

上海汽车工业教育基金会资助

燃料电池电动汽车

陈全世 仇 斌 谢起成 等编著

清华大学出版社
北 京

早在世界上第一辆内燃机汽车诞生的 1886 年之前，在巴黎等欧洲城市的街道上就出现了电动汽车。随着石油的大规模开采及科学技术的进步，内燃机汽车的性能大大超过了电动汽车，电动汽车开始逐渐淡出历史舞台。到了 20 世纪末期，100 多年来的许多科学技术和文化成果融入汽车技术之中，使汽车的生产技术愈来愈先进，汽车的性能愈来愈完善，汽车技术更加成熟。当前，全世界汽车的年产量超过了 6000 万辆，保有量超过 7 亿辆，其中半数以上是小轿车。汽车工业的发展给人们带来了许多就业机会，带来了财富；汽车缩短了人们之间的距离，带来了舒适与繁荣。然而，汽车给人类带来巨大贡献的同时，每天都在大量消耗地球上有限的石油资源，排出大量的有害气体，严重地污染了人类赖以生存的自然环境，给人类生存造成了严重的危害，这与人类追求美好生活的愿望背道而驰。如何在发展汽车工业的同时解决其带来的能源和环境问题，是汽车工业乃至整个文明社会需要解决的重大问题。这就是促使电动汽车重新被人们重视的主要因素。

最新的电动汽车绝不是 100 年前陈旧电动汽车技术的重复，它集机械、电子、汽车、电机、智能控制、化学电源、计算机、新能源、新材料等科学领域和工程技术中最新成果于一身，是多种高新技术凝聚的结果。电动汽车在行驶过程中没有排放污染，热辐射低，噪声小，不消耗汽油，可应用多种能源，结构简单，使用维修方便，是一种新型的交通工具，具有广阔的发展前景。

燃料电池(fuel cell, FC)是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。由于燃料电池同时兼备无污染、高效率、适用广、低噪声、可快速补充能量、具有模块化结构等特点，被公认为是今后替代传统内燃机的最理想的汽车动力装置。

本书的主要内容是作者所在的科研团队在国家“八五”、“九五”以及“十五”计划期间的十几年时间里承担国家电动汽车重大项目，从事电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。

本书主要介绍质子交换膜燃料电池的基本原理、国内外研究进展，燃料电池电动汽车的基本构成、系统仿真、试验方法以及氢燃料的制备、储存、运输等问题。

全书共分 7 章，由陈全世任主编，参加编写工作的人员有：仇斌、谢起成、

齐占宁、曹建荣、黄勇、陈勇、田光宇、林成涛、李海晨、管华等。全书的插图由陈勇协助整理。清华大学电动车研究室的伦景光教授、朱家琏教授、施双容副教授、韩晓东高级工程师、金达锋副教授、朱元博士、高大威博士、卢兰光博士，博士研究生林成涛，硕士研究生牟风涛、杜兴山、楼栋、胡伟华、熊健、赵立安、彭涛、梁伟铭、刘国权、黄文华、付正阳、王波、项晓波、周伟波等，博士后宋建国、王军平、王贺武、常秋英、江发潮等，国家“十五”“863”电动汽车重大专项——燃料电池城市客车项目组的欧阳明高教授、卢青春教授、张扬军研究员、裴普成副教授、马凡华副教授等为本书的写作提供了有价值的资料和热情的帮助，在此仅表示衷心的感谢。

本书的写作得到了“上海汽车工业教育基金会”的资助，在此表示衷心的感谢。

由于燃料电池汽车技术是近十多年来迅速发展的新技术，许多技术问题正在研究和解决中，此外，由于作者的知识和水平的限制，错误和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编著者
2005年3月

第 1 章 绪论.....	1
参考文献.....	6
第 2 章 燃料电池的基本原理及应用.....	7
2.1 燃料电池的基本原理	7
2.2 燃料电池的分类	8
2.2.1 碱性燃料电池.....	9
2.2.2 磷酸燃料电池.....	9
2.2.3 质子交换膜燃料电池.....	9
2.2.4 熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池	10
2.3 质子交换膜燃料电池.....	10
2.3.1 质子交换膜	11
2.3.2 质子交换膜燃料电池的催化剂	13
2.3.3 膜电极和双极性集流板	15
2.4 质子交换膜燃料电池的效率和工作特性.....	17
2.4.1 质子交换膜燃料电池的效率	17
2.4.2 质子交换膜燃料电池的工作特性	18
2.5 质子交换膜燃料电池的模块特性.....	21
2.6 燃料电池的发展趋势.....	21
参考文献	22
第 3 章 燃料电池汽车结构	23
3.1 燃料电池汽车的基本结构.....	23
3.2 燃料电池系统.....	25
3.2.1 燃料电池系统的基本结构	25
3.2.2 质子交换膜燃料电池与传统内燃机的比较	27
3.3 DC/DC 变换器	27
3.3.1 DC/DC 变换器的作用.....	27

3.3.2	DC/DC 变换器的基本工作原理	28
3.3.3	燃料电池汽车 DC/DC 变换器的关键技术	30
3.4	驱动电机及其控制系统	31
3.4.1	电机及其控制器	31
3.4.2	感应电机的矢量控制	33
3.4.3	无刷直流电机	39
3.4.4	燃料电池汽车电驱动系统的研究方向	40
3.5	辅助电池及其管理系统	42
3.5.1	电池概述	42
3.5.2	氢-镍电池	43
3.5.3	锂离子电池	46
3.5.4	电池管理系统	48
3.6	超级电容	54
3.6.1	超级电容概述	55
3.6.2	超级电容的分类	55
3.6.3	超级电容的发展水平	59
3.6.4	超级电容组管理系统	60
3.7	燃料电池汽车的研究进展	63
3.7.1	美国通用汽车公司	64
3.7.2	美国福特汽车公司	67
3.7.3	美国克莱斯勒汽车公司	68
3.7.4	加拿大巴拉德动力系统公司	68
3.7.5	戴姆勒-奔驰汽车公司	69
3.7.6	日本丰田汽车公司	72
3.7.7	日本本田汽车公司	75
	参考文献	77
第4章	建模仿真与能量管理策略	79
4.1	电动汽车仿真技术及其应用现状	79
4.1.1	仿真的基本概念	79
4.1.2	仿真方法	80
4.1.3	常用的仿真软件	81
4.2	燃料电池汽车的部件建模	82
4.2.1	车辆部件及其建模	82
4.2.2	轮胎模型	84
4.2.3	驱动电机及其控制器	87
4.2.4	辅助蓄电池及管理系统	93

4.2.5	超级电容	96
4.2.6	DC/DC 变换器	99
4.3	燃料电池电动汽车整车仿真实例	100
4.3.1	后向仿真	100
4.3.2	前向仿真	107
4.4	燃料电池大客车的动力性计算与仿真实例	111
4.4.1	变速器设计及整车动力性能计算	111
4.4.2	燃料电池大客车的系统仿真	113
4.5	能量管理策略与优化	115
4.5.1	燃料电池汽车能量管理策略	115
4.5.2	传统的功率分配策略	117
4.5.3	功率分配的模糊控制	117
4.5.4	功率分配策略的优化	118
4.5.5	工况自适应的功率分配策略	120
	参考文献	120
第 5 章	整车控制系统设计	123
5.1	系统设计要求和原则	123
5.2	基于 dSPACE 的整车控制器快速原型开发	125
5.2.1	dSPACE 系统简介	126
5.2.2	整车控制器快速原型的开发	127
5.3	整车控制器电控单元 ECU 的研究开发	130
5.3.1	整车控制器硬件开发	131
5.3.2	嵌入式实时操作系统的应用	132
5.4	CAN 总线通信技术的应用	135
5.4.1	CAN 总线介绍	135
5.4.2	CAN 总线的技术规范和网络协议	137
5.4.3	CAN 总线在燃料电池汽车上的应用举例	139
5.5	线控技术简介	139
	参考文献	140
第 6 章	燃料电池电动汽车及关键部件试验	143
6.1	燃料电池电动汽车整车性能试验	143
6.2	质子交换膜燃料电池试验	143

6.2.1	影响燃料电池性能的主要工作参数.....	144
6.2.2	燃料电池试验的主要内容.....	144
6.2.3	燃料电池测试系统的基本结构.....	145
6.2.4	燃料电池系统的稳态和动态特性.....	147
6.2.5	燃料电池的测试.....	149
6.3	蓄电池组及管理系统试验方法	154
6.3.1	蓄电池组的试验标准.....	154
6.3.2	国内外电池测试规范介绍.....	155
6.3.3	电池组试验方法.....	159
6.4	超级电容试验	160
6.4.1	试验目的与试验规范.....	160
6.4.2	超级电容试验内容.....	160
6.4.3	超级电容试验设备.....	164
6.5	驱动电机及控制器试验	164
6.5.1	驱动电机及控制器试验目的.....	164
6.5.2	驱动电机及控制器试验分类.....	165
6.5.3	型式试验.....	165
6.5.4	电机常规试验.....	168
	参考文献.....	169
第7章 燃料电池汽车供氢系统、氢源及氢安全		171
7.1	氢的基本性质	171
7.2	氢的制备方法	172
7.2.1	化石燃料的转化.....	172
7.2.2	水电解制氢.....	175
7.2.3	含氢工业尾气回收氢.....	176
7.2.4	可再生资源制氢技术.....	177
7.2.5	车载制氢技术.....	177
7.3	氢分离纯化技术	180
7.4	氢的输配	182
7.5	燃料电池汽车车上供氢系统	186
7.5.1	高压氢气储存.....	186
7.5.2	液态储氢.....	189
7.5.3	金属储氢.....	192

7.5.4	活性炭吸附储氢.....	193
7.5.5	碳纳米材料储氢.....	193
7.6	燃料电池汽车氢安全系统	194
7.6.1	燃料电池汽车氢安全控制系统.....	194
7.6.2	燃料电池汽车车库的氢安全系统.....	195
	参考文献.....	197
附录	国内外电动汽车标准目录.....	199

绪 论

汽车工业是国民经济的支柱产业,是衡量一个国家工业化水平的重要标志。经济发达国家在世界经济中的地位与其在世界汽车工业中的排名顺序是基本吻合的。迄今为止,还没有任何一种商品能够取代汽车在全球出口贸易中第一大商品的地位。汽车工业的发展将带动相关产业的技术创新和产业本身的发展。为了发展面向 21 世纪的汽车工业,尽可能多地占领国际市场,世界各国政府和各大汽车公司投入大量的人力、物力和财力竞相研制开发和推广应用节能、环保型汽车。电动汽车作为一种节能、无污染的理想“零排放”汽车,理所当然地受到了广泛的关注与重视,并在今后汽车工业的发展中占有越来越重要的地位。

由于传统蓄电池的性能和价格远未达到使电动汽车实用化的要求,因此电动汽车研究开发和推广应用的关键在于高性能价格比电池的研制开发。

燃料电池是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。这种装置的最大特点是由于反应过程不涉及燃烧和热机做功,因此能量转换效率不受“卡诺循环”的限制,其能量转换效率可高达 60% ~ 70%,实际使用效率则是普通内燃机的 2 倍左右。能量转换效率高是燃料电池的主要特点之一。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是燃料电池的一种,被认为是今后电动汽车上最理想的驱动电源。

燃料电池在工作过程中将外界供给的活性物质的化学能用电化学方式直接转换为电能,只要外部活性物质的供给不间断,燃料电池就会持续工作。所以,质子交换膜燃料电池汽车(PEMFC-EV)的行驶里程比普通电动汽车要长得多。据报道,20 世纪末期,美国通用汽车公司开发的“氢动 1 号”燃料电池轿车和戴姆勒-克莱斯勒汽车公司开发的 Necar-4 燃料电池轿车,使用液体氢气,一次充气可行驶 400km 以上,充气或更换氢气瓶只需要几分钟,比普通电动汽车充电时间短得多。燃料电池汽车的使用性能,如行驶速度、加速能力、一次加注燃料续驶里程等方面,可以和目前的燃油汽车相媲美。这是燃料电池汽车易于被使用者接受的主要特征。

由于质子交换膜燃料电池同时兼备无污染、高效率、适用广、低噪声、可快速补充能量、具有模块化结构等特点,因此被公认为是替代传统内燃机的最理想的动力

装置。全世界各发达国家及各大汽车公司都非常重视燃料电池的研究开发。美国能源部的最新报告指出,燃料电池的研制和开发“已接近历史性突破的边缘”,“欧、美、日的激烈竞争已进入冲刺阶段”,燃料电池技术将成为 21 世纪“汽车工业竞争的焦点”。美国前能源部部长助理克·西格尔说,21 世纪上半叶燃料电池技术在技术上的冲击影响,会类似于 20 世纪上半叶内燃机所起的作用。福特汽车公司主管 PNGV 项目的经理鲍伯·默尔称,燃料电池必定给汽车动力带来一场革命。

美国政府对燃料电池汽车的研制开发和推广应用非常重视。美国能源部于 2002 年 1 月 9 日提出 FreedomCAR(freedom cooperative automotive research)计划,支持新能源汽车的研究开发。该计划在 2003 年由美国联邦政府投资 15029.6 万美元,其中燃料电池 5000 万美元(占 33.27%),氢源设施 2582 万美元(占 17.18%),两者之和占总投资的 50% 以上。2003 年 2 月美国总统乔治·布什向国会提出“自由燃料”(freedom fuel)计划,他在对此计划发表的公开讲话中指出,“我要国会花费 12 亿美元的国家投资,给氢燃料电池小客车项目,使它能从实验室走向售车展示室。我们希望看到,今天诞生的小客车将属于今天诞生的儿童,他(或她)所开的第一辆车将是一辆由氢驱动而无污染的车”,“使用氢动力的最大结果,是实现我国的能源独立”,“使我们伟大国家的未来公民,极少地依靠外国能源”。

日本政府对燃料电池汽车的研究开发和推广应用也表示了极大的关注,为了促进燃料电池汽车的商业化,由中央和地方政府共同资助在大阪、京都、东京等城市建立加氢站。2002 年底,日本首相小泉纯一郎以政府的名义采购了 5 辆燃料电池轿车(丰田公司 3 辆,本田公司 2 辆),租给政府各部门使用。

为了使发展中国家的大城市公共交通车辆改变能源结构,降低有害物和温室气体(CO₂)排放,联合国发展计划署(united nations development programme, UNDP)和全球环境基金(global environmental facilities, GEF)资助巴西的圣保罗、墨西哥的墨西哥城、中国的北京和上海等大城市开展燃料电池公交客车的运行示范工程,其目的在于促进燃料电池大客车的尽快商业化。我国燃料电池公共汽车商用化示范项目于 2003 年 3 月 27 日在北京召开启动会,标志着这一由中国政府、全球环境基金、联合国发展计划署共同支持,科技部和北京市、上海市共同组织实施的项目进入实施阶段。该示范项目总投入为 3236 万美元,其中 GEF 投入 1158 万美元,UNDP 投入 40 万美元,科技部和北京市、上海市共投入 1458 万美元,企业等其他投入约 580 万美元。我国燃料电池公共汽车商用化示范项目为期 5 年,根据北京和上海的地域和资源特点提出燃料电池公共汽车系统技术指标,采用全球招标方式购置 12 辆燃料电池公共汽车,并建立相应的加氢设施,在北京和上海(各 6 辆)示范运行,预计运行 160 万 km。在示范运行中,将系统采集和分析各种试验数据,验证燃料电池公共汽车的技术可行性,积累包括可靠性、失效模式方面的知识和经验,进一步改进设计,降低成本,最终推动燃料电池公共汽车在我

国实现产业化和推广应用,从而达到减少温室气体排放、保护环境的目的。经过半年多的筹备及与世界各主要燃料电池大客车研制生产商的协商,项目组于2003年12月18日在北京向外界发布了第一期6辆(北京、上海各3辆)燃料电池大客车的招标书,投标截止日期为2004年3月18日。参与投标的共有4家公司:东风电动汽车有限公司、上海汽车工业集团总公司、戴姆勒-克莱斯勒中国(投资)有限公司、北京清华科威国际技术转移有限公司。经过专家评审和谈判,最后于2004年5月17日在北京与戴姆勒-克莱斯勒中国(投资)有限公司签署了采购3辆燃料电池大客车的合同。合同规定,3辆戴姆勒-克莱斯勒公司的燃料电池大客车将在2005年10月在北京市投入示范运营。

我国的汽车工业落后于当代世界先进水平至少20年。我国的石油资源比较匮乏,仅居世界第十位。从1993年开始,我国已经从石油净出口国再次转变为石油进口国。我国汽车工业的发展依靠石油燃料进口是不可能实现可持续发展的。从环境状况来看,汽车废气排放污染已经成为我国大中城市大气污染的主要污染源,这主要是因为我国人口分布高度集中,部分城市机动车尾气排放在大气污染中所占的比例是相当高的,所以我国的能源和环境状况要求我国未来的汽车工业发展不能跟在别人的后面走,必须探求新的思路,走中国特色的汽车工业发展道路,而电动汽车(electric vehicle, EV)无疑是我国未来汽车工业的发展方向。

发展我国21世纪的汽车工业,应当顺应当前的科技发展趋势,把握时机和切入点,与西方在应用高新技术、发展关键技术方面站在同一起跑线上。电动汽车是汽车工业未来发展的趋势,将电动汽车作为中国21世纪汽车工业的切入点,是实现我国汽车工业技术跨越式发展的战略选择。世界范围的资源和环境压力,使电动汽车不仅在中国,而且在全世界范围内都有巨大的发展潜力。我国的汽车工业可以充分利用后发优势,把各方面的研究、设计、制造力量联合起来,集中解决燃料电池电动汽车的各种关键技术,积极推动电动汽车产业化,其影响将是广泛而深远的。

我国政府也非常重视燃料电池汽车关键技术的研究,“九五”期间,国家科技部将燃料电池关键技术研究列入国家攻关计划。在国家科技部、中科院、北京市和上海市政府的支持下,中科院大连化学物理研究所、北京世纪富源燃料电池公司、北京飞驰绿能电源技术有限责任公司、上海神力科技有限公司等分别研制出5kW~30kW质子交换膜燃料电池。清华大学汽车工程系和北京世纪富源燃料电池公司合作,于1999年11月研制成功5kW质子交换膜燃料电池电动游览车(见图1-1),这是我国第一辆质子交换膜燃料电池电动车。

2001年1月中科院大连化学物理研究所、电工所与东风汽车公司合作研制成功质子交换膜燃料电池(30kW)轻型客车。在北京市经委、科委的资助下,2001年4月清华大学与北京飞驰绿能电源技术有限责任公司联合研制成功质子交换膜燃

4 燃料电池电动汽车

料电池(15kW)轻型客车(见图 1-2)。燃料电池汽车关键技术的研究已经全面展开。



图 1-1 5kW 质子交换膜燃料电池电动游览车



图 1-2 质子交换膜燃料电池(15kW)轻型客车

“十五”期间,燃料电池汽车及其关键技术的研究和样车的研制开发,被列入国家“863”电动汽车重大专项中,予以重点资助。图 1-3 是国家“863”电动汽车重大科技专项的组织结构和项目研究课题的设置概况,其中燃料电池轿车支持项目由上海新能源汽车公司承担,燃料电池城市客车整车项目由北京-清华新能源汽车工

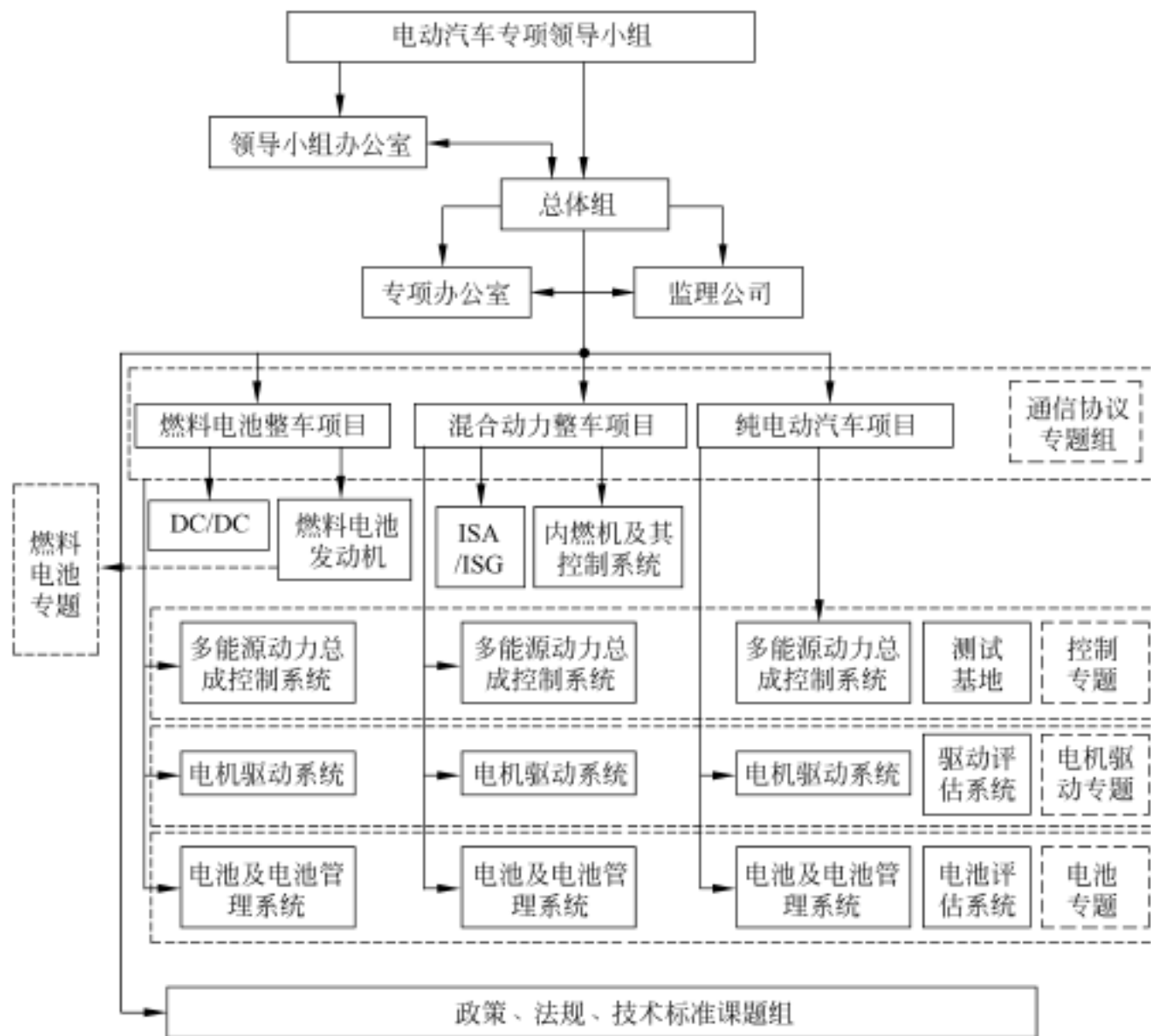


图 1-3 “863”电动汽车重大科技专项的组织结构和项目研究课题的设置

程中心承担。燃料电池系统项目由中科院大连化学物理研究所燃料电池工程中心、上海神力科技有限公司、北京世纪富源燃料电池公司与航天总公司 11 所、北京飞驰绿能电源技术有限公司与清华大学核研院共 4 个团队承担,他们按照项目要求研制的城市客车用 50kW、轿车用 30kW 燃料电池系统已于 2002 年底通过了整车单位的检测和国家科技部组织的项目验收。其中中科院大连化学物理研究所和上海神力科技有限公司为城市客车研制的 50kW 燃料电池系统,及为轿车研制的 30kW 燃料电池系统分别在燃料电池城市客车和燃料电池轿车上进行集成。两个燃料电池整车项目也通过了国家科技部的验收并顺利进入第二阶段。图 1-4 是由北京-清华新能源汽车工程中心与上海神力科技有限公司、中科院大连化学物理研究所燃料电池工程中心、株洲电力机车研究所、深圳雷天绿色电源有限公司、北京机电研究所等单位于 2002 年底联合研制的第一辆 11m 燃料电池城市客车样车。

本书的主要内容是作者所在的科研团队在国家“八五”、“九五”以及“十五”计



图 1-4 第一辆 11m 燃料电池城市客车样车

划期间的十几年内承担国家电动汽车重大项目,从事电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。本书主要介绍质子交换膜燃料电池的基本原理、国内外研究进展,燃料电池电动汽车的基本构成、系统仿真、试验方法以及氢燃料的制备、储存、运输等问题。

参考文献

- 1 国家科技部 国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题申请指南,2001—2005 年度(能源技术领域,电动汽车专项)
- 2 全球环境基金/联合国发展计划署/国家科学技术部合作项目,中国燃料电池公共汽车商业化示范项目,简报,2003 年第 1~3 期,2003 年 6—11 月
- 3 清华大学燃料电池城市客车项目总体组 国家“十五”863”电动汽车重大专项——燃料电池城市客车项目——研究简报,2003 年 1~2 期,2003 年 4 月
- 4 Remarks by the President G. Bush on Energy Independence, The National Building Museum, Washington D.C. Hydrogen Fuel Initiative Can Make “Fundamental Difference.”
<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/02/20030206-12.html>

燃料电池的基本原理及应用

早在 1839 年,英国人 W. Grove 就提出了氢和氧反应发电的原理,这是最早的氢-氧燃料电池(FC)。但直到 20 世纪 60 年代初,由于航天和军事的需要,才开发了液氢和液氧的小型燃料电池,应用于空间飞行器和潜水艇。近二三十年来,由于一次能源的匮乏和环境保护的突出要求,人们开始转向开发利用新的清洁能源。燃料电池由于具有能量转换效率高、对环境污染小等优点,因而受到世界各国的普遍重视。

本章将简要介绍燃料电池的基本原理和发展、应用情况。

2.1 燃料电池的基本原理

燃料电池实质上是电化学反应发生器。燃料电池的反应机理是将燃料中的化学能不经燃烧而直接转化为电能。氢氧燃料电池实际上就是一个电解水的逆过程,通过氢氧的化学反应生成水并释放电能。氢气和氧气分别是燃料电池在电化反应过程中的燃料和氧化剂。图 2-1 是燃料电池装置的原理简图。其反应过程如下:

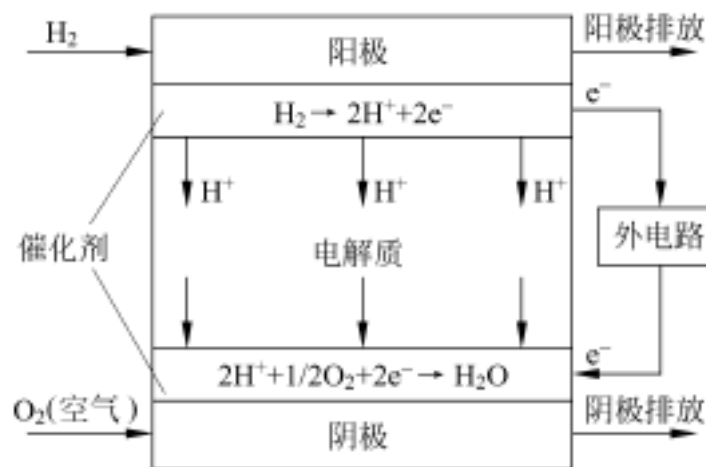


图 2-1 燃料电池基本原理示意图

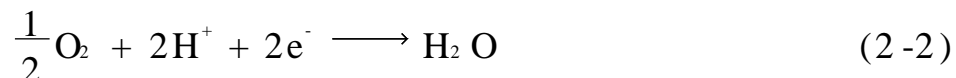
(1) 氢气通过管道或导气板到达阳极。

(2) 在阳极催化剂的作用下,一个氢分子分解为两个氢离子,并释放出两个电子,阳极反应为



(3) 在电池的另一端,氧气(或空气)通过管道或导气板到达阴极,同时,氢离子穿过电解质到达阴极,电子通过外电路也到达阴极。

(4) 在阴极催化剂的作用下,氧和氢离子与电子发生反应生成水,阴极反应为



总的化学反应为



与此同时,电子在外电路的连接下形成电流,通过适当连接可以向负载输出电能。

燃料电池的工作原理和普通的电化学原电池和充电电池类似,都是通过电化学反应将化学能转换成电能,但两者之间还是有本质差别的。普通的原电池或充电电池是一个封闭系统。封装后它与外界只存在能量交换而没有物质交换。当电池内部的化学物质耗尽或反应条件发生变化时,系统就无法继续输出能量。而燃料电池则不同,参与反应的化学物质,如氢和氧,是由燃料电池外部的单独供气系统供给的,只要保证物质供应的连续性,就可以保证能量输出的连续性。从这个意义上讲,燃料电池本身是一个开放的发电装置,这正是燃料电池与普通电池的最大差别。

2.2 燃料电池的分类

燃料电池的种类繁多,通常燃料电池可以依据其工作的温度、燃料种类、电解质类型进行分类。

按照工作温度,燃料电池可分为高、中及低温型三类。工作温度从常温至 100℃,称为低温燃料电池,这类电池包括固体聚合物电解质燃料电池等;工作温度介于 100℃ ~ 300℃ 的为中温燃料电池,如磷酸型燃料电池;工作温度在 500℃ 以上的为高温燃料电池,这种类型的电池包括熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池。

按照燃料的来源,燃料电池也可分为三类。第一类是直接式燃料电池,即其燃料直接使用氢气;第二类是间接式燃料电池,其燃料不是直接使用氢气,而是通过某种方法把甲烷、甲醇或其他烃类化合物转变成氢或富含氢的混合气后再供给燃料电池;第三类是再生燃料电池,指把燃料电池生成的水经适当方法分解成氢和氧,再重新输送给燃料电池进行发电。

国内外燃料电池研究者一般按照燃料电池的电解质类型分类。目前正在开发的商用燃料电池,依据电解质类型可以分成五大类:

碱性燃料电池(alkaline fuel cell, AFC);

磷酸燃料电池(phosphoric acid fuel cell, PAFC);

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC);

熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC);

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)。

2.2.1 碱性燃料电池

AFC是最早进入实用阶段的燃料电池之一,也是最早用于车辆的燃料电池。1959年驱动叉车的培根(Bacon)型中温、中压氢氧燃料电池就是AFC,同年美国Allis-Chalmers公司研制成14.9kW(约20马力)的AFC,在拖拉机上展示。美国的联合碳化物公司研制了32kW的AFC作为公共汽车的动力源。美国在20世纪60年代已将AFC用于阿波罗航天飞船。现在航天飞机上用的是PC-17型AFC,其输出功率7kW,功率密度280W/kg。美国在深潜艇上用的AFC中最有代表性的是PC-15B型AFC,功率为30kW。德国西门子公司研制的100kW的AFC于1988—1989年在205级U1潜艇上成功地进行了海上航行。可以说,AFC是目前技术最成熟的燃料电池之一。

2.2.2 磷酸燃料电池

PAFC是目前使用最多的燃料电池。以天然气为燃料的11kW的PAFC验证性电站已建成并投入运行,它的综合热效率可达到70%~80%。采用PAFC的50kW~250kW的独立发电设备可用于医院、旅馆等,作为分散的发电站。实践证明了PAFC电站运行的可靠性。1996年美国在25座(30ft)的大客车上安装了PAFC并进行了路试,车上采用燃料电池系统和蓄电池混合电源系统,燃料使用甲醇,额定功率50kW,效率大于44%。

2.2.3 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池特点是:效率高、结构紧凑、重量轻、比功率大、无腐蚀性、不受二氧化碳的影响、燃料来源比较广泛等。

质子交换膜燃料电池的最大优势在于它的工作温度。其最佳工作温度是80~90,但在室温下也可以正常工作,所以特别适合用作交通车辆的移动电源。正因为如此,质子交换膜燃料电池最有希望替代内燃机而成为汽车动力源。现今对于质子交换膜燃料电池的研究开展得越来越多。无论从电池本身,还是从

电池与车辆的匹配,以及样车的试制,都进行了比较深入的探索。鉴于质子交换膜燃料电池应用在电动车上的巨大潜力,下面将对质子交换膜燃料电池的原理和发展作比较详细的介绍。

2.2.4 熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池

这两种电池的工作温度都较高,而且燃料本身能量转换效率高,余热利用率也高,主要用作电厂发电,在此不作过多介绍。

表 2-1 中对于前面已说的这 5 种主要燃料电池的性能作了简单的比较。

表 2-1 5 种燃料电池的主要特征比较

燃料电池	典型电解质	工作温度 /	优点	缺点	效率 / %
碱性燃料电池	KOH-H ₂ O	80	1. 启动快 2. 室温常压下工作	1. 需以纯氧作氧化剂 2. 成本高	70
磷酸燃料电池	H ₃ PO ₄	200	对 CO ₂ 不敏感	1. 对 CO 敏感 2. 工作温度较高 3. 低于峰值功率输出时性能下降	40
固体氧化物燃料电池	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	1000	1. 可用空气作氧化剂 2. 可用天然气或甲烷作燃料	工作温度高	> 60
熔融碳酸盐燃料电池	Na ₂ CO ₃	650	1. 可用空气作氧化剂 2. 可用天然气或甲烷作燃料	工作温度高	> 60
质子交换膜燃料电池	含氟质子交换膜	80 ~ 100	1. 寿命长 2. 可用空气作氧化剂 3. 工作温度低 4. 启动迅速	1. 对 CO 敏感 2. 反应物需要加湿 3. 成本高	> 60

2.3 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池的结构和原理如图 2-2 所示。电池单体主要由膜电极(阳极和阴极、质子交换膜)和集流板组成。

其具体反应步骤为:经增湿后的 H₂ 和 O₂ 分别进入阳极室和阴极室,经电极扩散层扩散到达催化层和质子交换膜的界面,分别在催化剂作用下发生氧化和还原反应,即

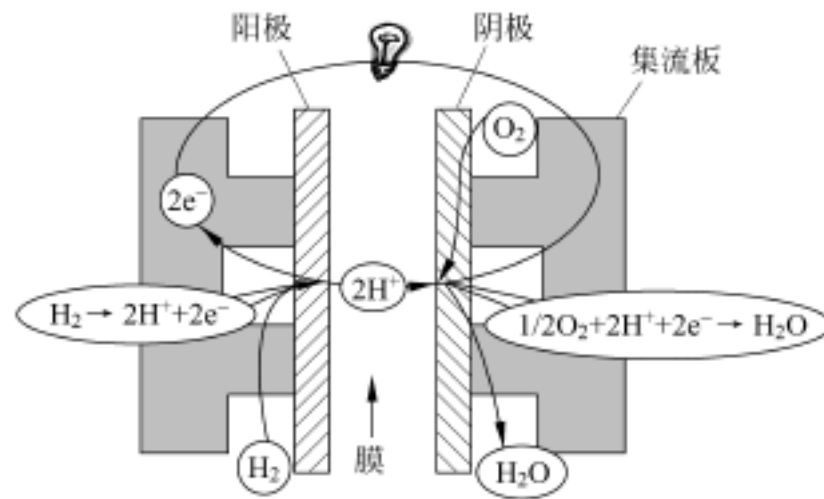
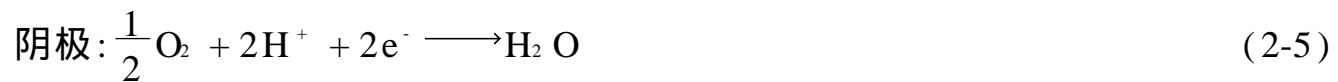


图 2-2 质子交换膜燃料电池的反应原理



阳极反应生成的质子 (H^+) 通过质子交换膜传导到达阴极, 阳极反应产生的电子通过外电路到达阴极。生成的水以水蒸气或冷凝水的形式随过剩的阴极反应气体从阴极室排出。

图 2-3 是加拿大巴拉德 (Ballard) 公司的燃料电池组的结构及分解图。

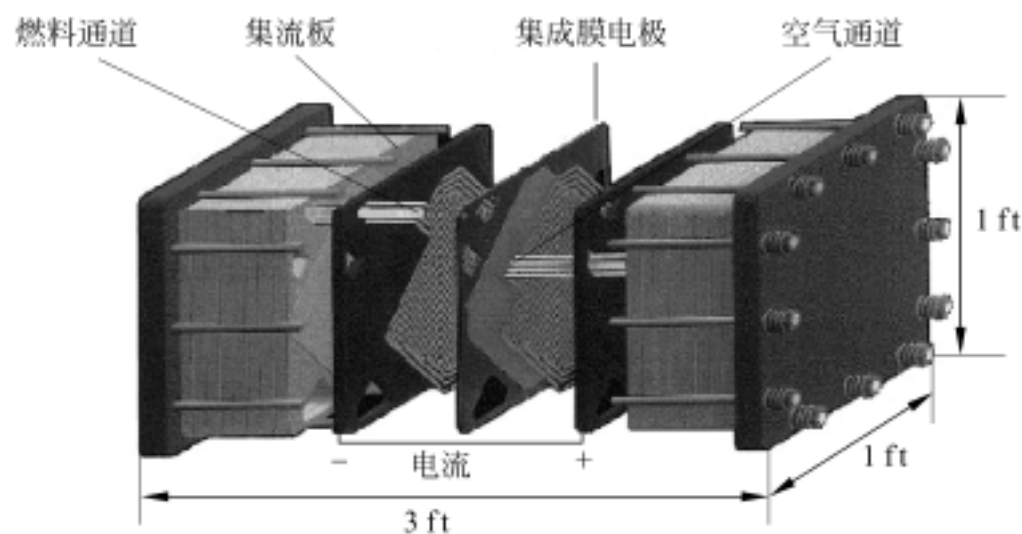


图 2-3 燃料电池结构示意图

为使读者进一步了解燃料电池的结构和原理, 下面将对燃料电池的各个部分和关键技术作简单的介绍。

2.3.1 质子交换膜

质子交换膜是 PEMFC 的核心部件, 是一种厚度仅为 $50\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$ 的极薄

膜片,是电极活性物质(催化剂)的基底。其微观结构非常复杂,本书不进一步讨论。它的主要特点是在一定的温度和湿度条件下,具有选择透过性,即只容许 H^+ 离子(质子)透过,而不容许 H_2 分子及其他离子透过。质子交换膜燃料电池对于质子交换膜的要求非常高,它不仅要具有良好的离子导电性能,还要同时具有适度的含水率,对电池工作过程中的氧化、还原和水解具有稳定性,具有足够高的机械强度和结构强度,以及具有膜表面适合与催化剂结合等性能。质子交换膜的物理、化学性质对燃料电池的性能具有极大的影响。对性能造成影响的质子交换膜的物理性质主要表现在以下几个方面。

(1) 膜的厚度和单位面积质量。降低膜的厚度和单位质量,可以降低膜的电阻,提高电池的工作电压和能量密度;但是如果厚度过低,会影响膜的抗拉强度,甚至引起氢气的泄漏而导致电池的失效。

(2) 膜的抗拉强度。它与膜的厚度成正比,同时也与环境有关。在保证满足膜的抗拉强度要求下,应尽量减小膜的厚度。

(3) 膜的含水率。每克干膜的含水量称为膜的含水率,可用百分数表示,即

$$r = \frac{\text{水的质量(g)}}{\text{干膜的质量(g)}} \times 100\% \quad (2-7)$$

含水率对膜电解质的质子传递能力有很大影响,也会影响到氧在膜中的溶解扩散。含水率高,质子扩散因子和渗透率也大,膜电阻随之下降,但同时膜的强度也有所下降。

(4) 膜的溶胀度。膜的溶胀度是指离子膜在给定的溶液中浸泡后,离子膜的面积或体积变化的百分率,即

$$C = \frac{\text{浸液后的体积(面积)} - \text{干膜的体积(面积)}}{\text{干膜的体积(面积)}} \times 100\% \quad (2-8)$$

膜的溶胀度标志反应中交换膜的变形程度。溶胀度高,在水合和脱水时会由于膜的溶胀而造成电极的变形和质子交换膜局部应力的增大,从而造成电池性能的下降。

质子交换膜的电化学性质主要表现在膜的导电性能和选择通过性能上。膜的导电性可用电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)、面电阻(Ω / cm^2)或电导率($\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)来表示,表 2-2 中给出了不同类型膜的电导率和与之相关的物理性质。

表 2-2 不同类型质子交换膜电导率和相关物理性能

类 型	干态厚度/ μm	含水率/ %	电导率/ ($\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Nafion115	100	34	0.059
Dow	125	54	0.114
Aciplex-S	120	43	0.108

膜的选择通过性可以用透过性参数 P 来表示,即

$$P = \frac{t_i^m - t_i}{1 - t_i} \quad (2-9)$$

式中, t_i^m 为离子在膜中的迁移数, t_i 为离子在溶液中的迁移数。 $P=0$ 时, 没有通过性; $P=1$ 时, 交换膜具有理想的选择通过性。通常情况下, $0 < P < 1$ 。

质子交换膜燃料电池曾采用酚醛树脂磺酸型膜、聚苯乙烯磺酸型膜、聚三氟(, ,)苯乙烯磺酸型膜和全氟磺酸型膜。研究表明, 最后一种最适合作为质子交换膜燃料电池的固体电解质。表 2-3 中所示为几种见诸于文献和主要应用的全氟型质子交换膜及其生产开发公司。

表 2-3 主要质子交换膜及其生产厂家

名称	开发者	名称	开发者
Nafion 系列	美国杜邦公司	Flemion 膜	日本 Asahi 公司
XUS-B204 膜	美国 DOW 化学公司	C 膜	日本氯工程公司
Aciplex 系列膜	日本 Asahi 公司	BAM 型膜	加拿大巴拉德公司

质子交换膜的微观结构非常复杂, 科学界采用许多不同的模型来描述它, 其中比较流行的是离子簇网络模型假设: 质子交换膜主要由高分子母体、离子簇和离子簇间形成的网络结构组成。离子簇之间的间距一般是 5 nm 左右。各离子簇间形成的网络结构是膜内离子和水分子迁移的惟一通道。由于离子簇间的通道窄而短, 因而对带负电且水合半径较大的 OH^- 离子的迁移阻力远大于 H^+ 离子, 这也正是质子交换膜具有选择透过性的原因。图 2-4 是质子交换膜的微观结构示意图。

由于膜的结构、工艺和生产批量等问题的存在, 到目前为止, 质子交换膜的成本是非常高的。使用最为广泛的杜邦公司开发的 Nafion 膜的价格在 600 美元/ m^2 左右, 相当于 120 美元/ kW (单体电池电压为 0.65V)。在燃料电池系统中, 膜的成本几乎占总成本的 20% ~ 30%。为尽早实现燃料电池的商业化应用, 降低质子交换膜的价格迫在眉睫。加拿大的巴拉德公司在质子交换膜领域做了一些后来居上的工作, 使人们看到了交换膜商业化的希望。据研究计划报道, 其第三代质子交换膜 BAM3G, 是部分氟化的磺酸型质子交换膜, 演示寿命已超过 4500h, 其价格已降低到 50 美元/ m^2 , 这相当于 10 美元/ kW (单体电池电压为 0.65V)。

2.3.2 质子交换膜燃料电池的催化剂

催化剂是质子交换膜燃料电池的另一项核心技术。图 2-5 为催化剂层的微观结构。质子交换膜燃料电池的阳极反应为氢的氧化反应, 阴极为氧的还原反应。为了加快电化学反应的速度, 气体扩散电极上都含有一定量的催化剂。催化剂包括阴极催化剂和阳极催化剂两类。对阴极催化剂的要求是足够的催化活性和稳定

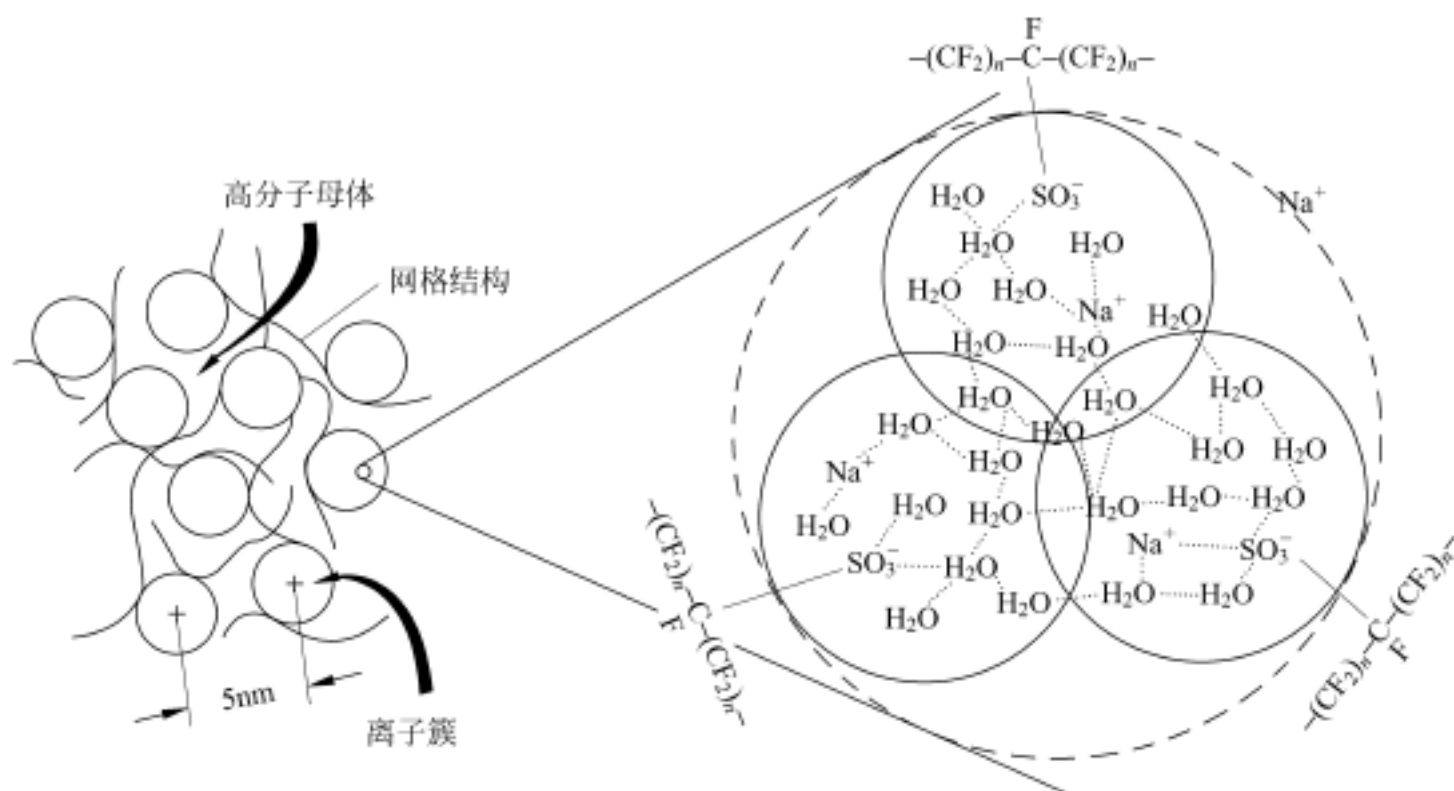


图 2-4 质子交换膜的微观结构示意图

性。阳极催化剂的选用原则与阴极催化剂的选用原则是相似的,但阳极催化剂应具有抗 CO 中毒的能力,对于使用烃类燃料重整的质子交换膜燃料电池系统,阳极催化剂系统尤其应注意这个问题。

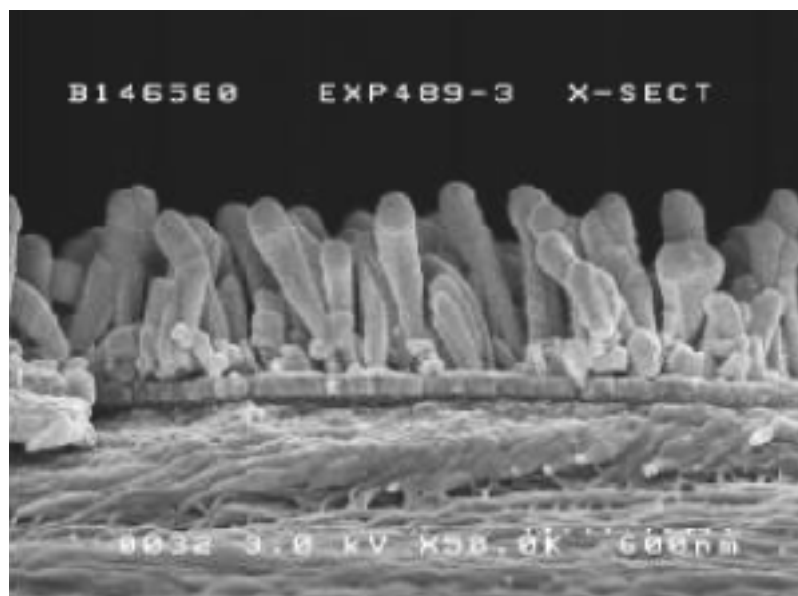


图 2-5 催化剂的微观结构

目前主要采用贵金属 Pt 作为电催化剂。虽然它对于两个电极反应均具有催化活性,而且可以长期稳定工作,但由于 Pt 的价格昂贵、资源匮乏,使得质子交换膜燃料电池的成本居高不下,限制了其大规模应用。质子交换膜燃料电池催化剂研究的重点主要在两个方面:其一是尽量提高 Pt 的利用率,减少单位面积的使用量。其二是寻找新的价格较低的非贵金属催化剂。经过多年的努力,在以上两方

面的研究工作都取得了一定的进展,从表 2-4 中可以看出 Pt 利用率在逐渐提高。

表 2-4 不同时期 Pt 利用率的比较

年 份	1994	1996	1998	目标
系统功率/ kW	5 ~ 10	30 ~ 40	120	
燃料电池的比功率/ (W/ L)	250	500	1000	1000
价格/ (美元/ kW)	3500	1000	500	30
Pt 载量/ (mg/ cm ²)	8	2 ~ 4	0.5	0.2
Pt 的利用率/ %	< 2	10	20	50
CO 允许量(体积分数)/ 10 ⁻⁶	n 10	30	100	100

2.3.3 膜电极和双极性集流板

1) 膜电极

质子交换膜与两侧的气体扩散电极(阴极和阳极)复合,组成燃料电池的膜电极。膜电极通常称为 MEA(membrane electrode assembly),是 PEMFC 的心脏。上面讨论的质子交换膜和催化剂就包括在膜电极中,除此以外,还包括阴阳极的扩散层。其结构如图 2-6 所示。

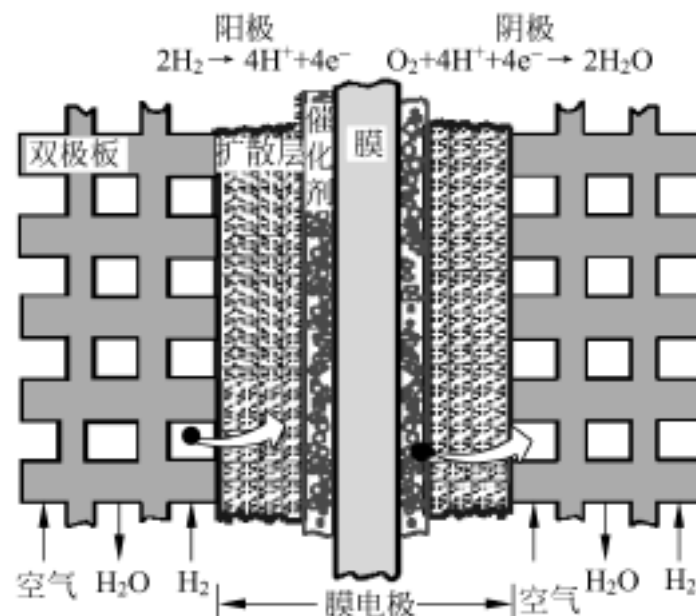


图 2-6 膜电极示意图

MEA 是 PEMFC 的核心部分,是影响 PEMFC 性能、能量密度分布和工作寿命的关键因素。组成 MEA 的电极材料、电极的制备工艺和方法等决定了其基本性能。另外,MEA 中贵金属(如 Pt)的用量也与电极的制备方法有直接的关系。在 PEMFC 研究的早期阶段,是把铂直接热压到电解质膜的两侧,这种方法制成的 MEA 铂载量高达 $2\text{mg}/\text{cm}^2 \sim 4\text{mg}/\text{cm}^2$,导致电池造价过高,难以实际应用。后

来,碳载铂的技术逐渐得到采用。在采用碳载铂技术的同时,人们也先后开发出涂膏法(pasting)、浇注法(casting)、滚压法(rolling)、电化学催化法(ECC)等电极制备工艺,并且取得了显著的成效。

气体扩散电极同样重要。一个好的气体扩散电极应同时具备适度的亲水性和疏水性,以保证催化剂发生作用的最佳湿化环境,同时让反应生成的水及时排除,以免电极被淹。

MEA 的性能除了决定于制备工艺外,还受以下电极参数的影响: 电极结构; 碳载体类型; 导电网类型; 聚四氟乙烯(PTFE)含量; Nafion 含量; 极板类型。

2) 双极性集流板

双极性集流板简称为双极板或集流板,放置在膜电极的两侧,分别称为阳极集流板和阴极集流板。除了导电外,其主要作用还包括导流燃料和氧气以及导流冷却水。

双极板主要有石墨集流板、金属双极板、复合型双极板等几种类型。双极板面向电极的表面刻有用于燃料和氧气(空气)流动的沟槽。双极板中间的沟槽是冷却水的通道,用来带走反应生成的富余热量。这些沟槽的设计结构是不同的,其典型结构如图 2-7 所示。

