\tau_x$
恢复时间 t_s	$15.5\tau_x$	$18.2\tau_x$	$20.5\tau_x$	$17.3\tau_x$
动态偏差 $\beta\delta_m$	1.39	1.94	1.77	1.63
动态偏差面积 βA_m	6.24	11.63	8.648	8.35
静态偏差面积 βA_0	6.24	11.2	8	8.35
备　　注	1. 本表所列数据为在阶跃输入情况下的计算值 2. 本表所列对扰动作用的计算值，其扰动作用点如图 17－86 所示 3. 表中 τ_x 为各系统中未被补偿的小时间常数表			

表 17－38　　具有给定滤波的模型系统及特殊形式

系统类型	具有给定滤波的模型系统	宽中频模型系统	对称最佳系统	谐振峰值最小的系统
条件	a、b、c 三个参数在一定范围内变化	$a=\infty$，b 和 c 在一定范围内变化	$a=b^2$，$c=a$ a 在一定范围内变化	$b=\dfrac{2a}{a+1}$　$c=0$ a 在一定范围内变化
结构框图				
闭环传递函数	$\dfrac{ap+1}{(cp+1)(abp^3+abp^2+ap+1)}$	$\dfrac{1}{(cp+1)(bp^2+bp+1)}$	$\dfrac{1}{a\sqrt{a}p^3+a\sqrt{a}p^2+ap+1}$	$\dfrac{ap+1}{\frac{2a^2}{a+1}p^3+\frac{2a^2}{a+1}p^2+ap+1}$
参数变化范围	$a=4\sim10$ $b=1\sim2$ $c=2\sim4$	$b=1\sim2$ $c=2\sim0$	$a=4\sim5$	$a=3\sim10$
一般系统设计推荐参数	$a/b/c=4.8/1.3/3$	$a/b/c=\infty/2/0$ $a/b/c=8/1.5/1$	$a/b/c=4/2/4$ $a/b/c=5/2.24/5$	$a=5$
系统特点	具有良好的抗干扰能力，适用于对扰动性能要求较高的场合，如轧钢机主传动系统	具有较大的稳定裕量，控制特性较好（响应快、超调小），适用于对控制特性要求较高，而对扰动性能要求不高的系统	系统开环对数频率特性的中放区宽度等于中衰宽度，抗干扰性能优于宽中频模型系统比 $a/b/c=4.8/1.3/3$，系统的抗干扰性能差	控制和扰动特性均较好，但超调量大 一般在给出了系统允许的最小谐振峰值 M_{pmin} 后，可用此方法设计系统

17.11 PLC 的组成及工作原理

17.11.1 PLC 的组成

PLC 是微机技术和继电器常规控制概念相结合的产物，是在程序控制器、1 位微处理机控制器和微机控制器的基础上发展起来的新型控制器。从广义上讲，PLC 是一种计算机系统，只不过它比一般计算机具有更强的与工业过程相连接的输入输出接口，具有更适用于控制要求的编程语言，具有更适应于工业环境的抗干扰性能。因此，PLC 是一种工业控制用的专用计算机，它的实际组成与一般微型计算机系统基本相同，也是由硬件系统和软件系统两大部分组成。

(1) PLC 的硬件系统。PLC 的硬件系统由主机系统、输入输出扩展部件及外部设备组成。

1) 主机系统。PLC 的主机系统由中央处理单元、存储单元、输入单元、输出单元、输入输出扩展接口，外围设备接口以及电源等部分组成。各部分之间通过内部系统总线进行连接，如图 17 - 88 所示。

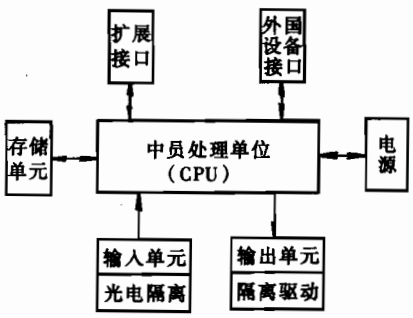


图 17 - 88　PLC 系统原理框图

a. 中央处理单元（CentralProcessingUnit——CPU）：CPU 是 PLC 的核心部分，它包括微处理器和控制接口电路。微处理器是 PLC 的运算控制中心，由它实现逻辑运算，协调控制系统内部各部分的工作。它的运行是按照系统程序所赋予的任务进行的。

CPU 的具体作用如下：

a) 接受，存储用户程序。

b) 按扫描方式接受来自输入单元的数据和各状态信息，并存入相应的数据存储区。

c) 执行监控程序和用户程序，完成数据和信息的逻辑处理，产生相应的内部控制信号，完成用户指令规定的各种操作。

d) 响应外部设备的请求。

PLC 常用的微处理器主要有通用微处理器、单片机或双极型位片式微处理器。通用微处理器按其处理数据的位数可分为 4、8、16 位和 32 位等。PLC 大多用 8 位和 16 位微处理器。单片机是将微处理器、部分存储器、部分输入输出接口以及连接它们的控制接口电路等集成在一块芯片上的处理器，具有高集成度、高可靠性、高功能、高速度、低成本等优点。

控制接口电路是微处理器与主机内部其他单元进行联系的部件，主要有数据缓冲、单元选择、信号匹配、中断管理等功能。微处理器通过它来实现与各个单元之间的可靠的信息交换和最佳的时序配合。

b. 存储单元：存储单元是 PLC 存放系统程序、用户程序和运行数据的单元。它包括只读存储器（ROM）和随机存取存储器（RandemAccessMemory——RAM）。只读存储器（ROM）在使用过程中只能取出不能存储，而随机存取存储器（RAM）在使用过程中能随时取出和存储。只读存储器（ROM）按照其编程方式不同，可分为 ROM、PROM、EPROM 和 EEPROM 等。

ROM 又称掩膜只读存储器，它存储的内容在其制造过程中确定，不允许再改变；PROM 是可编程只读存储器，它的存储内容是由用户用编程器一次性写入的，不能再改变；EPROM 是可擦除可编程只读存储器，它的存储内容也是由用户用编程器写入的，但是可以在紫外线灯的

照射下擦除，因此，它允许反复多次地擦除和写入；EEPROM 是电擦除可编程只读存储器，它的存储内容由用户写入，在写入新的内容时，原来存储的内容会自动清除，它允许反复多次写入。

由于只读存储器（ROM）是非挥发性的，即在断电状态下仍能保持所存储的内容，因此它被用作 PLC 的系统存储器，存放生产企业编制的系统管理程序。用户逻辑解释程序和标准程序模块等组成系统程序，系统程序对用户来说是透明的，用户是不能改变的，它也常被生产企业存储在PROM或EPROM内，安装在PLC中一起供给用户。随机存取存储器（RAM）有两种类型：静态RAM（SRAM)和动态RAM（DRAM)。SRAM是用 D 型触发器来存储写入的内容，除非写入新的内容或电源关断，它存储的内容可以保持不变；DRAM 是用电容来存储写入的内容，由于电容要放电，为了维持写入的内容不变，必须对它进行重复读出和写入操作，即要有刷新电路配合使用。

由于随机存取存储器（RAM）是一种挥发性的器件，即当供电电源关掉后，其存储的内容会丢失，因此在实际使用中，通常为其配备掉电保护电路，当正常电源关断后，由备用电池为它供电，保护其存储的内容不丢失。随机存取存储器（RAM）在 PLC 中用作用户程序的存储器和数据的存储器。用户程序存储器存放的是用户编制的应用程序。为了调试和修改的方便，总是先把用户程序存放在随机存取存储器（RAM）中，经过运行考核、修改完善、达到设计要求后，再把它固化到 EPROM 中，替代 RAM 使用。数据存储器存储的内容是 PLC 运行过程中产生的各种数据。由于这些数据是不断变化的，所以用随机存取存储器（RAM）来组成数据存储器。

c. 输入输出模块单元：PLC 的对外功能主要是通过各类接口模块的外接线，实现对工业设备和生产过程的检测与控制。通过各种输入输出接口模块，PLC 既可检测到所需的过程信息，又可将处理结果传送给外部过程，驱动各种执行机构，实现工业生产过程的控制。通过输入模块单元，PLC 能够得到生产过程的各种参数；通过输出模块单元，PLC 能够把运算处理的结果送至工业过程现场的执行机构实现控制。实际生产中的信号电平多种多样，外部执行机构所需电流也是多种多样，而 PLC 的 CPU 所处理的只能是标准电平，由于输入输出模块单元与工业过程现场的各种信号直接相连，这就要求它有很好的信号适应能力和抗干扰性能。因此，在输入输出模块单元中，一般均配有电子变换、光耦合器和阻容滤波等电路，以实现外部现场的各种信号与系统内部统一信号的匹配和信号的正确传递，PLC 正是通过了这种接口实现了信号电平的转换。

为适应工业过程现场不同输入输出信号的匹配要求，PLC 配置了各种类型的输入输出模块单元。其中常用的有以下几种类型。

a）开关量输入单元：它的作用是把现场各种开关信号变成 PLC 内部处理的标准信号。开关量输入单元按照输入端的电源类型不同，分为直流输入单元和交流输入单元，分别如图 17－89（a）、（b）所示。

在直流输入单元中，电阻 R1 与 R2 构成分压器，电阻 R2 与电容 C 组成阻容滤波。二极管用于防止反极性电压输入，发光二极管（LED）指示输入状态。光耦合器隔离输入电路与 PLC 内部电路的电气连接，并使外部信号通过光耦合器变成内部电路接收的标准信号。当外部开关闭合后，外部直流电压经过电阻分压和阻容滤波后加到光耦合器的发光二极管上，经光耦合，光敏晶体管接收光信号，并输出一个对内部电路来说是接通的信号，输出端的发光二极管（LED）点亮，指示现场开关闭合。

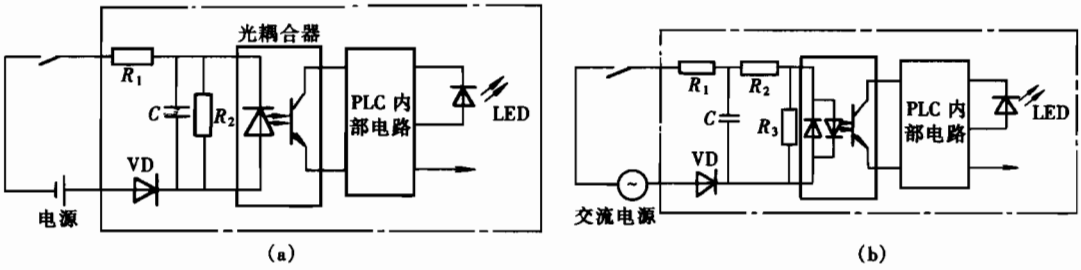


图 17－89　开关量输入单元

(a) 直流开关量；(b) 交流开关量

在交流输入单元中，电阻 R2 与 R3 构成分压器。电阻 R1 为限流电阻，电容 C 为滤波电容。双向光耦合器起整流和隔离双重作用，双向发光二极管用作状态指示。其工作原理和直流输入单元基本相同，仅在正反向时导通的双向光耦合器不同。

b）开关量输出单元：它的作用是把 PLC 的内部信号转换成现场执行机构的各种开关信号。按照现场执行机构使用的电源类型不同，可分为直流输出单元（晶体管输出方式或继电器触点输出方式）和交流输出单元（晶闸管输出方式或继电器触点输出方式）。

在继电器输出方式中，继电器作为开关器件，同时又是隔离器件。发光二极管（LED）构成输出状态显示器，当 PLC 输出一个接通信号时，内部电路使继电器线圈 K 通电，继电器触点闭合使负载回路的负载 L 接通得电，VD 作为续流二极管以消除线圈的反电动势，同时状态指示发光二极管（LED）导通点亮。根据负载的需要，负载回路的电源即可选用交流电源，也可选用直流电源。

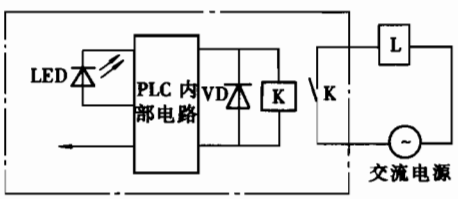


图 17－90　继电器模式输出单元

特别应指出的是，由于继电器模式具有断点确切，可以实际切断所控制的回路电器连接的作用，同时这种模式既适合于直流又适合于交流情况，因此这种模式在开关频率不太高的情况下是首选的输出控制方案。图 17－90 给出了这种输出方案的原理图。

在晶体管输出方式中，采用光敏晶体管作为开关器件。当 PLC 输出一个接通信号时，内部电路使光耦合器的发光二极管得电发光，光敏晶体管受光导通后，使晶体管导通，相应负载 L 得电。

在晶闸管输出方式中，采用光耦合式双向晶闸管作为开关器件，因此它同时又是隔离器件。当 PLC 输出一个接通信号时，内部电路使固态继电器内输入电路中的发光二极管导通，通过光耦合使输出回路的双向晶闸管导通，负载得电。

c）模拟量输入单元：模拟量输入在过程控制中的应用很广，如常用的温度、压力、速度、流量、酸碱度、位移的各种工业检测都是对应于电压、电流的模拟量值，再通过一定运算（PID）后，控制生产过程达到一定的目的。模拟量输入电平大多是从传感器通过变换后得到的，模拟量的输入信号为 4～20mA 电流信号或 1～5、－10～10、0～10V 的直流电压信号。输入模块接收这种模拟信号之后，把它转换成二进制数字信号，送给中央处理器进行处理，因此模拟量输入模块又叫 A/D 转换输入模块。总之，模拟量输入单元的作用是把现场连续变化的模拟量标准信号转换成 PLC 内部处理的、由若干位表示的数字信号。一般它由滤波、A/D 转换、光耦合器隔离等部分组成。其原理框图如图 17－91 所示。

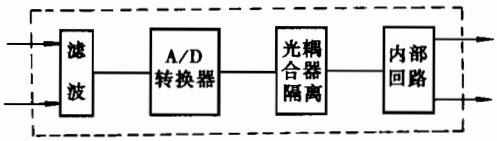


图 17－91　模拟量输入单元框图

模拟量输入单元设有电压信号和电流信号输入端。输入信号通过滤波、运算放大器的放大和量程变换，转换成 A/D 转换器能够接收的电压范围，经过 A/D 转换器后的数字量信号，再经光耦合器隔离后进入 PLC 的内部电路。根据 A/D 转换的分辨率不同，模拟量输入单元能提供 8、10、12 位或 16 位等精度的各种位数的数字量信号传送给 PLC 进行处理。

模拟量的输入点数可以是 2 点到 8 点，不同模拟量输入单元类型输入点数不同。对多通道的模拟量输入单元，通常设置多路转换开关进行通道的切换，而在输出端应设置信号的寄存器。为了适应工业生产过程的控制要求，对模拟量输入单元采取了必要的防电磁干扰措施，例如，光耦合器隔离、阻容滤波等。为了防止其他信号的影响，也采取了设置反向二极管或熔丝管等措施。这些措施为 PLC 能可靠地工作提供了保证。

d）模拟量输出单元：它的作用是把 PLC 运算处理后的若干位数字量信号转换成相应的模拟量信号输出，以满足生产过程现场连续信号的控制要求。模拟量输出单元一般由光耦合器隔离、D/A 转换器和信号转换等环节组成，其原理框图如图 17－92 所示。

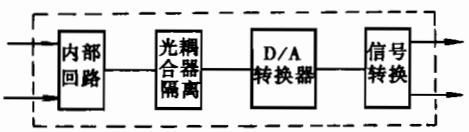


图 17－92　模拟量输出单元框图

模拟量输出模块是将中央处理器的二进制数字信号转换成 4～20mA 的电流输出信号，或 0～10、1～5V 电压输出信号，以提供给执行机构。因此模拟量输出模块又叫 D/A 转换输出模块。PLC 输出的若干位数字量信号由内部电路送至光耦合器的输入端，光耦合器输出端输出的数字信号进入 D/A 转换器，转换后的模拟量直流电压信号经运算放大器放大后驱动输出。

通常，模拟量输出单元还设有直流电流信号输出端，供用户选用。根据实际要求数字信号的不同分辨率，模拟量输出单元用的 D/A 转换器有 8、10、12 位等几种不同的精度，根据不同型号有所不同。

对 PLC 的模拟量输出单元也设置了防止电磁干扰的光耦合或变压器耦合的电路，同样，为了适应外部负载的要求，提供了电压或电流的标准信号输出。

e）智能输入输出单元：为了满足 PLC 在复杂工业生产过程中的应用，PLC 的制造厂商除了提供上述基本的开关量和模拟量输入输出单元外，还提供智能输入输出单元，来适应生产过程控制的要求。智能输入输出单元是一个独立的自治系统，它具有与 PLC 主机相似的硬件系统，也是由中央处理单元、存储器、输入输出单元和外部设备接口单元等部分，通过内部系统总线连接组成。智能输入输出单元在自身的系统程序管理下，对工业生产过程现场的信号进行检测、处理和控制，并通过外部设备接口与 PLC 主机的输入输出扩展接口的连接来实现与主机的通信。PLC 主机在其运行的每个扫描周期中与智能输入输出单元进行一次信息交换，以便能对现场信号进行综合处理。智能输入输出单元不依赖主机的运行方式而独立运行，这一方面使 PLC 能够通过智能输入输出单元来处理快速变化的现场信号，另一方面也使 PLC 能够处理更多的任务。

为适应不同的控制要求，智能输入输出单元也有不同的类型。例如高速脉冲计数器智能单元，它专门对工业现场的高速脉冲信号进行计数，并把累计值传送给 PLC 主机进行处理。如果不用高速脉冲计数智能单元，而用主机的输入输出单元来进行计数操作，则计数速度要

受主机扫描速度的影响。当高速脉冲信号的宽度小于主机的扫描周期时，会发生部分计数脉冲丢失的情况。因此，用一般的 PLC 不能正确地进行高速脉冲信号的计数。使用高速脉冲计数智能单元后，由于它脱离主机的扫描周期而独立进行计数操作，而主机仅在每个扫描周期内读出高速脉冲计数智能单元的计数值，因此，使 PLC 系统能正确地对高速脉冲信号进行计数处理。

PID 调节智能单元也是一种智能单元，它能独立完成工业生产过程控制中一个或几个闭环控制回路的 PID 调节。特别是 PID 调节控制软件是由智能单元来执行的，而主机系统仅周期地把调整参数和设定值传递给 PID 调节智能单元。这样就使主机从繁琐的输入输出操作、复杂的运算处理中解脱出来，从而在其扫描周期内能够处理更多的其他任务。

为了适应生产过程对温度检测的要求，一些制造企业也提供了直接可以与热电偶或热电阻连接的温度传感器输入智能单元，它通过信号转换、A/D 转换、光耦合等电路将模拟量的热电动势或电阻信号转换为 PLC 的内部数字量信号。对热电偶的冷端补偿、热电阻的非线性处理等也在该智能单元中实现。不同热电偶和热电阻的分度号是通过在该单元上的选择开关来确定的。

智能输入输出单元还有位置控制智能单元、阀门控制智能单元等类型。智能输入输出单元为 PLC 的功能扩展和性能提高提供了极为有利的条件。随着智能输入输出单元的品种增加，PLC 的应用领域将越来越广泛，PLC 的主机最终将变为一个中央信息处理机，对与之相连的各种智能输入输出单元的信息进行综合处理。

d. 输入输出扩展接口。输入输出扩展接口是 PLC 主机为了扩展输入输出点数和类型的部件，输入输出扩展单元、远程输入输出扩展单元、智能输入输出单元等都通过它与主机相连。输入输出扩展接口有并行接口、串行接口等多种形式。

e. 外部设备接口。外部设备接口是 PLC 主机实现人机对话，机—机对话的通道。通过它，PLC 可以和编程器、彩色图形显示器、打印机等外部设备相连，也可以与其他 PLC 或上位计算机连接。外部设备接口一般是 RS232C 或 RS422A 串行通信接口，该接口的功能是串行/并行数据的转换，通信格式的识别，数据传输的出错检验，信号电平的转换等。对于一些小型 PLC，外部设备接口中还有与专用编程器连接的并行数据接口。

f. 电源单元。电源单元是 PLC 的电源供给部分。它的作用是把外部供应的电源变换成系统内部各单元所需的电源，有的电源单元还向外提供直流电源，给与开关量输入单元连接的现场电源开关使用。电源单元还包括掉电保护电路和后备电池电源，以保持 RAM 在外部电源断电后存储的内容不丢失。PLC 的电源一般采用开关电源，其特点是输入电压范围宽、体积小、质量轻、效率高、抗干扰性能好。

2）输入输出扩展环节。输入输出扩展环节是 PLC 输入输出单元的扩展部件，当用户所需的输入输出点数或类型超出主机的输入输出单元所允许的点数或类型时，可以通过加接输入输出扩展环节来解决。输入输出扩展环节与主机的输入输出扩展接口相连有两种类型：简单型和智能型。简单型的输入输出扩展环节本身不带中央处理单元，对外部现场信号的输入输出处理过程完全由主机的中央处理单元管理，依赖于主机的程序扫描过程。通常，它通过并行接口与主机通信，并安装在主机旁边，在小型 PLC 的输入输出扩展时常被采用。智能型的输入输出扩展环节本身带有中央处理单元，它对生产过程现场信号的输入输出处理由本身所带的中央处理单元管理，而不依赖于主机的程序扫描过程。通常，它采用串行通信接口与主机通信，可以远离主机安装，多用于中大型 PLC 的输入输出扩展。

3）外部设备。PLC 的外部设备主要是编程器、彩色图形显示器、打印机等。

a. 编程器。它是编制、调试 PLC 用户程序的外部设备，是人机交互的窗口。通过编程器可以把新的用户程序输入到 PLC 的 RAM 中，或者对 RAM 中已有程序进行编辑。通过编程器还可以对 PLC 的工作状态进行监视和跟踪，这对调试和试运行用户程序是非常有用的。编程器分为简易型和智能型两类。简易型编程器只能连接在 PLC 上使用，一般由简易键盘和发光二极管矩阵或液晶显示器组成。而智能型编程器可以联机，也可以脱机使用。近年来，智能型编程器一般采用微型计算机加上相应的应用软件构成。它既可用于编制调试用户程序，又可完成彩色图形显示、通信联网、打印输出控制和事务管理等多项功能。

b. 彩色图形显示器。大中型 PLC 通常配接彩色图形显示器，用以显示模拟生产过程的流程图、实时过程参数、趋势参数及报警参数等过程信息，使得现场控制情况一目了然。

c. 打印机。PLC 也可以配接打印机等外部设备，用以打印记录过程参数、系统参数以及报警事故记录表等。

PLC还可以配置其他外部设备，例如，配置盒式磁带机或磁盘驱动器，用于存储用户的应用程序和数据；配置EPROM写入器，用于将程序写入到EPROM中。

（2）PLC 的软件系统。PLC 除了硬件系统外，还需要软件系统的支持，它们相辅相成，缺一不可，共同构成 PLC。PLC 的软件系统由系统程序（又称系统软件）和用户程序（又称应用软件）两大部分组成。

1）系统程序。系统程序由 PLC 的制造企业编制，固化在 PROM 或 EPROM 中，安装在 PLC 上，随产品提供给用户。系统程序包括系统管理程序、用户指令解释程序和供系统调用的标准程序模块等。

a. 系统管理程序。它的主要功能如下：

a）时间分配的运行管理，即实现 PLC 输入、输出运算，自检及通信时序。

b）存储空间的分配管理，即生成用户环境，规定各种参数、程序的存放地址，将用户使用的数据参数存储地址转化为实际的数据格式及物理存放地址。

c）系统的自检程序，即对系统进行出错检验、用户程序语法检验、句法检验、警戒时钟运行等。在系统管理程序的控制下，整个 PLC 能正确有效地工作。

b. 用户指令解释程序。它是将用户用各种编程语言（梯形图、语句表等）编制的应用程序翻译成 CPU 能执行的机器指令。

c. 供系统调用的标准程序模块。它是由许多独立的程序块组成，各自完成包括输入、输出、特殊运算等不同的功能。PLC 的各种具体工作都由这部分来完成。

由于通过改进系统程序可以在不改变硬件系统的情况下大大改善 PLC 的性能，所以制造企业对系统程序的编制极为重视，其产品的系统程序也在不断升级和完善。

2）用户程序。用户程序是根据生产过程控制的要求由用户使用制造企业提供的编程语言自行编制的应用程序。用户程序包括开关量逻辑控制程序、模拟量运算程序、闭环控制程序和操作站系统应用程序等。

a. 开关量逻辑控制程序。它是 PLC 用户程序中最重要的一部分，一般采用梯形图、助记符或功能表图等编程语言编制，不同的 PLC 的制造企业提供的编程语言有不同的形式，至今还没有一种能全部兼容的编程语言。

b. 模拟量运算程序及闭环控制程序。通常，它是在大中型 PLC 上实施的程序，由用户根据需要按 PLC 提供的软件和硬件功能进行编制。编程语言一般采用高级语言或汇编语言，

一些制造企业为方便用户编程，也有提供相应编程软件供用户进行编制模拟量运算和 PID 控制等程序。

c. 操作站系统程序。它是大型 PLC 系统经过通信联网后，由用户为进行信息交换和管理而编制的程序。它包括各类画面的操作显示程序，一般采用高级语言实现，一些制造企业也提供了人机界面的有关软件，用户可以根据制造企业提供的软件使用说明进行操作站的系统画面组态和编制相应的应用程序。

17.11.2 PLC 的工作过程和输入输出过程

(1) PLC 的工作过程。PLC 通电后，就在系统程序的监控下，周而复始地按固定顺序对系统内部各种任务进行查询、判断和执行，这个过程实质上是一个不断循环的顺序扫描过程。一个循环扫描过程称为扫描周期。

PLC 采用周期扫描机制，简化了程序设计，提高了系统可靠性。具体表现在：在一个扫描周期内，前面执行的任务结果，马上就可被后面将要执行的任务所用；可以通过设定一个监视定时器来监视每个扫描周期的时间是否超过规定值，避免某个任务进入死循环而引起的故障，PLC 的工作过程如图 17－93 所示。

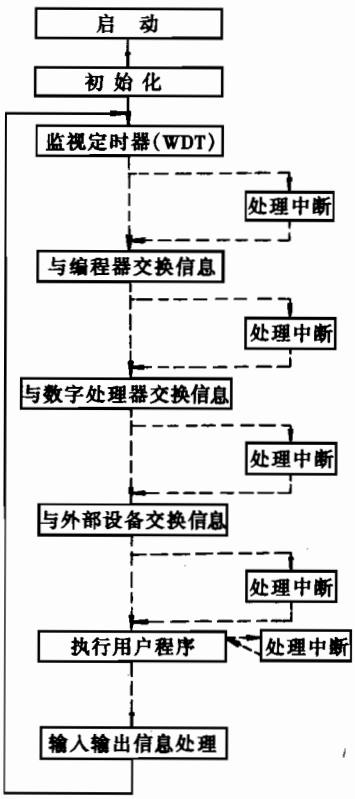


图 17－93　PLC 工作过程

PLC 在一个扫描周期内基本上要执行以下六个任务。

1) 运行监控任务。为了保证系统可靠工作，PLC 内部设置了系统监视计时器 WDT，由它来监视扫描周期是否超时。PLC 在每个扫描周期内都要对 WDT 进行复位操作，如果不能执行该任务，则 WDT 的计时会超过设定值，也就是扫描周期超过了规定时间，这表明系统的硬件或用户软件发生了故障。当 WDT 超时后，它会自动发出故障报警信号，并停止 PLC 的运行。WDT 的时间设定值一般为扫描周期的 2～3 倍，通常在 100～200ms，很多 PLC 可以由用户根据实际应用情况通过硬件或软件来设定。

2) 与编程器交换信息任务。编程器是 PLC 的外部设备，它与主机的外部设备接口相连。作为编制、调试用户程序的外部设备，编程器在 PLC 的外部设备中占有非常重要的地位，所以在主机的扫描周期中，把与编程器交换信息的任务单独列出，而不包括在与外部设备信息交换的任务中。编程器是人机交互的设备，用户把应用程序输入到 PLC 中，或对应用程序进行在线运行监视和修改都要用到它。这就要求 PLC 能与编程器进行信息交换。当 PLC 执行到与编程器交换信息任务时，就把系统的控制权交给编程器，并启动信息交换的定时器。在编程器取得控制权后，用户就可以利用它来修改内存中的应用程序，对系统的工作状态进行修改。如读微处理器的状态，读或写数字变量和逻辑变量，封锁或开放输入输出以及控制微处理器等。编程器在完成处理任务或达到信息交换的规定时间后，就把控制权交还给 PLC。在每个扫描周期内都要执行此项任务。

3) 与数字处理器（DPU）交换信息任务。一般大中型 PLC 多为双处理器系统。一个是字节处理器（CPU），另一个是数字处理器（DPU）。CPU 是系统的主处理器，由它处理字节

操作指令，控制系统总线，统一管理各种接口和输入输出单元。DPU 是系统的从处理器。它的作用是处理位操作指令，协助主处理器加快整个系统的处理速度。当 PLC 为双处理器系统时，就会有与数字处理器交换信息的任务。该任务主要是数字处理器（DPU）的寄存器信息与主系统的寄存器信息和开关量信息的交换。这个任务占用的时间随信息交换量而变化。在一般小型 PLC 中是没有这个任务的。

4）与外部设备接口交换信息任务。该任务主要是 PLC 与上位计算机、其他 PLC 或一些终端设备（如彩色图形显示器、打印机等设备）进行信息交换。这一任务的大小和占用时间的长短随主机外部设备的数量和数据通信量而变化。如果没有连接外部设备，则该任务跳过。

5）执行用户程序任务。用户程序是由用户根据实际应用情况而编制的程序，存放在RAM或EPROM中。PLC在每个扫描周期内都要把用户程序执行一遍，用户程序的执行是按用户程序的实际逻辑关系结构由前向后逐步扫描处理的，并把运行结果装入输出状态暂存区中，系统的全部控制功能都在这一任务中实现。

6）输入输出信息处理任务。PLC 内部开辟了两个暂存区，即输入信号状态暂存区和输出信号状态暂存区。用户程序从输入信号暂存区中读取输入信号状态，运算处理后将结果放入输出信号状态暂存器中。输入输出状态暂存区与实际输入输出单元的信息交换是通过输入输出任务实现的。输入输出任务还包括对输入输出扩展接口的操作，通过输入输出扩展接口实现主机的输入输出状态暂存区与简单输入输出扩展环节中的输入输出单元或与智能型输入输出扩展环节中的输入输出状态区之间的信息交换。

PLC 在每个扫描周期中都执行该任务。

（2）PLC 的输入输出过程。PLC 的工作方式是周期扫描方式，所以其输入输出过程是定时进行的，即在每个扫描周期内只进行一次输入和输出的操作。在输入操作时，首先启动输入单元，把现场信号转换成数字信号后全部读入，然后进行数字滤波处理，最后把有效值放入输入信号状态暂存区；在输出操作时，首先把输出信号状态暂存区中的信号全部送给输出单元，然后进行传送正确性检查，最后启动输出单元把数字信号转换成现场信号输出给执行机构。对用户程序而言，要处理的输入信号是输入信号状态暂存区的信号，而不是实际的信号。运算处理后的输出信号是被放入输出信号状态暂存区中，而不是直接输出到现场的。所以在用户程序执行的这一周期内，其处理的输入信号不再随现场信号的变化而变化；与此同时，虽然输出信号状态暂存区中信号随程序执行的结果不同而不断变化，但是实际的输出信号是不变的，在输出过程中，只有最后一次操作结果对输出信号起作用。PLC 周期性的输入输出处理方式对一般控制对象而言是能够满足的，但是对那些要求响应时间小于扫描周期的控制系统则不能满足，这时可以用智能型输入输出单元或专门的软件指令，通过与扫描周期脱离的方式来解决。

17.11.3 PLC 的中断输入处理过程

PLC 的中断输入处理方法同一般计算机系统是基本相同的，即当有中断申请信号输入后，系统要中断正在执行的相关程序而转向执行中断子程序；当有多个中断源时，它们将按中断的优先级有一个先后顺序的排队处理。系统可以通过程序设定允许中断或禁止中断。

PLC 对中断的响应不是在每条指令执行结束后进行，而是在扫描周期内某一个任务完成后进行，如图 17－93 所示。

PLC 的中断源信息是通过输入单元进入系统的。由于 PLC 扫描输入点是按顺序进行的，

因此中断源的先后顺序根据其占用的输入点位置而自动排序，当系统接到中断申请后，顺序扫描中断源。它可能只有一个中断源申请中断，也可能同时有两个或多个中断源提出申请中断。系统在扫描中断源的过程中，就在存储器的一个特定区里建立中断处理表，按顺序存放中断信息，然后系统按照该表顺序先后转至相应的中断子程序去处理。

PLC 的中断源有优先顺序，一般无嵌套关系，即在中断程序执行中，如果有新的中断发生，无论它的优先顺序如何，都不能中断正在执行的中断程序。只有在原中断处理程序结束后，再进行新的中断处理。

PLC 是以循环扫描方式工作的，正常的输入输出处理是在扫描周期内的某一个阶段进行，对于中断处理子程序中有关信息的输出必须采取特殊处理，即这部分输出信息不通过周期扫描方式输出，而利用专门的硬件或软件去立即执行。

17.11.4 PLC 的工作原理

PLC 的工作原理与计算机的工作原理是基本一致的。它通过执行用户程序来实现控制任务。但是，在时间上，PLC 执行的任务是串行的，与继电器逻辑控制系统中控制任务的执行有所不同。

PLC 的工作过程如上所述，可以看到，整个工作过程是以循环扫描的方式进行的。循环扫描方式是指在程序执行过程的周期中，程序对各个过程输入信号进行采样，对采样的信号进行运算和处理，并把运算结果输出到生产过程的执行机构中。在这个执行周期中，一些输入变量可能有变化，而有些输入变量可能没有发生变化，相应地有些输出变量有变化，有些输出变量没有变化。在 PLC 中，采用循环扫描的方式，不断地对输入和输出变量进行采样和输出，使得变量满足程序条件时，及时有相应的输出使执行机构动作。这里，与计算机程序执行过程的区别是，在计算机的工作过程中，如果变量的条件没有满足，程序将等待，直到该条件满足。而在 PLC 中，程序执行时，如果这一个扫描周期变量的条件未满足，程序将继续执行下去，到下面的某一个扫描周期中，变量的条件满足时，满足条件的运行结果就被执行。采用循环扫描的方式，由于扫描周期的时间很短，只要变量满足条件的时间大于扫描周期，该变量满足条件就能被 PLC 的程序执行。

PLC 中断处理的原理与计算机中断处理的原理也是基本一致的，上面已经进行了讨论。可以看到，中断的处理过程是在每个任务结束后进行的，在每个任务执行的过程中，PLC 对中断是不响应的，这是与计算机的中断响应有所区别的第一点。在用户程序的任务执行过程中，PLC 也需要程序块执行完成后才能执行中断子程序，这是与计算机中立即执行中断子程序的方式有所区别的第二点。中断的优先级处理和输出的区别是与计算机中断处理不同的第三点。产生区别的主要原因是由于 PLC 采用循环扫描工作方式，在系统软件的编制过程中，对中断处理采用了与计算机不同的处理方法。因此，在应用时要注意它与计算机的不同点，并在编程时加以注意。

PLC 的输入输出处理也因 PLC 采用循环扫描的工作方式而与计算机的处理方式有所区别。即只有在程序扫描到该变量时，才进行采样，而该变量可能在扫描前的某一时刻已经发生了变化。为了及时得到变量的变化信息，缩短扫描周期是可以采取的一个措施，也可以采用智能输入输出模块，它有独立的微处理器和存储器，与中央处理单元分别进行处理。

18 建筑智能化

18.1 火灾自动报警系统的设计要求

18.1.1 火灾自动报警系统设置原则及保护对象的等级划分

18.1.1.1 火灾自动报警系统设置原则：本节适用于工业与民用建筑内设置的火灾自动报警系统，不适用于生产和储存火药、炸药、弹药、火工品等场所设置的火灾自动报警系统。

18.1.1.2 保护对象的等级划分：火灾自动报警系统的保护对象应根据其使用性质、火灾危险性、疏散和补救难度等分为特级、一级和二级，并宜符合表 18－1 的规定。

表 18－1　　火灾自动报警系统保护对象分级

等级	保护对象	
特级	建筑高度超过 100m 的高层民用建筑	
一级	建筑高度不超过 100m 的高层民用建筑	一类建筑
	建筑高度不超过 24m 的民用建筑及建筑高度超过 24m 单层公共建筑	1.200 床及以上的病房楼，每层建筑面积 1000m² 及以上的门诊楼； 2. 每层建筑面积超过 3000m² 的百货楼、商场、展览楼、高级旅馆、财贸金融楼、电信楼、高级办公楼； 3. 藏书超过 100 万册的图书馆、书库； 4. 超过 3000 座位的体育馆； 5. 重要的科研楼、资料档案楼； 6. 省级（含计划单列市）的邮政楼、广播电视楼、电力调度楼、防灾指挥调度楼； 7. 重点文物保护场所； 8. 大型以上的影剧院、会堂、礼堂
	工业建筑	1. 甲、乙类生产厂房； 2. 甲、乙类物品库房； 3. 占地面积或总建筑面积超过 1000m² 的丙类物品库房； 4. 总建筑面积超过 1000m² 的地下丙、丁类生产车间及物品库房
	地下民用建筑	1. 地下铁道、车站； 2. 地下电影院、礼堂； 3. 使用面积超过 1000m² 的地下商场、医院、旅馆、展览厅及其他商业或公共活动场所； 4. 重要的实验室、图书、资料、档案库