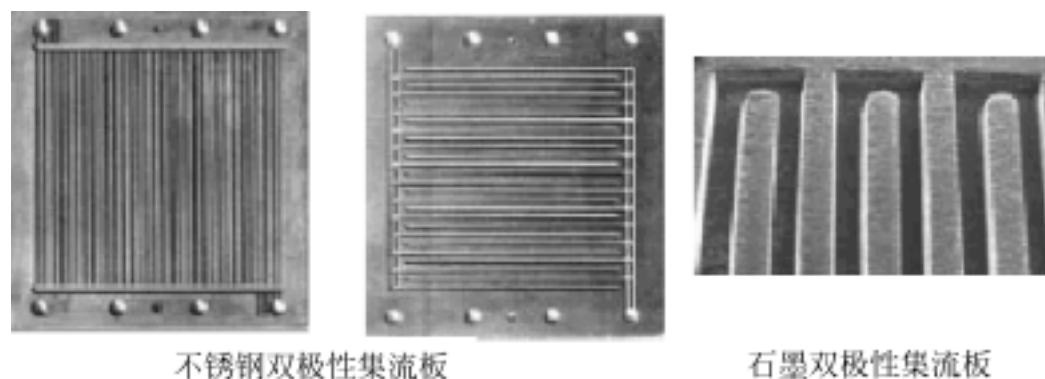


图 2-7 双极性集流板典型结构

双极板的设计主要考虑导电性能、密封、气体分布和水、热的排除等。目前制作双极板的材料主要有石墨、表面改性的金属、炭黑-聚合物合成材料等,其制造工艺已经比较成熟。例如对于石墨双极板,可以用精密铣床在石墨板上加工沟槽,也可用石墨-聚合物合成材料直接模压成形。

对于实用的 PEMFC 而言,双极板主要考虑用低成本材料,如碳或碳的合成材料,这一点对于大规模的汽车应用尤其重要。然而,即使采用无孔碳板作为极板的原材料,双极板的加工成本依然较高。

2.4 质子交换膜燃料电池的效率和工作特性

2.4.1 质子交换膜燃料电池的效率

燃料电池的效率是指燃料中转化为电能的那部分能量占燃料中所含能量的比值。PEMFC的效率为60%左右,在5种类型的燃料电池中并不算高,但是这已经是普通内燃机的2倍左右了。

由于内燃机是通过燃料的燃烧,把热能转变为机械能,因此其效率受到卡诺循环(Carnot cycle)的限制。根据热力学第二定律,热机的效率可表示为

$$\eta = W / Q \times 100\% = (T_2 - T_1) / T_2 \times 100\%$$

式中, Q 为热机在高温 T_2 时吸收的热, W 为所做的功,部分未转变为机械功的热能则在温度为 T_1 时排出,再加上热机中运动部件摩擦造成的损失,热机的实际效率在30%左右,甚至更低。而燃料电池不是通过氢气的燃烧产生机械能,而是氢氧的电化学反应直接产生电能,不受卡诺循环的限制。电堆本身也没有运动部件,不仅噪声小,而且效率得到提高。表2-5为1atm下,室温25℃时, H_2 、 O_2 和 H_2O 的热力学数据。

表 2-5 H_2 、 O_2 和 H_2O 的热力学数据

项目	${}_f H_m^0$ / (kJ / mol)	${}_f G_m^0$ / (kJ / mol)	S_m^0 / (J / (mol · K))
H_2 (气态)	0	0	130.59
O_2 (气态)	0	0	205.03
H_2O (液态)	-285.84	-237.19	69.94

表 2-5 中 ${}_f H_m^0$ 为焓变, ${}_f G_m^0$ 为吉布斯自由能差, S_m^0 为熵。

氢气与氧气发生反应生成水的化学反应焓变可表示为

$$H = ZEF + Q_R = G + T S$$

式中, ZEF 为反应所做的功, Q_R 是反应放出的热, T 为热力学温度,则理论上能量转换效率为

$$\eta = ZEF / Q_R = G / H = (-237.19 / -285.84) \times 100\% = 83\%$$

即在1atm下,室温为25℃时燃料电池的理想能量转换效率为83%。实际上,由于电池内阻的存在和电极工作时的极化现象,PEMFC燃料电池的实际效率大约在50%~70%。

2.4.2 质子交换膜燃料电池的工作特性

质子交换膜燃料电池的工作性能主要取决于三方面的因素：一是电堆本身的技术状况；二是燃料电池的工作条件；三是整个燃料电池系统的水管理和热管理。

1) 电堆本身技术状况的影响

质子交换膜燃料电池的性能首先与电堆的以下因素有关：

MEA 的结构、制备方式和条件；

质子交换膜的类型、厚度、预处理情况、传导质子的能力、机械强度、化学和热稳定性能；

催化剂的含量和制备方法等；

双极板的结构和流场设计等。

2) 工作条件的影响

(1) 电流密度、工作电压、功率密度及能量效率的关系

图 2-8 所示为某 1kW PEMFC 电堆的电压、电流及功率特性，从图中可以看出，随着电流增大（即电流密度增大），工作电压下降，但功率增大，电流增至 100A

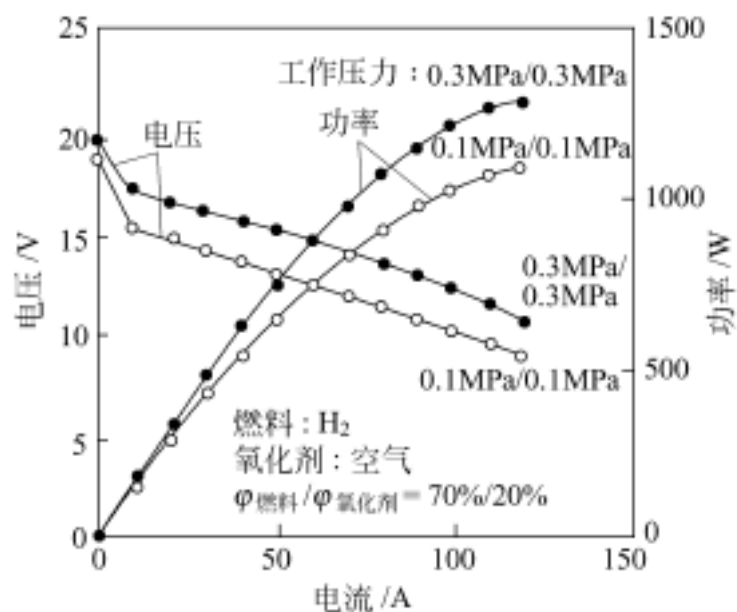


图 2-8 PEMFC 的电压、电流和功率特性

(相当于电流密度为 500 mA/cm^2) 时，达到设计的最高功率 1.2 kW (相当于 0.3 W/cm^2)。由于燃料电池的效率主要与工作电压有关，在燃料电池工作电压高时，能量效率高，但功率低。所以，没有“理想”的燃料电池设计，只能做到对电堆的设计最优化，以达到在一定的电流密度下获得较高的工作电压，既得到高功率又得到高能量效率。通常燃料电池的设计只能是满足最终产品的应用要求。例如，对燃料电池电动汽车用的 PEMFC，要求高功率密度和低成本，这只有在大电流密度下工作才能实现；而对于地面固定发电站，就要求高的能量效率和长寿命，这只有在高

工作电压(电流密度必然降低)下才能实现。

(2) 工作压力的影响

PEMFC的工作性能与反应气的体积分数有关,所以气体压力越高,燃料电池性能越好,尤其是阴极的反应物(氧气或空气)压力对电池性能的影响更加明显。如图2-8所示, H_2 与空气压力的比值为 $0.3MPa/0.3MPa$ 的性能优于 $0.1MPa/0.1MPa$ 的。为了减少氢气和氧气通过交换膜相互扩散,从而避免氢氧混合物引起危险,应尽可能减少膜两侧的压力差。

(3) 工作温度的影响

PEMFC的温度特性主要与质子交换膜有关。为保证质子交换膜具有良好的质子传导性,必须保持其适当的湿润条件,因此反应生成的副产物水应尽量为液态水。受此限制,在常压下 PEMFC 的工作温度不能超过 $80^\circ C$, 在 $0.4MPa \sim 0.5MPa$ 压力下不能高于 $102^\circ C$ 。如图2-9所示为工作温度对燃料电池性能的影响,从图中可以看出,随着温度的升高,电压-电流密度曲线线性区的斜率绝对值降低,这意味着电池内阻减小,这样,在相同的电流密度下,工作电压升高,燃料电池的功率增大,效率也有所提高。这主要是因为限定温度范围内,工作温度高,反应气体向催化剂层扩散,质子从阳极向阴极的运动都将加快,这些都会对电池性能的提高起到积极的促进作用。

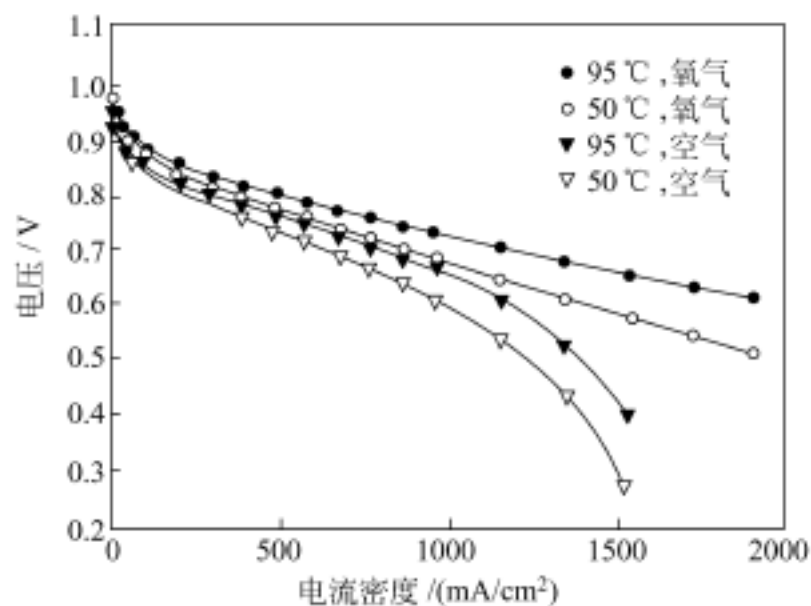


图 2-9 PEMFC 的温度特性

(4) 燃料气体中杂质的影响

燃料气体中的杂质主要有 CO , CO_2 , N_2 等,图2-10示出了燃料气体中 CO 含量对燃料电池的性能有极其严重的影响。表2-6示出了燃料气体中其他杂质的影响。可以看出高含量的 CO_2 对燃料电池性能影响很大,这是由于在阳极的 Pt 催化剂上吸附的 H_2 和 CO_2 相互作用引起 CO 中毒。

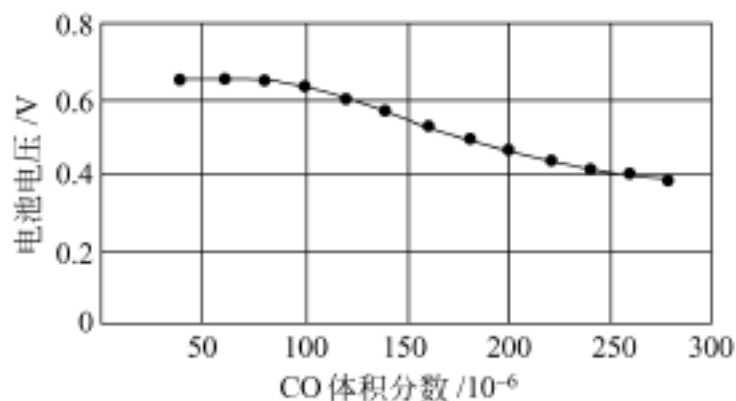


图 2-10 燃料气体中的 CO 对燃料电池性能的影响

表 2-6 燃料气体中其他杂质的影响
(电流密度 $1000\text{mA}/\text{cm}^2$)

燃料气体组成	单体工作电压/ V
纯 H_2	0.60
75% H_2 / 25% CO_2	0.31
75% H_2 / 25% N_2	0.58
98% H_2 / 2% CO_2	0.51

(5) 纯 O_2 和空气对燃料电池性能的影响

图 2-9 还示出了用纯 O_2 和空气作为氧化剂时燃料电池的电压-电流曲线,可以看出用空气作为氧化剂时,燃料电池的性能大幅下降。并在低电流密度时出现电压-电流线性区的偏离,这种偏离主要是由于“氮障碍层效应”和空气中氧分压较低造成的。

3) PEMFC 系统的水管理和热管理

PEMFC 工作时,燃料电池内部的水管理是一个重要而复杂的问题。为了同时获得高的能量转换效率和功率密度,就必须保证质子交换膜的导电性处于最佳状态。这就需要通过水管理来维持燃料电池内部的水平衡,始终使质子交换膜保持湿润状态且阴极又不淹渍。影响水管理的主要因素有:电流密度、进入燃料电池的气体的增湿程度、工作温度、气室压力和气体流速等。

为了进行有效的水管理,国内外研究机构进行了大量的研究和试验,并提出了实现有效水管理的各种途径: MEA 和电池组结构的优化设计; 对 PEMFC 的工作参数,包括电流密度、反应气体湿度、反应气体的流速和压力、工作温度等进行综合调控; 选择合适的质子交换膜及碳纸或碳布。

热管理即温度控制。PEMFC 虽然属于低温型燃料电池,但其工作温度仍高于环境温度,应维持在 $80 \sim 100$ (温度上限受质子交换膜的特性所限制)。温度低于 80 ,会导致各种极化均增大,燃料电池性能恶化;另一方面,燃料电池长

期工作时又产生大量的热,导致燃料电池温度过高,从而影响质子交换膜的热稳定性和其他性能,所以又必须采取适当的冷却措施,如空冷或水冷。

2.5 质子交换膜燃料电池的模块特性

由于燃料电池单体的输出电压和输出功率往往无法满足实际使用的要求,故必须将不同数目的电池单体串联形成电池组以满足电压和功率的要求。例如:作为普通电池组的替代电源的小型燃料电池组(1.5kW),输出电压要求比较低,只需28.5V即可,这样需串联50个电池单体。而一个可用于电动汽车驱动动力的质子交换膜燃料电池,功率需求往往达到30kW~200kW以上,如果输出电压过低,则会导致电流过大,从而造成导线过粗、效率不高等。这就需要增加电池单体的个数,并且使用升压系统才能够满足要求,但这又会引起一系列的问题:随着电池单体个数的增加,电池组的体积随之增加;在单体间由于水、热、压力、燃料供应以及膜的情况的不同而出现性能的差异,使得燃料电池组内部的不平衡性成为应用的一个不可忽视的问题。而且,为保证燃料电池组的连续运转,必须要考虑燃料供给系统、水热管理系统如何协调工作。需要解决燃料电池组输出电压升压系统(DC/DC)的效率、尺寸和两者之间的匹配问题,要考虑整个燃料电池系统在车辆上的布置、与车上其他部件的匹配等一系列问题。

2.6 燃料电池的发展趋势

早在1995年美国总统一办公厅科技政策办公室公布的美国国家关键技术报告中,就将燃料电池列入美国经济繁荣和国家安全至关重要的关键技术领域。依据美国乔治·华盛顿大学未来学家评选出的未来10年十大技术突破中,燃料电池位于网络生活之后,转基因动植物之前的第2位。从担任沙特阿拉伯石油部长达20年的现任全球能源研究中心主任雅玛尼,到依赖石化燃料驱动的内燃机而创造了汽车世纪的美国福特汽车公司现任董事长比里·福特,这些传统能源的生产者和使用者都相信燃料电池技术将带来石油时代和内燃机的终结,人类将进入可持续绿色能源的新时代。燃料电池已被列为新经济和21世纪可持续发展的三大支柱之一,与信息技术、生物技术并驾齐驱,将与我们每个人息息相关。燃料电池不仅仅在汽车等交通工具中具有广阔的应用前景,而且在我们的日常生活中也将被广泛使用。

表2-7中给出了一些燃料电池除了在汽车、航天及水下等运载工具中应用以外的,在在日常生活中应用的例子。

表 2-7 燃料电池的日常应用情况

便携式燃料电池	郊游、地质勘探、边防哨所等野外工作或生活用
分散/ 备用电源	别墅、岛屿等的分散电源及居民家庭的备用电源
替代蓄电池用的燃料电池	燃料电池掌上电脑、笔记本电脑 高速公路广告牌 电视摄像机用电源 移动电话用微型燃料电池
教学用燃料电池	再生燃料电池教学用具 教学用太阳能-氢燃料电池系统

燃料电池技术的飞速发展,使人们看到了当前人类社会所面临的能源和环保两个棘手的重大问题得到解决希望。虽然距燃料电池技术的成熟和大规模推广应用还有很长的路,还有许多技术、经济和社会难关需要克服,但是有理由相信,燃料电池技术将会给我们的社会和经济生活带来翻天覆地的变化。从燃料电池技术的发展可以看出,“氢能经济”和“氢能社会”的到来只是时间问题。

参考文献

- 1 黄倬,屠海令,等.质子交换膜燃料电池的研究开发与应用.北京:冶金工业出版社,2000
- 2 Fuel Cell Handbook Fifth Edition . PDF version . EG&G Services, Parsons, Inc . and Science Applications International Corporation for the U . S . Department of Energy . 2000
- 3 [http:// education .lanl .gov/ resources/ fuelcells/](http://education.lanl.gov/resources/fuelcells/)
- 4 The Energy Conversion Team, U . S . Department of Energy . DOE Fuel Cells for Transportation Program: 1999 Annual progress report
- 5 Marr C, Li X . An engineering model of proton exchange membrane fuel cell performance . ARI (1998) 50:190 ~ 200
- 6 Steven G C, James F M, et al . Challenges for fuel cells in transport applications . Journal of Power Sources, 2000, 86:40 ~ 51
- 7 毕道治,邱瑞珍,等.电工高新技术丛书(第1分册):燃料电池.北京:机械工业出版社,2000
- 8 衣宝廉.燃料电池—高效友好的发电方式.大连:中国科学院大连化学物理研究所燃料电池工程中心,2000

燃料电池汽车结构

如第2章所述,燃料电池用于车辆驱动,为能源问题和环境污染问题提供了一个有效的解决方案。随着燃料电池技术的不断发展,如何将燃料电池应用于车辆系统,解决其与车辆众多复杂子系统之间的匹配等问题随之出现。本章主要介绍燃料电池在车辆应用技术上的发展和各国、各大公司的燃料电池车辆的研究情况。

3.1 燃料电池汽车的基本结构

燃料电池汽车的基本结构多种多样。按照驱动型式可分为纯燃料电池驱动和混合驱动两种;按照能量来源可分为车载纯氢和燃料重整两种方式。由于燃料电池电动汽车正处在研究的初期阶段,所以各种技术竞相试用,并各有优缺点。

纯燃料电池汽车只有燃料电池一个动力源,汽车的所有功率负荷都由燃料电池承担。其主要缺点有: 燃料电池的功率大,成本昂贵; 对燃料电池系统的动态性能和可靠性提出了很高的要求; 不能进行制动能量回收。基于这些不利因素,目前的燃料电池汽车主要采用的是混合驱动型式,即在燃料电池的基础上,增加了一组电池或超级电容作为另一个动力源。

图3-1是采用“燃料电池+电池”(FC+B)混合驱动型式的燃料电池汽车的动力系统结构图。考虑到目前燃料电池系统自身的一些特殊要求,例如,在启动时空压机或鼓风机需要供电,电堆需要加热,氢气和空气需要加湿等,同时也为了能够回收制动能量,因而将电池和燃料电池系统组合起来形成混合动力驱动系统。该系统降低了对燃料电池的功率和动态特性的要求,同时也降低了燃料电池系统的成本,但却增加了驱动系统的重量、体积和复杂性,从而增加了电池的维护、更换费用。

根据燃料电池所提供的功率占整车总需求功率的比例不同,燃料电池混合动力汽车可分为能量混合型和功率混合型两大类。

在燃料电池汽车开发的早期,由于技术水平的限制,燃料电池的功率较小,还难以满足车辆的功率需求。在车辆行驶过程中燃料电池只能提供整车功率需求的一部分,不足的部分还需要其他动力源如电池来提供,采用这种混合驱动型式的汽

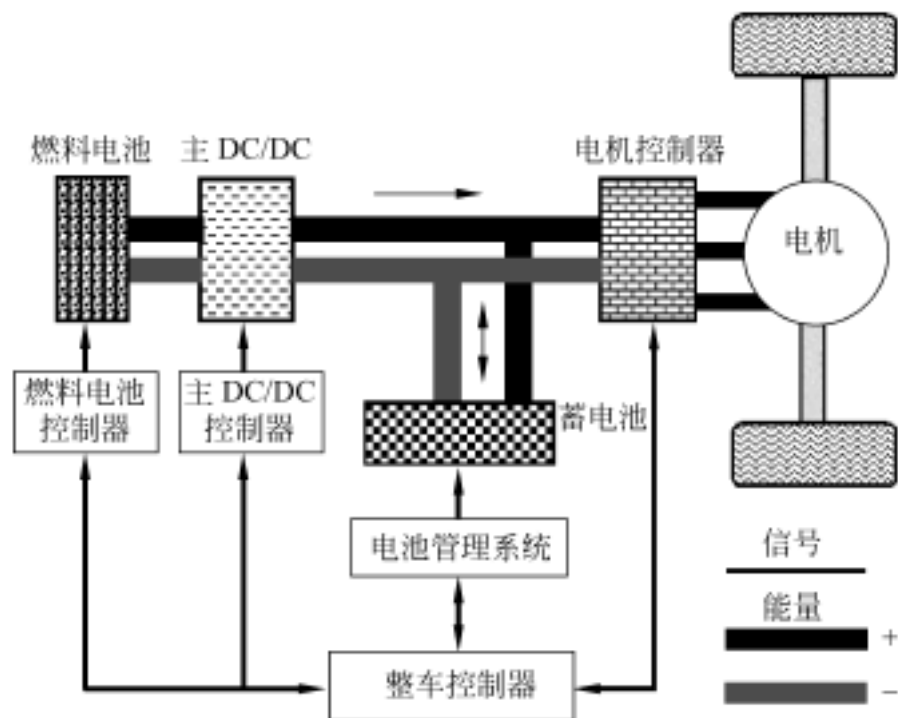


图 3-1 “FC + B”燃料电池汽车混合动力系统结构图

车即为能量混合型燃料电池汽车。能量混合型燃料电池汽车为了满足一定的性能指标,往往需要配备较大容量的电池组,从而导致整车的自重增加、动力性变差、布置空间紧张。能量混合型燃料电池汽车的燃料电池可以经常在系统效率较高的额定功率区域内工作。但每次运行结束后,除了要加注氢燃料外,还需要用地面电源为电池充电。

随着燃料电池技术的不断成熟,燃料电池性能的逐渐提高,燃料电池所提供的功率比例越来越大,这样就可以减少电池的容量,从而减轻车重、提高动力性等。但为了回收制动能量,还需要一定数量的电池,但电池只提供整车所需功率中很小的一部分。燃料电池作为主动力源,电池作为辅助动力源,车辆需要的功率主要由燃料电池提供,电池只是在燃料电池启动、汽车爬坡和加速时提供功率,在汽车制动时回收制动能量。采用这种混合驱动型式的汽车即为功率混合型燃料电池汽车。

由于氢-镍电池或锂离子电池比能量及比功率较高,从而可以减少电池组的体积和重量,现在越来越多地被用作燃料电池混合动力汽车的电池。但是,由于目前这些电池的价格仍非常昂贵,同时使用过程中电池的工作电压、电流、温度等的变化与其安全有很密切的关系,所以往往需要配备专门的电池管理系统。

目前,燃料电池混合动力汽车的驱动型式多种多样,除了前面介绍的“FC + B”外,近年来,功率混合型燃料电池汽车开始出现“FC + C”的驱动型式,即采用燃料电池与超级电容组合,完全摒弃了寿命短、成本高、使用要求复杂的电池。采用超级电容的突出优点是寿命长和效率高,可大大降低使用成本,有利于燃料电池汽车的商业化推广和应用。图 3-2 所示为采用“燃料电池 + 电池 + 超级电容”(FC +

B + C)驱动型式的燃料电池汽车的系统结构图,该型式是在电压总线上再并联一组超级电容,用于提供(吸收)加速(紧急制动)的尖峰电流,从而减轻电池的负担,延长其使用寿命。

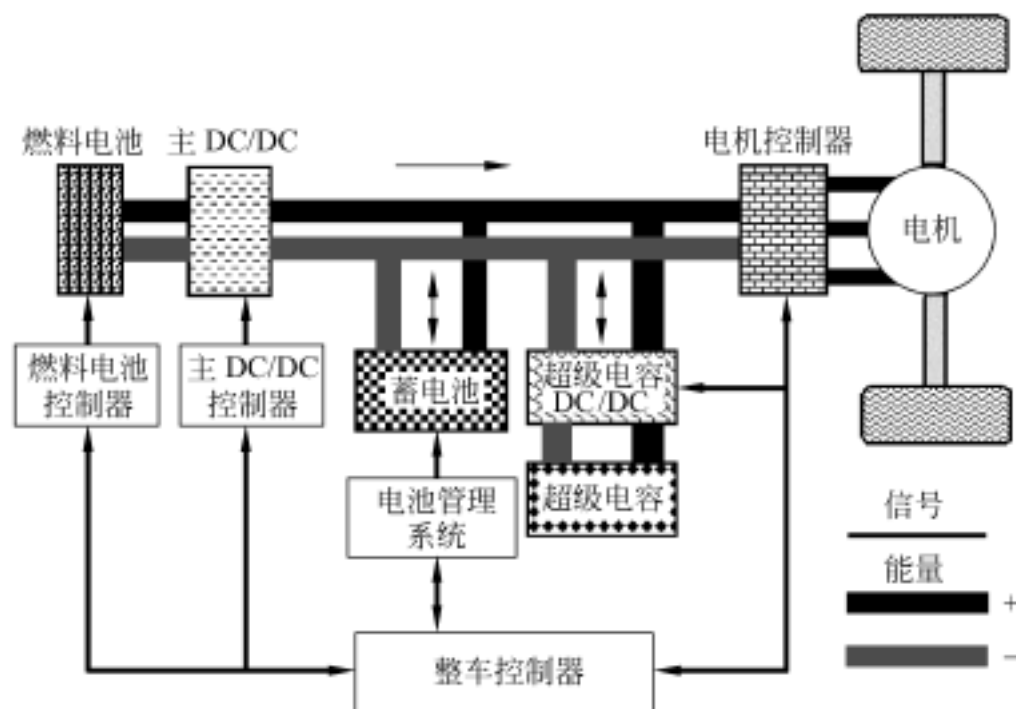


图 3-2 燃料电池汽车动力系统结构图(FC + B + C)

3.2 燃料电池系统

单独的燃料电池堆是不能发电并应用于汽车的,它必须和燃料供给与循环系统、氧化剂供给系统、水/热管理系统和一个能使上述各系统协调工作的控制系统组成燃料电池发电系统,简称燃料电池系统(fuel cell system),才能对外输出功率。

3.2.1 燃料电池系统的基本结构

如图 3-3 所示,燃料供给与循环系统在提供燃料的同时循环回收阳极排气中未反应的燃料。目前最成熟的技术还是以纯氢为燃料,而且系统结构相对简单,仅由氢源、稳压阀和循环回路组成。

燃料电池的功率密度随反应物——氢和氧压力的升高而增大。所以,目前有些燃料电池采用提高空气供给压力(一般是 2atm ~ 3atm)的方法来提高燃料电池系统的功率密度,但是空气在被加湿的情况下,由于水蒸气的存在,将减小氧气的分压,而且空气中大量的非反应物——氮气同时被加压,如果没有从燃料电池排出的空气中回收能量的良好措施,则会大大降低 PEMFC 的净输出功率和系统效率,所以其作用受到了限制。这种空气加压系统的另一个问题是不可能提供较大的过量空气供给,因为过量空气供给越大系统效率越低,而大量的过量空气有助于改善

燃料电池的性能。如果采用环境压力(常压)空气作为氧化剂,通过对膜加湿(取消对空气加湿、加压)、加大过量空气供给以及采用先进的冷却方法等一系列措施,则简化了结构,提高了效率,可以克服加压燃料电池的一些不足。还有一类燃料电池采用变压系统,即根据燃料电池的负荷来调节系统中空气和氢气的压力,虽然也表现出不错的性能,但结构比较复杂。

电池内部的水/热管理是燃料电池的难点和重点,也是电池性能好坏的关键。如图 3-3 所示,产物水首先通过燃料电池堆的反应区冷却电堆本身,在冷却过程中水蒸气被加热至燃料电池的工作温度,被加热的水再与反应气体接触,起到增湿的效果。除了在增湿过程中,部分热量被反应气体带走外,还需一个水/空气热交换器,将多余的热量带走,防止系统热量积累,造成电池温度过高。控制系统则根据负载对燃料电池功率的要求,或随燃料电池工作条件(压力、温度、电压等)的变化,对反应气体的流量、压力、水/热循环系统的水流速等进行综合控制,保证电池正常有效地运行。

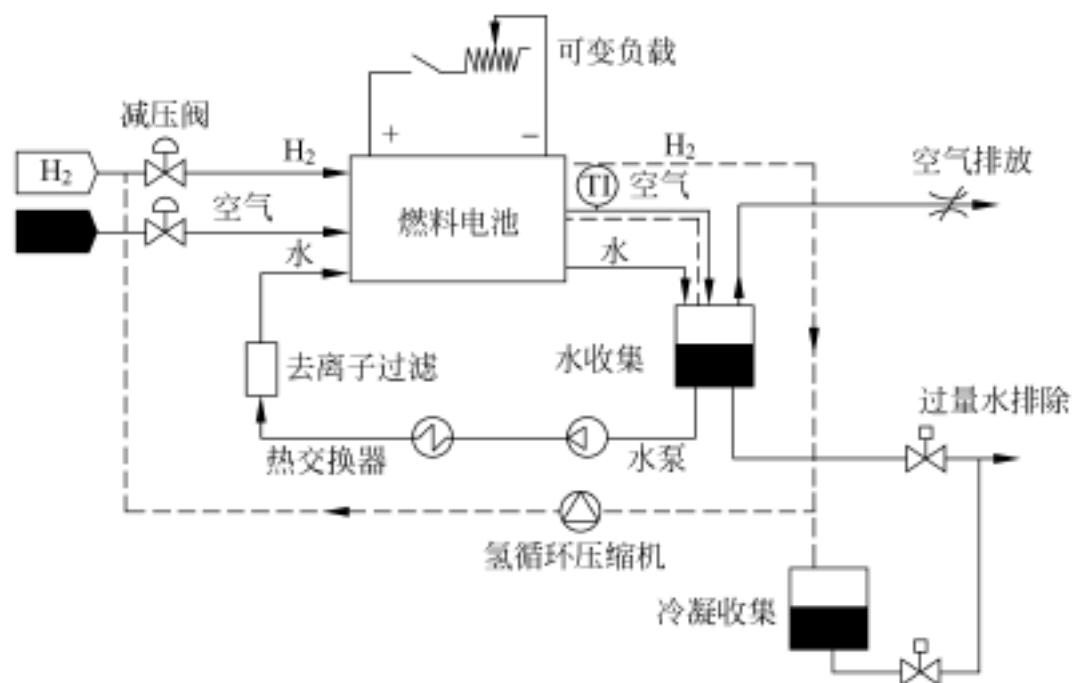


图 3-3 典型的质子交换膜燃料电池系统图
(图中虚线表示回收利用的气体)

该控制系统由多种功能不同的传感器、阀件、泵、调节控制装置、管路、控制单元等组成。随着电堆技术的日趋成熟,控制系统成为决定燃料电池系统性能和制造成本的瓶颈,因此必须对这些零部件进行系统的耐久性和安全性研究,并且制定适合车辆应用的统一标准。

燃料电池系统的主要研究热点包括:使用轻质材料,优化设计,提高燃料电池系统的比功率;提高 PEMFC 系统快速冷启动能力和动态响应性能;研究具有负荷跟随能力的燃料处理器;对电池或超级电容、氢气存储进行系统优化设计,提高系统的效率和调峰能力,回收制动能量等。

3.2.2 质子交换膜燃料电池与传统内燃机的比较

燃料电池是静态能量转换装置,基本没有运动部件,具有效率高、无污染、过载能力强、噪声小、振动小等优点。

燃料电池堆理论上能量效率可接近 83%,实际效率已达 50%~60%。根据 NEDC 工况在转鼓试验台测试的 NECAR4 的能耗分布如图 3-4 所示,其中:1—燃料电池的热损失所占的百分比;2—附件(包括燃料电池附件及车载附件)消耗的能量所占的百分比;3—驱动系统部件如电机、控制器及传动系统等因效率问题而损失的能量所占的百分比;4—系统效率,即驱动轮处获得的净驱动能量占燃料电池消耗的燃料能量的百分比。

由于传统的汽车内燃机经常工作在负荷较低的工况下,因此燃油效率差,而燃料电池在低负荷时的系统效率较高,这一特点更适合于汽车应用。传统内燃机和燃料电池的效率曲线如图 3-5 所示。

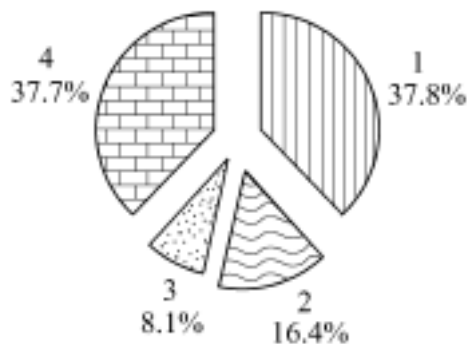


图 3-4 NECAR4 能流图

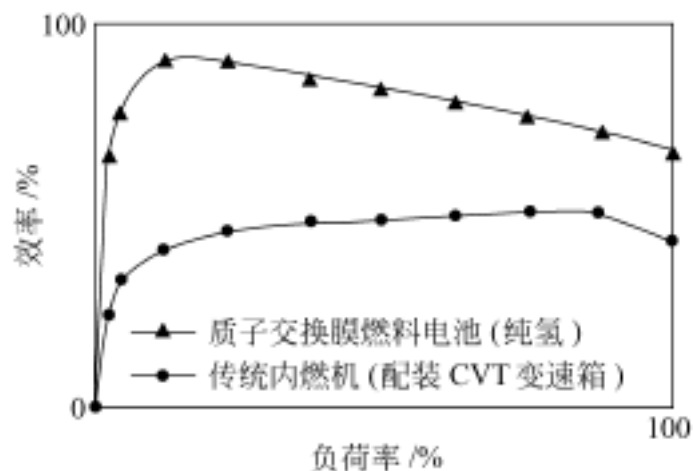


图 3-5 效率与负荷率曲线

3.3 DC/DC 变换器

燃料电池输出的电压一般来说比电动汽车动力总线的电压要低,且特性比较软,即随着输出电流的增加,电压下降幅度比较大。为了实现燃料电池输出电压与动力总线电压匹配,就需要有一个 DC/DC(直流/直流)变换器。另外,从控制的角度讲,为了控制燃料电池的能量输出,也需要有一个 DC/DC 装置。

3.3.1 DC/DC 变换器的作用

混合型燃料电池汽车的动力系统通常采用燃料电池加电池(如:锂离子电池、氢-镍电池等)的混合结构。基于制造工艺和产品可靠性的考虑,燃料电池系统的输出电压通常比较低,一般在 240V~430V,而且燃料电池的外特性(电压随电流

的变化)曲线斜率较大,当输出电流变化时,输出电压波动较大。另一方面,设计较高的动力总线电压等级可以提高驱动系统的效率和减小驱动系统的体积及重量,电池组的标称电压一般设计在 380V 以上,而且,电池的充放电特性及其使用安全性也要求电池的端电压在较小的范围内变化。因此,燃料电池难以直接和电池并联使用。解决这一问题的方法是在燃料电池的输出端串接一个 DC/DC 变换器,对燃料电池的输出电压进行升压变换及稳压调节,使 DC/DC 变换器的输出电压和电池工作电压相匹配。同时,DC/DC 变换器可以对燃料电池的最大输出电流和功率进行控制,起到保护燃料电池系统的目的。

3.3.2 DC/DC 变换器的基本工作原理

升压变换的 DC/DC 变换器一般有两种结构:Boost 型和全桥逆变式。

1) Boost 型变换器

Boost 型变换器也称为并联开关变换器,其电路原理如图 3-6 所示,由开关管 V_1 、二极管 VD_1 、储能电感 L_1 和输出滤波电容 C_1 组成。当 V_1 导通时,能量从输入端 AO 流入,并储存于电感 L_1 中,由于 V_1 导通期间正向饱和管压降很小,二极管 VD_1 反偏,变换器输出由滤波电容 C_1 提供能量。当 V_1 截止时,电感 L_1 中的电流不能突变,它所产生的感应电势阻止电流减小,感应电势的极性为右正左负,二极管 VD_1 导通,电感中储存的能量经二极管 VD_1 流入电容 C_1 ,并供给输出端 BO 。如果开关管 V_1 周期性地导通和截止,开关周期为 T ,其中,导通时间为 t_{on} ,截止时间为 $T - t_{on}$,则 Boost 型变换器输出电压 U_{BO} 和输入电压 U_{AO} 之间的关系为

$$U_{BO} = U_{AO} \times \frac{T}{T - t_{on}} \quad (3-1)$$

由式(3-1)可知,当开关周期 T 不变、改变导通时间 t_{on} 时,就能获得所需的上升的电压值。

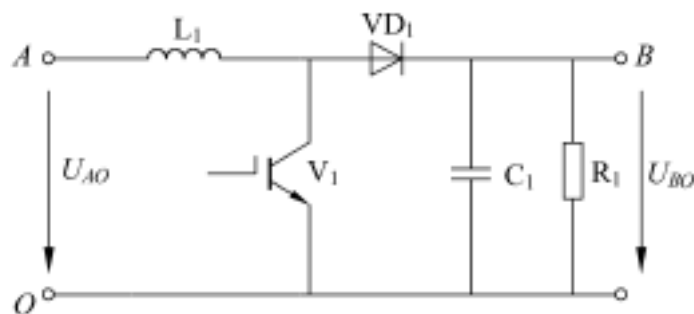


图 3-6 Boost 型变换器电路原理图

当开关管 V_1 导通时,其饱和压降只有 2V ~ 3V,在 V_1 截止期间,二极管 VD_1 的压降为 1V 左右,因此,Boost 型变换器的效率可以高达 90% 以上;而且其电路结构简单、器件少,作为车载变换器,还具有重量轻、体积小特点。

2) 全桥逆变式变换器

全桥逆变式变换器的电路原理如图 3-7 所示,主要由开关管 $V_1 \sim V_4$ 、中频升压变压器 TR 和输出整流二极管 VD_1 、 VD_2 组成。开关管 $V_1 \sim V_4$ 构成全桥逆变电路,需要两组相位相反的驱动脉冲进行控制:当 V_1 和 V_4 同时导通、 V_2 和 V_3 同时截止时,输入电压 U_{AC} 通过 V_1 和 V_4 加到中频变压器 TR 的原边线圈上,原边电压 $U_{TR} = U_{AC}$;当 V_1 和 V_4 同时截止、 V_2 和 V_3 同时导通时,输入电压通过 V_2 和 V_3 反方向地加到中频变压器 TR 的原边线圈上,原边电压 $U_{TR} = -U_{AC}$;当开关管 $V_1 \sim V_4$ 同时截止时, $U_{TR} = 0$ 。这样,通过开关管 $V_1 \sim V_4$ 的交替导通和关断,将输入的直流电压转换成交流电压加到变压器上,其副边电压通过 VD_1 和 VD_2 整流,输出直流电压。如果开关管 $V_1 \sim V_4$ 开关周期为 $2T$,其中,导通时间为 t_{on} ,变压器副、原边线圈变比为 n ,则全桥逆变式变换器输出电压 U_{BD} 和输入电压 U_{AC} 之间的关系为

$$U_{BD} = U_{AC} \times n \times \frac{t_{on}}{T} \quad (3-2)$$

由式(3-2)可知,当采用升压变压器时, $n > 1$,可获得变换器的升压特性;当开关周期 T 不变,改变导通时间 t_{on} 时,就能调节输出的电压值。

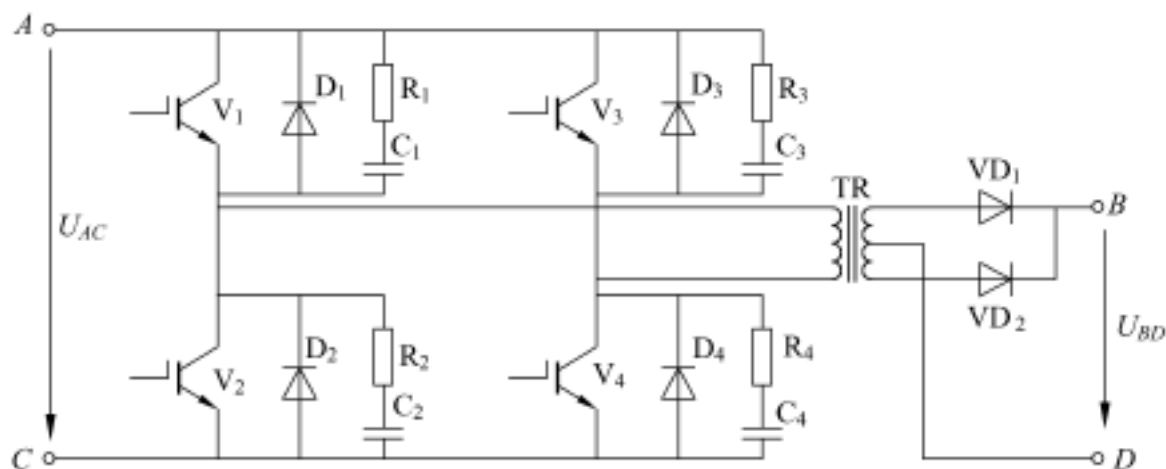


图 3-7 全桥逆变式变换器的电路原理图

与 Boost 电路相比,全桥逆变式变换器的输入和输出是通过中频变压器隔离的,由于变压器具有一定的频率响应带宽,在变换器输入端和变压器原边电路产生的部分高频干扰信号不能传输到变换器的输出端,因此,作为车载变换器,全桥逆变式结构具有较好的电磁兼容性能。

在燃料电池汽车中,除了上述两种升压变换器外,还有对超级电容进行充放电控制的双向 DC/DC 变换器,它位于电压总线与超级电容之间。当总线电压对超级电容进行充电时,它起到降压变换器的作用;当超级电容对电压总线释放能量时,它起到升压变换器的作用。此外,车上还有对 DC24V 低电压电池进行充电的降压变换器,由于电压变比大(输入 384V、输出 26V)、输出功率较小(一般只需要 5kW ~ 6kW),因此,该降压变换器一般采用推挽式或半桥式的电路结构形式。

3.3.3 燃料电池汽车 DC/DC 变换器的关键技术

在燃料电池汽车动力系统中,DC/DC 变换器的输入端是燃料电池的输出电压,DC/DC 变换器的输出端和电池并联,为车辆驱动系统等负载提供能量。燃料电池汽车 DC/DC 变换器的关键技术之一是设计合理的输出特性,实现从燃料电池输出电压到电池工作电压之间的变换,同时,DC/DC 变换器的输出特性还应该限制燃料电池的输出功率和电流,保证燃料电池的安全运行。

DC/DC 变换器的控制结构如图 3-8 所示,根据整车动力系统的设计要求,确定 DC/DC 变换器的输出电压给定值,通过输出电压的闭环控制实现变换器恒压

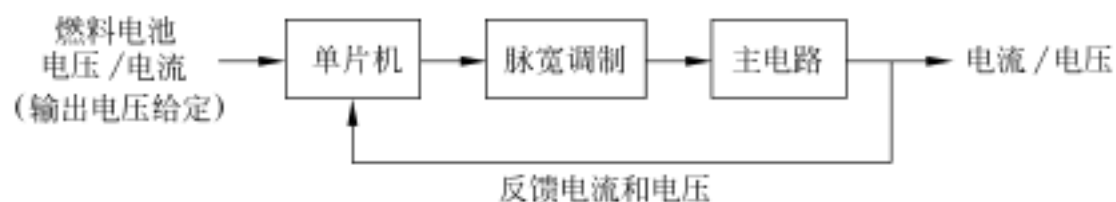


图 3-8 DC/DC 变换器的控制结构框图

输出,如图 3-9 中的 AB 段所示。随着输出电流的增大,燃料电池输出电压下降,DC/DC 变换器实时检测燃料电池的输出电压,当该电压下降到下限值时,DC/DC 就根据燃料电池的输出功率进行恒功率输出,如图 3-9 中的 BC 段所示。由于在输出电压下限值时的燃料电池输出功率随着燃料电池反应温度和压力等外部环境条件的变化而变化,因此, BC 段的功率大小不能事先给定,只能通过 DC/DC 变换器的控制系统通过检测燃料电池输出电压和电流来实时地调节 BC 段功率给定的大小,这是保证燃料电池不发生过电流的重要措施,也是车载 DC/DC 变换器的关键技术。图 3-9 中的 CD 段为恒流特性,其电流值决定了 DC/DC 变换器最大输出电流。

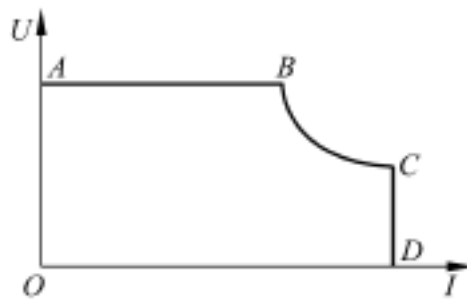


图 3-9 DC/DC 变换器外特性

DC/DC 变换器与其他车载电气的电磁兼容性是开发 DC/DC 变换器的另一项关键技术。由于采用开关技术,DC/DC 变换器将产生宽频电磁噪声。对于频率 20kHz 的开关电路而言,产生的电磁噪声频谱范围主要在 15kHz ~ 5MHz 之间。电磁噪声通过电缆与电缆之间的互感及分布电容进行传输,这会严重影响电气控制系统的正常运行。电磁兼容措施应该从设备级和分系统级两个层次进行。设备级措施主要包括:DC/DC 变换器主电路与控制电路的隔离、控制电路板的合理布线以及电源去耦电容的应用。分系统级措施是为噪声信号在 DC/DC 变换器主电路与负载之间提供一条低阻抗的泄放回路,避免噪声信号通过公共地线对其他电气设备造成干扰。

3.4 驱动电机及其控制系统

驱动电机及其控制系统是燃料电池汽车的“心脏”，它的主要功能是使电能转变为机械能，并通过传动系统将能量传递到车轮驱动车辆行驶。

其基本构成有两部分：电机和控制器。电机由控制器控制，是一个将电能转变为机械能的装置。控制器的作用是将动力源的电能转变为适合于电机运行的另一种形式的电能，所以控制器本质上是一个电能变换控制装置。

目前，燃料电池车可以采用的电机驱动系统有：直流电机驱动系统、异步电机驱动系统、同步电机驱动系统和开关磁阻电机驱动系统等。

本节重点介绍采用矢量控制的异步感应电机及控制系统和稀土永磁直流电机及控制系统。

3.4.1 电机及其控制器

对于电动车用电机，其要求是：电机的过载能力强、启动转矩大、功率密度高、转矩响应快。此外，还要求电机具有一定的防尘、防水能力。

目前，电动车常用的电机有：直流有刷电机、感应电机、稀土永磁无刷直流电机及开关磁阻电机等。燃料电池电动车多采用感应电机及稀土永磁无刷直流电机。

1. 直流电机

直流电机具有控制简单、调速性能好、控制器成本低等一系列优点，经常在中、小功率驱动电机中得到应用。最常使用的直流电机是串励电机（启动转矩大）及稀土永磁直流电机（效率较高）。但是，由于直流电机含有换向器及电刷等部件，因此其最高转速较低，体积大，功率密度低，成本高，需要定期维护，在大功率驱动电机中应用较少。另外，直流电机在运行时，还易产生火花，这对于以氢气为燃料的燃料电池汽车来说，存在安全隐患。

近年来，一些研究人员对有刷直流电机的换向问题进行了深入研究，提出了一些新型的有刷直流电机设计。如果这些研究工作能够取得突破，结合电机控制器的低成本优势，新型的有刷直流电机驱动系统也会在大功率应用场合中得到更多的应用。目前，直流电机主要应用在低成本、性能要求不高的中小型电动车中。

直流电机的控制通常采用 PWM 控制方式，其控制器又称为斩波器。控制系统主要由功率开关模块和中央控制器构成，其原理如图 3-10 所示。

2. 感应电机

感应电机具有结构简单、成本低、效率较高、免维护等一系列优点，在工业上得到广泛的应用。由于感应电机没有独立的励磁绕组，其电枢绕组（定子绕组）既是

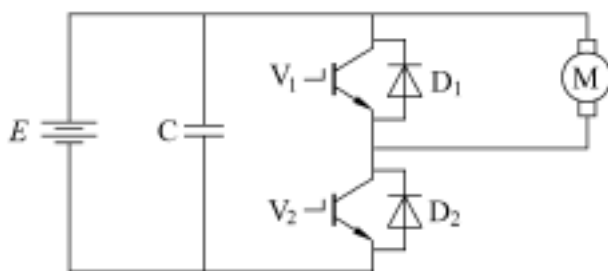


图 3-10 斩波器的原理

驱动状态: V_1 截止, V_2 受控, D_1 续流; 回馈制动状态: V_2 截止, V_1 受控, D_2 续流

励磁绕组, 又是转矩绕组, 因此感应电机属于多变量强耦合的非线性系统, 其励磁与转矩之间的耦合, 使得感应电机的控制比较困难。

随着电力电子及微电子技术的进步和运动控制理论的发展, 及新的控制技术的不断采用, 感应电机的控制技术得到质的飞跃。目前, 感应电机主要应用中、大功率的驱动系统中。

感应电机的转速公式为

$$n = \frac{60f}{p_n} (1 - s) \quad (3-3)$$

式中, n , f , p_n 及 s 分别为电机的转速、供电频率、极对数和转差率。由该式可以看出, 为了调节电机的转速, 可以采用变极、变转差率和变频调速等方案。其中, 变频调速具有调速范围宽、转速可以连续调节、效率高、转矩特性好等优点, 更适合电动车上使用。

感应电机变频驱动的关键问题是能够为电机提供变压变频电源, 同时其电压及频率应该按照一定的控制策略进行调节, 使得驱动系统具有良好的转矩转速特性。

感应电机变频系统可以采用不同的控制方式, 主要包括标量控制和矢量控制两种方式。本节的后面将进一步介绍感应电机的矢量控制系统。

3. 稀土永磁电机

稀土永磁同步电机采用稀土永磁材料, 具有效率高、功率密度大等特点, 在中、小功率的系统中有优势。但是, 稀土永磁同步电机的成本高, 而且目前使用最多的钕铁硼稀土永磁体的工作温度比较低, 电机运行时的温升不能太高。稀土永磁同步电机分为正弦波稀土永磁同步电机(通常称为稀土永磁同步电机)和方波型稀土永磁同步电机(通常称为稀土永磁无刷直流电机)。

正弦波稀土永磁同步电机的特点是, 永磁体在气隙中产生的磁场空间上按照正弦分布, 定子三相绕组为正弦分布绕组, 电机的反电动势及电机定子电流均为正弦波。高性能的正弦波稀土永磁同步电机系统通常采用矢量控制策略, 其定子电流的直轴分量为零, 其交轴电流在磁场的作用下产生电磁转矩。

稀土永磁无刷直流电机的特点是,永磁体在气隙中产生的磁场在空间按照矩形分布,定子三相绕组为集中整距绕组,电机定子电流为方波电流,电机的反电动势为梯形波。

正弦波稀土永磁同步电机及稀土永磁无刷直流电机均需要变频器供电。但是,前者需要正弦波型逆变器供电;后者只需要方波型逆变器供电。因此,稀土永磁无刷直流电机的控制器比较简单,更容易实现,成本也较低。正弦波稀土永磁同步电机产生的转矩比较平稳,目前多用在伺服系统中。稀土永磁无刷直流电机因为控制相对容易,而且对于相同容量的电机,可以产生比正弦波稀土永磁同步电机更大的转矩,因此更适用于牵引系统。但是,受绕组电感的影响,稀土永磁无刷直流电机的电流不可能是理想的方波,在换向时会发生相电流的重叠,从而引起电机的转矩产生一些脉动。

4. 开关磁阻电机

开关磁阻电机具有最简单的结构:定子采用集中绕组结构,转子无任何绕组。开关磁阻电机与感应式步进电机的结构及工作原理有些相似,均是利用在磁场作用下不同介质之间的磁拉力(Maxwell力)产生电磁转矩。开关磁阻电机与感应电机工作原理不同,后者是利用转子电流在旋转磁场的作用下产生的电磁力(Lorentz力)来产生电磁转矩。直流电机、同步电机等均是利用 Lorentz 力产生电磁转矩。

开关磁阻电机的定子和转子具有不同的极数。常采用的结构是定子、转子的极数分别为 8,6 及 6,4。

近年来,开关磁阻电机驱动系统在电动车中也得到一定的应用。开关磁阻电机主要的问题是噪声和转矩脉动。如何减小电机在低转速运行时转矩的脉动,降低电机的噪声,是开关磁阻电机能够实用的关键。