续表

等级	保护对象	
二级	建筑高度不超过100m的高层民用建筑	二类建筑
	建筑高层不超过24m的民用建筑	1. 设有空气调节系统的或每层建筑面积超过2000m²，但不超过3000m²的商业楼、财贸金融楼、电信楼、展览楼、旅馆、办公楼、车站、海河客运站、航空港等公共建筑及其他商业或公共活动场所； 2. 市、县级的邮政楼、广播电视楼、电力调度楼、防灾指挥调度楼； 3. 中型以下的影剧院； 4. 高级住宅； 5. 图书馆、书库、档案楼
	工业建筑	1. 丙类生产厂房； 2. 建筑面积大于50m²，但不超过1000m²的丙类物品库房； 3. 总建筑面积大于50m²，但不超过1000m²的地下丙、丁类生产车间及地下特品库房
	地下民用建筑	1. 长度超过500m的城市隧道； 2. 使用面积不超过1000m²的地下商场、医院、旅馆、展览厅及其他商业或公共活动场所

注 1. 一类建筑、二类建筑的划分，应符合现行国家标准（高层民用建筑设计防火规范）GB50045的规定；工业厂房、仓房的火灾危险性分类，应符合现行国家标准（建筑设计防火规范）GBJ16的规定。

2. 本表未列出的建筑的等级，可按同类建筑的类比原则确定。

18.1.2 火灾自动报警系统的构成

18.1.2.1 区域报警系统的构成：一个报警区域宜设置一台区域火灾报警控制器或一台火灾报警控制器，系统中区域火灾报警控制器或火灾报警控制器不应超过两台。

18.1.2.2 集中报警系统的构成：系统中应设置一台集中火灾报警控制器和两台及以上区域火灾报警控制器，或设置一台火灾报警控制器和两台及以上区域显示器。

18.1.2.3 控制中心报警系统的构成：系统中至少应设置一台集中火灾报警控制器、一台专用消防联动控制设备和两台及以上区域火灾报警控制器；或至少设置一台火灾报警控制器、一台消防联动控制设备和两台及以上区域显示器。

18.1.3 火灾探测器的选择及设置要求

18.1.3.1 火灾探测器的选择：

（1）一般规定火灾探测器的选择，应符合下列要求：

1）对火灾初期有阴燃阶段，产生大量的烟和少量的热，很少或没有火焰辐射的场所，应选择感烟探测器。

2）对火灾发展迅速，可产生大量热、烟和火焰辐射的场所，可选择感温探测器、感烟探测器、火焰探测器或其组合。

3）对火灾发展迅速，有强烈的火焰辐射和少量的烟、热的场所，应选择火焰探测器。

4）对火灾形成特征不可预料的场，可根据模拟试验的结果选择探测器。

对使用、生产或聚集可燃气体或可燃液体蒸气的场所，应选择可燃气体探测器。

智能建筑的重要场所宜选择智能型火灾探测器。在采用单一型火灾探测器不能有效探测

火灾的场所，可采用复合型火灾探测器。

(2) 点型火灾探测器的选择：对不同高度的房间，可按表 18－2 选择点型火灾探测器。

表 18－2　　对不同高度的房间点型火灾探测器的选择

房间高度 h (m)	感烟探测器	感温探测器			火焰探测器
		一级	二级	三级	
$12 < h \leqslant 20$	不适合	不适合	不适合	不适合	适　合
$8 < h \leqslant 12$	适　合	不适合	不适合	不适合	适　合
$6 < h \leqslant 8$	适　合	适　合	不适合	不适合	适　合
$4 < h \leqslant 6$	适　合	适　合	适　合	不适合	适　合
$h \leqslant 4$	适　合	适　合	适　合	适　合	适　合

下列场所宜选择点型感烟探测器：

1) 饭店、旅馆、教学楼、办公楼的厅堂、卧室、办公室等；

2) 电子计算机房、通信机房、电影或电视放映室等；

3) 楼梯、走道、电梯机房等；

4) 书库、档案库等；

5) 有电气火灾危险的场所。

符合下列条件之一的场所，不宜选择离子感烟探测器：

1) 相对湿度经常大于 95%；

2) 气流速度大于 5m/s；

3) 有大量粉尘、水雾滞留；

4) 可能产生腐蚀性气体；

5) 在正常情况下有烟滞留；

6) 产生醇类、醚类、酮类等有机物质。

符合下列条件之一的场所，不宜选择光电感烟探测器：

1) 可能产生黑烟；

2) 有大量粉尘、水雾滞留；

3) 可能产生蒸气和油雾；

4) 在正常情况下有烟滞留。

符合下列条件之一的场所，宜选择感温探测器：

1) 相对湿度经常大于 95%；

2) 无烟火灾；

3) 有大量粉尘；

4) 在正常情况下有烟和蒸气滞留；

5) 厨房、锅炉房、发电机房、烘干车间等；

6) 吸烟室等；

7）其他不宜安装感烟探测器的厅堂和公共场所。

可能产生阴燃火或发生火灾不及时报警将造成重大损失的场所，不宜选择感温探测器；温度在0℃以下的场所，不宜选择定温探测器；温度变化较大的场所，不宜选择差温探测器。

符合下列条件之一的场所，宜选择火焰探测器：

1）火灾时有强烈的火焰辐射；

2）液体燃烧火灾等无阴燃阶段的火灾；

3）需要对火焰做出快速反应。

符合下列条件之一的场所，不宜选择火焰探测器：

1）可能发生无焰火灾；

2）在火焰出现前有浓烟扩散；

3）探测器的镜头易被污染；

4）探测器的“视线”易被遮挡；

5）探测器易受阳光或其他光源直接或间接照射；

6）在正常情况下有明火作业以及X射线、弧光等影响。

下列场所宜选择可燃气体探测器：

1）使用管道煤气或天然气的场所；

2）煤气站和煤气表房以及存储液化石油气罐的场所；

3）其他散发可燃气体和可燃蒸气的场所。

有可能产生一氧化碳气体的场所，宜选择一氧化碳气体探测器。

装有联动装置、自动灭火系统以及用单一探测器不能有效确认火灾的场合，宜采用感烟探测器、感温探测器、火焰探测器（同类型或不同类型）的组合。

（3）线型火灾探测器的选择。无遮挡大空间或有特殊要求的场所，宜选择红外光束感烟探测器。

下列场所或部位，宜选择缆式线型定温探测器：

1）电缆隧道、电缆竖井、电缆夹层、电缆桥架等；

2）配电装置、开关设备、变压器等；

3）各种皮带输送装置；

4）控制室、计算机室的闷顶内、地板下及重要设施隐蔽处等；

5）其他环境恶劣不适合点型探测器安装的危险场所。

下列场所宜选择空气管式线型差温探测器：

1）可能产生油类火灾且环境恶劣的场所；

2）不易安装点型探测器的夹层、闷顶。

18.1.3.2 火灾探测器的设置要求：

（1）点型火灾探测器的设置。探测区域内的每个房间至少应设置一只火灾探测器。

感烟探测器、感温探测器的保护面积和保护半径，应按表18－3确定。

感烟探测器、感温探测器的安装间距，应根据探测器的保护面积 A 和保护半径 R 确定，并不应超过GB50116—1998《火灾自动报警系统设计规范》附录A探测器安装间距的极限曲线D1～D11（含D9[1]）所规定的范围。

一个探测区域内所需设置的探测器数量，不应小于下式的计算值

表 18－3　　感烟探测器、感温探测器的保护面积和保护半径

火灾探测器的种类	地面积 S（m^2）	房间高度 h（m）	一只探测器的保护面积 A 和保护半径 R					
			屋顶坡度 θ					
			$\theta \leqslant 15°$		$15° < \theta \leqslant 30°$		$\theta > 30°$	
			A（m^2）	R（m）	A（m^2）	R（m）	A（m^2）	R（m）
感烟探测器	$S \leqslant 80$	$h \leqslant 12$	80	6.7	80	7.2	80	8.0
	$S > 80$	$6 < h \leqslant 12$	80	6.7	100	8.0	120	9.9
		$h \leqslant 6$	60	5.8	80	7.2	100	9.0
感温探测器	$S \leqslant 30$	$h \leqslant 8$	30	4.4	30	4.9	30	5.5
	$S > 30$	$h \leqslant 8$	20	3.6	30	4.9	40	6.3

$$N = \frac{S}{K \cdot A} \tag{18-1}$$

式中　N——探测器数量，只，N 应取整数；

S——该探测区域面积，m^2；

A——探测器的保护面积，m^2；

K——修正系数，特级保护对象宜取 0.7～0.8，一级保护对象宜取 0.8～0.9，二级保护对象宜取 0.9～1.0。

在有梁的顶棚上设置感烟探测器、感温探测器时，应符合下列规定：

1）当梁突出顶棚的高度小于 200mm 时，可不计梁对探测器保护面积的影响。

2）当梁凸出顶棚的高度为 200～600mm 时，应按 GB50116—1998《火灾自动报警系统设计规范》附录 B、附录 C 确定梁对探测器保护面积的影响和一只探测器能够保护的梁间区域的个数。

3）当梁凸出顶棚的高度超过 600mm 时，被梁隔断的每个梁间区域至少应设置一只探测器。

4）当被梁隔断的区域面积超过一只探测器的保护面积时，被隔断的区域应按式（18－1）计算探测器的设置数量。

5）当梁间净距小于 1m 时，可不计梁对探测器保护面积的影响。

在宽度小于 3m 的内走道顶棚上设置探测器时，宜居中布置。感温探测器的安装间距不应超过 10m；感烟探测器的安装间距不应超过 15m；探测器至端墙的距离，不应大于探测器安装间距的一半。

探测器至墙壁、梁边的水平距离，不应小于 0.5m。

探测器周围 0.5m 内，不应有遮挡物。

房间被书架、设备或隔断等分隔，其顶部至顶棚或梁的距离小于房间净高的 5% 时，每个被隔开的部分至少应安装一只探测器。

探测器至空调送风口边的水平距离不应小于1.5m，并宜接近回风口安装。探测器至多孔送风顶棚孔口的水平距离不应小于 0.5m。

当屋顶有热屏障时，感烟探测器下表面至顶棚或屋顶的距离，应符合表 18－4 的规定。

锯齿型屋顶和坡度大于 15°的人字型屋顶，应在每个屋脊处设置一排探测器，探测器下表面至屋顶最高处的距离，应符合表 18－4 规定。

表 18－4　　感烟探测器下表面至顶棚或屋顶的距离

探测器的安装高度 h（m）	感烟探测器下表面至顶棚或屋顶的距离 d（mm）					
	顶棚或屋顶坡度 θ					
	$\theta \leqslant 15°$		$15° < \theta \leqslant 30°$		$\theta > 30°$	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大
$h \leqslant 6$	30	200	200	300	300	500
$6 < h \leqslant 8$	70	250	250	400	400	600
$8 < h \leqslant 10$	100	300	300	500	500	700
$10 < h \leqslant 12$	150	350	350	600	600	800

探测器宜水平安装。当倾斜安装时，倾斜角不应大于45°。

在电梯井、升降机井设置探测器时，其位置宜在井道上方的机房顶棚上。

(2) 线型火灾探测器的设置。红外光束感烟探测器的光束轴线至顶棚的垂直距离宜为0.3～1.0m，距地高度不宜超过20m。

相邻两组红外光束感烟探测器的水平距离不应大于14m。探测器至侧墙水平距离不大于7m，且不应小于0.5m。探测器的发射器和接收器之间的距离不宜超过100m。

缆式线型定温探测器在电缆桥架或支架上设置时，宜采用接触式布置；在各种皮带输送装置上设置时，宜设置在装置的过热点附近。

设置在顶棚下方的空气管式线型差温探测器，至顶棚的距离宜为0.1m。相邻管路之间的水平距离不宜大于5m；管路至墙壁的距离宜为1～1.5m。

18.1.4　消防联动控制

18.1.4.1　消防联动控制设计要求：当消防联动控制设备的控制信号和火灾探测器的报警信号在同一总线回路上传输时，其传输总线的敷设应符合GB50116—1998规范第10.2.2条规定。

消防水泵、防烟和排烟风机的控制设备当采用总线编码模块控制时，还应在消防控制室设置手动直接控制装置。

设置在消防控制室以外的消防联动控制设备的动作状态信号均应在消防控制室显示。

18.1.4.2　消防控制设备一般规定：消防控制设备应由下列部分或全部控制装置组成。

1）火灾报警控制器；

2）自动灭火系统的控制装置；

3）室内消火栓系统的控制装置；

4）防烟、排烟系统及空调通风系统的控制装置；

5）常开防火门、防火卷帘的控制装置；

6）电梯回降控制装置；

7）火灾应急广播的控制装置；

8）火灾警报装置的控制装置；

9）火灾应急照明与疏散指示标志的控制装置。

消防控制设备的控制方式应根据建筑的型式、工程规模、管理体制及功能要求综合确定，并应符合下列规定：

1）单体建筑宜集中控制；

2）大型建筑群宜采用分散与集中相结合控制。

消防控制设备的控制电源及信号回路电压宜采用直流 24V。

18.1.4.3 消防控制设备的功能：消防控制室的控制设备应有下列控制功能及显示功能：

1）控制消防设备的启、停，并应显示其工作状态；

2）消防水泵、防烟和排烟风机的启、停，除自动控制外，还应能手动直接控制；

3）显示火灾报警、故障报警部位；

4）显示保护对象的重点部位、疏散通道及消防设备所在位置的平面图或模拟图等；

5）显示系统供电电源的工作状态。

消防控制室应设置火灾警报装置与应急广播的控制装置，其控制程序应符合下列要求：

1）二层及以上的楼房发生火灾，应先接通着火层及其相邻的上、下层；

2）首层发生火灾，应先接通本层、二层及地下各层；

3）地下室发生火灾，应先接通地下各层及首层；

4）含多个防火分区的单层建筑，应先接通着火的防火分区及其相邻的防火分区。

消防控制室的消防通信设备，应符合本节 18.1.5.2 条的规定；

消防控制室在确认火灾后，应能切断有关部位的非消防电源，并接通警报装置及火灾应急照明灯和疏散标志灯；

消防控制室在确认火灾后，应能控制电梯全部停于首层，并接收其反馈信号。

消防控制设备对室内消火栓系统应有下列控制、显示功能：

控制消防水泵的启、停；

显示消防水泵的工作、故障状态；

显示启泵按钮的位置。

消防控制设备对自动喷水和水喷雾灭火系统应有下列控制、显示功能：

控制系统的启、停；

显示消防水泵的工作、故障状态；

显示水流指示器、报警阀、安全信号阀的工作状态。

消防控制设备对管网气体灭火系统应有下列控制、显示功能：

显示系统的手动、自动工作状态；

在报警、喷射各阶段，控制室应有相应的声、光警报信号，并能手动切除声响信号；

在延时阶段，应自动关闭防火门、窗，停止通风空调系统，关闭有关部位防火阀；

显示气体灭火系统防护区的报警、喷放及防火门（帘）、通风空调等设备的状态。

消防控制设备对泡沫灭火系统应有下列控制、显示功能：

控制泡沫泵及消防水泵的启、停；

显示系统的工作状态。

消防控制设备对干粉灭火系统应有下列控制、显示功能：

控制系统的启、停；

显示系统的工作状态。

消防控制设备对常开防火门的控制，应符合下列要求：

门任一侧的火灾探测器报警后，防火门应自动关闭；

防火门关闭信号应送到消防控制室。

消防控制设备对防火卷帘的控制，应符合下列要求：

疏散通道上的防火卷帘两侧，应设置火灾探测器组及其警报装置，且两侧应设置手动控制按钮；

疏散通道上的防火卷帘，应按下列程序自动控制下降：

1）感烟探测器动作后，卷帘下降至距地（楼）面 1.8m；

2）感温探测器动作后，卷帘下降到底。

用作防火分隔的防火卷帘，火灾探测器动作后，卷帘应下降到底；

感烟、感温火灾探测器的报警信号及防火卷帘的关闭信号应送至消防控制室。

火灾报警后，消防控制设备对防烟、排烟设施应有下列控制、显示功能：

停止有关部位的空调送风，关闭电动防火阀，并接收其反馈信号；

启动有关部位的防烟和排烟风机、排烟阀等，并接收其反馈信号；

控制挡烟垂壁等防烟设施。

18.1.5 火灾应急广播，消防电话的设计要求

18.1.5.1 火灾应急广播：控制中心报警系统应设置火灾应急广播，集中报警系统宜设置火灾应急广播。

火灾应急广播扬声器的设置，应符合下列要求：

民用建筑内扬声器应设置在走道和大厅等公共场所。每个扬声器的额定功率不应小于 3W，其数量应能保证从一个防火分区内的任何部位到最近一个扬声器的距离不大于 25m。走道内最后一个扬声器至走道末端的距离不应大于 12.5m。

在环境噪声大于 60dB 的场所设置的扬声器，在其播放范围内最远点的播放声压级应高于背景噪声 15dB。

客房设置专用扬声器时，其功率不宜小于 1.0W。

火灾应急广播与公共广播合用时，应符合下列要求：

火灾时应能在消防控制室将火灾疏散层的扬声器和公共广播扩音机强制转入火灾应急广播状态。

消防控制室应能监控用于火灾应急广播时的扩音机的工作状态，并应具有遥控开启扩音机和采用传声器播音的功能。

床头控制柜内设有服务性音乐广播扬声器时，应有火灾应急广播功能。

应设置火灾应急广播备用扩音机，其容量不应小于火灾时需同时广播的范围内火灾应急广播扬声器最大容量总和的 1.5 倍。

18.1.5.2 消防专用电话：消防专用电话网络应为独立的消防通信系统。

消防控制室应设置消防专用电话总机，且宜选择共电式电话总机或对讲通信电话设备。

电话分机或电话塞孔的设置，应符合下列要求。

下列部位应设置消防专用电话分机：

（1）消防水泵房、备用发电机房、配变电室、主要通风和空调机房、排烟机房、消防电梯机房及其他与消防联动控制有关的，且经常有人值班的机房。

（2）灭火控制系统操作装置处或控制室。

（3）企业消防站、消防值班室、总调度室。

设有手动火灾报警按钮、消火栓按钮等处宜设置电话塞孔。电话塞孔在墙上安装时，其底边距地面高度宜为 1.3～1.5m。

特级保护对象的各避难层应每隔 20m 设置一个消防专用电话分机或电话塞孔。

消防控制室、消防值班室或企业消防站等处，应设置可直接报警的外线电话。

18.1.6　消防控制室（中心）的设计

消防控制室的门应向疏散方向开启，且入口处应设置明显的标志。

消防控制室的送、回风管在其穿墙处应设防火阀。

消防控制室内严禁与其无关的电气线路及管路穿过。

消防控制室周围不应布置电磁场干扰较强及其他影响消防控制设备工作的设备用房。

消防控制室内设备的布置应符合下列要求。

设备面盘前的操作距离：单列布置时不应小于1.5m；双列布置时不应小于2m。

在值班人员经常工作的一面，设备面盘至墙的距离不应小于3m。设备面盘后的维修距离不宜小于1m。

设备面盘的排列长度大于4m时，其两端应设置宽度不小于1m的通道。

集中火灾报警控制器或火灾报警控制器安装在墙上时，其底边距地面高度宜为1.3～1.5m，其靠近门轴的侧面距墙不应小于0.5m，正面操作距离不应小于1.2m。

消防控制室的照明灯具宜采用无眩光荧光灯具，照明线路应接在应急电源回路上，室内环境应按智能建筑环境要求设计。

消防控制室可单独设置，当与BA、SA系统合用控制室时，有关设备在室内应占有独立的区域，且相互相间不会产生干扰。火灾报警控制系统主机及控制盘应设在消防控制室内。

18.1.7　消防设备的供电原则

18.1.7.1　火灾自动报警系统的供电原则：火灾自动报警系统应设有主电源和直流备用电源。

火灾报警系统的主电源应采用消防电源，直流备用电源宜采用火灾报警控制器的专用蓄电池或集中设置的蓄电池。当直流备用电源采用消防系统集中设置的蓄电池时，火灾报警控制器应采用单独的供电回路，并应保证在消防系统处于最大负载状态下不影响报警控制器的正常工作。

火灾自动报警系统中的CRT显示器、消防通信设备等的电源，宜由UPS供电。

火灾自动报警系统主电源的保护开关不应采用漏电保护开关。

18.1.7.2　消防专用设备的供电原则：消防控制室、消防水泵、消防电梯、防排烟设施、火灾自动报警、自动灭火装置、火灾应急照明和电动防火门窗、卷帘、阀门等消防用电，一类建筑应按现行国家电力设计规范规定的一级负荷要求供电；二类建筑的上述消防用，应按二级负荷的两回线路要求供电。

火灾消防及其他防灾系统用电，当建筑物为高压受电时，宜从变压器低压出口处分开自成供电体系，即独立形成防灾供电系统。

一类建筑的消防用电设备的两个电源或两回线路，应在最末一级配电箱处自动切换。

各类消防用电设备在火灾发生期间的最少连续供电时间，可参见表18－5。

二类建筑的供电变压器，当高压为一路电源时亦宜选两台，只在能从另外用户获得低压备用电源的情况下，方可只选一台变压器。

配电所（室）应设专用消防配电盘（箱），如有条件时，消防配电室尽量贴邻消防控制室布置。

对容量较大（或较集中）的消防用电设施（如消防电梯、消防水泵等）应自配电室采用放射式供电。

表 18－5　　消防用电设备在火灾发生期间的最少连续供电时间

序号	消防用电设备名称	保证供电时间（min）	序号	消防用电设备名称	保证供电时间（min）
1	火灾自动报警装置	≥10	8	排烟设备	>60
2	人工报警器	≥10	9	火灾广播	≥20
3	各种确认、通报手段	≥10	10	火灾疏散标志照明	≥20
4	消火栓、消防泵及自动喷水系统	>60	11	火灾暂时继续工作的备用照明	≥60
5	水喷雾和泡沫灭火系统	>30	12	避难层备用照明	>60
6	CO_2 灭火和干粉灭火系统	>60	13	消防电梯	>60
7	卤代烷灭火系统	≥30	14	直升飞机停机坪照明	>60

注　1. 表中所列连续供电时间是最低标准，有条件时应尽量延长。

2. 对于超高层建筑，序号 3、4、8、10、13 项，尚应根据实际情况延长。

对于火灾应急照明、消防联动控制设备、火灾报警控制器等设施，若采用分散供电时，在各层（或最多不超过 3～4 层）应设置专用消防配电屏（箱）。

在设有消防控制室的民用建筑中，消防用电设备的两个独立电源（或两回线路），宜在下列场所的配电屏（箱）处自动切换：

（1）消防控制室；

（2）消防泵房；

（3）消防电梯机房；

（4）防排烟设备机房；

（5）火灾应急照明配电箱；

（6）各楼层消防配电箱等。

火灾报警控制器的直流备用电源的蓄电池容量应按火灾报警控制器在监视状态下工作 24h 后，再加上同时有两个分路报火警 30min 用电量之和计算。

专供消防设备用配电箱、控制箱等主要器件及导线等宜采用耐火、耐热型。当与其他用电设备合用时，消防设备的线路应作耐热、隔热处理。且消防电源不应受别处故障的影响，消防电源设备的盘面应加注“消防”标志。

消防用电设备配电系统的分支线路不应跨越防火分区，分支干线不宜跨越防火分区。

消防用电设备的电源不应装设漏电保护，当线路发生接地故障时，宜设单相接地报警装置。

消防用电的自备应急发电设备，应设有自动起动装置，并能在 15s 内供电。当由市电切换到柴油发电机电源时，自动装置应执行先停后送的程序，并应保证一定时间间隔，在接到“市电恢复”信号后延时一定时间，再进行柴油发电机电源对市电的切换。

18.2　建筑设备自动控制系统的设计要求

18.2.1　一般概念

18.2.1.1　建筑设备自动控制系统的作用：建筑设备自动控制系统（BAS—Building Automation System）是运用自动化仪表、计算机过程控制和网络通信技术，对建筑物内部的环境参数和建筑物内机电设备运行状况进行自动化检测、监视、优化控制及管理。

18.2.1.2　建筑设备自动控制系统的应用目的：建筑设备自动控制系统的主要应用目的，是优化建筑物内各个工艺系统的运行管理，为建筑物内提供良好环境，节省建筑物能耗和提高

工作人员效率，减少运行人员及费用。

18.2.1.3 建筑设备监控系统的适用场所：

《民用建筑电气设计规范》规定：

（1）BAS 占总投资 2%以下；

（2）按 10%～15%节能，5 年内可收回投资。

建筑设备自动控制系统不属于国家强制执行标准范围，应根据建筑物物业运行管理需要，各相关专业的自动控制要求，以及项目投资状况等实际需求，确定建筑设备自动控制系统的内容、范围和标准。

18.2.2 建筑设备自动控制系统的构成

当前的建筑设备自动控制系统多为分布式计算机过程控制系统，一般由监控主机、现场控制器、就地仪表和通信网络四个主要部分组成。

18.2.2.1 监控主机的组成和功能：

（1）监控主机的硬件要求。计算机主机一般采用普通办公或工业型微机，包含与系统处理性能相适应的主板、CPU、内存、硬盘、显示器、光驱、键盘、鼠标等，并带有能满足系统通信要求的网络接口。

主机外围设备包括打印机、控制台等，打印机用于报表和图形打印，一般报表打印选择 A4 激光打印机，图形打印选择 A3 彩色喷墨打印机。控制台用于安装计算机主机设备，外形应美观、便于操作。

（2）自动控制主机的软件要求。自动控制主机软件包括系统软件、图形显示组态软件和应用软件，系统软件应采用通用、稳定、可靠的操作系统及数据库软件。图形显示组态软件应支持整个系统的硬件设备，具备中文界面，并易于组态编程操作。应用软件是专为项目实施的由组态软件形成的，应能满足整个系统的自动检测、控制和管理要求，且为用户留有后续维护管理的手段。

（3）自动控制主机的功能要求。自动控制主机是设备监控系统的核心，其主要功能为：自动控制系统内的设备和参数在合理优化的状态下工作，自动监视系统中每台设备的运行状态和系统的运行参数，对设备故障和异常参数及时报警和自动记录，自动记录、存储和查询历史运行数据等。

18.2.2.2 通信网络的性能要求：

（1）现场总线（Fieldbus）。

1）现场总线的定义。美国仪表协会（ISA/SP50）现场总线的定义：“现场总线是一种串行的数字数据通信链路，它沟通了过程控制领域的基本控制设备（及车间级设备之间的联系）。这里的现场设备指最低层的控制设备、监测设备和执行设备，包括传感器、控制器、智能阀门、微处理器和存储器各种类型的仪表产品。

国际电工委员会 IEC/TC65 标准和现场总线基金会 FF 的定义：“现场总线是连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络”。

智能仪表为内藏微机或微处理器的仪器。

2）现场总线的特点。

a. 现场通信网络：为现场设备之间的通信网络；

b. 现场设备互联：用于连接现场数字化设备；

c. 互操作性：作为不同生产厂的互联标准；

d. 分散功能块：功能和危险性分散；

e. 通信线供电；

f. 开放式互联网络：网络互联与数据共享；

g. 现场通信的核心支持技术：数字化。

3）现场总线的典型结构示意图，见图 18－1。

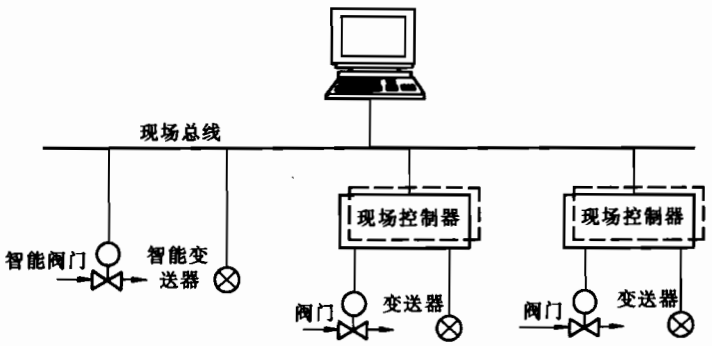


图 18－1　现场总线结构示意图

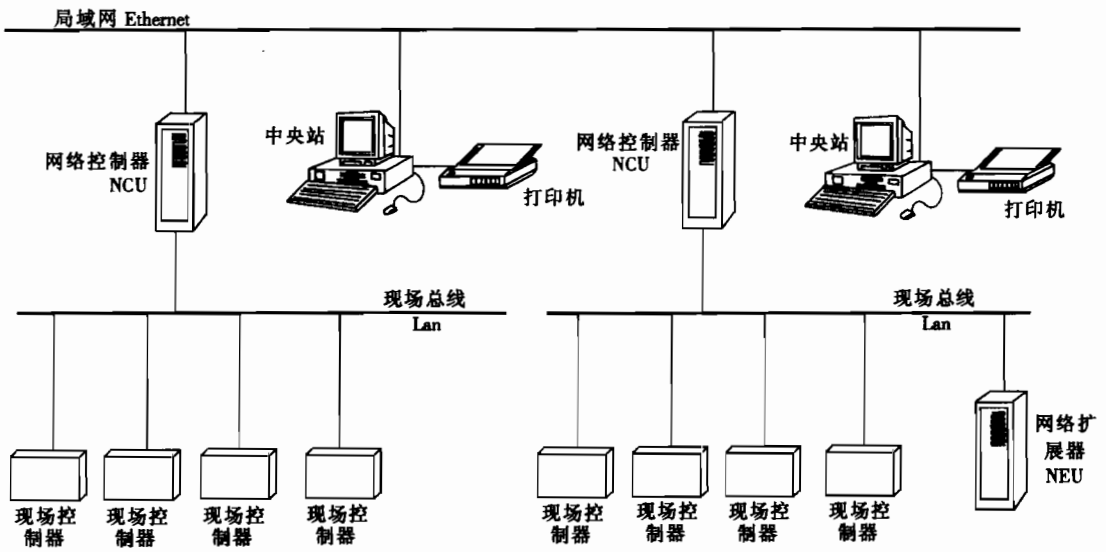


图 18－2　BAS 网络拓扑结构图（一）

（2）建筑设备自动控制系统通信网络的要求。通信网络和通信设备的设置，应满足系统响应时间要求、通信子网的数量限制要求、系统总点数限制要求。

每个通信子网应使自动控制主机数量、现场控制器台数、监控点数、通信网络的线路长度、通信网络的线路规格等符合各生产厂商的网络通信要求。

（3）建筑设备自动控制系统通信网络的常用结构型式，见图 18－2～图 18－4。

（4）建筑设备自动控制系统开放性标准。

1）LonWorks 标准；

2）BACnet 标准。

（5）LonWorks 技术介绍。

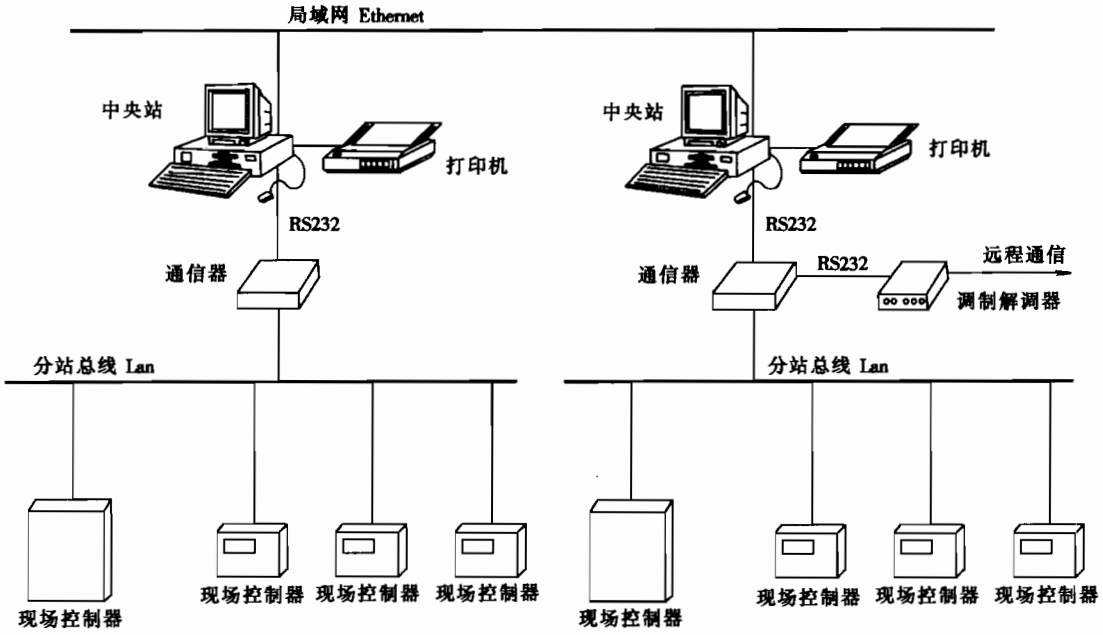


图 18－3　BAS 网络拓扑结构图（二）

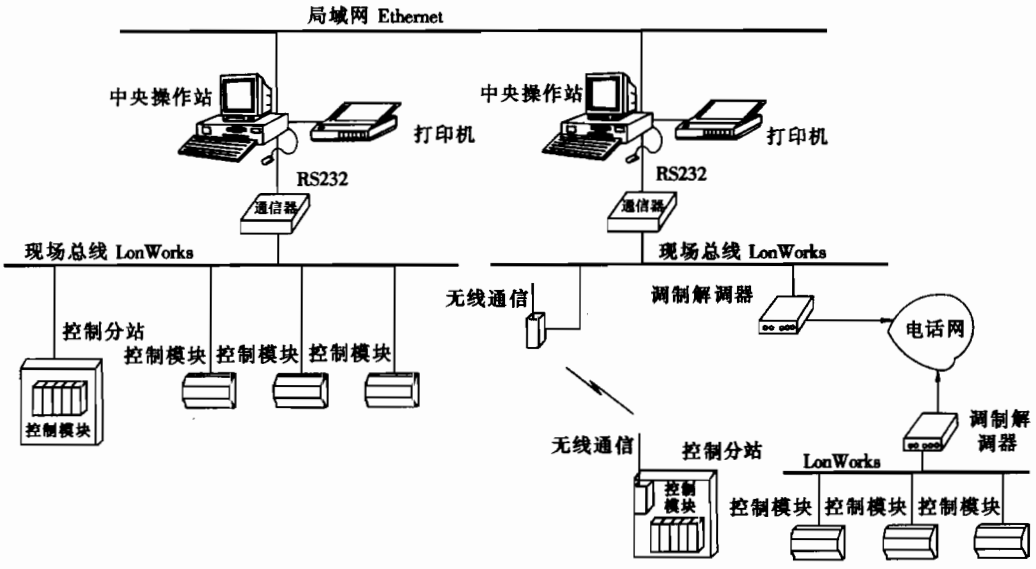


图 18－4　BAS 网络拓扑结构图（三）

注：系统特点：

1. LonWorks 为开放式通信协议，不同厂商开发的 LonWorks 控制产品可在同一网络下运行，易于实现多种厂商产品和不同系统之间的系统集成，便于系统未来扩展。
2. LonWorks 协议支持多种通信介质，如双绞线、电力线、无线等，适用于多种通信要求场合。
3. 控制模块产品种类多，选择范围大，可组合成较经济适用的控制系统，每个模块可独立运行，实现系统的分布控制，使得系统布线简便，可靠性高。

Lon 总线（Local Opration Networks），美国 Echelon 公司 1991 年产品，很多建筑设备自动控制系统厂商应用其技术，是建筑设备自动控制系统开放性标准之一。

1）LonWorks 技术核心。LonWorks 技术核心是神经元芯片（Neuron chip），内部装有 3 个微处理器，MAC 处理器、网络处理器和应用处理器。

a. MAC 处理器：完成介质访问控制；

b. 网络处理器：完成网络通信管理；

c. 应用处理器：完成用户控制编程。

2）神经元芯片内部结构图，见图 18－5。

3）LonWorks 控制节点结构图，见图 18－6。

4）LonWorks 控制系统特点：

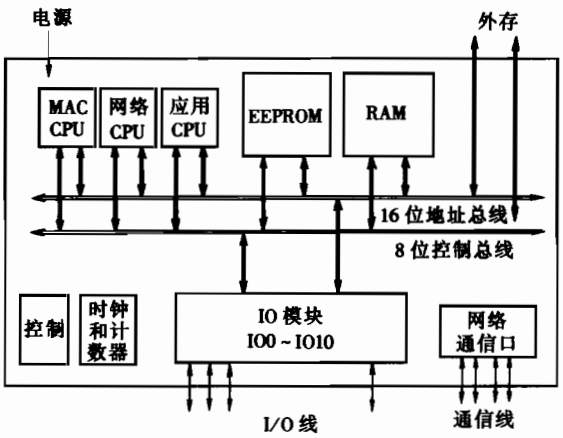


图 18－5　神经元芯片内部结构图

a. 神经元芯片构成的控制节点具有 3 个微处理器，包括 11 个 IO 口，可以完成控制和网络通信功能；

b. 每个控制节点具备完整的 OSI 7 层网络通信协议，通过网络变量（NV）等能方便地传输数据；

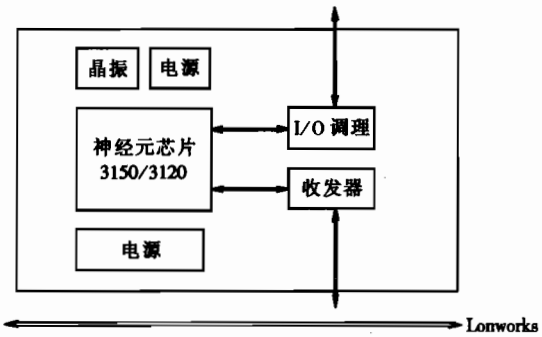


图 18－6　LonWorks 控制节点结构图

c. 支持多种通信介质：选择不同收发器，可支持双绞线、无线、电力线等通信介质；

d. 为开放性系统，可实现网络的互操作性。

18.2.2.3　现场控制器：

（1）现场控制器的功能。现场控制器是安装于现场自动控制对象附近的小型化专用计算机控制设备，其主要功能为：

1）数据转换功能：对现场仪表信号作采集和数据转换，输出控制信号至现场执行机构；

2）控制功能：可进行基本控制运算，独立实施设备自动控制功能；

3）通信功能：接受自动控制主机指令，将信号和执行结果送至自动控制主机。

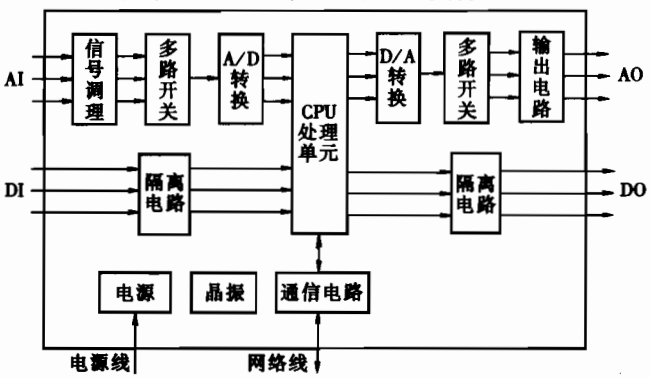


图 18－7　现场控制器的主要工作原理和框图

（2）现场控制器的主要工作原理和框图，见图 18－7。

（3）现场控制器的信号及精度。现场控制器的信号分为模拟量输入（AI）、模拟量输出（AO），开关量输入（DI）、开关量输出（DO）四种。

现场控制器的信号应与现场仪表的信号相匹配。

现场控制器的信号测量和数据转换精度，应满足系统的测量和控制要求。

（4）现场控制器的结构。现场控制器的结构选择应根据被自动控制设备的特点而定，测控点较少且功能要求比较固定的设备，可选用输入输出点数相对固定结构的现场控制器。测控点较多且变化较多的设备，可选用输入输出点数可灵活组合结构的现场控制器。

（5）现场控制器的安装。现场控制器应安装在被自动控制设备较集中的场所，以尽量减少管线敷设，一般设置在电控箱内挂墙明装，电控箱内内部设备应布置整齐美观，强弱电系统分开，并便于检修。

（6）现场控制器的通信速率。现场控制器的通信速率应满足整个自动控制系统的响应速度。

现场控制器之间应可通过通信实现现场信息与数据共享。

18.2.2.4 就地仪表的性能：

（1）就地仪表的分类及主要功能。就地仪表分为检测仪表和执行仪表两大类。建筑设备自动控制系统中常用的检测仪表包括：温度、湿度、压力、压差、流量、水位、一氧化碳、二氧化碳、照度、电量等测量仪表。执行仪表包括电动调节阀、电动蝶阀、电磁阀、电动风门执行机构等。

检测仪表中分为处理模拟量信号的传感器类仪表和处理数字量的控制器类仪表，检测仪表的主要功能是将要被检测的参数稳定准确可靠地转换成现场控制器可接受的电信号。

执行仪表中分为对被调量可进行连续调节的调节阀类仪表和对被调量进行通断两种状态控制的切断阀类仪表，执行仪表的主要功能是接受现场控制器的信号，对现场参数进行稳定准确可靠的调节。

（2）数字量和模拟量的基本概念。

1）数字量（digital）：又称开关量，只有“通/断”或“0/1”两种状态；

2）模拟量（analog）：连续变化的量，如 0～10V，4～20mA 等。

（3）仪表测量精度的基本概念。就地仪表的测量精度应满足被测参数的测量和自动控制的精度要求。

（4）检测仪表选择的一般原则。检测仪表的选择包括仪表的适用范围、量程、输出信号、测量精度、尺寸规格、防护等级、安装方式等。

检测仪表的选择原则：在满足仪表测量精度和安装场所要求的前提下，应尽量选择结构简单、稳定可靠、价格低廉、通用性强的检测仪表。

（5）检测仪表的量程选择。检测仪表的量程选择应符合工业自动化仪表的系统设计规定，并符合现场的实际需求。对于温度测量仪表，选择量程时应使常用工作温度位于量程的 2/3 处；对于压力和压差测量仪表，选择量程时应使常用工作压力位于量程的 1/2 处；对于流量等其他测量仪表，选择量程时应使量程超过被测参数正常可能达到的最大值，同时应注意：

仪表量程选择应根据实际情况而定，在满足仪表测量范围情况下应使仪表量程最小，以减少仪表测量的绝对误差。

仪表量程应尽量采用标准测量范围的圆整值，如1、1.6、2.5、4、6乘以10的N次方或整数。

(6) 就地仪表的输出（输入）信号。就地仪表的输出（输入）信号应与现场控制器的输入（输出）信号相匹配。

就地仪表的输出（输入）信号应具备一定通用性，以便日常维护和备件供应。

(7) 就地仪表的结构。应根据现场的安装条件，选择水管、风管、室内、室外等结构型式的就地仪表，并应符合插入深度、耐压等级、固定方式等安装要求。

(8) 就地仪表的安装。就地仪表的安装，如取测点结构型式、外部管路连接方式、维修阀门的设置等，应符合工业自动化仪表安装规范。

(9) 电动阀门和电动执行机构。在需要对被控对象进行通断两种状态的控制时，应采用电动控制阀。在需要对被控对象进行流量的连续调节时，应采用电动调节阀，两种阀门不可互换使用。

建筑设备自动控制系统中常用的电动调节阀有电动调节两通阀、三通阀、单座柱塞阀、双座柱塞阀、套筒阀、蝶阀等，应根据现场被控设备的技术条件进行选择。其控制信号应与现场控制器的输出信号相匹配，重要场所阀门应将位置反馈信号送至现场控制器，阀门技术规格应满足安装场所的工作压力、温度和最大允许差压值需求。

建筑设备自动控制系统中常用的电动控制阀有电动蝶阀、电动闸板阀、电磁阀等。电动蝶阀多用于大口径水管路中的流量控制，电动闸板阀多用于一般管路中的流量控制，电磁阀一般用于小管径且正常工作时线圈不带电时的工作条件下。重要场所或安装位置就地操作困难的大口径电动控制阀，应在就地或便于操作的地点设置阀门的电控操作箱，便于紧急情况或调试阶段进行手动控制。

电动执行机构在建筑设备自动控制系统中多用于风门的控制，应使输出连接方式和转距与风门的机械结构相匹配，同时输出扭矩可满足风门的动作要求。

(10) 现场仪表的安装。现场仪表的取测点、传感器、执行机构和电动阀门的安装，应符合工业自动化仪表有关安装和验收规范。

18.2.3 建筑设备自动控制系统常用现场仪表及主要控制原理

18.2.3.1 温度测量仪表：

(1) 热电偶。

1) 测量原理。两种金属材料一端（热端）熔接，当两端处在不同温度中，另一端（冷端）会产生热电势。根据测量出的电势和冷端温度，得到被测量处的温度。

2) 冷端补偿方法。恒定冷端温度：将冷端用补偿导线延长至恒温处。

冷端温度补偿器：将冷端用补偿导线延长至冷端温度补偿器处，再用铜电阻在一定范围内补偿，相当于冷端恒温在20℃。

3) 常用热电偶。分度号为E：镍铬－考铜，常用温度400～600℃，短期使用800℃；分度号为K：镍铬－镍硅，常用温度500～800℃，短期使用1000℃；分度号为S：铂铑－铂，常用温度800～1100℃，短期使用1300℃。

(2) 热电阻。

1) 测量原理。金属在不同的温度下具有不同的电阻值，根据测量出的电阻得到被测量处的温度值。

2) 两线制与三线制。测量导线在不同的温度下也具有不同的电阻值，采用两线接法会

叠加在热电阻上产生一定测量误差。三线制接法将现场导线产生的线路电阻分别接入温度测量电路两个不同桥臂，以抵消现场导线产生的温度误差。

3）常用热电阻。分度号为 Pt50、Pt100、Ni1000；常用温度 400℃以下。

（3）热敏电阻。测量原理为半导体 PN 结在不同的温度下具有不同的电阻值，根据测出的电阻得到被测量处的温度值。阻值较高，如 $R_0 = 10\ k\Omega$，线路电阻误差可忽略。

（4）温度传感器与变送器。将测量范围内的温度值转换成电气测量模拟量信号输出。

1）温度传感器：输出 0～10V、0～2V、4～20mA 等信号；

2）温度变送器将电阻信号转换为 4～20mA 标准信号；

3）变送器的两线制与四线制。四线制为两根电源线 + 两根信号线；

两线制为电源线和信号线共用两根线。

（5）温控器。当被测量范围内的温度值达到设定值时发出接点信号。输出信号为开关量，常用温包式、毛细管、双金属，用于低温保护等处。

（6）温度仪表的结构型式。

1）风管内安装式：螺纹或法兰连接，带保护套管；

2）水管内安装式：螺纹或法兰连接，带密封保护套管；

3）室内安装式：螺钉安装；

4）室外安装式：螺钉安装，带防护罩。

18.2.3.2 湿度测量仪表：

（1）测量原理。

1）阻性疏松聚合物式湿度测量元件，湿度增加电阻加大。

2）高分子薄膜电容式湿度测量元件，湿度增加电容加大。

（2）湿度传感器。输出 0～10V、0～2V、4～20mA 等信号。

（3）温、湿度传感器。输出温、湿度两路信号。

（4）结构型式。

1）风管内安装式：螺纹或法兰连接，带保护套管；

2）室内安装式：螺钉安装；

3）室外安装式；螺钉安装，带防护罩。

18.2.3.3 压力与差压测量仪表：

（1）测量原理。压力——→位移——→电信号——→标准连续信号。

（2）压力与差压变送器。将测量值转换成电气测量模拟量信号输出，输出：0～10V 、4～20mA 等信号。

1）膜片、膜盒式；

2）弹簧管式；

3）扩散硅式；

4）电容式。

（3）压力、压差控制器。当被测量值达到设定值时发出接点信号。

18.2.3.4 流量测量仪表：应注明：流量范围、介质特性、工作温度、工作压力等。

（1）电磁流量计。

1）测量原理。通电线圈中当导电介质通过时产生感应电流。输出连续信号：4～20mA。

2）结构型式为管道卡装式和插入式。

(2) 标准节流装置。

1) 测量原理。在被测管路中安装节流装置，节流装置两侧产生的压差与流量的平方成正比。节流装置常用孔板、喷嘴等。

采用差压测量方式，加差压变送器；输出连续信号：4～20mA。

2) 结构型式。环式角接取压。

(3) 涡流量计。

1) 测量原理。在被测管路中安装阻力杆，阻力杆后产生的旋涡与流量相关，通过测量旋涡的频率得到流量。

加脉冲变换器后输出连续信号：4～20mA，需电源。

2) 结构型式。阻力杆常用菱形、圆形等。

(4) 流量开关。

1) 测量原理。安装在被测管路中的叶片当流体流过时发生机械偏转，达到其设定值时产生接点信号的变化。

2) 结构型式：

风流开关、水流开关；

尽量用差压开关代替，使用寿命较长。

18.2.3.5 液位测量仪表：

(1) 浸入式液位计。

1) 测量原理。当被测容器液位变化时将对底部产生不同的压力，通过安装在被测容器底部的传感器测出压力得出液位测量值。

连续测量液位，输出模拟量信号，需电源。

2) 结构型式。不锈钢管或橡胶电缆插入管，必须用于不带压容器的测量。

(2) 浮球式液位计：

1) 测量原理。连接在被测容器内固定杆上的浮球漂浮在液面上，当液位下降时将倾斜翻转，引起内部机械开关信号的变化。

每个浮球产生一个开关量信号，如需多个位置的水位测量必须设置多个浮球传感器。

2) 结构型式。浮球材料有塑料、尼龙、不锈钢等，饮用水箱必须符合卫生标准。

18.2.3.6 电量测量仪表：

(1) 测量原理。电流互感器（0～5A）⟶变送器（4～20mA）⟶DDC；

电压互感器（0～100V）⟶变送器（4～20mA）⟶DDC；

集成测量方式：三相进线，测量多个参数，数据通信。

(2) 测量参数。电压、电流、功率因数、有功、无功功率、电量、频率等。

18.2.3.7 其他测量仪表：

1) 一氧化碳变送器：车库用；

2) 二氧化碳变送器：多安装于回风道中；

3) 照度变送器：室外照明控制。

18.2.3.8 电动调节阀：

(1) 电动执行机构。

1) 工作原理。将输入控制信号通过伺服电动机和减速器转换成机械位移，驱动阀体动作，通过流量进行调节。

2）输出机械特性。

a. 行程：可选，必须与阀体匹配；

b. 输出力矩：可选；

c. 直行程：距离和力矩；

d. 角行程：转角和扭距。

3）电气特性。

a. 供电电源：～220、～24V，一般可选；

b. 控制信号：可由模拟量或开关量控制阀门开度

模拟量：0～10V、4～20mA；

开关量：直接控制开、关阀线圈的通断，两个 DO 控制一个执行机构；

c. 阀位反馈：0～10V、4～20mA、电阻值，或全开、全关状态。

(2) 调节阀体。

1）结构型式：单座阀、双座阀、套筒阀、蝶阀与风门等；两通阀与三通阀。

2）材质：黄铜、铸铁、铸钢、铸不锈钢、密封材料。

3）调节阀耐压与前后差压最大允许值。

(3) 调节阀的特性与计算。

调节阀具备流量调节特性：

1）调节阀的流量特性：在整个开度范围内，流过调节阀的介质流量与调节阀开度的关系。常用的特性有线性、等百分比特性。

2）调节阀的计算与选择。调节阀的选择对整个自动控制回路的调节效果影响至关重要。

根据调节阀全开时压降与系统管路总压降的比值（S）选择调节阀特性。

流通能力计算：根据流通能力查表选择阀门口径。

18.2.3.9 电动控制阀：只有全开全关两种工作方式，不允许作为调节阀使用。

(1) 工作原理。将输入控制信号通过伺服电动机和减速器转换成机械位移，驱动阀体动作，对通过流量进行通断控制。

(2) 电气特性。

1）供电电源：～380、～220、～24V；控制信号：由开关量直接控制阀门开、关线圈的通断，两个 DO 控制一个执行机构。

2）阀位反馈：全开全关状态信号。

(3) 阀体结构型式：

1）闸阀、蝶阀等；

2）材质：黄铜、铸铁、铸钢、铸不锈钢、密封材料。

(4) 手动工作状态。重要或人工难以操作的电动阀门应具备远程手动操作方式。

18.2.4 建筑设备自动控制系统中的自动调节系统

18.2.4.1 自动调节系统基本概念：

(1) 测量值。通过仪表实际采集到的现场工艺参数值。

(2) 给定值。要求保持的工艺参数值叫做给定值。

(3) 偏差。给定值与测量值之差叫做偏差，即偏差 e = 给定值 R - 测量值 X，给定值大于测量值时为正偏差，给定值小于测量值时为负偏差。

(4) 反馈。将输出量的一部分或全部，通过一定的网络（称为反馈网络），反送回输入回路的方法叫做反馈。反馈结果使输出量增大的称为正反馈，使输出量减小的称为负反馈。自动调节系统通常采用负反馈。

(5) 调节对象。自动调节系统所控制的生产工艺设备叫做调节对象。

(6) 调节对象特性。调节对象本身具有的响应特性。典型调节对象特性有比例特性（封闭水箱）、积分特性（有流出口水箱）及一阶惯性特性（温度）等。

18.2.4.2 自动调节系统的基本组成：由调节设备和调节对象构成的具有自动调节功能的系统，称为自动调节系统。

自动调节系统由测量元件、变送单元、计算单元、调节单元、执行机构、调节机构（如阀门、挡板）和调节对象组成。

18.2.4.3 自动调节系统的基本调节规律：

(1) 位式调节。当测量值超过设定点后对被控设备的通断控制，常用两位式与三位式控制。

1) 两位式控制：如空调机组的低温保护控制；

2) 三位式控制：如高、低水箱水位控制。

(2) 负反馈闭环调节。

1) 开环调节：根据被测参数进行自动调节，但无反馈。如无二氧化碳传感器的新风门开度控制。

2) 负反馈闭环调节：根据被调量与给定值的偏差进行自动调节，调节结果负反馈至调节对象输入端，使偏差逐步减小直至消除。如空调机组回风温度自动调节。

(3) 闭环调节的基本调节规律。PID 调节规律：即比例—积分—微分调节规律。

1) 比例调节：输出与偏差成比例，有差调节；

2) 积分调节：输出与偏差的累积值成比例，无差调节；

3) 微分调节：输出与偏差的变化趋势成比例。

(4) 闭环调节的主要性能要求。

1) 稳定性：系统要稳定，不允许振荡与发散；

2) 响应时间：调节速度尽可能快，满足系统要求；

3) 超调量：最大超调量不能超过安全允许值。

18.2.4.4 自动调节系统的参数整定：设定比例、积分、微分调节系数，使自动调节系统的安全稳定运行。

(1) 比例调节系数（P）的作用：P 越大，调节作用越强，在相同偏差下输出值越大。P 太小调节时间长，P 太大引起系统振荡甚至发散。

(2) 积分调节系数（I）的作用：I 越小，调节作用越强，偏差的累积值调节作用越强。I 太大误差消除调节时间长，I 太小引起系统超调量大，甚至振荡和发散。

(3) 微分调节系数（D）的作用：D 越大，调节作用越强，初始调节作用越强。D 太小调节时间长，D 太大引起系统振荡和发散。

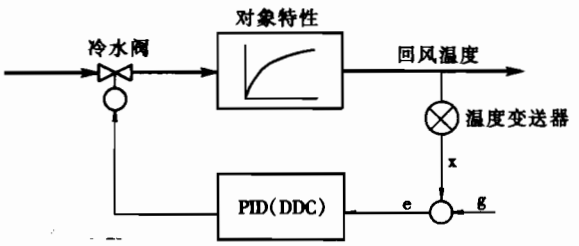


图 18－8 自动调节系统例图

18.2.4.5 自动调节系统的一个实例：见

图 18－8。

18.2.4.6 建筑设备自动控制系统中常用的自动调节系统：

1）开环调节：新风阀；

2）位式调节：水箱水位，冷却塔温度；

3）PID 调节：空调机组温度、湿度调节；

4）分程调节：焓值控制，冷冻水与新风门按季节改变调节方式；

5）随动调节：室内温度、照度给定值随室外温度、照度而变化；

6）时间表控制：工作时间、节假日设备启停控制。

18.2.5 建筑设备自动控制系统的自动控制功能

建筑设备自动控制系统的主要功能，应满足建筑物中各个机电设备子系统的经济合理优化的运行要求，满足建筑物总体弱电信息系统集成化管理的要求，其各设备自动控制子系统常见功能如下：

18.2.5.1 冷冻站设备自动控制子系统：见图 18－9，其常用自动控制功能见表 18－6。

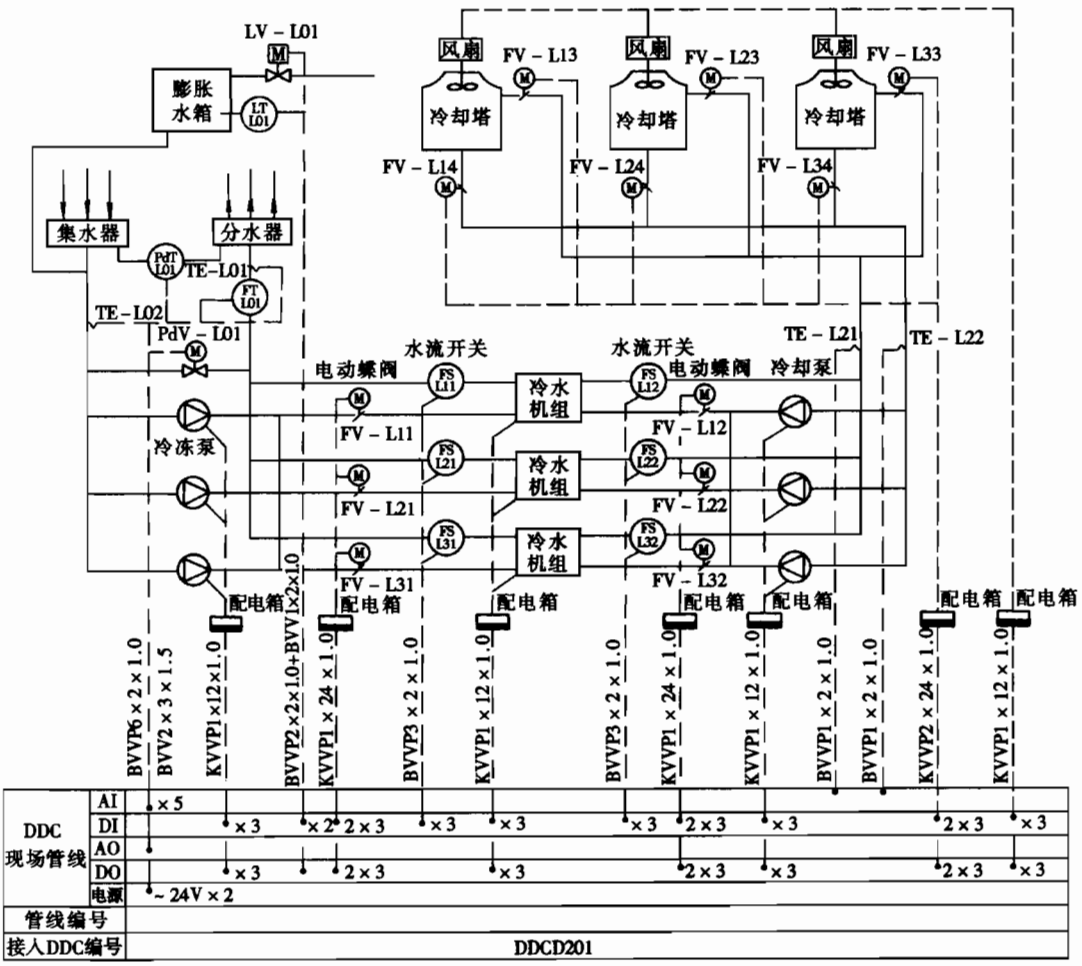


图 18－9 冷冻站设备自动控制系统

表 18－6　　冷冻站设备自动控制子系统常用自动控制功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
冷冻水供、回水温度	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	水管式温度传感器，插入长度使敏感元件位于管道中心位置；保护管应符合耐压等级
冷冻水供水流量	瞬时与累计值的自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	电磁流量计，注明工作温度、压力、管径、流量范围、介质重度、黏度和导电率
冷负荷计算	根据冷冻水供、回水温度和供水流量测量值，自动计算建筑物实际消耗冷负荷量	
冷水机组台数控制	根据建筑物所需冷负荷和实际冷负荷量，自动确定冷水机组运行台数，达到最佳节能目的	每台冷水机组的电控柜内应为建筑设备自动控制系统设置控制和状态信号接点
供回水压差自动调节	根据供回水压差测量值，自动调节冷冻水旁通水阀，以维持供回水压差为设定值	差压变送器、双座或其他最大差压允许值大的电动调节阀，调节阀口径和特性应满足调节系统的动态要求，耐压等级能满足工作条件
冷却水供、回水温度	参数及测量自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	水管式温度传感器，插入长度使敏感元件位于管道中心位置；保护管应符合耐压等级
膨胀水箱水位自动控制	自动控制进水电磁阀的开启与闭合，使膨胀水箱水位维持在允许范围内，水位超限时进行故障自动报警和记录	浮球式水位控制器，设置上、下限水位控制和高、低报警四个控制点；常闭式电磁阀
冷却水温度自动控制	自动控制冷却塔风扇启停，使冷却水供水温度低于设定值	每台冷却塔风扇的电气控制回路内，应为建筑设备自动控制系统设置控制和状态信号接点
冷水机组保护控制	机组运行状态下，冷冻水与冷却水的水流开关自动检测水流状态，如异常则自动停机，并报警和进行事故记录	在每台冷水机组的冷冻水和冷却水管内安装水流开关
冷水机组定时启停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时启停机组	机组电控柜内应设置状态信号和控制信号
冷水机组连锁控制	启动顺序：开启冷却塔蝶阀，开启冷却水蝶阀，启动冷却水泵，开启冷冻水蝶阀，启动冷冻水泵，水流开关检测到水流信号后启动冷水机组。停止顺序：停冷水机组，关冷冻泵，关冷冻水蝶阀，关冷却水泵，关冷却水蝶阀，关冷却塔风机、蝶阀	电动控制蝶阀，蝶阀公称直径与管径相同，除现场控制器外，电动蝶阀宜设置单独的电动控制装置
自动统计与管理	自动统计系统内各水泵、风机的累计工作时间，进行启停的顺序控制，提示定期维修	
	可选自动控制功能	
	根据系统需要增设其他测量控制点	
机组通信	与机组控制器进行数据通信	专用通信接口及软件

18.2.5.2　热交换站设备自动控制子系统：见图 18－10，其常用功能见表 18－7。

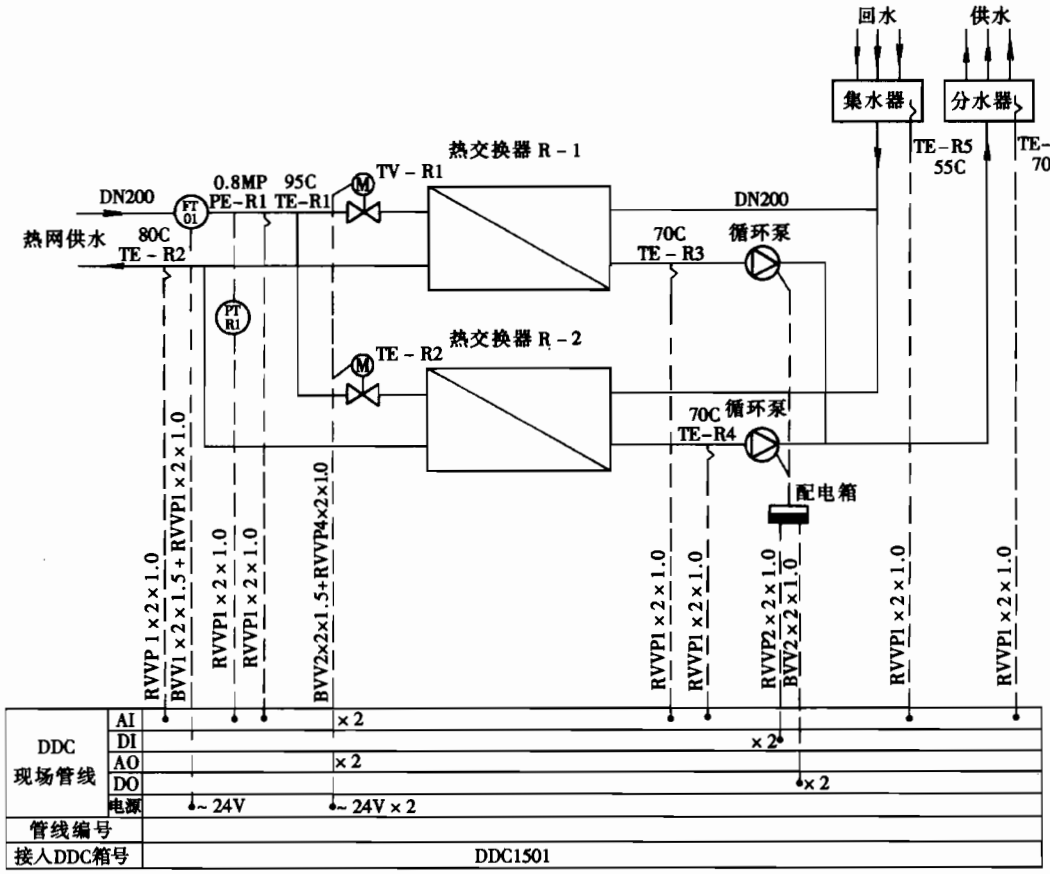


图 18－10　热交换站设备自动控制系统

表 18－7　　热交换站设备自动控制子系统常用自动控制功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
一次水供、回水温度	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	水管式温度传感器，插入长度使敏感元件位于管道中心位置；保护管应符合耐压等级
一次水供水压力	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	压力变送器，性能应稳定可靠，安装和取压方式应能满足规范要求
一次水供水流量	瞬时与累计值的自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	电磁流量计，注明：工作温度、压力、管径、流量范围、介质重度、黏度和导电率；如导电率无法满足要求，可采用标准节流装置和差压变送器，需经过计算选取参数
自动计算消耗热量	根据供、回水温度和供水流量测量值，自动计算建筑物实际消耗热负荷量	
二次水供、回水温度	测量参数自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	水管式温度传感器，插入长度使敏感元件位于管道中心位置；保护管应符合耐压等级
二次水温度自动调节	自动调节热交换器一次热水/蒸汽阀开度，维持二次出水温度为设定值	电动调节阀，调节阀口径和特性应满足调节系统的动态要求，耐压等级能满足工作条件
自动连锁控制	当循环泵停止运行时，一次水调节阀应迅速关闭	
设备定时启停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时启停设备，自动统计设备工作时间，提示定期维修	水泵电控柜内应设置状态信号和控制信号
	可选自动控制功能	
	根据系统需要增设其他测量控制点	

18.2.5.3 空调机组设备自动控制子系统：见图 18－11，其常用自动控制功能见表 18－8。

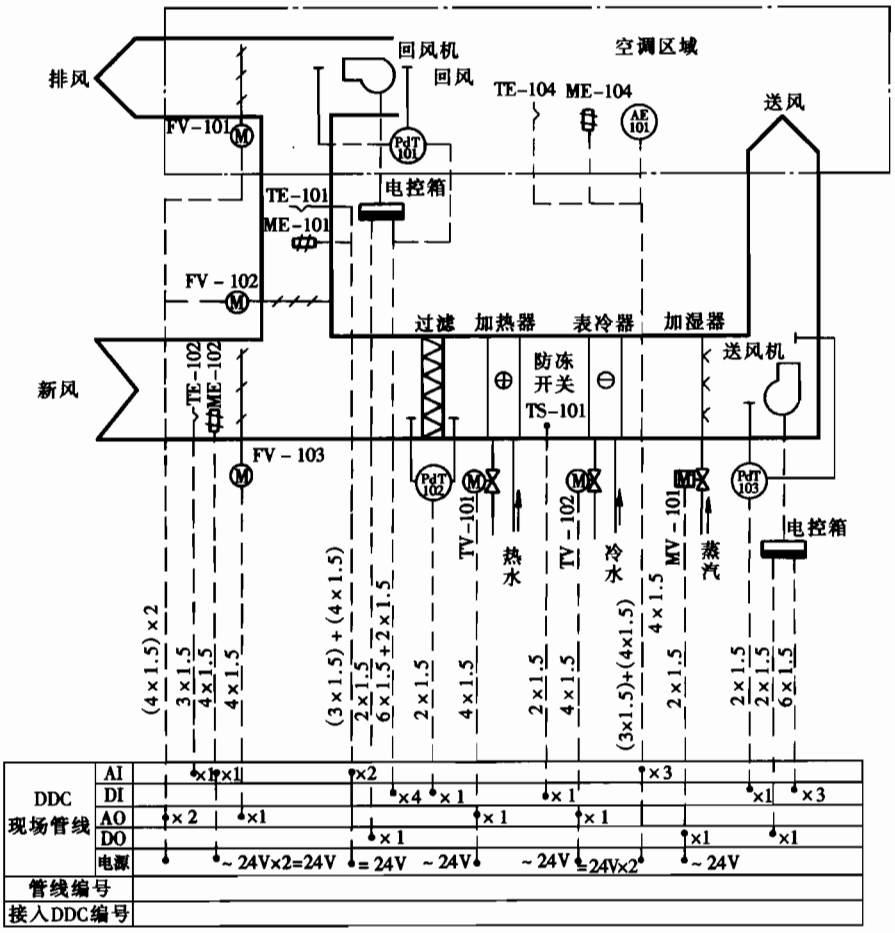


图 18－11 空调机组设备自动控制系统

表 18－8 **空调机组设备自动控制子系统常用自动控制功能**

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
新风门控制	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	电动风门执行机构，要求与风阀联结装置匹配并符合风阀的转矩要求。控制信号和位置反馈信号与现场控制器的信号相匹配
过滤器堵塞报警	空气过滤器两端压差大于设定值时报警，提示清扫	压差控制器，量程可调
防冻保护	加热器盘管处设温控开关，当温度过低时开启热水阀，防止将加热器冻坏	温度控制器，量程可调，一般设置在4℃左右
回风温度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	风管式温度传感器，风管内插入长度＞25mm
回风温度自动调节	冬季自动调节热水调节阀开度，夏季自动调节冷水调节阀开度，保持回风温度为设定值。过渡季根据新风的温湿度自动计算焓值，进行焓值调节	电动调节阀，调节阀口径和特性应满足调节系统的动态要求，耐压等级能满足工作条件
回风湿度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	风管式湿度传感器

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
回风湿度自动控制	自动控制加湿阀开断，保持回风湿度为设定值	常闭式电磁阀，调节阀口径与管径相同，耐温符合工作温度要求，控制电压等级与现场控制器输出相匹配
风机两端压差	风机启动后两端压差应大于设定值，否则及时报警与停机保护	压差控制器，量程可调
机组定时启停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时启停机组	机组电控柜内应设置状态信号和控制信号
工作时间统计	自动统计机组工作时间，定时维修	
联锁控制	风机停止后，新、回风风门、电动调节阀、电磁阀自动关闭	
空调机组设备自动控制子系统可选功能		
重要场所的环境控制	在重要场所设温湿度测点，根据其温湿度直接调节空调机组的冷热水阀，确保重要场所的温湿度为设定值	重要场所的温湿度测点可分别采用室内式温、湿度传感器，也可采用一体式温湿度传感器
最小新风量控制	在回风管内设置二氧化碳检测传感器，根据二氧化碳浓度自动调节新风阀，在满足二氧化碳浓度标准下使新风阀开度最小，可节能	二氧化碳浓度检测传感器采用可风管安装方式，量程符合工作条件要求
新风温湿度自动检测	测量参数自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	温湿度测点可分别采用风管式温、湿度传感器，也可采用一体式温湿度传感器
送风温湿度自动检测	测量参数自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	温湿度测点可分别采用风管式温、湿度传感器，也可采用一体式温湿度传感器

18.2.5.4 新风机组设备自动控制子系统：见图 18－12，其常用自动控制功能见表 18－9。

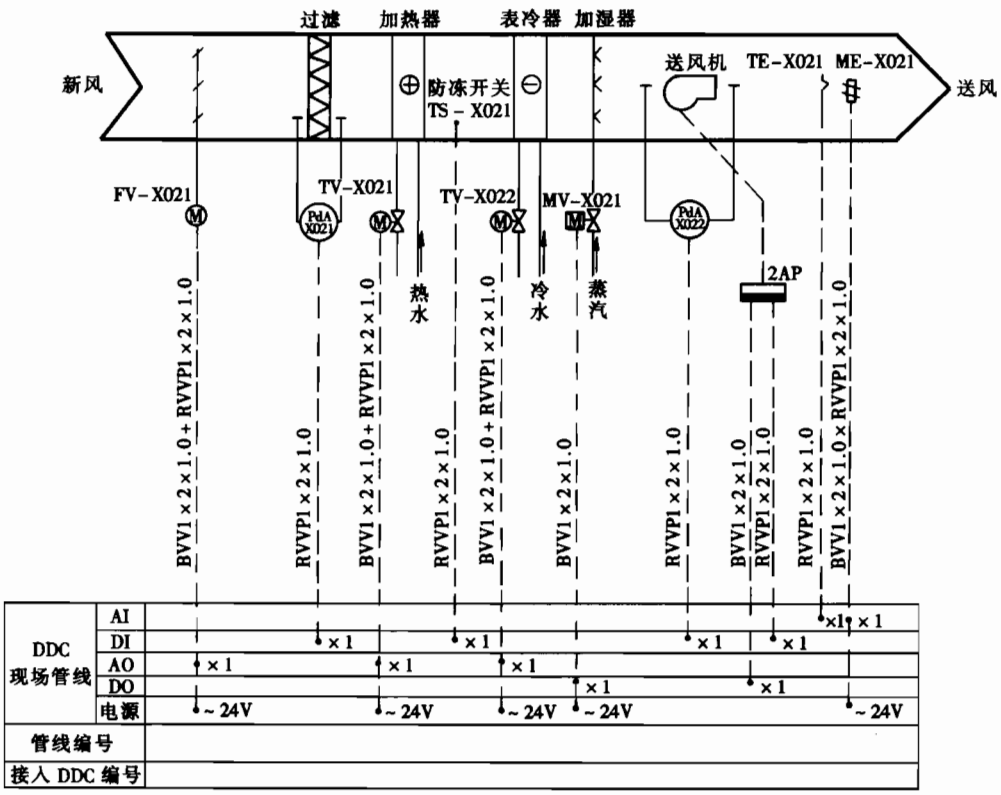


图 18－12 新风机组设备自动控制系统图

表 18－9　　新风机组设备自动控制子系统常用自动控制功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
新风门控制	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	电动风门执行机构，要求与风阀联结装置匹配并符合风阀的转矩要求。控制信号和位置反馈信号与现场控制器的信号相匹配
过滤器堵塞报警	空气过滤器两端压差大于设定值时报警，提示清扫	压差控制器，量程可调
防冻保护	加热器盘管处设温控开关，当温度过低时开启热水阀，防止将加热器冻坏	温度控制器，量程可调，一般设置在4℃左右
送风温度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	风管式温度传感器，风管内插入长度＞25mm
送风温度自动调节	冬季自动调节热水调节阀开度，夏季自动调节冷水调节阀开度，保持送风温度为设定值。过渡季根据新风的温湿度自动计算焓值，进行焓值调节	电动调节阀，调节阀口径和特性应满足调节系统的动态要求，耐压等级能满足工作条件
送风湿度自动检测	参数测量及自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	风管式湿度传感器
送风湿度自动控制	自动控制加湿阀开断，保持送风湿度为设定值	常闭式电磁阀，调节阀口径与管径相同，耐温符合工作温度要求，控制电压等级与现场控制器输出相匹配
风机两端压差	风机启动后两端压差应大于设定值，否则及时报警与停机保护	压差控制器，量程可调
机组定时启停控制	根据事先排定的工作及节假日作息时间表，定时启停机组	机组电控柜内应设置状态信号和控制信号
工作时间统计	自动统计机组工作时间，定时维修	
联锁控制	风机停止后，新风风门、电动调节阀、电磁阀自动关闭	