3.4.2 感应电机的矢量控制

1. 矢量控制概述

从前面的介绍可知,感应电机是多变量、非线性、强耦合的复杂系统,电机的励磁与转矩之间相互耦合,使得电机的转矩很难通过外加的信号准确控制。为了提高感应电机的动态性能,国内外研究机构进行了深入的研究,目的是探索出各种新型的控制方法,使得感应电机系统达到甚至超过直流电机的控制性能。

1971年,德国西门子公司的工程师 F. Blaschke 博士等学者提出了“感应电机磁场定向的控制原理”,对定子磁动势同时进行幅值和相位控制,这样便提出了矢量控制的概念。矢量控制的本质是从电机电磁场理论出发,运用统一电机理论,以产生相同的旋转磁场为准则,通过坐标变换及磁场定向,将感应电机的定子电流分

解为励磁和转矩两个彼此正交的分量,将感应电机等效为直流电机,实现转矩与励磁之间的解耦。矢量控制的原理可以用图 3-11 来说明。

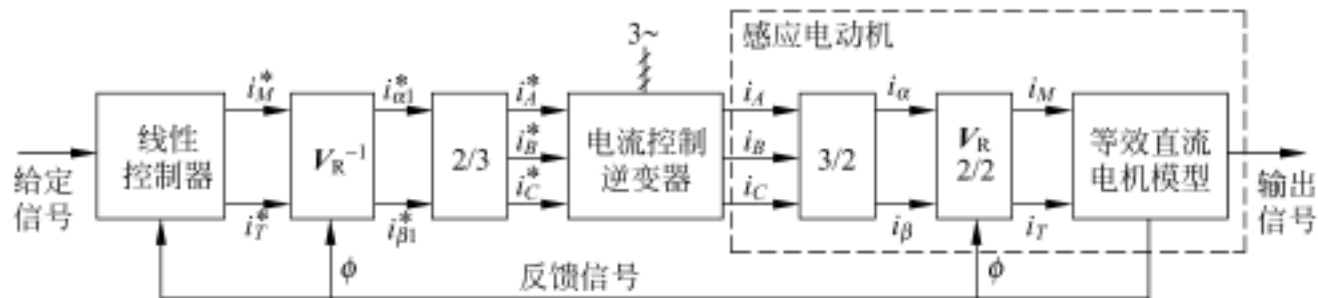


图 3-11 感应电机的矢量控制原理框图

从图 3-11 可以看出,矢量控制引入的矢量变换 V_R^{-1} 与感应电机内部的旋转变换 V_R 相抵消。如果不考虑逆变器的电流滞后,则系统相当于由线性控制器直接控制一台直流电机,亦即系统等效为图 3-12 所示的直流调速系统。

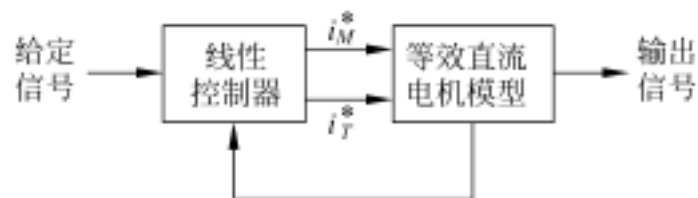


图 3-12 感应电机矢量控制的等效直流调速系统

2. 矢量控制的基本原理

1) 感应电机的数学模型

图 3-13 为感应电机定子转矩绕组和转子绕组的 A, B, C 坐标系。在研究感应电机的数学模型时,作以下假设:

定子绕组 A, B, C 在空间完全对称,彼此互差 120° 电角度;

忽略铁心饱和,各绕组的自感、互感均为线性;

忽略空间谐波;

转子绕组 a, b, c 等效为三相绕线型电机的转子绕组,绕组的匝数与定子绕组相同;

忽略电机的齿槽效应,各绕组电流产生的磁动势在气隙空间是按正弦分布的;

各绕组电压、电流、磁链的正方向为关联参考方向,符合电机惯例和右手螺旋法则。

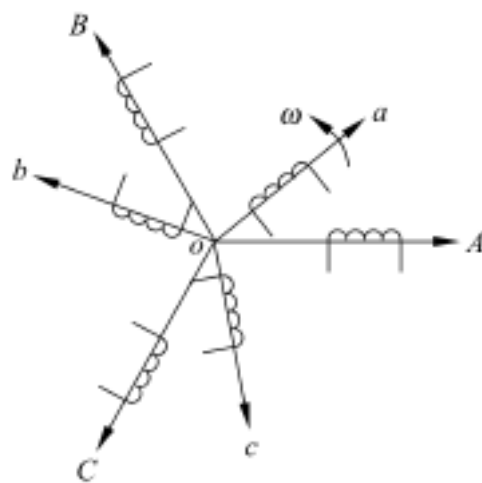


图 3-13 A, B, C 坐标下绕组的空间分布

在静止三相坐标系下的方程如下:

定子电压方程为

$$u_s = r_s \dot{i}_s + \dot{\psi}_s \quad (3-4)$$

式中, $u_s = [u_A \ u_B \ u_C]^T$, $i_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$, $\psi_s = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C]^T$, 分别为定子电压、电流和磁链向量; r_s 为定子电阻。

转子电压方程为

$$u_r = r_r \dot{i}_r + \dot{\psi}_r \quad (3-5)$$

式中, $u_r = [u_a \ u_b \ u_c]^T = 0$, $i_r = [i_a \ i_b \ i_c]^T$, $\psi_r = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$, 分别为转子电压、电流和磁链向量; r_r 为转子电阻。

定子、转子磁链方程分别为

$$\begin{cases} \psi_s = L_s \dot{i}_s + L_{sr} \dot{i}_r \\ \psi_r = L_r \dot{i}_r + L_{rs} \dot{i}_s \end{cases} \quad (3-6)$$

式中, 定子、转子的自感及互感矩阵分别为

$$L_s = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_s & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_s \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_r & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_r & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_r \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = L_{rs}^T = L_m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2/3) & \cos(\theta - 2/3) \\ \cos(\theta - 2/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2/3) \\ \cos(\theta + 2/3) & \cos(\theta - 2/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

转矩公式

$$L_s = L_m + L_{s1}$$

$$L_r = L_m + L_{r1}$$

式中, L_s , L_r 和 L_m 分别为定子、转子电感和励磁电感; L_{s1} 和 L_{r1} 分别为定子、转子的漏感; θ 为转子旋转的电角度, 即转子 a 绕组与定子 A 绕组之间的夹角(电角度)。

电机的电磁转矩反应了电机的磁场储能相对于转子旋转角度的变化量。当电机的铁心不饱和时, 电机的磁场储能 W_m 与磁共能 W_m 相等。

$$W_m = W_m = \frac{1}{2} i^T L i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^T & i_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

电机产生的电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{W_m}{r} = \frac{1}{2} i^T \frac{L}{r} i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^T & i_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{L_s}{r} & \frac{L_{sr}}{r} \\ \frac{L_{rs}}{r} & \frac{L_r}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^T & i_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_{sr}}{r} \\ \frac{L_{rs}}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \\ T_e &= \frac{1}{2} \left(i_r^T \frac{L_{rs}}{r} i_s + i_s^T \frac{L_{sr}}{r} i_r \right) \end{aligned}$$

式中, r 为转子转角。由于定子、转子之间的互感矩阵随着转角变化, 是时变电感矩阵, 因此转矩公式比较复杂。

2) Clarke 变换与 Park 变换

将定子三相系统的绕组变换为静止坐标系下的二相绕组, 变换的原则是, 变换前后系统总磁动势不变, 即三相系统的总磁动势等于二相系统的总磁动势。

$$C_{3/2} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{2/2} & -\sqrt{2/2} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$C_{2/3} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{2/2} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{2/2} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

坐标变换 $C_{3/2}$ 称为 Clarke 变换, $C_{2/3}$ 称为反向 Clarke 变换或 Clarke 逆变换。由于 $C_{3/2}$ 不再是方阵, 故其逆矩阵应为广义逆矩阵。 $C_{2/3} = C_{3/2}^{-1} = C_{3/2}^T$ 为 $C_{3/2}$ 的右逆矩阵, 满足

$$C_{3/2} \cdot C_{2/3} = C_{3/2} \cdot C_{3/2}^{-1} = I$$

同样, 转子 a, b, c 空间三相绕组变换到 α, β 坐标系下静止二相绕组的变换矩阵为

$$C_{3r/2} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} \cos & \sqrt{2/3} \cos(+ 120^\circ) & \sqrt{2/3} \cos(- 120^\circ) \\ \sqrt{2/3} \sin & \sqrt{2/3} \sin(+ 120^\circ) & \sqrt{2/3} \sin(- 120^\circ) \end{bmatrix}$$

, 静止二相到 a, b, c 旋转三相之间的变换矩阵为

$$C_{2/3r} = C_{3r/2}^{-1} = C_{3r/2}^T = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} \cos & \sqrt{2/3} \sin \\ \sqrt{2/3} \cos(+ 120^\circ) & \sqrt{2/3} \sin(+ 120^\circ) \\ \sqrt{2/3} \cos(- 120^\circ) & \sqrt{2/3} \sin(- 120^\circ) \end{bmatrix}$$

设坐标轴为 M 和 T , 将坐标系与气隙磁场同步旋转, 并且使得坐标轴 M 与转子磁场方向保持相同, 如图 3-14 所示, 其中 M 轴是磁链轴, T 轴是转矩轴, M 轴与 α 轴之间的夹角 ϕ 是转子磁链角。由于气隙磁场是旋转磁场, 而旋转角速度就是同步角速度, 转子磁链等于气隙磁链与转子漏磁链之和, 转子磁链也是以同步角速度 ω_s 旋转的旋转磁链, 因而

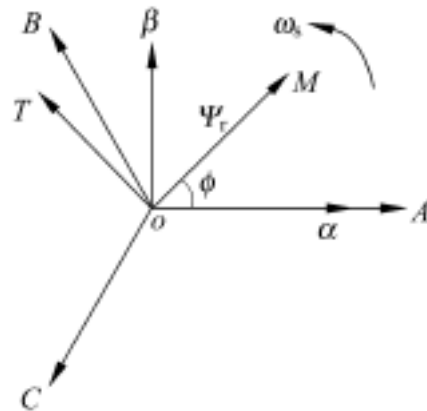


图 3-14 静止坐标系与同步旋转坐标系

转子磁链角为

$$\frac{d}{dt} = \omega_s$$

$$\phi = \arctan \frac{\Psi_r}{\Psi_m}$$

设静止二相坐标系 α, β 中的绕组与同步旋转坐标系 M, T 中的绕组具有相同的匝数, 以产生相同旋转磁动势为原则, 将这两种坐标系中的电流进行变换, 可以得到

$$\begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} = C_{2/2r} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

及

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{2r/2} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

变换 $C_{2/2r}$ 称为 Park 变换, $C_{2r/2}$ 称为反向 Park 变换, 或 Park 逆变换。

3) 矢量控制系统的方程

前面已经介绍了矢量控制的基本概念。感应电机的矢量控制是通过坐标变换及磁场定向, 将感应电机这一多变量、强耦合的非线性系统解耦并线性化, 得到同他励直流电机类似的特性。

将感应电机在静止三相坐标系下的变量通过 Clarke 变换及 Park 变换, 变换到同步旋转坐标系下。可以将静止坐标系下的交流变量变换为直流变量。与此同时, 使旋转坐标系的直轴 (记为 M 轴) 与转子磁链同方向, 即实现转子磁场定向, 如图 3-15 所示, 可以得到感应电机矢量控制系统的方程。

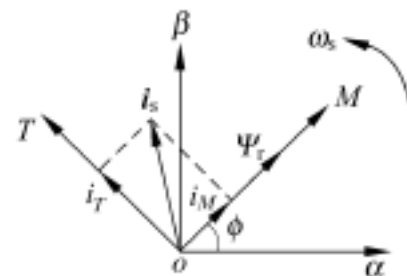


图 3-15 磁场定向控制原理

定子电压方程为

$$\mathbf{u}_{MT}^s = r_s \mathbf{i}_{MT}^s + \begin{bmatrix} p & -\omega_s \\ \omega_s & p \end{bmatrix} \mathbf{i}_{MT}^s$$

其中, $\mathbf{u}_{MT}^s = [u_M^s \ u_T^s]^T$, $\mathbf{i}_{MT}^s = [i_M^s \ i_T^s]^T$ 和 $\mathbf{i}_{MT}^s = [i_M^s \ i_T^s]^T$ 分别为在同步旋转坐标

系下定子电压、电流和磁链向量; p 是微分算子。

$$p = \frac{d}{dt}$$

转子电压方程为

$$\dot{u}_{MT} = r_r \dot{i}_{MT} + \begin{bmatrix} p & -s \\ s & p \end{bmatrix} \dot{i}_{MT} = 0$$

定子、转子磁链方程分别为

$$\dot{\psi}_{MT}^s = L_s \dot{i}_{MT}^s + L_m \dot{i}_{MT}^s$$

$$\dot{\psi}_{MT}^r = L_m \dot{i}_{MT}^s + L_r \dot{i}_{MT}^r$$

对于转子磁场定向的矢量控制,在上式中,令 $\dot{i}_{MT}^r = 0$,可以得到

$$\dot{i}_{MT}^r = \frac{L_m}{1 + T_r p} \dot{i}_{MT}^s \quad (3-11)$$

式中, T_r 为转子时间常数, $T_r = L_r / r_r$ 。

由式(3-11)可以看出,采用转子磁场定向后,在同步旋转坐标下,感应电机的转子磁链只受定子 M 轴电流分量的控制。因此 M 轴称为转子磁场轴,定子电流的 M 轴分量为感应电机的励磁电流。

采用转子磁场定向控制时,感应电机的电磁转矩公式为

$$T_e = p_n \frac{L_m}{L} \dot{i}_{MT}^s \dot{i}_{MT}^r \quad (3-12)$$

从该式可以看出,采用转子磁场定向的矢量控制策略后,感应电机的电磁转矩与转子磁链和定子电流在 T 轴的分量的乘积成正比。如果控制感应电机的励磁电流,使得转子磁链恒定,则电磁转矩只与定子电流在 T 轴的分量成正比,该电流分量称为转矩分量。

从矢量控制系统的方程可以得出,采用转子磁场定向后,感应电机相当于他励直流电机,定子电流的励磁分量决定电机的转子磁链,定子电流的转矩分量决定电机的电磁转矩。

3. 燃料电池电动汽车感应电机的矢量控制系统实例

在国家“十五”863”电动汽车重大专项——燃料电池城市客车项目中,其电机驱动系统采用感应电机变频控制系统。其中技术方案之一是感应电机矢量控制系统。图 3-16 是系统的原理图。

该系统是全数字化矢量控制系统,控制单元采用了 DSP 等大规模集成电路,功率单元采用多 IGBT 并联技术及先进的母排技术。算法上,逆变器采用电压开关矢量型 PWM 逆变器。转子磁链采用电压、电流组合模型法进行计算。电机运行在较低的速度时,采用电流模型法计算转子磁链;电机运行在中、高转速时,采用电压模型法计算转子磁链。系统的转矩根据电动车的特点设定。磁链按照电机的

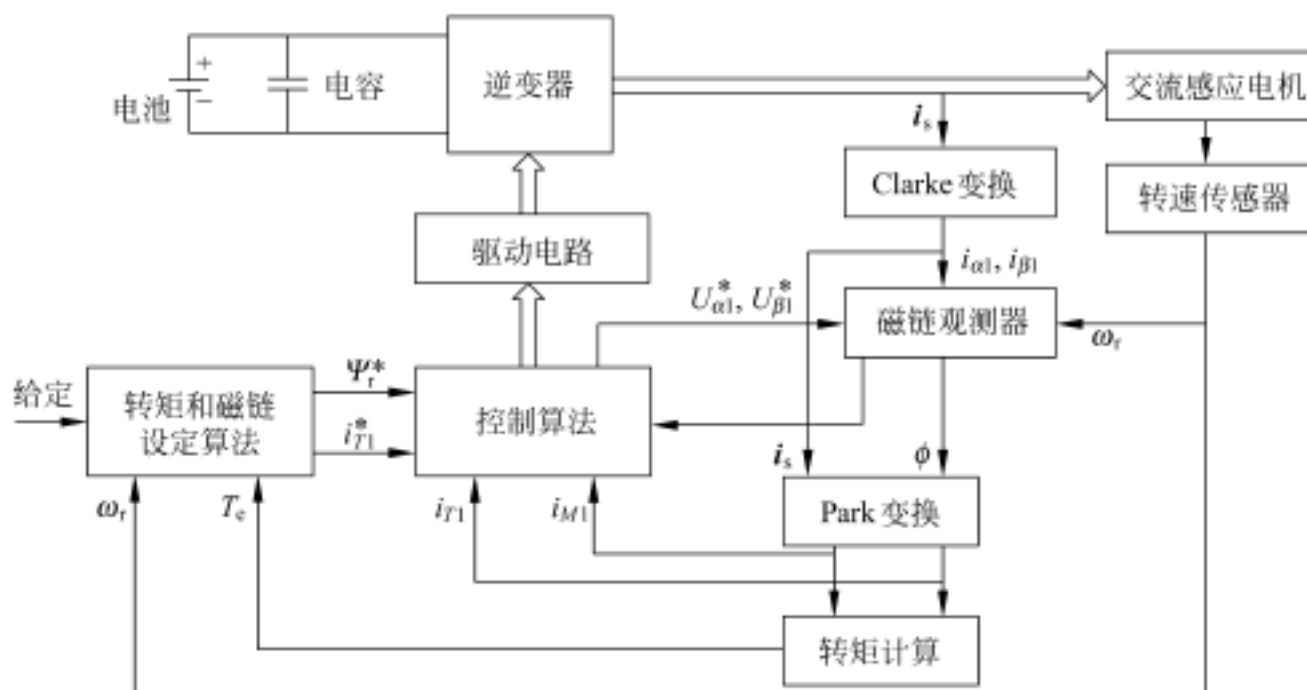


图 3-16 矢量控制原理

转速设定。通常,当电机运行在低速时的恒转矩区,磁链保持常值;当电机运行在恒功率区及转差限制的高速区时,磁链将随着转速的增加而逐渐降低。另外,磁链的设定可以根据电机效率优化策略来确定。

3.4.3 无刷直流电机

无刷直流电机产生的反电动势为梯形波,是非正弦波,因此难以采用坐标变换进行分析。应直接在本身的相变量上建立数学模型。

如果电机的三相绕组在空间上完全对称,同时假设电机的磁场不饱和,并忽略涡流及磁滞损耗,则电机的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

式中, u , e 和 i 分别为定子相绕组的电压、电动势和电流; L 和 M 分别为每相绕组的自感和彼此之间的互感。对于三相绕组为 Y 型连接,而且没有中线的情况,三相电流满足

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

则电机的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

电机的输出功率为

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

电机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{P}{\omega_m}$$

式中, ω_m 为转子机械角速度。

下面以两两导通三相星形连接为例,给出无刷直流电机的平均电磁转矩公式。假设无刷直流电机永磁体在气隙中产生的磁感应强度为方波,在空间占 180° 电角度;定子绕组为 60° 相带的集中整距绕组,定子电流为在空间对称的梯形三相电流,各相彼此相差 120° 电角度;忽略电枢反应及铁损、磁损。当绕组相电流与对应的反电动势相位完全相同时,电机产生的电磁转矩为

$$T_e = \frac{2 E_a I_{DC}}{\omega_m} = C_T I_{DC} \quad (3-13)$$

式中, E_a 为反电动势幅值; I_{DC} 为相绕组电流的幅值; C_T 为转矩常数。可见,永磁无刷直流电机与永磁有刷直流电机具有相同形式的转矩公式。

上述公式是通过假设电机绕组电流与反电动势相位相同的条件得到的。此时,电机具有恒转矩特性,即在基速以下,只要保持绕组电流为最大值,电机就可以产生恒定的最大转矩。对于电机在基速以上运行的情况,由于永磁铁自身无法弱磁,只能通过其他方式进行弱磁。目前有两种弱磁的方法,其一是增加额外的励磁绕组;其二是利用电枢反应进行弱磁。对于第一种方法,通过控制额外励磁绕组的电流,使其产生的磁动势与永磁体产生的磁动势方向相反,即可达到弱磁的目的。对于第二种方法,控制绕组的电流,使其在相位上超前其对应的反电动势一定的角度,电枢绕组产生的磁动势与永磁体产生的磁动势不再正交,利用直轴去磁电流引起的去磁电枢反应,可以实现电机的弱磁。目前主要采用第二种方法。

上述分析假设电机绕组为集中绕组,气隙磁感应强度为方波,绕组电流也为方波。事实上,由于绕组电感的影响,电流并非理想的方波,在换向时,不同相绕组会发生电流重叠。此外,由于漏磁及磁路饱和等一些因素的影响,气隙磁感应强度并非理想的方波。因此无刷直流电机的电磁转矩会发生一些脉动。

无刷直流电机与正弦波型永磁同步电机相比,前者的优点是,控制器简单,输出转矩大,缺点是转矩脉动大一些。后者的优点是,转矩脉动较小,但是控制器较复杂,对于同容量的电机,其转矩比无刷直流电机略小。

3.4.4 燃料电池汽车电驱动系统的研究方向

燃料电池电动汽车与其他类型的电动汽车一样,均要求其电驱动系统具有高可靠性、高性能、高效率、低成本。此外,就目前技术的发展而言,燃料电池电动汽车的成本是非常高的,其关键是燃料电池技术复杂,价格昂贵。对于燃料电池电动车的电机驱动系统,更强调系统具有良好的转矩控制性能和高效率,同时可以接受相对高的价格。

燃料电池电动汽车应采用感应电机及无刷直流电机驱动系统。无刷直流电机系统应用在数十千瓦以下的中、小功率的系统中,如燃料电池轿车;感应电机应用在数十千瓦以上的中、大功率系统中,如燃料电池客车。此外,下列问题也是在燃料电池电动汽车电驱动系统研究工作中应该考虑的问题。

1) 感应电机的效率优化控制

对于电动车辆,其最经常的运行工况是在平坦道路上等速行驶,此时电机处于轻载状态。驱动系统在轻载时的效率极大地影响着电动车辆的续驶里程。感应电机运行在接近额定功率时,其效率较高。但是,对于轻载运行时,由于励磁损耗所占的比重较大,此时电机的效率较低。如何提高感应电机轻载运行时的效率,是燃料电池电动汽车必须解决的课题。

感应电机的效率优化,其目标是从降低电机的铁磁损耗出发,探索一种新的控制方法,在确保系统具有高性能转矩特性的前提下,电机的励磁除了受转速控制外,还与电动汽车的运行工况联系起来,使得在轻载状态下,能降低电机的励磁电流,降低磁链损耗,提高电机的效率,实现电机效率最优化。

此外,当电动汽车处于制动状态时,电机实现回馈制动可以提高车辆的续驶里程。对于感应电机驱动系统,在制动状态下,为了维持电机的磁场,电机需要一定的能量进行励磁。只有当回馈制动的能量大于励磁所需的能量时,能量回馈才是有意义的。所以提高轻载时的效率,可以降低励磁能量,提高制动能量利用率,可以进一步提高车辆的续驶里程。

2) 提高电驱动系统的鲁棒稳定性

用于电动汽车中的电机通常具有两个显著的特点,其一是电机具有较高的功率密度,电机的电磁负荷比较大;其二是由于车辆的运行工况较复杂,电机运行时,转速及功率变化范围都很大,并经常工作在过载状态。上述特点决定了电动车中电机的温升比较高。因此,一方面要求提高电机的绝缘等级,另一方面要解决驱动系统的鲁棒稳定性问题。对于稀土永磁电机,还要防止温升引起永磁体退磁。

电机运行环境的变化及温升的增加,会引起电机模型参数的改变,从而会影响电机的控制性能。对于感应电机而言,转子电阻会受到温度及转子电流的频率影响(集肤效应),定子、转子电感受磁场饱和的影响。采用矢量控制策略,控制器依赖于电机的模型。当模型参数发生摄动时,会影响到系统的控制性能。因此,提高系统的鲁棒性是很重要的研究课题。

近年来,不少学者深入探索了电机的鲁棒控制问题,提出了各种方法,如模型参考自适应控制(MRAS)、变结构控制(VSC)、模糊控制(fuzzy logic)、H_∞控制、神经元控制(neural network)、迭代学习控制(iterative learning control)等。这些方法从理论上极大地丰富了电驱动系统的研究内容,其中一些方法已经或正在得到利用。

3) 无传感器化

感应电机变频驱动系统通常需要转速传感器。转速传感器一般采用光学编码

器。但是,光学编码器会受到环境因素及电机的工作状态等因素的影响,因而会降低系统的可靠性,同时也增加了系统的成本。

无刷直流电机需要检测电机磁极的位置,因此需要转子位置传感器。磁极位置传感器也会受温度等环境因素的影响,因而也会降低系统的可靠性。

近年来,无速度传感器及无位置传感器系统在国内得到广泛的研究,出现了多种方案。一些成果已经得到应用。

3.5 辅助电池及其管理系统

辅助电池及其管理系统是混合型燃料电池汽车动力系统中的重要组成部分,它可以在汽车起动、加速、爬坡等工况下,需要的驱动功率大于燃料电池可以提供的功率时,释放存储的电能,从而降低燃料电池的峰值功率需求,使燃料电池工作在一个较稳定的工况下。而在汽车怠速、低速或减速等工况下,燃料电池功率大于驱动功率时,存储动力系统富余的能量,或在回馈制动时,吸收存储制动能量,从而提高整个动力系统的能量效率。

3.5.1 电池概述

电池的历史可以追溯到一个半世纪前。1859年,法国科学家普兰特(Plante)发明的铅酸电池是世界上第一个可充电的电池。1889—1901年,瑞典的扬格纳(Jungner)和美国的爱迪生(Edison)先后研制成功了铁-镍电池和镉-镍电池。这些电池在实际应用中都经历了数次结构、工艺、材料方面的改进,性能得到大幅度提高。20世纪80年代研制成功的氢-镍电池及20世纪90年代开始生产的锂离子电池,性能和寿命有了长足的进步。同时,电池从研制成功到规模化生产的周期也大大缩短。

下面首先介绍一些有关电池的名词术语。

电池的容量:指电池在一定放电条件下所能放出的电量。它分为实际容量和额定容量,用 C 表示,单位为 $A \cdot h$ (安时)。实际容量指电池在一定条件下所能输出的电量,它等于放电电流和放电时间的乘积。额定容量也称公称容量,指在一定标准所规定的放电条件下,电池应该放出的最低限度的电量。

电池的能量:指在一定标准所规定的放电条件下,电池所输出的电能,单位为 $W \cdot h$ (瓦时)或 $kW \cdot h$ (千瓦时)。它分为实际能量和标称能量,实际能量等于电池的实际容量与平均工作电压的乘积,标称能量等于电池的额定容量与其额定电压的乘积。

能量密度有质量能量密度和体积能量密度之分。质量能量密度指电池单位质量所能输出的电能,单位为 $W \cdot h / kg$ (瓦时/千克)。体积能量密度指电池单位体积所能输出的电能,单位为 $W \cdot h / L$ (瓦时/升)。

电池的使用寿命:指在规定条件下,电池的有效寿命期限。由于电池内部短路或容量达不到额定要求而造成电池使用失效,其使用寿命终止。电池充电和放电一次称为一个循环。按一定的测试标准,当电池容量降到某一规定值以前,电池承受的充放电循环次数,称为电池的循环使用寿命。

电池的功率:指在一定的放电制度下,单位时间内电池输出的能量,单位为 W(瓦)或 kW(千瓦)。单位质量或单位体积的电池输出的功率称为功率密度,单位为 W/kg 或 W/L。

电池的放电制度:指放电速率、放电形式、终止电压和温度。放电速率简称放电率,常用小时率和倍率表示。小时率指以放电时间表示的放电率,即以某电流放电至规定的终止电压所经历的时间(h)。倍率指电池放电电流的数值为额定容量数值的倍数。终止电压指电池放电时电压下降到不宜再继续放电时的最低工作电压。

目前应用于电动汽车的动力电池主要有铅酸电池、氢-镍电池、锂离子电池等,其性能对比如表 3-1 所示。

表 3-1 电池的性能比较表^[11]

种类	特点	问题	能量密度		功率密度 /(W/kg)	寿命 /充电次数	成本
			/(Wh/kg)	/(Wh/L)			
密封 铅酸	功率密度较大,安全	能量密度低	35	80	200	400~800	低
氢-镍	功率密度和能量密度大	成本高,温度特性差	65	155	200	600~1200	较高
镍-锌	功率密度和能量密度大	寿命低	70	130	200	300~400	较高
锂 离子	高电压,高能量密度	成本高	110	160	200	500	很高

3.5.2 氢-镍电池

1. 工作原理

氢-镍(Ni-MH)电池属于碱性电池,它的许多基本特性和镉-镍(Ni-Cd)电池相似,但氢-镍电池不存在重金属污染问题,被称为“绿色电池”。20世纪70年代荷兰 Philips 公司成功运用 LaNi₅ 储氢合金开发了 Ni-MH 电池,但是由于电池容量衰减太快,对其的利用进展很慢。20世纪80年代 Philips 公司制成了 LaNi_{2.5}Co_{2.5} 储氢合金材料,成功研制了 Ni-MH 电池。20世纪90年代随着电动汽车,尤其是混合动力汽车研究开发的需要, Ni-MH 电池向高能量动力电池的方向迅速发展。

氢-镍电池充放电反应机理可以由图 3-17 来说明^[12]。

Ni-MH 电池正极的活性物质为 NiOOH(放电时)和 Ni(OH)₂ (充电时), 负极板的活性物质为 H₂ (放电时)和 H₂O(充电时), 电解液采用 30% 的氢氧化钾, 电化学反应过程如图 3-17 所示。

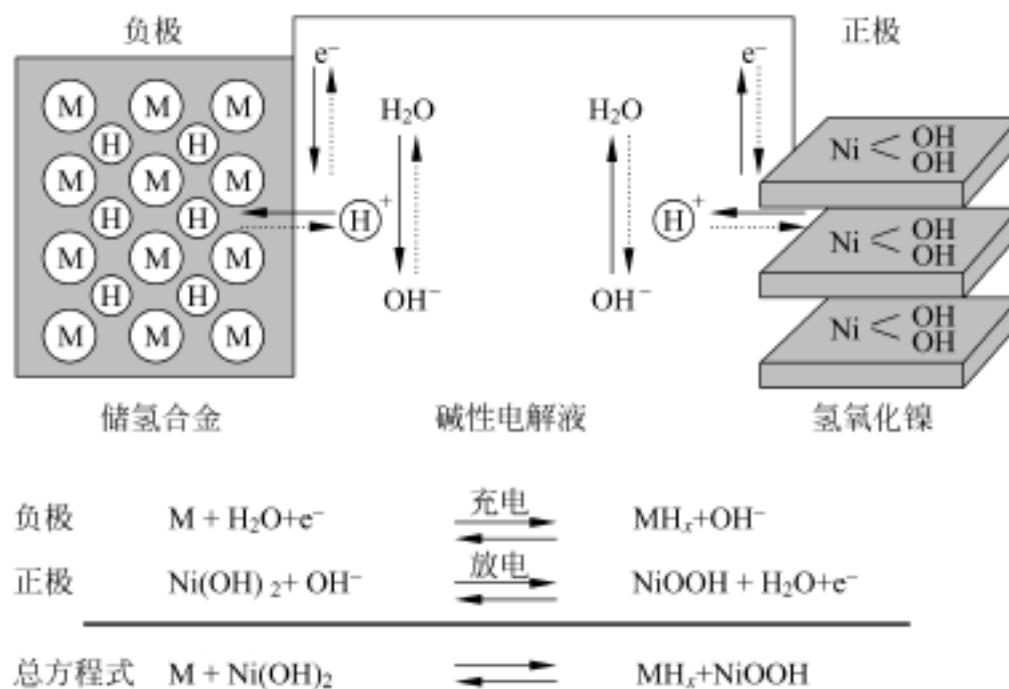


图 3-17 Ni-MH 电池工作原理示意图

目前 Ni-MH 电池所能达到的性能指标为: 单体电池的标称电压为 1.2V; 能量密度(3h)为 55 W·h/kg ~ 70 W·h/kg; 功率密度为 160 W/kg ~ 500 W/kg; 快速充电: 从满容量的 40% 充到 80% 为 15 min; 工作温度为 -28 ~ +50 ; 循环使用寿命超过 1000 次(DOD = 100%)。

Ni-MH 电池的优点是: 能量密度、功率密度均高于铅酸电池和 Ni-Cd 电池, 循环使用寿命在实际电动汽车用电池中是最高的; 快速充电和深度放电性能好, 充放电效率高; 无重金属污染, 全密封, 免维护。

Ni-MH 电池的缺点为: 成本高, 价格为相同容量铅酸电池的 5 ~ 8 倍; 单体电池电压低(1.2V); 有“记忆效应”, 自放电损耗大; 对环境温度敏感, 电池组热管理要求高。

近几年来, 随着混合动力汽车的产业化和燃料电池汽车的研制开发, Ni-MH 电池受到了非常普遍的关注, 随着氢-镍电池技术的不断发展, 其能量密度、功率密度、循环寿命和快速充电能力会大幅度提高, 价格将会大幅度降低。许多公司都把 Ni-MH 电池作为今后混合动力汽车和燃料电池汽车使用的首选电池。

2. 电动汽车用 Ni-MH 电池的技术性能

世界上最早的两款商业化电动汽车——日本丰田公司的 RAV4 EV 和本田公司的 EV Plus——配备的都是 Ni-MH 动力电池。目前 Ni-MH 动力电池已经能

够批量生产,领先厂商有美国 Ovonic、日本 Panasonic、法国 Saft、德国 Varta 等。我国国内承担国家“863”电动汽车重大专项研制 Ni-MH 电池的主要单位有北京有色金属研究总院、天津和平海湾电池公司、湖南神州科技公司、江苏春兰集团公司等。国外主要电池公司 Ni-MH 电池性能指标如表 3-2、表 3-3 和表 3-4 所列。

表 3-2 日本 Panasonic 公司 Ni-MH 电池性能表^[13]

项 目	EV95	EV28	EV6 5
容量/ A · h	95	28	6 5
额定电压/ V	12	12	7 2
质量/ kg	18 .7	6 5	1 .1
能量密度/ (W · h/ kg)	63	53	44
功率密度/ (W/ kg)	200(80% DOD)	300(80% DOD)	500(50% DOD)

表 3-3 美国 Ovonic 公司 Ni-MH 电池性能表^[14]

项 目	12HEV20	6HEV28	12HEV45	12HEV60	12HEV90
额定电压/ V	12	6	12	12	12
额定容量/ A · h	20	28	45	60	90
质量/ kg	5 4	3 6	8 4	11 6	16 8
能量密度/ (W · h/ kg)	46	50	67	65	67
功率密度/ (W/ kg)	550	550	550	550	500

注:容量和能量是在 35℃, 电池 50% DOD 时以 10s C/3 放电脉冲响应测得。

表 3-4 法国 Saft 公司 Ni-MH 电池性能表^[15]

电池组型号	NH12 2	NH12 .4
额定容量/ A · h	96	109
能量密度/ (W · h/ kg)	66	70
功率密度/ (W/ kg)	150	162

3. 国家“十五”863”电动汽车重大专项对 Ni-MH 电池的研制目标

1) 混合动力电动汽车(HEV)用高功率型氢-镍动力电池主要技术参数

容量:5A · h ~ 20A · h(HEV 轿车), 40A · h ~ 80A · h(HEV 客车);

单体电池功率密度 > 600W/ kg, 能量密度 > 40W · h/ kg;

电池工作温度: - 20℃ ~ + 55℃ ;

电池组寿命:可满足 HEV 行驶 10 万 km;

可达到小批量中试生产。

2) 电动汽车(EV)用高能量型氢-镍动力电池主要技术参数

容量: $80\text{A} \cdot \text{h} \sim 120\text{A} \cdot \text{h}$;

单体电池能量密度 $> 65\text{Wh}/\text{kg}$, 功率密度 $> 160\text{W}/\text{kg}$;

电池工作温度: $-20 \sim +55$;

循环寿命 > 500 次(按国标测试), 可满足 EV 行驶 10 万 km;

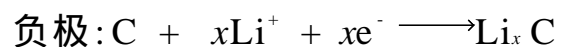
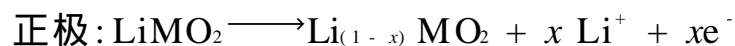
可达到小批量试生产。

3.5.3 锂离子电池

1. 工作原理

锂离子电池(lithium-ion battery)是在二次锂电池的基础上发展起来的。它从原理上解决了二次锂电池安全性差和充放电寿命短两个技术难题。典型的电池体系构成如下: 电池的正负极均由可以嵌入和脱出 Li^+ 的化合物或材料组成, 其中, 正极: 锂化跃迁金属氧化物(LiMO_2 , M 代表 Co、Mn 或 Ni 等跃迁金属), 负极: 可嵌入 Li^+ 的碳(形成 Li_xC ——碳化锂), 电解质: 有机溶液或固体聚合物。

这种电池的工作原理如图 3-18 所示。充放电过程的反应方程式为



在电池充电时, Li^+ 从正极脱出, 经过电解质嵌入负极; 电池放电时, Li^+ 则从负极脱出, 经过电解质再嵌回正极。电池的操作过程实际上是 Li^+ 在两电极之间来回嵌入和脱出的过程, 故 Li^+ 电池也称之为“摇椅式电池”。

锂离子电池是所有可充电电池中综合性能最优的一种新型电池。

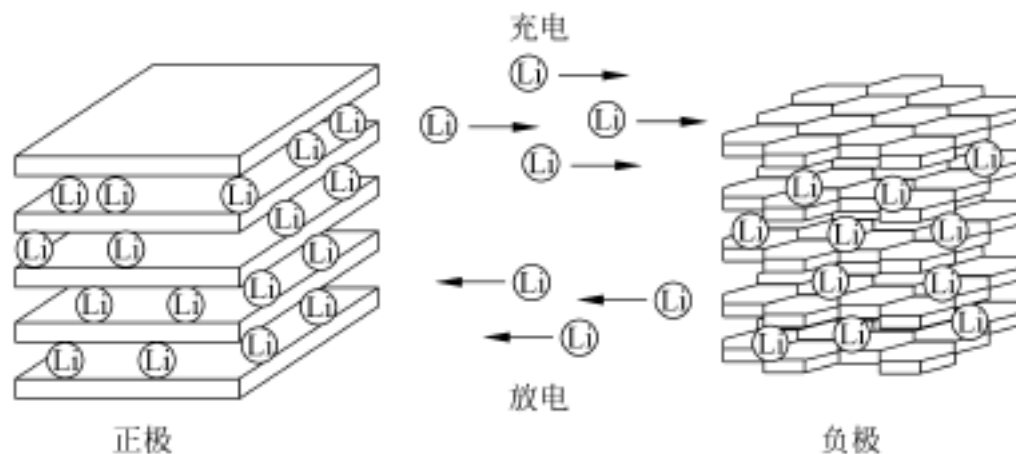


图 3-18 锂离子电池工作原理示意图

2. 锂离子电池在电动汽车中的应用

与其他电池相比, 锂离子电池应用于电动汽车时, 在容量、功率方面均具有较大优势。国内外许多单位对锂离子电池在电动汽车方面的应用都表现出特别的关

注。1995年,日本索尼能源技术公司(Sony Energytec. Co.)与日产汽车公司(Nissan Motor)联合研制成功用锂离子电池组驱动的电动汽车。索尼公司研制的车用锂离子电池有两种,一种用于电动汽车,容量为 $100\text{A}\cdot\text{h}$ 的圆柱形高能量电池,8只电池串联成一个小组合,12个小组合电池组成完整的车用电源系统。另一种用于混合动力电动汽车,容量为 $22\text{A}\cdot\text{h}$ 的圆柱形高功率型电池,虽然其能量密度仅为 $62\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ (仅为前者的56.4%),但其功率密度为 $800\text{W}/\text{kg}$ (是前者的2.7倍)。表3-5列出了这两种电池的主要技术指标。

表3-5 日本SONY公司电动车用锂离子电池的技术指标

性能参数	圆柱形单体电池		方形组合电池	
	高能量	高功率	高能量	高功率
质量/ kg	3.3	1.2	29	12.5
尺寸/ mm	67 × 410	50 × 250	292 × 150 × 140	220 × 300 × 160
工作电压/ V	3.6	3.6	28.8	28.8
额定容量/ A·h	100	22	100	55
比能量/ ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)	110	62	100	55
比功率 / (W/kg)	300	800	300	700
循环寿命/ 次	1200	1200	1200	1200

法国 Saft 公司在研制电动车用大容量锂离子电池方面取得了很大进展,该公司主要致力于 LiNiO_2 及 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{O}_4$ 材料的开发,已研制成 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 能量的小组合电池,由 6 只圆柱形 $40\text{A}\cdot\text{h} \sim 50\text{A}\cdot\text{h}$ 电池经串联或并联构成,并装有智能电子控制器与热管理系统。电池已经装车调试,一次充电可行驶 200km,最佳化的全尺寸电池性能已达到 $120\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 和 $200\text{W}\cdot\text{h}/\text{L}$ 。

目前锂离子电池的比能量、放电率、充放电寿命及密封性等,均可以满足美国 USABC 制定的电动汽车用动力电池的中期目标。

当前,锂离子电池存在的主要问题是:快充放电性能差、价格高和过充放电保护等。在过充或过放条件下,锂电池可能发生火灾或爆炸。锂离子电池安全性与散热紧密相关,电池散热则受反应速率控制等诸多因素影响,仅考虑单一因素无法确定是否安全。因此为确保锂离子电池的安全性,必须使用电池管理系统。此法虽然有效,但增大了电池的成本和体积。

3. 国家“十五”863”电动汽车重大专项规定的锂离子动力电池的研究开发目标

1) HEV 用高功率型锂离子动力电池主要技术参数

单体电池功率密度 $> 800\text{W}/\text{kg}$, 电池能量密度 $> 70\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$;

电池组寿命:可满足 HEV 行驶 10 万 km。

2) EV 用高能量型锂离子动力电池主要技术参数

单体电池能量密度 $> 130 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{kg}$, 功率密度 $> 160 \text{ W} / \text{kg}$;

循环寿命 > 500 次(按国标测试), 可满足 EV 行驶 10 万 km;

电池工作温度: $-20 \sim +55$;

可达到小批量试生产。

3.5.4 电池管理系统

1. 电池管理系统概述

电池技术的进步与性能的提高对于混合动力电动汽车和混合型燃料电池汽车都有重要意义。为解决电动汽车商品化的问题, 研究人员主要从两个方面应对电池技术的挑战: 一方面, 从产品的角度, 开发满足电动汽车要求的新型电池。当前开发的电池主要有先进铅酸电池、氢-镍电池、锂电池(锂离子、锂聚合物)和高温钠-硫电池, 目前, 铅酸电池、氢-镍电池和锂离子电池应用较多。另一方面, 从使用的角度, 采用电池管理系统, 优化电池使用, 充分发挥现有电池的性能, 并提高使用寿命。

根据电池特性, 对电池组实施有效的管理对于确保电动汽车的安全、保持电池组性能、延长电池组寿命、提高电池使用效率具有重要意义。

2. 电池管理系统的功能

国际电工学会(IEC)在 1995 年制定的电池管理系统标准中给出的电池管理系统应有的主要功能包括:

显示荷电状态(SOC);

提供电池温度信息, 电池高温报警;

显示电解液状态;

电池性能异常早期警报;

提供电池老化信息;

记录电池关键数据。

随着电动汽车的发展, 对先进电池的需求和对电池管理系统的要求也日益提高。电动汽车的电池管理系统比较复杂, 需要针对车用动力电池专门研究。实用的电池管理系统的主要功能包括: 数据采集、电池状态估计、能量管理、热管理、安全管理和通信功能。图 3-19 所示为电池管理系统的功能简图。下面对这些功能分别加以介绍。

(1) 数据采集。电池管理系统的所有算法都以采集的数据作为输入, 采样速

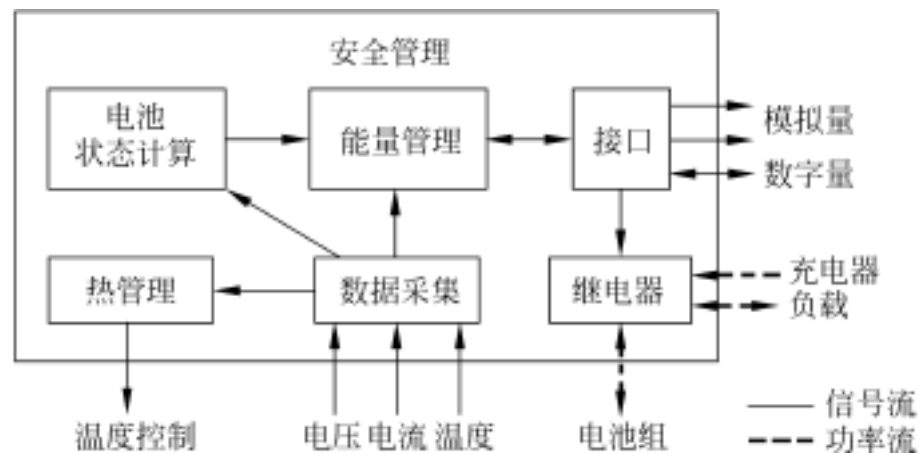


图 3-19 电动汽车电池管理系统一般功能示意图

率、精度和前置滤波特性是影响电池管理系统性能的重要指标。电动汽车电池管理系统的采样速率一般要求大于 200Hz(50ms)。

(2) 电池状态估计。电池状态估计包括 SOC(state of charge)和 SOH(state of health)两个方面。SOC 告诉驾驶员电池的荷电量,以此可以估计汽车还能行驶的里程;SOH 告诉驾驶员电池的寿命还有多久。SOC 和 SOH 是进行能量管理的重要参数。最常用的 SOC 估计方法是 Ah 计量结合效率补偿的方法,优化滤波、模糊逻辑、神经网络为新近发展的方法。

(3) 能量管理。在能量管理中,电流、电压、温度、SOC、SOH 等参数作为输入用来完成下列功能:

控制充电过程,包括均衡充电;

用 SOC,SOH 和温度限制电池放电电流。

充放电过程的监控和限制与电池种类、电池工艺有很大关系。

(4) 安全管理。安全管理的具体功能为:监测电池的电压、电流是否超过限制;防止电池过度放电,尤其是防止个别电池单体过度放电;防止电池过热而发生热失控。

(5) 热管理。对于大功率放电和高温条件下使用的电池,电池的热管理尤为必要。热管理的功能是使电池单体温度均衡,并保持在合理的范围内,对高温电池实施冷却,在低温条件下对电池进行加热等。在热管理中从电池内部到外界环境的传热速率是一个关键问题,因为电池电解液和电池壳的热导率很小。

(6) 通信功能。电池管理系统与车载设备或非车载设备的通信是其重要功能之一。根据应用需要,数据交换可采用不同的通信接口,如:模拟信号、PWM 信号、CAN 总线或 I²C 串行接口。

3. 国家“十五”863”电动汽车重大专项对电池及其管理系统的要求

电池荷电量预估误差 < 8%,具有自检和诊断功能,高抗干扰能力;带有管理系

统的动力电池组模块的能量总效率 $> 75\%$, 循环寿命 500 次(对 EV 车用), 一致性为 $0.05V$ ($12V$ 标称电压的电池模块); 动力电池组系统通过国家级检测中心测试, 可小批量生产, 实现产品化。

4. 典型的电动汽车电池管理系统举例

1) 美国通用汽车公司 EV1 电动汽车用电池管理系统

EV1 电动汽车是世界上迄今为止最为成功的电动汽车之一。EV1 电动汽车由 27 个铅酸电池供电, 可放电深度 80% , 电池寿命 450 个深放电周期, 一次充电市内行驶里程 $113km$, 高速公路行驶里程 $145km$ 。

EV1 电池管理系统包括: 电池模块(用于汽车驱动和其他用电系统)、电池组控制模块 BPM(battery pack module)、电池组热管理系统(thermal management system)和电池组高压断点保护装置(high voltage disconnect)四个组成部分。

其中, 电池组控制模块有以下功能: 电池单体电压监测, 电流采样, 电池组高压保护, 六个热敏电阻对不同部位进行温度采样, 控制充放电, 电量或里程计算, 高压回路继电器。

2) 德国柏林大学研制的电池管理系统^[16]

柏林大学设计的电池管理系统总体结构如图 3-20 所示, 整个系统包括: 显示模块(display)、速度调节模块(accelerator)、温度调节模块(cooling and heating)、上位机诊断模块(diagnosis PC)。除此之外, 还有为每个电池模块配备的平衡器(chargebalancing)。在总体控制方案中, 采用 CAN 总线方式, 微处理单元采用西门子的 Microcontroller 80C167CR。

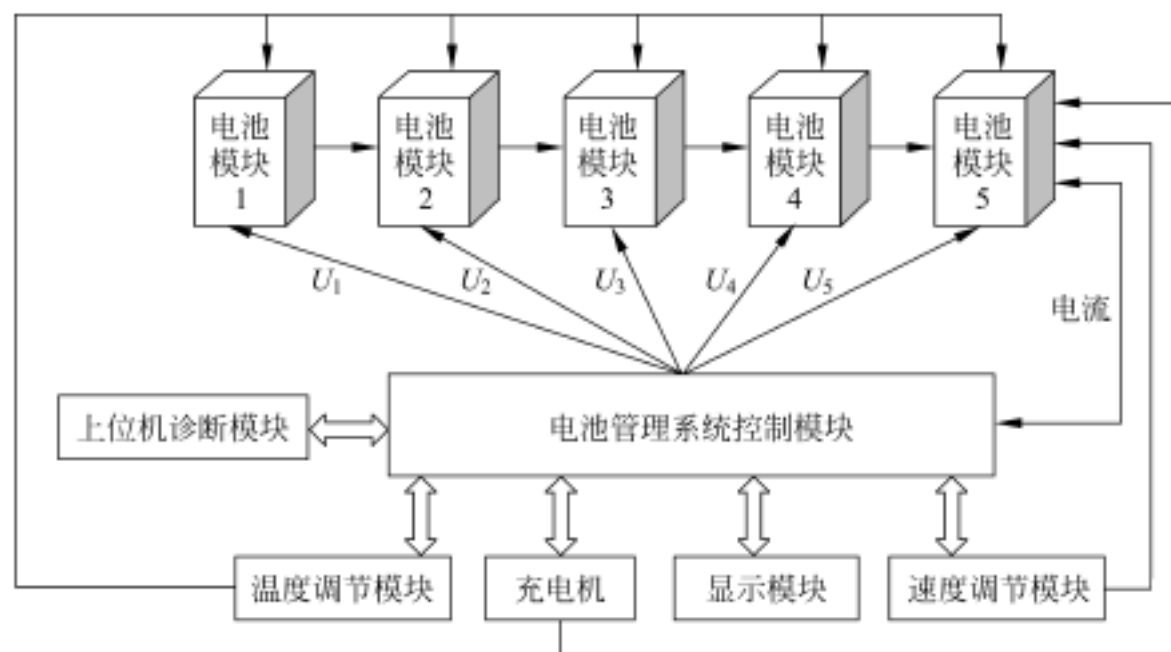


图 3-20 柏林大学电池管理系统结构图

该电池管理系统是目前国际上功能比较齐全、技术含量比较高的电动汽车用电池管理系统,其主要功能包括:防止电池过充过放、电池模块加平衡器实现均衡充电、电池组热管理、基于模糊专家系统的剩余电量估计、用神经网络辨识电池老化信息、电池故障诊断,并且能及时调整模糊专家系统的参数、数据记录和存储(为了电池诊断和维护工作保存一定的历史数据)。

3) 韩国大宇公司 DEV5-5 电动汽车用电池管理系统^[17]

韩国大宇公司和韩国先进工业研究所研制的用于 DEV5-5 电动汽车的电池管理系统的主要功能有:数据采集、优化充电、SOC 估计与显示、热管理、安全管理、能量管理、电池管理和故障诊断功能。电池管理系统的结构如图 3-21 所示。

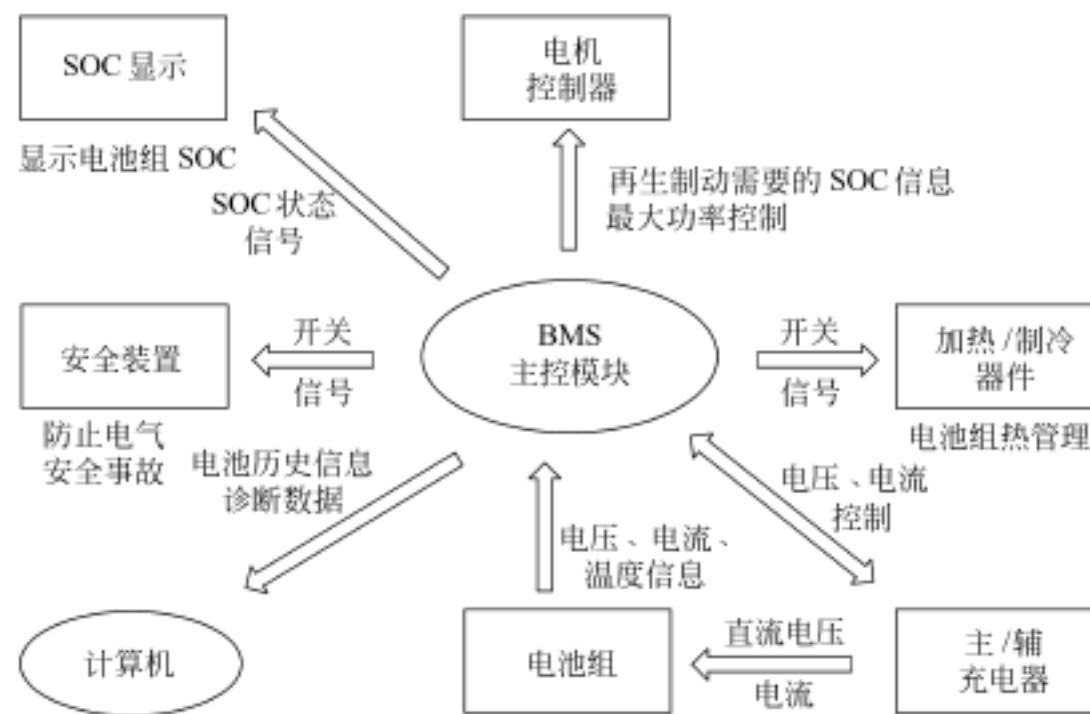


图 3-21 大宇公司 DEV5-5 电动汽车电池管理系统结构图

电池管理系统由电池控制单元(BCU)、主充电器、辅助充电器、热管理系统、SOC 计、电池警报装置、模块传感装置和安全模块构成,其中 BCU 发挥核心功能。BCU 实时监测电池工作状态,向各子系统发送正确的指令以使动力电池正常工作。图 3-22 给出了 BCU 的功能模块图。

5. 电池 SOC 估计

目前使用的 SOC 估计方法总结对比如表 3-6 所列。

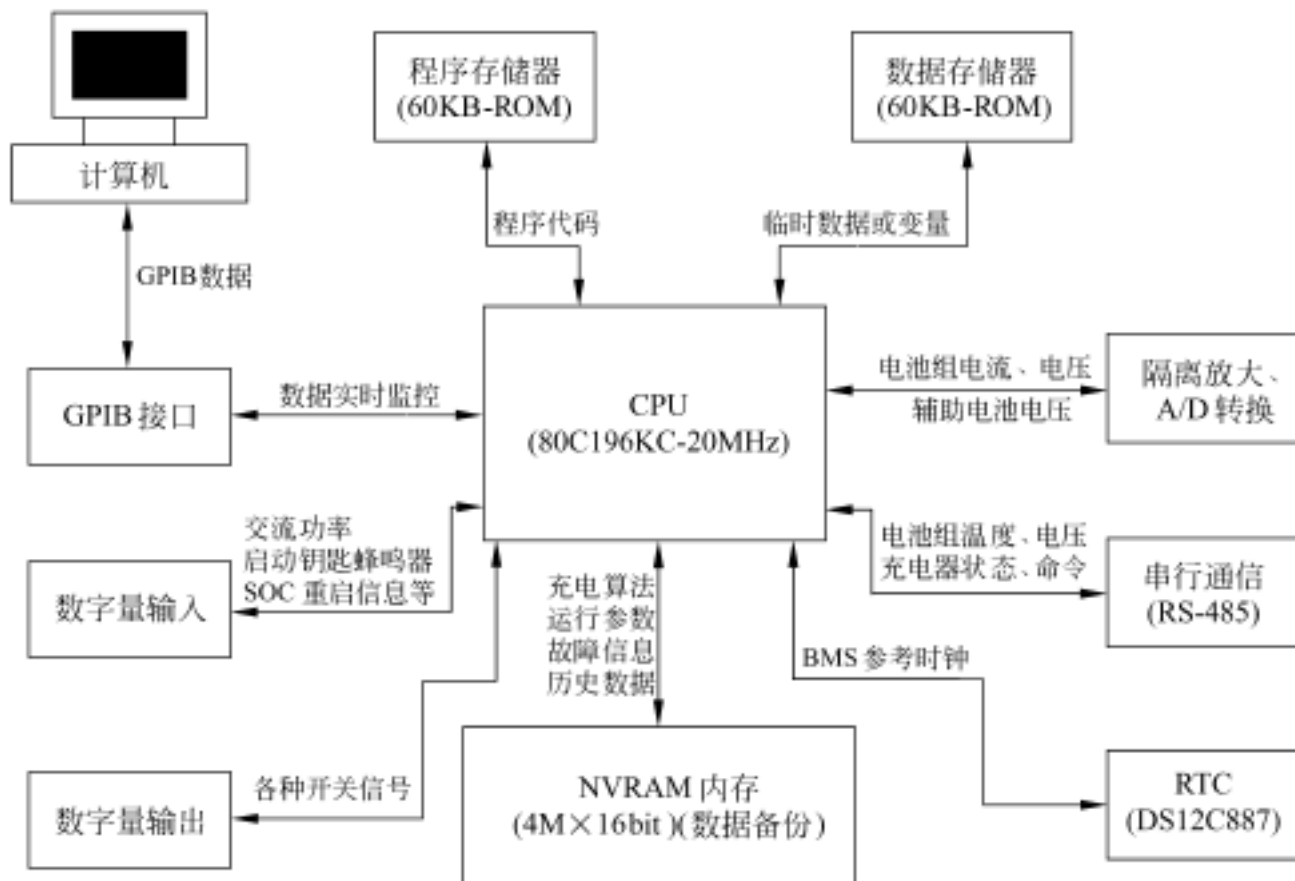


图 3-22 大宇公司 DEV5-5 电动汽车电池管理系统 BCU 功能模块图

表 3-6 SOC 估计方法总结

方法	应用领域	优点	缺点
放电试验法	适于所有电池系统,用于使用初期判断电池容量	易操作且数据准确,与 SOH 无关	无法在线测量,费时,改变电池的状态,有能量损失
电解液特性法	铅酸, 锌/溴 (Zn/Br)	可在线测量,并给出 SOH 的信息	有酸成层现象时将出现错误,动态响应慢,在电解液中传感器存在稳定性问题,对温度和电解液纯度敏感
开路电压法	铅酸, 锂电池, 锌/溴 (Zn/Br)	可在线测量,成本低	动态响应慢,有酸成层现象时将出现错误,电池需要长时间静置,有附带问题(如铅污染)
负载电压法	铅酸, 镍-镉, 氢-镍, 锂电池	可在线测量,成本低	数据采集和存储量大,变电流情况下的数据处理较难
Ah 计量法	适于所有电池系统	可在线测量,易操作,精度较高	需要有反映损失的模型,对干扰比较敏感,电流精确测量的成本高,需要规则的重新标定数据

续表

方法	应用领域	优点	缺点
直流内阻法	铅酸, 镍-镉	可在线测量, 易操作, 能给出 SOH 的信息	只适用于低 SOC 状态
阻抗频谱法	适于所有电池系统	能给出 SOH 的信息, 可在线测量	对温度敏感, 成本高
人工神经网络	适于所有电池系统	可在线测量	需要相近电池的训练数据
卡尔曼滤波器	适于所有电池系统	可在线测量	需要大量的计算能力、合适的电池模型, 确定内部参数困难

6. 电池热管理系统

在电动汽车和混合动力汽车上, 电池模块以串联或并联的方式组成电池组, 以达到容量和电压的要求, 并以某种方式安装在电池箱中。要使电池组发挥出良好的性能、具有更长的寿命并保证使用安全, 电池的工作温度需要限定在一个比较小的范围。热管理系统必须具有以下功能: 电池组温度过高时的有效散热、低温条件下的快速加热、保证所有电池单体较好的温度一致性和有害气体产生时的有效通风。

电池组中电池单体或模块之间的温度差异主要由以下两个因素引起:

其一, 电池单体由于内阻的差异而引起的在工作中发热量的不一致性, 主要源于生产商的质量控制水平;

其二, 电池单体或模块在电池箱中所处位置的差异而引起的电池单体或模块传热效率的不一致性, 处于电池箱中间位置的电池单体容易积累热量, 边上的电池散热条件要好些。

电池组内单体或模块之间温度的不一致性会加剧电池内阻和容量的一致性, 进而影响电池组的性能和寿命。

美国国家再生能源实验室(NREL)在文献[19]中给出了电池热管理系统设计的一般过程如下:

(1) 确定热管理系统的目标和要求。确定在不同天气条件下热管理系统要达到的指标, 如平均温度 T 、温度变化范围 T 等; 根据整车集成的要求, 确定电池组空间布置方案和尺寸。

(2) 测量或估计电池模块发热量及热容量。在相应温度条件和充放电循环工况下, 测量或估计电池组的发热量。

(3) 热管理系统初步设计。根据电池组的温度场分析,确定热管理系统所需要消耗的功率、热传递介质、流电路径、流量等参数,初步制定设计方案。

(4) 预测模块和电池组的热行为。测量或估计电池组各部件的热传导率,使用计算流体力学或实验得到电池单体或模块与热传递介质之间热传递速度,计算不同热管理策略下的系统性能及其对电池组和整车性能的影响。

(5) 设计热管理系统并进行试验和优化。确定合适的部件(鼓风机、液泵等)及系统的热管理策略,估计系统的成本,考虑维修、可靠性等其他因素,以确定最终设计方案。

图 3-23 为日本丰田汽车公司的 e-com 纯电动小轿车的电池组风冷系统结构图^[11]。

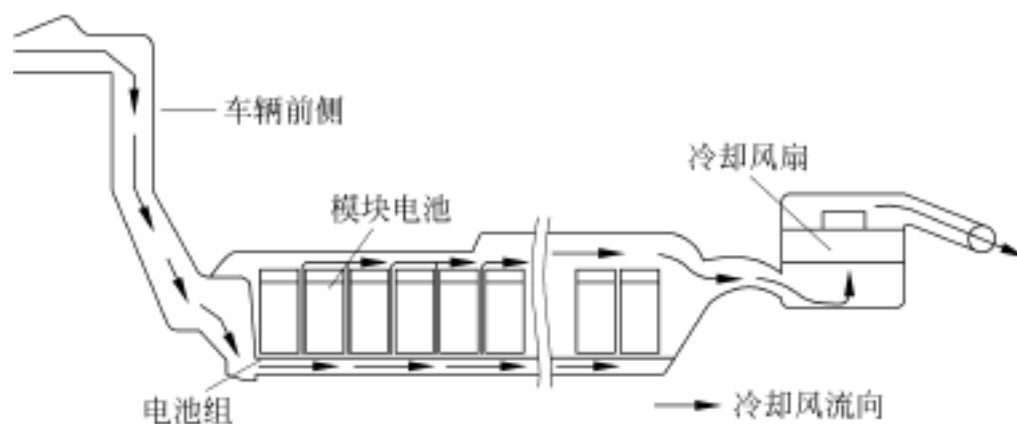


图 3-23 丰田公司 e-com 纯电动小轿车用电池组风冷系统结构图

3.6 超级电容

超级电容器准确地说应称为电化学双电层电容器(electrochemical double layer capacitor, EDLC)。Helmholtz 于 1853 年发现,在电势的作用下,电极和电解液之间的固/液双层结构间可以存储能量。它通过电解质极化以静电方式来存储能量。

超级电容从字面意思上理解,是一种比传统电容更优秀、档次更高的电容。这种新型的能源器件所能存储的能量比传统的电容大 10 倍以上,同时又保持了传统电容释放能量速度极快的特点,因此“超级”之说当之无愧。正是由于超级电容所具有的可以在短时间大电流充放电(一次充放电只需要几分钟),循环寿命长(能反复充放电使用的寿命超过 10000 次,极限寿命可达 10 万次,为一般电池的数十倍以上),充放电效率高,可以正常工作的温度范围宽(- 35 ~ 75)等特点。因此,在混合动力汽车和燃料电池汽车上作为辅助能源的应用前景广阔。

3.6.1 超级电容概述

超级电容是一种介于传统电解质电容器和电化学电池之间的新型储能元件,其储能方式与传统电解质电容不同。传统电容器是通过电极间的电解质在电势能作用下产生极化效应而存储能量,而电化学电容器是依靠电解质与电极间形成特有的电双层结构(electric double layers)和电极表面的氧化还原反应来存储能量。电化学电容的容量远大于传统电容,达到 $10^3 \sim 10^4$ 法拉级,故而得名超级电容。

超级电容的发展已经经历了很长时间。德国人 Helmholtz 于 19 世纪末发现,当导体电极插入电解液中时,由于库仑力、分子间作用力(范德华力)或原子间作用力(共价力)的作用,其表面上的净电荷将从溶液中吸引部分不规则分配的带异种电荷的离子,使它们在电极/电解质溶液界面的溶液一侧离电极一定距离排成一排,形成一个电荷数量与电极表面剩余电荷数量相等而符号相反的界面层,从而形成了一层在电极上,另一层在溶液中的两个电荷层,称为双电层。如图 3-24 所示。由于界面上存在一个位垒,两层电荷都不能越过边界彼此中和,双电层结构将形成一个平板电容器。如果用 C 表示双电层的电容量,则其计算公式为

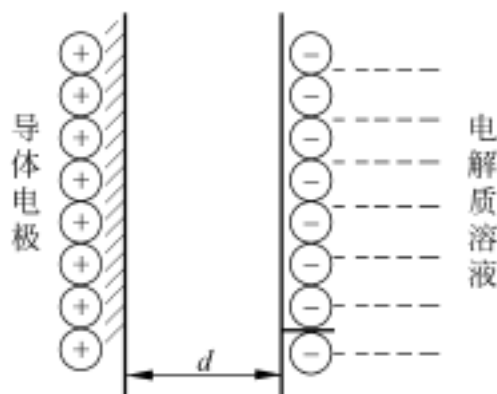


图 3-24 双电层结构示意图

$$C = Q_{M-S} = Q_a \quad (3-14)$$

式中, U_{M-S} 为固体与液体之间双电层的电位差, $U_{M-S} = U_M - U_S$; Q 为双电层的电荷量; a 为从零电荷电位算起的电极电位。则电容器存储的能量为

$$E = \frac{1}{2} CV_w^2 \quad (3-15)$$

式中, V_w 为电容器的最大工作电压。

3.6.2 超级电容的分类

实际应用中的超级电容有很多种类。通常可以根据超级电容的电极材料和电解质材料进行分类,不同的超级电容具有不同的特性。

1. 根据电极材料分类

按照电极材料的不同可以把超级电容分为三类:碳电极双层超级电容、金属(钎、铌)氧化物电极超级电容和有机聚合物电极超级电容。采用金属氧化物电极

的优点是比功率很高,但这些超级电容价格昂贵,是研究初期主要采用的电极材料,主要用于军事领域。随着研究的深入,碳材料成为商品化超级电容所采用的主要电极材料,它具有成本低、单位重量的表面积大、技术成熟等优点。有机聚合物电极技术还处于实验室研究阶段。

1) 电极双层超级电容

电极双层超级电容(double layer capacitor, DLC)主要使用多孔碳材料作为电极,比如活性炭或白炭黑的碳布、碳粉和碳纤维等。碳电极的主要优点在于来源广泛、成本低、加工技术成熟,其最重要的优点是活性面积大。作为电极的碳粉、碳布、碳纤维等材料其活性面积可以达到 $2500\text{m}^2/\text{g}$ 。近年来随着碳纳米管研究的进一步深入,碳电极的活性面积进一步加大。最新研究结果表明,采用直径为 8nm 的碳纳米管制备的厚度为 $25.4\mu\text{m}$ 的薄膜电极,比电容达到 $49\text{F/g} \sim 113\text{F/g}$ 或 $39.2\text{F/cm}^3 \sim 90.4\text{F/cm}^3$ 。图 3-25 是碳电极超级电容的充放电曲线。

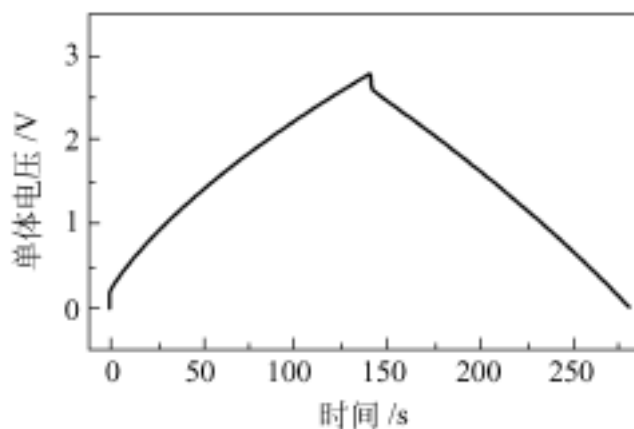


图 3-25 DLC 充放电循环单体电压变化图

尽管碳电极超级电容具有以上优点,但也有随活性面积的增大其稳定性和导电性降低的缺点。

2) 金属氧化物电极超级电容

以金属氧化物为电极材料的超级电容是利用法拉第效应来存储能量的。这种电容器使用 RuO_2 , IrO_2 等金属氧化物作为电极,充放电时在电极上会发生一系列的氧化还原反应,其中的 $\text{Ru}(\text{Ir})$ 的化合价会在 $3 \sim 6$ 价间变化。因为在这种电容单体间除了物理储能作用还包括了化学储能作用,所以也被称作法拉第准电容(Farad pseudo-capacitor)。图 3-26 是金属氧化物超级电容的充放电曲线。从充放电曲线可以看出,这种电容器具有某些电池的充放电特性。

与碳电极相比,金属氧化物电极的电导率比碳大 2 个数量级,比容量远高于碳,循环寿命、充放电性能也相当好。金属氧化物电极超级电容可以实现非常高的质量比容量,例如, RuO_2 电极可以达到 750F/g ,而碳电极的这项指标是 100F/g 。但是,这种电极材料成本太高,而且由于对使用的电解液有限制,电容的额定电压值较低。

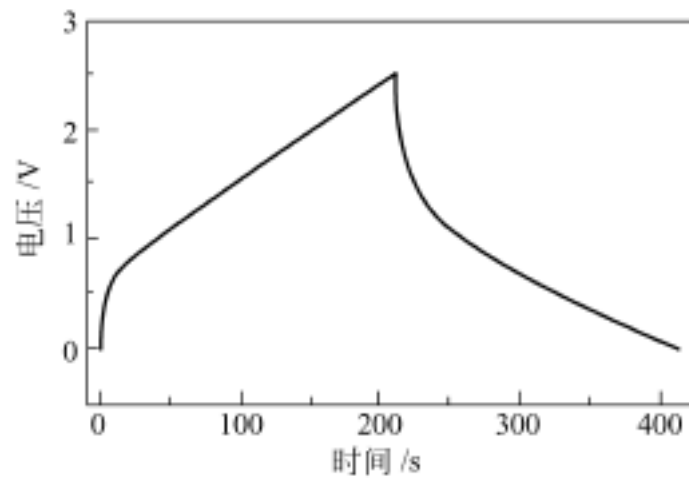


图 3-26 金属氧化物超级电容的充放电曲线

混合型超级电容是金属氧化物超级电容和碳电极超级电容的混合产物。一方面解决了碳电极电容器比能量较小的问题,另一方面可以降低超级电容的成本。近年来,俄罗斯研究机构对碳/ NiO_2 电极体系超级电容的研究取得了很大进展。

3) 有机聚合物电极超级电容

作为电容电极材料的有机聚合物一般都经过杂化处理,利用电极上的法拉第准电容效应来存储能量。其作用机理是通过在电极上的聚合物膜中发生快速可逆的 n 型或 p 型掺杂和去掺杂氧化还原反应,使聚合物达到很高的储存电荷密度,从而产生很高的法拉第准电容来储存能量。其较高的工作电位是源于聚合物的导带和价带之间较宽的能隙。

目前,有机聚合物电极超级电容是研究热点,因为使用这种技术,可同时提高超级电容的质量比能量和质量比功率两个指标。这种电容的缺点是在长期循环中稳定性较差。这是因为有机聚合物材料容易产生膨胀变形且在长期循环中出现性能恶化。图 3-27 为有机聚合物电极超级电容放电曲线。

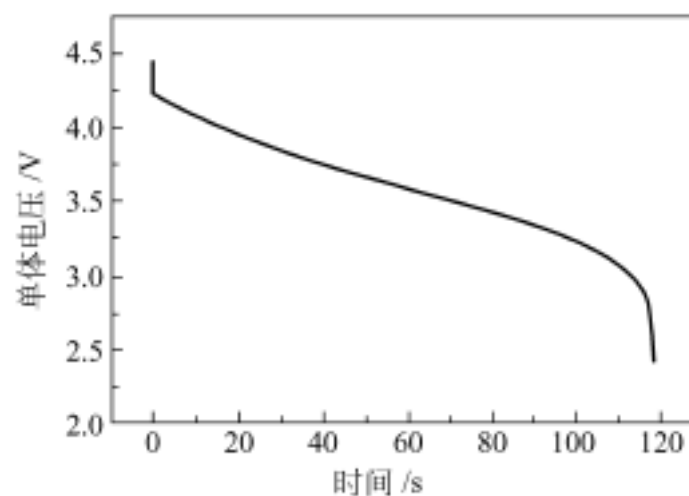


图 3-27 有机聚合物电极超级电容放电曲线

2. 根据电解质材料分类

根据电解质材料的不同超级电容可以分为两类:有机物电解质超级电容和水基溶液电解质超级电容。采用有机物作电解质的超级电容工作电压较高(2.3V~2.7V左右),而采用水基溶液作电解质的超级电容工作电压只有1V左右。由于电离相对困难,前者单位体积的内阻比后者要高得多,但是由于前者的比能量大,所以更受关注。

1) 有机物电解质超级电容

超级电容中使用有机电解液的最大好处是可以提高超级电容单体的电压,可以使之达到2V以上,电容电压可以稳定在2.3V,瞬时甚至可以达到2.7V。电容可以存储的能量与电压的平方成正比($E = C \cdot U^2 / 2$),因此,使用有机电解液的超级电容的比能量比较高,可达到 $18\text{W} \cdot \text{h} / \text{kg}$ 。但是使用有机电解液必须采用特殊的净化工艺,且电极上必须覆盖特定涂层以避免对电极的腐蚀。它的另一个缺点是因为电离比较困难,所以内阻较高,通常是水溶液的20倍以上,甚至达到50倍。因此在比功率指标上无法达到水基电解液的水平。

2) 水基溶液超级电容

超级电容中使用水基溶液电解液的最大好处是内阻非常低,导通率高。这就可以达到较高的比功率指标。水基溶液的第二个优点是提纯和干燥加工工艺简单,成本低廉。

水基溶液超级电容的最大缺点是单体电压低,一般不超过1V,这就限制了这种超级电容比能量的提高。

3. 碳镍体系超级电容

碳镍体系超级电容是一种混合型超级电容,综合了双电层电容器和准电容的储能原理,与这两种电容器相比,显示出比功率性能和比能量性能上的优势。

在碳-碳结构的双电层电容器中使用金属氧化物替代其中的一块碳电极,使得一块电极的电压发生变化时,另一块极板不发生极化或极化程度很小,这样可以更加充分地利用法拉第准电容效应以提高电容量,这种复合系统称为“电双层-准电容器”。对于这种电极材料的要求是必须具有良好的可逆性。如前文所述, RuO_x 具有高导通率、低衰退性能以及良好可逆性的特点,是一个很好的选择。但是Ru的储量稀少,材料成本太高,使得这种电容器无法大规模地应用到民用场合。在积累了多年的镍-镉电池和氢-镍电池研究成果的基础上,金属氧化镍电极材料被引入到这种超级电容的研究中。试验结果显示,这种电极材料的性能参数达到甚至超过了 RuO_x 的水平。

碳镍体系超级电容目前的研究重点是进一步提高活性碳电极的比表面积,提高比容量,以及将有机电解液引入这种体系结构,进一步提高单体电压,从而提高

电容器的比能量性能。

3.6.3 超级电容的发展水平

经过近 30 年的发展,各种类型的超级电容的性能都有了很大的提高。表 3-7 列出了近年来世界各国超级电容生产和研究的发展水平。

表 3-7 近年来各国超级电容的性能指标

公司/研究所	使用技术	电容参数	能量密度 / (W · h/ kg)	功率密度 / (W/ kg)
美国 Maxwell	碳微粒电极, 有机电解液	3V, 800F ~ 2000F	3 ~ 4	200 ~ 400
	铝箔附着碳布电极, 有机电解液	3V, 130F	3	500
俄罗斯 ESMA	混合型 (NiO 碳电极), KOH 电解液	1.7V(单体), 50000F	8 ~ 10	80 ~ 100
日本 Panasonic	碳微粒电极, 有机电解液	3V, 800F ~ 2000F	3 ~ 4	200 ~ 400
法国 Saft/ Alcatel	碳微粒电极, 有机电解液	2.8V, 3500F	6	3000

美国 Maxwell 公司、韩国 Ness 公司, 俄罗斯 ESMA 以及一些日本公司都已经实现了超级电容的批量化生产, 可以向市场提供性能稳定的实用化产品。

近年来超级电容在汽车能源领域的应用逐渐成为研究热点, 尤其是在混合动力汽车和燃料电池汽车上作为辅助能源, 及在低温起动和车辆 42V 系统中的应用。各大汽车公司纷纷开展超级电容在汽车上的应用研究, 以下是其中一些研究项目:

西门子公司的 MAN BUS 项目。这是一项使用柴油机的混合动力城市客车项目。超级电容使用在制动能量回收系统中。

德国大众公司和苏黎世瑞士联邦科技研究院、Paul Scherrer 研究院以及其他一些合作伙伴共同开发的燃料电池混合动力项目, 在大众的 BORA 轿车中使用了超级电容, 并于 2002 年 3 月在日内瓦汽车展中向公众展示。

本田公司在其开发的燃料电池混合动力汽车 FCX-V3 中应用超级电容, 以提高其相应的性能动态和动力性能。

马自达公司正在研制的 FC-EV 燃料电池混合动力汽车中, 使用超级电容作为辅助能量回收系统的储能元件。

Nissan 公司在日本开发了一种商品化的混合动力柴油机卡车, 使用超级电容作为制动能量回收和助力系统的能源。

2001年9月丰田公司开发了ES3概念车,在制动能量回收系统中使用了超级电容。

美国电燃料公司(EFC)最近宣布其开发的锌-空气燃料电池电动公共汽车,由于超级电容组的使用,行驶里程总数提高了近25%。

日本Oshkosh卡车公司开发的混合动力重型载重军用卡车,使用柴油机作为主动力,并以400kW发电机和超级电容组作为辅助动力单元。

除了各主要汽车公司外,很多学校和科研机构中的研究小组也在积极开展超级电容在车辆上的应用研究,其中美国南加州大学、罗马特里大学、瑞士中心应用科学大学等都做出了自己比较有特色的使用方案。超级电容已经应用于从概念车到商品化生产的所有车型。随着生产工艺的逐渐成熟及生产成本的逐步下降,超级电容的应用前景一定会更加光明。

我国对于超级电容的研究开发起步相对较晚,但通过技术引进和自主开发,发展速度很快,现在已经出现了一批超级电容研发和生产单位,如上海奥威公司、哈尔滨巨容公司、锦州电容器厂等,其提供样品的某些技术指标已经达到了国际先进水平。超级电容已被列入国家“十五”863“电动汽车重大专项的研究开发课题中。

3.6.4 超级电容组管理系统

1. 超级电容组管理系统简介

超级电容组管理系统主要有三个功能:对超级电容组各单体充放电进行均衡控制、采集超级电容的状态信息并通过各种数据传输手段和整车控制系统进行通信以及失效报警。

1) 充放电均衡控制

由于超级电容组中的各单体参数不同,各单体在充放电过程中的电压分配会有所不同。图3-28是串联的超级电容组等效电路图,其中, n 是串联单体的个数。从图中可得,充电过程中第 m 个超级电容单体上的电压分压为

$$U_m = \left[\frac{kR_p(m)}{\sum_{i=1}^n (R_{ESR}(i) + R_p(i))} + \frac{(1-k) \times 1/C_m}{\sum_{i=1}^n 1/C_i} \right] \times U_{group} \quad (3-16)$$

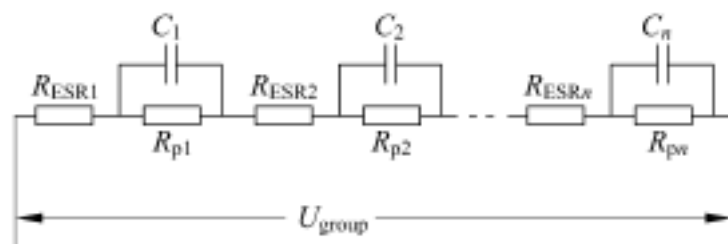


图 3-28 超级电容组等效电路

其中, $0 < k < 1$ 。当时间 $T=0$ 时, 电容器从 $0V$ 开始充电, $k=0$, 且在这些电容器中的电压分配完全依赖电容的变化; 当 T 接近达到无穷大时, $k=1$, 电压分配完全依赖漏电电阻 R_p 进行分配。对于 R_p 较小的电容单体在循环过程中分压会比较低; 当分压高的电容已经充满时, 分压低的单体还处于未充满状态。经过多次循环后, 各个单体将处于相差很大的状态。这在使用过程中将对整个组件的性能造成极大的影响。

解决超级电容均衡问题的方法很多, 其中比较简单的是在串联电容单体间并联一个阻值较大的旁路电阻, 这样, 可以使电流通过旁路电阻从分压高的单体流向分压低的单体, 如图 3-29(a) 所示。这种方法简单有效, 但缺点为旁路上始终有电流存在, 消耗在旁路电阻上的能量不仅会造成系统效率的下降, 而且会造成温度上升。

图 3-29(b) 给出了另一种均衡控制方法, 与图 3-29(a) 相类似, 但使用了奇纳二极管。这样在超级电容达到最大电压时, 可以保持电压恒定, 从而实现充电均衡, 它具有允许主电流通过的特点。但在奇纳二极管上会有很大的能量损失, 同时奇纳二极管也会给系统带来稳定性的问题。

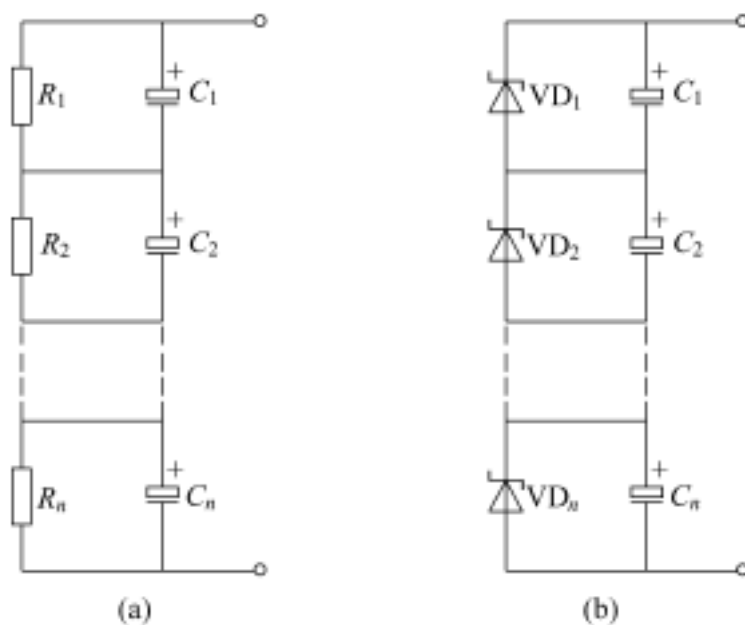


图 3-29 使用并联网解决均衡问题

(a) 并联旁路电阻; (b) 并联奇纳二极管

2) 状态采集和通信

管理系统的第二个功能是保持与整车控制器的通信联络, 采集超级电容的各个工作状态信号, 通过数据传输手段传递到整车控制器或能量管理系统。需要采集的状态量包括超级电容的工作电压 U_{group} 、SOC 状态、工作电流 I 、工作温度 T 以及电容电压间的差异程度。整车控制器或能量管理系统, 根据超级电容的状态和能量流管理策略发出相关控制指令。

3) 故障检测和失效报警

超级电容管理系统还应该具有失效管理。实际使用过程中超级电容的主要故障模式有以下几种:

- 单体电压过低/ 过高;
- 单体间不均衡程度过大;
- 温度过高;
- 气/ 液泄漏;
- 短路或断路。

当出现以上情况时,管理系统必须给出明确的声光信号并采取一定的安全措施,比如切断线路等,以保证整车及各子系统的安全。

2. 超级电容组双向 DC/ DC 转换器

由于超级电容组进行充放电时,其电压变化范围较大,为了与动力总线的电压 U_{BUS} 相匹配,需要使用双向 DC/ DC 转换器,将超级电容组的工作电压 U_{SCAP} 转换成输出电压 U_{SC_OUT} ,同时便于控制超级电容处于放电状态 ($U_{SC_OUT} > U_{BUS}$) 或处于充电状态 ($U_{SC_OUT} < U_{BUS}$)。

适合超级电容组使用的双向 DC/ DC 转换器有多种类型,各有其优缺点。这里不再一一介绍。对于超级电容组使用的 DC/ DC 转换器的要求如下:

- (1) 保证能量双向流通,既可以对超级电容充电,也可以使超级电容放电;
- (2) 可以接受整车控制器发出的指令,根据需要控制 DC/ DC 转换器的输出电压或电流;
- (3) 根据超级电容的状态决定当前最大的允许输出功率 P_{max} ,限制 DC/ DC 转换器的输出电压范围,以避免对超级电容系统过充和过放。

图 3-30 是超级电容系统使用的 Buck-Boost 型升降压双向转换器的电路简图。当开关管 V_1 工作时,电容的能量流向动力总线;当开关管 V_2 工作时,电流流向相反,这样就保证了能量在超级电容和动力总线间的双向流动,而且 Buck-Boost 变流器的布局结构保证了超级电容电压不会高于动力总线的电压(自我保护)。

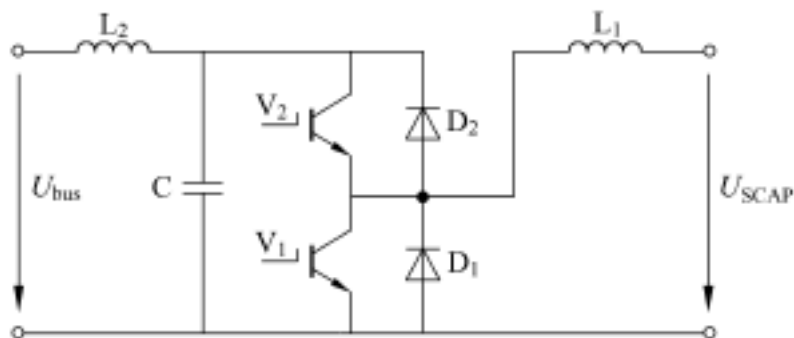


图 3-30 超级电容用双向 Buck-Boost 型 DC/ DC 转换器结构简图

从图 3-30 可以看到,通过控制开关管 V_1 ,可以使 DC/DC 转换器在 Boost(升压)模式下工作,把需要的能量从电容传送到动力总线上。当 V_1 为 ON(开)时,能量从电容抽出,存到 L_1 中。当 V_1 为 OFF(关)时,存在 L_1 中的能量通过 D_2 传送到 C 中,然后进入动力总线。电感 L_2 可以使进入动力总线的电流脉冲减小。此时,DC/DC 的输入端电压为超级电容工作电压 U_{SCAP} ,输出端电压为总线电压 U_{bus} ,两者的电压间关系如下式:

$$U_{bus} = \frac{1}{1 - n_1} U_{SCAP} \quad (3-17)$$

式中, n_1 为开关管 V_1 导通时间 t_1 占开关动作周期 T_1 的占空比,定义为 $n_1 = t_1 / T_1$ 。

通过控制开关管 V_2 ,可以使 DC/DC 转换器在 Buck(降压)模式下工作,动力总线通过 DC/DC 转换器把能量充入超级电容。当 V_2 为 ON 时,能量从电池组传送到超级电容, L_1 存储其中的部分能量。当 V_2 为 OFF 时,存储在 L_1 中的能量传送到超级电容中。此时,DC/DC 的输入端电压为总线电压 U_{bus} ,输出端电压为超级电容工作电压 U_{SCAP} ,两者的电压间关系如下式:

$$U_{SCAP} = n_2 U_{bus} \quad (3-18)$$

式中, n_2 为开关管 V_2 导通时间 t_2 占开关动作周期 T_2 的占空比,定义为 $n_2 = t_2 / T_2$ 。

通过以上分析可以看到,超级电容组通过双向 DC/DC 转换器与动力总线相连接,通过控制双向 DC/DC 转换器的工作模式和占空比,可以实现对超级电容的充放电进行控制。在放电状态下 DC/DC 工作在升压状态(Boost 模式),充电时 DC/DC 工作在降压状态(Buck 模式)。

3.7 燃料电池汽车的研究进展

目前世界各国政府及各大汽车厂商都纷纷投入巨资进行 PEMFC 电动车的研究与开发,其中影响最大的开发项目有两个:第一个是由美国能源部组织的国家 PEMFC 研究计划;第二个是以巴拉德动力系统公司的技术为依托,由戴姆勒-克莱斯勒、福特汽车公司等跨国公司投资合作的 PEMFC 电动汽车项目。

美国能源部的 PEMFC 计划在 1991 年开始实施,共分 4 个阶段。第一个阶段主要是对 PEMFC 技术进行测试,所用燃料电池系统由巴拉德公司提供,功率为 5kW。此阶段主要是由美国 Argonne 国家实验室负责项目管理,涉及的单位还有 LANL,主要负责重整器的研制和燃料电池的测试,Dow 化学公司主要负责质子交换膜技术,通用汽车公司主要负责催化剂的研制,通用先进工程公司(GM Advanced Engineering)主要负责电动车系统。第二阶段于 1993 年开始启动,主要工作是检验 25kW PEMFC 系统用于电动车的可行性。第三阶段从 1995 年开始,把试验用 PEMFC 系统的功率提高到 50kW。第四阶段从 1996 年开始,进行电动车辆运行试验。

2000年“加州燃料电池伙伴计划(California Fuel Cell Partnership)”于加州 West Sacramento 的核心试验基地揭幕。在揭幕仪式上,来自七家汽车制造商的燃料电池电动汽车登台亮相,其中,燃料电池驱动的大客车也进行了示范运行。这个 55000ft² (约 5110m²) 的试验基地既有燃料电池汽车的展示运行,又配有加氢站,还有一个集教育展览、燃料电池模型和互动式报告于一体的陈列馆。在以后的几年中,将有超过 50 辆的燃料电池汽车在美国加州的道路上做实际工况下的示范运行,还有 20 辆大客车也将进行区段间的示范运行。这也是目前世界上规模最大的燃料电池汽车集中示范基地。

为了提供一种获得工业界评价和建议的机制,美国能源部和 USCAR 合作建立了燃料电池联盟。该联盟加速了由政府支持的燃料电池研究和开发项目在美国汽车工业界的传播。该联盟的其他成员包括各燃料提供商和其他一些为研究方向和实施计划提供建议的联邦和州的政府部门。他们之间的密切合作和协调减少了重复劳动,保证了技术的快速发展。

随着研究的不断深入,各种类型的燃料电池车相继出现,使燃料电池车家族不断壮大。下面将把各大公司推出的燃料电池车按地区加以归纳整理。

3.7.1 美国通用汽车公司

“Electrovan”是通用汽车公司在 1966 年推出的世界上第一个可驾驶的燃料电池示范车。该车使用液态氢作为燃料,纯氧作为氧化剂,行驶里程为 240km,最高车速为 112km/h(70mile/h),如图 3-31 所示。



图 3-31 通用汽车公司的第一辆燃料电池汽车 Electrovan

“氢动一号”曾在 2000 年悉尼奥运会上为马拉松领跑。它是利用通用公司在德国生产的一款“欧宝”轿车的平台开发的。其燃料为液态氢,存储在不锈钢罐中,位于后轴前的后座下面,钢罐直径为 400mm,长为 1000mm,容量为 75L/5kg 液态氢。燃料电池堆包括 200 个串联的单体,外形尺寸(长×宽×高)为 590mm×

270mm × 500mm,总电压为 125V ~ 200V。电机为三相异步交流电机,工作电压范围为 250V ~ 380V,功率输出为 55kW ~ 60kW,扭矩为 251N · m ~ 305N · m,电机上装有一个单级减速器,总质量为 68kg,前轮驱动。用于短时间峰值功率输出的电池放在汽车尾部的地板下面。车辆的整备质量为 1575kg,0 ~ 100km/h 加速时间为 16s,最高车速为 140km/h,一次加氢续驶里程为 400km。其外形如图 3-32 所示。



图 3-32 通用汽车公司的“氢动一号”燃料电池汽车

通用汽车公司还曾推出过 Precept 概念轿车,驱动形式有混合驱动和纯燃料电池两种。Precept 为四轮驱动,燃料电池的电驱动前桥的电机。实际运行数据显示,Precept 轿车的等效燃油经济性能达到 108 mile/gal。

在 2002 年北美国际车展上,美国通用汽车公司的燃料电池概念车“自主魔力”(Autonomy)亮相(图 3-33)。它运用了当今世界最尖端的技术和革命性的设计理念。

“自主魔力”是第一款从零开始全新设计,使用燃料电池驱动系统的车型,也是第一款将燃料电池与线传操控(X-by-wire)电子控制技术相结合的车型。

线传操控电子控制技术使其操控系统、制动系统和其他车载系统能够通过电子方式而不是传统的机械方式进行控制。由于采用了线传操控电子控制系统,驾驶员无需通过踏板进行驾驶,而仅仅需要一个操作引导系统——该系统被称为“X-Drive(操作系统)”。这一系统可以非常容易地将驾驶位置调整至左侧、右侧或者中间。这种具备极大自由性的设计使乘坐更加灵活和舒适。此外,车厢底部也是完全平整的,这又提供了更多的内部空间和更大的灵活性,并且使得乘客上下车更加方便。

“自主魔力”以可灵活组合的燃料电池组为动力,从而革命性地改善了汽车的载客空间和载货能力;它运用全球最丰富的可再生资源——氢作为能源,排放物只有水,彻底改变了车用能源的结构。

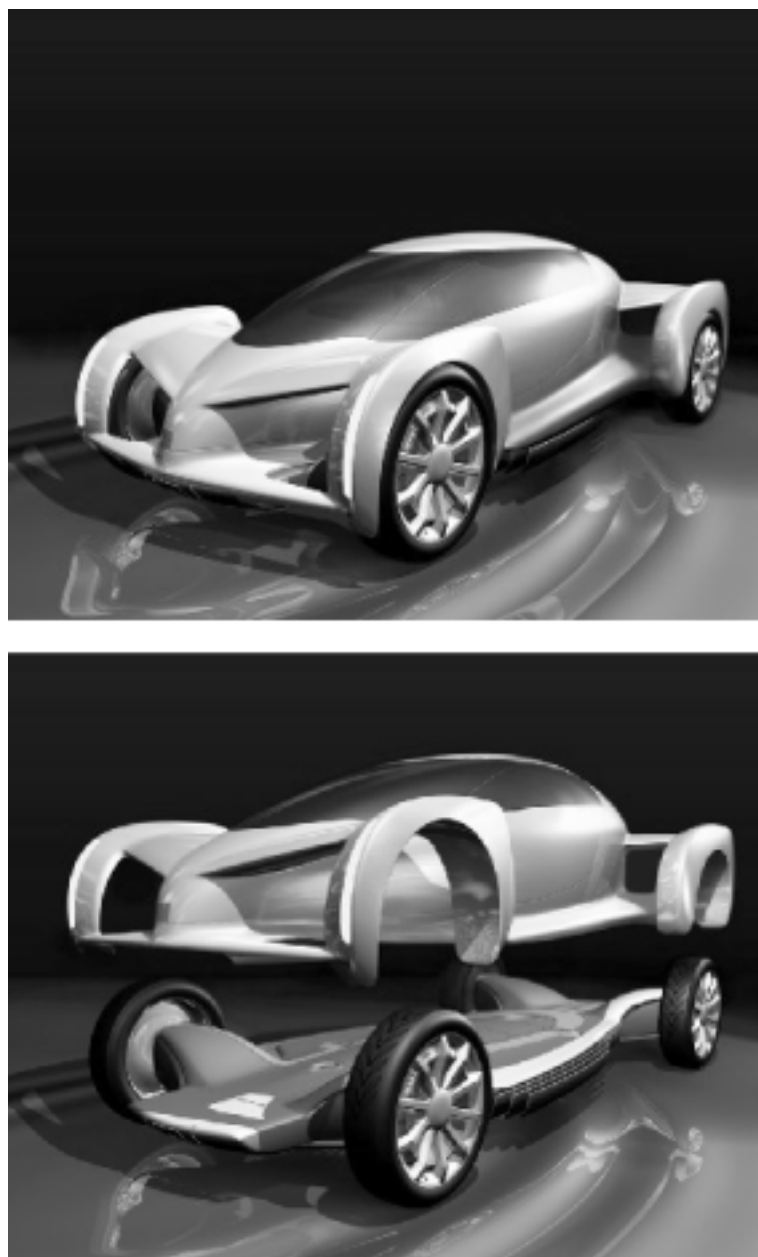


图 3-33 “自主魔力”外型示意图

“自主魔力”中所有的关键系统,包括燃料电池组和车载氢燃料存储系统,都非常整齐地安装在形状酷似滑板的底盘上。其灵活的结构使得生产商可以将车身和底盘分开制造。规模性的底盘生产和简化的制造过程可以降低燃料电池系统的成本。最终使得燃料电池车符合大众的购买力。

其车身设计也彻底摆脱了传统设计的束缚。在这种车型中因为没有脚踏板或驾驶杆,车身形状也可以随心所欲地进行改变。所以客户能够根据自己的需求租用和更换各种类型的车身。

“自主魔力”电子系统的“神经网络”是一个通用的接入端口,它位于滑板底盘的中心位置。该接入端口提供了一种简便而快捷的方式,使得所有的车内系统——包括控制系统、动力系统以及加热系统——都能够方便地与运动的底盘相连。

线传操控电子控制系统由计算机进行管理,可以通过软件下载进行升级来提高汽车的运行性能。还可以对汽车进行定制,以调整特定的品牌特征、车身类型,以适应客户的不同要求。

从安全性的角度看,“滑板式”底盘的重心非常低。具有出色的操控性,同时还能够很好地防止翻滚事故,即使在采用最高车身的情况下也同样如此。如果发生碰撞事故,车厢底部坚固的底盘将能够吸收绝大部分冲击力,使乘客舱免于因碰撞而内陷,同时它比目前采用的内燃机、操纵杆和脚踏板的传统车型更能降低人身伤害事故的发生。

通用汽车公司已为“自主魔力”申请 24 项专利,范围涉及商业模式、技术和制造等各方面。

继推出“自主魔力”概念车 8 个月后,在 2002 年 9 月的巴黎车展上,美国通用汽车公司发布了可以驾驶的采用线传操控技术的燃料电池车“Hy-wire”(图 3-34)。其原型就是在 2002 年 1 月于美国底特律车展上发布的概念车“自主魔力”。



图 3-34 通用汽车公司 Hy-wire 燃料电池电动车

Hy-wire 的主要技术参数如下:

底盘(滑板)尺寸 4300mm(长)×1670mm(宽)×280mm(高);

整车总质量 1898kg(4185lb);

最高车速 160km/h(100mile/h);

燃料电池功率 94kW(连续),129kW(峰值);

燃料电池堆电压 125V~200V。

有报道称,通用公司计划于 2010 年将该车型投放市场。

3.7.2 美国福特汽车公司

福特、巴拉德和戴姆勒-克莱斯勒三家公司将密切合作开发燃料电池发动机和电驱动系统。2000 年,福特公司已向“加州燃料电池伙伴计划”交付一辆以氢气为燃料的汽车。

2000 年,福特展示了其“THINK”FC5 家庭用轿车,采用巴拉德公司的甲醇重整燃料电池系统。该车型基于 2000 年款福特 Focus,驱动系统位于车厢地板下,所以为乘客和货物提供了更宽敞的空间。

福特 P2000 Prodigy 是一辆由燃料电池驱动的轿车,使用车载氢气为燃料,设

计性能与福特的 Taurus 相近,燃料电池发动机功率为 90 马力(约 67 .1kW)。如图 3-35 所示。福特公司的 P2000 SUV 概念车为带甲醇重整的运动型车。

福特和 Mobil 公司合作研制燃料处理器,从碳氢化合物中得到燃料电池用的氢气。

3.7.3 美国克莱斯勒汽车公司

克莱斯勒公司推出了基于 Jeep Commander 的燃料电池概念车(图 3-36)。其发动机采用燃料电池和电池混合驱动设计,并且使用汽油作为燃料。



图 3-35 福特公司的 P2000 燃料电池车



图 3-36 Jeep Commander 燃料电池车

3.7.4 加拿大巴拉德动力系统公司

巴拉德公司是汽车用 PEM 燃料电池的主要提供商。该公司为世界上很多汽车制造商提供燃料电池动力系统。2000 年推出其最先进的燃料电池堆 Mark 900,使用低成本材料并且为大批量生产而设计。图 3-37 是该公司研制的燃料电池大客车。



图 3-37 巴拉德公司的燃料电池大客车

3.7.5 戴姆勒-奔驰汽车公司

在燃料电池汽车开发和销售方面,戴姆勒-奔驰公司是巴拉德的股东和福特的合作伙伴。戴姆勒-奔驰公司将拿出 7.25 亿美元和巴拉德与福特进行燃料电池汽车的合作研究。该公司曾在 1993 年开始 Necar-1 燃料电池货车的实车道路试验。Necar 系列的燃料电池汽车目前已经开发到了第五代,使用的燃料也是各种各样。下面将对 Necar 系列燃料电池车作简要介绍。

Necar-1(图 3-38)是戴姆勒-奔驰公司制造燃料电池驱动车辆的第一次尝试。展示于 1994 年的这辆原型车像是一个“移动的实验室”。它的基础车型是一种两座的运输车辆,除了司机和前排乘客的位置,其余空间都被燃料电池系统占据。尽管这辆车显得并不完美,但是它有力地证明了燃料电池作为车辆动力的可能性。在一次加满压缩氢气后,它的续驶里程能达到 100km。



图 3-38 戴姆勒-奔驰公司的 Necar-1

Necar-2(图 3-39)诞生于 1996 年,它在 V-class 车型上加装了使用压缩氢气的燃料电池系统。相对于 Necar-1 而言,它的车速更快,续驶里程也更长,达到了 250km。由于将燃料储存罐置于车顶上,Necar-2 看起来很像一辆宿营车,这也使



图 3-39 戴姆勒-奔驰公司的 Necar-2

车内有了三排座椅的空间。与 Nekar-1 相同,它也达到了完全的零排放。

1997 年诞生的 Nekar-3(图 3-40)是在 A-class 上进行的改装,比以往车型显得更紧凑精干。这是第一辆使用车载氢气重整装置的燃料电池电动汽车。它使用液态甲醇作为燃料,在车辆后部的重整装置中将甲醇转化为氢气。这个技术上的突破不但去掉了氢气罐,降低了车重,还提高了车辆的可用性,因为在现阶段甲醇比压缩氢气更容易获得。使用甲醇所导致的排放只能达到 SULEV 标准,但这也远远低于现阶段排放法规的要求。



图 3-40 戴姆勒-奔驰公司的 Nekar-3

1999 年,戴姆勒-奔驰在 A-class 车型基础上进行了另一次改装燃料电池驱动系统的尝试。这次改装的目的是为了证明燃料电池汽车能够拥有通常的 ICE 汽车一样的乘坐舒适性和行驶性能。Nekar-4(图 3-41)有足够 5 人乘坐的空间,续航里程达到 450km,最高车速 145km/h。驾驶起来舒适、平顺,同时达到了零排放标准。为了达到这些优异的性能,Nekar-4 采用了液氢作为燃料,这导致了整车成本上升和维修困难等一系列缺点。



图 3-41 戴姆勒-奔驰公司的 Nekar-4

2000 年 11 月,戴姆勒-奔驰公司在柏林发布了以甲醇为燃料的燃料电池车 Nekar-5(图 3-42),并将 Nekar-5 定位为第一个达到实用阶段的甲醇重整燃料

燃料电池汽车。Necar-5 是 Necar-3 的后继者。1997 年戴姆勒-奔驰公司使用 Necar-3 首次证明了燃料电池所需要的氢可以从车载甲醇中提取出来。但 Necar-3 整套动力系统(包括甲醇转化器)的体积非常庞大,而 Necar-5 的整套动力系统结构较紧凑,体积比 Necar-3 减小了一半,功率却提高了 50%。Necar-3 需要两个燃料电池堆才能产生 50kW 的电能,而 Necar-5 仅仅用一个电堆就能产生 75kW 的电能。Necar-5 未配备电池,整套燃料电池系统包括甲醇转化器首次安装在梅赛德斯·奔驰 A 级车的底部,提供了和传统梅赛德斯·奔驰 A 级车一样宽敞的内部空间。Necar-5 最高车速超过 150km/h。



图 3-42 戴姆勒-奔驰公司的 Necar-5

Nebus(图 3-43)是戴姆勒-奔驰公司制造的一辆燃料电池城市客车。它使用了 10 个峰值功率为 25kW 的燃料电池。燃料电池发动机系统置于原来放置内燃机和齿轮箱的位置。Nebus 的输出功率为 150kW,可以与现有的柴油驱动的传统大巴媲美。燃料供给系统、驱动系统和冷却系统都安装在地板下方,不影响乘坐的舒适性。它装载了 7 个 150L 的压缩氢气燃料罐,能提供 250km 的续驶里程。