新风机组设备自动控制子系统可选功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
最小新风量控制	在回风管内设置二氧化碳检测传感器，根据二氧化碳浓度自动调节新风阀，在满足二氧化碳浓度标准下使新风阀开度最小，可节能	二氧化碳浓度检测传感器采用可风管安装方式，量程符合工作条件要求
新风温湿度自动检测	测量参数自动显示、历史数据记录及定时打印、故障报警	温湿度测点可分别采用风管式温、湿度传感器，也可采用一体式温湿度传感器

18.2.5.5　给排水设备自动控制子系统：见图 18－13 和图 18－14，其功能见表 18－10 和表 18－11。

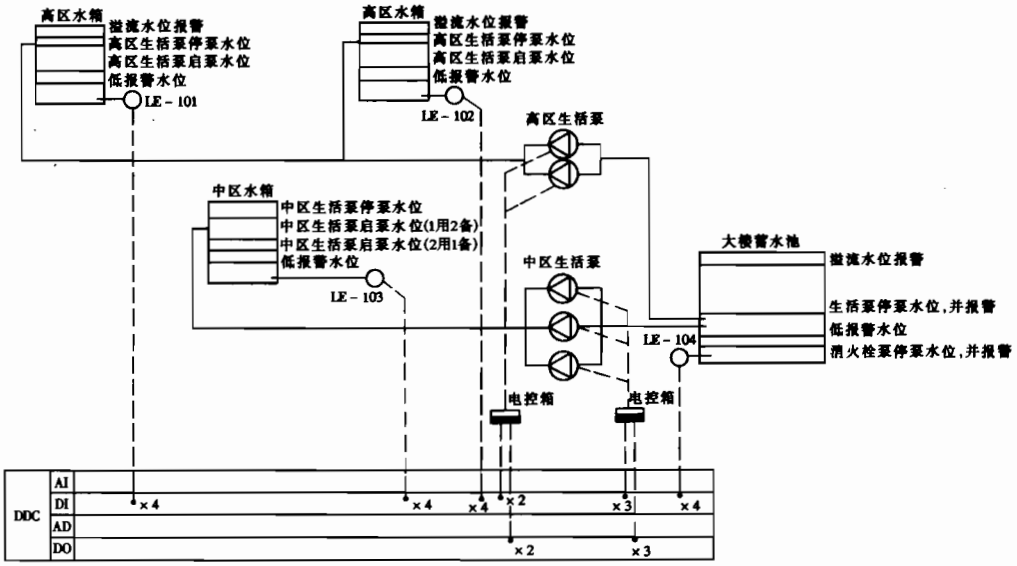


图 18－13　给水设备自动控制系统图

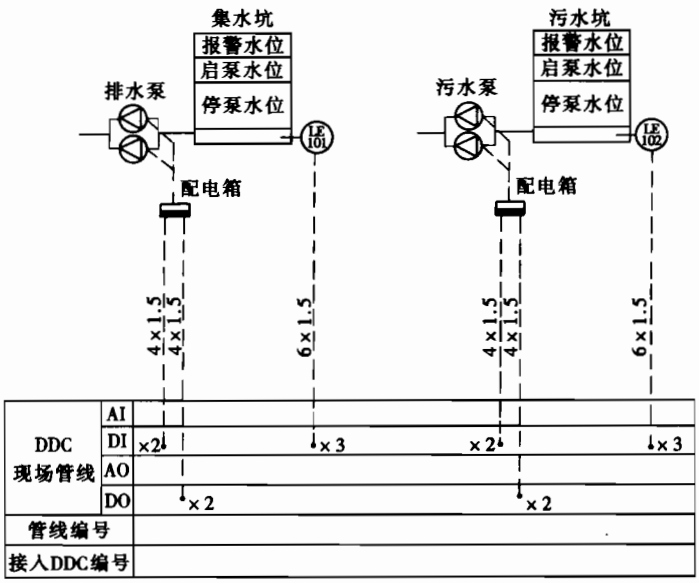


图 18－14　排水设备自动控制系统图

表 18－10　　给水设备自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
水箱水位自动控制	自动控制给水泵启停，使水箱水位维持在设定范围内	浮球水位计，将浮球固定在控制水位的上下限处
水箱水位自动报警	水位超过设定报警线时发出报警信号，同时进行事故记录及打印	在浮球水位计上增加上下限报警浮球
工作时间统计	自动统计水泵工作时间，定时维修	

表 18－11　　排水设备自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
水池水位自动控制	自动控制排水泵启停，使水池水位不超过设定线	浮球水位计，将浮球固定在控制水位的上下限处
水池水位自动报警	水位超过设定报警线时发出报警信号，同时进行事故记录及打印	在浮球水位计上增加上限报警浮球
工作时间统计	自动统计水泵工作时间，定时维修	

18.2.5.6　送排风设备自动控制子系统：其功能见表 18－12。

表 18－12　　送排风设备自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
风机自动控制	自动控制风机启停	风机电控柜内应设置状态信号和控制信号
一氧化碳自动报警	车库中一氧化碳浓度超过设定报警线时发出报警信号，同时自动启动风机工作	一氧化碳浓度传感器，车库内挂墙安装
工作时间统计	自动统计风机工作时间，定时维修	

18.2.5.7　电力设备自动控制子系统：见图 18－15，其功能见表 18－13。

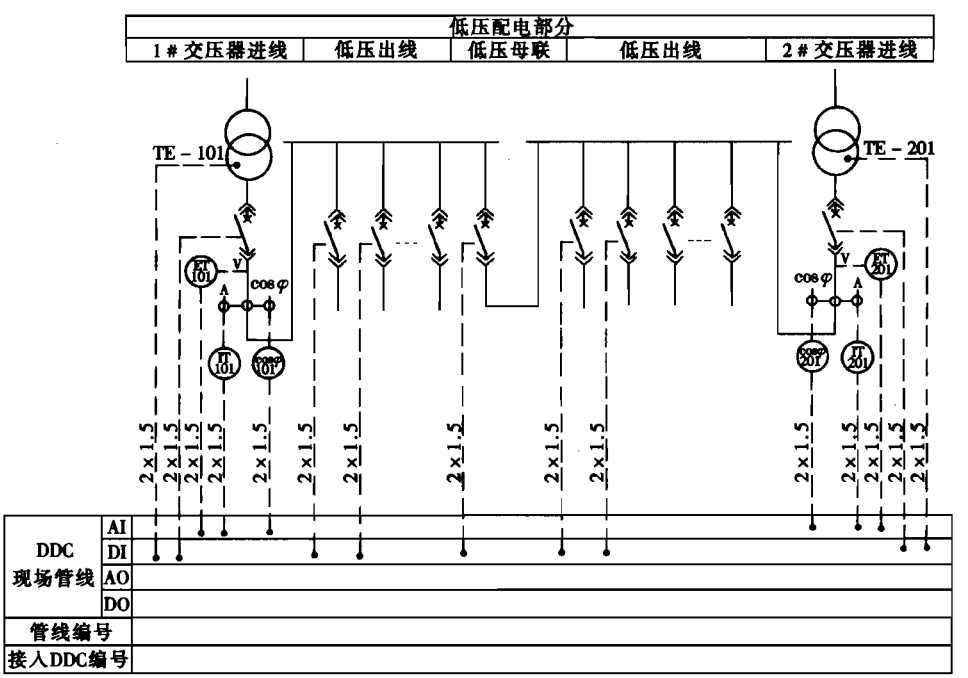


图 18－15　电力设备自动控制系统图

表 18－13　　电力设备自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
变压器线圈温度过热保护	当变压器过负荷时，线圈温度升高，温度控制器发出信号，自动报警记录故障，并采取相应措施	温度控制器热电阻由制造厂家预埋在变压器线圈里，现场控制器可直接获取开关量信号
电流检测	自动检测回路电流，越限自动报警记录故障，并采取相应措施	通过电控柜中安装的电流互感器，将被测回路的电流转换为 0～5A，再通过电流变送器将其变为标准信号送至现场控制器
电压检测	自动检测回路电压，越限自动报警记录故障，并采取相应措施	通过电控柜中安装的电压互感器，将被测回路的电压转换为 0～100V，再通过电压变送器将其变为标准信号送至现场控制器
开关状态检测	自动检测各重要回路开关状态，跳闸时自动报警记录故障，并采取相应措施	从断路器或自动开关的辅助接点上获取信号
有功功率检测	自动检测回路有功功率	通过电流与电压互感器，将被测回路的电流与电压信号送至有功功率变送器，将其变为标准信号送至现场控制器
无功功率检测	自动检测回路无功功率	通过电流与电压互感器，将被测回路的电流与电压信号送至无功功率变送器，将其变为标准信号送至现场控制器
电量检测	自动检测回路用电量及建筑物总用电量	通过电流与电压互感器，将被测回路的电流与电压信号送至电量变送器，将其变为标准信号送至现场控制器
频率检测	自动检测回路频率	通过频率变送器，将其变为标准信号送至现场控制器

18.2.5.8　照明自动控制子系统：见图 18－16，其功能见表 18－14。

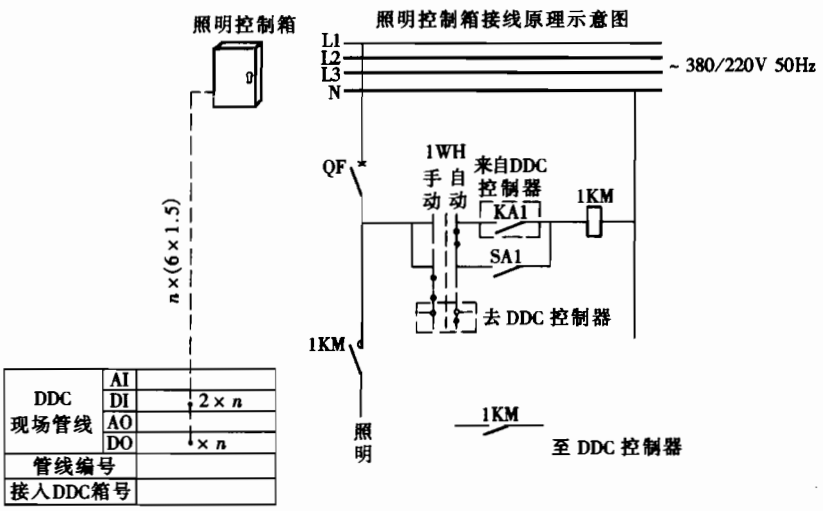


图 18－16　照明自动控制系统图

表 18－14　　照明自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
建筑内部照明分区控制	可按照建筑内部功能，划分照明的分区及分组控制方案，自动或遥控各个照明区域的电源通断	照明配电柜内应设置状态信号和控制信号
建筑外部道路照明分区控制	可按照时间或室外照度，自动控制室外各个照明区域的电源通断	安装在室外的照度传感器，将照度转变为标准信号送至现场控制器
建筑外部轮廓与效果照明控制	可按照建筑外部照明方案，自动或遥控各分组照明灯光的电源通断，达到外部照明要求的效果	从照明配电柜内取状态信号和控制信号

18.2.5.9　电梯运行自动控制子系统：见图 18－17，其功能见表 18－15。

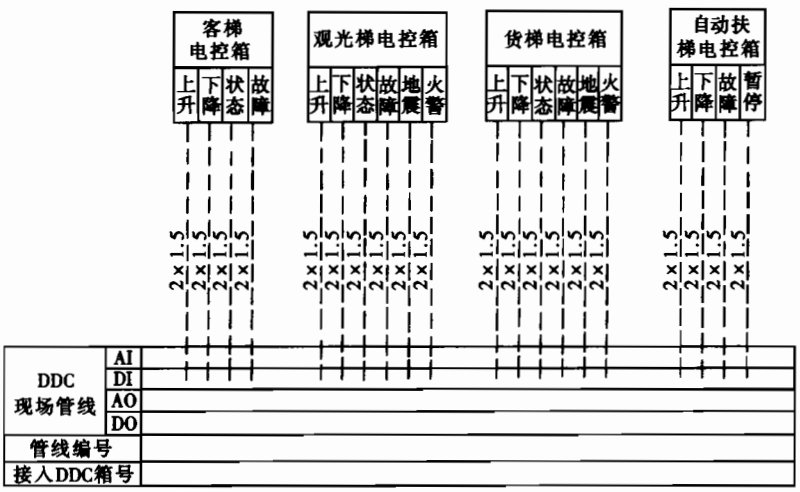


图 18－17　电梯运行自动控制系统图

表 18－15　　电梯运行自动控制子系统功能

监控内容	常用自动控制功能	常用仪表选择
电梯运行状态自动控制	自动监测各电梯运行状态，紧急情况或故障自动报警和记录	电梯控制柜内应设置状态信号和控制信号
扶梯运行状态自动控制	自动监测各扶梯运行状态，紧急情况或故障自动报警和记录	从扶梯控制柜内取状态信号和控制信号
工作时间统计	自动统计电梯工作时间，定时维修	

18.2.6　建筑设备自动控制系统中的其他问题

18.2.6.1　线路敷设：

（1）规范。建筑设备自动控制系统的仪表与电缆管线敷设，应符合建筑电气设计的有关规范。

（2）通信线缆选择。现场控制器及自动控制主机之间的通信线，在设计阶段宜采用控制电缆或计算机专用电缆中的屏蔽双绞线，截面为 0.5～1mm^2。如设计在系统招标后完成，则应根据选定系统的要求进行。

(3) 仪表控制电缆选择。仪表控制电缆宜采用截面为 1～1.5mm² 的控制电缆，根据现场控制器要求选择控制电缆的规格，一般模拟量输入输出采用屏蔽电缆，开关量输入、输出采用普通无屏蔽电缆。

(4) 电缆桥架选择。在线缆较为集中的场所宜采用电缆桥架敷设方式。

电缆桥架敷设时应使强弱电缆分开，当在同一桥架中敷设时，应在中间设置金属隔板。

电缆在电缆桥架中敷设时，电缆面积总和与桥架内部面积比一般应不大于 40%。

电缆桥架在走廊与吊顶中敷设时，应注明桥架规格、安装位置与标高。

电缆桥架在设备机房中敷设时，应注明桥架规格，安装位置与标高可根据现场实际情况而定。

(5) 电缆穿管的选择。建筑设备自动控制系统中的仪表信号、电源与通信电缆所穿保护管，宜采用焊接钢管。电缆面积总和与保护管内部面积比为 35%。

地面与墙内安装的电缆穿管，一般由土建施工单位安装。

(6) 仪表管线选择与安装。

仪表导压管选择，应符合工业自动化仪表有关设计规范。一般选择 ϕ14mm × 1.6mm 无缝钢管。

仪表管路敷设，应按照工业自动化仪表管路敷设有关规定，设置一次阀、二次阀、排水阀、放气阀、平衡阀等，管路敷设应符合标准坡度要求。

18.2.6.2 建筑设备自动控制系统的电源与接地：

(1) 供电方式。建筑设备自动控制系统的现场控制器和仪表宜采用集中供电方式，即从主控室放射式向现场控制器和仪表敷设供电电缆，以便于系统调试和日常维护。

(2) 配电柜。主控室应设置配电柜，总电源来自负荷等级较高的动力电源，总电源容量不小于系统实际需要电源容量的 1.2 倍。配电柜内对于总电源回路和各分支回路，都应设置断路器作为保护装置，并明显标记出所供电的设备回路与线号。

(3) 电源线规格与截面选择。向每台现场控制器的供电容量，应包括现场控制器与其所带的现场仪表所需用电容量。宜选择铜芯控制或电力电缆，导线截面应符合电力设计相关规范，一般在 1.5～4.0mm² 之间。

(4) 接地原则。建筑设备自动控制系统的主控室设备、现场控制器和现场管线，均应良好接地。

(5) 屏蔽接地与保护接地。建筑设备自动控制系统的接地一般包括屏蔽接地和保护接地。屏蔽接地用于屏蔽线缆的信号屏蔽接地处，保护接地用于正常不带电设备，如金属机箱机柜、电缆桥架、金属穿管等处。

18.2.6.3 接地方式：建筑设备自动控制系统的接地方式可采用集中的共用接地或单独接地方式，应将本系统中所有接地点连接在一起后在一点接地。采用联合接地时接地电阻应小于 1Ω，采用单独接地时接地电阻应小于 4Ω。

18.3 安全防范系统的设计要求

18.3.1 访客对讲系统

18.3.1.1 访客对讲系统的组成：

访客对讲系统是安装在住宅楼、公寓楼、别墅、商住楼及需要安全防范场所入口的一套电子装置，其配合防盗门或门卫，为住户、业主提供选呼（可视）对讲、遥控开锁及简单报

警等服务，达到方便户内人员了解来访者，并对外部人员来访，或非授权时间中内、外人员的进入进行控制和管理。访客对讲系统是小区安全防范系统中的一个子系统。

访客对讲系统一般包括单元（小区）门口对讲主机、对讲分机、电控门锁、供电电源及管理主机（极简单除外）。

访客对讲系统工作过程如下：在小区保安室内安装管理主机，小区入口处安装小区门口对讲主机，各单元门口安装防盗门及门口对讲主机，住户室内安装对讲分机。当来访者进入小区时，保安人员通过小区门口对讲主机与住户通话，确定来访者身份后，来访者方可进入小区。来访者在单元门口再通过（可视）门口对讲主机呼叫住户，住户同意后开启单元电控门锁，来访者方可进入楼内。

18.3.1.2 访客对讲系统的分类：访客对讲设备从简单到复杂、从独立分散到整体联网基本上分以下三种：

（1）单户型。也称别墅型一对一，访客对讲系统专供单户使用，其特点是在别墅内门厅、客厅等多处均安装有对讲分机，以达到方便主客对讲和开门功能。

（2）单元及大楼型。目前使用最多的一种型式。由住宅单元或大楼入口处电控门锁、（可视）门口对讲主机及各户室内对讲分机组成。系统多以总线制数位编解码方式运行。特别是数位式超薄型 CRT 可视对讲系列，由于其具有以号码锁定来传信开门、户数容量大、私密性好、安装容易、配线简单等特点，已经成为对讲产品的主流。目前采用液晶显示器的彩色电视对讲机具有温度感知、耗电量低、体积小等特点，将逐步占据更大市场。

在功能上兼具防盗、防灾、对讲及紧急求助的一体化的多功能（可视）对讲分机，在产品外观上追求“轻、薄、巧、小”，配线简单，是对讲设备的发展趋势。

（3）小区联网型。在单元型基础上使各单元（幢楼）与小区物业管理部分之间联网，具有专门的管理主机，系统可多达成百上千户。高档产品还具有火警、盗警、紧急报警和紧急广播功能；室内机、门口（单元）机、管理主机均采用独立通话回路。

18.3.1.3 访客对讲系统设计要点：门口对讲主机宜安装在门口防盗门框架上或采用墙内嵌入式安装，门口机中心距地宜为 1.5m，室内对讲分机宜设置在住户门厅墙壁上或客厅内，安装高度距地宜为 1.4m。系统应自带备用电源装置，市电停电后能自动投入，蓄电池应至少保证系统在停电情况下连续工作 24h。系统的供电应由配电箱公共回路引出。

当建筑物内设有火灾自动报警系统时，访客对讲系统应具有接受火灾自动报警系统的联动控制信号的功能。如火灾发生时，应将住宅单元或大楼入口处门上的电控门锁打开。

18.3.2 闭路电视监控系统

18.3.2.1 闭路电视监控系统和组成：系统宜由摄像、传输、显示及控制四个主要部分组成。当需要记录监视目标的图像时，应设置磁带或数字硬盘录像装置。在监视目标的同时，当需要监听声音时，可配置声音传输、监听和记录系统。

18.3.2.2 CCD 摄像机选型要点：在实际工程中，如果监视目标照度不高，而对监视图像清晰度要求较高时，宜选用黑白 CCD 摄像机；对有景物色彩及细部要求的监视场合，宜选用彩色 CCD 摄像机。在确定选用黑白摄像机还是彩色摄像机之后，进而主要应考虑摄像机的技术指标。

（1）清晰度（分辨率）。清晰度是表示摄像机分辨图像细节的能力，通常用电视线（TVL）来表示。闭路电视自动控制系统使用的 CCD 摄像机，水平清晰度要求彩色摄像机在 270TVL 以上，黑白摄像机在 400TVL 以上。

（2）灵敏度（照度）。在镜头光圈大小一定的情况下，摄像机获取规定信号电平所需要的最低靶面照度，就称作该摄像机的灵敏度。如果被摄物体照度再低，监视器屏幕上将是一幅很难分辨层次的灰暗图像。一般所选摄像机的灵敏度为被摄物体表面照度的1/10。

（3）信噪比。即摄像机的图像信号与噪声电压的比值，往往用 S/N 表示。CCD摄像机信噪比的典型值在45～55dB之间。信噪比越高越好，电视监控系统中使用的摄像机，一般要求其信噪比高于40dB。

18.3.2.3 摄像机的布置原则：摄像机的设置位置、摄像方向及照明条件应符合下列规定：

摄像机宜安装在监视目标附近不易受外界损伤的地方，安装位置不应影响现场设备运行和人员正常活动，安装的高度，室内宜距地面2.5～5m；室外应距地面3.5～10m，并不得低于3.5m。

电梯厢内的摄像机应安装在电梯厢顶部、电梯操作器的对角处，并应能监视电梯厢内全景。

摄像机镜头应避免强光直射，保证摄像管靶面不受损伤。镜头视场内，不得有遮挡监视目标的物体。

摄像机镜头应从光源方向对准监视目标，并应避免逆光安装；当需要逆光安装时，应降低监视区域的对比度。

18.3.2.4 摄像机镜头的分类：镜头是安装在摄像机前端的成像装置，其种类繁多，分类方式就有好几种，从控制方式上大致分以下几种：

（1）手动光圈定焦镜头。这种镜头的焦距是不可变的，可变的只有光圈的大小。适合于监视固定目标，且光照度变化很小的场合。

（2）自动光圈定焦镜头。当进入摄像机镜头的光通量变化时，CCD成像面上产生的电荷也相应变化，使视频信号电平发生变化，从而产生一个控制信号，驱动镜头内的微型电动机转动，达到自动调整光圈大小的目的。适合于摄取焦距相对固定，照度变化较大的目标。

（3）自动光圈电动变焦镜头。这是最常用的一种镜头，由于其光圈是自动的，所以适合光照度经常变化的场所。又由于其焦距是电动可变的，因而可对所监视场所的的视角及目标进行变焦距摄取图像。这种镜头非常适合远距离观察和摄取目标。

（4）自动光圈、自动聚焦、电动变焦镜头。这种镜头除具有自动光圈及电动变焦功能外，还有自动聚焦功能。自动聚焦是由测焦系统与电动变焦反馈控制系统构成的。还有一种镜头与此差不多，习惯叫做电动三可变镜头，不同的只是对光圈的调整由自动控制方式改为遥控方式。毫无疑问，这种镜头功能更为强大，造价也较高。

18.3.2.5 摄像机镜头的选型：摄像机镜头的选择应符合下列规定：

镜头的焦距应根据视场大小和镜头与监视目标的距离确定，并按下式计算

$$F = \frac{A \cdot L}{H} \tag{18-2}$$

式中 F——焦距，mm；

A——像场高，mm；

L——物距，mm；

H——视场高，mm。

摄取固定监视目标时，可选用定焦距镜头；当视距较小而视角较大时，可选用广角镜头；当视距较大时，可选用望远镜头；当需要改变监视目标的观察视角或视角范围较大时，

宜选用变焦距镜头。

除硫化锑摄像管外，当监视目标照度有变化时，均应采用光圈可调镜头。

当需要遥控时，可选用具有光对焦、光圈开度、变焦距的遥控镜头装置。

18.3.2.6 传输方式的确定：系统的图像信号传输方式，宜符合下列规定：

传输距离较近，可采用同轴电缆传输视频基带信号的视频传输方式。

当传输的黑白电视基带信号，在5MHz点的不平坦度大于3dB时，宜加电缆均衡器；当大于6dB时，应加电缆均衡放大器。当传输的彩色电视基带信号，在5.5MHz点的不平坦度大于3dB时，宜加电缆均衡器；当大于6dB时，应加电缆均衡放大器。

传输距离较远，监视点分布范围广，或需进电缆电视网时，宜采用同轴电缆传输射频调制信号的射频传输方式。

长距离传输或需避免强电磁场干扰的传输，宜采用传输光调制信号的光缆传输方式，当有防雷要求时，应采用无金属光缆。

18.3.2.7 室内传输线路敷设方式的确定：室内传输线路敷设方式的选择，应符合下列要求：

无机械损伤的建筑物内的电（光）缆线路，或扩建、改建工程，可采用沿墙明敷方式；

在要求管线隐蔽或新建的建筑物内可用暗敷设方式；

对下列情况可采用明管配线：

（1）易受外界损伤；

（2）在线路路由上，其他管线和障碍物较多，不宜暗敷的线路；

（3）在易受电磁干扰或易燃易爆等危险场所。

电缆与电力线平行或交叉敷设时，其间距不得小于0.3m；与通信线平行或交叉敷设时，其间距不得小于0.1m。

同轴电缆宜采取穿管暗敷或线槽的敷设方式，当线路附近有强电磁场干扰时，电缆应在金属管内穿过，并埋入地下。当必须采取架空敷设时，应采取防干扰措施。

18.3.2.8 系统同步方式的确定：对几台摄像机的信号进行频繁切换并需录像的系统，宜采用主从同步方式或外同步方式稳定信号。

18.3.2.9 监控室的设计要点：根据系统大小，宜设置自动控制点或自动控制室。自动控制室的设计应符合下列规定：

监控室宜设置在环境噪声较小的场所；自动控制室的使用面积应根据设备容量确定，宜为12～50m^2；监控室的地面应光滑、平整、不起尘，门的宽度不应小于0.9m，高度不应小于2.1m。

监控室内的温度宜为16～30℃，相对湿度宜为30%～75%。

监控室内的电缆、控制线的敷设宜设置地槽。当属改建工程或自动控制室不宜设置地槽时，也可敷设在电缆架槽、电缆走道、墙上槽板内，或采用活动地板。

根据机柜、控制台等设备的相应位置，应设置电缆槽和进线孔，槽的高度和宽度应满足敷设电缆的容量和电缆弯曲半径的要求。

监控室内设备的排列，应便于维护与操作，并应满足安全、消防的规定要求。

18.3.2.10 系统的供电设计原则：系统的供电电源应采用220V、50Hz的单相交流电源，并应配置专门的配电箱。当电压波动超出+5%～10%范围时，应设稳压电源装置。稳压装置

的标称功率不得小于系统使用功率的1.5倍。

18.3.2.11 摄像机的供电设计原则：摄像机宜由监控室引专线经隔离变压器统一供电；远端摄像机可就近供电，但设备应设置电源开关、熔断器和稳压等保护装置。

18.3.2.12 系统接地。系统的接地宜采用一点接地方式，接地母线应采用铜质线。接地线不得形成封闭回路，不得与强电的电网中性线短接或混接。

系统采用专用接地装置时，其接地电阻不得大于4Ω；采用共用接地网时，其接地电阻不得大于1Ω。

光缆传输系统中，各自动控制点的光端机外壳应接地，且宜与分监控点统一连接接地。光缆加强芯、架空光缆接续护套应接地。

18.3.3 防盗报警系统

18.3.3.1 常用探测器及其适用场合：防盗报警探测器种类繁多，选用品种是否得当，布局是否合理，将直接影响系统的整体防范能力。

(1) 振动入侵探测器（又称振动传感器）。它能探测出人的走动，门、窗移动或被撬之响动，可用在背景噪声较大的场所。常用的振动传感器有机械式、电动式和压电晶体式。电动式又比压电式传感器灵敏度高，探测范围大，主要用于室外掩埋式周界报警系统。

(2) 红外入侵探测器，分主动式和被动式两种。主动式红外入侵探测器属于线控型，一般成对设置，多用于周界防范上。被动式红外入侵探测器可作为直线型，也能作为空间探测器，一般多用于室内空间立体防范，其隐蔽性优于主动式红外入侵探测器。

(3) 超声波探测器。它是利用多普勒效应，当被测目标侵入，并在防范区域空间移动时，移动人体反射的超声波将引起探测器报警。超声波探测器容易受到振动和气流的影响。

(4) 微波探测器。微波是一种频率很高的无线电波，由于其波长很短（0.001～1m），与一般物体的几何尺寸相当，所以微波很容易被物体所反射，利用这一原理，根据入射波和反射波的频率漂移，就可以探测出入侵物体的运动。

(5) 多技术探测器。不言而喻，多技术探测器是指运用两种或两种以上检测技术合成的探测报警装置。比如红外加微波双鉴报警探测器、双技术（声频/振动）玻璃破碎探测器等。多技术报警器的使用大大降低了系统的误报率，提高了报警的可靠性与准确性。

(6) 感应电缆/光缆探测器。它属于周界探测器范畴，主要跟随地形用于围墙、栅栏等周界报警，如电场畸变探测器等。

(7) 视频探测器，即视频移动探测器。它用摄像机作为探测器，通过检测视频信号亮度等级的变化来触发报警。就像人类的眼睛一样，视频图像移动跟踪器能在对比图像的改变后作出反应，事先用摄像机拍摄下一幅自动控制目标图像作为标准，并与随后的一组摄像机图像进行分析对比。即使图像亮度在测量循环中只改变0.01%，系统仍可判断出来。对于金属系统和文博场馆内要害部位的安全防范，是一种既方便又可靠的报警装置。

(8) 玻璃破碎探测器。它利用压电式微音器，装于面对玻璃的位置。由于只对10～15kHz高频的玻璃破碎声音进行有效的检测，因此不会因玻璃本身的振动而引起反应。这种探测器普遍应用于玻璃门窗的防护。

(9) 音频探测器，也有称声入侵探测器。它是常用的空间防范探测器。通常将探测说话、行走等声响的装置叫声控探测器；将探测物体被破坏时发出固有声响的装置叫声发射探测器。选用音频探测器，对环境要求较高（十分安静），应尽可能将其靠近保护目标，降低探测器的灵敏度，与其他探测手段结合使用。

（10）手动及脚踏报警按钮（开关），属于紧急报警源。由于是人为操作，使用方便、灵活，不受电源限制，可保证昼夜全天候工作。是报警装置中最常见的一种。按国家现行有关规定，所有的防盗报警系统都应有自动报警探测器和手动报警探测器两种触发装置。

（11）开关入侵探测器。一般由开关传感器（如微动开关、磁簧开关、干簧继电器、压力垫或金属丝等）与相关电路组成常开或常闭式报警装置。在大型安防系统中，开关常用作第一道防线，与多个其他感知器配合，形成较为周密的监测网。

（12）接近式感测器。依感测方式，可分为电磁式、电容式及光电式三种。所感测的距离通常在几厘米以内，甚至不到1cm。接近式感测器大多用于定点检测，如检测门把是否被人触动等。

（13）无线传输探测器。防范区域分散或不易架设传输线的地方，无线传输探测器有其独特的作用。由于目前用任何型式的传感器所组成的探测器都能组成无线探测器，这就给用户带来了很大的方便。于是无线红外、无线振动等无线传输探测器应运而生。

18.3.3.2 银行系统和金融机构营业场所防护区的划分原则：按照行业标准结合工程实际及房间功能来划分风险等级，一级为最高风险。防护级别与风险等级一一对应，共分为四级防护工程。

防护区分为一号区、二号区和三号区。一号区为中心控制室、守库室。二号区为营业厅、展厅、现金柜台、进入中心控制室和守库室的通道。三号区为进入营业厅、展厅的所有通道、门、窗。

最高的一级防护工程要求如下：

（1）应为全方位防护。入侵探测系统至少应选用两种以上不同探测原理的探测器。

（2）一号区、二号区、三号区的所有门窗安装报警装置，门应安装防盗电控安全门。

（3）守库室、二号区、三号区均应设置摄像机，摄像机数量根据实际情况设，应能在中心控制室观察到上述区域的全部图像。

（4）营业场所的四周应安装周界防入侵报警系统。库房内必须设置振动报警器和监听器。

（5）录像系统在营业期间应能长时间录像。非营业期间能在接收报警信号发出声光报警的同时自动启动照明、录音及录像设备。此时录像方式应为正常速度。

（6）营业厅大门外设置联防警笛或警铃，其声压级室外应大于100dB（A），室内应大于80dB（A）。报警信号同时传至中心控制室及上级报警部门。

（7）营业场所的重点部位应设置出入口控制系统，能通过信息卡的方式对进出该部位的人员分级、分档管理。

（8）中心控制室应能在接收报警信号的同时立即识别事件发生部位、性质（抢劫、盗窃、火灾、故障等），并在屏幕上显示；打印记录及存储报警时间、部位、性质及处置预案。

18.3.4 门禁系统

18.3.4.1 门禁系统的基本形式及组成：有接触式刷卡装置、非接触感应式刷卡装置、数字密码键盘装置、指纹识别（或其他人体生物特征辨识别装置）等型式。

门禁系统主要由四个基本部分组成，即现场门禁设备（包括读卡器、控制器、电动阴锁、阳锁及出门按纽等）、中心机房设备（多路系统集中控制器、远程开门控制器、管理计算机）、系统传输网络及系统管理软件。

通过现场门禁设备，接收通过人员输入的信息，再转换成电信号送到控制器中，同时根

据控制器反馈的信号完成开锁、闭锁、警报等工作。单个控制器就可以组成一个简单的门禁系统，用来管理一个或几个门。多个控制器通过适当的通信网络同计算机连接起来，就组成了整个建筑的门禁系统。计算机装有门禁系统的管理软件，它管理着系统中所有的信息分析与处理。

18.3.4.2 门禁控制方法分类：控制出入门的方法主要有卡片读出、密码输入和生物特征识别系统三大类。卡片读出器也称刷卡机，可受理的卡片类别有磁码卡、条码卡、威根卡（铁码卡）、接触式 IC 卡、射频 IC 卡、感应卡（接近卡）、非接触逻辑加密卡、非接触 CPU 卡、混合卡等。加上密码输入、生物特征识别及乱序键盘等，就可构成将几种技术任意组合使用的理想、可靠的门禁系统。

IC 卡（Integrated Circuit Card）又称集成电路卡，其保存介质是低功耗的 CMOS 大规模集成电路，通过读写存储在芯片中的数据来达到信息交换的目的。卡内的信息加密后不可复制，其性能指标要求符合 ISO7815 和 ISO7816 标准。与传统的磁卡相比较，IC 卡具有寿命长、存储量大、抗干扰、不宜复制、安全性高等优点，将逐步取代磁卡，受到越来越多人们的青睐。

射频 IC 又称为集成电路智能卡，是最近几年发展起来的一项新技术。它成功地将射频识别技术和 IC 卡技术结合起来，将具有微处理器及大容量存储器的集成电路芯片（ASIC）和天线封装于塑基片之中，构成了可在一定距离范围内感应传递信号的非接触 IC 卡。这种射频 IC 卡既继承了接触式 IC 卡的优点，如大容量、安全性高，又克服了接触式 IC 卡所无法避免的缺点，同时其感应距离也比普通感应卡大。

非接触逻辑加密卡，是属于一种可读写的非接触 IC 卡，其感应频率符合 ISO1443 的 13.56MHz，具有良好的性能价格比，已成为企业级非接触 IC 卡使用的首选。

非接触 CPU 卡，由于其内置 CPU 和 CMOS，故 CPU 卡开放性优于逻辑加密卡，其安全性设计也较灵活，适用于金融界需求。

混合卡是由于目前市场上接触式 IC 卡已占据了广大市场，而在某些场合接触式 IC 卡不能满足需求这样一个背景，而采取的一种补救性技术措施。对于我国大多数用户来说，可以一步到位上非接触 IC 卡系统。

18.3.5 停车场管理系统

18.3.5.1 系统的组成：停车场管理系统可划分为：车辆自动识别子系统、收费子系统、电视监视子系统等。通常包括中央控制计算机、自动识别装置、临时车票发放及检验装置、挡车器、车辆检测器、监视摄像机、车位提示牌等设备。

18.3.5.2 系统的分类及适用对象：停车场根据其使用对象可划分为内部停车场、公用停车场及综合停车场三种。内部停车场主要面向该停车场的固定车主及长期租用车位的单位、公司及个人。此种停车场的特点是使用者固定，禁止外部车主使用，使用者对设施的使用时间长、次数多且高峰时间集中，对停车场管理的安全性、可靠性及处理速度要求较高。公用停车场主要为临时性散户提供服务，有收费和无偿使用之分。使用者通常是临时一次性使用者，数量多、时间短。而综合停车场集各种对象于一身，情形更为复杂。基于上述这些特点，为满足不同客户的需求及对不同车辆的管理，收费管理系统可分为出口管理、入口管理、中央集中管理，人工管理、自动管理等多种不同型式。

入口管理型，适用于内部专用停车场；

出口管理型，适用于中小型公共停车场；

中央管理型，适用于大型公共停车场。

18.3.6 其他安全防范系统

18.3.6.1 巡更系统：

（1）系统的分类。分为离线式系统和在线式系统。

（2）系统的选型原则。在线式系统通常与门禁系统组合应用，较适用于单体建筑；离线式系统较适用于住宅小区，厂区，校园等建筑群。

18.3.6.2 周界防范系统：

系统的组成。周界防侵入系统是一些重要场所（如高档小区、重要建筑或要害部门等）不可缺少的有效防护手段。系统由前端（如红外对射式探测器、缆线平衡感应探测器、电场畸变探测器、激光探测器等）、传输及终端控制部分组成。将被保护部分实现无盲区、全封闭、有效可靠的边界控制。对周界探测器的工作方式可作如下分类：

（1）安装方式有埋地式、围栏相连式及自由站立式，这又有隐藏式和可见式之分。

（2）信号探测分无源被动式和有源主动式。

（3）按安装地形分为视线式和随高就低式。

视线探测器只有当探测空间具有清晰的视线时方能正常工作，这意味着在主动探测器的发射端和接收端之间应有清晰的视线，故要求有平整的地面；而随高就低式探测器，也称为地形跟随式，其敏感元件和射场能随地形的变化而变化，因此在平坦的和不规则的地形上均能很好地探测，从而在整个探测区域内给出统一的检测结果。

18.4 通信网络及系统的设计要求

18.4.1 通信系统设计技术基本原则

18.4.1.1 电信、电信系统的定义及组成：电信一般指利用有线电、无线电、光或其他电磁系统，对于消息、指令、文字、图像、声音或任何性质的信息的传输、发送或接收。

系统通常是由具有特定功能、相互作用和相互依赖的若干单元组成，完成统一目标的有机整体。电信系统是以电信号作为传递和交换信息手段的通信方式所构成的通信系统，是指完成各种电信业务的软、硬件系统的总称。

任何一个电信系统必须要有以下几个部分：信源、信宿、变换器、反变换器和信道。如图 18－18 所示。

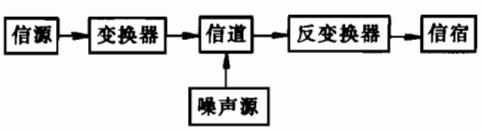


图 18－18 电信系统的构成

信源是发出各种信息（语音、文字、图像或数据）的信息源，可以是人，也可以是机器，如计算机等。

变换器的作用是将信源发出的信息变换成适合在信道中传输的信号。对应不同的信源，变换器有不同的组成和变换功能。在进行电话通信时，送话器将人发出的语音信号变换为电信号，再经过必要变换和处理才能使之可靠地、有效地通过信道传输。对模拟电话通信，变换器中除了送话器外，还包括放大器、滤波器、调制器等；对数字电话通信，还包括数字信号处理装置，其中主要是编码器。

信道是信号的传输媒介。信道可分为有线信道和无线信道两类。在有线信道中为电磁信号（大气层、对流层、电离层等）传输。信号在不同的信道中传输，要经过不同的变换设备进行处理和变换。

反变换器的作用是将从信道接收的信号变成信息接收者可以接收的信息。从信道出来的信号一般不能被信宿直接接收，必须通过反变换器的作用变换为人可以接收的语言或机器可接收的代码等。反变换器包括受话器、解码器、解调器等。

信宿是信息的接收者，它可以是人或机器。

噪声源是系统内各种干扰影响的等效结果。系统的噪声来自各个部分，从发出和接收信息换周围环境、各种设备的电子器件，到信道所受到的外部电磁场干扰，都会对信号形成噪声影响。为了分析问题方便，将系统内所存在的干扰均折合到信道中，用噪声源表示。

18.4.1.2 电信网的几种类型：图 18－1 的模型是一个点对点的电信系统模型，若想完成多个用户之间通信，就要形成电信系统网络。电信网络中，交换机完成不同地址信息的交换，因此交换机是电信网络中的节点。

这样，一个完整的电信网络应由终端设备、传输设备（包括线路）、交换设备三大部分组成。其中，终端设备的主要功能是进行待发送的信息与信道上传送的信号之间的转换，当然它还能产生和识别系统内的信令或协议。终端设备有电话机、PC 机等；传输设备的主要功能是有效可靠地传输信号；交换设备的主要功能是完成信号的交换，交换的方式还可以分为电路交换、分组交换、信元交换等。以电话通信网络为例，终端设备为电话机，传输设备为用户线、中继线，交换设备为电话交换机。

上述三个部分构成一个电信网络的“硬件”。此外，还有一套“软件”，即各种规约，如信令、协议等。

电信网络的主要类型如下：

(1) 按信道分类：

1) 有线通信网。借助于导线进行通信，如架空明线、电缆、光缆等；

2) 无线通信网。借助于无线电波在自由空间的传输进行通信，如长波、中波、短波、微波等方式。

(2) 按信号分类：

1) 模拟通信网。在网络内传输、交换和处理的信号全部为模拟信号。

2) 数字通信网。在网络内传输、交换和处理的信号全部为数字信号。

3) 数模混合网。在网络内传输、交换和处理的信号一部分为数字信号，另一部分为模拟信号。

通常交换是采用模拟信号、传输采用数字信号，或者交换采用数字信号，传输采用模拟信号。在数模混合网内，需要用 D/A（数/模）或 A/D（模/数）转换，达到模拟系统与数字系统的连接。

(3) 按通信距离分类：

1) 长途通信网。如长途电话、传真等。

2) 本地通信网。如市内电话、郊区电话网等。

3) 区域网。在校园或厂区由 PBX 或远端交换模块管辖范围内的网络。

(4) 按信源分。

1) 语音通信网。如电话通信。

2) 数据通信网。如计算机通信。

3) 文字通信网。如电报通信。

4) 图像通信网。如会议电视、可视图文通信等。

以上是完成各种专门业务的通信网，称业务网。其中，公用电话交换网（PSTN）是电信网的主体和基础，尤其在数字电话通信网上可以开通电话、传真、数据等业务，它是走向N－ISDN的前提。

5）综合业务数字网。即ISDN，ISDN又可分为窄带N－ISDN和宽带B－ISDN，该网能在一个网内综合完成各种不同的业务信息交换。

（5）按不同使用范围分类：

1）公用通信网即公共网。向社会开放的通信网。

2）专用通信网。相对于公用通信网而言的，它是国防、军事或国民经济的某一专业部门，如铁道、航运、石油、水利、电力、广播电视等部门自建，并向电信部门租用电路，也有的专用网自建传输线路，这是专供部门内部业务使用的电信网，但专用网与公用网之间应实现互连互通。

公用通信网和专用通信网是国家电信网的组成部分，公用网在综合经济效益上要优于专用通信网，公用通信网和专用通信网应相互补充，协调发展。公用通信网和专用通信网的建设应统一规划，统一技术标准和技术体制。

18.4.1.3 程控数字用户交换机系统：

（1）概述。建筑物中通信系统的信息交换中心可以采用程控数字用户交换机PABX（Private Auto－matic Branch Exchange）系统。该系统将数字通信技术、计算机技术和微电子技术集成为一体，成为一个高度模块化设计的全分散控制系统。它不仅能向建筑中用户提供模拟通信环境，而且还能向用户提供数据通信、多媒体通信以及正在发展的ISDN综合业务数字网通信环境。系统中先进的全分散控制方式、软硬件高度的模块化设计，使建筑中交换设备在增加不同的功能模块后就能实现为用户提供多种通信业务，适应飞速发展的现代通信的要求。

程控数字用户交换机系统能够集各种功能模块及线路模块于一体，实现系统在建筑中所覆盖范围内的话音、数据、图像、窄带、宽带多媒体业务以及移动通信业务的综合通信。系统还具有众多的中继接口、丰富的信号方式、灵活多变的动态网络管理来使其成为一个具有较强组网能力的数字交换机，可以做到下列几点：

a. 通过数字微波、卫星、光纤等与其他建筑物中程控数字用户交换机等设备进行组网。

b. 在建筑楼内组成2B＋D及30B＋D的N－ISDN网，并通过2B＋D或30B＋D中继接口与公用N－ISDN网相连。

c. 在建筑楼内可接入分组型终端设备，并与公用分组交换网相连。

d. 在建筑楼群区域内，组成一个全数字化的有线和无线的综合通信业务网。

1）数字用户交换机的技术发展。80年代中，国外智能建筑中已大多采用第三代程控数字交换机产品。

90年代初以来，随着现代数字交换技术、计算机技术和微电子技术飞跃发展，有力地推动着第三代数字交换机系统中采用更加先进的硬件和高级软件，并向第四代交换机技术发展和完善。

程控数字交换机通常按用途可分为市话、长话和用户交换机。程控数字用户交换系统结构比数字交换机简单、体积小、容量小，但能向建筑物中使用者提供各种特殊的功能，处理能力大，应用范围广，使用灵活，深受各类建筑物中用户的欢迎。正在发展的第四代程控数字用户交换机实际上是全数字综合业务交换机，它为建筑中实现办公室自动化及多媒体通信

等提供强有力的支持，它的技术特点是：

a. 采用新型共路信号方式，提供高速的公共信号的通路接入公网。

b. 采用全分散控制方式，提供控制的灵活性和可靠性。

c. 采用 ITU 建议的高级语言，提供强大的软件系统。

d. 采用全模块化结构，提供高集成度、高可靠性、高功能、低成本的硬件产品。

e. 采用国标标准的数字网络通信接口，提供和提高与其他通信网（如分组交换网、数字数据网、计算机局域网、卫星通信网、ISDN 网等）之间的连接及组网的能力。

f. 采用全透明的网络互连方式，用户交换机系统作用广域网中一个信息通信节点。

2）建筑中全数字综合业务交换机 ISPBX 的应用功能。

a. 具有宽带综合业务数据的传输功能，对每一用户同时进行语音、数据、图像的多媒体通信。

b. 实现办公室信息自动化的功能，对各个不同的用户终端设备提供码式、码速和协议转换。

c. 构成计算机局域网（LAN）的功能。

（2）系统的构成。

1）程控用户交换机系统构成。建筑中程控用户交换机是以完成建筑物内用户与用户之间，以及完成用户通过用户交换机中继线与外部公用电话交换网上各个用户之间的通信。

程控用户交换机实质上是一部由计算机软件控制的数字通信的交换机。交换机除采用软件的高级语言、先进的全分散控制方式、高可靠性电路模块化设计外，还应针对建筑办公信息自动化的要求，具有组成数据通信能力的综合业务数据网，向建筑物内用户提供电话业务和非话业务的综合信息服务，并构成一个交换网络的技术。程控数字用户交换机一般性系统结构如图 18－19 所示。

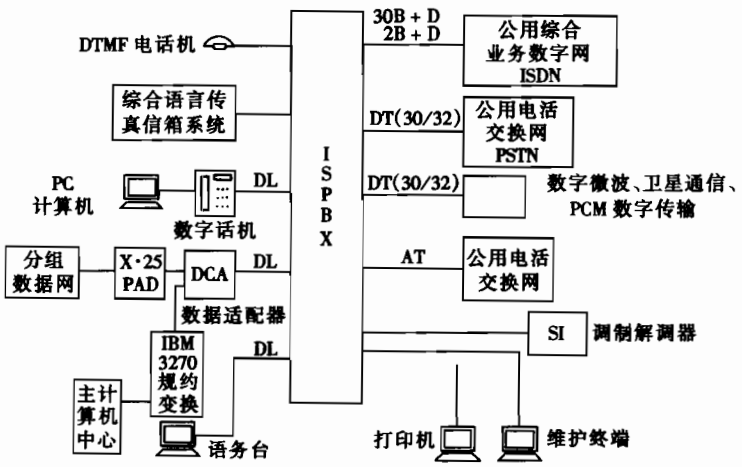


图 18－19　程控数字用户交换机一般性系统结构

AT—模拟中继；DL—数字用户；

DT—数字中继；SI—RS232C 串行接口；

DTMF—双音多频；PAD—X25 分组拆装；

PABX—用户电话交换机

2）程控用户交换机的功能。建筑中使用用户交换机的目的，是向用户提供更多、更新、

更为周到的服务功能，让用户使用起来感到方便、灵活、迅速。根据现有的技术，程控用户交换机的服务功能可分为三类，即为系统功能、话务台功能和用户分机功能。

a. 系统功能：

a）集中用户交换机功能。集中用户交换机功能可称为分区使用功能或用户交换机分割功能。程控用户交换机可按照建筑物内各个使用公司单位的需要，通过修改软件数据库，分割成许多个（多达16个左右）“虚拟”用户交换机。各个“虚拟”用户交换机分别具有各自的话务台、中继线（外线）、编号方案、各自的呼叫及功能相互隔离，互不干扰。各个“虚拟”用户交换机中用户之间的呼叫需通过局间DID中继或由各自使用公司单位的话务员转接（即同虚拟用户交换机内的用户之间可直拨通话，不同虚拟用户交换机中的用户间的呼叫相当于出局呼叫），以保证各自用户单位通信业务的独立性。这种功能特别适用于出租办公楼（写字楼）及建筑楼群办公租用户（公司）使用。

b）直接拨入。直接拨入功能为DID功能。当公用网用户呼叫程控用户交换机用户时，可直接拨入他所需要的用户号码，系统可直接将外线用户与其所要的用户接通，不需要话务员转接。直接拨入功能一般在采用数字中继线的程控用户交换机上使用，因为只有数字中继线才可以传送有关控制信息。

c）经话务系统转接。当公用网用户呼叫用户交换机的引示号码，需启动人工话务台电路，在听到话务员应答语或交换机送出的附加拨号音（或电脑话务台的语音提示）后，主叫端用户继续拨打被叫分机号码，就可完成整个呼叫过程，这种方式为BID接入呼叫方式。

d）直接拨号呼出。用户交换机中一个分机用户以具有双重性，它不仅能完成内部分机之间的呼叫，还可由交换机软件编程设定后通过相应中继线路连接到公用电话局局用交换机上，实现接续。

e）经理/秘书电话。通过软件编程设定，当经理外出或有重要事务时，来话均由秘书代答，有重要的电话时，立即转接到经理的电话分机上。

f）灵活编号。根据用户单位的具体要求和用户的容量来确定各个分机的编号，可以编3、4位或5位。还可把电话分机号码与房间号统一起来。

g）话务等级限制。根据管理上的需要，可以为每一个分机用户规定一个话务等级，以确定其分机用户在建筑物中对内、对外的通话范围。例如，规定话务等级为0级的用户只能呼叫话务台，1级可以打内线分机电话，2级可以接通某些专线电话，3级可以打市内电话，4级可以打国内长途电话，5级可以打国际长途电话。并且高等级呼叫权限可以覆盖低等级的功能。

h）截接服务。此服务也称为截答或中间服务。主要用来向未能接通所需号码的主叫用户提供一个提示，说明未能接通的原因，避免无意义的重复呼叫，提高呼入的接通效率。

i）自动路由选择。如果交换机系统呼叫到同一目的地由多条的路由，当主路由遇忙时或出现故障，其他路由都可作迂回路由使用，保证电话畅通。

k）铃流识别。根据呼叫类型向用户提供不同的振铃信号，以使被叫用户区别内线呼叫或外线呼叫。

l）全日服务。通过综合语音信息系统（包括声讯服务、语音邮箱、传真邮递、BP机寻呼、电脑话务员）向外线或内线主叫用户提供自动应答服务，转换呼叫服务，存储主、被用户的话音、传真等信息。

m）组网功能。符合ITU国际电信联盟（原CCITT）要求，组成专用网，并易与公用电

话交换网等公用业务网的连接。

b. 话务台功能。话务台有下列功能：回叫话务员、话务员插入、预占、数字显示、状态指示、呼叫等待及选择、话务台相互转接、话务台直接拨中继线、来话转接及释放、电话会议、话务台闭锁、自动定时提醒、呼叫分离、人工线路服务、维护与管理等。

c. 用户分机功能。用户分机有下列功能：自动振铃回叫、缩位拨号、热线服务、跟随电话、号码重发、呼叫等待、三方通话、呼叫转移、电话会议、呼叫代答、勿打扰、定时叫醒、恶意电话追踪、保密电话、高级行政插入、保留电话、呼叫寄存、遇忙记存呼叫、话音呼叫、无线电传呼等。

3）程控用户交换机的类型。各类应用功能不同的建筑中的用户可以采用现有的程控用户交换机中系统软件、应用软件和不同的硬件设备等，将通用型程控用户交换机变换成积压自相适应的特殊用途的程控用户交换机。现已开发的应用软件大致有以下几种：

第一种：与系统软件配合实现办公室自动化的通信软件，包括数字话机及适配器的通信软件；

第二种：特殊用途的程控用户交换机，如银行型、旅馆型、学校型、医院型的专用软件；

第三种：专用网程控用户交换机特殊应用软件，如调度系统软件、远端管理、远端控制、远端维护软件等；

第四种：数据处理系统专用软件，如 X.25 接口软件、计费处理软件及一切不涉及系统软件的专用软件。

根据以上应用软件，应用功能不同的用户根据各自不同的应用要求，在用户交换机中加设相适应的软硬件后，可把通用型程控用户交换机变换下列几种特殊用途的程控用户交换机。

a. 旅馆型。旅馆型程控用户交换机出入局话务量较大，但因以客房用户为主，不采用直接拨入功能，但话务台功能要强。为满足客人打长途电话的需要，应具有立即计费功能（PAMA）；为满足旅馆房间管理需要，应具有旅馆房间管理软件，该软件应提供房间控制、语音信箱（提供留言服务、客房状态、请勿打扰、自动叫醒、综合语音和数据系统等功能）。

b. 医院型。医院型程控用户交换机除具有旅馆型用户交换机软件功能外，还应具有呼叫寄存、呼叫转移、病房紧急呼叫、热线电话、BP 寻呼机或 CT2 无绳电话、综合语音和数据系统等信息接口的功能。

c. 办公室自动化型。

a）为了提高办公效率，用户能自动呼出，即采用 DOD1 + DID 中继方式（或采用 DOD2 + DID 中继方式），避免话务介入，以提高效率。

b）采用最先进的电话机，完成呼出的缩位拨号、语音操控自动拨号。

c）提供传输速率为 144kbit/s 的窄带综合业务数字用户线基本速率接口（即 2B + D，其中 B 为 64kbit/s 传输通道，传输业务信息；D 通道为 16kbit/s，主要传输信令使用），并通过异步、同步适配器传输方式，传输智能用户电报、传真文本、静态图像、可视图像（可视电话）等。

d）提供 X.25 分组交换接口，可与公用分组数据交换网联网。

e）提供计算机局域网（LAN）的接口，可与计算机网络联网。

f）提供卫星通信的接口，可与远地的用户交换及计算机网络联网。

g）提供 30 + D（2Mbit/s）的数字通信基群接口，开展（N - ISDN）窄带综合业务数字通信。

h）提供高次群的光通信接口，开放宽带（622Mbit/s）综合业务数字通信（B - ISDN）。

i）具有与语音信箱、传真信箱、电子信箱连接的通信接口，并与上述信箱联网，提高办公效率、提高对建筑内用户住处通信的服务等级。

d. 银行型。银行程控用户交换机具有办公自化型的功能化，还具有总行与分行间的通信联络、语音自动应答、警卫巡更线路、外线保留等功能。

e. 专网型。专网型程控用户交换应具有较强的组网功能，具有多位号码存储和转发、直达路由选择、自动迂回、外线呼叫等级限制、远端集中维护管理及话务台集中设置等功能。

（3）系统的中继入网方式。建筑中程控用户交换机按接入公用电话交换网的中继方式最好为全自动接入方式，但根据我国公用电话交换网上的现有的交换技术体制要求，还可采用半自动接入方式、混合接入方式。具体选用哪一种，要根据用户交换机容量的大小与公用电话网之间话务密切的程度、业务的类型以及当地电话网接口局的设备制式和当地电话局提供中继线为何种方式来确定。

用户交换机进入公网的中继方式一般有以下几种：

1）全自动直拨中继方式。

a. DOD1 + DID 中继方式，如图 18 - 20 所示。

当程控用户交换机的呼出和呼入公用电话网话务量均≥40Erl 时，宜采用直拨呼出中继方式，即 DOD1（DOD1. Direct Outward Dialling - one）方式，“1”为含有只听一次拨号音之意。采用这种中继接入方式的用户单位相当于当地电话网中的一个电话支局，其各个用户的电话号码可纳入当地电话网的编号中。这种中继方式无论是呼出或呼入都是接到电话局的选组级上，并根据规定，在程控用户交换机和电话局相连的中继线路上要求使用中国 1 号信令局间的信号方式。

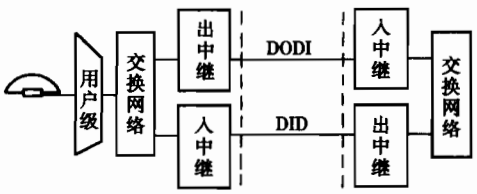


图 18 - 20　全自动中继方式

b. DOD2 + DID 中继方式，如图 18 - 21 所示。

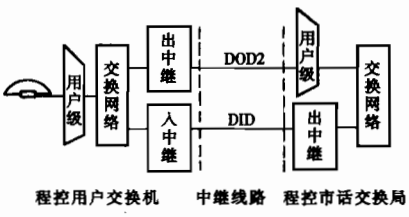


图 18 - 21　全自动中继方式

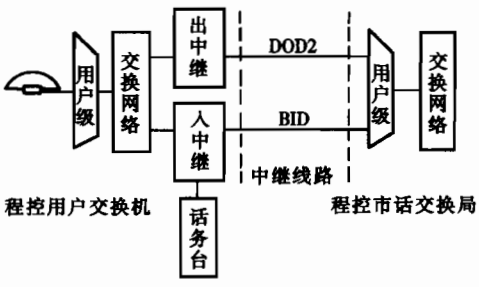


图 18 - 22　半自动中继方式

当程控用户交换机至公用电话网的呼出话务量 < 40Erl 时，宜采用直拨呼出听二次拨号音的中继方式，即 DOD2（DOD2，Direct Outward Dialling - two）方式，“2”为含有听二次拨号音之意，呼出的中继方式是接到电话局的用户电路而不是选组级上，所以出局呼出要听二次

拨号音（用户交换机通过设定可以消除从电话局送来的二次拨号音）。呼入时仍采用 DID 方式。这种中继方式在出局呼叫公用电话网时要加拨一个字冠，一般都用“9”或“0”。

2）半自动中继方式。DOD2 + BID 中继方式，如图 18 - 22 所示。

当公用电话交换网至程控用户交换机的呼出和呼入话务量均≤40Erl 时，宜采用半自动中继方式，即 BID（BID，Board Inward Dialling）方式。中继方式的特点是，呼出时接入电话局的用户级，听二次拨号音（用户交换机可消除从电话局送来的二次拨号音）。呼入时经电话局的用户级接入到用户交换机的话务台上，由话务员转接至各分机（现用户交换可在机内送出附加拨音号或语音提示以及附加电脑话务员来实现外线直接拨打被叫分机号码）。

3）混合中继方式。DID1 + DID + BID 中继方式，如图 18 - 23 所示。

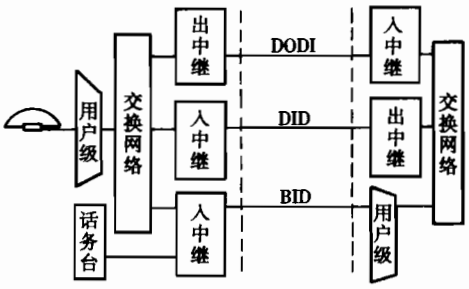


图 18 - 23　混合中继方式

数字用户交换采用中继电路以全自动直拨中继方式（DOD1 + DID）为主，同时辅以半自动接入方式（BID），增加呼入的灵活性和可靠性。

（4）系统的选型原则。程控用户交换机选型通常按以下几个方面来考虑。

1）交换机技术的先进性。评定交换机产品技术是否先进，可先从以下几点来判定：

a. 生产厂家的概况。产品开发的年代、生产厂的历史及知名度以及所具有的技术力量、公司产品占有市场情况和用户的反应等。

b. 综合性能。产品系统的容量、话务量负荷能力、基本业务及新业务功能、话音和非话音的综合支持能力、外围接口配置、非话音业务接口、信号方式、技术指标、话务台功能、能提供的特殊功能、组网能力及各种终端设备。

c. 系统结构。控制方式（全分散或集中分散结合）、总体结构方式以及处理机处理能力（处理速度）、内存容量、外存容量及结构（硬盘和软盘）、交换网络结构（控制方式、无阻塞）、外围处理机能力等。

d. 软件系统。软件模块化结构程序设计水平、软件的规模、编程语言的先进性和规范化程度、软件的容错性、软件的成熟性、软件操作的易难度、软件的可维护性。

e. 硬件系统。硬件水平、硬件接口符合 ITU 建议标准程度、硬件的冗余度、硬件可靠性指标、机械结构和工艺水平等。

f. 系统情况。模块化结构、系统可靠性、系统冗余度、维护管理功能等。

2）用户对产品的适用性。用户应对自己建筑物内通信业务的需求、近期的需求和远期的发展作出评估后，再进行对交换机产品的选定。在选型时，一定要充分考虑今后容量的扩充、数据通信、与计算机联网、办公自动化等方面发展的需要以及软件上的兼容性。做到长远规划，适度发展，满足近期要求。

3）产品的可靠性。由于通信系统是一个连续、具有高度可靠性的系统工程，在其规定的寿命期内，不允许中断或瘫痪，所以，必须对交换机产品提出可靠性要求。

通常系统可靠性应包括硬件（元器件）的故障率、软件设计的故障，维护管理诊断等方面。

4）交换机接入计算机局域网。根据用户自用以及用户办公自动化程度的需求，程控用户交换机备有多种数字通信接口能与计算机联网，例如 B + D、2B + D、30B + D 及以太网等

接口。一旦联网时，应注意接口处的速率应保持一致、电平一致、阻抗相同。

5）交换机设备的经济性。程控用户交换机选型时，在首先考虑设备先进性、适用性、可靠性为原则的同时，还应考虑设备的经济性，即以合理的价格购买优质的产品获得最大的经济效益。主要从以下几点来考虑。

a. 设备性能价格比。根据用户单位使用功能的要求，选择几种对自己应用相适应的、同一等级技术水平的交换机型进行质量和价格比较。通常应该选择性能价格比高的设备产品。

b. 设备询价。首先将用户所需话务量大小、容量多少（分近期和远期）、接口与信令要求、外围设备的配置，如话务台、维护终端数字话机、计费系统、网管系统等设备状况一一制作标书后，发标给厂家报价。然后通过厂家报价后，再折算出每一线平均价格进行对比，并对各设备单价进行核实。

每一个交换机生产厂设计的交换机都是针对一定的市场需要，包括功能、质量及容量范围，然后，确定设备的系统结构、中央处理机和外围处理机的位长及存储器容量等。在同样设备的情况下，对不同容量的用户价格是不同的。对单机柜的交换机而言，装满全部设备的情况下，每线平均价格要比没装满设备时要低一些。对多机柜的交换机，每增加一定容量，机柜的数量就要增加一个，价格也相应地阶跃，所以用户在进行选型时，需要考虑所选机型在远期增加容量时所产生的价格阶跃是否合理。

影响价格的因素除交换机设备基本配置外，还有与交换机设备所配套的产品，如总配线架、配电设备、蓄电池、多功能话机、普通电话机及可选择的功能等。通常设备产品商务报价都应报设备到用户所在地价格（其中包括各类手续费、税金、运输、设备安装、人员培训等费用）。

6）设备需符合进入公用的要求。根据我国信息产业部规定，各类用户交换机接入公用电信网使用，均应有进网许可证和设备产品检定证书，即从国家电信网整体利益出发，对要求入网的用户交换机提出统一的进网要求。如接口及局间配合的要求、编号的要求、传输参数的要求、信号方式的要求、服务质量指标的要求、计费要求、网同步的要求等，以满足国内全程网及国际通信的质量要求。

7）设备产品的维护：用户交换机的硬件维修比较简单，一旦有了故障只需由维护终端判别故障通常所在位置，更换备用电路板即可。但对于较大的软件故障，宜请厂家派专人协助处理。

从维护角度出发选型时应从下列几方面考虑：首先了解这个公司的稳定度，是否有倒闭的可能；生产该设备是否稳定；该公司的信誉如何；对用户是否负责；能否按时供货；当设备出现较大故障时，该公司能否及时派专人处理；当用户需要扩容、补充订购设备和备件时，该公司能否按优惠价或平价供给；能否长期供给备品备件；在技术培训上，公司能否提供培训方式，培训时间、地点；使用的语言、软件程序能否全部告诉用户；该公司在国内或当地是否已建立维护中心，如有维护中心，便能获得有效的技术后缓和备件的支持（如远端维护）。

总之，在进行程控用户交换机的选型时，要从本单位实际情况出发，考虑综合问题，全面衡量，既要便于通信，又要节省资金，还要有利于今后维护，确保通信安全。

（5）系统的设计。

1）电话用户数量的确定。建筑中电话用户的数量的确定应根据建筑物的类别、应用的

对象、使用功能以及使用单位提供的用户数量表为依据，并结合物业管理部门的实际需要、用户近期初装容量及远期发展的终装容量进行综合考虑来确定，也可按综合布线语音信息点的数量作为依据预测。

当建筑单位或建筑的物业管理部门提供不出用户数量表而今后又可能发展时，应根据建筑中最终应用对象的性质以及远期发展的状况来确定（按表中标准1.2倍来考虑），表18－16是根据有关资料统计，可供设计时参考。

表18－16　　电话回线的设计标准数

类　别	使用面积每10m²		类别	使用面积每10m²	
	外线回线数	内线回线数		外线回线数	内线回线数
公司办公楼	0.5	1.5	报社	0.5	2
政府机关	0.5	1.5	银行	0.5	1.5
商务大楼	0.5	1.5	医院	0.03（病房）	0.03（病房）
证券公司	0.5	1.5		0.2（办公室）	0.5（办公室）
广播电视楼	0.2	1	公寓住宅	1～2	1
百货公司	0.02（商场） 0.5（办公室）	0.2（商场） 1.5（办公室）			

注　公寓住宅按每户为单位设置外线和内线用户数量。

2）数字用户交换机容量的确定。用户交换机的实装用户限额通常为交换机容量门数的80%（即100门用户交换机实装最高限额为80门）。

a. 用户交换的初装容量计算

初装容量＝1.3×［目前所需门数＋（3～5）年内近期增容数］

当缺乏近期用户资料时，可参考同类使用性质工程项目或用户单位实际需要情况，以及国家有关部门制定的电话普及率的规划指标综合考虑确定。

b. 用户交换机的终装容量计算

终装容量＝1.2×［目前所需门数＋（10～20）年的远期发展总增容数］

当缺乏上述资料时，应根据用户单位发展远量规划远期电话普及率指标确定。

实际上由于程控用户交换机向全分散控制方式、全模块化结构（积木式结构）和设备小型化发展，所以当用户分机增加时，很容易对交换机进行设备扩容，从而可免去人们对用户交换机终装容量的长远考虑。

3）电话机房内中继线设计原则及种类和数量的确定。

a. 电话机房内中继线的设计原则：建筑中程控用户交换机除了其楼内用户相互之间通信的基本功能外，还要通过出、入中继线，来实现楼内用户与公用电话交换网上用户（包括其他用户交换机）之间的信息交换。

中继方式设计的原则是：按照用户的话务情况及基础数据，以节约用户方的投资、提高线路的利用率，并与传输设备配合，达到信号传输标准的要求，确保通信的质量。

由于建筑通信机房对外管线与当地公用电话交换网的连接方式密切相关，所以在设计建筑对外通信线路时，需与当地电话局有关部门充分讨论后，加以确定。

b. 电话交换机接入公用网及交换机之间的中继方式种类：

a）中继线可分为单向、双向和单双向混合中继方式三种类型。

b）双向中继只用于需要中继线群很少的通信设备上，以便提高中继线的利用率。

c）建筑物内各通信设备与公用电话网直接连接的用户线（双向）。

c. 电话机房内中继线数量的确定：

a）通常50门以上的用户交换机均采用单向中继线，而50门以下的用户交换机可采用双向中继线，以提高中继线的利用率。

b）用户交换机中继线数量的确定。用户交换机的基本配置，单向、双向中继线安装数量参见表18－17。

表18－17　单向、双向中继线安装数量

用户交换机容量（门）	接口中继线数量（对）	
	呼出至端局中继	端局来话呼入中继
50线以内	采用双向中继1～5话路	
50	3	4
100	6	7
200	10	11
300	13	14
400	15	16
500	18	19

表18－17中规定为基本配备数，一般配备数不应少于电话局核定的这个最低数量。当用户对公用网的话务量较大时，则中继线应大于表中规定的数目。

当用户交换机入网分机数超过500线用户时，其安装中继线数，应按实际话务量进行计算。

实际设计过程中，用户交换机中继线数量一般按总机容量的8%～10%左右来考虑，或根据话务量的计算结果查出交换机本身的中继线数量。当用户对公网话务量很大时，可按照总机容量的15%～20%左右来考虑。

表18－17中不包括建筑物内各通信设备与公用电话网直接连接的用户线。

（6）系统中数据通信技术的应用。

1）系统的应用扩展。数据通信是现代化通信业务的重要组成部分。程控用户交换机的一个很重要的特点，它已不再是本来意义的电话交换机，尤其是当今高度发达的信息社会，电话作为一种通信手段已远远不能满足社会对通信的需求。办公自动化和现代管理都需要数据的通信和交流，用程控用户交换机满足通话的同时满足数据的通信已越来越被人们所重视。我国现有具有ISDN功能的程控用户交换机系统能提供一系列CCITT建议标准的数据通信的接口，以实现在一个数字化的通信网络上同时支持话音、数据共享和支持图像传输的综合数字业务的功能。

程控用户交换机系统具有多种为数据交换和数据终端连接而设计的系统软件和连接硬件模块。用户数据终端接口主要是RS232C、RS422、X.25等接口，而用户交换机用作数据通信时主要接口是2线B＋D接口、2线2B＋D接口、4线2B＋D接口、30B＋D接口、X.21接口、X.25接口等，通信方式可以是异步或同步，全双工方式。

2）数据通信设备。

a. 交换机系统接口设备：

a）B＋D数字用户电路板（DLU）。数字用户电路板提供B＋D的信息通道，并与各种单端口的数据设备以及与异步、同步终端适配器相连。

b）2B＋D（2线）数字用户电路板。该板提供2线的（2B＋D）ISDN基本速率的信息通道，并通过数据通信接口设备与数据设备相连。

c）2B＋D（4线）数字用户电路板。该板提供4线的（2B＋D）ISDN基本速率的信息通道，可与S0接口设备相连。在S0总线上可连接多达8个终端设备。

d）X.21 数字用户电路板。该板提供连接具有 X.21 规程的计算机。

e）30/32 路 2Mb/s 数字中继电路板。该板提供符合 CCITTG700 系列建议标准的 30/32 路 2Mbit/s 数字中继接口。

f）（30B + D）ISDN 基群速率数字电路板。该板提供符合 CCITTQ.921/Q.931 建议标准的（30B + D）ISDN 基群速率数字接口。

b. 数据终端接口设备：

a）（B + D）数字话机。该机采用 B + D 通信接口并与数字电路板以 1 对线相接。该线对经过数据通信接口可提供 V.24、V.28、V.35 等接口接入 PC 机或小型计算机。

b）（2B + D）数字话机。该机采用 2B + D 通信接口，并与数字电路板 1 对线相接。该接口可直接连接数字话机，在数字话机插入接口板后，可提供 V.24 接口，以接入数据终端，使话音、数据同时通信。

c）异步数据通信适配器（DCA）。异步数据通信适配器与数字用户电路板以 1 对线相连，对符合 RS232C 的数据终端及数据通信设备提供通信入口。通常连接至计算机、调制解调器、规约转换器等上。

d）同步数据通信适配器（SDCA）。同步通信适配器与数字用户电路板以 1 对线相连。为数字复用（DMT）的数据终端设备和数据通信设备提供入口，连接方式均为 RS232C 接插件。

e）X.25 分组拆装—PAD（打包/拆包设备）。该设备与异步通信适配器相连，是异步数据设备和同步分组交换网（X.25）之间使用的规约转换设备。通过它可以使 PABX 的异步数据终端与分组交换网互通。

f）计算机规约转换器。规约转换器与异步通信适配器相连，是异步数据设备和计算机网之间的规约转换设备。通过它可以使一切可以接入 PABX 的异步数据终端与计算机网互通。

g）调制解调器（MODEM）群。调制解调器群的作用是进行数据信号的调制与解调，实现数/模与模/数的转模。通过它可以使一切可以接入 PABX 的数据终端与公用电话网上的数据终端设备互通，实现远距离的数据传输。

18.4.1.4 语音与传真服务系统。

（1）概述。语言信息和图文传真服务系统是在公用电话网上向用户提供存取语音信息、图文传真的邮箱式服务系统，它是计算机技术和通信技术在通信领域里紧密结合的产物。

当语音和传真信箱服务系统在建筑中使用，可作为建筑物内用户专用的语音信息、图文传真的服务系统；当系统在社会公用电话网上使用时，可称为综合语音信息平台系统。系统作为公用电话智能网未建成之前向用户开放的一种智能业务。它的目的是：任何人在任何时间和任何地方使用电话机或传真（带电话机），通过设备上的拨号和按键对语音信息和传真服务系统的操作，从中存取、管理语音信息和传真文件。语音与传真信箱系统与计算机技术和软件工程发展密切相关，系统中信箱的不同类别、用户的不同需求，信件的不同种类，服务的不同侧重点以及系统管理模式等，都可以通过丰富而复杂的软件设计得到实现。