图 3-43 戴姆勒-奔驰公司制造的 Nebus

3.7.6 日本丰田汽车公司

日本丰田汽车公司自 1992 年致力于发展电动汽车以来,一直积极进行燃料电池汽车的研制工作。1996 年,在第 13 届国际电动汽车研讨会上,丰田公司展示了其采用储氢合金方式储氢的燃料电池汽车。1997 年又展示了其第一辆采用车载甲醇重整制氢的燃料电池汽车。2001 年 2 月,在东京举行的国际燃料电池汽车研讨会上,丰田公司推出其燃料电池混合动力车 FCHV-3(图 3-44),FCHV-3 是以 Highlander 运动型多功能车(SUV)为原型,采用“燃料电池+电池”的混合驱动型式,所使用的燃料电池是丰田公司开发的 90kW 燃料电池(polymer electrolyte fuel cell),电池采用氢-镍电池,储氢方式为储氢合金。



图 3-44 丰田汽车公司的燃料电池车 FCHV-3

2001 年 6 月,丰田公司在第 4 届丰田环境论坛上宣布燃料电池汽车 FCHV-4(图 3-45)研制成功,FCHV-4 是以 Kluger-V SUV 为原型开发的,使用纯氢为燃料



图 3-45 丰田汽车公司的燃料电池车 FCHV-4

的燃料电池混合动力车。FCHV-4 采用高压储氢瓶方式储氢,共采用了 4 个高压气瓶。每只容积 34L,储氢压力为 250 个大气压,被布置在车辆底盘下。与使用储氢合金相比,整个储氢系统质量减轻了 200kg,只有 100kg 左右。燃料电池仍采用丰田独自开发的 90kW 燃料电池,电池采用氢-镍电池,驱动电机采用 80kW 永磁同步电机。一次充氢可以行驶 250km 以上的距离。而且,该车采用了热泵式空调系统,该系统使用 CO₂ 作制冷剂,实现了无氟化。

在 2001 年东京汽车展上,丰田公司展出了其燃料电池汽车 FCHV-5 (图 3-46),主要特点是采用车载清洁碳氢燃料(clean hydrocarbon fuel,CHF)重整方法制氢,CHF 不仅含硫量低,而且燃料来源广泛,可以从石油、天然气、煤炭等多种原料中制取。另外,使用汽油的汽车也可以使用 CHF,还可以使用现有的加油站设施。FCHV-5 使用的燃料电池、马达等主要零部件同 FCHV-4 一样。车载的 CHF 重整器,通过改进催化剂、热交换器等,可以提供更高质量的氢。另外,FCHV-5 通过各部件的最佳搭配,使整车结构更加紧凑。



图 3-46 丰田汽车公司的燃料电池车 FCHV-5

丰田汽车公司在 2001 年第 4 届丰田环境论坛上,公布了日野汽车公司研制的燃料电池公交车 FCHV-BUS1(图 3-47),该车采用低地板设计,燃料采用高压氢气,动力系统采用“燃料电池 + 电池”的混合动力系统,燃料电池功率 90kW,可载客 63 人。2002 年,对 FCHV-BUS1 进行了多项改进,并在此基础上开发出燃料电池公交车 FCHV-BUS2(图 3-48)。FCHV-BUS2 的主要特点是燃料电池由 FCHV-BUS1 的 1 个增加到 2 个,从而将燃料电池的输出功率提高到 180kW。驱动系统采用双电机驱动方式。表 3-8 列出了 FCHV-BUS2 的主要技术参数。



图 3-47 丰田公司 Hino 分公司的燃料电池公交车 FCHV-BUS1



图 3-48 丰田公司 Hino 分公司的燃料电池公交车 FCHV-BUS2

表 3-8 FCHV-BUS2 主要技术参数

项 目	技术参数
外形尺寸(长×宽×高)/ mm	10515 × 2490 × 3360
乘客人数/ 人	60
最高车速/(km/h)	80
一次充氢续驶里程/ km	250
燃料电池	丰田 90kW × 2
驱动电机	永磁同步电机 80kW × 2
储氢方式	高压储氢最高压力 35MPa
氢-镍电池	4 × 6 5A · h × 40(288V, 4 组并联)

3.7.7 日本本田汽车公司

本田公司于1999年9月发布了其燃料电池原型车FCX-V1和FCX-V2(图3-49)。FCX-V1采用纯氢作为燃料,采用金属合金储氢方式。燃料电池电堆由加拿大巴拉德公司提供,功率60kW。FCX-V2采用车载甲醇重整制氢工作方式,燃料电池由本田公司自己开发。这两种车型都以本田的EV Plus为原型改造而成,只能乘坐2人,采用“燃料电池+电池”混合驱动方式。



图3-49 本田公司研制的燃料电池汽车FCX-V1(a)和FCX-V2(b)

2000年9月本田公司推出了经过改进的燃料电池原型车FCX-V3(图3-50(a)),并将其送到美国“加州燃料电池合作伙伴计划”进行试验。本田在FCX-V3



图3-50 本田公司研制的燃料电池汽车FCX-V3(a)和FCX-V4(b)

上实现了中央集成控制,其主要关键部件的设计和整车布置更加紧凑,可以乘坐4名乘客。FCX-V3采用独特的“燃料电池+超级电容”的混合驱动方案,燃料电池选用巴拉德公司的电堆,堆功率为62kW。储氢方式采用100L高压储氢瓶方式,储氢压力25MPa。

2001年9月,本田公司宣布燃料电池车FCX-V4(图3-50(b))开发研制成功。对FCX-V4的各主要部件进行了全面的改进,其各种性能已经接近大批量生产的传统汽车,并采取了碰撞安全保护措施。燃料电池采用巴拉德公司的电堆,输出功率为78kW。储氢瓶容积增加到130L,压力为35MPa,一次加氢可以行驶约

300km,最高车速可达 140km/h。

在 2002 年秋季的第 36 届东京汽车展上,本田公司展示了其计划在日本和美国两地限量销售的商品燃料电池车 FCX(图 3-51)。该车是在本田 FCX-V4 的基础上改进而成的,FCX 商品车与其前身 FCX-V4 的主要区别是车身全长缩短 40mm,配备了显示燃料电池发电状态及电容器充放电状态、可行驶距离和行驶车速的“三眼式”仪表盘,但主要构件与布局基本和 FCX-V4 一样。另据报道,本田公司已与美国洛杉矶市就租售 5 辆 FCX 达成了基本协议。表 3-9 列出了 FCX 的技术参数。



图 3-51 本田公司研制的燃料电池汽车 FCX

表 3-9 燃料电池汽车 FCX 的技术参数

项 目		技术参数
乘客数/ 人		4
最高车速/ (km/h)		150
驱动电机	最大功率/ kW	60
	最大扭矩/ N·m	272
	型式	永磁同步电机
燃料电池堆	型式	PEM(巴拉德公司)
	输出功率/ kW	78
燃料	储氢方式	高压氢气
	压力/ MPa	35
	容积/ L	156.6
外形尺寸(长×宽×高)/ mm		4165×1760×1645
辅助储能装置		超级电容
一次加氢续驶里程/ km		355

此外,日产汽车公司、德国大众公司、宝马汽车公司、法国雷诺公司、标致雪铁龙汽车公司等世界著名的大汽车公司也都在从事燃料电池汽车的研究开发工作。

参考文献

- 1 李发海, 伦景光, 陈全世等. 电工高新技术丛书(第6分册): 电动汽车. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 2 陈清泉, 孙逢春. 现代电动车技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- 3 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 4 Bose B K. Power electronics and variable frequency drives. New York: IEEE Press, 1997
- 5 Vas P. Vector control of AC machines. New York: Oxford University Press, 1990
- 6 Novotny D W, Lipo T A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. New York: Oxford University Press, 1996
- 7 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 8 李钟明, 刘卫国等. 稀土永磁电机. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 9 曹建荣. 混合动力电动车若干关键技术的研究: [博士后出站报告]. 北京: 清华大学, 2004
- 10 吴凯. 一种新型无刷直流电动机系统的研究: [学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1997
- 11 户岛和夫, 久保馨. 丰田汽车公司 EHV 技术部. 2000 年丰田汽车技术讲座资料, 2000. 12
- 12 Tetsuo Sakai, Ituki Uehara, Hiroshi Ishikawa. R&D on metal hydride materials and Ni-MH batteries in Japan. J Alloys and Compounds, 293-295(1999)762 ~ 769
- 13 Tadao Kimura, Munehisa Ikoma, Kunio Kanamaru. Nickel-MetalHydride Batteries for Hybrid Electric Vehicle. EVS-15(1998)
- 14 Corrigan D, Menjak I, Cleto B, Dhar S, Ovshinsky S. Nickel-Metal Hydride Batteries for ZEV-Range Hybrid Electric Vehicles. EVS-17(2000)
- 15 王金国, 叶德龙等. 电动汽车用镍-氢电池的技术发展方向. 汽车电器, 2000, 4
- 16 Werner R. On board battery diagnostic and charge equalizing system. EVS-11, Florence
- 17 Do Y J, Baek H L, Sun W K. Development of battery management system for nickel-metal hydride batteries in electric vehicle applications. Journal of Power Sources, 109 (2002) : 1 ~ 10
- 18 Sabine P, Marion P, Andreas J. Methods for state-of-charge determination and their applications. Journal of Power Sources, 96(2001):113 ~ 120
- 19 Ahmad A P, Steve B, Matthew K. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs. For presentation at The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, London, 1999
- 20 Buller S, Karden E, Kok D, et al. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy industry application 2001. 36th IAS Annual Meeting
- 21 Andrew B, et al. Ultracapacitors: why, how and where is the technology. Journal of Power Sources, 91(2000) :37 ~ 50
- 22 Beliakov A I, Brintsev A M, et al. Development and application of combined capacitors: Double Electric Layer—Pseudocapacity. The 7th International Seminar On Double Layer

Capacitors and Similar Energy Storage Device

- 23 Peter J M, George L P, et al . Measurement and modelling of the high-power performance of carbon-based supercapacitors . Journal of Power Sources, 91 2000:68 ~ 76
- 24 Eugenio Faggioli, Piergeorgio Rena, et al . Supercapacitors for the energy management of electric vehicles . Journal of Power Sources, 84 1999:261 ~ 269
- 25 Khalid B, Roger D D, et al . Hybrid Electric Vehicle: A Simulation Study . Proceeding of IASTED International Conference, 1999
- 26 张丹丹,李劲 .双电层电容器特性研究 .高电压技术,2001(10)
- 27 钟海云,李奎等 .新型能源器件—超级电容器研究发展最新动态 .电源技术,2001,25(5):367
- 28 马仁志,魏秉庆等 .基于碳纳米管的超级电容器 .中国科学,30(2)
- 29 张玲,唐冬汉等 .超级电容器极化电极材料的研究进展 .重庆大学学报,2002:25(5)
- 30 李海晨 .车用超级电容特性的试验研究:[硕士学位论文] .北京:清华大学汽车工程系,2003

建模仿真与能量管理策略

燃料电池汽车动力系统庞大而复杂,各部件的物理特性和“运动行为”各异,存在大量非线性环节和时变特性,使得传统的模拟计算方法难以奏效,只有建立起各部件的模型才有可能准确描述整个系统的特性和行为。系统仿真在设计过程中起到了举足轻重的作用。

通过仿真,可以在设计初始阶段快速分析系统的加速性能和燃料经济性,同时提供动力系统详细的仿真和分析结果,优化和匹配各部件及其参数,考察能量管理策略的有效性和正确性,从而为车辆的后续设计和开发提供有力的参考和依据。建模与仿真在车辆设计中的重要性主要体现在以下几个方面:

(1) 燃料电池系统各部件之间的相互作用频繁而复杂,只有通过仿真才能定量地分析其对系统性能的影响和作用。

(2) 动力部件的性能参数对于保证动力性能等优化设计目标至关重要。由于参数较多,各参数的匹配和优化方法也不尽相同,使用传统的计算方法或者通过大量的试验来测定这些参数往往得不偿失。而使用系统仿真的方法,可以在保证系统级设计目标的前提下,大大提高参数匹配的速度与准确性。

(3) 混合驱动车辆的能量管理策略多种多样,对其进行优化是需要解决的核心问题。仅仅依靠大量的试验来测试各种控制策略的实际效果不但代价高,实际上也是不可行的。通过系统仿真就可以解决这一问题。

4.1 电动汽车仿真技术及其应用现状

4.1.1 仿真的基本概念

系统仿真技术是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算机技术等理论基础之上,以计算机和其他专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或假想的系统进行试验,并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对试验结果进行分析研究,进而作出决策的一门综合性和试验性的学科。

最初,仿真技术主要用于航空、航天、原子能反应堆等价格昂贵、周期长、危险

性大、实际系统实验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、化工、机械等一些主要工业部门,并进一步扩大到社会系统、经济系统、交通运输系统、生态与环保系统等一些非工程系统领域。

按照参与仿真的模型的不同种类,可将系统仿真分为物理仿真、数学仿真及物理-数学仿真(又称半物理仿真或半实物仿真)。

物理仿真,又称物理效应仿真,是指按照实际系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行试验研究。物理仿真直观形象,逼真度高,但不如数学仿真方便。尽管不必采用昂贵的原型系统,但在某些情况下要构造一套物理模型也需较大的投资,且周期也比较长,此外,在物理模型上做试验不易修改系统的结构和参数。

数学仿真是指首先建立系统的数学模型,并将数学模型转化为仿真计算模型,通过仿真模型的运行达到对系统运行的目的。现代数学仿真由仿真系统的软件/硬件环境,动画与图形显示、输入/输出等设备组成。数学仿真在系统设计和分析阶段是十分重要的,通过它可以检验理论设计的正确性与合理性。数学仿真具有经济性好、灵活性强和仿真模型通用性好等特点。

物理-数学仿真的准确称谓是硬件(实物)在环仿真(hardware in the loop, HIL)。这种仿真将系统的一部分以数学模型描述,并把它转化为仿真计算模型,另一部分以实物(或物理模型)方式引入仿真回路。这种仿真充分发挥物理仿真和数学仿真的优越性,避免各自的缺点,是一种重要的仿真手段。

硬件在环仿真环境实现了物理硬件和软件模型的互换,从而可以在原型车不存在的情况下进行部件或整车的试验,也可对潜在的部件技术及其组合方案进行评价、筛选,从而确定最终方案。

按照仿真实验中所取的时间标尺(模型时间)与自然时间(原型)标尺 T 之间的关系可将仿真分为实时仿真和非实时仿真两大类。实时仿真的必要条件之一是 $t/T = 1$,而且需要相应的接口和实时同步时钟。

4.1.2 仿真方法

就燃料电池汽车而言,按照仿真过程中信息流动的方向不同,系统仿真可以划分为前向仿真和后向仿真两大类。

图 4-1 是后向仿真示意图,仿真循环的数据流方向与实际系统的能量流动方向相反,它以循环工况作为输入,逆推在此工况要求下,驱动系统各部件必须具备和可以得到的转矩、转速、功率等信息。后向仿真一般只能反映系统的静态特性,多用于系统设计阶段的参数匹配、能量管理策略确定和车辆动力性计算等。

图 4-2 是前向仿真示意图。在前向仿真中,仿真循环的数据流方向与实际系统的能量流动方向相同。驾驶员模型作为仿真的起点,由其感知系统和环境的各项参数或简单地跟随行驶工况,输出加速(油门)踏板和制动踏板信号。前向仿真

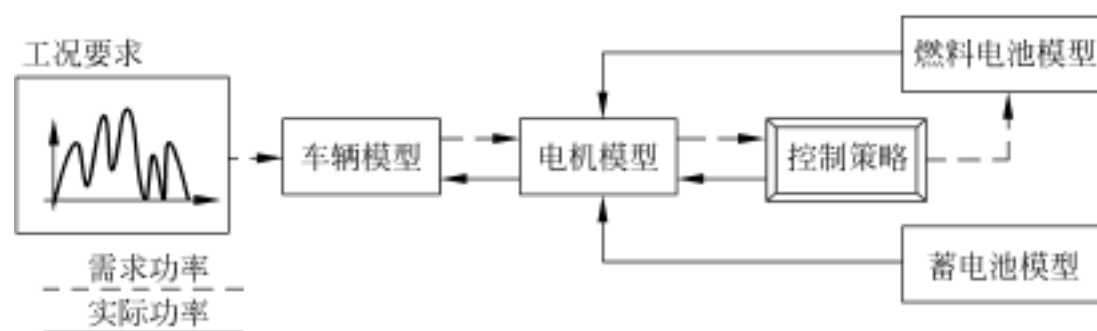


图 4-1 后向仿真示意图

的过程与汽车行驶时各部件的实际工作过程相一致。

前向仿真模型可以集成硬件在环仿真和驾驶员在环仿真,从而更真实地模拟系统运行状态和逻辑结构,主要可用于控制器的开发与测试。

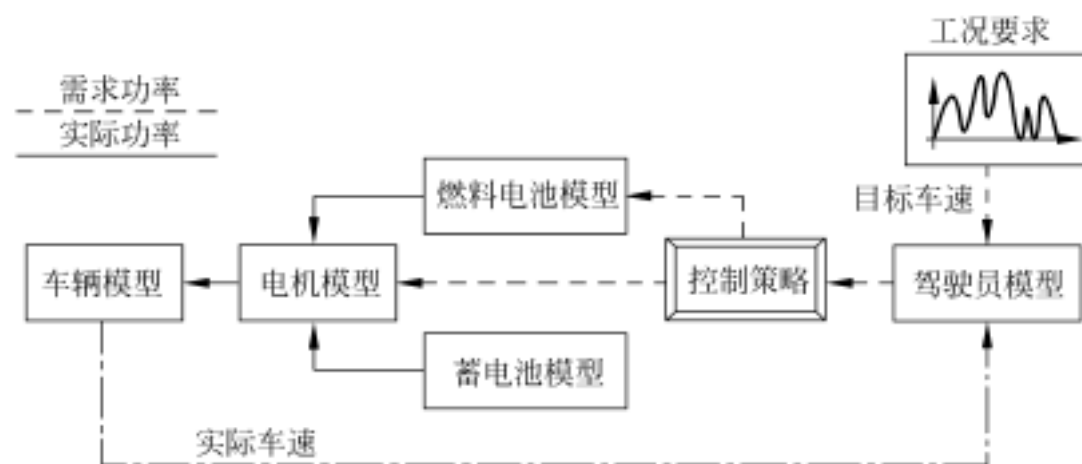


图 4-2 前向仿真示意图

燃料电池电动汽车的仿真研究应将后向仿真和前向仿真相结合,先利用后向仿真确定系统的基本参数和设计控制策略。对各部件有了深入了解后,再应用前向仿真对真实系统进行再现,最大限度地逼近实车,从而对前一阶段确定的动力系统参数和控制策略进行验证,并进行整车控制器的开发与测试工作。

4.1.3 常用的仿真软件

燃料电池汽车或者混合动力汽车的研究属于多学科交叉的领域,涉及机械、电力电子、化学、自动控制等多个学科,所以对仿真软件提出了更高的要求。随着计算机技术和建模理论与算法的迅速发展,出现了一大批通用的或者专业的仿真软件。每个软件都有各自的优缺点,如何在众多的软件中选择适合自己所用的软件是需要解决的首要问题。

按照建模方法的不同,可以把这些软件分为因果的(causal)和非因果的(non-causal)两大类。

采用因果的方法进行建模时,描述物理对象的方程必须以显式方程来表示,才能确定数据流的方向,即因果关系(causality)。因果方法一般只适合解常系数微

分方程(ODE 方程)问题,推导对象的因果关系模型的任务完全是由建模者来承担的。同时,由于 ODE 方程组与物理对象之间没有结构相似性,这也阻碍了模型的模块化和重用性。ODE 方程组的表达式如下:

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

式中, x 为一组状态变量, u 为输入, t 为时间。

非因果方法主要描述被建模系统的各个部件之间的互连关系,无需建模者推导出对象的显式因果关系,而是可以采用隐式的微分和代数方程(DAE 方程,也称为混合方程)对系统进行描述。DAE 方程组与物理对象之间有结构相似性,可以很好地支持模块化和重用性,同时也大大降低了建模者的负担。DAE 方程组的表达式如下:

$$f(x, \dot{x}, w, u, t) = 0$$

式中, x 为一组状态变量, w 为一组代数变量, u 为输入, t 为时间。

因果方法目前应用比较普遍, MATLAB/ Simulink 和 Ptolemy 是此类方法的典型代表。非因果方法应用得不太普遍,其典型代表为 Dymola 和 Saber。

采用 ODE 方程建立的模型一般都可进行定步长仿真(这是实时仿真的基本要求),并且能保证仿真精度;而采用 DAE 方程建立的模型一般要采用变步长的仿真方法才能保证足够的精度。

按照适用的领域不同,仿真软件有通用和专业之分。用于混合动力汽车的专业软件主要有: ADVISOR, V-ELPH, PSAT, VehProp, EASY5, CRUISE 等;通用软件的典型代表是 MATLAB/ Simulink,它已经成为控制系统开发和实时仿真领域的事实上的工业标准,与众多的仿真软件都有接口,并且还可以把图形化的模型直接编译成实时代码,从而可以大大提高建模与开发速度。很多专业仿真有的是基于 MATLAB 平台经过二次开发得到的,有的与 MATLAB/ Simulink 有丰富的接口。

4.2 燃料电池汽车的部件建模

除了燃料电池系统外,燃料电池汽车还包括车身/底盘、驱动电机及其控制器、辅助蓄电池及管理系统、超级电容和 DC/DC 等部件。本节主要对这些部件的建模进行探讨。

然而,建模的目的、现有参数和数据、现有建模工具等因素都会影响模型的具体实现。其结果是部件模型种类繁多,难以进行准确的分类。下文就目前文献中出现的、有代表性的各种部件模型,及目前从事电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车的研究人员在部件模型方面所做的工作进行介绍。

4.2.1 车辆部件及其建模

车辆(车身/底盘)是承载货物、乘客的基本部件。对于燃料电池汽车而言,一

般只需考虑车辆纵向动力学的模型。

如果不考虑前后轴的轴荷转移,就可将整个车辆(车身/底盘和轮胎)简化为一个不可变形的固体质量块,从而得到一个单自由度的集总参数模型。如图4-3所示。

根据整车质量 m 、风阻系数 C_d 、迎风面积 A_f 、路面坡度 等基本参数,按照《汽车理论》可得出汽车的行驶方程式,即

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (4-1)$$

式中, F_t 为牵引力或制动力; F_f 为滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_i 为爬坡阻力; F_j 为加速阻力。

滚动阻力 F_f 不仅取决于轮胎负载,还与轮胎尺寸、型式、结构,轮胎的气压等因素有关。根据复杂程度和自由度的不同,描述滚动阻力的模型也有好几种。一般可采用下面的公式来表示:

$$F_f = mg \cos \alpha (f_1 + f_2 V) \quad (4-2)$$

式中, m 为汽车质量, kg; f_1 为滚动阻力系数, 常量; f_2 为滚动阻力系数随车速变化的系数, s/m ; V 为车速, m/s 。

空气阻力 F_w 与作用于车辆横截面上的动态风压紧密相关,通常由迎风面积 A_f 、风阻系数 C_d 、空气密度 决定,并与车速 V 的平方成正比,即

$$F_w = \frac{1}{2} C_d A_f V^2 \quad (4-3)$$

爬坡阻力为

$$F_i = mg \sin \alpha \quad (4-4)$$

加速阻力为

$$F_j = m \frac{dV}{dt} \quad (4-5)$$

式中, δ 为汽车旋转质量换算系数(>1)。

如果考虑轴荷转移,就需要对车身建立两自由度的车辆模型(如图4-4所示),并假设车辆为后轮驱动。根据受力分析可很容易列出方程

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= F_t - F_f - mg \sin \alpha - F_w \\ F_z (a + b) &= \left[m \frac{dV}{dt} + mg \sin \alpha \right] h_g + mg \cos \alpha h_w + F_w h_w \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

式中, h_w 为空气阻力 F_w 等效作用点的高度。

当 $\delta = 1$ (即忽略各旋转部件的转动惯量)时,式(4-6)可变形得

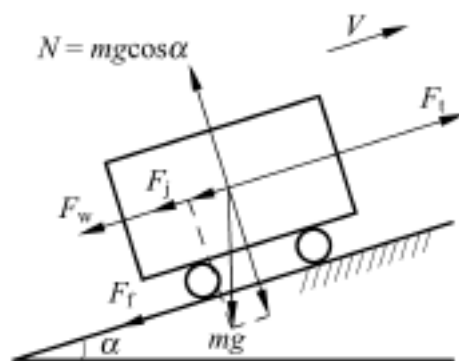


图4-3 单自由度车辆模型受力分析

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= F_t - F_f - mg \sin \alpha - F_w \\ F_z (a + b) &= (F_t - F_f - F_w) h_g + mg a \cos \alpha + F_w h_w \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

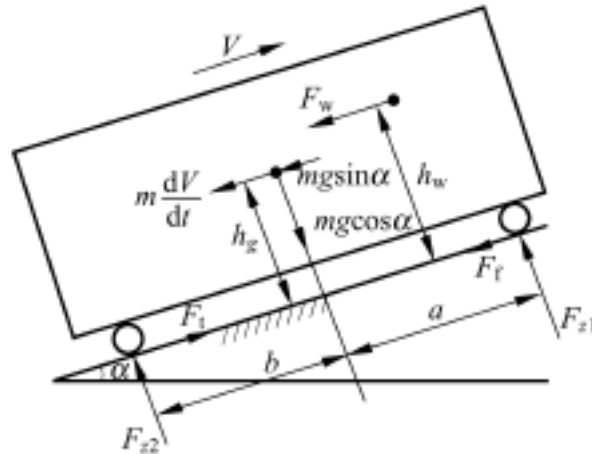


图 4-4 两自由度车辆模型受力分析

4.2.2 轮胎模型

如果采用两自由度的车辆模型,就需要对轮胎进行单独的建模。

实际轮胎是有弹性阻尼且与地面存在滑动的复杂结构。轮胎特性不仅影响车辆的实际行驶里程,而且与车辆的驱动和制动能力有直接的关系。由于车辆的启动和停车过程为非稳态的过渡过程,如果只采用上述的单质量车辆模型,仿真时就会出现车速过零点的问题,这不仅会造成一些逻辑上的错误,而且会造成额外的能量损失,这与实际情况差别比较大。

可以说,轮胎模型是车辆传动系统模型的关键。为了解决以上问题,就需要考虑轮胎的非稳态模型。

1. 轮胎纵向动力学稳态模型

轮胎的纵向牵引力

$$F_t = \mu(s_x) F_z \quad (4-8)$$

式中, F_z 为垂直载荷; $\mu(s_x)$ 为滑动附着系数,它是滑动率的函数。滑动率的定义如下

$$s_x = \frac{\omega r - V}{V} \quad (4-9)$$

式中, r 为轮胎半径; ω 为轮胎胎面的转速; V 为车速。

μ 与 s_x 的关系可以由试验获得,其关系曲线如图 4-5 所示,一般可通过 Pacejka“魔术公式”来进行拟合^[4],或者用简单的两段直线来拟合。

2. 轮胎纵向动力学非稳态模型

轮胎的非稳态模型需要考虑胎体的弹性, 商业化仿真软件 Easy5 中的轮胎模型, 如图 4-6 所示。

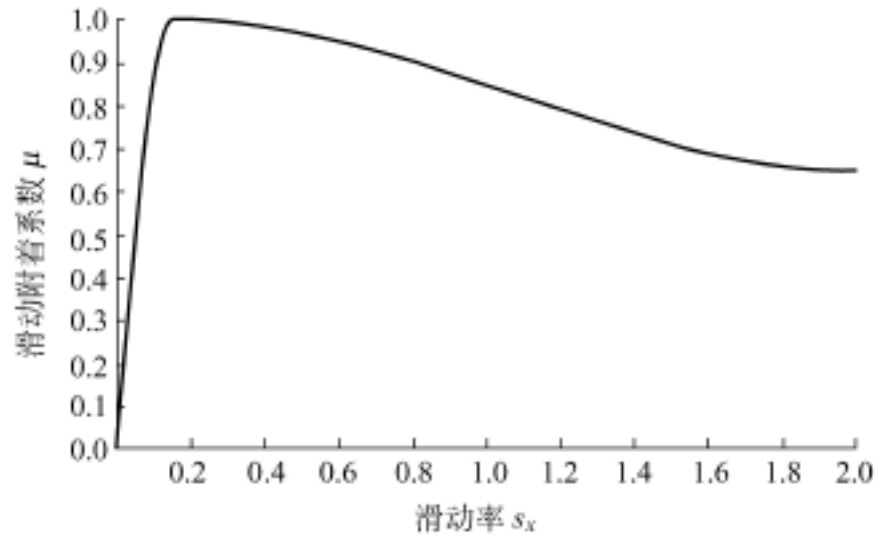


图 4-5 滑动附着系数-滑动率特性曲线

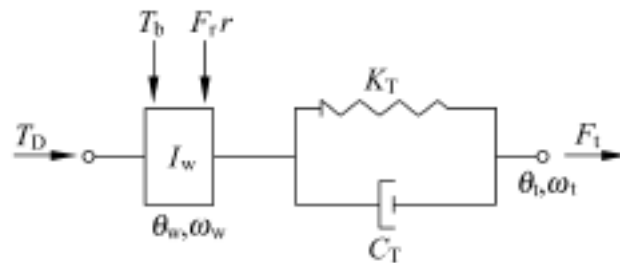


图 4-6 Easy5 轮胎模型

式中, F_r 为滚动阻力, N; T_b 为机械制动力矩, N · m; T_D 为驱动力矩, N · m; F_t 为纵向牵引力, N; ω_w, ω_t 为轮毂转角和角速度, rad, rad/s; θ_t, θ_t 为轮胎胎面的转角和角速度, rad, rad/s; K_T 为胎冠刚度, N · m/rad; C_T 为胎冠阻尼, N · m · s/rad。

设 $u = (\omega_w - \omega_t) r$, 则有

$$u = r \omega_w - V s_x - V \quad (4-10)$$

考虑“弹簧 + 阻尼”结构, 有以下约束关系

$$F_t = (K_T u + C_T \dot{u}) / r^2 \quad (4-11)$$

滚动阻力是车速的函数

$$F_r = C_r V + C_r V^2 \quad (4-12)$$

式中, C_r, C_r 为与车速有关的滚动阻力系数。

由轮毂的力矩平衡可得

$$I_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_D - T_b - F_r r - F_t r \quad (4-13)$$

式(4-10) ~ 式(4-13)构成了常微分方程与非线性代数方程的混合方程, 也就

是如前所说的 DAE 方程。对于这类方程,一般只能采用迭代和变步长的积分算法才能得到精确的数值解。

然而,即使在 Easy5 中也只能采用变步长的积分算法才能得到准确的数值解。当采用定步长时误差较大,即使仿真步长取得非常小($< 0.1\text{ms}$),在车速过零点时的仿真误差依然非常大。

下面通过合理的假设,将滑移率作为状态变量,从而将此 DAE 方程组转化为 ODE 方程组,以便于用 Simulink 进行求解。通过对比发现,该方法不仅仿真精度高,而且仿真速度快,振荡小。

3. 非稳态轮胎模型的 ODE 状态方程实现

式(4-10)对时间求导得

$$\ddot{u} = \dot{r}_w - \dot{V}_{S_x} - V_{S_x} - \dot{V} \quad (4-14)$$

式(4-11)对时间求导得

$$\dot{F}_t = (K_T u + C_T \ddot{u}) / \dot{r}^2 \quad (4-15)$$

对式(4-8)两边求导

$$\dot{F}_t = \mu(s_x)_{S_x} F_z + \mu(s_x) \dot{F}_z \quad (4-16)$$

式(4-16)中右边第二项相对于第一项可以忽略,这从下面的模型验证中也可以看出。从而有

$$\dot{F}_t = \mu(s_x)_{S_x} F_z \quad (4-17)$$

联立解得

$$S_x = \frac{K_T (r_w - V - V_{S_x}) + C_T (r_w - \dot{V} - \dot{V}_{S_x})}{\mu(s_x) F_z r^2 + C_T V} \quad (4-18)$$

用状态方程表示的轮胎模型可表示为

$$\begin{cases} I_w \frac{d}{dt} = T_D - T_b - F_r r - F_t \cdot r \\ F_r = C V + C_{rr} V^2 \\ S_x = \frac{K_T (r_w - V - V_{S_x}) + C_T (r_w - \dot{V} - \dot{V}_{S_x})}{\mu(s_x) F_z r^2 + C_T V} \\ F_t = \mu(s_x) F_z \end{cases}$$

滑动率被当作状态变量输出,避免了在 Easy5 中出现的算法局限,所建立的模型不仅仿真速度高,而且精度高,振荡小。

4. 模型验证

为了验证所建立的 Simulink 模型(图 4-7)的正确性,可用 Easy5 搭建一个包括车辆、轮胎、差速器和传动轴在内的驱动系统模型,如图 4-8 所示。

对两个模型施加如图 4-9 所示的驱动力矩, 仿真时间为 20s, Simulink 模型的仿真步长为 1ms。图 4-10 为两个模型车辆的车速对比曲线, 图 4-11 为滑移率对比曲线, 对 Easy5 模型和建立的 Simulink 轮胎模型分别进行仿真, 并对比其仿真结果。

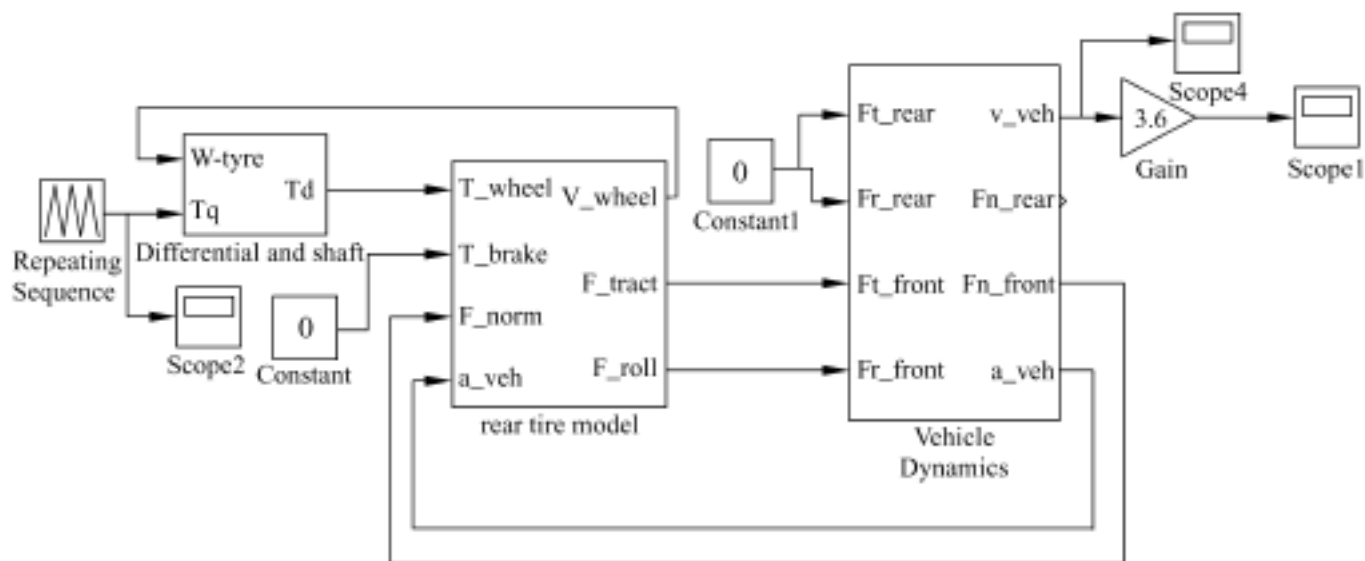


图 4-7 Simulink 实现的包括轮胎的车辆传动系模型

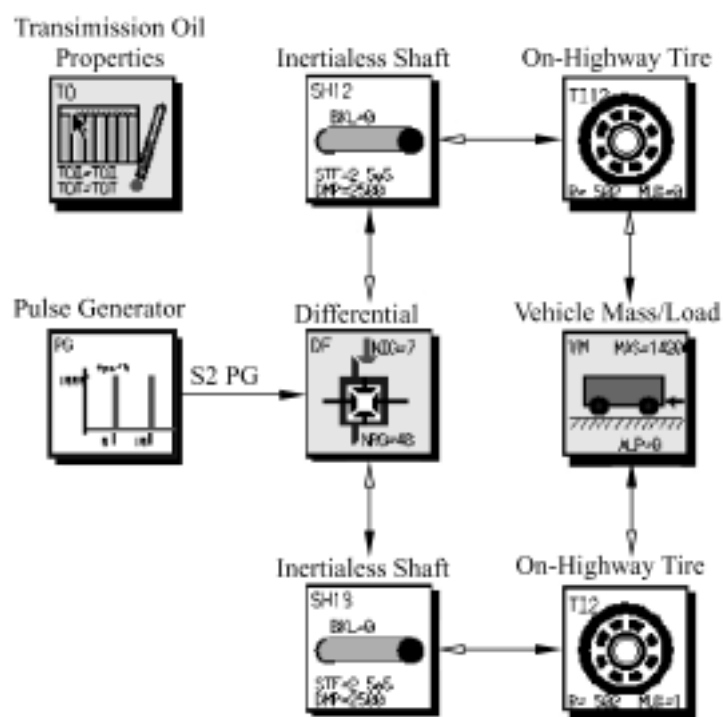


图 4-8 Easy5 传动系模型

可以看到, 两个模型的车速曲线和滑动率曲线都是基本吻合的, 这就证明了该 Simulink 模型的有效性。而且该模型还能实现起步/ 停车及轮毂抱死的车辆纵向动力学的全过程仿真, 拓宽了轮胎模型的适用范围。

4.2.3 驱动电机及其控制器

作为燃料电池汽车系统中的核心部件, 电机的主要作用在于驱动车辆行驶。同时, 电机驱动系统具有回馈制动能力。在整个系统控制和仿真中, 电机及其控制

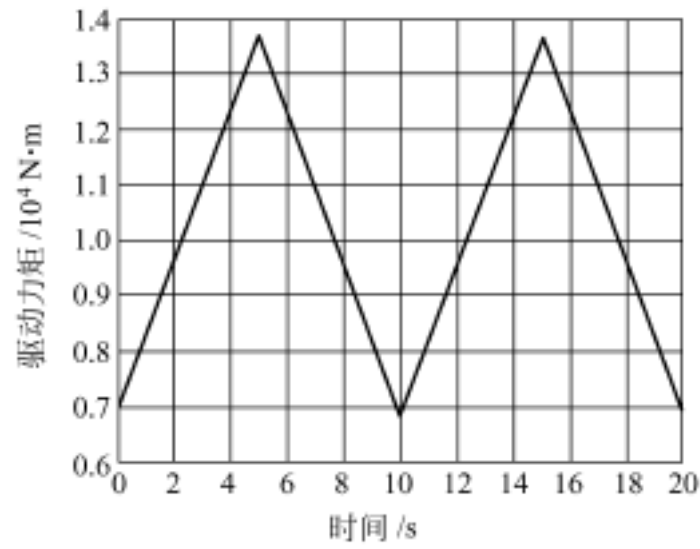


图 4-9 施加循环变化的驱动力矩

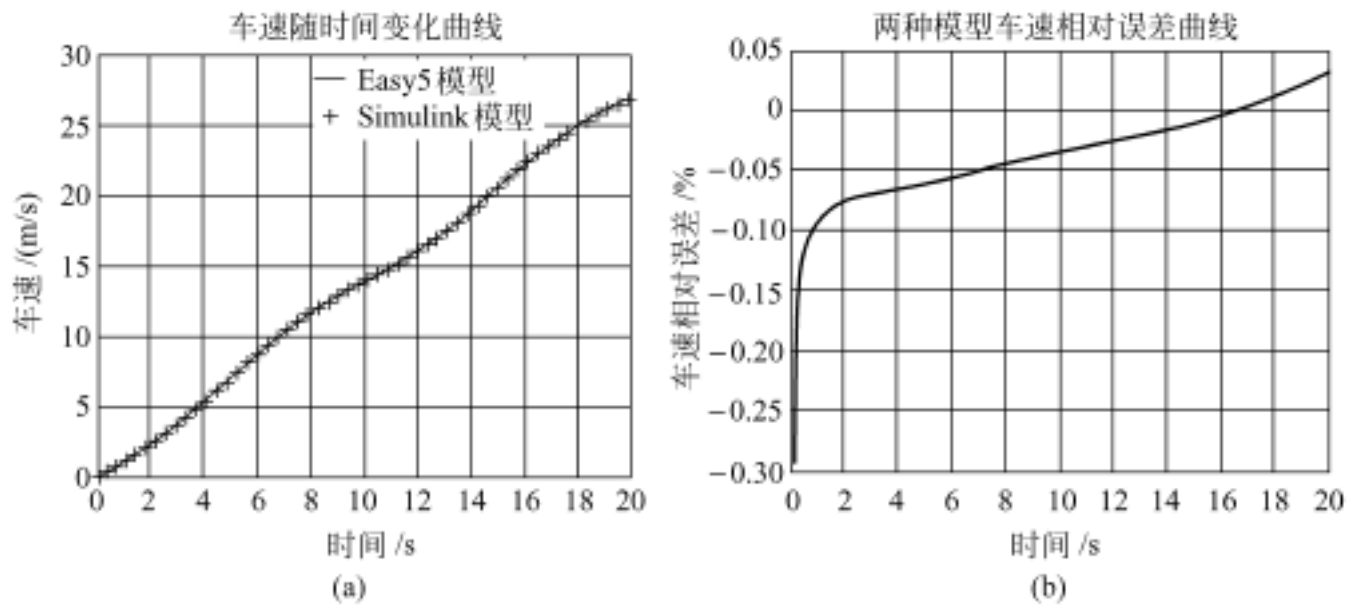


图 4-10 循环驱动力矩下的车速对比

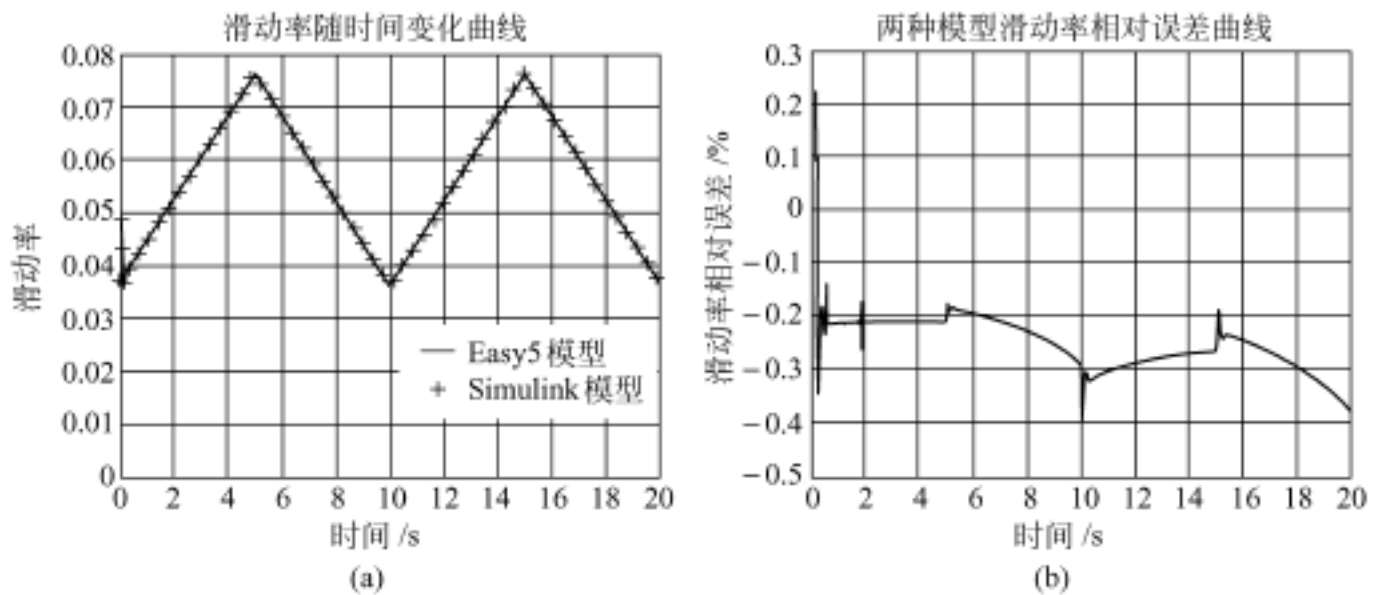


图 4-11 循环驱动力矩下的滑动率对比

器的模型占有重要的地位。

1. 基于效率图的稳态模型

当车辆制动时,电机工作在发电状态,电机驱动系统将行驶车辆的动能转化为电能,对电池充电。也就是说,电机控制器允许电机处于反转矩状态从而产生制动能量的回收。因为电机转矩的最大值依赖于电压和电机转速(驱动和制动模式下),可以把加速时电机特性简单地翻转到第四象限,作为制动时发电机特性,如图 4-12 所示。电机的效率图也做相近的处理,如图 4-13 所示^[12]。

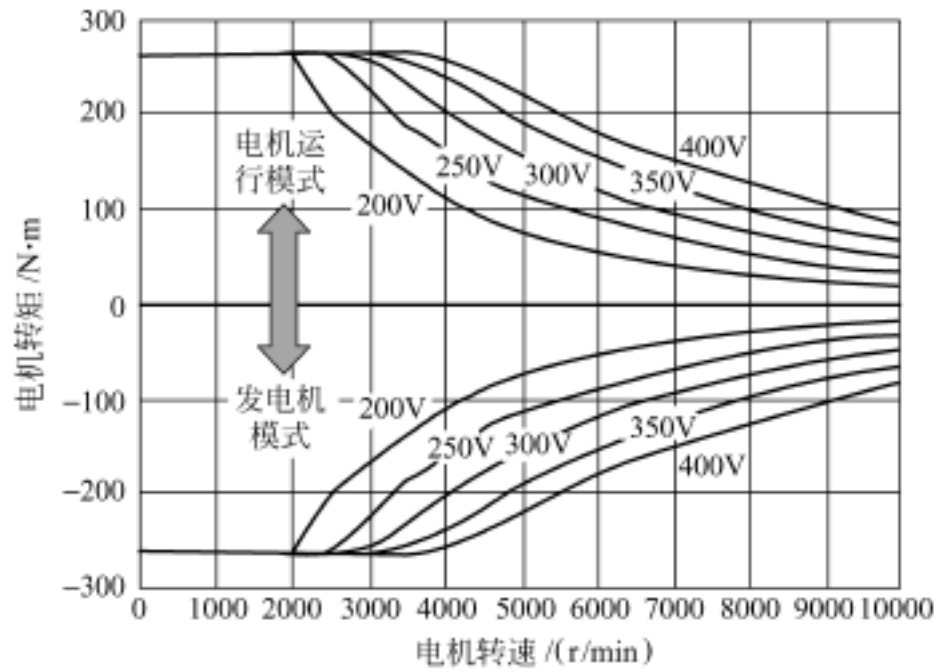


图 4-12 电机转矩与转速关系图

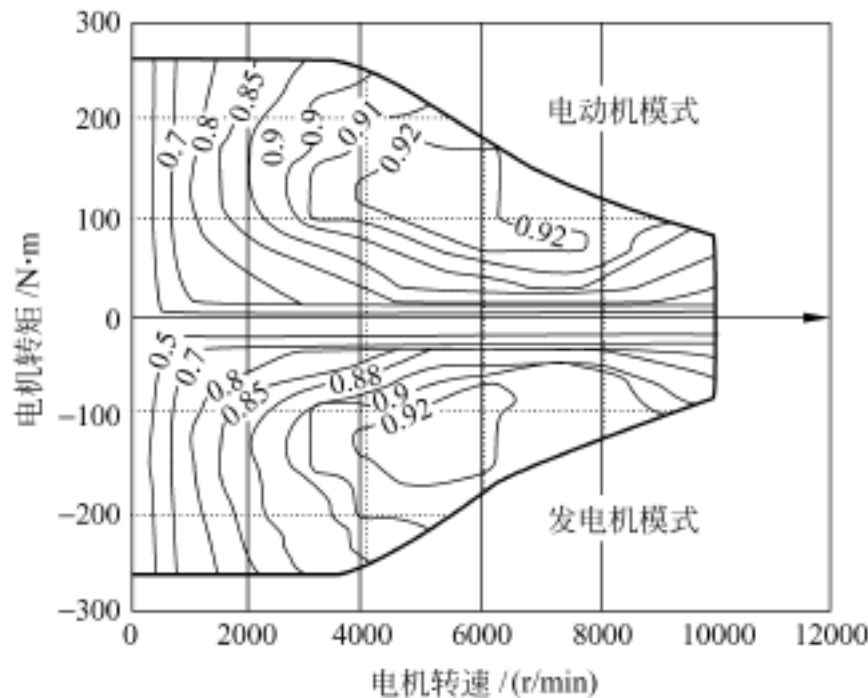


图 4-13 电机的效率图

2. 基于转子磁场定向的动态模型

如第 3 章所述,交流电机的转矩一般和定转子旋转磁场及其夹角有关。因此,要想控制转矩,必先检测和控制磁通。在矢量控制中,一般把 d - 坐标系放在同步旋转磁场上(M - T 轴),把静止坐标系中的各交流量转化为旋转坐标系中的直流量,并使得 d 轴与转子磁场方向(M 轴)重合,此时转子磁通 T 轴分量为零。同时转矩表达式成为

$$T_e = p_n \frac{L_m}{L} i_r^s i_M^r \quad (4-19)$$

转子磁链

$$i_M^r = \frac{L_m}{1 + T_r p_n} i_M^s \quad (4-20)$$

式中,转子时间常数 $T_r = L_r / R_r$

可以看到,此时转矩方程的结构与直流电机转矩方程的结构就很相似了,于是,交流电机可以等效为“矢量变换 + 直流电机”,而只要按直流电机的控制方法,确定其定子电流的转矩分量和励磁分量,再通过矢量反变换就可以获得应有三相电流的控制参考值。

图 4-14 为异步电机矢量控制系统的 Simulink 仿真模型,具体实现原理可参见文献[5,7]。所用的异步电机额定功率为 100kW,具体参数如表 4-1 所示^[3]。

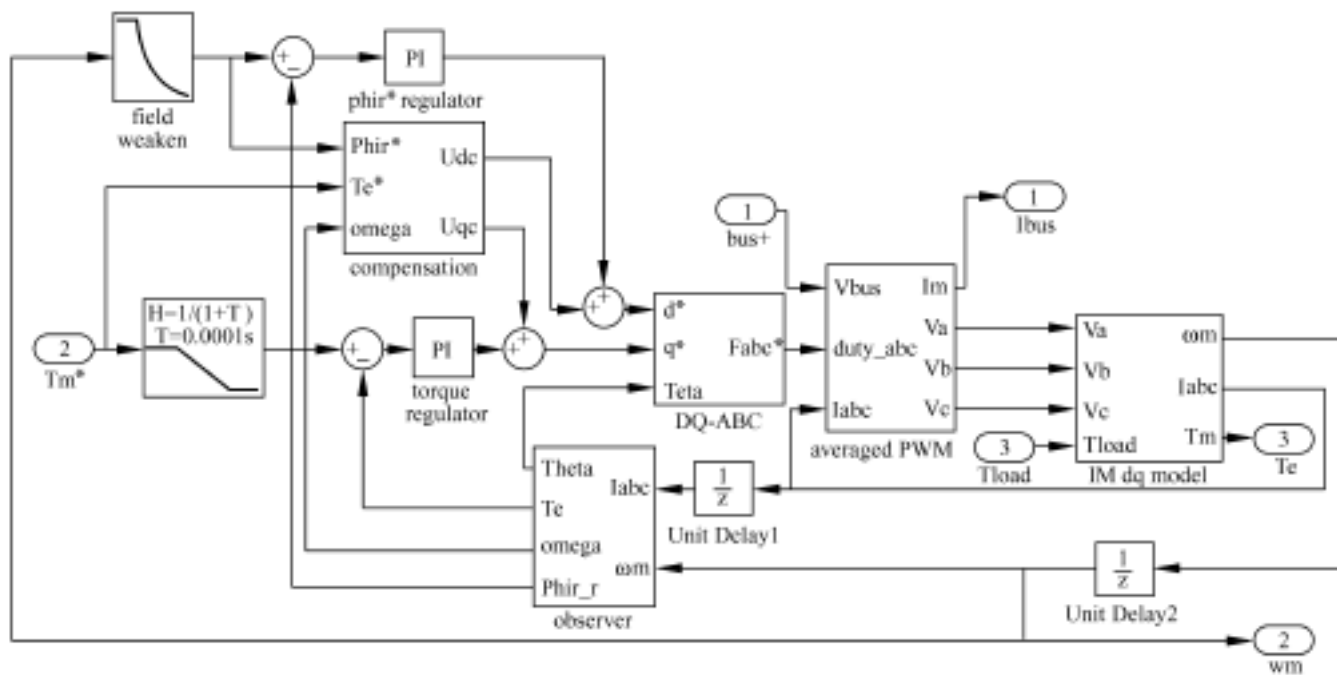


图 4-14 异步电机矢量控制系统仿真模型

表 4-1 100kW 交流异步电机实测参数

模型参数	R_s	R_r	L_s	L_r	L_m	p_n	F_n	J
	/	/	/ mH	/ mH	/ mH		/ Hz	/ kg · m ²
试验值	0.006	0.005	0.06	0.08	1.3	3	90	0.3