电话网上，语音与传真服务系统开放业务有许多，本条中只阐述语言信箱系统、电话信息服务系统、传真信箱系统和新发展的综合语言信息平台系统。

（2）语言信箱系统。语言信箱（Voice Mailbox）系统是随着电子计算机技术、语言处理技术发展以及信息交换的需求增长而发展起来的。建筑物内电话用户即可通过大楼内公用小

型语言信箱或通过楼内各公司的专用小型语言信箱系统，以及通过公用电话网上公用大型语言信箱系统来获取大楼内外的语言信息，并在系统语言的引导下，用按键电话机对系统进行访问、存储、提取和管理信息。

语言信箱兴起的目的是改善人们电话通信的服务质量，增加电话通信的服务内容，避免电话通信时无人应答、占线、断线和话音内容传递错误，节省用户通话的时间，充分利用通信线路及交换设备，提高电话呼叫一次接通率。

1）语音信箱系统的工作原理。建筑物中，语音信箱系统工作的基本原理是将用户内部的电话信号或将连接外部公用电话网上的电话信号，经过语言的特殊处理，即语言频带压缩，转换成数字信号送至语音信箱的计算机存储器内。

语音信箱的工作原理见图 18－24 所示。

语音信箱可通过用户线路或中继线路与用户交换机或公用电话交换网相连后，它适配于各种交换机接口，并满足信令要求。

语音信箱系统中，外来语音经数学化和编码压缩后存储在多个磁盘的空间内，供用户在信箱的自动应答系统的引导下存储，检索和取消语音信息，信箱系统保证数字化语音信号还原后清晰、逼真。

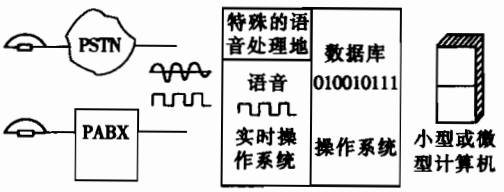


图 18－24　语音信箱原理

2）语音信箱系统的结构及功能特点。建筑物内用户小型语音信箱系统的结构日前有两种型式，一种是采用通用个人计算机（PC 机型）和软件来实现语音信息处理，另一种是采用先进的小型综合语音信息（话音、传真）系统来实现综合语音信息的处理。

对于建筑的外部公用电话交换网上，电信部门则采用通用大型计算机或专用计算机语音信箱系统。

（3）电话信息服务系统。电话信息服务也可称声讯服务（AUDIOTEX）。

电话信息服务是进行信息传递和信息流通的一种方式，它最早出现于英国，1987 年我国上海开设了首家电话信息服务台来，很受用户欢迎。

建筑中用户可以通过建筑楼内程控用户交换机与公用电话网连接，来获取电话信息服务，为商务工作提供支持。电话信息服务是利用公用电话网数据库把信息采集、加工、存储、传播和服务合为一体，面向建筑内和社会上各个用户提供综合性的多层的信息咨询服务。

城市中公用电话交换网覆盖面最广、最普及，建筑中的用户不但可以在短时间内，以最低的代价通过公用网向电话信息服务台索取各类不同用途的信息，而且可以使信息给用户带来巨大的经济和生活效益。

电话信息服务的声讯内容十分广泛，能满足建筑中用户的不同内容的咨询服务。通常信息服务的内容有邮电业务、政策法规、水电煤、交通气象、文化娱乐、医疗保健、人才招聘、家庭生活、性知识普及、金融财经、股票交易、教育、科研、出入境之友、商业服务、体育、房地产信息等。

信息服务可分为话音信息服务及非话音信息服务两大类。该项服务由公用电话网提供，电话用户得到共享。

电话信息服务可分为人工和自动电话信息服务。

(4) 传真信箱系统。传真信箱（Fax Mailbox）实际上是指在计算机数据库的存储器中拥有一块内存空间，存放输入信箱中经过数字化及压缩编码处理后的传真文件。

建筑中应设置小型综合式传真信箱系统。小型综合式传真信箱系统中不但有传真信箱服务的功能，而且还有语音信箱服务的功能。

小型综合式传真信箱系统是建筑商务办公自动化不缺少的设施之一。

(5) 综合语音信息平台系统。综合语音信息平台是目前国际上广泛使用的一种能够二次开发，从而实现多种电信服务功能的开放平台。现在使用的自动声讯服务系统“168”只是综合平台中的部分功能。系统的原理是运用“信箱”，以不同的号码加以区分，人们可以将话音、图形（信息）、数据等存入其中，建筑中或社会上广大用户可以通过各种相应终端取出或转接，并用计算机来进行处理。通常，各类用户是通过电话、传真机、计算机等各种终端的键盘来控制和处理信息。

18.4.2 移动通信

18.4.2.1 移动通信概述：移动通信是指通信的双方至少有一方是处在移动状态下进行信息交换的。它包括移动客户之间的通信和移动客户与固定客户之间的通信。在移动通信中，除了移动电话外，还有多种移动通信方式：如集群移动通信、无线电寻呼、无绳电话等。

移动通信是当前世界上先进的通信方式之一。如果双方交换的信息是语音，则称移动电话通信。移动电话是 20 世纪 80 年代发展起来的。移动电话的服务区域（例如一个城市）被划分成若干个相邻的小区，每个小区设有基站，如图 18－25 所示，基站负责将本小区内移动电话的呼叫传送至移动电话交换机，并在移动电话交换机的控制下实现移动用户间的转换，以及移动用户与市话用户通话的转接。由于常用六边形来等效一个小区，而一个个相邻的六边形酷似蜂窝，因此，人们把如此划分服务区的移动电话系统称为蜂窝移动电话系统。

18.4.2.2 移动通信的通信方式：移动通信的通信方式可分为单工、双工和半双工三种。

(1) 单工通信。所谓单工通信是指通信双方电台交替地进行收信和发信。根据收、发频率的异同，又可分为同频单工和异频单工。单工通信多用于点对点通信，见图 18－26 所示。

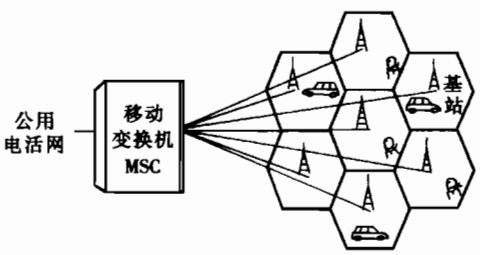


图 18－25 移动电话系统

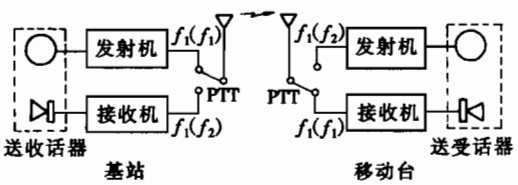


图 18－26 单工通信

同频单工是指通信双方（如基站和移动台）使用相同的频率 f_1 工作，发送时不接收，接收时不发送。平常各接收机均处于守候状态，即把天线接至接收机等候被呼。当基站要发话时，它按下其送受话器的按键开关（PTT），一方面关掉接收机，另一方面将天线接至发射机的输出端，接通发射机开始工作。当确知移动台收到载频为 f_1 的信号时，即可进行信息传输。同样移动台向基站传输信息也使用载频 f_1。显见，同频单工工作方式的收发信机是轮流工作的，故收发天线可以共用，收发信机中某些电路也可共用，因而电台设备简单、省电，且只占用一个频点。但是这样的工作式只允许一方发送时另一方进行接收，例如在基站

发送期间移动台只能接收而无法应答，这时即使移动台启动其发射机，也无法通知基站使其停止发送。此外，任何一方当发送完毕时，必须立即松开其按键开关，否则将收不到对方发来的信号。

异频单工通信方式，收发信机使用两个不同的频率分别进行发送和接收，例如其站的发射频率及移动台的接收频率为 f_1，移动台的发射频率及其站的接收频率为 f_2，不过，同一部电台的发射机与接收机还是轮进行工作的，这一点它与同频单工相同。异频单工与同频单工差异仅仅是收发频率不同而已。

（2）双工通信。所谓双工通信，是指通信双方可同时进行传输信处的工作方式，有时亦称为全双工通信，如图 18－27 所示。图中，其站的发射机和接收机分别使用一副天线。而移动台通过双工器共用一副天线。双工通信必须使用一对频道，以实施频分双工（FDD）工作方式。这种工作方式使用方便，同普通有线电话相似，接收和发射可同时进行，但是，在电台的运行过程中，不管是否发话，发射机总是工作的，故电源消耗较大，这一点以电池作电源的移动台而言是不利的。为缓解这个问题，在一些简易通信设备中可以采用半双工通信方式。

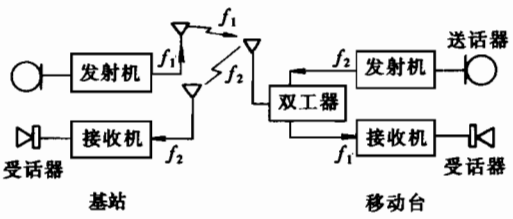


图 18－27　双工通信

（3）半双工通信。半双工通信的组成与图 18－27 相似，其特征是移台采用单工的按讲方式，即按下按讲开关，发射机才工作，而接收机总是工作的。基站的工作方式与双工方式完全相同。

18.4.2.3　移动通信的类型：随着移动通信应用范围的扩大，移动通信系统的类型也越来越多，常用的主要有以下几种：

（1）模拟和数字蜂窝移动通信系统，是以若干个相邻的蜂窝式小区覆盖范围组成服务区的大中容量移动电话通信系统。

（2）模拟和数字无绳电话系统，是用无线信道来代替普通电话机的绳线，从而能在限定范围内自由移动的电话系统。

（3）800MHz 集群调度系统，是多个部门共用一组无线信道的专用调度系统。

（4）450MHz 无线移动通信系统，是一种早期的中小容量移动电话系统。

（5）无中心选址移动通信系统，是一种不要交换（控制）中心，采用多信道选址技术的拨号专用无线通信系统。

（6）无线寻呼系统，是没有话音的单向广播式无线选呼系统。

18.4.2.4　蜂窝移动电话系统：蜂窝移动电话系统是一种大容量、小区制（蜂窝状小区），以信道共用、同频复用为特征的公用移动电话系统，是通信技术与计算机有机结合的高科技成果，可以构成大面积覆盖（全省、全国，甚至全洲）的移动电话网。可以看出，移动通信系统是一个大概念，蜂窝移动电话系统只是前者的一种。

蜂窝移动电话系统大多采用三级网结构，由许许多多的移动台（MS）一级，基地站（BS）一级，移动业务交换中心（MSC）又一级，以及与公用电话交换网 PSTN 相连接的中继线等组成，如图 18－28 所示。

基地站和移动台设有收、发信机和天线馈线等设备。每个基地站都有一个可靠通信的服务范围，称为无线小区。无线小区的大小，主要由发射功率和基地站天线的高度决定。移动

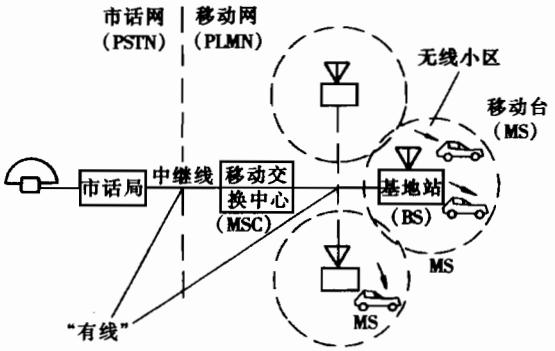


图 18－28　蜂窝移动电话系统组成

通信交换中心的主要功能是信息的交换和整个系统的集中控制管理。

各种蜂窝式移动通信系统均具有下列主要功能。

(1) 具有与公用电话网进行自动交换能力；

(2) 双向全自动拨号，包括移动台与市话用户之间可直接拨号及移动台之间直接拨号；

(3) 双工通话，话音质量接近市话网的标准；

(4) 能适应业务增加需要，通过小区分裂可以扩充容量；

(5) 以传送模拟电话为主，也可开发电报、传真等非话业务；

(6) 使用频率再用技术；

(7) 具有自动过境切换频道技术，均有自动漫游功能；

(8) 设备通用性强，通常基站、移动台设备等在全国范围可以通用。

18.4.2.5　建筑物内移动通信盲区的解决方案：建筑物的地下层及楼上各层，在受到楼宇屏蔽影响而出现盲区时，通信的质量下降而难于通话，可在室内适当处所设置无线移动通信基站或直放站。

18.4.3　通信网的接入技术

18.4.3.1　现代电信网中接入网划分：接入网也称为用户接入网，是由业务节点接口和相关用户网络接口之间一系列传送实体（例如：线路设施和传输设施）组成的，泛指本地交换机与用户设备之间的实施网络。

在现代电信网中，根据所采用的传输媒介，可分为有线接入网和无线接入网。其中有线接入网又可分为铜线接入网、光纤接入网、混合光纤/同轴电缆接入网等；无线接入网又可分为固定无线接入网和移动接入网。另外，还可以根据具体情况综合采用这些接入技术。

18.4.3.2　接入网中几种典型的接入技术：

(1) 铜缆接入技术。铜缆接入是指在非加感的用户线上，通过采用先进的数字信号处理技术来提高双绞铜线对的传输容量，向用户提供各种业务的接入手段。

传统的电话用户接入网结构见图 18－29。

图 18－29　传统的电话用户接入网

传统的铜线传输系统，在实际应用时会出现以下问题：

1) 由于用户与交换机之间的线对长度视地理环境而差别较大，且线径多有失配，从而导致信号传输所经历的中继器数量不等，信号质量受到影响。

2) 由于各双绞铜线对在较长距离内都是紧紧贴在一起的，信号中高频成分的电磁感应容易造成不同线对之间的串音，影响通信质量。

3) 由于双绞铜线对在信号低频部分的相位频率特性是非线性的，因而信号在传输过程中，将产生群时延失真，造成码间干扰。

4）由于双绞铜线对在信号高频部分的衰减量很大，因而引起信号失真。

5）铜线电缆的传输频带较窄。

6）使用场合受到一些条件的制约。

7）铜线还存在着重量大、难敷设等问题。

近年来，在铜线接入技术上虽然采用了包括数字线对增容技术、高比特率数字用户线技术、不对称数字用户线技术等，它们都可在不同程度上提高双绞铜线对的传输能力，但它也仅能起到应付当前业务增长需要的过渡措施作用，从长远发展来看，它有很大局限性。有关接入网的分类如下：

由于光纤用户网的成本较高，在今后若干年内，很多用户网仍将继续使用现有的铜线网路，于是近年来人们提出了多项过渡性的宽带接入网技术，ADSL就是其中之一。

ADSL是XDSL家族之一，此外尚有HDSL、SDSL、VDSL和RADSL等，它们的主要区别就是体现在信号传输速度和距离的不同以及上行和下行速率对称性的不同这两个方面。

ADSL属于非对称式传输，它在一对铜线上支持上行速率640Kbit/s～1Mbit/s，下行速率1～8Mbit/s，有效传输距离在3～5km范围以内。

ADSL的接入模型主要有交换局端模块和远端模块组成。

ADSL的安装包括局端线路调整和用户端设备安装。在局端方面，由服务商将用户原有的电话线中串接入ADSL局端设备，用户端只需将电话线连上滤波器，滤波器与ADSL MODEM之间用一条两芯电话线连上，ADSL MODEM与计算机的网卡之间用一条交叉网线连通，即可完成硬件安装，再将TCP/IP协议中的IP、DNS和网关参数项设置好，便完成了安装工作。

局域网用户的ADSL安装与单机用户的区别是只需再多加一个集线器，用直连网线将集线器与ADSL MODEM连起来就可以了。

ADSL与普通拨号MODEM及N－ISDN相比较具有的优势：

1）比起普通拨号MODEM的最高56Kbit/s速率，以及N－ISDN 128Kbit/s的速率，ADSL

的速率优势是不然而喻的。

2）ADSL 更为吸引人的地方是：它在同一铜线上可分别传送数据和语音信号，数据信号并不通过电话交换机设备，减轻了电话交换机的负载，即使用 ADSL 上网并不需要缴付另外的电话费。

（2）光纤接入网（OAN）。光纤接入网是指在接入网中采用光纤作为主要传输媒介来实现用户信息传送的网络形式，它与铜线接入网相比，有着许多无可比拟的优点和广阔的应用前景。

它的主要优点是：可以传输宽带交换型业务，且传输质量好，可靠性高；光纤接入网不仅可以支持窄带业务、宽带广播式业务，而且还可在 B－ISDN 中支持交互式宽带业务，为高速宽带业务提供传输通道。

根据主干系统与配线系统的分界点——光网路单元（ONU）的位置，即光纤距用户距离的不同，目前光纤用户网可分为以下几类：

1）光纤到路边（FTTC）：ONU 设置到路边，一般用户采用铜线引入线，有宽带业务的用户也可用光纤引入用户。

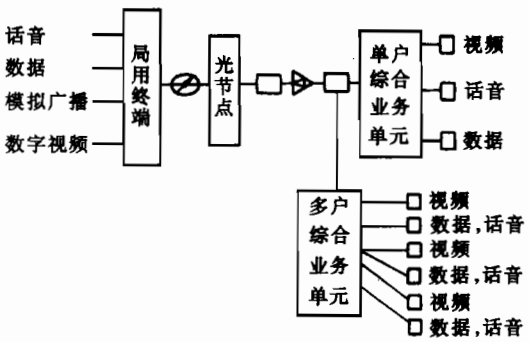


图 18－30　HFC 基本结构

2）光纤到大楼或者商业区（FTTB）：ONU 设置于大楼内的配线箱处，主要用于高层建筑或商业区内，为商业用户服务。

3）光纤到户（FTTH）：光纤一直延伸到用户家中，可以传送高速双向宽带业务，为家庭提供各种综合性宽带业务。

随着计算机通信及网格技术的成熟与发展，有力地促进了光纤接入网的发展与应用，当然，它的投资成本当前还较大，网络管理尚显复杂，远端供电也较难。

（3）混合光纤/同轴电缆（HFC）接入网。混合光纤同轴电缆（HFC）接入网，是一种综合应用模拟和数字传输技术、同轴电缆和光纤技术、射频技术、高度分布式的接入网络，是电信网与 CATV 网相结合的产物，是将光纤逐渐向用户延伸的一种新型的、经济的演进策略。

通过 HFC 的基本结构和网络组成，可见 HFC 实际是在一根光纤上，采用通带模拟调制方式进行全业务传送的一种综合业务实现方式，通过对 1GHz 以下频段的安排，实现多业务的上下行双向通信。图 18－30 与图 18－31 是 HFC 的基本结构和网络组成示意。

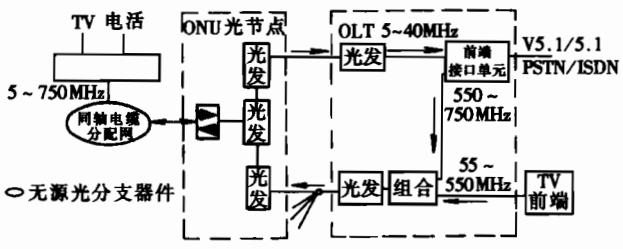


图 18－31　HFC 系统网络组成

18.4.3.3　接入网主要接口类型：接入网有三种主要类型的接口，即用户网络接口（UNI）、

业务节点接口（SNI）和维护管理接口（Q）。

（1）用户网络接口（UNI）。主要包括模拟二线音频接口，64、2048Kbit/s 接口，ISDN 基本速率接口（BRA）和 ISDN 基群速率接口（PRA）等。

（2）业务接点接口（SNI）。主要有两种：其一是对交换机的模拟接口（Z 接口），它对应于 UN 的模拟二线音频接口，可提供普通电话业务或模拟租用线业务；其二是数字接口（V5 接口），它又含有 V5.1 接口和 V5.2 接口，以及对节点机的各种数据接口或针对宽带业务的各种接口。

（3）维护管理接口（Q3）。维护管理接口（Q3 接口）是电信管理网（TMN）与电信网各部分的标准接口。接入网作为电信网的一部分，也应通过 Q3 接口和 TMN 相连，便于 TMN 实施管理功能。

18.4.3.4 智能建筑通信网络可包括以下内容：

随着传递的信息有各种不同的型式，因而现代通信系统已不再是单一的电话网或电报文字网，而是一个综合性的为多种信息服务的通信网。

现代通信网络所包含的系统，随着功能、标准要求的不同而有所不同，就其含义通常应包括：电话系统、移动通信系统、卫星通信系统、分组交换系统、会议电视系统、有线电视系统和综合布线系统等。

18.4.4 卫星通信

18.4.4.1 卫星通信技术基本原理：

（1）卫星通信。卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站转发无线电波，在两个或多个地球站之间进行的通信，是宇宙通信型式之一。宇宙通信是以宇宙飞行体或通信转发体为对象的无线电通信。

目前，卫星通信已成为远距离、全球通信的主要手段之一。它的通信业务已从简单的电报、电话发展到电视、数据、传真、导航、定位应急通信等诸领域；站址从固定发展到移动；信号特征从模拟到数字；用户从民用到军用，成为各种用户不可缺少的通信手段之一。

（2）卫星通信的特点。与其他通信手段相比，卫星通信具有以下一些特点：

1）通信距离远，且费用与通信距离无关。显然，这是地面微波中继通信、光纤通信以及短波通信等其他通信手段无法比拟的。

利用单颗地球同步卫星通信，其最大通信距离可达 18000km（约为地球周长的 1/3）。

2）覆盖面积大，可进行多址通信。许多其他类型的通信手段常常只能实现点对点的通信。而卫星通信，只要是在卫星天线波束的覆盖区域内，都可设置地球站，共用同一颗卫星，在这些地球站之间进行和双边或多边通信，或者说多址通信。

3）通信频常宽、传输容量大。目前，卫星带宽已达到 3000MHz 以上，一颗卫星的通信容量已可达到 30000 路电话，并可同时传输 3 路彩色电视以及数据等其他信息。

4）机动灵活。卫星通信不仅能作为大型固定地球站之间的远距离干线通信，而且可以在车载、船载、机载等移动地球站间进行通信，甚至还可以为个人终端提供通信服务。

5）通信线路稳定、右靠，传输质量高。由于卫星通信的无线电波主要是在大气层以外的宇宙空间中传播，因而传播性能比较稳定，同时也不易受自然条件和其他干扰的影响，传输质量高。

6）可以实现自发自收。

图 18－32 为卫星通信线路的组成示意。

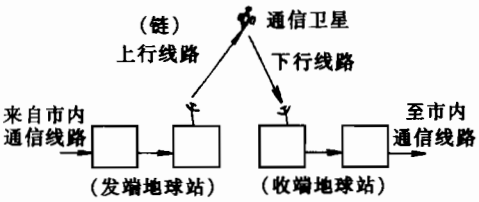


图 18－32　卫星通信线路的组成

(3) 卫星通信系统分类。从不同的角度，卫星通信系统分以下几类：

1) 按卫星运动方式分为：静止卫星通信系统、低轨道移动卫星通信系统。

2) 按通信覆盖分为：国际卫星通信系统、国内卫星通信系统、区域卫星通信系统。

3) 按用户分为：公用卫星通信系统、专用卫星通信系统。

4) 按通信业务分为：固定地球站卫星通信系统、移动地球卫星通信系统、广播业务卫星通信系统、科学实验卫星通信系统。

5) 按多址方式分为：频分多址卫星通信系统、码分多址卫星通信系统、混合多址卫星通信系统。

6) 按基带信号分为：模拟卫星通信系统、数字卫星通信系统。

(4) 卫星通信系统的工作频段。目前大多数卫星通信系统是选择在以下频段工作的：UHF 波段（S 波段），4.0/2.5GHz；L 波段，1.6/1.5GHz；C 波段，6/4GHz；X 波段，8/7GHz；Ku 波段，14/11、14/12GHz；Ka 波段，30/20GHz。

(5) 卫星通信系统的组成。利用卫星进行通信，除应有通信卫星和地球站以外，为了保证通信的正常进行，还需要对卫星进行跟踪测量，并对卫星在轨道上的位置及姿态进行监视和控制，完成这一功能的就是跟踪遥测和指令系统。为了对卫星的通信性能及参数进行通信业务开通前和开通后的监测与管理，还需要监控管理系统。所以，卫星通信系统，通常是由通信卫星、地球站、跟踪遥测及指令系统和监控管理系统等四大部分组成。如图 18－33 所示。

作为一条通信路线，卫星通信路线由发端地球站、上行传播路径、通信卫星转发器、下行传播路径和收端地球站组成。

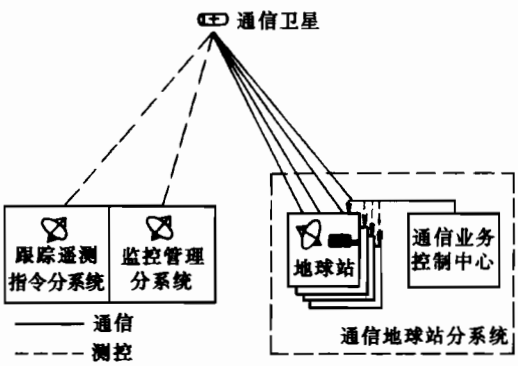


图 18－33　卫星通信系统的组成

(6) 卫星天线分类。卫星天线有两类：一类是全方向天线，主要用于遥测、指令和信标。另一类是通信天线，按其波覆盖区的大小，可分为全球波束天线、点波束天线、赋形波束天线。

1) 全球束速天线：波束宽度约为 17° ~ 18°，天线增益为 15 ~ 18dB。

2) 点波束天线：波束比全球束窄很多，因而有较高增益，能将辐射的能量集中于预定的，较全束波束小得多的区域内。

3) 赋形波束天线：覆盖区域轮廓不规则，视服务区的边界而定。

通信卫星的天线要求体积小、重量轻，供电方便，便于折叠和展开；除了波束覆盖区的形状和面积应满足整个系统的需要外，还要具有以下各种性能：

a. 一定的指向精度。指向误差小于波束宽度的 10%。

b. 足够的频带宽度：应满足大容量通信的要求。

c. 必要的星上转接功能。

d. 适当的极化方式。一般频率低于 10GHz 时使用圆极化，频率高于 10GHz 时使用线极化。

e. 必要的消旋措施，使自旋稳定的通信卫星天线波束不随星体旋转。

(7) 地球站的主要作用、站址条件与系统组。地球站选择主要应考虑：与其他微波、短波通信系统之间是否有干扰；地平线的仰角是否在 3°以下（仰角是指山棱线、天线之间的连线与水平线的夹角）气象及环境条件是否达到要求。

地球站主要由天线分系统、发射机分系统、接收机分系统、通信控制分系统、信道终端设备分系统和电源分系统六大部分组成。

18.4.4.2 VSAT 卫星通信系统：

(1) VSAT。VSAT 中文含义是“甚小口径天线地球站”。它是由天线尺寸小于 2.4m、G/T值低于 19.7dB/K、设备紧凑、全固态化、功耗小，价格低廉的卫星用户小站和一个枢纽站组成的通信网，主要用来进行 2Mbit/s 以下的低速数据双向通信。

我国 VSAT 系统通常使用 Ku 波段和 C 波段。Ku 波段 VSAT 天线口径一般在 1.2 ~ 1.8m 之间；C 波段 VSAT 天线口径一般在 1.8 ~ 3m 之间。

一个典型的 VSAT 系统，是由许多智能化小型地球站、一个（或数个）大的主站构成。空中的通信卫星为中继，VSAT 可与主站或其他 VSAT 通信，提供信息业务，如图 18 - 34 所示。

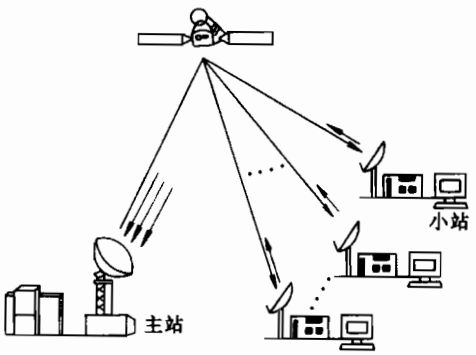


图 18 - 34 VSAT 系统的基本构成

1) 主站（或称中心站）：经 VSAT 网的管理控制中心，它与普通地球站一样，使用大型天线，其天线直线 Ku 波段一般在 3.5 ~ 8m；Cu 波段一般为 7 ~ 13m；配有功率放大器，低噪声放大器和上、下变频器，调制解调器及数据接口设备等。

主站设有网络控制中心，负责对全网监测、管理、控制和维护，并实时监测、诊断各小站和主站自身的工作状况，以及测试信道质量、负责信道分配、统计、计费等。

2) 小站：小站（VSAT）由小口径天线、建筑的室外单元和室内单元三部分组成。

小站（VSAT）天线有正馈和偏馈两种型式。正馈天线尺寸较大，偏馈天线尺寸小，增益高，旁瓣小。室外单元主要包括固态功放、低噪声放大、变频组件、上下变频器、正交模耦合器等。室外单元安装在天线反射面焦点处。室内单元由调制解解器与基带处理单元功能强的微处理器组成。安装在大厦建筑内与用户终端设备直接相连，完成数据信息的发送和接收。

3) 卫星：VSAT 使用的卫星设备是 Ku 波段或 C 波段的同步卫星转发器。

(2) VSAT 系统优越性与其远端站的基本特性。VSAT 系统主要用来替代地面专用网，完成中心站与远地分散的终端站之间的通信。

1) VSAT 系统的优越之处在于以下几点：

a. 通信链路费用与距离无关。

b. 远地分散的小站可以方便地进入通信链路。

c. 载波之间无需互连。

d. 无需本地环路连接。

e. 数据、话音、图像信道带宽动态分配。

f. 主站对远端站具有监控能力。

g. 主站可以对小站的状况进行诊断。

h. 网络扩充能力强。

i. 投资固定。

2) VSAT 的远端站基本特征如下：

a. 便于携带。

b. 便于在屋顶、阳台和地面安装。

c. 成本低。

d. 天线：1m 天线用于带主站的星形网，2m 天线用于不带主站的网状网。

e. 固态功放 SSPA。

f. 多址接入技术：TDMA，单路单载波（SCPC），TDM，CDMA，数据 ALDHA，(TDMA 或 SCPC 为话音提供)。

g. 调制（QPSK，BPSK)。

h. 前向纠错码 PEC，编码：卷积；解码：维特比译码或序译码。

(3) VSAT 可以运用的网络结构。根据需求，VSAT 可以运用在以下任何种网络结构中：

1) VSAT 使得用户在个人电脑或连锁店的数据终端上，传低速率的数据和话音，这种业务通常是点对点或卫星单跳通信。

2) 远端站从一组终端用户或 LAN 网中收集数据，通过卫星发到其他远端站的一组用户或 LAN 网中的用户，这种业务往往是一组 VSAT 终端站连接到一个特定的主站上。主站可以有很多，他们在规模上较大，通过卫星或地面光纤接连起来，通常设在数据或设备中心。一个主站所携带的数目没有限定，而是根据业务量的分布和主站的大小来确定。

3) 网络中的任何一对终端站可以进行点对点的话音、数据和图像的传输。这种结构更多的为话音和会议电视而运作。

4) 星形网络结构下，远端站可以运用话音数据以及图像功能。到目前为止，90% 的 VSAT 网络采用星形结构，并且用于数据传输功能。

18.4.5 可视图文系统

18.4.5.1 概述：可视图文（Videotex）是一种公用的、开放式的信息服务系统，它利用现有的两个公用通信网公用电话交换网 PSTN（Public Switch Telephone Network）和公用数据分组交换网（PSPDN，Public Switch Packet Data Network)，以交互型图像通信的方式向智能建筑物内用户提供公用数据库和专用数据库中的各类信息，以达到或满足用户最大范围地共享信息资源的目的。

可视图文也可称视讯服务，它于 70 年代初由英国人发明。我国在 80 年代中开始研究和开发可视图文系统，并在 1990 年内颁布了国家技术标准。1992 年可视图文试验系统已通过国家鉴定，现已在海投为商用。其服务的各个领域为：电话号码簿、外汇牌价、股票行情、期货行情、天气预报、火车时刻、飞机航班、出国申请程序、股票实时交割、医疗卫生、旅游服务、科技资料、市场动态、商品广告等。

由于可视图文是一种公用的、开放式的信息服务系统，所以它覆盖面广、安装方便、费用低廉、用户操作使用简单易学。系统操作只需根据用户通过其终端输入的检索要求，从专

用数据库或公用数据库中找出相应的信息，并以数据的形式通过公用通信网传回给用户终端，经解码后就显示在用户终端的屏幕上。

18.4.5.2 可视图文系统的构成：我国可视图文系统的网络是一个广域分布式网络结构。网络除了利用现有的两个公用通信网外，还由可视图文用户终端、编辑终端、网络服务器、接入点设备、电话号码簿系统问讯中心、公用数据库、专用数据库、业务管理中心设备所组成，如图 18－35 所示。

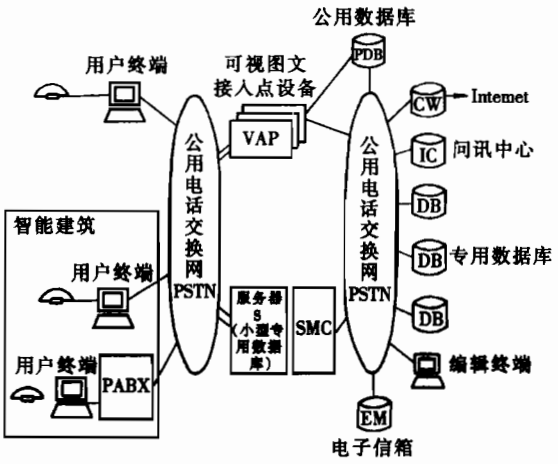


图 18－35 我国可视图文业务网的网络结构

（1）可视图文用户终端。智能建筑物内可视图文用户终端均接在公用电话交换网上。这里的公用电话交换网是指一个城市的公用电话交换系统，也可包括智能建筑中程控用户交换机。电话机和可视图文用户终端共用一条电话用户线。使用时，首先用电话机呼叫，通过电话交换网接通至所需要的某个数据库。然后利用用户终端与该数据库进行交互式信息交换达到信息检索的目的。

智能建筑中可视图终端可分为三类：第一类为专用用户终端；第二类为微机型用户终端；第三类为普通电视机形用户终端。

1）专用用户终端。专用用户终端是专门为可视图文业务研制的用户终端设备。它可以输入汉字和英文，并能显示汉字、英文、镶嵌图形和动态再定义字符。终端内部装有调制解调器，可与电话机并联后直接连接到公用电话交换网上。终端能实现传输差错控制，自动发送“终端识别序列”，并具有设备体积小、功能齐全、流动携带方便等特点。

2）微机型用户终端。微机型用户终端是在个人计算机 PC（Personal Computer）及其兼容机的基础上改造而成的。但微机作为可视图文用户终端时，由于缺少调制解调器和缺少专用显示卡（有增强型图形适配卡和视频图像阵列卡的微机除外），所以需在微机内部增加可视图文适配卡和相关软件，增加接入电话交换网的调制解调器，构成微机型用户终端。微机型用户终端不但保留了个人计算机的全部功能，而且还是一个完整的可视图文终端，起到一机多用的功能。

3）普通电视机型用户终端。普通电视机型用户终端是由普通电视机配上可视图文适配器和小型键盘所组成。适配器中包括调制解码器、信源解码器和图形显示控制器。这种设计对有普通电视机及电话的用户是很可取的。

第一类和第二类用户终端是目前可视图文用户终端的主要型式。

用户终端内均应配有 V.23 调制解调器，与电话交换网相连，异步双工通信的接收速率早先为 1200bit/s，发送速率为 75bit/s。现接收速率和发送速率均为 2400bit/s，今后发展为 9600bit/s。

（2）编辑终端。编辑终端是网上信息提供者使用的一种专用设备。它有微机、图形适配卡、图像处理装置、同步通信卡及相应软件所组成，用于数据库的可视图文信息页和画面的编辑处理，以及对网上任何一个数据库进行通信，交换信息。

(3) 网络服务器。可视图文网络服务器是集通信管理和小型专业数据库于一身的专用设备。它通过电话交换网直接向智能建筑物内用户提供信息服务，一般不属于公用交换网，而是属于单位或公司专用网部分。它还具有接入分组交换网的能力，获取网上数据库中的数据，或作为数据向网上提供信息服务。

(4) 接入点设备。可视图文接入点设备（VAP，Videoted Access Point），是网络十分重要的设备，它设置在电话交换网与分组交换数据网之间，将分组网上的数据库与电话网的用户连成整体，构成一个完整的可视图文系统。它具有完成用户终端的接入与管理、网间互通、自动路由选择、信息集中、计费、统计、诊断和测试等功能。

(5) 问讯中心。问讯中心是专门为电子号码等系统设计的预处理设备，直接连接在分组交换网上。

(6) 公用数据库。可视图文公用数据库是由国家电信部分管理经营并向公用用户提供国家级的公用的可视图文数据库。

(7) 专用数据库。可视图文专用数据库是由各单位或公司管理经营，并向公众用户提供各专业特点的可视图文数据库。

(8) 业务管理中心。可视图文业务管理中心是管理数据库和可视图文网间接入点设备，以确保公用数据的一致性和对全网进行状态管理。

(9) 电子信箱。可视图文业务网上的电子信箱是为用户利用自己的用户终端设备向网上另一个用户终端写信，同时也可读取其他用户终端通过电子信箱发来的信件。

(10) 网关。可视图文业务网上的网关（Gateway）的设置是使可视图文业务网获得像 Internet 的全部优点（如资源丰富、通信覆盖面广等）。

18.4.5.3 可视图文系统的应用：

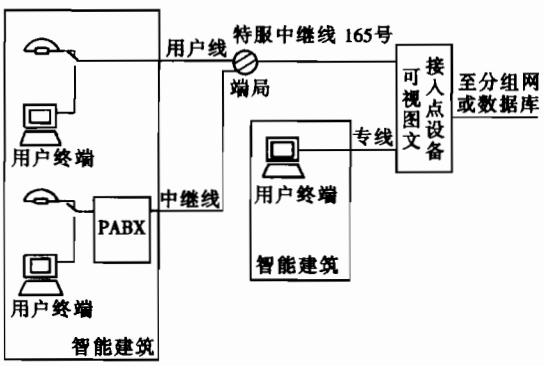


图 18－36 用户终端和可视图文接入点设备的连接方式

(1) 可视图文用户终端接入交换网的方式。

1) 本地接入方式。对于已安装可视图文接入点设备的城市地区，智能建筑物内的用户终端使用当地可视图文信息公司给予的专用电话号码（上海是 8 位数）或使用当地可视图文信息公司（邮电部门）自己设定的可视图文接入点设备的特种业务号“165”接入。连接用户终端的端局使用特服中继线连接到就近一个接入点设备；对智能建筑物内业务量大的用户可采用专线连接到接入点设备上，如图 18－36 所示。

2) 长途接入方式。对于未安装可视图文接入点设备的城市地区的少量用户终端，用户使用接入点设备的集线用户号，以长途呼叫的方式与可视图文接入点设备连接，如图 18－37 所示。

3) 接入可视图文服务器方式。智能建筑中用户终端，可使用服务器的集线用户号，经电话网与本地服务器（小型专业数据库）直接进行通知。服务器通常只向本地范围内用户提供信息，如图 18－38 所示。

(2) 可视图文的应用服务。可视图文是一种公用的、开放型的信息服务系统，它的应用

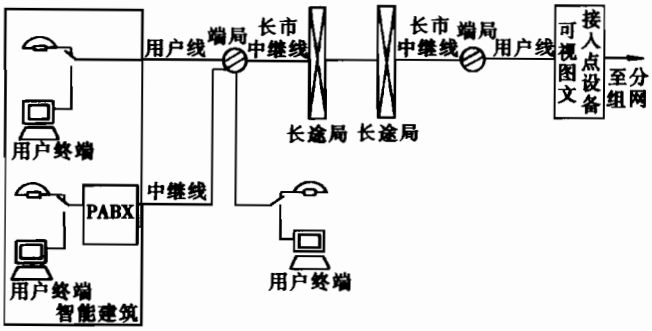


图 18－37　用户终端长途呼叫可视图文接入点设备的连接方式

领域十分宽广。

可视图文业务从不同的应用角度来看，可以分为三大类。

1）检索型业务。这类业务的特点是：用户通过三种检索方式（直接检索、菜单检索、征询单检索）向数据库索取各种数据资料，在用户和数据库主机间进行交互式人机通信过程中，用户只读取数据库中的数据，不改变数据库中的任何内容。这类业务很多，如新闻、法律、文化、艺术、体育、消息、市场动态、科技资料、专利目录、图书情报、火车时刻、飞机航班、天气预报等都属于检索型业务。

2）交易型业务：这类业务的特点是：用户不仅要向数据库索取必要的信息，还要修改数据库的内容。在用户和数据主机间进行交互型人机通信过程中，用户对数据库的操作是一个“既读又写”的过程。典型的业务有银行储蓄、电子购物、火车、飞机的预约订票、旅馆饭店的预定、证券交易等。由于这类业务通常涉及钱物交易，因而保密、可靠和安全问题是首先要考虑的问题，系统必须给以充分的保证。

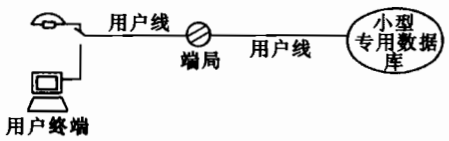


图 18－38　用户终端和服务器的连接方式

3）计算和信息处理型业务。这类业务的特点是，用户不是向数据库索取信息，而是要求服务主机提供计算和信息处理业务。用于这类业务的主机（大、中、小型计算机）的特点是：它能提供计算、信息处理能务，或者是具有某类专门的处理功能。可视图文系统借助于计算机的这些功能，向用户提供一般用户无法拥有的计算机或特殊处理能力。典型的业务有大型科学计算、大型数据和图像处理、大中小型翻译机、各类专家系统。这类业务要求通信质量高，高度可靠。

可视图文应用极广泛，可用于各行各业，各个领域。

18.4.5.4　可视电话系统：

（1）概述。可视电话（Videophone）是通话双方在通话时，能同时见到对方图像的电话。可视电话在建筑物内使用时，用户双方打开可视电话设备，通过拨号连通后，就能进行面对面的可视图像通信。

可视电话发展再次提高是由于数字通信技术、图像信号编码压缩技术、超大规模集成电路等技术发展，给发展数字式可视电话创造了条件。

90年代前研制的可视电话以模—数—模的通信技术可以在公用电话交换网中一条模拟

电话线上传输彩色活动头像和话音。当我国公用电话网上一旦建立窄带或宽带综合业务数字网后，就会给数字式可视电话提供最佳的传输条件。

(2) 可视电话系统的构成。当把可视电话机连接在能传输声音和图像信号的交换通信网上，就可进行彩色活动图像的可视电话的通信。根据现有的网络技术和发展的网络通信技术，可视电话系统连接示意图如图 18－39、图 18－40 所示。

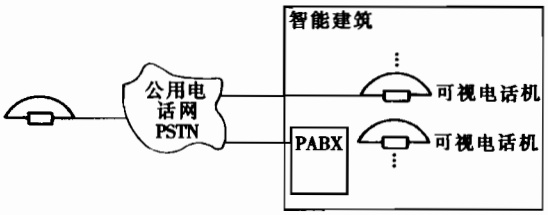


图 18－39　模拟交换网可视电话系统示意图

ISDN 网是进行可视电话信号传输的最佳的网络。根据国际电信联盟（原 CCITT）H.261 建议，制作的编解码器（Codec）以高效的编码压缩技术，已使彩色活动图像信号，压缩到 64Kbit/s 速率的图像编码技术进入了实用阶段，可视电话利用 ISDN 网络传输可视电话信号有以下几种方案。

1) 将图像和声音集中在一个 B 信道（64Kbit/s）中传输，其图像信号为 64Kbit/s，声音为 16Kbit/s。

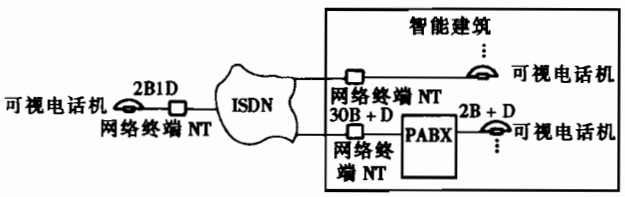


图 18－40　ISDN 交换网可视电话系统示意图

2) 将用两个 B 信道，一个传输图像信号（64Kbit/s），另一个传输主语音信号（64Kbit/s）。

3) 将两条 B 信道合在一起，作为一条 128Kbit/s 线路使用，将图像和语音集中在这条线路中传输。其中图像信号为 112Kbit/s、语音信号为 16Kbit/s。

日本在开发 ISDN 可视电话方面走在世界的前列，日立、NTT、三菱等公司都研制出按 H.261 标准进行图像信号压缩编码的可视电话机。如日立公司 1991 年推出的 HV－100 型可视电话采用 1/2in 的 CCD 摄像头和 5in 彩色液晶显示器。传送 176×144 像素的图像最高帧频为 10 帧/s。NTT 公司 Picsend－R 型可视电话（台式），摄像头内置于电话机中，话机上配有 5.6in 显示器，屏幕上可分成 4 个视频窗口，可保证 5 方会议，并以 15 帧/s 速率传递高清晰度图像。

18.4.5.5　会议电视系统：

(1) 概述。会议电视系统（Videoconferencing System）不但是一种以视觉为主的图像通信，而且是一种交互式的多媒体通信。它利用现有的图像通信技术、计算机通信技术及微电子技术，进行本地区或远程地点与点之间或多点之间双向视频、双工音频、数据等信息交互式的实时通信。

会议电视系统是现代通信系统中迅速发展的一种新型的通信手段。它之所以能够实用化是由于超大规模集成电路集成度的不断提高，图像压缩技术的不断发展以及相应国际标准 H.320 的建立和完善、公用网的数字化，使图像处理、传输进入了实用化和商用化的阶段。会议电视系统具有节省时间和金钱的优点，对智能建筑内用户的高效率的会议办公有着重大的意义。

会议电视的目的是把相隔两地或多个地点的会议室的电视设备连接在一起，使各方与会人员有如身临现场一起开会的感觉，进行面对面的对话，共同商讨与会人员相关的问题或研究大家所关心的实形物体、图片、图表和工程图纸，系统还能根据各处与会人员的要求，向与会方提供文件传真、静止图文等辅助服务项目。广泛地用于智能建筑楼办公室内的各类行政会议、科研会议、技术教学、商务谈判等多种事务中。

会议电视系统按照业务分类有以下几种：

1）公用的会议电视系统作为一种开放的业务在各城市、县镇设立电视会议室，租给用户使用。

2）专用的会议电视系统作为本行业或总公司下属单位组成会议电视业务网，当本公司单位需要使用时，只要将房间系统设备移动出来即可使用。

3）桌面会议电视系统（桌面型 Desktop）。在建筑物内，用户可以随时利用桌面个人电脑终端（PC 机型）的会议电视设备，进行点与点及多点之间的交互多媒体通信。

我国制定的会议电视标准按照国际统一标准，即 ITU－T（前 CCITT）H 系列等相应的国际建议标准，确定了会议电视设备中视频编码、解码器的具体规定，图像传输速率为 P×64Kbit/s（P＝1，2，3，4，…，30）的标准。

（2）会议电视系统的构成。

1）公用和专用会议电视系统的构成。会议电视系统是由会议电视终端 VCT（Video Conference Terminal）、数字传输网络（通常采用 DDN 或 ISDN 网）、多点控制单元 MCU（Multipoint Control Unit）等部分所构成，如图 18－41 所示。

a. 会议电视终端设备。会议电视终端设备由视频、音频输入输出设备，编解码器，附加信息终端设备以及系统控制复用设备，网络接口和信令等部分所组成。终端设备主要完成会议电视信号的发送和接收任务。

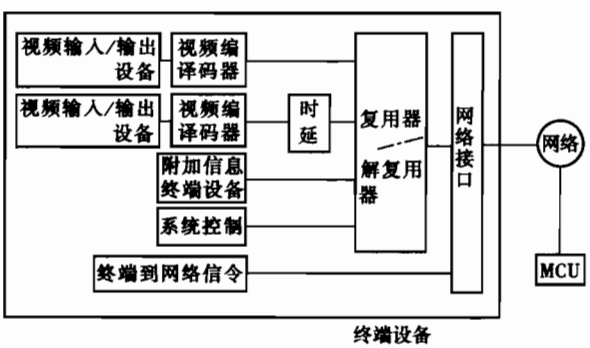


图 18－41　会议电视系统构成框图

会议电视终端设备中各个子设备的功能作用如下：

a）视频输入输出设备：包括摄像机、图文摄像机、图文摄像机、监视器等。

b）声频输入输出设备：包括麦克风、扬声器。

c）视频编解码器：对视频信号进行编解码处理。

d）声频编解码器：对声频信号进行编解码处理。

e）附加信息终端设备：如个人电脑电子白板等，它们增强了视频通信能力。

f）系统控制：利用协议的控制信令对系统进行控制。

g）时延电路：音频电路上的时延电路，用以补偿视频编解码器的时延以完成唇音同步的功能。

h）复用和解复用：将发送的视频、音频、数据和控制信号复用成一个比特流，或将接收到的比特流分解成组成它的各种信号。

i）网络接口：完成网络和终端之间的匹配。

b. 多点控制单元：多点控制单元 MCU 是位于网络节点上的一种交换设备。各会议电视终端与相应的 MCU 是点对点的对应关系。会议电视终端通过网络上一个或多个 MCU 形成会议呼叫，建立通信。按终端业务类型的不同，终端和 MCU 之间的数字信道可以从 64、128、384Kbit/s ~ 2.048Mbit/s 等。MCU 将不自各终端的视频、声频、控制和指示信号以及用户数据信息流，经过同步分离，得到图像、话音、数据等信息和信令，再将各点的信息各信令，送入同一种处理模块，完成混合、处理、切换等过程，最后将各点所需的各种信息重新组合起来，送往各对应会议电视终端。MCU 的个数及连接方式又决定了会议电视网的结构和大小。

2）会议电视的信号传输。会议电视组网是根据业务需要临时组成的。所有的数字网（光缆、卫星、数字微波等）均可成为会议电视网的网络支撑（现通常采用 DDN 网，最终为 ISDN 网），不开放会议电视时，网络电路可作为电话或其他非话业务的传输信道。

3）多点控制单元的控制方式。在多点会议中，对会议进程进行控制有以下几种控制方式：

a. 语音控制。根据多点会议中各分会场音量的大小决定谁是广播者（发言会场音量最大），基本用于会议点数较少的场合。

b. 导演控制。控制者利用 MCU 所连接的 PC 机对会议进行控制，在多台 MCU 级连的会议中需由各 MCU 的操作者同步控制。

c. 主席控制。根据国际标准 ITU - TH.243 建议实现的多点会议控制方式，为目前电视会议中最常用、最有效的会议控制方式。

a）主席可在任一分会场如开及主持多台 MCU 级连会议。

b）同一会议中主席只能有一位。

c）主席可指定网上任一分会场发言，切换其图像作为全网的发言者。

d. 演讲人控制。演讲人控制方式是在常规主席控制方式基础上开发的增强型功能，多用于远程教学方面的控制。

演讲人可切换浏览任一分会场画面。

演讲人可预置并自动浏览任一分会场画面。

演讲人控制方式适用于有重要主会场的会议远程教学等方面中应用。

4）会议电视图像显示方式。

a. 一个画面方式（单个显示器）。主要作特写显示，如显示会议主持人或会议发言者。通常摄像机经过遥控变焦调整后，一个 29in 画面方式最佳显示是 3 ~ 5 名开会人员，人多时，图像显示太小。

b. 一个画面切换方式（单个显示器）。人像特写镜头、会议全景、文件、图表、电子白板可轮换显示。

c. 画面并列显示方式（两个显示器）。把对方会议参加者与文件、图纸或电子白板等，便于与会者观察。

（3）公用和专用会议电视系统的组网结构。智能建筑或公共建筑中会议电视系统组网在 ISDN 网未实现前通常是挂在本地公用数字数据网（DDN）上实现的，各会议电视系统之间的组网一般采用星形树状网络结构，如图 18 - 42 所示。

结构图中骨干网是连接全国大区或中央的骨干网，本地网是连接当地的建筑或公共建筑以及电话分局中的会议电视终端。

(4) 桌面会议电视系统的构成。桌面会议电视系统（Desktop Videoconfe－rencing）亦称台式视频会议系统，是人们利用个人电脑终端（PC 机）来进行人与人之间的多媒体通信。系统可采用 PENTIUM 或 PENTIUM PRO 以上机种，按照国际标准（H.320），使智能建筑中用户与楼内外用户之间进行近距离和远距离的点对点及多点的会议通信，并实现文件、图像、图片和其他数据资源的共享。

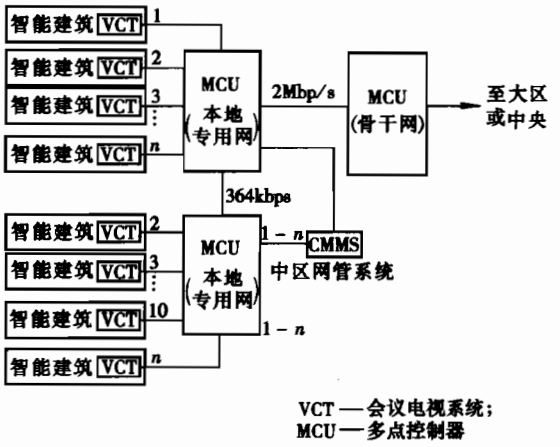


图 18－42　公用或专用会议电视星形树状组网结构

1）桌面会议电视系统构成。桌面会议电视系统中一个单方会谈者的桌上会议电视设备除有一台标准个人电脑（PENTIUM 或 PENTIUM PRO 以上几种）及个人电脑的硬盘等辅助器件外，还应配有 1/3inCCD 彩色摄像机（如 PC 机上交谈者摄像机、文件图表辅助摄像机）、视音频混合器、视盘系统、电话、手机、扬声器音箱（或头带式耳机）、话筒以及复接分接功能卡、视频和音频编解码功能卡、（高速数据）调制解调器功能卡、电视会议应用软件和系统在网络上应用时的网络接口。桌面会议电话系统配置方框图如图 18－43 所示。

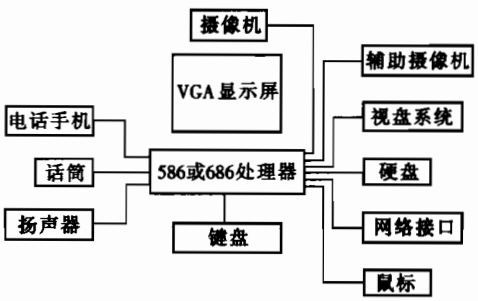


图 18－43　桌面会议电视系统配置方框图

2）桌面会议电视系统的功能。

a. 具有动态的彩色视频图像、声音、文字、数据资料实时的双向同步传输及交互式的面对面会谈。

b. 多媒体电话号码簿，储存对方通话者明细资料、彩色照片、语音信息，作为快速拨号的依据。

c. 双向交谈式电子白板共享，交谈者可在线同步讨论文字、图形资料、备注符号。

d. 点与点或多点之间的视讯会谈。

e. 实时的在线档案传输，即在通话过程中同时传送任何型式的档案。

f. 能传送传真文件和传送视频图像及声音的电子邮件。

g. 双向对话者的视频窗口，可以缩放，以满足不同类型的使用者的需求，如方便聋哑人沟通信息。

h. 可远程遥控对方摄像机的画面位置，还可以采用视频图像分割技术，同时接收交谈对方的摄像机、文件图表摄像机、录像机、影碟机的视频信号。

3）桌面会议电视系统基本运行环境需求根据现有技术和线路情况环境的选用。

a. Windows3.1（中、英文版）以上或 Windows 95 的操作软件。

b. 一条标准普通电话线（POTS）。当使用标准电话线连接的系统时，提供的视频速率，通常为 1～5 帧图像。

c. 一条高速数据线路。根据现有的图像通信技术，当使用线路在 128Kb/ps 通信速率时，在 FCIF（公共中间格式）视频技术下，提供视频速率为 15 帧/s 图像；当使用线路在 384Kb/

ps 通信速率时，在 FCIF 视频技术下，提供视频速率为 22 帧/s 图像，当使用线路在 128Kb/ps 或 384Kb/ps 通信速率时，在 QCIF（1/4 公共中间格式）视频技术下，提供视频速率为 30 帧/s 图像。

18.5 有线电视的设计要求

18.5.1 有线电视系统构成及应用

18.5.1.1 有线电视系统的基本构成：有线电视系统是由初期的共用天线系统由于信号源的增加和覆盖范围的扩大而发展完善来的。

有线电视系统一般由前端部分、传输部分和分配部分三大部分组成。

前端部分包括信号源部分、信号处理部分和信号放大合成输出三部分组成。信号源包括开路接收天线、天线放大器和变频器、卫星接收天线及接收设备、自办节目用的录像机、影碟机以及导频信号源等。信号处理部分的设备包括频道变换器、频道处理器和调制器等。

传输部分由同轴电缆、光缆、光接收机、干线放大器和其他相应的器件及设备等组成。

分配部分由支干线和分配电缆、延长放大器、分配放大器、分支器分配器、用户终端等组成，见图 18－44。

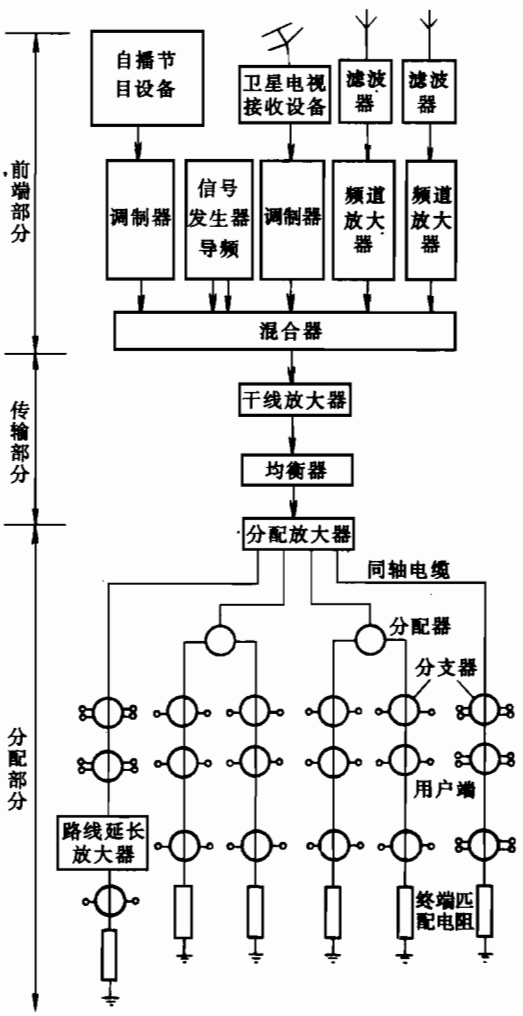


图 18－44 典型 CATV 系统的组成

有线电视系统根据结构的不同还可分为以下四种模式：

（1）无干线系统；

（2）独立前端系统，见图 18－44；

（3）有中心前端系统；

（4）有远地前端系统。

18.5.1.2 有线电视系统的综合应用：随着科学技术的发展，有线电视也由单一的电视信号下行功能，正在向更先进的宽带化、数字化，集话音、数据、图像为一体的双向宽带综合信息网的方向发展。宽带综合信息网除了具有电视信号下行的功能外，还可以实现双向通信、可视电话、图文传输、电视购物、电视会议、股票交易、防盗报警、家庭办公、VOD 视频点播、远程教学、远程医疗、高速 INTERNET 接入、高速数据通信、生活资讯服务、物业信息发布及广告、网上图书馆、游戏库等服务功能。

现在的有线电视系统正朝着大型化、双向多功能的宽带综合信息网的方向发展，成为社会信息的重要传播媒介和手段，见图 18－45。

18.5.2 有线电视系统的设计方法

18.5.2.1 分贝与电平：在有线电视系统中各点的电压和功率相差很大，能差到 100 万倍，

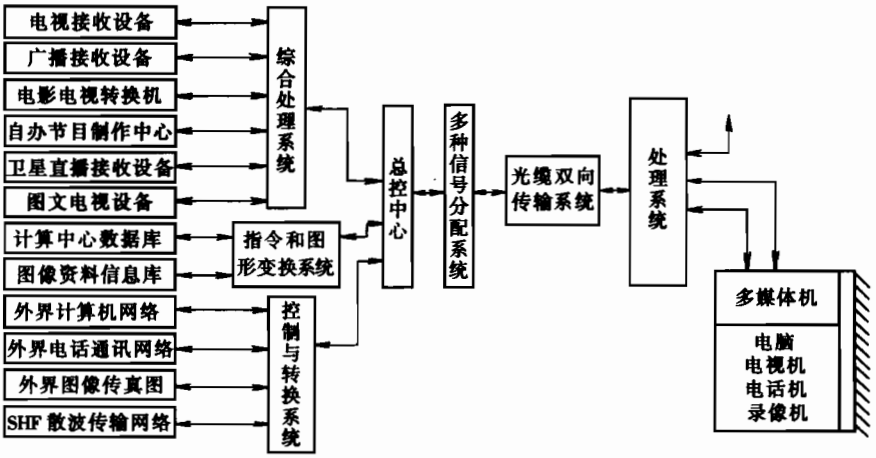


图 18－45　宽带综合信息网

这样大的差别，要用乘除法来计算其中某一级的增益、衰减等很不方便。为了简化这种运算，人们采用分贝比来表示系统中两个功率或电压大小的区别，不仅简化了数字的表示方法，而且原来需要用乘除法的地方改为用加减法来计算，用起来非常方便。

两个功率（例如：输入与输入）P_1 和 P_2 的分贝比定义为：

$101\lg(P_1/P_2)$ 其单位用分贝（dB）来表示，可用电压来表示分贝比

$$101\lg(P_1/P_2) = 101\lg(U_1^2 Z_2/Z_1 U_2^2) = 201\lg(U_1/U_2) \qquad (18-3)$$

当需要表示系统中的一个功率或电压时，无法用分贝比，则可利用电平来表示：系统中某一点的电平是指该点的功率或电压对某一基准功率或电压的分贝比，即

$$101\lg(P/P_0) = 201\lg(U/U_0) \qquad (18-4)$$

式中　U——实际测量电压；

U_0——基准电压；

P——实测功率；

P_0——基准功率。

在有线电视系统中常以 1μV 为基准电压，则电压为 U 时对应的电平为 $201\lg(U/1\mu V)$，单位记为（dBμV）。例如电压为 1mV 时，电平为 60dBμV。

以后要经常用到这一电平单位。

18.5.2.2　设计依据

（1）GB6510—1996《30MHz～1GHz 声音和电视信号的电缆分配系统》；

（2）GY/T106—1999《有线电视广播技术规范》；

（3）GB50200—1994《有线电视系统工程技术规范》；

（4）国家有关的标准和技术规范；

（5）所设计的有线电视系统的技术要求。

18.5.2.3　设计前要了解的情况。

（1）系统规模用户分布及覆盖区域的各建筑物平面。

（2）信号源和自办节目的数量、类别和其他有关参数。

（3）接收天线设置点的实测电视信号场强，设置点周围的地形地貌。

（4）系统发展规划（结合城市广播电视发展规划）及被遮挡区输出干线预留的要求。

18.5.2.4 有线电视系统的基本技术参数

（1）有线电视下行传输系统。

1）系统输出口电平：邻频为 64 ± 4dBμV（85 ~ 860MHz）；非邻邻频为 70 ± 5dBμv（85 ~ 860MHz）。

2）任意频道间电平差：≤5dB，FM 信号比电视信号低 8dB，数字信号比模拟电视信号低 10dB；

3）相邻频道间电平差：≤2dB；

4）伴音对图像：－10 ~ －20dB；

5）带内幅频特性：≤2dB；

6）载噪比：$C/N \geqslant 44$dB；

7）交扰调制比：$CM \geqslant 47$dB；

8）载波互调比：$IM \geqslant 58$dB；

9）复合三次差拍：$C/TB \leqslant 55$dB；

10）复合二次差拍：$C/CSO \leqslant 55$dB；

11）邻频道抑制：≥60dB；

12）带外抑制：≥60dB；

13）交流哼声：≥48dB；

14）输出口相互隔离：≥22dB；

15）特性阻抗：75Ω；

16）图像质量主观评价：不低于四级。

（2）有线电视上行传输系统。

1）频率范围：5 ~ 65MHz；

2）载噪比：≥50dB；

3）载波互调比：≥61dB；

4）交扰调制比：≥66dB；

5）载波交流声比：≥60dB；

6）带内幅频特性：≤0.5dB/MHz。

18.5.2.5 有线电视频段的划分。

现在的有线电视系统都应是 860MHz 双向邻频传输系统。

（1）上行频段。5 ~ 65MHz 用于传输管理及上行数字信号。

（2）下行频段。85 ~ 860MHz 用于传输模拟与数字电视信号。

其中，87 ~ 108MHz 为调频广播节目频段；85 ~ 450MHz 为各地有线电视台频段；550 ~ 750MHz 为数字电视频段；450 ~ 550、750 ~ 860MHz 为卫星与自播节目频段。

18.5.2.6 前端的设计要求

（1）前端节目源的构成。

1）卫星节目。按规定，经批准，可以接收鑫诺一号卫星提供的 30 套卫星节目。

2）有线电视台节目。接收当地有线电视台提供的所有电视节目。

3）开路电视节目。用 VHF、UHF 天线接收当地电视台发射的开路电视节目（注：在没有有线电视台节目的情况下使用）。

4）自办闭路节目。用录像机和影碟机与调制器等设备配合，自己播出闭路电视节目。

5）VOD 点播节目。在三星级以上的宾馆、具有双向功能的有线电视系统中可以采用 VOD 双向点播系统点播电视节目。

（2）开路接收天线的要求：

1）一般每接收一个电视频道信号，应采用一副相应频道的接收天线。

2）两副天线的水平或垂直间距不应小于较长波长天线的工作波长的 1/2，且不应小于 1m。

3）最低层天线与支撑物顶面的间距不应小于其工作波长。

4）天线至前端的馈线采用屏蔽性能好的同轴电缆，其长度不得大于 20m。

（3）前端设备的要求：

1）具有自办节目功能的前端，采用的视频设备的信噪比不应小于 45dB。

2）采用邻频传输的前段设备，应符合下列要求：

a）应具有 60dB 以上的邻频信号抑制特性。

b）频率偏移在甚高频段不应大于 20kHz。

c）图像伴音功率比的调整范围应为 10 ~ 20dB。

3）频道放大器的输出电平要留有 3dB 的余量。

18.5.2.7 传输分配网络的设计方法

（1）传输方式的选择：当传输干线的衰耗（以最高工作频率下的衰耗值为准）小于 100dB 时，可采用甚高频（VHF）、超高频（UHF）直接传输方式。传输干线的衰耗大于 100dB 时应采用甚高频（VHF）传输或邻频传输方式。

（2）传输分配网络的选择与要求：

1）500 个电视终端以上的传输分配网络宜采用光缆—同轴电缆混合的传输分配网络。

2）500 个电视终端以下的传输分配网络宜采用同轴电缆传输分配网络。

3）当干线衰耗不大于 88dB 时，可采用斜率均衡和手动增益调整的放大器。当干线衰耗大于 88dB 小于 220dB 时，必须采用自动增益调整（AGC）的干线放大器。

4）当传输干线中需要提供分配点时，宜采用桥接放大器或定向耦合器。

5）按广电部的要求，分配部分的形式应采用分配—分支或分支—分支方式。

6）分配器的空余端和最后一个分支器的主输出口上，必须终接 75Ω 负载。

（3）光缆和电缆的选择：

1）有线电视传输网络的光缆应选择光波长为 1310nm 或 1550nm 的单模光缆，1550nm 的单模光缆是发展方向。

2）在末端用户放大器之前的主干电缆宜选用75 - 12型或 75 - 9 型的铝管铜芯同轴电缆。

3）在末端用户放大器之后的支干电缆宜选用 75 - 9 型或 75 - 7 型的四重屏蔽同轴电缆。

4）终端用户电缆宜选用 75 - 5 型的四重屏蔽同轴电缆。

（4）无源器件的选择：

1）在末端用户放大器之前的无源器件应采用宽频带型（5 ~ 1000MHz）过电流型器件。

2）在末端用户放大器之后的无源器件应采用宽频带型（5 ~ 1000MHz）器件。

（5）终端电平的计算：

终端电平 = 末级用户放大器输出 - 分配器损耗 - 分支器损耗（插入或分支损耗）
- 终端损耗 - 同轴电缆损耗

(6) 传输网络的电源供给方式。干线部分可采用集中供电方式，电源为交流 60V，用电源插入器插入方式集中供电。分配部分可采用 220V 就近取电的方式。

(7) 传输网络阻抗。有线电视传输网络所有有源无源器件与同轴电缆的匹配阻抗均为 75Ω。

18.5.2.8 有线电视加密和解密技术。

(1) 概述。加密电视就是在电视信号的播出端改变电视信号的某一部分，使图像变成无法收看，在接收端用一种专门装置即解密器（解码器），使电视信号恢复正常收看。为了适应有线电视发展的需要，现在的收费电视就是采用这种技术实现的。用户要收看电视就必须增添有线电视台特制的解密器才能收看到经过加密处理的电视节目。

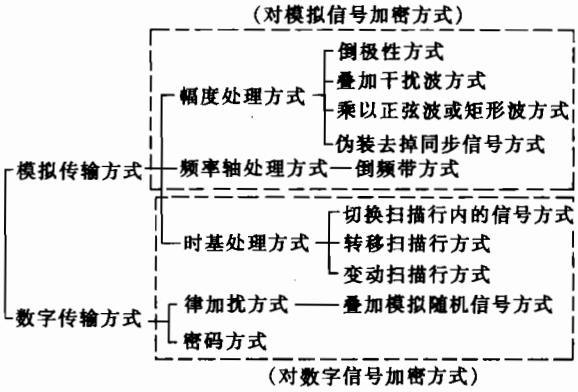


图 18－46 加密方式的分类

(2) 有线电视的加密原理。一个完整的电视信号是由图像信号行场消隐脉冲和行场同步脉冲等几部分组成的。我国的电视标准是：每帧分奇偶两场共传 625 行信号，场频 50Hz，行频 1562Hz，色同步信号放在行消隐脉冲后肩上传送，彩色副载波为 4.43MHz。如果这些脉冲中任何一种丢失、失真或位移都会使图像翻滚、分裂或彩色失真，给收看电视图像带来困难，甚至完全不能收看。

基于这一原理，在发送端对电视信号进行编码，改变组成电视信号的关键成分，如去掉同步脉冲，搞乱图像信号的顺序等，在接收端设计一个解密电路，使电视信号恢复正常。所以用户有了解码器，便可以收看加密电视了。

(3) 有线电视的加密和解密方法。对有线电视信号加密的方式，大体上分为两大类：一是模拟传输方式，二是数字传输方式。它们又分若干种方式，如图 18－46 所示。

解密方法是加密方法的复原，见表 18－18。

表 18－18 加密方法、解密方法及其比较

序号	加密方式名称	加密方式	解密方式	图像质量	保密性	成本
1	倒极性	将图像信号的极性和相位颠倒，调制后发送出去	将极性和相位再颠倒过来	不明显劣化	不好	低
2	叠加干扰波	在距图像载波 2～25MHz 处，叠加干扰波，对图像和声音进行干扰	收端将干扰波滤除，但不彻底	明显劣化	不好	低
3	乘以正弦波或矩形波	原图像信号乘以正弦（矩形）波播出	加相反正弦（矩形）波	明显劣化	不好	低
4	伪装去掉同步信号	原图像信号的同步信号去掉或变形	复同步信号	不明显劣化	不好	低
5	倒频带方式	颠倒已调波的频带播出	复原已倒频带	不明显劣化	一般	

续表

序号	加密方式名称	加密方式	解密方式	图像质量	保密性	成本
6	切换扫描行内信号（行旋转）	选择每个扫描行的伪随机切断点，把扫描行切断以后，改变前后段顺序播出	复原扫描行顺序	不明显劣化	好	较高
7	转移扫描行（行置换）	改变一场中扫描行的顺序，转移的顺序以伪随机方式来指定	复原	不明显劣化	好	较高
8	变动扫描行（行变换）	挪动时分复用数字信号或图像信号相对同步信号的位置，并加以搅乱、播出	以伪随机方式复原	不明显劣化	好	较高
9	叠加模拟随机信号	在数字化信号的码序列上加上伪随机信号的码序列以后播出	复原	不劣化	好	高
10	密码	把数字化信号的码序列分割成适当的长度按照数据加密标准（DES），格式控制符自适应逻辑（FEAL）等密码算法密码化后播出	解码复原	不劣化	好	高

18.5.3 有线电视系统管线的设计方法

18.5.3.1 前端机房的设计

（1）在播出节目少于10套时，前端机房使用面积宜为20m^2，播出节目每增加5套，机房面积宜增加10m^2。

（2）前端机房控制台的布置。控制台正面与墙的净距不应小于1.2m，侧面与墙或其他设备的净距，在主要通道不应小于1.5m，在次要通常道不应小于0.8m。

（3）前端机房内的电缆敷设方式。前端机房内的电缆敷设宜用活动地板或地槽方式。对改建工程或不宜设置地槽的机房，也可采用电缆槽或电缆架，并置于机架上方。采用电缆架敷设时，应按分出线顺序排列线位，并绘出电缆排列端面图。

18.5.3.2 室内外管线设计

（1）电视电缆（光缆）线路路由的设计原则。电缆（光缆）线路路由设计，应使线路短直、安全、稳定、可靠、便于维修和检测，并应使线路避开易受损的场所，减少与其他管线等障碍物的交叉跨越。

（2）室外线路的敷设方式。

1）当用户的位置和数量比较稳定，要求电缆线路安全隐蔽时，可采用管道电缆敷设方式。如果有可利用的管道时更好，但不得与电力电缆和广播通信电缆共管敷设。

2）在条件允许时也可采用直埋电缆敷设方式。

3）在下列情况可以采用架空电缆敷设方式：

a. 不宜采用管道或直埋电缆敷设方式；

b. 用户的位置和数量变动较大，并需要扩充和调整；

c. 有可供利用的架空通信、电力杆路；

d. 有建筑物可利用时，前端输出干线、支线和入户线的沿线，宜采用墙壁电缆敷设方式；

e. 架空敷设电缆时，与1kV及以下电力线的最小距离应为1.5m以上，与广播线的最小

距离应为1m以上，与电话线等通信线路的最小距离应为0.6m以上；

h. 架空敷设应符合GBJ42—1981《工业企业通信设计规范》中的有关规定。

（3）室内电缆的敷设方式。

1）在新建或有内装修要求的已建建筑物内，可采用暗管敷设方式；对无内装修要求的已建建筑物，可采用线卡明敷方式。

2）建筑物内由放大箱—分配箱—终端盒组成的暗管系统，应采取短捷的路径，以减少线路损耗。分配箱到每户的终端盒应采用单独的暗管设置，不得与其他住户终端盒相串接，一户内多终端口的设置可采用户内分配方式。