3. 控制器的平均值模型

仿真步长的选择对于实现复杂系统的实时仿真来说尤为重要。然而,电机的控制器开关频率很高(一般都大于 2kHz),为了保证仿真精度,仿真的步长一般要小于 10 μ s。如果采用平均值方法,那么采用 50 μ s 甚至更大的步长也能得到稳定的数值解,并且达到足够的仿真精度。平均值建模方法也是目前国际公认的分析 PWM 开关变换器的有效方法^[6]。

如图 4-15(a)中所示为基本的三相电压源逆变器(VSI)桥结构简图。输入端接入相对较大的电解电容器是为了增强直流电压的负载能力并为逆变器的输入端快速变化的电流提供通路。该电容器一般选择范围在 2mF ~ 20mF 之间,这主要由纹波电流的有效值决定。

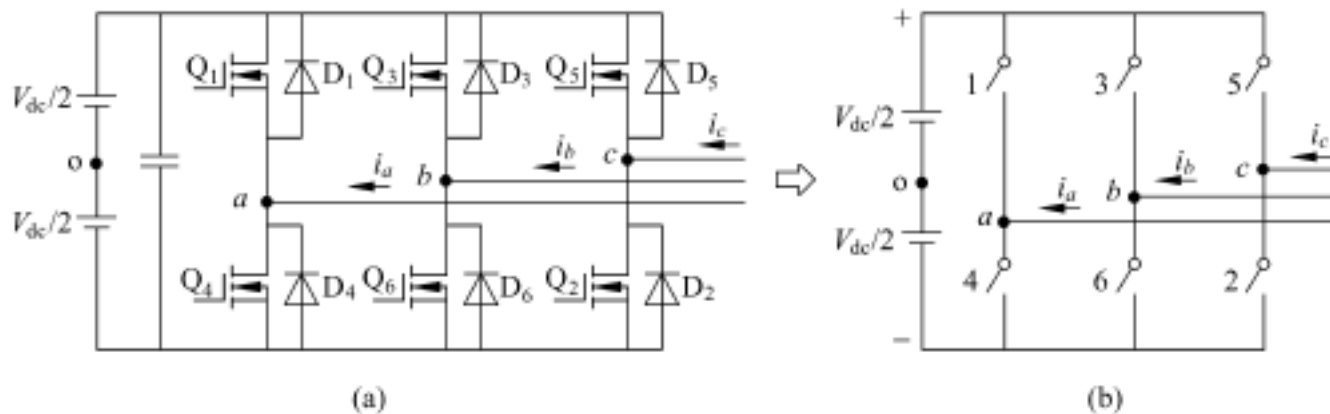


图 4-15 由逆变器供电的三相异步电机结构图

为了建立逆变器的平均值模型,先不考虑滤波电容,并假设: 开关器件为理想的,无内阻损失; 由于开关动作造成的谐波损失可以忽略; 三相对称。得到理想的逆变器结构简图(图 4-15(b))。

如图 4-16(b)图所示,在调制波 v_{ao}^* 为一个常数 K 时,对 a 相电压 v_{ao} 在载波的采样周期 T_c 内取平均得

$$v_{ao} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} v_{ao} dt = K \frac{V_{dc}}{2} \quad (4-21)$$

实际上, v_{ao}^* 是一个幅值为 M 的正弦曲线, $v_{ao} = M \sin(\omega t)$ 其中, M 为脉宽调制比,并且 $0 < M < 1$; ω 为同步角速度。因此有

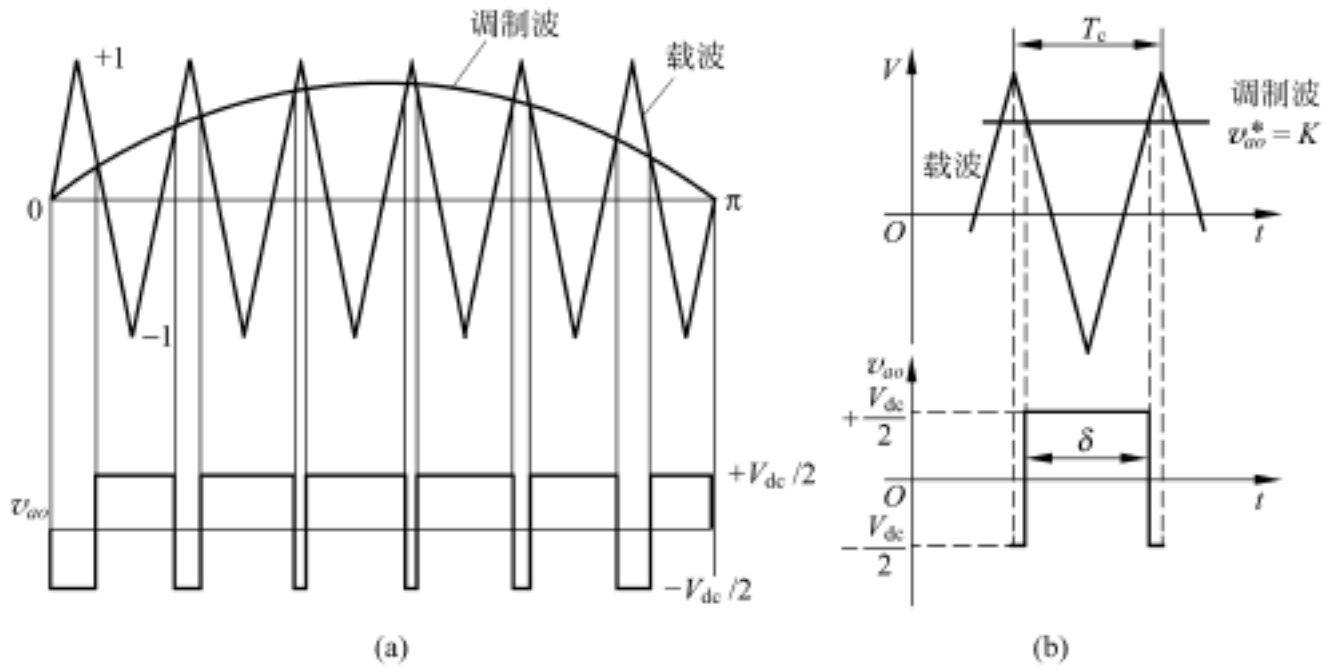


图 4-16 (a) 调制波、载波和 a 相电压之间的关系; (b) 一个载波周期

$$v_{ao} = M \sin(\omega t) \frac{V_{dc}}{2} \quad (4-22)$$

因为 v_{bo} 和 v_{co} 比 v_{ao} 分别延迟 $2/3$ 和 $4/3$ 个电角度, 同样可得^[7]

$$v_{bo} = M \sin\left[\omega t - \frac{2}{3}\right] \frac{V_{dc}}{2}$$

$$v_{co} = M \sin\left[\omega t - \frac{4}{3}\right] \frac{V_{dc}}{2}$$

由于假设逆变器是理想器件, 没有功率损失, 根据功率平衡方程式

$$v_{ao} i_{ao} + v_{bo} i_{bo} + v_{co} i_{co} = V_{dc} i_m \quad (4-23)$$

可得, 逆变器输入侧的直流电流

$$i_m = \frac{M}{2} \left[i_{ao} \sin(\omega t) + i_{bo} \sin\left[\omega t - \frac{2}{3}\right] + i_{co} \sin\left[\omega t - \frac{4}{3}\right] \right] \quad (4-24)$$

用 Simulink 实现理想逆变器的平均值模型如图 4-17 所示^[3]。

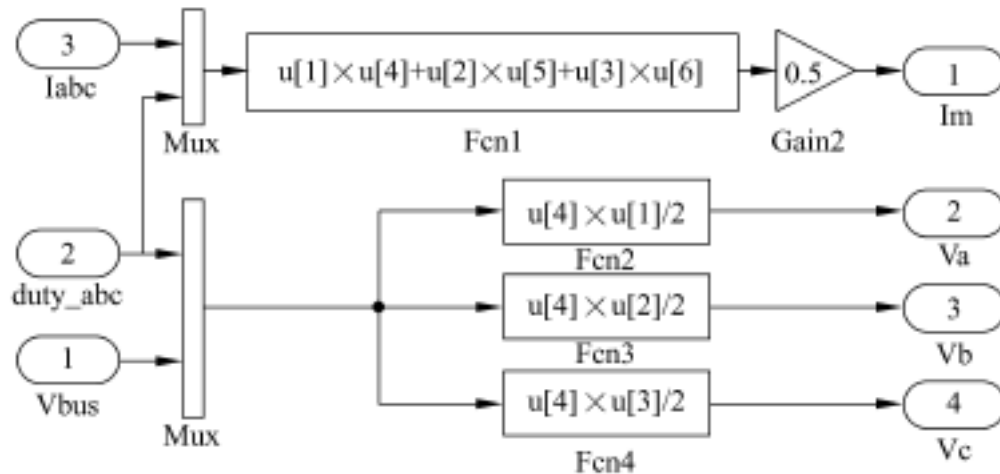


图 4-17 逆变器的平均值模型

为了验证平均值模型的正确性,下面对逆变器平均值模型和实际模型进行了对比,图 4-18 所示为用于比较平均值模型和实际模型的 Simulink 模型。该模型的上半部分是文献[3]中搭建的逆变器平均值模型和异步电机模型,下半部分为 MATLAB 中已有的逆变器和异步电机模型。这两部分都由统一的电源供电,电源电压为 384VDC,内阻为 $0.02\ \Omega$ 。除此之外,在底部的逆变器输入端加了一个 10mF 的滤波电容。该模型仿真持续时间为 1s,步长为 $2 \times 10^{-6}\ \text{s}$,0.6s 时有一个阶跃负载转矩,仿真结果如图 4-19 所示。由于三相电流的曲线过于密集,所以未在图中示出。

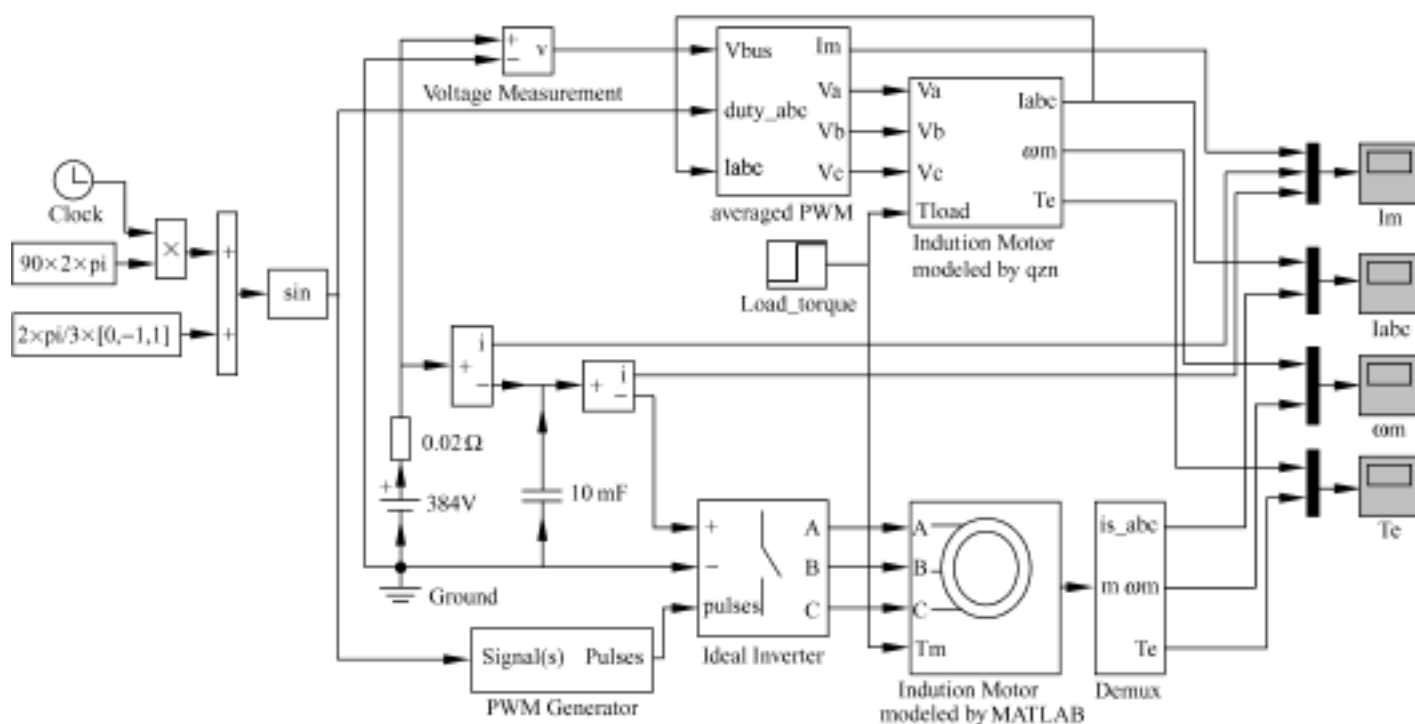


图 4-18 逆变器的平均值模型与非平均值模型

其中图 4-19(a)为逆变器输入端滤波电容右侧的直流电流与平均值模型输入端直流电流的比较。图 4-19(b)为逆变器输入端滤波电容左侧的直流电流与平均值模型输入端直流电流的比较。可以看出,经过电容滤波的逆变器输入端直流电流和平均值模型的输入端直流电流很相近,也就是说,逆变器平均值模型本身就已经起到了对直流侧电流进行滤波的作用。

4.2.4 辅助蓄电池及管理系统

蓄电池的结构复杂,涉及固—液—气三相反应,电池的充放电特性随着环境温度,充放电电流和本身的荷电状态以及时间历程的变化而不同。有些文献^[8]从内部机理入手,通过描述化学能和电能之间的转换来建立电池的模型。这类模型中参数众多且识别困难,在电动汽车整车动力性仿真中并不实用。在混合动力电动汽车的整车能量仿真中,所重视的只是能量流的损失,也就是电池充放电过程中的效率问题,而不关心电池内部的化学反应。

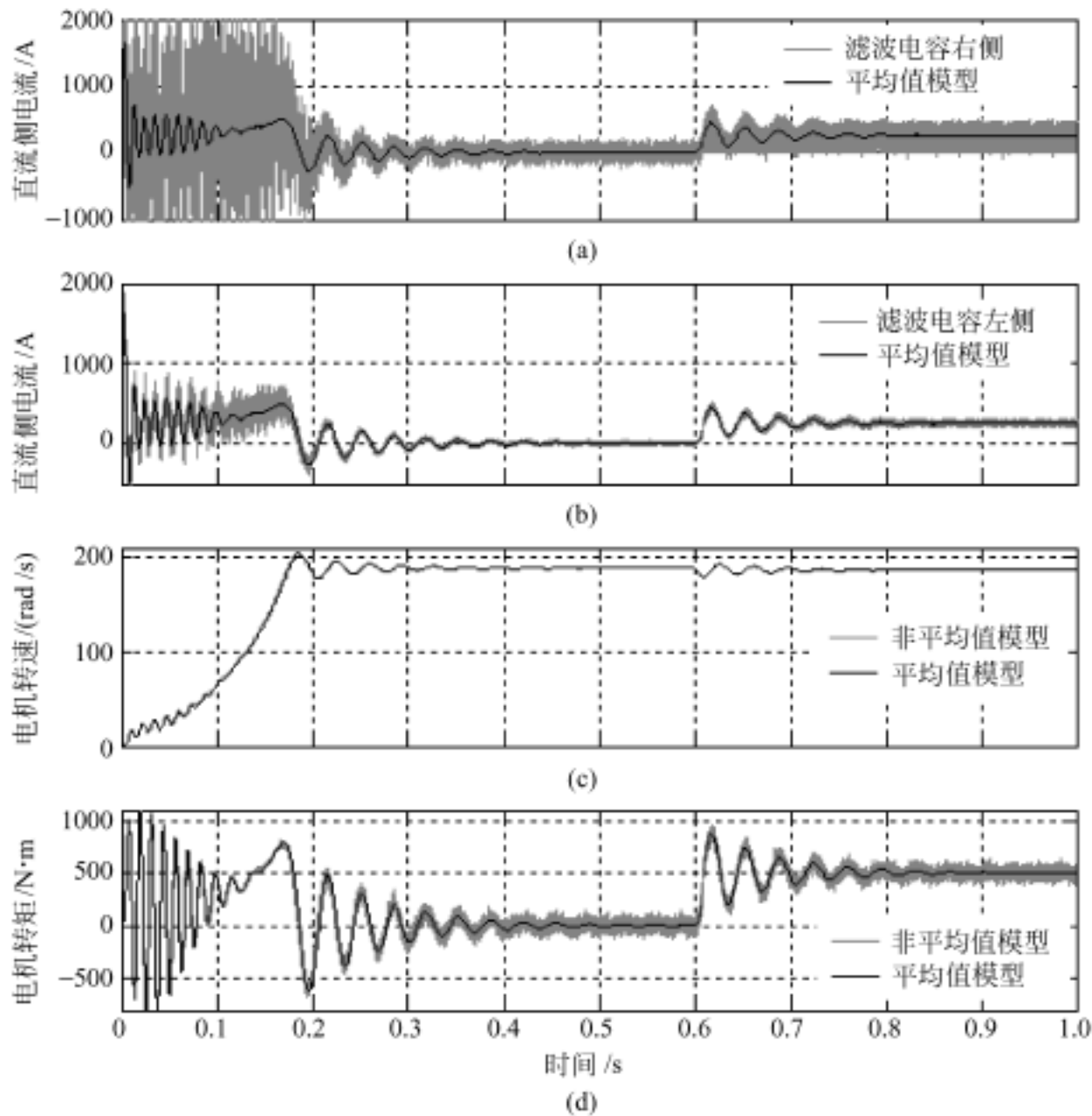


图 4-19 验证逆变器平均值模型

1. 等效电路模型

文献[9]从电池的外特性着手,将蓄电池等效成一个电路(如图 4-20),通过试验方法拟合出电路中的参数。这类模型既有相当的精度又相对较为简单,而且可以描述电池在低频段充放电过程中电压的动态变化过程。

图 4-20 中 R_0 为接触电阻,在充放电过程中保持不变,它主要是由于电极材料、隔膜以及各部分零件的接触而产生的电阻,与电池的尺寸、结构、电池的成形方式、隔膜材料和装配的松紧度等有关。等效电路中的 $R-C$ 回路是电池放电过程中极化过渡过程的等效电路, R 为极化内阻,是电池正极和负极在进行电化学反应时,由于极化而产生的内阻。它包括了电池放电过程中三种极化现象,即浓差极化、欧姆极化和放电末期的电化学极化。 E_0 是电池的开路电压, E_0 、 R 和 C 都是荷电状态 SOC、充放电电流 i 的函数。

同样是采用等效电路的方法, J.M.Lee 和 Bo.H.Cho^[10] 给出了另外一种蓄电池的等效仿真模型, 如图 4-21 所示。 R_i 代表极板内阻, 二极管 D_1 和 D_2 代表电池电化学的滞后和非线性内阻效应, 它们是电流方向和放电深度的函数。二极管 D_3 代表充电泄漏和过充的传导泄漏。 C_1 代表电池的线性电容, C_2 代表化学反应电容。此模型对蓄电池的非线性特性考虑得更为全面一些, 但不足之处是未考虑温度对电池特性的影响。

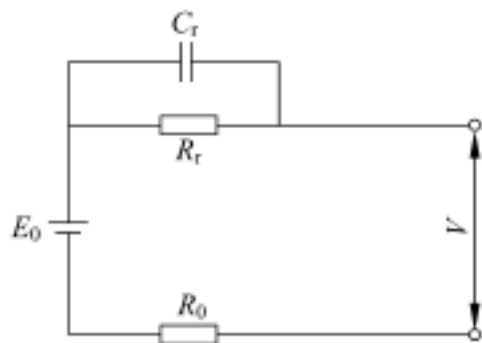


图 4-20 蓄电池的等效模型

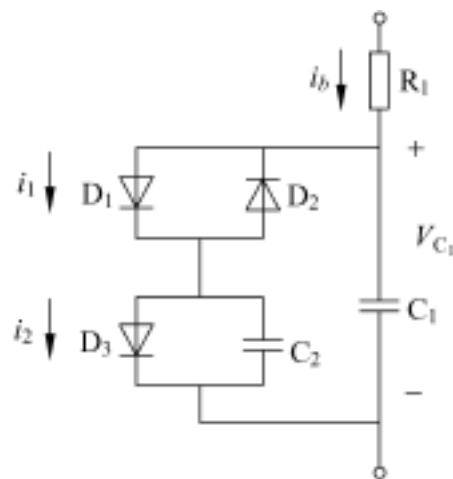


图 4-21 蓄电池的等效电路模型

以上这些模型在描述电池的动态响应过程中具有积极意义, 但是对于电池充电过程中能量损失的预测还有一定的误差, 从而造成整个仿真过程中对 SOC 值估计的偏差。这也体现了该类模型的局限性。

2. 神经网络模型

由于建立精确的辅助电池模型很困难, S.R.Bhatkar 等^[11] 用神经网络的方法对辅助电池进行建模, 并且应用于仿真环境 ADVISOR 中。该模型属于后向仿真模型, 用电池 SOC 和需求功率作为输入, 电池电压和电流作为模型输出, 如图 4-22 所示。其网络结构为单隐层 (共有三个隐层神经元) 结构。使用 32254 个试验数据点中的 1583 个来训练该网络, 然后用其余的数据来验证该模型。该模型不能描述电池的动态特性, 而且对温度也没有加以考虑。

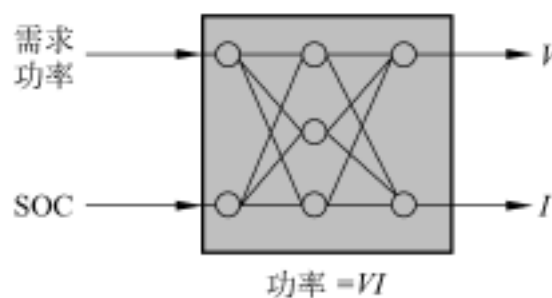


图 4-22 蓄电池的神经网络模型

3. 蓄电池在环仿真

以上所有的蓄电池模型都有其各自的局限性, 而且大部分模型都没有考虑温度因素对电池性能的影响。这主要是因为温度因素的影响过于复杂, 难以用数学

模型来描述,或者是因为试验条件的限制,不能采集试验过程中的温度数据。

为了更真实地模拟燃料电池汽车动力系统,文献[3]提出并实现了蓄电池在环的仿真。为了进行蓄电池的在环仿真,需要一个专用的接口设备,用于模拟真实部件的输入,并且获取其输出响应。对于蓄电池和超级电容而言,根据因果关系(causality)可确定其输入应为电流,而输出为电压。因此需要一个电流可控的充放电设备来模拟电池输入,其有关参数见表 4-2。

表 4-2 电池在环仿真接口设备规格

项目	额定功率	充放电电流	电流响应速度	电流控制精度	电压工作范围	通信方式
规格	2kW	$\pm 40\text{A}$	$< 1\text{ms}$	$< 1\%$	5V ~ 50V	RS232/ 模拟
备注	—	放电时电网回馈	0 ~ $\pm 40\text{A}$ 阶跃	—	限压保护	

接口设备结构主要组成部分有:主回路(AC/DC、DC/DC等)、IO接口板、CPU控制板、控制电源(交流220V供电)和控制软件等。装置主要功能包括:蓄电池或超级电容充放电、电压限幅功能、交流电流正弦波控制、数据通信监控及模拟量输入控制等。

4.2.5 超级电容

如前所述,电容是在 Helmholtz 双层结构储能基础上发展起来的,超级电容研究工作也并没有脱离这个轨道,基于 Helmholtz 双层结构,人们提出了各种理论模型来描述电容的特性。

1. 超级电容的理论模型

1) Helmholtz 双层模型

Helmholtz 认为,电荷均匀分布在固液交界面两边,如图 4-23 所示,在这种情况下,电容的比容量就可以由式 $C^* = \epsilon / d$ 获得。

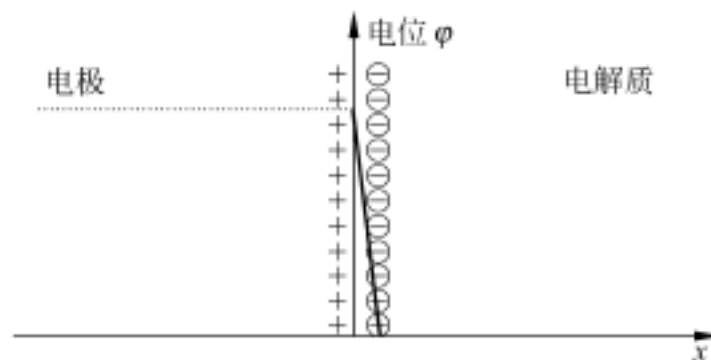


图 4-23 Helmholtz 双层模型

其中, ϵ 为电解质的介电常数, d 为双层结构的间距。

Helmholtz 双层模型相当简单, 它提出容量和接触面大小成正比, 和间距成反比, 这给后人指明了提高电容性能的方向, 但这个模型没有考虑容量和电压的关系, 且认为电荷均匀分布。由于电解液传导特性的影响, 这些假设都是不够准确的。因此, 在应用中, 电容的实际比容量往往会比模型的计算结果低 1 ~ 2 个数量级(一般为 $10\mu\text{F}/\text{cm}^2 \sim 30\mu\text{F}/\text{cm}^2$)。

2) Gouy 和 Chapman 的双层结构模型

为弥补上述模型的缺陷, Gouy 和 Chapman 考虑了电压对容量的影响, 引入随机热运动模型, 考虑电荷在电解液中的空间分布, 提出这种模型, 也称扩散层模型, 如图 4-24 所示。

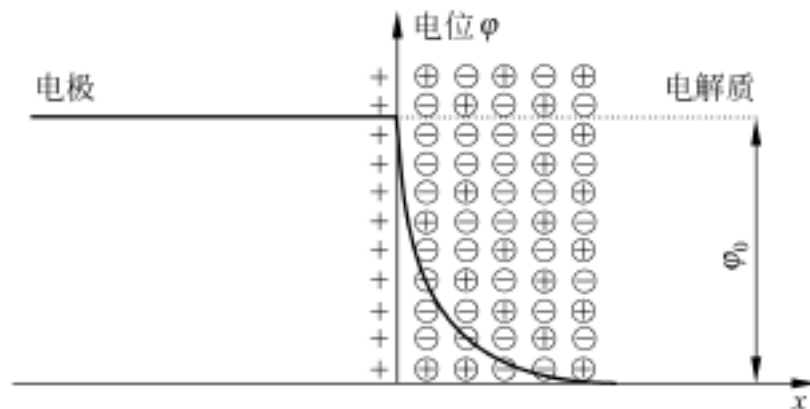


图 4-24 Gouy 和 Chapman 的扩散层结构模型

这个模型的数学表达式如下:

$$C_d^* = z \sqrt{\frac{2qn_0}{u_T}} \operatorname{ch}\left(\frac{z\phi_0}{2u_T}\right) \quad (4-25)$$

式中, z 为电解质中离子的原子价; n_0 为电解液热力平衡后阴离子和阳离子的浓度; ϵ 为电解质的介电常数; q 为基本电子电量; u_T 为热力学电势单位, $u_T = kT/q$, 其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度; ϕ_0 为表面电位。

3) Stern 的双层结构模型

Stern 在前述模型的基础上又引入了离子和溶剂分子尺寸, 并将充电区域分为两个部分, 一部分是前述模型的扩散区, 电容是 C_d^* , 另一部分是离子吸附区, 电容是 C_c^* 。如图 4-25 所示。

实际电容值是两部分电容串联组成的。有

$$\frac{1}{C^*} = \frac{1}{C_c^*} + \frac{1}{C_d^*} \quad (4-26)$$

式中, C_d^* 可以通过方程(4-25)计算得到, 只是将 ϕ_0 换成 ϕ_d 即可。

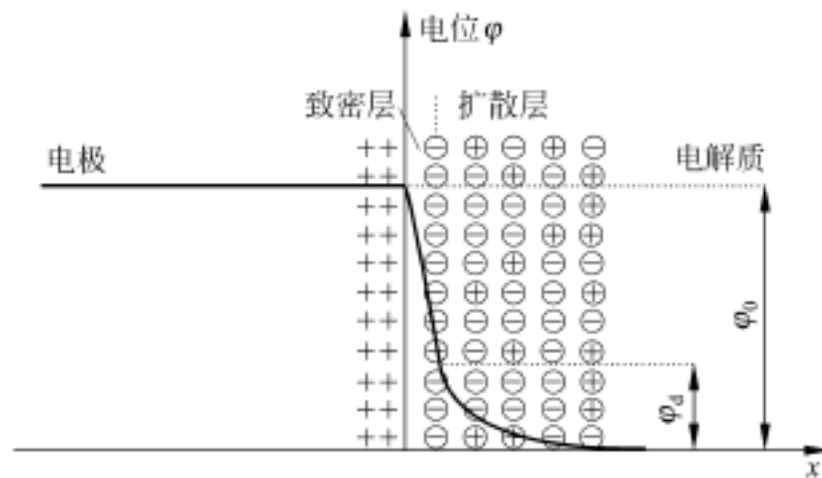


图 4-25 Stern 的双层结构模型

2. 等效电路模型

超级电容的理论模型主要集中在对双电层特性的研究上,对于研究提高电容器能量和容量水平具有指导意义,但是,这种集中在微观条件下,描述单一界面的理论模型无法准确描述超级电容的外特性,无法满足超级电容的使用及控制的研究要求。为了准确地描述电容器的外特性,人们设计了多种等效模型,通过使用简单电气元件组成网络,来研究超级电容器的外特性,并分别研究各个元器件的物理意义和化学意义。这些模型各有其特点,也都有其局限性,适用于一定的情况,首先简单介绍几个最有代表性的等效模型。

1) 简单充放电模型

在这个简单模型中,超级电容被等效成一个简单的 RC 回路,如图 4-26 所示,其中, R_{ESR} 是电容的内阻, C 是理想电容, R_0 是负载电阻, U_{C_0} 是初始电压, U_{SCAP} 是

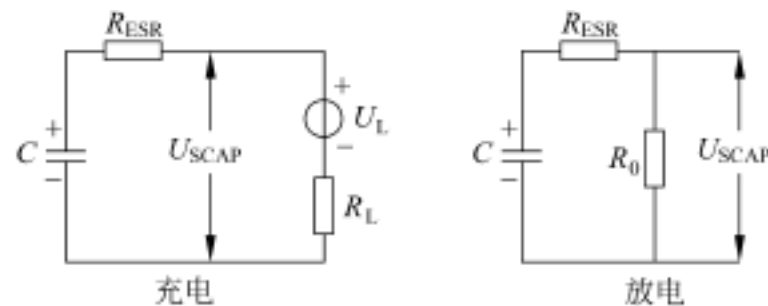


图 4-26 超级电容充放电电路

超级电容的工作电压。若 U_L 是充电电压, R_L 是充电限流电阻,则充电时有

$$U_{SCAP}(t) = U_L + \frac{R_L}{R_L + R_{ESR}} (U_{C_0} - U_L) \exp\left[-\frac{t}{(R_L + R_{ESR})C}\right] \quad (4-27)$$

放电时有

$$U_{SCAP}(t) = \frac{R_0}{R_0 + R_{ESR}} U_{C_0} \exp\left[-\frac{t}{(R_0 + R_{ESR})C}\right] \quad (4-28)$$

这种模型结构简单,且在一定精度范围内可以对超级电容特性进行描述。但在

这个模型中,电容内阻被认为是常数,且电容量恒定不变,这些都与实际情况不符,因而影响到它对超级电容动态特性描述的准确性。

2) 双分支模型

这种模型是从超级电容的过渡过程出发进行考虑的。如图 4-27,其中, C_0 , R_0 为主回路,主要用来表示充放电过程中的能量流动,而 C_r 和 R_r 成为辅助回路,主要用来模拟充放电状态变化时过渡过程中的动态特性(能量在超级电容内部的再分配问题)。

为了进一步增加准确性,还可以增加 RC 回路以提高模型的精度,文献[13]曾提出一个 5 时间常数模型,就是在此模型基础上增加 RC 回路实现的。但这类模型的等效元器件都是从提高模拟精度的角度出发进行考虑的,其物理意义并不明显,且参数过多导致模型比较复杂,使用不便,试验中也无法直接测量,因此这类模型的应用并不广泛。

3) 一阶交流等效电路模型

如果将超级电容器应用于交流工况中,那么电容器将表现出很多不同于其直流特性的交流特性,主要包括交流阻抗特性、频响特性,以及在交流工况下的效率、温度特性等。文献[13]中给出了一阶交流等效电路模型,如图 4-28 所示。

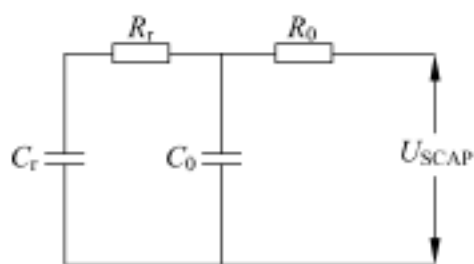


图 4-27 双分支超级电容等效电路



图 4-28 一阶交流等效电路模型

这个模型中, R_s 是等效串联电阻,考虑到超级电容中存在一定的漏电电流,就设计了 R_p 用来模拟漏电电阻。电感 L 主要是用来模拟电容器的内在电感,电容器本身都会带有一定的固有电感,主要包括内部芯子引起的电感、引出线引起的电感以及金属外壳的电感。如果只研究超级电容的中低频特性,该电感可以忽略。

4.2.6 DC/DC 变换器

对 DC/DC 的建模一般也是采用稳态特性建模和平均值建模两种方法。

1. 基于效率图的稳态模型^[14]

考虑到 DC/DC 变换器响应很快,不考虑它的瞬态响应,从而将其模型简化为图 4-29 所示的二维效率图。DC/DC 的效率定义为 DC/DC 的输出(蓄电池侧)功率与 DC/DC 的输入(燃料电池侧)功率的比值。它依赖于传输功率的大小和 DC/DC 两端电压的差值。该模型主要有以下特点:

效率仅依赖于输出电压和输入电压的比值,而不是绝对电压值本身;

对于某个确定的电压比值,效率随着功率的增加而增加,当达到某个功率值后又缓慢下降。

由于 DC/DC 的整体效率较高,所以这对整个系统的结果影响不会太大。

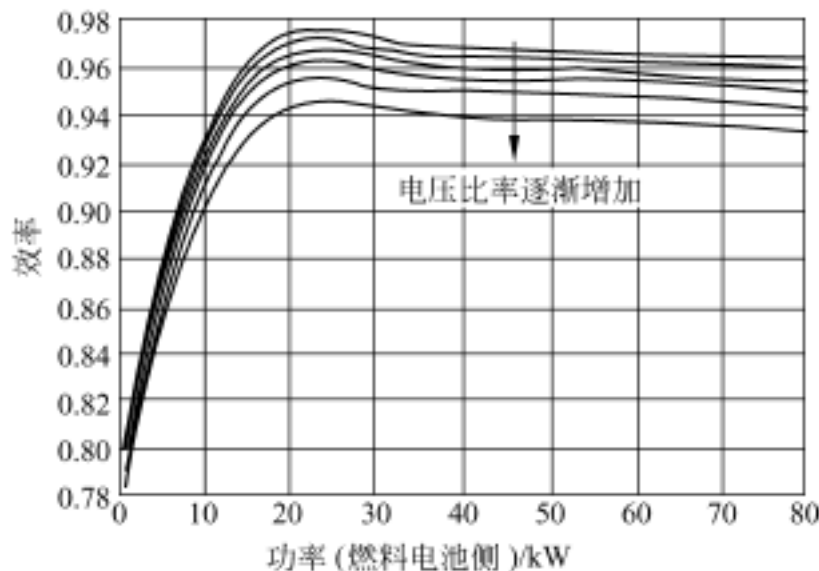


图 4-29 DC/DC 的二维效率简图

2. 基于平均值模型的动态模型

然而由于 DC/DC 是高频开关器件,要想对其动态模型进行精确的仿真,其仿真步长要取得非常小,这会大大增加仿真时间。为了兼顾仿真时间和精度的要求,平均值模型得到了广泛应用。这方面的文献较多,这里就不详细介绍了,具体可参见文献[6,15]。

4.3 燃料电池电动汽车整车仿真实例

以下就两种有代表性的燃料电池混合动力汽车仿真实例进行介绍。

4.3.1 后向仿真

Virginia Tech^[16] (VT, 美国弗吉尼亚技术学院) 的学生为了进入 1999 年 FutureCar Challenge 而开发了一辆五座燃料电池混合动力汽车 (VT/FC-HEV)。其驱动系统包括 100kW 驱动电机, 324V 密封铅酸电池组, 一个相对较小的燃料电池堆来提供车辆需求的平均功率, 在变工况条件下, 蓄电池组提供峰值需求功率。所用的燃料电池堆是由 Energy Partners 公司提供的 20kW PEM 氢气/空气燃料电池, 整车结构如图 4-30 所示。

此车辆的仿真模型是用 ADVISOR (advanced vehicle simulator) 仿真工具开发的。ADVISOR 是美国国家再生能源实验室 (NREL) 为常规车辆和先进车辆进行能量消

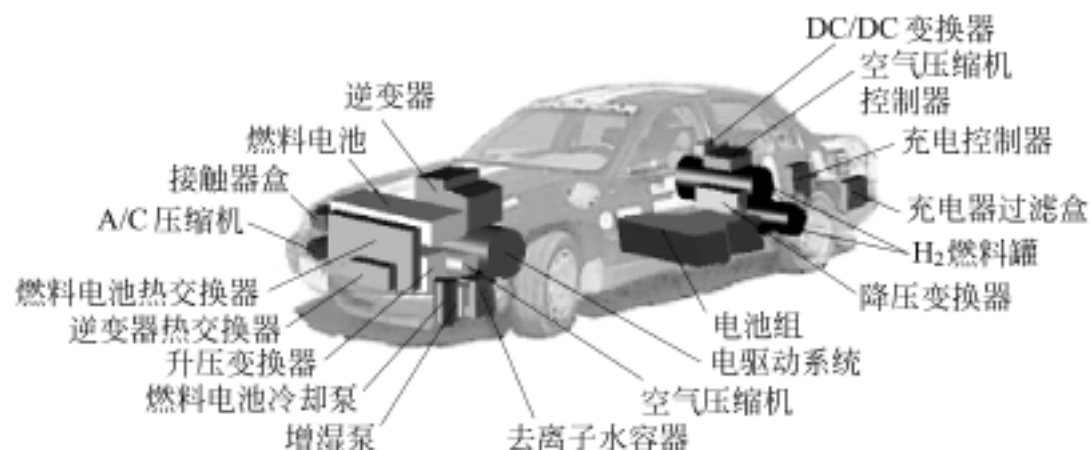


图 4-30 Virginia Tech 燃料电池混合动力汽车 (VT/ FC-HEV)

耗和排放分析而开发的计算机仿真工具。它基于 MATLAB/ Simulink 图形仿真环境,对车辆的能量流和燃料消耗进行后向仿真。ADVISOR 使用 Simulink 图形模块代表各个部件,并用 MATLAB 数据文件包含车辆结构、控制系统和性能数据。这些各种各样的车辆性能和控制信息对车辆不同部件提供模型和数据。

1. 燃料电池子系统

ADVISOR 模型的目标就是对车辆的能量存储、能量产生与能量流动的全过程进行仿真。图 4-31 显示了 VT/ FC-HEV 车载的能量存储与产生相关的系统框图,这些子系统被加入到 ADVISOR 的修改模型中。

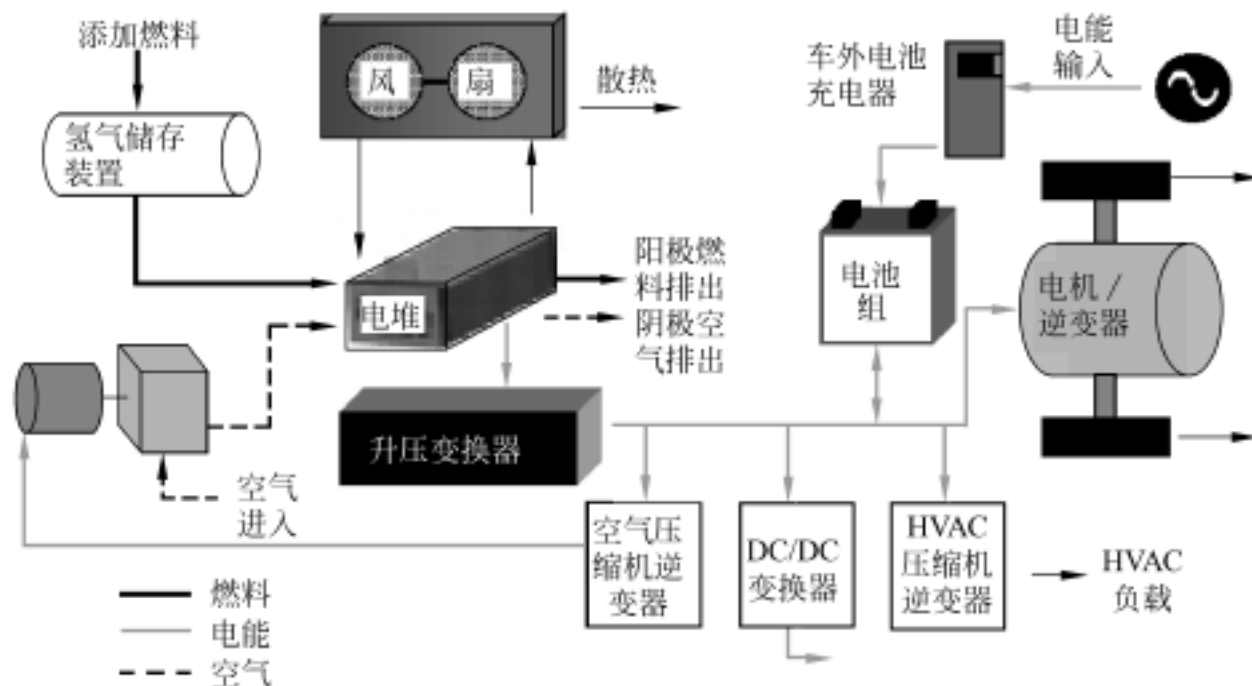


图 4-31 VT/ FC-HEV 车的能量流系统框图

1) 燃料电池堆

燃料电池堆的性能试验由 Energy Partners 公司完成。性能曲线如图 4-32 所示。

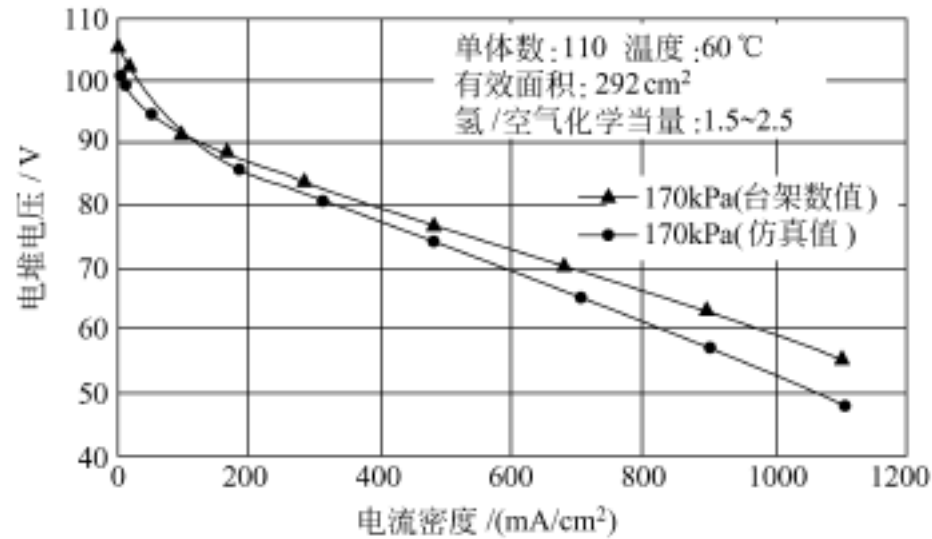


图 4-32 电堆极化曲线

2) 反应物供给装置

在燃料电池堆的燃料供应一侧,压缩罐中的氢气经过压力调节器使得压力降到 170kPa,进入氢气供应和循环再利用管路,这一过程不需要额外的能量就可完成。

该燃料电池所用的氧化剂是空气,由一个 7000r/min 的螺杆式压缩机,以流量 1415 L/min(50cfm)供应空气。最初的试验测试表明,为了产生 339kPa 的压力,需要为空气压缩机提供 4kW~5kW 的功率,这占整个燃料电池总输出功率的大约 25%。尽管空气压力高可以使得燃料电池性能提高,但是系统的整体效率却因为空气压缩机的寄生功率过高而降低。鉴于此,把电堆的工作压力降到 170kPa,可使得整个系统的效率提高。

图 4-33 中的降压变换器将车辆电池组的电压降到空气压缩机电机所需的电压水平。这种结构并不是为了使整个效率有所提高,而是为了使系统能够工作所必需的。对空气压缩系统的测试把这些部件当作一个整体对待,测试结果显示,为了让燃料电池满功率工作,空气压缩系统需要消耗 3.65kW 的功率。

燃料电池系统一旦运行,空气压缩机就以满负荷 3.65kW 工作,保证足够的空气供应。当燃料电池以满负荷工作时,空气的流量能够满足化学当量比(供应氧气与反应需要的氧气流量比)为 2.5 的要求,这也是燃料电池生产商建议的比率。当燃料电池的输出功率下降时,空气流量也应该下降,从而降低寄生功率,但前提是要保证化学当量比大于等于 2.5。鉴于系统复杂性的限制,燃料电池空气系统没有使用“负载跟随”的手段来控制反应物质的供应量,所以当燃料电池输出功率小于峰值功率时,系统的效率较低。

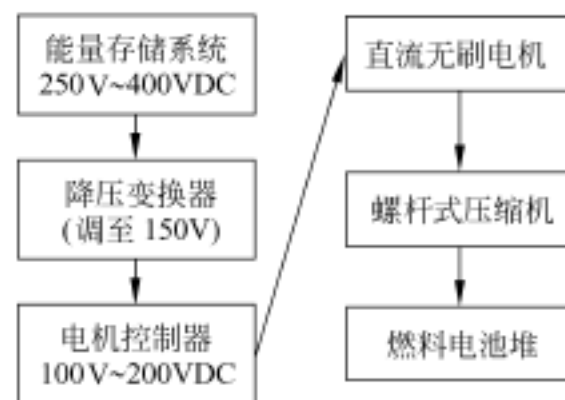


图 4-33 空气压缩系统的功率流图

3) 其他附件的负载

除了燃料与空气供应外, VT/ FC-HEV 燃料电池系统需要其他几个支持系统,包括温度控制(通过带有泵和风扇的水冷却回路实现)、加湿和水回收控制(通过两个小泵)和为电子器件提供冷却的各种风扇。这些负载集成到一个附件功率模块(图 4-34),加入到现有的车辆附件中。

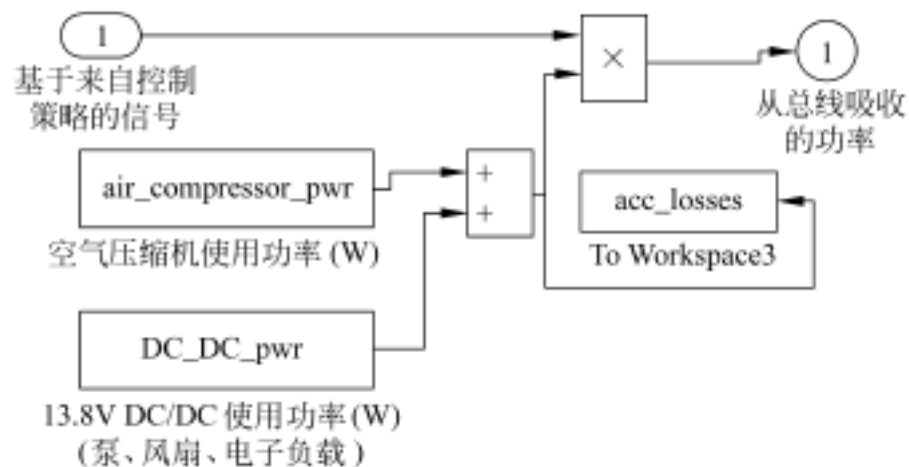


图 4-34 附件功率模块

图 4-34 的附件模块清楚地显示了空气压缩机的功率是如何作为一个恒定的负载附件集成到燃料电池系统中的。该模块同时集成了以上所提到的各种泵和风扇所导致的 12V 负载。

2. DC/DC 变换器

由于燃料电池的开路电压为 110V,把电堆与电池组直接相连是不可行的。而升压式 DC/DC 变换器(boost converter)解决了该难题。而且为了使其具有部分的负载跟随能力,把它设计成当电压低于 300V 时输出功率最大,而电压高于 380V 时输出功率为零。这主要是基于燃料电池堆在低功率区域效率较高的考虑。

DC/DC 变换器是一个电力电子装置,它除了具有把燃料电池输出电压升到车辆电池组电压的作用外,还集成了整车对燃料电池系统控制策略中部分的负载跟随功能:当负载较高时,输出给车辆的功率水平也相应提高。通过检测电池组电压,DC/DC 变换器能够让燃料电池在车辆负载较低时,在效率较高的低功率点工作。而且在车辆功率需求较高时或电池组放电后需要充电时,DC/DC 变换器仍旧能够提供足够的功率以维持电池组足够的 SOC 值。图 4-35 显示了其具有“负载跟随”功能的功率输出与电池组电压的关系图。

安全问题是设计时首先要考虑的。除了把高压电子器件和底盘与周围环境绝缘以保证人身安全等问题外,最重要的就是要保护燃料电池不受损害。有两种保护燃料电池堆的限制性措施:最大电流限制到 300A,最小电压 60V,从而避免燃料电池过载。如果电压降到 60V 以下,可以断定反应物的供应量不足,这时降低燃料电池的功率输出,直到电堆电压恢复到 60V 以上。一旦电堆电压降到 55V 以

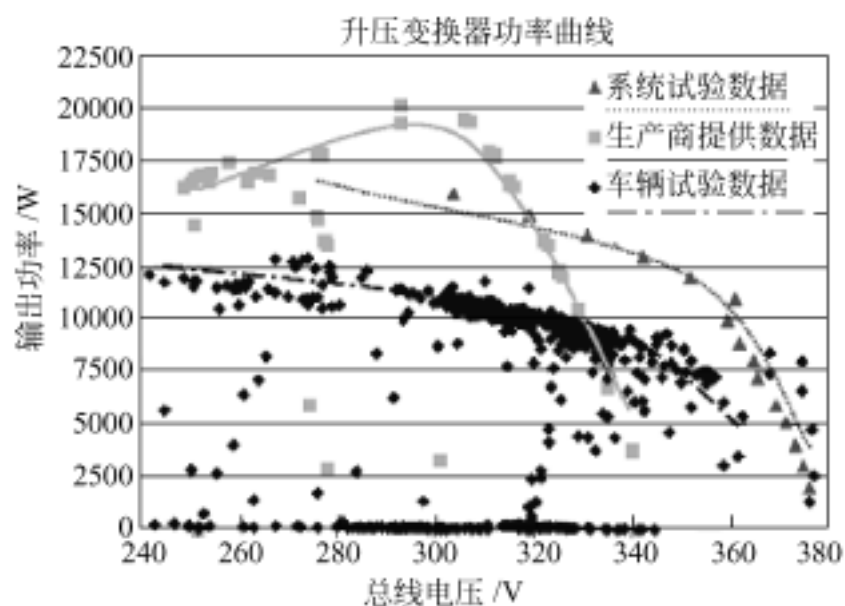


图 4-35 DC/DC 变换器功率传递曲线

下,DC/DC 变换器将停止工作。

图 4-36 为 DC/DC 变换器的模型,它将燃料电池的 60V 电压升到 330V 左右的电池组电压。当系统运行时,该模块通过查一维表的形式控制输出到功率总线上功率的速率,该表的输入为电池组电压。