3）不得将电缆与电力线同槽同出线盒同连接箱安装。

4）明敷的电缆与明敷的电力线的间距不应小于0.3m。

18.5.4 有线电视系统的防雷：

有线电视系统的防雷设计应有防止直击雷、感应雷和雷电侵入波措施。

有线电视系统的接收天线的竖杆（架）上应装设避雷针。避雷针的高度应能满足对天线设施的保护。当安装独立的避雷针时，避雷针与天线之间的最小水平间距应大于3m，独立避雷针和接收天线的竖杆均应有可靠的接地。

当建筑物已有防雷接地系统时，避雷针和天线竖杆的接地应与建筑物的防雷接地系统共地连接；当建筑物无专门的防雷接地可利用时，应设置专门的接地装置，其接地电阻不应大于4Ω。

沿天线竖杆（架）引下的同轴电缆应采用双层屏蔽的电缆或采用单层屏蔽电缆穿金属管敷设。双屏蔽电缆的外层或金属管应与竖杆有良好的电气连接。设置在天线附近的天线放大器，当采用单独的电源线馈电时，电源线应单独穿金属管敷设，并严禁架空明敷。

进入前端的天线馈线应加装避雷保护器。

市区架空电缆吊线的两端和架空电缆线路中的金属管道均应接地。郊区旷野的架空电缆在引上、终端、转角、安装放大器的电杆，直线线路每隔5～10根电杆处，均应将电缆外层屏蔽接地。

架空电缆在入户处，应设避雷器，并应将电缆外导体接地。

18.6 扩声和音响的设计要求

18.6.1 扩声系统

18.6.1.1 扩声系统及其系统设备：

（1）扩声系统及音响系统的基本功能。因自然声源（如演讲、乐器演奏和演唱等）发出的声音能量是有限的，其声压级随着传播距离的增大而迅速衰减；由于环境噪声的影响，使声源的传播距离减至更短，因此采用电声技术进行扩声，将声源的信号放大，有效地提高声场范围内的声压级，这就是扩声系统所具有的基本功能。由此延伸就出现了在建筑物（群）内，能自成体系、具有更大传播范围的广播系统，它就是综合应用电子学技术，电声技术和建筑声学技术，达到进一步改善和美化音质、提高收听效果的各种类型的音响系统。

（2）扩声系统设备组成。扩声系统通常由节目源（各类话筒、卡座、CD、LD或DVD等）、调音台（电信号的放大、调整、混合、分配音色调等）、信号处理设备（周边器材）、功放和扬声器系统等设备组成。

18.6.1.2 扩声系统的分类：各类建筑物中的扩声系统按使用功能可分为以下几类：

（1）室外扩声系统。室外扩声系统主要用于体育场、广场、公园、艺术广场等，它的特点是服务区域面积大，空间宽旷，声音传播以直达声为主。

（2）室内扩声系统。室内扩声系统是应用最广泛的系统，包括各类剧场、礼堂、体育馆、歌舞、卡拉 OK 厅等，它的专业性较强、不仅要考虑电声技术问题，还要涉及建筑声学问题，不仅要作语言扩声，还要能供各种文艺演出使用。对音质的要求很高，房间建筑声学条件对系统整体效果影响较大。

（3）流动演出系统。扩声系统有固定安装和流动系统两大类，流动系统是在固定系统的声学特性条件不能满足文艺演出使用时，临时设置的一种大型场地（如体育场、体育馆、艺术广场和宴会厅等）作演讲、文艺演出等使用。

（4）公共音响系统。公共音响系统是为宾馆、商厦和各类大楼提供背景音乐和广播节目，在不少建筑物中，公共音响系统又兼作紧急广播，公共音响系统的控制功能较多，如分区广播和全区呼叫功能，强切功能、广播优选功能等，由于扬声器负载多而分散，传输线路距离较长，因此一般都用定电压输出（70V 或 100V），对声压级的要求不高，音质要求以中音或中高音为主。

（5）会议系统。会议系统包括会议讨论系统、电子表决系统和同声传译系统，一般用于专业会议中心、宾馆的会议室及大学的教室等场所。

18.6.1.3 扩声系统主要技术指标：扩声系统的技术指标等级，应根据建筑物用途的类别、质量标准和服务对象等因素综合确定，主要有以下技术指标：

（1）最大声压级。指扩声系统在听众席产生的最高稳态声压级。

（2）最高可用增益。指扩声系统在厅堂内即将产生声反馈的临界状态时系统增益减去 6dB 的增益。

（3）声反馈。指由扩声系统中扬声器输出能量的一部分反馈到传声器（话筒）而引起的啸叫或声音衰变。

（4）传输频率特性。厅堂内各测点处稳态声压级的平均值，相对于扩声系统传声器处声压级或扩声设备输入端电压的幅频响应。

（5）传声增益。扩声系统达到可用增益时，声场内各测量点处稳态声压级的平均值与扩声系统传声器处声压级的差值。

（6）声场不均度。扩声时，厅内各测量点处得到的稳态声压级的极大值和极小值的差值，以 dB 表示。

（7）背景噪声。扩声系统不工作时，厅堂内各测量点处本底噪声声压级的平均值。

（8）总噪声。扩声系统达到最高有用增益，在没有声信号输入时，厅堂内各测量点处噪声声压级的平均值。

（9）系统失真。扩声系统由输入信号到输出信号全过程中产生的非线性畸变。

（10）混响时间。声源达到稳态，等停止发声后，室内声压级衰减 60dB 所需的时间。

18.6.2 扩声系统设计

18.6.2.1 扩声系统的设备互联：扩声系统的各设备之间为使信号能达到最佳的传输条件，获得最大的信号噪声比，必须进行阻抗和电平匹配。例如：输入设备与调音台互联的额定阻抗、输出阻抗、额定输出电压、额定负载电压、最大输出电压需达到互联的电气配接优选值；调音台与输出设备互联的输出阻抗、额定输出电压、最大输出电压、额定负载电阻、输出阻抗、额定负载阻抗需达到互联的电器配接优选值。

18.6.2.2 扩声系统的设备配置及选择：扩声系统的设备配置必须依据场地的面积、高度，室内建筑空间形态，使用环境及设计要求要达到的声学特性指标等因素综合考虑。首先应考虑选择何种扬声器箱，然后根据扬声器箱的各项技术参数进行声场的初步计算并确定扬声器箱的品种和数量；其次根据扬声器箱的功率要求配以相应容量的功放；最后再选用相应档次的调音台、周边器材（均衡器、压缩/限幅器、效果器、反馈抑制器、电子分频等）和节目声源（各类有线/无线话筒、CD 机、LD 机和卡座等）。

18.6.2.3 传声器的选择与分置：

（1）传声器选择。

1）选用有利于抑制声反馈的传声器。

2）应根据扩声类别的实际情况合理选择传声器的类别，满足语言或音乐扩声的要求。

3）传声器的电缆线路超过 10m 时，应选用平衡、低阻抗型传声器。

（2）传声器的合理布置。合理地布置传声器，可以有效地抑制声反馈，提高听众区的声压级，并且可以改进扩声的音质。传声器的布置应符合以下要求：

1）传声器的位置与扬声器（或扬声器系统）的间距应尽量大于临界距离，并且位于扬声器的辐射范围角以外。

2）当室内声场不均匀时，传声器应尽量避免设在声级高的部位。

3）传声器远离晶闸管（可控硅）干扰源及其辐射范围。

18.6.2.4 功率放大器的配置要求：

（1）扩声系统的功率馈送要求。

1）厅堂建筑采用定阻（低阻）输出。

2）体育场、广场类建筑，当传输距离较远，采用定压（高阻）输出。

3）功率传输采用聚氯乙烯绝缘多股导线，功放设备输出端至最远端扬声器（或扬声器系统）的导线衰减一般应不大于 0.5dB。

（2）扩声系统的功放单元合理配置。扩声系统的功放单元，应根据各工程的具体情况合理地进行配置，一般应符合以下要求：

1）对前级分频控制的扩声系统，其分频功率输出端分别单独配线。

2）同一供声范围的不同分路扬声器（或扬声器系统）不应接至同一功率单元，避免功放故障时造成同一供声范围内的失真。

（3）功率放大器选择。

1）功放设备的单元划分应满足负载分组的要求。

2）功放设备平均声压级的电功率的储备量应满足要求：语言扩声时一般为 2.5 倍以上；音乐扩声时一般为 10 倍以上。

3）扩声用功放设备应设备用单元，其数量应按使用重要程度确定。

18.6.2.5 扬声器的选择与布置：

（1）民用建筑扬声器的选择。选用扬声器除满足灵敏度、频响、指向性等特性及播放效果的要求外，尚宜符合下列规定：

1）办公室、生活间、客房等，可采用 1～2W 的扬声器箱。

2）走廊、门厅及公共活动场所的背景音乐、业务广播等扬声器宜采用 3～5W 的扬声器箱。

3）在建筑装饰和室内净高允许的情况下，对大空间的场所宜采用声柱（或组合音箱）。

4）在噪声高、潮湿的场所设置扬声器时，应采用号筒扬声器，其声压级应比环境噪声大 10～15dB。

5）室外扬声器应采用防潮保护型。

（2）扬声器的布置。整个扬声器系统的布置如何，与整个系统的扩声质量密切相关，扬声器布置应考虑以下几方面：

1）使整个建筑空间环境的声场均匀；

2）声像方向一致，声音亲切自然；

3）有利于克服反馈，提高传声增益；

4）线路简单，便于维护及调整覆盖面；

5）扬声器发出的声音，要比自然声源延迟 5～30ms；

6）按扬声器覆盖角（4000～8000Hz 为轴线下降 6dB）覆盖全部观众席。

（3）扬声器布置的方式。扬声器布置应根据建筑功能、体型、空间高度及观众席设置等因素确定，一般分为分散布置、集中布置及混合布置。

18.6.2.6 扩声系统的线路敷设与选择：

（1）扩声系统的配线要求。

1）宾馆客房内的服务性音响宜采用多芯线有色标双绞型的电缆，穿钢管或线槽敷设。

2）其他广播线路应采用有色标铜芯塑料绞合线，穿管或线槽敷设。

（2）室外广播线路的敷设要求。室外广播线路敷设应按总平面图规划要求确定，当采用埋地敷设时，应符合以下要求：

1）埋地敷设路由不应通过预留用地或规划未定的场所。

2）埋地敷设路由应避开易使电缆损伤的场所，尽量减少与其他管路的交叉跨越。

3）直接埋地和敷设电缆应敷设在绿化地带下，当穿越道路时应穿钢管保护。

（3）在可控硅调光设备的场所广播线路防干扰的措施。采用可控硅调光设备的场所，广播线路的敷设应采用以下防干扰措施：

1）传声器线路宜采用有色标四芯金属屏蔽绞线，对角并接穿钢管敷设；

2）调音台（或前级控制台）的进出线路均应采用屏蔽线。

（4）功率放大器输送至扬声器的电缆选择。

1）扬声器的额定功率和沿线的功率分配；

2）电缆长度；

3）功率放大器输出电压；

4）最大允许电压降；

5）导线允许电流密度；

6）电缆机械强度，选用导线的截面积按下式计算

$$A = \frac{0.035\ (100 - n)\ LP}{nU^2}$$

式中 A——导线截面积，mm^2；

L——从功率放大器到扬声器的电缆长度，m；

P——输入到扬声器的电功率，W；

U——扩音机的输出电压，V；

n——电缆上的电压降，用功率放大器输出电压的百分率表示。

例：一电缆长200m，输入到扬声器的电功率为100W，输出电压为100V，沿线的电压降为10%（即1dB），则导线的截面积为

$$A = \frac{0.035 \times (100 - 10) \times 200 \times 100}{10 \times 100^2} = 0.63\ (\text{mm}^2)$$

考虑到其机械强度，应选用$2 \times 0.75\text{mm}^2$电缆。同时，应再校核一下其电流密度，通常最大允许电流密度为（5～10）A/mm^2。

为保证电缆机械强度，需要使它有一定的最小截面积，对于穿在管子中的导线，截面至少应为0.75mm^2，明线至少应为1.5mm^2。实验表明，在大多数情况下可选用$2 \times 0.75\text{mm}^2$、$2 \times 1.5\text{mm}^2$或$2 \times 2.5\text{mm}^2$的电缆。

18.6.3 扩声系统的控制室，供电和接地系统设计

18.6.3.1 扩声系统控制室：

（1）扩声系统控制机房位置的选定。扩声系统控制室的位置应能通过观察窗直接观察到舞台活动区（或主席台）以及大部分观众席，一般应设在以下位置：

1）剧院建筑，应设在观众厅后部（设在侧部时，面向舞台的上台侧）。

2）体育场、馆类建筑应设在主席台侧，若采用电视监控系统作为辅助手段可不受此限制。

扩声系统控制室不应与电气（包括灯光控制室）设备机房，特别是设有可控硅设备的机房毗邻或上、下重叠设置。

（2）扩声控制室的土建要求。扩声控制室的土建及设施要求应符合表18－19的规定。

18.6.3.2 扩声系统的供电：

（1）扩声系统的供电电源要求。

表18－19　　扩声控制室的土建及设施要求

序号	技术房间名称	室内最低净高（m）	楼板、地面等效均匀静荷载（N/m^2）	地面类别要求	室内表面处理		窗洞面积/地面面积要求	门	外窗	照明	空调设备
					墙面	地面					
1	录播室	≥2.8	2000	塑料地面或木地板	根据声学处理选用材料和布置	根据声学处理选用材料和布置	1/6（要求高时不应开窗）	满足隔声要求	窗洞面积/地面面积=1/6	宜采用照度为5lx以上的白炽灯	独立式应符合噪声限制的要求
2	机房	≥2.8	3000		抹水泥砂表浅灰石浆、面刷色油漆	抹水泥砂表浅灰石浆、面刷色油漆	1/6（不宜开窗）	门窗小于1m^2	良好防尘	照度为150lx以上	三级旅馆和有值班要求的机房，设空调设备

注　1. 楼板、地面等效均匀静荷载，应根据具体工程的实际情况校核；

2. 录播室的建声处理等应符合有关规定；

3. 当配线较多、使用要求较高时，机房可采用抗静电要求的架空活动地板；

4. 机房设备的周围铺胶垫或塑料垫等绝缘材料；

5. 采用独立式空调设备时，应采用分体式空调机。

1）仅有一路交流电源供电的工程，应由照明配电箱专路供电，功放设备容量在250W及以上的应设专用配电箱。

2）有两路电源供电的工程，可采用两路电源末端自切供电。

3）交流电源电压偏移值一般不超过±10%，当电压偏移不能满足设备的限制要求时，在该设备供电电源处增设自动稳压装置。

4）交流电源容量一般为终期扩声设备耗电容量的1.5～2倍。

5）体育场（馆）剧院、厅堂等重要公共场所的扩声系统，应从变配电所内的低压配电屏（柜）供给两路独立电源至扩声控制室配电箱（柜）内自切供电。

（2）扩声系统的供电电源抗干扰措施。扩声系统的供电电源的外部干扰，尤其是舞台的可控硅调光设备常引起正弦波畸变，使电能质量下降，严重干扰扩声系统的音质效果，应采取以下抗干扰措施：

1）舞台调光照明供电与扩声系统的供电分别设置电源变压器。

2）当不能采取两台变压器分别供电时，电声系统可采用1:1隔离变压器及交流电子稳压电源供电。

3）对可控调光系统采用带抗干扰滤波线路供电。

4）电声系统应设备用电源。

18.6.3.3 扩声系统的工作接地：

（1）单独设置专用接地装置，接地电阻不大于4Ω。广播设备的电路工作接地点、传声器输入屏蔽线接地、功率放大器输出变压器接地端等，均应接至该接地装置，并构成一点接地系统。

（2）广播设备的外露可导电部分，均应接至电气专用保护地线。

（3）当建筑物的接地系统采用共同接地方式时，扩声系统的接地应用专用线与其可靠连接，接地引线应采用多芯绝缘电缆，线芯截面不应小于16mm^2。

18.6.4 音响广播系统

18.6.4.1 音响广播系统的主要型式：

（1）公共区域的公共音响；

（2）宾馆内的客房音响；

（3）厅堂内独立设置的音响；

（4）专用会议室的会议和多功能厅音响；

（5）用于消防紧急广播的事故紧急广播。

18.6.4.2 背景音响的主要区域：

（1）公共通道；

（2）电梯厅；

（3）电梯轿厢；

（4）公众卫生间；

（5）入口大厅；

（6）餐厅、咖啡厅、酒吧、宴会厅等；

（7）保龄球场及康乐中心；

（8）电子游戏中心；

（9）商场；

（10）游泳池休息廊；

（11）屋顶花园等。

18.6.4.3 公共音响系统如何兼有事故广播功能公共音响的设计：因其兼有事故广播功能，故应与消防报警系统的设计相配合。公共音响实行分区控制，分区的划分应与消防分区相一致，根据消防事故报警的要求，某区某层发生火灾时，则该层及上两层、下一层均应同时报警。公共音响也必须与此相适应地进行分组。这样每一消防分区，根据楼层的不同组合，可分成许多消防报警及事故广播控制区。为保证事故时分区自动动作的选择性，采用微处理机控制，能方便地达到目的。事故广播是用预先录制好的录音带播放的，播放语言种类的多少，可根据需要选择。公共音响喇叭的装设，应配合建筑的装饰设计进行。

18.6.4.4 音响系统的设计：

（1）宾馆客房音响的设计。现代化旅游宾馆建筑均设客房音响。客房音响设置的目的，是为了向客人提供高级的音乐享受，建立优美的休息环境。为了适应人们的不同爱好，应用多套节目供客人选择。节目设置的套数可根据宾馆标准等级而定，一般在三套以上，国内标准较高的宾馆通常有六套节目，国际上的豪华宾馆通常设十余套。

客房音响的节目选择，音量控制开关及扬声器均应安装在床头柜上，一般选用 5～6.5in 纸盆式扬声器。

由于宾馆中央控制系统控制的客房音响系统应能切换接放中央紧急广播系统，故在每套客房床头柜的集控板上需设紧急广播自动转接装置（有的系统是采取在每个楼层的广播线路箱里）。当紧急广播时，客房音响无论处在开或关的状态均能自动接入事故广播，向客人报警。

（2）会议室音响系统设计。在会议室，均安装有中央控制系统控制的广播输出控制箱，输出通道数为总系统的输出数，另外还有原地供应的功率放大器，吸顶嵌装的扬声器均由各会议室的控制箱接出，音量由控制板进行控制，在控制板上还有一个功率放大器的输入插座，另有几个嵌入墙的传声器座，可用来连接一个可移动式放大器和传声器。在紧急广播的情况下，所有音响都会被中断，被紧急广播取代。

（3）专业会议厅和多功能厅的音响系统设计。

1）背景音乐中有一路从中央广播室传送，音量可单独调节。

2）在紧急广播的情况下，所播出的背景音乐被紧急广播取代。

3）自身有一套完整的扩音体系：

a. 具有多路话筒输入的前置扩大器；

b. 具有供会议室演出用的有线话筒、无线话筒；

c. 具有供各区与机房联系用的有线对讲机；

d. 具有供召开国际会议用的多国语音即时同声翻译系统；

e. 具有提供会议、演讲用的大屏幕及投影机、实物投影仪、电子白板、各种型号不同制式的录像机；

f. 具有带话筒和扩音器的移动式讲台；

g. 具有专供会议录音用的录音系统；

h. 具有提高灯光音响效果的声光控制系统。

18.6.4.5 火灾应急广播的要求：

（1）火灾应急广播扬声器的设置要求。

1）民用建筑内扬声器应设置在走道和大厅等公共场所。每个扬声器的额定功率不应少于3W，其数量应能保证从一个防火分区内的任何部位到最近一个扬声器的距离不大于25m。走道内最后一个扬声器至走道末端的距离不应大于12.5m。

2）在环境噪声大于60dB的场所设置的扬声器，在其播放范围内远点的播放声压级应高于背景噪声15dB。

3）客房设置专用扬声器时，其功率不宜小于1.0W。

（2）火灾应急广播与公共音响广播兼用时的要求。

1）火灾时应能在消防控制室将火灾疏散层的扬声器和公共音响扩音机强制转入火灾应急广播状态。

2）消防控制室应能监控用于火灾广播时扩音机的工状态，并应具有遥控开启扩音机和采用传声器播音的功能。

3）床头控制柜内设有服务性音乐广播扬声器时，应有火灾应急广播功能。

4）应设置火灾应急广播备用扩音机，其容量不应小于火灾时需同时广播范围内的火灾应急广播扬声器最大容量总和的1.5倍。

18.6.5 同声传译系统设计

经常需要将一种语言同时翻译成两种及两种以上的语言的会议厅、堂，应设同声传译设施。

18.6.5.1 同声传译系统分类：同声传译的信号输送方式一般分为有线、无线两种。

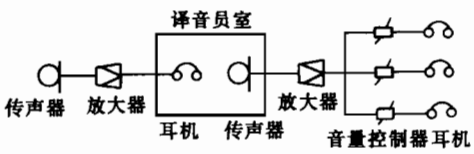


图18－47 简单有线同声传译系统方框图

（1）有线同声传译系统。简单有线同声传译系统的方框图如图18－47所示。发言人前放置传声器，它的输出经放大器放大后送到译音员室的耳机插孔。译音员把发言人的语言译出并用另一个传声器接收，然后由译员室的放大器把它放大到需要的电平，通过分配网络送到大厅内的接收面板输入端。每个听众可以在发言的同时用另一种语言来收听。

多种语言的同声传译系统方框图如图18－48所示。对于每一种语言都有相应的译音员室、放大器和较复杂的分配网络。在听众处常常设有音量调节器选择开关或多对耳机插孔以便选择需要的语言。

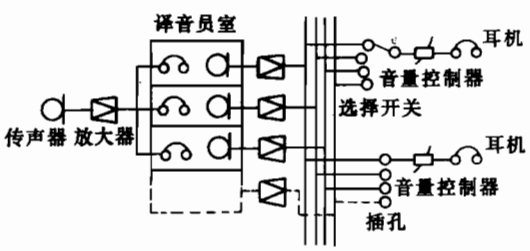


图18－48 多种语言同声传译系统方框图

有线同声传译的特点是操作使用方便，保密性好，但因用线路来传送多种语言信号，故线路复杂，听众不能离开自己的座位。

（2）无线同声传译系统。无线同声传译系统如图18－49所示。它的设备比较复杂，除了低频放大器以外，还有发射机、无线系统、小型无线电接收机等。实际上这是一套无线通信系统，故听众可以在走动时听取发言，甚至在大厅周围的休息室内听报告。这种系统的缺点是保密性差，另外这种设备需较熟练的技术人员维护。

（3）直接感应式同声传译系统。近年来国外成功地应用了基于低频电磁场原理的同声传译系统，如图18－50所示。为了保证有良好的房间内接收，需铺设环形铜线圈，若用大功

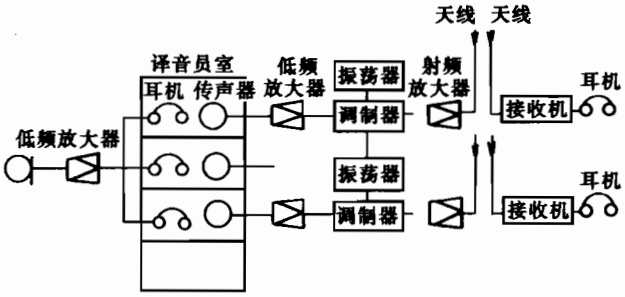


图 18－49　无线同声传译系统

率低频放大器馈电，则环形线圈内外有较均匀的低频电磁场；如电磁场甚强，接收信号可以直接用带有铁磁天线的耳机，也可以使用包括输入铁心线圈晶体管放大器和微型耳机的接收设备。

磁感应装置通常是单通路的，必要时可以在一个大厅内同时使用两路装置，使听众可以选择两种语言中的一种。这时应该使室内两组感应线圈互相垂直，为了选择节目，可以调节接收设备耦合线圈的方向，并在整个接收时间内维持最佳位置。

磁感应系统具有无线同声传译系统的优点，但不需要发射机，装置容易，因此它开始应用于电影院、剧院、博物馆和展览会内，甚至在大型现代化企业中也得到应用。

低频放大器的功率决定于服务区大小和建筑的结构，特别是室内金属结构的情况。

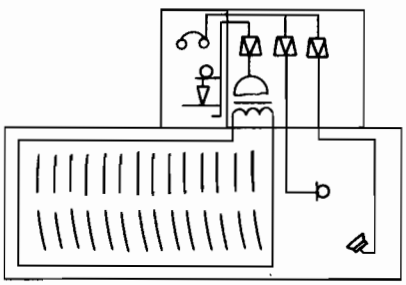


图 18－50　直接感应式同声传译系统

18.6.5.2　直接翻译和二次翻译：语言同声传译装置有直接翻译和二次翻译两种型式。直接翻译需要懂多种语言的译音员，而二次翻译仅需要懂两种语言的译音员。

普通直接翻译系统如图 18－51 所示。译音员室的译音员直接听发言的讲话，并译成指定的语言。对一种语言总可以找到一个熟悉发言人和听众语言的译音员。但是在多种语言情况下，这种要求对译音员就太严格了。例如，当会议的语言有汉语、俄语、法语、英语四种时，要求译音员能听懂四国语言。如果译音员只懂 2～3 种语言，则就要求每个译音室配 2～3 个译音员。因此直接翻译系统虽简单，但在实际中很少采用。

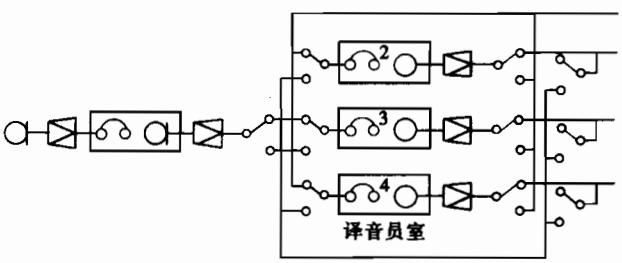


图 18－51　直接翻译的同声传译系统

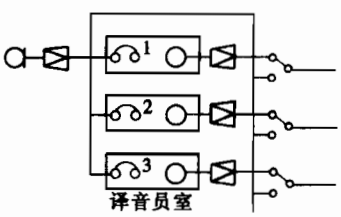


图 18－52　二次翻译的同声传译系统

语言同声翻译系统也可以这样设计：发言人的讲话先翻译成各译音员都熟悉的一种语言，然后由固定的译音员再转译成另一种语言。这就是二次翻译系统。二次翻译系统如图 18－52 所示。这种系统的主要特点，是译音员不根据发言人的语言来翻译，而以某种语言作为译音员的公共语言，因此二次翻译系统对译音员的要求就低一些。二次翻译系统所需译

音员室的数量比会议使用语言少一个。和直接翻译相比，译出时间稍迟，并且翻译质量也较差。

具有 8 种语言以上的多通路语言同声传译系统，使用混合方式较合理，即一部分语言直接翻译，另一部分语言做二次翻译。

近年来运用的一种红外线同声传译系统，可以同时传送 15 种不同语言。系统包括若干红外线辐射器，每个辐射器可以覆盖 30～50m² 面积。接收用红外线光电接收机。15 种不同语言节目用时间分隔制进行传送。

同声传译系统信号输送方式具体选用应满足如下要求：

1）设置固定坐席并有保密要求的场所，宜采用有线式。在听众的坐席上应设有耳机插口、音量调节和分路选择开关的收听盒。

2）不设固定坐席的场所，宜采用无线式。当采用感应式同声传译设备时，在不影响接收效果的前提下，天线宜沿吊顶、装修墙面或无抗静电措施的地毯下敷设。

3）如有特殊需要时，宜采用有线和无线混合方式。

18.6.5.3 同声传译设备及同声传译室：同声传译系统的设备及用户宜根据二次翻译的工作方式设置，同声传译应满足语言清晰的要求。

同声传译需设专用的译音室并符合以下规定：

1）靠近会议大厅（或观众厅），译音员可以从观察窗清楚地了望主席台（或观众席）的主要部分。观察窗应采用中间有空气层的双层玻璃隔声窗。

2）译音室与机房间设联系信号，室外设译音工作指示信号。

3）译音员之间应加隔音板，有条件时设置隔音间，本底噪声不应高于 NR20。

4）译音室应设空调设施，并做好消声处理。

5）译音室应作声学处理。

18.7 呼叫系统及公共显示装置的设计要求

18.7.1 呼叫系统的技术设计原则

18.7.1.1 病房呼叫系统的组成：病房呼叫系统是医院为向住院患者提供及时、周到的医疗服务而设置的一种信号沟通装置。病房呼叫系统由护士站主控台、走廊显示挂屏、病室门口机、病床呼叫（对讲）单元等组成。

18.7.1.2 病房呼叫系统具备以下功能：

（1）随时接受患者呼叫，准确显示呼叫患者房间号及床位号；

（2）患者呼叫时，护士站或医护值班室应有明显的声、光提示，病房门口要有光提示，走廊挂屏显示呼叫者位置；

（3）允许多路同时呼叫，对呼叫者逐一记忆、显示；

（4）特护患者应有优先呼叫权；

（5）医护人员未作临床处置的患者呼叫，其提示信号应持续保留。

18.7.1.3 病房呼叫系统的技术设计原则：病房呼叫系统设计时，可根据医院的规模、标准及医护水平的要求，设置病房呼叫系统。

病房呼叫系统应按护理区及医护责任体系划分成若干个病房呼叫管理单元。各管理单元的信号主控装置应设于护士站或医护值班室。有条件的医院可以将各护理区的病房呼叫管理单元联网，由总值班掌握各护理区医护服务情况。

18.7.1.4 走廊显示挂屏的作用：走廊显示挂屏按优先顺序顺次地显示呼叫患者床号，以免护士在匆忙中忘记患者地址，尤其是在处理完患者呼叫返回途中，接受新的患者呼叫，节省应答时间。但显示挂屏不可设置在手术区。

18.7.1.5 患者呼叫的解除环节：护士站或医护值班室主控台不设解除患者呼叫的机关（除非系统关机停电），呼叫解除键均设于病床呼叫单元处，医护人员只有亲临呼叫现场才能解除呼叫，否则呼叫提示信号将持续保留。

18.7.1.6 系统的对讲功能：经过医疗实践，对病房呼叫系统是否应具备对讲功能，观点不一致。设计上只能按实际情况向业主建议并按业主决定的方案执行。

18.7.2 公共显示装置的设计原则

18.7.2.1 公共显示装置：这里的公共显示装置，仅指在大型公共场所，以信息传播为目的的计时、计分及动静态显示装置。

近年来随着全球信息产业的持续高速增长，信息技术在各领域不断突破，大屏幕显示装置在金融、证券、体育、机场、铁路、公路、商业、广告、邮电、电信、指挥调度等方面得到了广泛的应用，已成为公共信息的重要媒体。

18.7.2.2 公共显示装置的分类：

（1）按显示器件可分为阴极射线管（CRT）、真空荧光显示（VFD）、等离子体显示（PDP）、液晶显示（LCD）、发光二极管（LED）、白炽灯显示、磁翻转显示、电致发光显示（ELD）及场致发光显示（FED）。其中：液晶和磁翻转为被动光显示，其余为主动光显示。

（2）按显示色彩可分为单色、双基色及全彩色（三基色）。

（3）按显示信息可分为图文显示屏、视频显示屏。

（4）按使用环境可分为、室内显示屏、室外显示屏。

（5）按技术要求高低可分为（主要用于 LED 屏）A 级，一般显示屏应达到的基本指标。B 级，指标高于 A 级，目前国内现有技术可以实现的较高指标。C 级，指标高于 A 级和 B 级，其中部分指标是目前国际先进技术和工艺可以实现的最高指标。

当前大屏幕显示的主流产品：

市场对显示器件的要求主要为四个方面：大屏幕、高分辨率、低功耗、低成本。

LED 以其体积小、响应速度快、寿命长、可靠性高、功耗低、易与 IC 相匹配、可在低电平下工作、易实现固化等优点而在显示屏领域受到广泛应用。近年来，各种颜色 LED 的开发成功和高亮度 LED 的不断完善，使 LED 全彩屏、室外全天候显示有了很大的发展。因此，我国的大屏幕显示领域，LED 显示屏几乎是一统天下。

近年来，等离子体显示（PDP）和液晶显示（LCD）的全彩色、高亮度、高对比度的研究和这两种显示器件在大屏幕显示领域的应用发展很快，具有较大的发展潜力，应予以足够的重视。

18.7.2.3 公共显示装置设计时的技术要求

设计应在以下几个方面提出要求：

（1）光学性能方面。

1）视觉分辨率：在一个可视图像中，最小可鉴别或度量的细节。视觉分辨率决定着显示矩阵中任意两个基本信元（即像素）间的距离，是非常重要的基础指标。

2）亮度：在给定方向上，发光或反光表面上的单位垂直投射面积上的发光强度的度量。另一层含义：发光体在人眼视网膜上的等效照度，即所谓的主观亮度。亮度因素很重要的方

面是亮度鉴别率，其特点是：眼睛在较低的主观亮度时，对亮度变化的鉴别能力较低；在较高的主观亮度时，对亮度变化的鉴别能力较强。

3）对比度：信息亮度与背景亮度之比。

人对亮度变化的察觉，对实际应用来说，认为可接受的最小值大约为3%。为了可靠辨别，对比度应取8～10或更高一些。

4）闪烁：当亮度变化的速率低于能消除感觉亮度变化的眼睛累积能力的最低更新速率时，观看者就能察觉到亮度上的变化，这个察觉出的亮度变化，就是闪烁。

这个最低更新速率通常又称为临界闪烁频率，临界闪烁频率不是固定的常数。

5）视角：从显示屏左右（上下）两侧检测显示屏亮度，当两侧的亮度值下降至法线方向的1/2时，称两条观测线之间的夹角 θ（$\theta < 180°$）为显示屏的水平（垂直）方向视角。

6）亮度鉴别等级：图像从最黑到最白之间能够区分的亮度级数，一般分为三级。

7）组字：以像素矩阵组成数字、字母、汉字字符。设计中，数字、字母最小基本组字单元应选择5×5或5×7；汉字最小基本组字单元应选择16×16或24×24。字符高与点直径（像素直径）的比，数字字母宜取7:1～10:1，汉字宜取16:1～23:1。

8）均匀性：显示屏中某些特别亮的（或暗的）像素、矩阵块、模组与其相关联的区域内的像素、矩阵块、模组亮度一致性的一个指标。一般分为三级。

（2）电性能方面：

1）最大换帧频率：画面信息更新的频率。

2）刷新频率：设显示屏最高灰度的驱动周期为 T，则刷新频率为 $1/T$。

3）驱动占空比：在最高灰度级和最大亮度下，任一像素在一个扫描周期内的导通时间与扫描周期之比。当驱动占空比为1时，为静态驱动；当驱动占空比小于1时，为动态驱动。

4）亮度变化率：在最高灰度级和最大亮度下显示模组全亮和局部亮两种状况的亮度变化率。一般分为三级。

5）灰度等级：显示屏在同一级亮度中从零灰度到最高灰度之间的等级。一般分为八级。

6）信噪比：在播放视频信号时，信号有效值与噪声有效值之比。一般分为三级。

（3）机械结构：

1）外壳防护等级。

2）模组拼接精度。

a. 平整度：任意相邻像素之间的平整度。

b. 像素中心距精度：任意相邻模组拼接处相邻像素之间的像素间距误差。

c. 水平错位精度：水平方向两相邻模组在拼装过程中形成上下错位，称为水平错位。

d. 垂直错位精度：垂直方向两相邻模组在拼装过程中形成左右错位，称为垂直错位。

（4）环境照度与显示方案之间的关系：

由对比度定义式可知

$$C = L_1 + L_2 / L_2$$

式中 C——对比度；

L_1——信息元亮度；

L_2——背景亮度。

对于主动光显示方案来说，环境照度过高会使显示对比度降低；当对比度不能达到8～

10 时，会破坏显示屏的信息显示效果。因此对于主动光显示方案，除了要强调显示器件自身的亮度外，还应对环境照度的上限提出限制要求。相反，对于被动类显示方案，如果环境照度过低，会缩短有效视看距离，影响显示效果，设计应对环境照度的下限提出限制。

18.7.2.4 显示屏尺寸的确定：

（1）由视觉分辨率的计算，保证在有效视距内最小可鉴别细节识别无误，推出基本像素间距。

（2）满足字符显示的满屏容量。

（3）满足图像显示的图像级别的像素数，见表 18－20。

表 18－20 图像级别要求像素数

序号	图像极别	像素数
1	VGA	640 × 480
2	SVGA	800 × 640
3	XVGA	1024 × 768

若一台计算机控制多个显示屏，还应有合理的分割规格。

（4）综合确定显示屏规格尺寸，多功能显示屏的长高比宜为 4:3 或 16:9。通常最小文字规格应由最远视认距离确定。作图像显示时，往往强调图像画面的整体效果，不希望视看者看到画面是由一个个明显的像素点组成的，此时模糊像素点视认，应由最近视认距离确定。

18.7.2.5 显示装置的清屏功能：清屏功能用于阻止屏幕显示及屏幕显示发生逻辑混乱时。