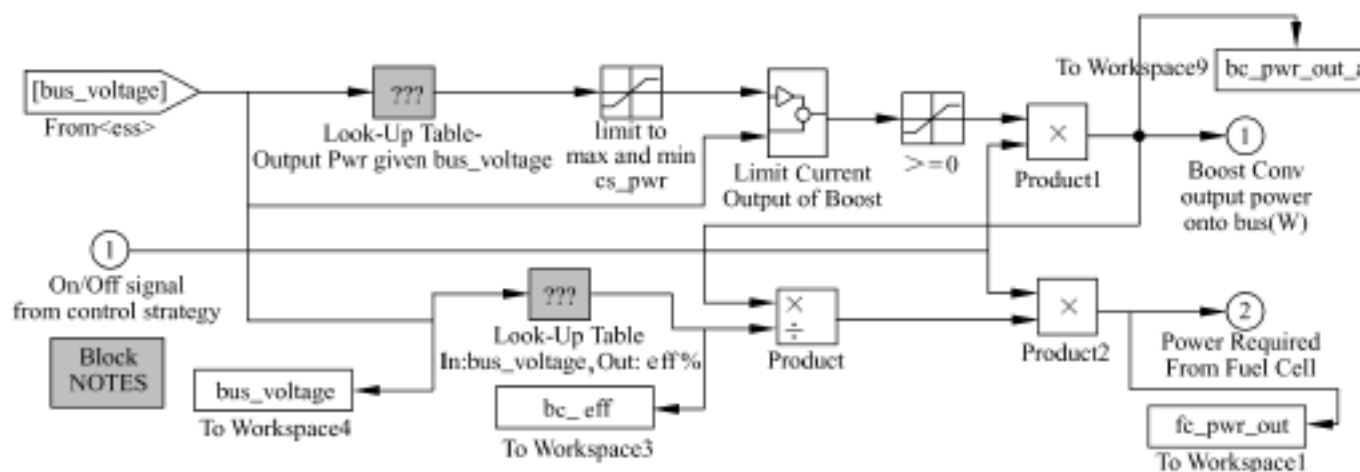


图 4-36 DC/DC 变换器模型框图

3. 整车模型与仿真结果

图 4-37 为整个系统结构的模型实现。

车辆的测试在安装了排放测试设备的转鼓测功机上进行,该测功机能够进行包括 FUDS 和 HWFET 工况(图 4-38)在内的路况试验。

图 4-39 与图 4-40 为在福特(汽车公司)的实验室进行的测功机试验时所记录的时域数据与 VT/FC-HEV 的 ADVISOR 模型输出数据的比较。

从试验结果可以看到,该模型能够很好地跟随整个循环工况下的电机和附件的功率需求。除此之外,模型还应该决定该功率需求如何在燃料电池系统和蓄电池组之间合理分配,这属于整车能量控制策略的问题。

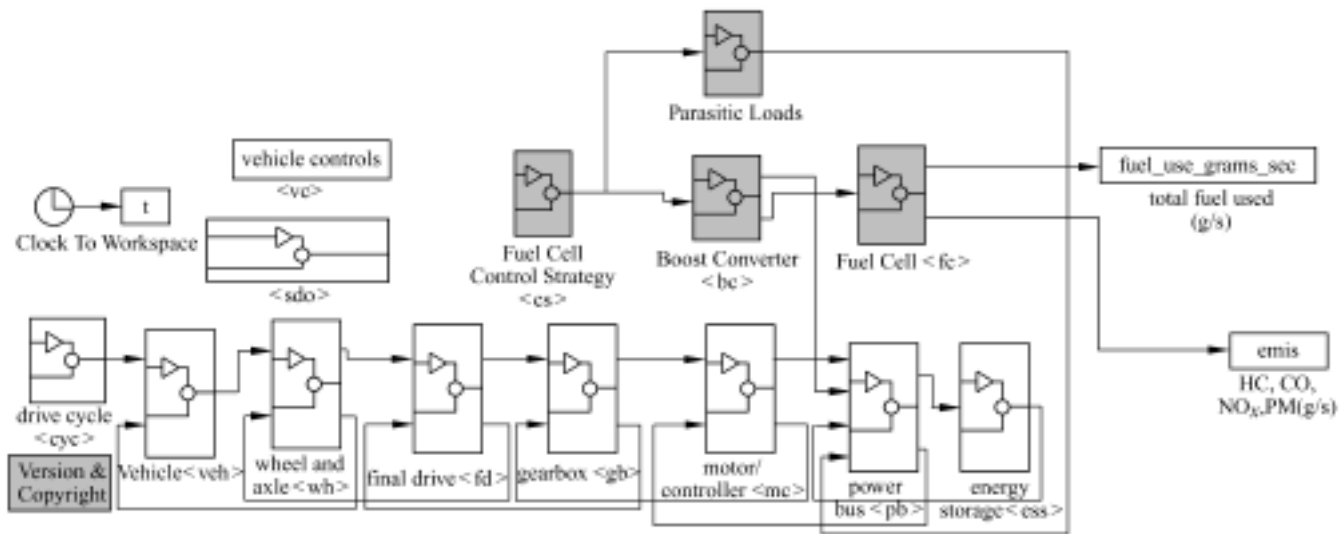


图 4-37 燃料电池混合动力汽车的系统仿真模块图

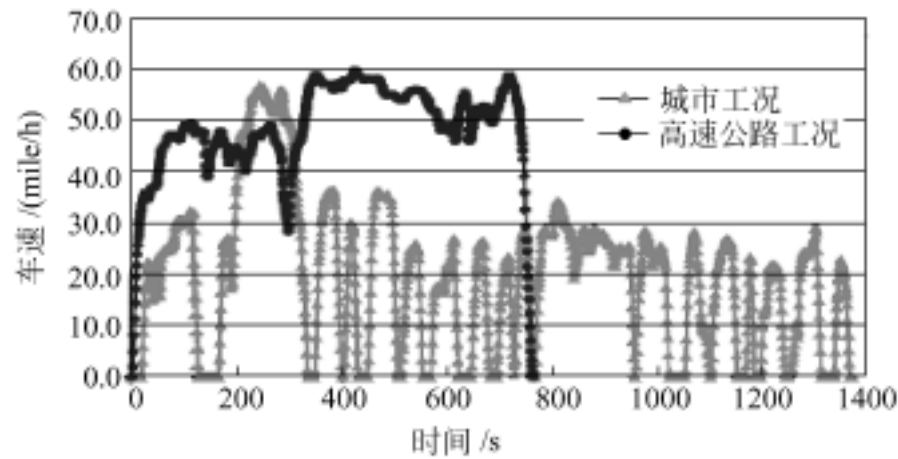


图 4-38 EPA 城市与高速公路行驶工况速度变化图
(1mile/h = 0.44704m/s)

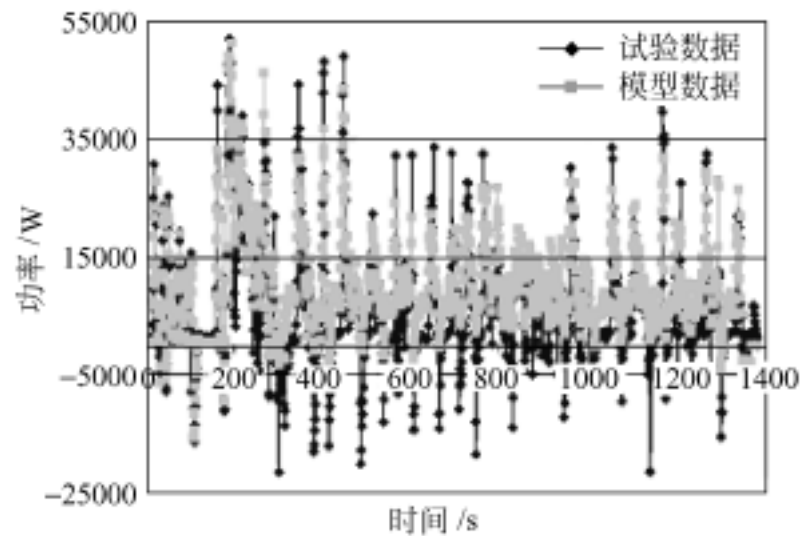


图 4-39 驱动电机功率(城市工况)

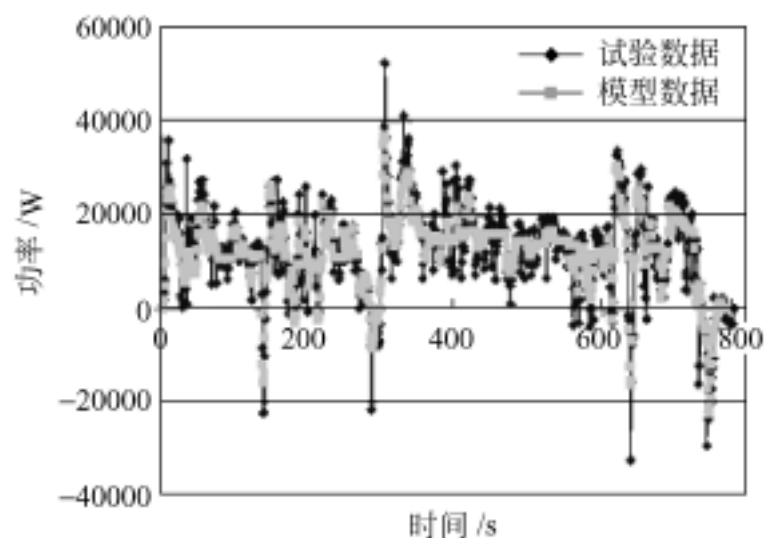


图 4-40 驱动电机功率(高速公路工况)

如图 4-41 和图 4-42 所示, VT/ FC-HEV 燃料电池系统与常规车用内燃机系统的峰值效率相当。尽管燃料电池系统具有高效率的潜力,但是当把燃料电池系统运行时所遇到的各方面的工程问题加以综合考虑时,结果往往不令人很满意。当然,该车在系统控制和集成方面还可以有很多的改进余地。这些改进包括降低重量,实现空气压缩机的负载跟随与控制策略的优化等。

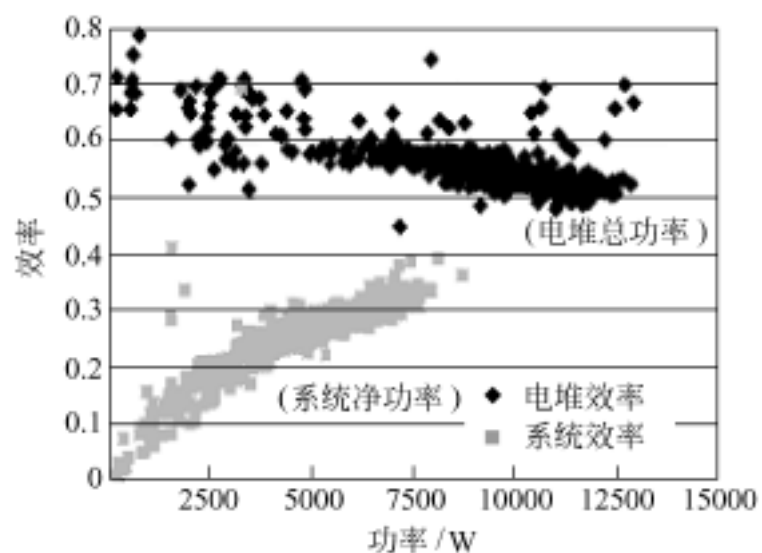


图 4-41 燃料电池工作效率(城市工况)

电堆与系统的效率数据以氢气燃料电池的理想电动势为基础,在每瞬时按照下面的公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} \text{电堆} &= \frac{U_{\text{单体}}}{1.254} \times 100\% \\ \text{系统} &= \text{电堆} \times \frac{P_{\text{电堆}} - P_{\text{寄生}}}{P_{\text{电堆}}} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (4-29)$$

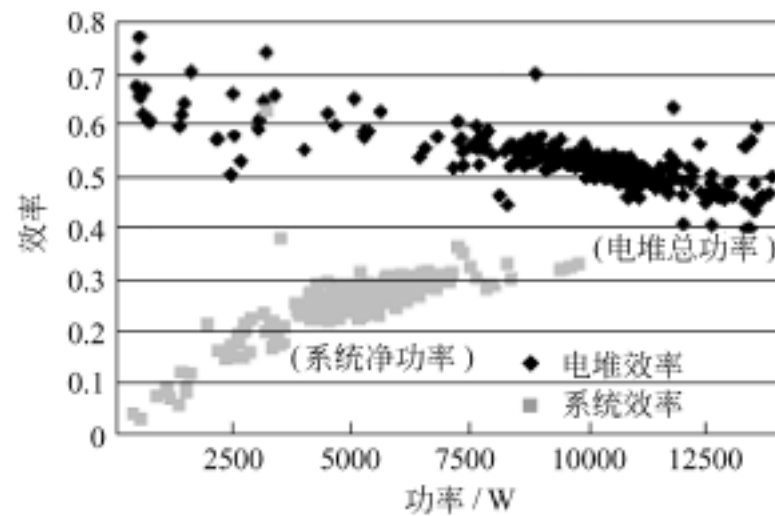


图 4-42 燃料电池工作效率(高速公路工况)

4.3.2 前向仿真

为了定量研究燃料电池汽车的经济性和排放性,美国加州大学 Davis 分校^[12]对燃料电池电动汽车进行了建模与仿真研究。整个的仿真模型称为 IMFCHV, 结构如图 4-43 所示。该模型把驾驶员模型和车辆其余部件分离开来。驾驶员相当于一个目标控制器,控制目标为行驶工况中预定义的车速。这一系统架构和控制算法与部件模型相分离的基本原则是一致的。这种建模方法允许对硬件限制条件进行系统和详细地研究,而和由于整个系统的控制问题而产生的限制相互独立。这种软硬件的相互独立性有利于把控制算法用于整车控制器的快速原型开发。

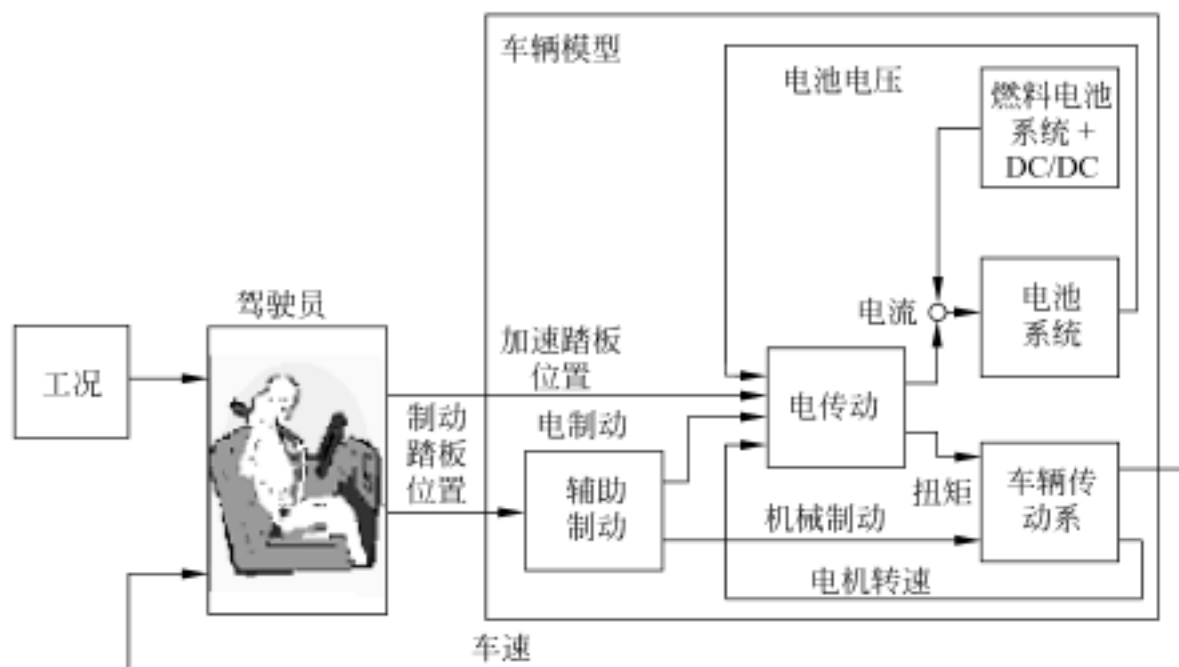


图 4-43 仿真模型的主要结构图

IMFCHV 模型包括电池管理系统,由电池及其控制器和制动辅助模块组成。电池系统提供和回收能量,并且把燃料电池系统和驱动系统解耦。这样,驱动系统

只能“看到”电池电压而不是燃料电池系统电压。制动辅助模块基于制动踏板位置,决定机械和电制动的比例和大小。

燃料电池系统和 DC/DC 变换器模块中的 DC/DC 变换器影响了燃料电池系统和蓄电池的分离。电驱动系统模块中允许双向的能量流动,包括加速过程中从电池流向驱动系统和回馈制动过程中从驱动系统流向电池。

车辆传动系模块以电机驱动和制动转矩为输入,电机转速和车速作为输出,同时考虑了其他因素,例如车辆质量,空气阻力和轮胎摩擦等。

有了电池系统就可以让燃料电池系统运行于稳态工况,当然,当车辆运行工况剧烈变化时例外。在混合结构中让燃料电池系统仅仅运行于一个或有限多个点是可能的。这种控制策略能够提供更好的燃料经济性,而且也使得燃料电池系统设计者不再一味追求燃料电池系统跟随瞬态功率需求的能力。

1. 制动辅助模块

IMFCHV 模型允许两种不同的制动模式,即电制动(使电动机运行于发电机状态)和机械制动。前者将车辆部分动能转换成电能回馈给电池充电,后者通过在制动器上(或者轮胎和地面之间)摩擦产生热量来消耗车辆动能。

制动辅助模块负责把制动踏板信号(表达驾驶员意图)分成两路不同的制动信号。一个决定电制动模式,而另一个决定机械制动模式。在实际的混合车中这一功能模块可以集成到 ABS 上或作为一个单独的控制单元。

从能量角度讲,电制动部分越多越好。然而,由于电制动只能由与驱动车轮相连接的电动机起作用,基于安全考虑,电制动是有其局限性的。另外,在紧急制动情况下,电机所能提供的最大制动转矩也不能满足整车制动力矩的需要。

图 4-44 解释了制动辅助模块中用于调节整个制动转矩组成部分的 4 个参数。此图只是概念性的说明,而不能把它当成是混合动力汽车最佳的制动方式。图中 G_1 为车轮上的最大机械制动力矩; G_2 为电机产生的最大制动力矩(该值并不是固定的,而是依赖于电机特性和电池电压而变化); G_3 为机械制动开始起作用的制动踏板位置; G_4 为电制动力矩随制动踏板增加而增加的斜率。

通过改变 $G_1 \sim G_4$ 这四个参数,可以实现不同的制动力分配。

2. 电池(包括电池管理系统)模型

燃料电池混合动力汽车控制系统框图如图 4-45 所示,动力系统的关键部件——燃料电池、DC/DC 变换器、蓄电池、电机及其控制器的状态信息传递至整车控制器,整车控制器根据车辆行驶功率需求确定燃料电池和蓄电池的输出功率。其中,蓄电池模块描述了电池的性质(例如开路电压和内阻与 SOC 的关系)和电池实际容量与电流的关系。

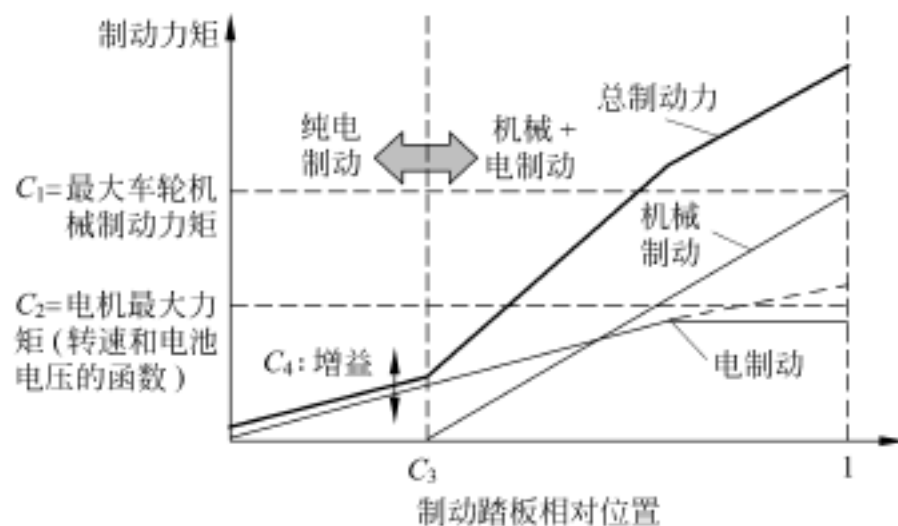


图 4-44 制动辅助模块原理图

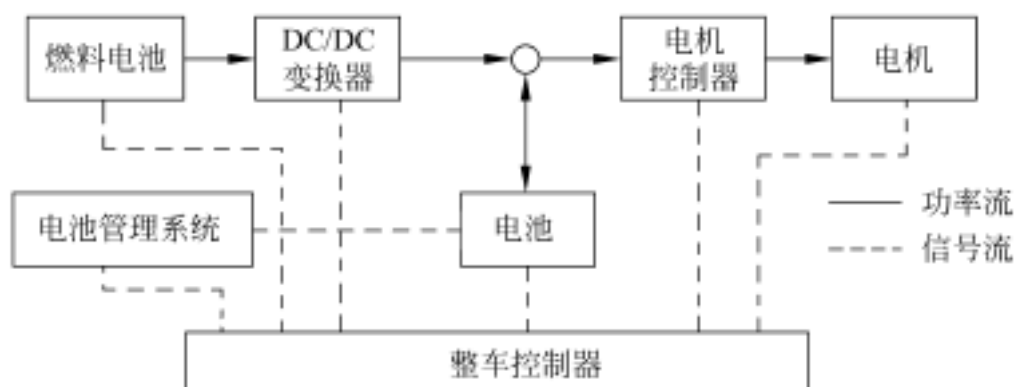


图 4-45 整车控制框图

电池管理系统的作用是根据电池电流确定电池的 SOC,对燃料电池系统进行开关控制。除了这一最基本的功能外,其他一些对电池实现最优控制的措施也可以应用于该模型中。

1) 蓄电池

该蓄电池模型考虑了充放电内阻随 SOC 的变化关系和开路电压与 SOC 的关系。该模型假设充放电电流对蓄电池实际容量的影响相同且独立于 SOC 值。温度因素未加考虑。蓄电池 SOC 用 Peukert 方程进行计算。公式(4-30)~式(4-32)描述了 SOC 的计算过程。

首先计算电池的平均放电电流,即

$$\bar{I}_{\text{dchg}}(t) = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t |I_{\text{dchg}}(t)| \cdot dt \quad (4-30)$$

式中, $I_{\text{dchg}}(t)$ 为电池瞬时放电电流, A; $\bar{I}_{\text{dchg}}(t)$ 为电池平均放电电流, A; t 为放电时间, s。

然后,电池的实际容量用 Peukert 方程进行计算,即

$$C_{\text{actual}} = K_1 \cdot \left| \frac{\bar{I}_{\text{dchg}}(t)}{I_{\text{normal}}} \right|^{k_2} \quad (4-31)$$

式中, K_1 为 Peukert 常数 (1h 放电容量 $A \cdot h$); K_2 为 Purkert 指数; I_{nomal} 为电池 1h 名义放电电流, A; C_{actual} 为电池实际容量, AH。

电池 SOC 的计算如下:

$$SOC = \frac{\int_0^t \eta \cdot I(t) dt}{C_{actual}} + SOC_{initial} \quad (4-32)$$

式中, SOC 为电池荷电状态; $SOC_{initial}$ 为电池初始的荷电状态; $I(t)$ 为电池充放电电流, 充电为正 (+), 放电为负 (-), A; η 为充放电效率, 与 SOC、充放电电流和温度等参数有关。

2) 电池管理系统

电池管理系统具有以下几项主要功能(图 4-46):

(1) 监视电池组的 SOC 值, 并且以此值来决定启动与停止燃料电池系统。当电机需求的平均功率加上附件功率超过某个最低限值时, 或当加速踏板超过某一位置时, 燃料电池系统将启动。

(2) 电池管理系统能够产生一个使回馈制动无效的信号, 以免电池被过充。

(3) 在燃料电池系统未准备就绪提供能量时(例如预热阶段), 电池管理系统把对燃料电池系统的电流值设置为零。

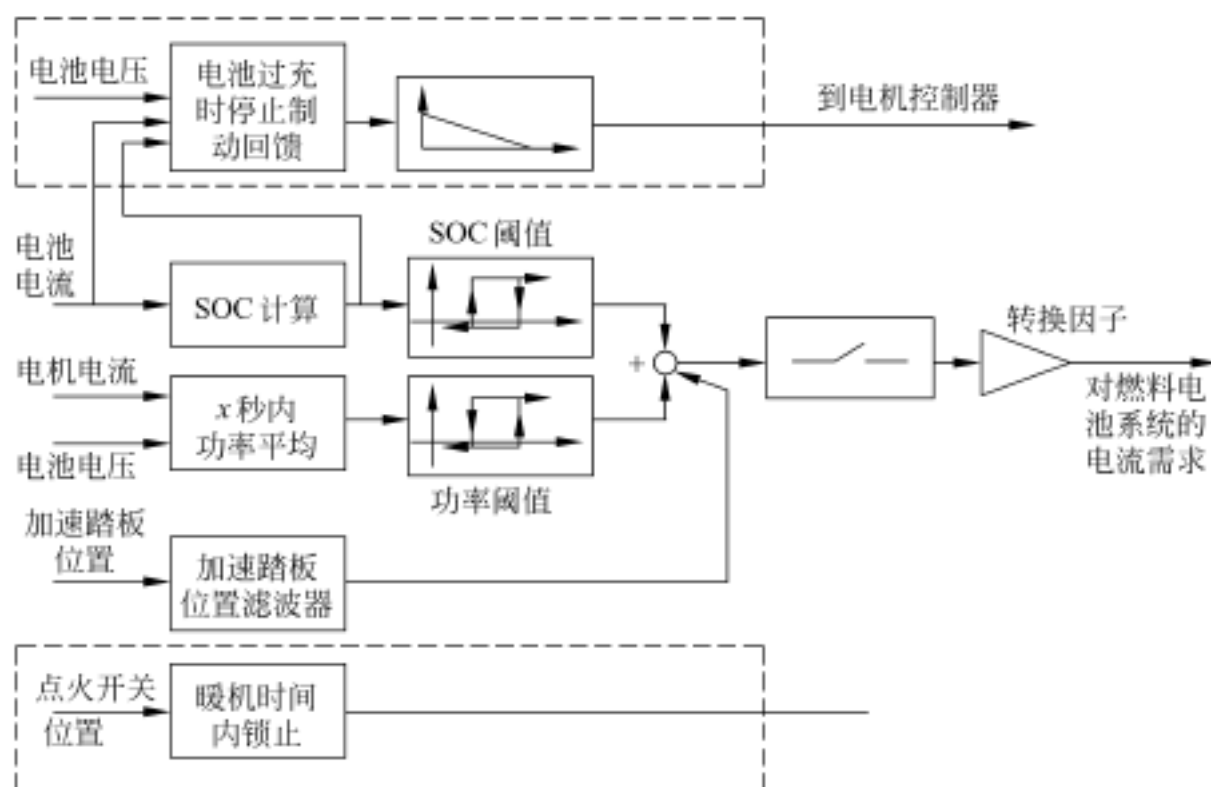


图 4-46 电池管理系统的功能框图

除此以外, 电池管理系统还有其他一些功能, 比如:

根据电池组的接受能力, 限制电动机的最大制动回馈功率; 当持续的回馈制动可能导致电池过充或损坏时, 应该限制回馈制动功率。

执行针对充电机的充电算法。

对不同的 SOC 估计算法进行测试。

电池控制算法只对燃料电池系统给出恒定的电流需求(单点控制策略),也可以将其他变功率的控制策略纳入此电池管理系统中。

4.4 燃料电池大客车的动力性计算与仿真实例

本节将以一辆燃料电池大客车为例,在对其进行初步的设计计算并确定了部件的基本参数后,对燃料电池大客车整车的动力性能进行验证,而且对不同的燃料电池汽车结构的性能进行仿真计算分析。

4.4.1 变速器设计及整车动力性能计算

1. 两挡变速器的设计

由电机的工作特性和良好的调速性能可以得出,燃料电池汽车的变速器可以使用较少的挡位就可以满足汽车的使用要求,国外的燃料电池汽车甚至已经取消了变速器的配置,此时汽车的速度变换完全靠电机的调速实现,当然这需要很好的电机控制技术。

由于燃料电池大客车主要作为城市公交车运行,需要频繁的起步—加速(或爬坡)—减速—停车,需求功率和相应的转矩、转速变化范围较大,为了更有效地利用燃料电池系统提供的功率,需设计两挡变速器,设计要求如下:

最高车速:80km/h;

最大爬坡度:20% (11.31°);

从换挡的方便性出发,变速器邻近挡位速比的比值不宜大于1.8。

根据如上的设计要求,变速器设计计算过程如下:

(1) 选定主减速比 $i_b = 6.83$,若设定变速器在2挡、电机最大转速 ($n_{\max} = 5300\text{r/min}$) 时为设计最大车速(80km/h),可得2挡速比 $i_2 = 1.7655$;

(2) 要满足最大爬坡度20%的要求,可得1挡速比 $i_1 = 3.0$ 。

综合考虑换挡的方便和齿轮加工的要求,初步取: $i_b = 6.83$, $i_1 = 3.026$, $i_2 = 1.644$ 。但是两挡速比已经达到了1.8248,比较大。

2. 燃料电池大客车整车动力性能计算

燃料电池大客车初步确定的设计参数和性能指标如表4-3所示。燃料电池大客车采用的是交流异步电机,电机的工作特性曲线如图4-47所示。

表 4-3 燃料电池大客车整车参数

长 × 宽 × 高/ mm	10890 × 2490 × 3360
迎风面积/ m ²	7.5
轴距/ mm	5600
蓄电池总电压/ 容量	384V/ 35 Ah
座椅数/ 乘员总数	(30 + 1)/ 50
用于计算的总质量/ kg	14200
风阻系数	0.7
滚动阻力系数	0.012
旋转质量换算系数	1.1
车轮滚动半径/ m	0.502
空调及附件所需功率/ kW	30
传动系机械效率	0.88
燃料电池额定净输出功率	$P = 100\text{kW} (250\text{V} \sim 400\text{V})$
驱动电机功率	$P_{\text{rated}} = 100\text{kW}, P_{\text{max}} = 160\text{kW}$
电机及控制器最大总效率	90% 以上
超级电容能量/ 最大功率	1kWh/ 50kW(1 min)
变速箱速比	1 挡: 1.644, 2 挡: 3.026

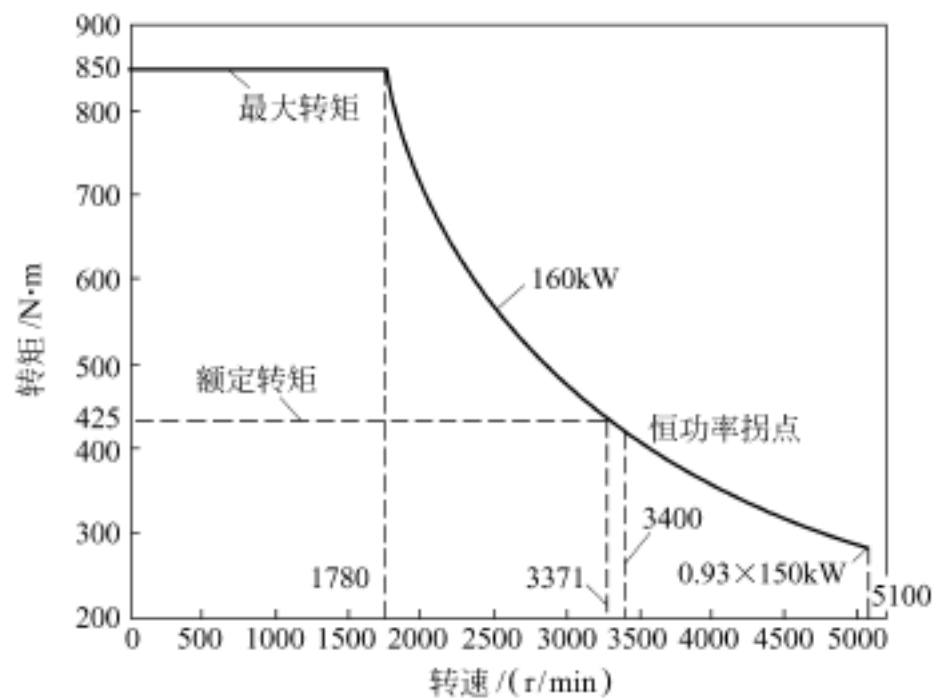


图 4-47 交流电机工作特性图

根据以上的参数计算得汽车动力性能,可得如下结果:

最高车速为 87.64km/h;

在爬 20% 的坡时的最高车速为 17.4km/h;

在爬 12% 的坡时能达到的最高车速为 27.3km/h;

汽车 0~50km/h 的加速时间为 13.7s(在 30km/h 时由 1 挡换到 2 挡)。

4.4.2 燃料电池大客车的系统仿真

本书作者利用 Simulink 建立燃料电池混合动力汽车各部件及整车的仿真模型,并根据一定的控制策略进行仿真计算。下面将对两种不同结构的燃料电池混合动力汽车进行仿真计算分析。

1. 燃料电池 + 辅助电池(FC + B)方案

众所周知,燃料电池是一种新型的动力源,价格昂贵,其特点是在额定功率的 20%~60% 之间,是系统效率最高的区域。随着输出功率的增大,效率逐渐降低。因此,若加一个用于功率调峰的辅助电池组,可使燃料电池工作在比较经济的区域内,发挥它工作效率高的优点。以下就是对这种结构燃料电池汽车的仿真结果,图 4-48(a)为北京市小公共汽车工况循环;(b)为燃料电池和辅助电池输出功率与

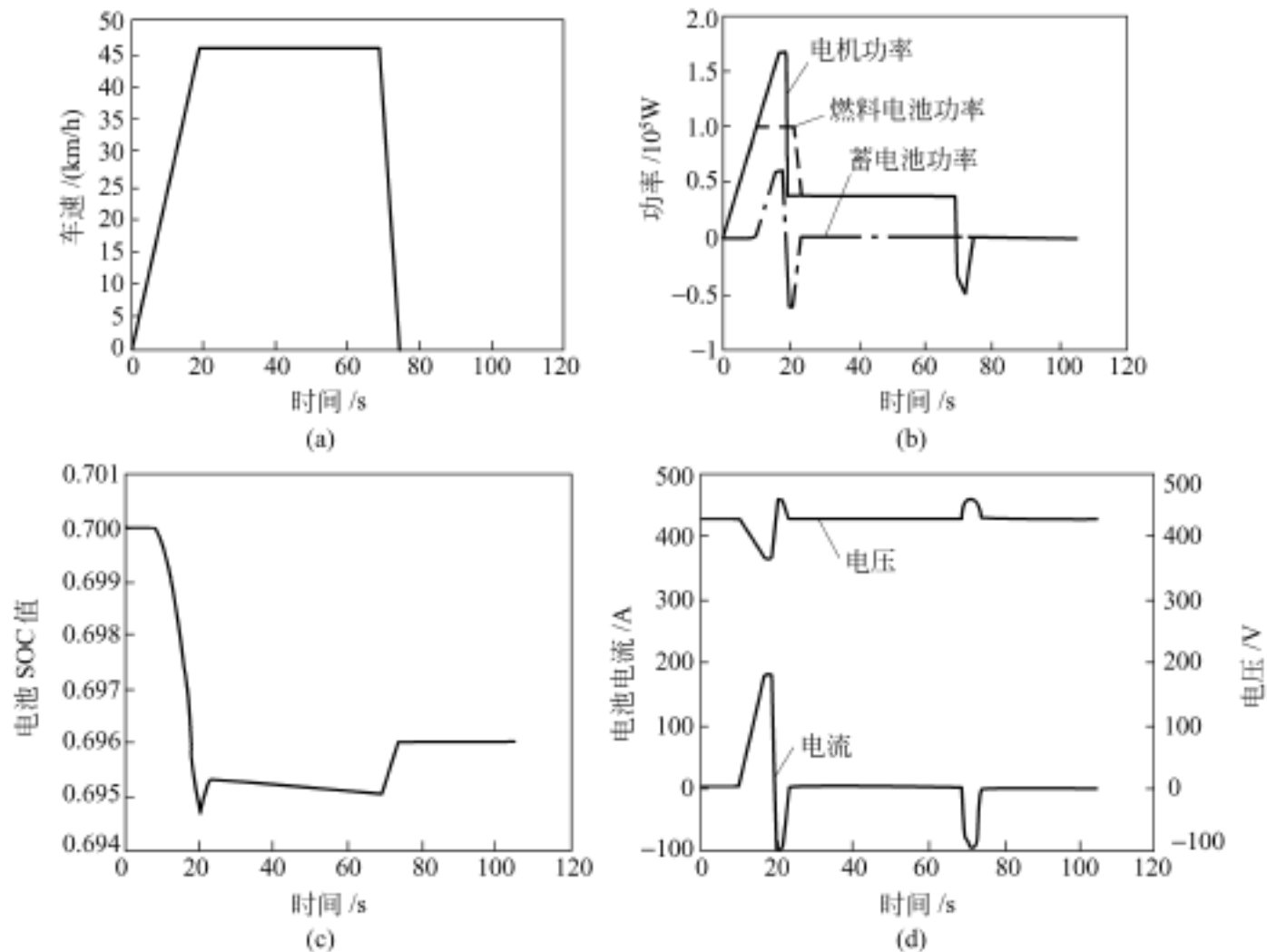


图 4-48 燃料电池 + 辅助电池方案的仿真结果

电机输入功率比较。可以看出,燃料电池客车可以满足北京市小公共汽车工况循环的行驶驱动要求。也就是说该车基本满足市内公交系统的运行要求。图 4-48 (c)为辅助氢-镍电池组 SOC 的变化;(d)为氢-镍电池组输出电压、电流曲线。如图 4-48 所示,在减速阶段,电池的充电电流可以达到 100A 左右,这对辅助电池组的安全影响很大。由此引出了以下的方案设计。

2. 燃料电池 + 辅助电池 + 超级电容(FC + B + C)方案

使用 FC + B + C 这个较为复杂方案的主要理由如下:

(1) 目前燃料电池系统的冷启动性能不是很好,空气压缩机及加热系统需要的功率大,启动时可以应用超级电容和辅助电池组联合供电。

(2) 汽车在制动能量回馈或驱动电机突然卸载时,瞬时充电电流较大,很容易对辅助电池组造成损害,或导致电池组热失控而发生事故。利用超级电容可以快速、大电流充电的特性可以有效解决这些问题。图 4-49 为此方案的仿真结果。

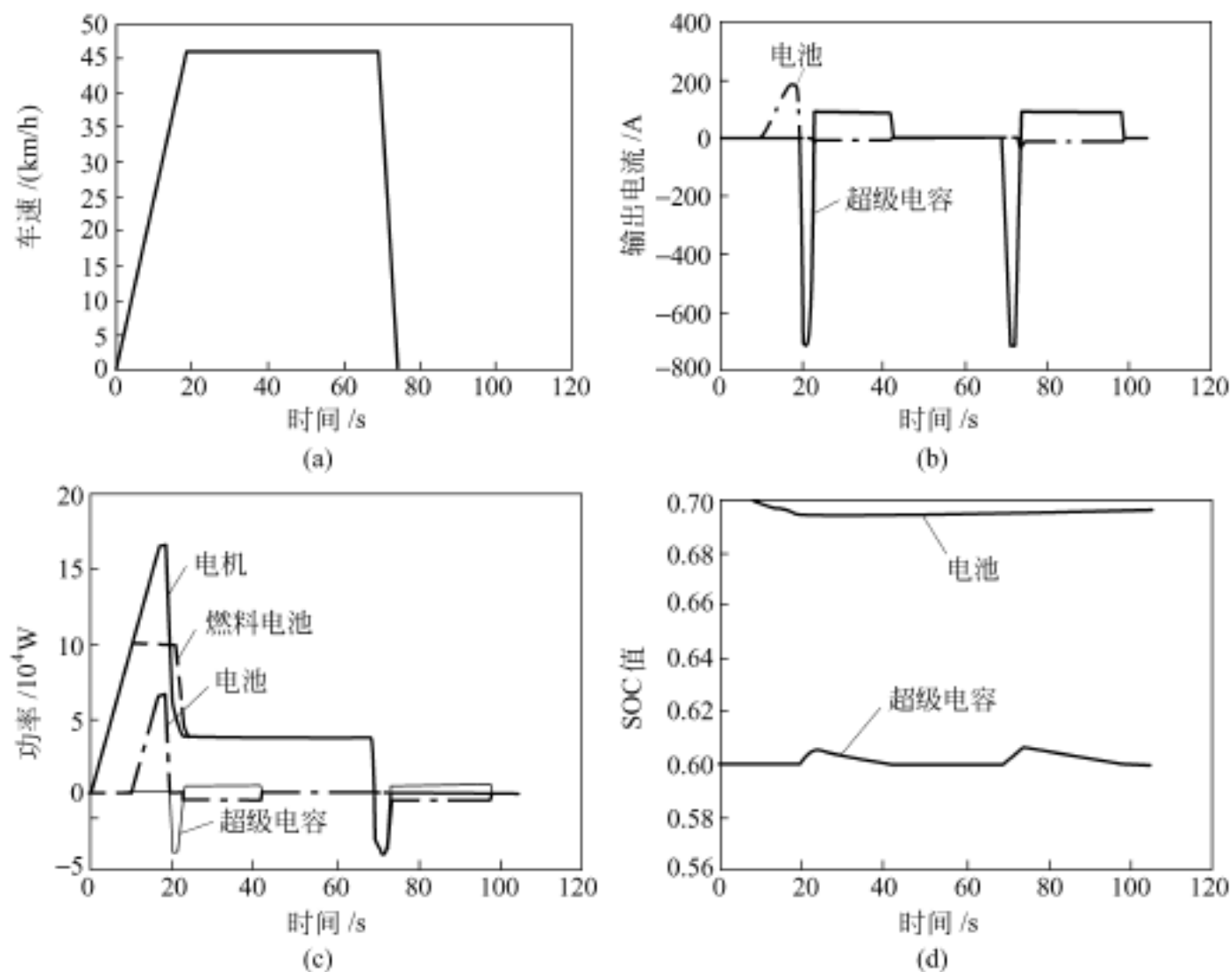


图 4-49 燃料电池 + 辅助电池 + 超级电容方案的仿真结果

图 4-49(a)为北京市小公共汽车工况循环;(b)为辅助电池组(氢-镍电池)和超级电容实际输出电流;(c)为电机、燃料电池、辅助电池、超级电容的功率仿真图;

(d) 为辅助电池组(氢-镍电池)和超级电容的荷电状态 SOC 曲线。

仿真计算北京市小公共汽车行驶工况循环的结果显示,燃料电池+辅助电池+超级电容的方案也是可以满足这种工况行驶要求的。由电流曲线可知,在汽车实际行驶过程中,驱动电机由大功率突然卸载时,燃料电池系统过渡过程中的富余功率,主要由超级电容来吸收;在制动能量回收时,主要的充电电流也由超级电容来吸收,从而减小辅助电池组的负荷。这对系统的安全性、制动能量的回收效率和辅助电池组的安全与寿命都是非常重要的。

4.5 能量管理策略与优化

虽然燃料电池混合驱动系统的多个动力源增加了系统的复杂性,但是这也为系统的优化设计提供了更大的灵活性和自由度。在系统设计过程中,可以选择合适的能量管理策略(energy management strategy)使系统的能量驱动效率最优。能量管理策略是燃料电池混合驱动系统设计初期所要考虑的最主要的内容。

能量管理策略的任务就是控制汽车动力系统的能量转换和传输过程,从而达到期望的系统响应。具体地讲,就是在不损害车辆性能和部件寿命的前提下均衡各部件的工作负荷,从而降低能量损失,提高燃料经济性。

能量管理策略有系统层次和部件层次之分。例如蓄电池的管理系统、燃料电池发动机及其控制系统等都属于部件层次的能量管理策略。本书只研究系统层次的能量管理,而把蓄电池组和燃料电池发动机等看作一个封装好的子部件,只关心其外部输出特性。例如,燃料电池发动机本身的控制是很复杂的,但对于任意的输出功率,其最佳的效率工作点只有一个,至于其控制系统是如何达到该状态,这不是本书研究的主要内容。

对于具有多个能量源的燃料电池混合动力汽车来讲,能量管理策略主要包括功率分配策略、速比控制和制动能量回馈策略三个有机组成部分。核心问题是功率分配。三者的紧密结合,才能够降低燃料消耗,并且延长燃料电池和蓄电池的使用寿命。

4.5.1 燃料电池汽车能量管理策略

根据混合驱动结构和混合程度的不同,其能量管理策略的结构也不尽相同。混联式驱动结构的速比控制和功率分配是耦合在一起的,所以能量管理策略也比较复杂^[17]。而对于燃料电池混合动力汽车来说,基本上属于串联式混合驱动结构,速比控制和功率分配是解耦的(图 4-50),可分开来讨论。

速比控制和制动回馈主要目的就是降低驱动电机输入端的功率需求;而功率分配是研究在给定功率需求的情况下,如何协调两个或两个以上动力源的功率输出比例,从而增加能量利用效率和整体的燃料经济性。

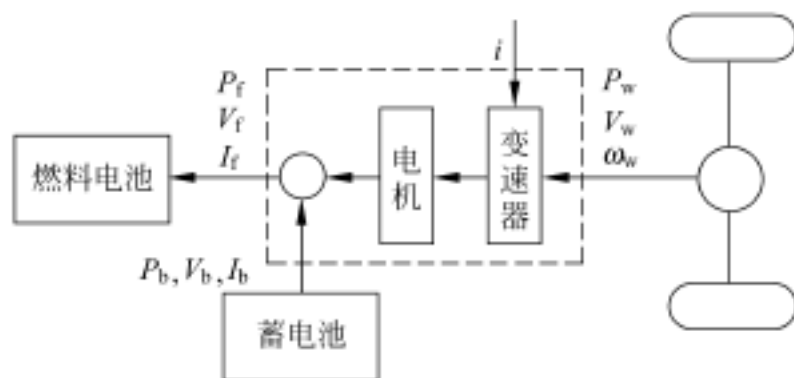


图 4-50 燃料电池混合驱动系统的后向仿真结构

1. 能量管理策略的任务

对于采用蓄电池作为功率缓冲器的混合动力汽车而言,通过以上分析可以把能量管理策略的主要任务归结为以下几点:

- (1) 在不损害蓄电池,即保护蓄电池处于合理的工作状态的情况下,满足汽车动力性的设计要求,保证可接受的驾驶性。
- (2) 根据驾驶员转矩需求和子系统的限制条件来确定车轮转矩命令。
- (3) 确定燃料电池系统的运行状态(包括其开启和关闭)从而获得最大的燃料经济性。
- (4) 确定动力系统的驱动模式和各模式之间的转换机制,确定传动系的速比。

其中,蓄电池工作状态的控制是能量管理策略所要解决的基本问题。主要考虑以下几个因素:

- (1) 蓄电池效率与其内阻紧密相关,且是 SOC 的函数。必须选择一个蓄电池的最佳工作区域,从而降低充放电损失,同时要保留额外的吸收峰值功率的空间。
- (2) 电池所存储的能量在整个循环工况下要达到平衡。
- (3) 控制蓄电池的充放电深度,放电深度和频率影响电池的循环寿命。

2. 能量管理系统的结构与内容

如图 4-51 所示,能量管理系统根据当前状态(包括车速、电池 SOC 等)及驾驶员的转矩需求信号,决定当前汽车的最佳挡位。如果转矩需求为负值(制动状态),就需要根据预先制定的制动能量回馈策略来确定电机的回馈转矩。在确定了所有负载的功率需求后(包括空调等其他附件),就可以根据功率分配策略计算出对燃料电池系统的需求功率,以保证在满足当前动力需求的前提下获得较好的整车能量效率。

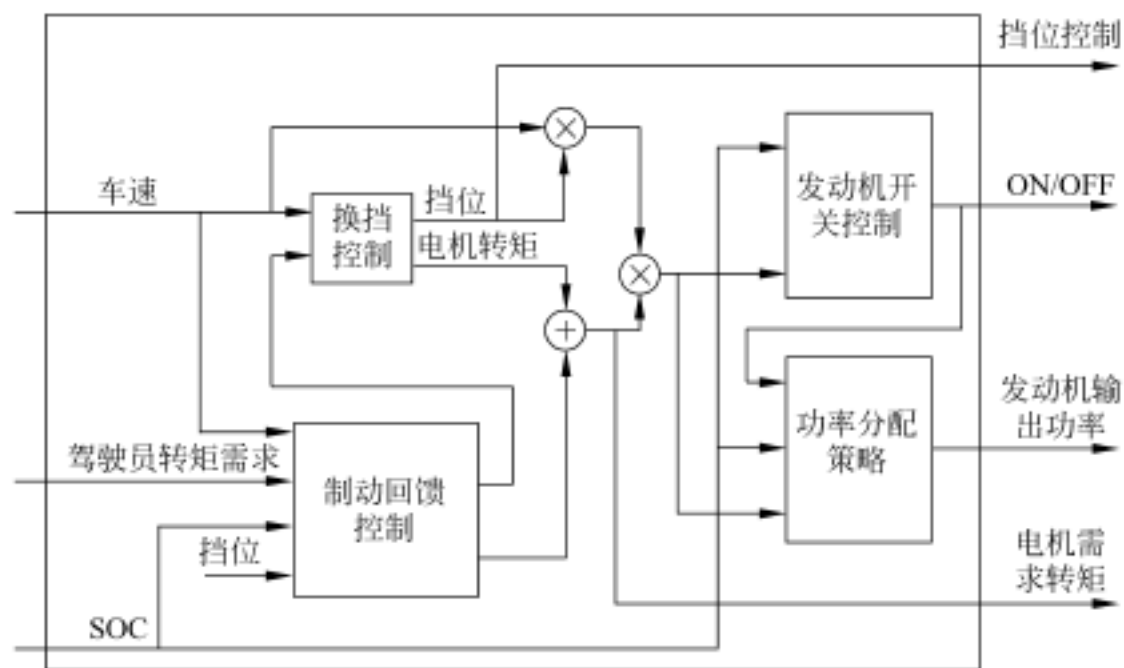


图 4-51 燃料电池混合动力汽车能量管理系统的结构

4.5.2 传统的功率分配策略

本节中介绍的功率分配策略,是以保证各个动力模块的效率最高为目标,但不一定能保证整车系统效率是最高的。

最简单的一种就是开/关(ON/OFF)控制,它始终使燃料电池系统工作在最佳效率点。当电池SOC超过一定值时关掉燃料电池系统;反之,当SOC低于某个值时,重新开启燃料电池系统。这种控制策略简单易行,但难以实现系统最优化。而且频繁的开关燃料电池系统将会导致能耗的增加和系统的不稳定性。

对于以纯氢气作为燃料的燃料电池系统,可以选择燃料电池系统效率最高的点;而对于以汽油和甲醇重整作燃料的燃料电池系统,也可以考虑用 NO_x 或HC排放最低的点作为运行点。由于排放最低与效率最高的点往往不是重合的,所以也可以在二者之间进行优化或折中。

为了进一步改善整车的经济性,最容易想到的就是使燃料电池系统在多个点进行工作,比如:最佳运行线、最佳运行区域等。

4.5.3 功率分配的模糊控制

功率分配策略的设计目标包括多个方面,如能量消耗最低,排放最小,保证足够的车辆动力性,降低驱动系统成本等。这些目标之间有时相互矛盾,需要进行统一考虑。燃料电池和蓄电池的混合驱动系统与传统内燃机和蓄电池的串联式混合驱动系统非常相似,功率分配控制模式的基本思路是一致的,只是用燃料电池系统代替了内燃机和发电机组成的辅助动力单元(APU)。鉴于人们对串联式混合动力系统的研究已经进行了相当一段时间,并取得了许多经验和成果,这里在研究燃

料电池混合动力系统时,可以借鉴其中的方法和结论。

在确定燃料电池系统(或 APU)应该输出的功率时,影响整车能量效率的因素很多^[18],而其中需要认真考虑并予以满足的因素主要有以下几个方面。

(1) 电池电压和 SOC。不管采取何种控制策略,都必须保证电池电压在限定的安全范围内运行,否则电池会损坏,甚至会导致严重的安全事故。电池的 SOC 不能太低,以保证有足够的能量用于车辆加速或爬坡。为了获得尽可能多的回收制动能量,电池也不能完全充满。当电池的 SOC 值达到最高限制值时,就应该关断燃料电池系统或使其空载运行;相反,当电池 SOC 值低于某个规定值时,燃料电池系统就应该输出较大功率,除提供驱动功率外,还应为辅助电池充电。

(2) 车速。车速及车速的变化决定了车辆需求功率的大小,为了使燃料电池高效运行,可以对燃料电池的工作点进行相应的调整,以适应运行工况的要求。

另外,由于串联式混合动力系统的数学模型十分复杂,各个部件都有强烈的非线性和时变性,而且汽车的能量策略要适应多种不同的道路情况和驾驶员意图。在这种情况下,常规的控制方法就难以取得满意的效果。为此,很多学者引进了模糊控制的思想。

Nashat Jalil 等^[20]采用基于规则的功率分配(power split)策略对发动机与能量存储装置的能量流进行分配。该功率分配器根据整车功率需求、驾驶员加速踏板开度和电池的 SOC 来确定功率在发动机和电池之间的分配比例,从而保证发动机和电池都尽可能在高效率点上工作。这些工作点的选择是基于这些部件的效率图进行的。除了功率模糊分配器之外,还包括一个用来控制车辆纵向加速度的 PI 控制器,用其输出来估计车辆的功率需求。该加速度控制器与功率模糊分配器相结合,就构成了整个能量控制策略。此能量控制策略在功率需求为负值时还能够激活制动能量回收系统。

此外,E. Cerruto^[21,22]等人也应用模糊控制对混合动力系统两个动力源的功率分配进行研究,并且用仿真的方法加以验证。

这种能量控制策略有一定的合理性,而且由于采用模糊规则的形式,增强了控制系统的鲁棒性和适应性。但是众所周知,控制规则的确定主观性较强,手工调节模糊控制器费时费力,而且难以做到最优。

4.5.4 功率分配策略的优化

上述的发动机最佳运行线的方法只是使得发动机(或燃料电池系统)的燃料消耗最优,并没有考虑电池、电机对系统整体的影响。文献[23]根据各个部件在不同工作点的效率图,对当前工作点进行瞬时优化,即始终保持当前工作点的系统整体效率最高。对于工作点变化时的动态响应过程不予考虑,这主要是基于混合动力系统中的发动机工作点变化较慢且不频繁的假设。

该种控制策略基于系统的瞬时最优工作点,对各个状态变量进行动态再分配。

而且要求将电机的能量损耗转换为等效的发动机油耗,得到一张类似于发动机万有特性图的电机损耗图。

与以上的方法不同, A . Brahma^[24] 等人认为瞬时的优化并不等于全局优化,因为在每一个瞬时作出的控制决策都会影响以后时刻的决策,基于此, A . Brahma 提出了串联式混合动力系统中发电装置与电能储存装置能量分配的全局优化问题。为此 A . Brahma 应用动态规划的方法来优化发动机和蓄电池这两个能量源之间的功率分配问题。

如图 4-52 所示为整个串联式混合动力系统中一个抽象的能量流图,每条通路上的元件只考虑其效率影响。图中, q_1 和 η_1 分别代表从燃料到电压总线的功率和效率; q_2 和 η_2 分别代表蓄电池到电压总线的功率和效率(符号为正时代表电池输出功率);中间的圆圈代表一个功率分配器,没有功率损失,只作数值的加减。

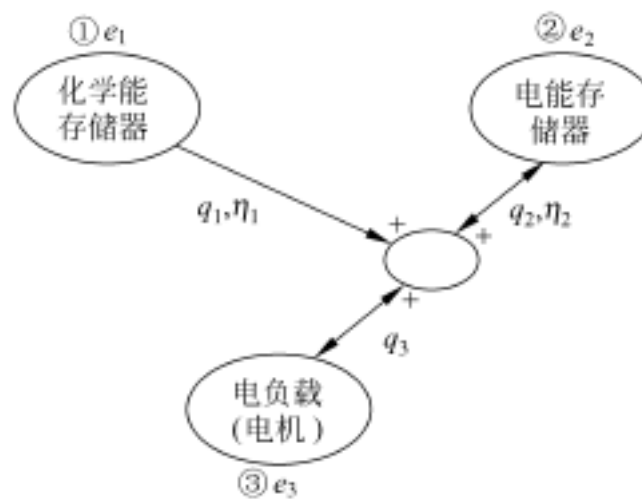


图 4-52 功率分配示意图

这些图中的变量有如下关系:

$$\dot{e}_3(t) = q_1(t) + q_2(t) - q_3(t) \quad (4-33)$$

$$\dot{e}_1 = - (q_1 / \eta_1) \quad (4-34)$$

$$\dot{e}_2 = - (q_2 / \eta_2) \quad (4-35)$$

$$\dot{e}_3 = q_3 \quad (4-36)$$

功率分配还必须考虑一些限制条件,如电池容量的限制,各个部件的额定值等。整车的功率分配问题就可以表示为受到一定约束的最优化问题,其最优化目标可表示为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left[\frac{q_1}{\eta_1} \right] dt \quad (4-37)$$

这种优化方法需要进行大量的离线优化计算,而且只能针对特定的工况进行优化,但实际行车过程中的工况是难以预先知道的,所以这种功率分配策略在实际应用中有很大的局限性。

目前也有很多公司专门开发优化软件,并与 ADVISOR 仿真模型接口,充分发挥各自的优点。这些优化软件包括 MATLAB 优化工具箱中的 FMINCON^[27], VisualDOC^[28], DIRECT^[29], iSIGHT^[30]。后三者为专业的优化软件包,文献[30]介绍了利用 iSIGHT 中的遗传算法和顺序二次规划(SQP)方法对 ADVISOR 仿真模型进行优化。

以上的优化方法大都是采用传统的数值法寻找最优的解析解,其缺点是同时

优化的变量个数较少;对于非线性较强的问题或者对系统做过多的简化,或者很难达到全局最优;而且要求目标函数是连续光滑的且可求导数等诸多限制。这些缺点,使得数值解析法寻优的鲁棒性差。

近年来,随机的非数值寻优算法备受青睐,比较典型的是模拟退火算法(simulated annealing)和遗传算法(genetic algorithm)。例如,H. Ishitani等^[26]把诸如环境影响、成本和燃料消耗等多方面因素作为选择混合动力汽车类型与参数的评价标准,建立了范围更广泛的框架仿真模型(framework simulation model),在此基础上应用遗传算法进行大范围寻优,选择优化的混合驱动结构及其参数。

4.5.5 工况自适应的功率分配策略

功率分配策略的好坏受工况的影响很大,前述的全局优化方法只能针对特定的工况进行优化,但实际行车过程中的工况是难以预先知道的。所以这种功率分配策略在实际应用中有很大的局限性。因此又有人提出基于工况自适应的功率分配策略^[32,33]。

文献[34]以一辆并联混合动力汽车为研究对象,提出了一种运用神经网络技术对行驶工况进行在线识别的方法,整车的能量管理系统会根据当前车辆所处的行驶工况模式进行在线的调整。

这种工况识别主要是根据坡度、平均车速、车速的方差等汽车行驶状态的多个统计信息进行聚类,从而得出车辆目前所处的工况模式,这些模式是若干个离散的状态。而实际的工况变化是非常复杂的,通常难以用几种确定的模式来区分,而且从本质上讲,工况代表的应该是车辆在行驶变化过程中总的功率需求变化状况,而不仅仅是车辆行驶状况的变化。而这种方法对于整车质量的变化,车载附件功率的变化(如空调)都没有考虑,但这些确实会改变总的功率需求。

这种方法的另外一个不足之处在于,即使在每个行车模式下,相应的功率分配策略也可能不是最优的。所以文献[34]虽然意识到了根据工况变化对功率分配策略进行自适应调节的重要性,但并没有给出最优的控制结构,仅仅作为一种控制方法进行研究,目前还没有达到实际应用的目标。

参考文献

- 1 余志生 汽车理论 北京:机械工业出版社,2000
- 2 赵立安 燃料电池城市客车整车控制器仿真与样机实现:[硕士学位论文] 北京:清华大学汽车工程系,2003
- 3 齐占宁 燃料电池混合汽车的优化控制与实时仿真研究:[博士学位论文] 北京:清华大学汽车工程系,2004
- 4 EASY5 help document .Boeing Co . Ltd .
- 5 李永东 交流电机数字控制系统 北京:机械工业出版社,2002
- 6 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计 北京:电子工业出版社,1998

- 7 Burak Ozpineci . SYSTEM IMPACT OF SILICON CARBIDE POWER ELECTRONICS ON HYBRID ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS: [PhD Thesis] . Knoxville: University of Tennessee, 2002
- 8 Gu W B, Wang C Y, Li S M . Modeling discharge and charge characteristics of nickel-metal hydride batteries . *Electrochimica Acta*, 1999 , 44: (25)
- 9 李斌,陈全世 .混合动力电动汽车中电池特性的研究 .*汽车技术*, 1997
- 10 Lee J M, Cho B H . Modeling and simulation of electric vehicle power system . Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-97, 3: 2005 ~ 2010
- 11 Bhatikar S R, Mahajan R L, et al . Artificial neural network based energy storage system modeling for hybrid electric vehicles . SAE paper 2000-01-1564
- 12 Buller s, Karden E, Kok D, et al . Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy . Industry Applications Conference, 2001, conference record of 2000 IEEE, 4: 2500 ~ 2504
- 13 USABC Battery & Ultracapacitor Test Procedures Manuals, BUSINESS/ TECHNOLOGY BOOKS . 1996
- 14 Hauer K H, Moore R M, Ramaswamy S . The hybridized fuel cell vehicle model of the University of California, Davis . SAE paper 2001-01-0543
- 15 Yaakov S B, Adar D . Average models as tools for studying the dynamics of switch mode DC-DC converters . Power Electronics Specialists Conference, 25th Annual IEEE , 1994, 2: 1369 ~ 1376
- 16 Ogburn M J, Nelson D J, Wipke K, et al . Modeling and validation of a fuel cell hybrid vehicle . SAE paper 2000-01-1566
- 17 朱元 . 混合动力汽车能量管理策略的四步骤设计方法: [博士学位论文] 北京:清华大学汽车工程系, 2003
- 18 Arnet B J, Haines L P . Combining ultra-capacitors with lead-acid batteries . EVS-17
- 19 Mierlo J V . Views on hybrid drivetrain power management strategies . EVS-17
- 20 Jalil N, Kheir N A, et al . A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle . Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997
- 21 Cerruto E, Consoli A, Raciti A, et al . Energy flows management in hybrid vehicles by fuzzy logic controller . Proceedings of the 7th Electrotechnical Conference, Mediterranean, 1994
- 22 Cerruto E, Consoli A, Raciti A, et al . Fuzzy logic based efficiency improvement of an urban electric vehicle . The 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994, 2: 1304 ~ 1309
- 23 Seiler J, Schroder D . Hybrid vehicle operating strategies . EVS-15
- 24 Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G . Optimal energy management in series hybrid electric vehicles . Proceedings of American Control Conference, Chicago, Illinois, 2000
- 25 Delprat S, Paganelli G . Algorithmic optimization tool for evaluation of HEV control

- strategies . EVS 16
- 26 Ishitani H, Baba Y, Molyneaux A, et al .An optimization tool of hybrid type EV systems . EVS-15
- 27 MATLAB Optimization Toolbox 2 .1 Documentation . [http:// www .mathworks . com/ products/ optimization](http://www.mathworks.com/products/optimization)
- 28 VisualDOC Documentation . [http:// www .vrand .com/ visualdocinfo .htm](http://www.vrand.com/visualdocinfo.htm)
- 29 [http:// www .ctts .nrel .gov/ analysis](http://www.ctts.nrel.gov/analysis)
- 30 Wipke K, Markel T, Nelson D . Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV, EVS-18
- 31 belhachemi F, Rael S, Davat B . A physical based model of power electric double-layer supercapacitors . Industry Applications Conference, 2000, conference record of 2000 IEEE, 5: 3069 ~ 3076
- 32 Drozd P, Fitzpatrick N, et al . Adaptive energy flow management in hybrid systems . Proc . of EVS17, Montreal
- 33 Saeks R, Cox C, Mays P . Adaptive control of a Hybrid Electric Vehicle . IEEE, 2000
- 34 Jeon S, Jos, et al . Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition . Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, M 2002, 124: 141 ~ 149

整车控制系统设计

燃料电池电动汽车是一个高度集成的电气系统,各个部件之间的耦合性很强,为了实现燃料电池汽车多个能源之间的能量分配,需要一个中央控制单元来进行动力系统的协调控制,从而达到更好的经济性和动力性。

本章主要围绕在完成国家“863”电动汽车重大专项任务中,在开发整车控制器实践过程中遇到的问题进行论述。主要包括以下几个方面:基于 dSPACE 的整车快速控制原型的研制,整车电控单元 ECU 的研制,CAN 协议的制定和硬件实现等内容。本章最后还对当前流行的线控(X-by-wire)技术等进行了简要的介绍。

5.1 系统设计要求与原则

图 5-1 是一个典型的燃料电池汽车整车控制系统总体结构图。它主要包括三个控制模块,即传动系控制、电机及其控制器和燃料电池系统控制。如果通过燃料处理器供氢,辅助电池作为能量存储装置,还需要两个额外的控制模块,即燃料处理器控制模块(如图 5-1 中虚线框所示)和电池组控制模块。

通过电流控制输入信号和转子位置信息,电机及其控制器模块计算控制器开关信号,从而在不同的行驶车速下产生预期的电机转矩。通常情况下,电机控制需要非常快的采样时间,一般在几百微秒左右。

考虑到燃料电池及燃料处理器的时间滞后,其启动、停车和瞬态过程的控制就与一般的纯电动汽车不一样,必须在其空气供给控制中采用特殊的方法加以补偿。另外,燃料电池的控制单元还必须有自身的单体电压和功率监控能力及水、热、空气供应和氢气供应控制子系统。每个子系统有各自的闭环反馈控制,从而维持所需的压力、流量和温度。这些所需的压力、流量和温度值由外环控制决定。

为了补偿燃料电池及燃料处理器响应时间慢的缺点,通常选用辅助电池或其他能量存储装置,如超级电容等。辅助电池的控制模块需要完成对电池单体或模块的充、放电管理功能,除此之外,还必须计算辅助电池的荷电状态,监控并控制每个单体的状态,进行温度管理等功能。超级电容也需要类似的控制模块。为了满足对各个单元的控制要求,例如快速采样、各种数据和指令的快速传输与处理等,

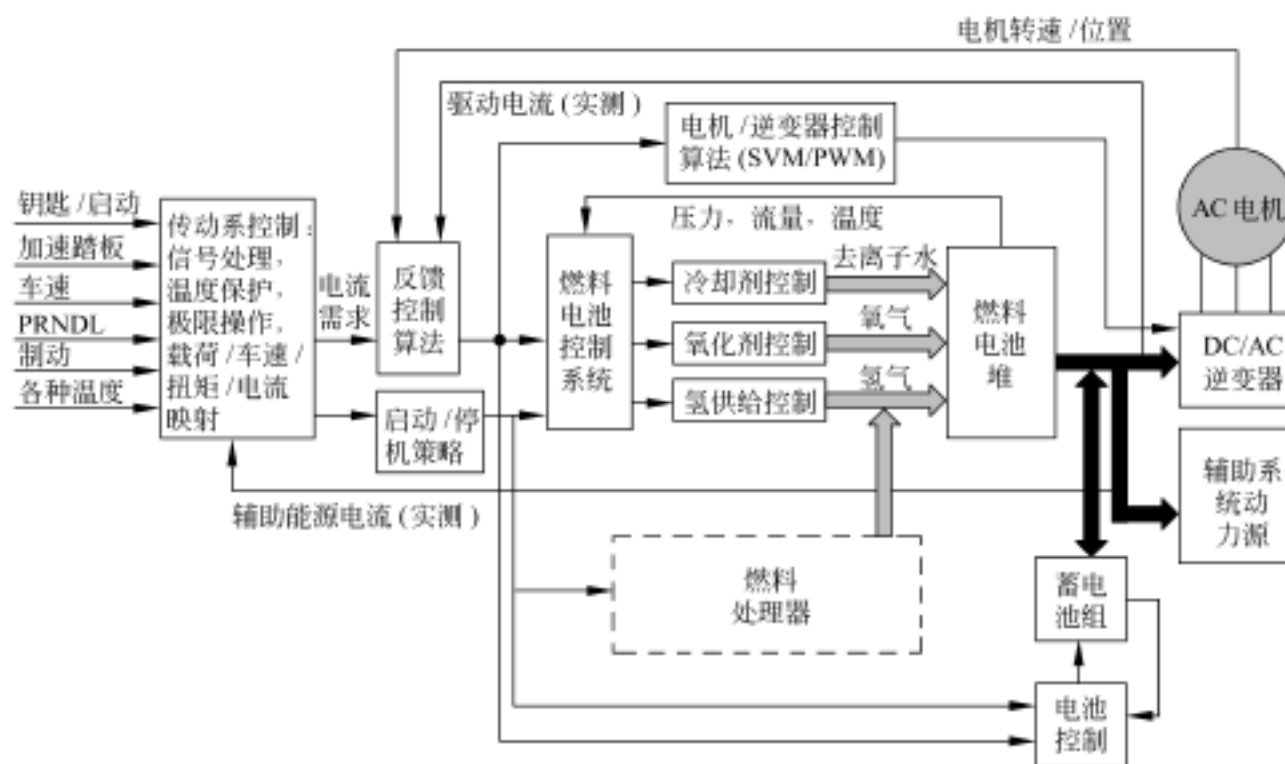


图 5-1 整车控制框图

就需要不止一个控制器。

燃料电池汽车整车控制系统、动力驱动系统及多能源和能量管理系统等各个电控单元都需要新的设计方案。同时,燃料电池汽车每个控制单元对数据实时性要求比普通汽车更高,因此,要实现整车的优化控制必须依赖于高性能的数据通信系统。由于控制器局域网络(controller area network, CAN)具有通信方式灵活、可靠性高、实时性好、传输速率快等优点,因此燃料电池汽车采用了 CAN 总线通信系统。

图 5-2 描述了“燃料电池 + 辅助电池”结构的燃料电池汽车的典型运行模式(表 5-1),但该图并不一定反映车辆的实际运行工况。

表 5-1 燃料电池系统及辅助电池在各种工况下的工作状态

序号	模式	部件工作状态	
		燃料电池系统	辅助电池
(1)	静止	关	如果可能则充电
(2)	启动	开	为燃料电池和车辆提供功率
(3)	起步,加速	最大功率	如果需要则为电机提供功率
(4)	巡航,充电	最大功率然后巡航功率	吸收燃料电池功率,然后无功率输出
(5)	巡航	开	无需功率输出
(6)	制动,下坡	怠速	如果需要则充电,吸收回馈能量
(7)	巡航,爬坡	功率增加	燃料电池启动时提供功率,然后再充电,最后无需功率输出
(8)	制动	怠速	吸收电机功率充电
(9)	停车	关	无需功率输出

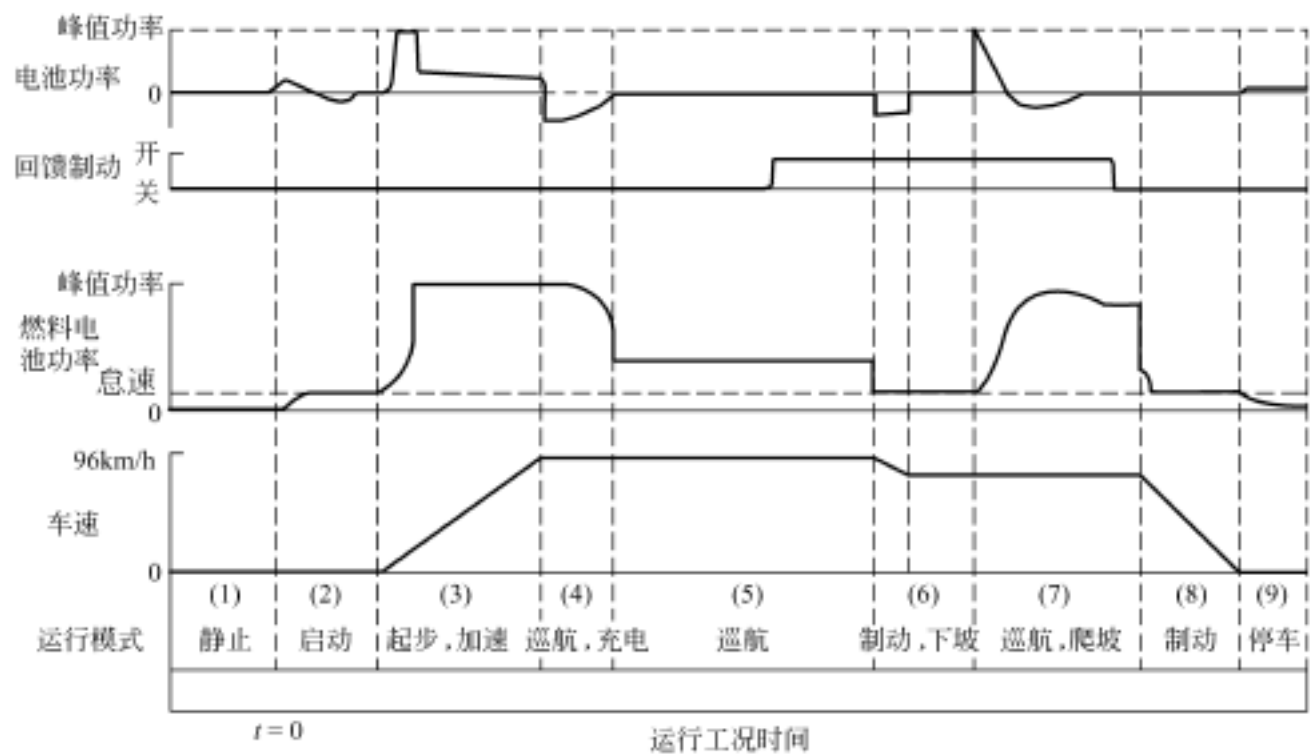


图 5-2 燃料电池车辆典型工况分析

车辆的运行模式基本决定了整车控制单元(vehicle control unit, VCU)应该实现的功能。一般来讲,VCU 需要完成的基本功能包括:

保持与各个子控制单元的通信,对各个子系统进行整体监控和协调;

调节燃料电池、主 DC/DC 输出电流以便控制燃料电池输出功率,并实现整车的能量流优化。

从以上分析可以确定整车控制系统总体设计的几条原则:

采用基于 CAN 总线的分布式结构,提高网络性能和系统可靠性;

遵循开放式国际标准,有利于系统的扩充和发展;

采用分层控制,使系统的结构清晰,便于模块移植和并行设计,提高设计效率;

系统应具有好的鲁棒性和容错性能,这一点对于车辆而言尤为重要。

整车控制器负责处理驾驶员输入和系统运行状态信号,例如启动钥匙状态、加速踏板位置、制动踏板位置、挡位、燃料电池温度和电流等。通过这些信号进行控制决策和计算,将控制指令输出到各部件控制单元。

本章介绍整车控制器的研制,不涉及各部件控制器的研究开发。

5.2 基于 dSPACE 的整车控制器快速原型开发

汽车作为重要的机电类产品,电子控制技术的应用日益普遍和重要,汽车电子控制系统已经成为汽车最重要的组成部分。尤其是日益严格的汽车污染物排放法规及对安全与舒适性越来越高的要求,使汽车电子控制单元(ECU)实现的功能越

来越复杂。工程师们在进行控制系统设计开发时,常常需要同时面临许多相互制约而难以轻松解决的问题,而汽车产品更新的时间间隔和为开发所留下的时间却愈来愈紧迫。这些问题主要有以下几个方面:

对控制性能越来越高的要求使得控制算法越来越复杂;

有时控制对象在开发过程中也在不断发生变化;

并行工程要求设计、实现、测试及生产准备同时进行;

由于在制造过程中存在的公差、老化和元器件装配等问题,对控制系统提出了相当高的鲁棒性要求。

ECU 的开发时间是决定汽车新产品推出快慢的瓶颈。

许多汽车厂商与零部件供应商已经意识到规范的开发系统可以使各个开发阶段有效的衔接。通过统一的开发工具可以实现现代的开发流程,从而减少手工编程的工作量并能避免许多错误。

计算机辅助控制系统设计(computer-aided control system design, CACSD)可以满足这一要求。计算机辅助控制系统设计不仅是进行控制方案的设计和离线仿真,还包括实时快速控制原型(RCP)、已验证的设计向产品型控制器的转换和硬件在环仿真(HILS)。

dSPACE 为 RCP 和 HILS 提供了这样一套计算机辅助控制系统设计的工具包 CDP(control development package)。dSPACE 支持从基于框图的功能原型到自动产品代码生成,以至 ECU 测试的所有开发阶段。这一解决方案的优势在于它可以极大地节约时间与成本,提高软件质量并且有利于厂商与供应商之间的合作。

5.2.1 dSPACE 系统简介

dSPACE 实时仿真系统是由德国 dSPACE 公司开发的一套基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发及半实物仿真的软硬件工作平台。它采用功能非常强的 32 位嵌入式微控制器 PowerPC 603e,这种微控制器是专门为汽车控制而设计的,所以,可很方便地实现汽车上的通信、数据采集和实时控制。另外,有些型号的 dSPACE 还具有一个从微处理器 DSP 芯片,用户可以灵活编程,进行快速的浮点运算。

dSPACE 除了具有很强的处理和控制在能力以外,更加重要的是实现了和 MATLAB/Simulink/RTW 的无缝连接。其所带的软件 ControlDesk 可以方便地实现数据显示和在线调节控制参数。dSPACE 提出的 V 循环开发流程,如图 5-3 所示。

下面简单介绍 dSPACE V 循环开发流程中的几个主要环节。

(1) 功能设计与 Simulink 仿真。采用 MATLAB/Simulink 这样的建模工具,可以设计相应的功能并首先在 Simulink 下进行验证。这些模型是所有开发阶段

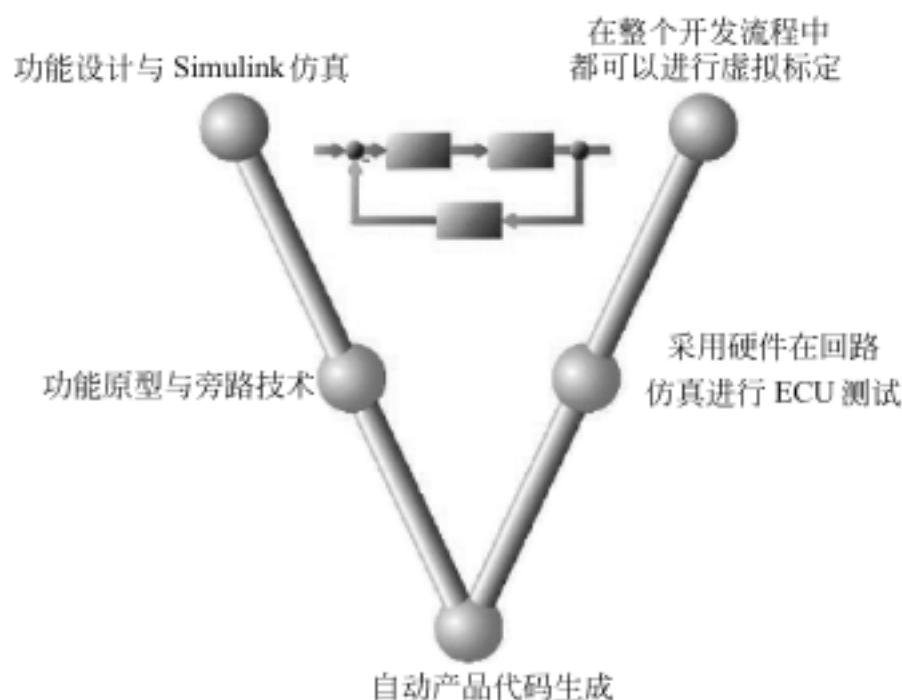


图 5-3 dSPACE 的 V 循环开发流程图

的基础。发动机、传动系与整车模型也可以在后续阶段用于硬件在环仿真中对 ECU 进行测试。虚拟测试环境也将在整个流程中保持一致。

(2) 功能原型与旁路技术。dSPACE 原型允许在实际车辆中方便可靠地测试与优化各种功能。可从 Simulink 中自动生成代码下载到原型硬件上并通过虚拟仪表进行测试,这加快了设计迭代循环。智能的旁路技术允许在原有 ECU 中集成新功能。

(3) 自动产品代码生成。自动生成产品 ECU 的定点代码是开发流程中的关键。一旦功能模型被验证, TargetLink 用很短的时间就可以直接从 Simulink/Stateflow 中生成高效的 C 代码。而且在这一阶段也可以改进设计功能。

(4) 采用硬件在回路仿真进行 ECU 测试。当 ECU 已经完成,采用 dSPACE 仿真器可以自动快速地测试其功能。与实际车辆测试不同的是,测试可以更加完整,发生错误的情况可以被随时重复。基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型结合高性能的实时硬件可以在实验室内准确模拟实际的驾驶情况。

(5) 在整个开发流程中都可以进行虚拟标定。在现代的开发流程中,参数标定已经从最后阶段逐渐前移到设计早期,特别是在原型与测试阶段调整参数可以大大减少实际标定所需要的时间。在未来,dSPACE 工具将包括强大的标定与测试系统,以保证在开发的所有阶段都可以对 ECU 参数进行调整。

5.2.2 整车控制器快速原型的开发

1. 开发步骤

参照 dSPACE 的 V 循环开发流程,整车控制器快速原型开发的主要步骤

如下。

第一步,确定控制器应该具有什么功能,同时借助 MATLAB/ Simulink/ Stateflow 建立整个控制系统(包括控制器和被控对象)的仿真模型,进行离线的仿真与参数调整。

第二步,从控制系统的 MATLAB 仿真模型中分离出控制器的 Simulink/ Stateflow 模型,并且结合 dSPACE 的物理接口模块(A/D, D/A, I/O, RS232, CAN)来实现与被控对象的物理连接。利用 dSPACE 提供的编译工具可以生成可执行程序,并下载到 dSPACE 中。在这个阶段可以方便地实现控制器的实时仿真与控制参数的在线调整。控制对象的模型由另外一个 dSPACE 实现,两者通过 CAN 接口实现通信。

第三步,经过实时硬件在环仿真的验证后,把整车控制器快速原型控制器在整车动力系统试验台上进行测试,该试验台包括燃料电池系统、蓄电池组及其管理系统、电机及控制系统和测功机等设备,能够模拟车辆的运行工况,与真实车辆更为接近。

第四步,进行实车运行试验和调试。在这个过程中还可能会发现一些在硬件在环仿真与台架试验中不能发现的问题,可对设计进行必要的修改。

通过实际的开发应用可以发现,dSPACE 不仅仅是一个功能强大的控制单元,更重要的是为用户提供了一套完整的仿真、调试和验证的系列硬件和软件工具,从而大大加速了实际控制单元 ECU 的软硬件研究和开发。

如果采用传统的开发方法,那么在开发过程中至少要包括一个控制工程师——负责根据原始说明设计电气线路;一个程序员——负责开发控制系统设计人员所描述的控制算法代码。这样,在开发过程中就难免由于各种协调问题产生时间延误。而且由于硬件方面的种种限制,对控制系统参数的修改必须花很长时间才能得到验证,导致开发周期过长。

利用 dSPACE 可使开发研究人员全神贯注于控制方案的构思,而不必再在琐碎的杂务上花费相当多的时间,从而可以大大缩短开发周期。两者的对比如表 5-2 所示。

2. 硬件接口电路开发

为了把整车控制器模型分离出来,进行实时硬件在环仿真及台架试验和整车调试的工作,需要相应的硬件接口设备来支持。

在这个环节中,除了电控单元是真实的部件,部分被控对象也可以是真实的零部件,例如把油门踏板、制动踏板通过“A/D”连入仿真回路中,就可以实现简单的驾驶员在环的实时仿真。如果把车上驾驶员操作的开关、按钮和挡位信号也接入仿真回路,就会更加接近实际情况。

表 5-2 dSPACE 与传统开发模式的对比

流程的阶段与特点	传统的开发流程	现代的(利用 dSPACE) 开发流程
技术要求(管理与维护)	口头描述的技术要求,通常很模糊	基于模型的技术要求,很清晰
功能开发	对复杂的原型进行手工编程	图形化建模,自动下载到实时硬件上运行,快速进行方案评估,快速形成控制原型
产品代码生成	手工编写 C 代码,容易出错	从开发工具中自动生成产品代码
ECU 测试	非系统地进行车辆测试,工况可重复性差	系统地进行测试,通过硬件在回路仿真进行失效测试
灵活性	非常有限	好
开发进程	慢	由于并行开发,使进程大大加速

通过这样一个可扩展的实时硬件在环仿真平台,可以更加真实地验证电控单元 ECU 的功能,尤其是在验证时序、出错的处理等问题上,更能显示硬件在环仿真的优越性。

要实现被控对象(真实或虚拟的)与 dSPACE 实现互连,其中一个重要环节就是要研制出一块信号调理板对各个输入输出量作必要的处理。

设计的信号调理板涉及的输入输出接口有:

- CAN 总线的抗干扰设计;
- 多路开关信号的输入输出;
- 多路模拟信号的输入输出。

有了这些输入输出信号的接口电路,采用 dSPACE 的接口模块,很容易把这些接口加到整车控制器的 MATLAB 模型中,编译后就可以下载在 dSPACE 硬件中。如图 5-4 所示为快速整车控制器原型,图中笔记本电脑通过高速串行接口与 dSPACE 相连,信号调理板通过一个标准接插件与 dSPACE 相连。

最后,要对搭建的快速整车控制器原型进行实验室硬件在环仿真试验和实车道路试验。硬件在环仿真过程中,主要对汽车的工作模式切换、燃料电池的开关控制等控制逻辑进行测试。实车道路试验是对快速整车控制器原型进行比较全面的真实测试,并且可以比较各种控制策略的燃料经济性和动力特性(除了受零部件本身特性影响以外,还受司机意图解释的影响),最终为整车控制器 ECU 的研究积累经验。另外,由于硬件在环仿真过程中可以人为地假设某些零部件发生了故障,从而可以检验快速整车控制器原型的故障诊断能力及故障处理逻辑。在实车道路试验过程中,燃料电池发动机若多次发生氢气泄漏故障,快速整车控制器原型都能及时地进行相关的保护处理,确保燃料电池混合动力汽车的安全。图 5-5 给出了

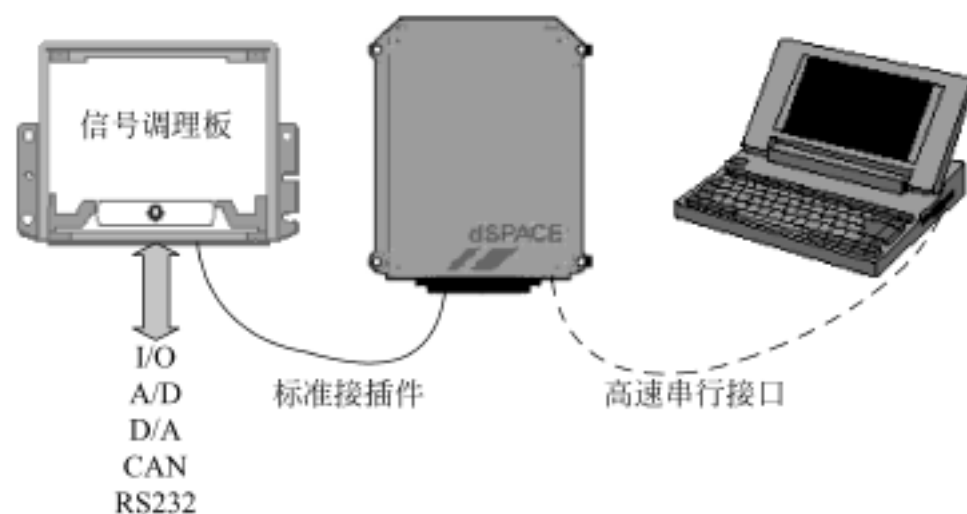


图 5-4 基于 dSPACE 的快速整车控制器原型

最终在燃料电池混合动力汽车上进行实车道路试验的用户界面。试验人员可以方便地知道 CAN 总线通信的状态、各个重要子系统的当前状态、汽车当前的工作模式、根据车速和油门踏板的位置解释出的电机转矩命令等。

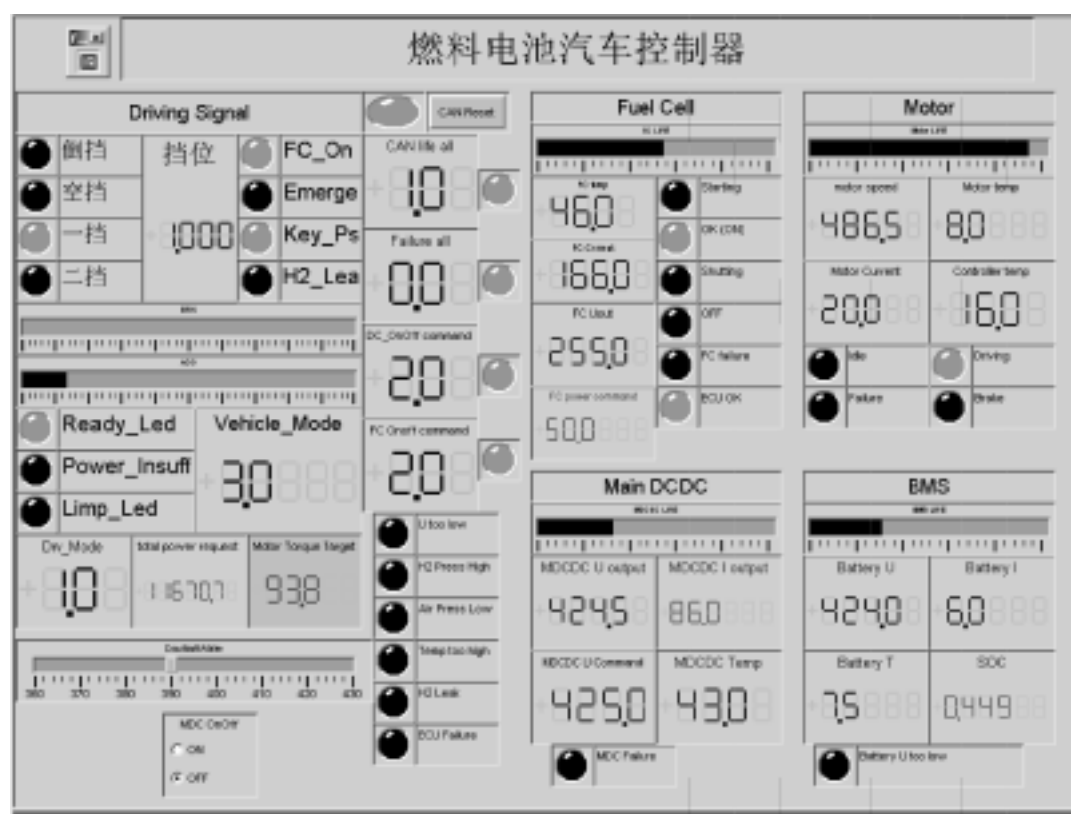


图 5-5 dSPACE 整车快速控制原型的控制界面

5.3 整车控制器电控单元 ECU 的研究开发

本节的内容相当于 V 循环开发流程图(图 5-3)中的第三步,即自动产品代码生成。在开发过程进行到此步时,已经确定了整车控制器的控制算法,并且通过 dSPACE 进行了算法的验证。同时,也通过信号调理板的研制对控制器所需要的

信号有了更多的了解。开发重点变成了研制出符合燃料电池混合动力汽车要求的整车控制器电控单元 ECU。

5.3.1 整车控制器硬件开发

结合先进性和实用性,采用一般目前汽车领域应用最为广泛的 Infineon (Siemens)公司的 C166 单片机。无论从芯片性能、对 CAN 总线的支持水平、功耗、性价比等各方面来衡量,C166 系列 16 位单片机都是很好的选择。C166 系列单片机从 1989 年开始进入市场,能满足高端实时控制应用的需求,可支持大量的外设器件,尤其在对 CAN 总线的支持方面,与 CAN 总线的发明厂商 BOSCH 公司合作,可以充分满足 CAN 总线应用系统全面的性能要求。最近,Infineon 公司在 C166 单片机的基础上推出新一代的 XC166 单片机,XC166 单片机在 40MHz 的时钟频率下可以达到 25ns 的指令执行周期,更为重要的是此种单片机集成了 DSP 功能,可以在一个指令周期内完成乘法运算或者乘累加运算。这样 XC166 单片机可以胜任包括 FFT 等在内的多种数字信号处理功能,从而把 16 位单片机的水平提到了一个新的高度。此外,XC166 还包括了一个片内的 JTAG 接口,以方便用于程序的调试。另外,STMicroelectronics 公司的 ST10 SUPER10 系列单片机与 C166 系列单片机兼容,该系列单片机的时钟频率可以达到 80MHz ~ 100MHz,可以满足用户对高性能的要求^[1]。

整车控制器 ECU 的设计一方面要考虑工程性,另外也要突出其硬件平台的特点。所以,最好能够兼顾下面几个特点:

(1) 先进性。硬件平台采用国际汽车电子系统广泛使用的高性能 16 位微控制器。该微控制器可以在高速移动、苛刻的环境下工作,具有高度的灵活性和可靠性,并且适合大批量、低成本生产。

(2) 强大的扩展功能。硬件平台共支持 10 多个功能模块接口信号的扩展。

(3) 灵活性。可以根据用户接口的需要制定相应的 I/O 扩展板接口,而不需要修改核心主板的设计。这样可以大大的缩短研发时间。

(4) 标准的连接器接口(可靠易拔插)设计。

(5) 支持 CAN2.0B 总线通信。

(6) 具有较强的抗干扰能力,通过了 EMC 电磁干扰试验。

基于上面要求设计的硬件平台的功能框图如图 5-6 所示。该硬件平台 ECU 包括了 CAN 总线、A/D 转换器、I/O、定时器,串口 RS232 用来与液晶显示器相连,USB 接口用来将数据保存到 USB 存储设备中。这个硬件平台中没有包括信号调理电路,信号调理电路单独进行设计,这样可以提高硬件 ECU 平台的通用性。也就是说,即使被控对象的接口增加了,也不需要改动硬件 ECU 电路,只需改动信号调理板就可以了。这样就大大地增加了硬件 ECU 的灵活性。

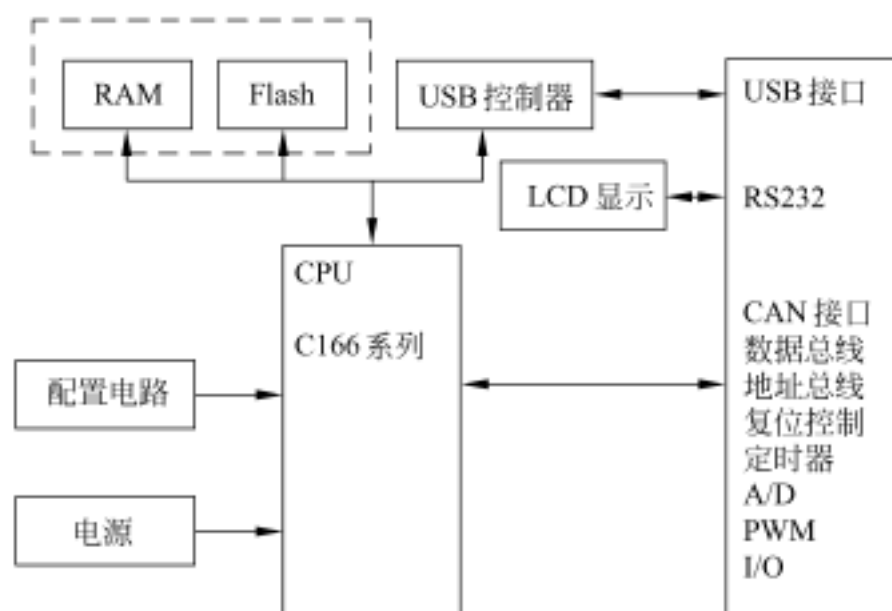


图 5-6 硬件平台功能框图

整车控制器 ECU 是在 Keil C166 的集成环境进行编译、仿真和调试的。借助于 C166 单片机所具有的 Bootload 功能,可以把用 Keil 编译好的可执行程序代码下载到 ECU 的程序存储器 Flash 中。

5.3.2 嵌入式实时操作系统的应用

简单的控制器软件设计一般并不使用操作系统,只包含一些控制流程。但是,随着车辆控制向数字化、网络化和智能化发展,并且对控制品质要求越来越高时,仅仅用简单的控制流程就不能满足系统的要求了,必须考虑使用操作系统做系统软件。这样,嵌入式实时操作系统(embedded real-time operating system, RTOS)就开始产生,并且得到大量的应用。RTOS 是 ECU 发展到一定阶段的产物,它的引入解决了 ECU 软件开发标准化的难题。随着 ECU 中软件比重不断上升、应用程序越来越大,对开发人员、应用程序接口、程序档案的组织管理成为一个大的课题。基于 RTOS 开发出的程序具有较高的可移植性,一些成熟的通用程序可以作为专家库函数产品继承下来,对以后的项目开发也有很大的帮助。

为了满足日益庞大复杂的汽车控制软件的开发需要,实现软件开发的模块化和高度可移植性,完成整车分布式控制所需的可靠的通信功能,并尽可能地实现不同厂商控制模块间的互换性和兼容性,欧洲一些大的半导体厂商和汽车厂商联合推出了 OSEK (open systems and the corresponding interfaces for automotive electronics)规范。该规范从实时操作系统、软件接口、通信功能和网络管理方面对未来的以分布式控制为特征的汽车电子控制软件的开发平台技术作了全面、实际、细致的定义与规定。尽管该规范尚处于完善中,但它所提出的一整套解决方案则是未来汽车电子软件开发的发展方向。

由于 C166 系列单片机具有巨大的市场,所以世界上众多的公司专门为 C166

单片机开发了嵌入式操作系统。其中比较著名的有 Keil 公司开发的 RTX166, CMX 公司开发 CMX for C166, OSE system 公司开发的 OSE, Accelerated Technology 公司开发的 Nucleus, HighTec 公司开发的 PXROS。另外还有三家公司开发了符合 OSEK/ VDX 标准的嵌入式实时操作系统,它们是 3Soft 开发的 ProOSEK, Vector 公司开发的 osCAN 和 Trialog 公司开发的 OSEKtr。而且可以预计,将会有更多的商用嵌入式实时操作系统出现。然而,商用的 RTOS 一般比较昂贵,所以大部分应用者初期采用的软件平台主要是基于几乎免费的 μC OS-II^[2] 实时操作系统。

针对中小型控制系统来说, μC OS-II 是目前最流行的源码公开的几乎免费的 RTOS。 μC OS-II 具有执行效率高、占用空间小、实时性能优良和可扩展性强等特点,最小内核可编译至 2KB。尤其对于 16 位的微控制器来说, μC OS-II 可靠实时的性能可以得到充分的发挥。

μC OS-II 是一种适用很广的实时操作系统,目前 μC OS-II 在 C166 系列单片机上的移植程序相当成熟,所以只要参考移植实例就可以很容易地完成移植工作。另外,InterNiche Technologies 公司还在 μC OS-II 基础上推出了商用嵌入式实时操作系统 ChronOS,增加了 TCP/ IP 网络支持、文件系统和安全系统等。

μC OS- 采用了可剥夺型内核,最高优先级的任务一旦就绪,总能得到 CPU 的控制权。当一个运行着的任务使一个比它优先级高的任务进入了就绪态,当前任务的 CPU 使用权就被剥夺了,或者说被挂起了,那个高优先级的任务立刻得到了 CPU 的控制权。

图 5-7 可剥夺型内核示意图中描述的是当中断服务子程序使一个高优先级的任务进入就绪态,中断完成后,被中断的任务被挂起,优先级高的那个任务开始运行。

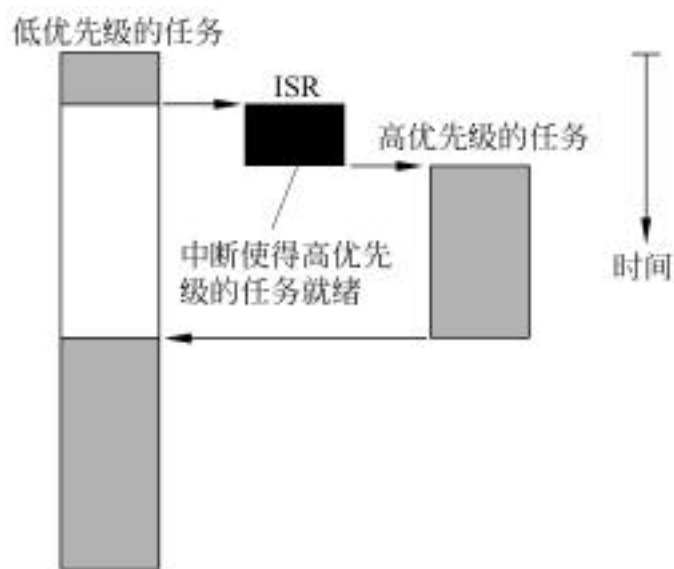


图 5-7 可剥夺型内核示意图

使用可剥夺型内核可以在尽量小的时间内快速响应比较紧迫的任务,这样最

高优先级的任务什么时候可以得到 CPU 的控制权是可知的。使用可剥夺型内核使得任务级响应时间得以最优化。实时性是嵌入式实时操作系统与普通 PC 机操作系统的一个重大差异。

有了实时操作系统 RTOS 后,微处理器可以实时执行多项任务,允许系统资源(CPU、内存等)被灵活的分配给几个任务。一般来说,采用 RTOS 具有以下几个优点:

(1) 可以把一个待解决的问题分解成许多独立的、容易被理解的多个任务,这样,就可容易地编写、调试和维护程序。

(2) 模块化设计的方法可以方便地把某个独立的任务移植到其他项目中。

(3) 由于实时性和多任务的调度问题已经由 RTOS 解决,所以就可以减少创建和调试项目所需要的时间。

(4) 通过有效的服务,如信号量、邮箱、队列等,RTOS 使得资源得到更好的利用。

通过基于 dSPACE 的快速整车控制器原型的研究,可以得到整车控制器的控制算法及所要完成的功能。结合 RTOS 可分解整车控制器的功能并且制定相对应的独立任务。目前,典型的软件系统包括了 9 个任务和 1 个中断服务程序。

任务 0 系统初始化,并且启动所有其他的任务;

任务 1 控制策略数值计算;

任务 2 发送 CAN 总线报文:当任务 0 完成了控制策略数值计算后,通过 CAN 总线发送相应的控制命令;

任务 3 模数转换 A/D 和 D/A;

任务 4 数字量的输入和输出;

任务 5 在液晶屏幕上进行相应的汽车状态显示,可包括汽车各个零部件的信息;

任务 6 燃料电池发动机开关控制;

任务 7 故障诊断,判断单片机系统工作是否正常,CAN 总线通信是否正常,零部件工作是否正常,并且给出相应的报警信号;

任务 8 通过 USB 接口保存有用的数据;

中断 1 接收 CAN 总线报文:接收其他控制器节点发来的 CAN 报文,并且按照 CAN 协议把接收到的数值进行相应的转换。

实时操作系统的实施使软件设计思路产生很大的变化,让开发人员可以更容易地进行复杂软件的设计。也可以说,实时操作系统的引入提高了软件设计的起点,并且提高了软件设计的效率。

5.4 CAN 总线通信技术的应用

5.4.1 CAN 总线介绍

CAN 即控制器局域网络是 20 世纪 80 年代初期,德国 BOSCH 公司为了解决汽车中众多的控制系统与测试系统之间的数据通信问题而推出的串行数据通信总线。由于 CAN 总线的高性能、高可靠性及其独特的设计,CAN 总线越来越受到人们(尤其在汽车领域内)的重视。国外一些著名的汽车制造商如 BENZ、BMW、PORSCHE 等公司都已经在各自的产品中引入了 CAN 总线技术^[3]。

CAN 总线属于现场总线范畴,它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络。通信介质可以是双绞线、同轴电缆或光纤。CAN 可通过简单的协议,实现在电磁干扰环境下远距离实时数据的可靠传输,且硬件成本较低。由于 CAN 总线本身的特点,其应用范围已不再局限于汽车行业,在纺织机械、农用机械、机器人、数控机床及医疗器械等领域都有应用。CAN 已经形成国际标准,并被认为是几种最有前途的现场总线之一。

出于标准化的要求,1992 年 11 月国际标准化组织(ISO)正式颁布了道路运输工具—数据信息交换—高速通信控制器局域网的国际标准 ISO 11898。随后,汽车行业也颁布了一系列的行业标准,最有代表性的标准就是 SAE J1939^[4]。这里需要指出的是,CAN 通信标准 SAE J1939 本身也是为了适应汽车发展而不断发展完善的,目前的 SAE J1939 仅适用于传统的内燃机汽车。

与传统的通信系统中的接线技术相比,CAN 总线技术最明显的优点是大大减少了汽车接插件的数量和信号线束的长度。在传统接线模式下,信号依靠各自的信号线来传递。但随着控制系统复杂程度的增加,信号线束急剧增加,传统的信号接线方式越来越不能适应汽车控制系统的要求,同时复杂的接线也增加了系统的不可靠性。国外统计数据表明,如果一辆中型以上的汽车中大量地采用 CAN 总线技术,那么大约可以平均减少大约 300 个接插件、1mile 长的线束,共能减少约 35kg 的质量。CAN 总线的另一个突出优点是全数字化通信,便于实现灵活的网络互连系统。与传统接线技术相比,这一点才是 CAN 总线技术最深刻的变革。

另外,有些参数数据会被汽车中多个子系统采用,这样对一个参数就需要多个 A/D 转换器,不仅增加了实现的成本,还可能会引起参数数据的不统一。并且,线束过长容易引入噪声,降低信号的精度或影响电子控制单元的运行,为此而进行的抗干扰设计会进一步增加系统的成本。而采用 CAN 总线技术可以很好地解决这些问题。

1 mile = 1609.347 m

由于燃料电池混合动力汽车的动力驱动系统比一般汽车驱动系统复杂,状态量和控制量也相对增多,采用传统的接线方式所面临的困难就更显而易见了。此外,燃料电池混合动力汽车动力系统中广泛采用了数字化电控单元,这为 CAN 总线的实施奠定了必要的基础。基于以上考虑,燃料电池混合动力汽车比较适于采用 CAN 总线来实现动力驱动系统中各个子系统之间的通信。

采用 CAN 总线通信以后,燃料电池混合动力汽车的网络结构如图 5-8 所示。这个结构图中包括了汽车多能源动力系统中的所有子部件,其中能量管理系统(整车控制器)根据驾驶员的操作,对各个子部件做出相应的控制。蓄电池、燃料电池和超级电容是汽车的能量源,电机是汽车的动力源。燃料电池 DC/DC 变换器,双向 DC/DC 变换器,24V DC/DC 变换器是用于电压的调整和控制。数据采集器和显示诊断单元是动力系统必备的辅助单元,主要用于给整车控制器提供信息或者为驾驶员显示相应的汽车状态。

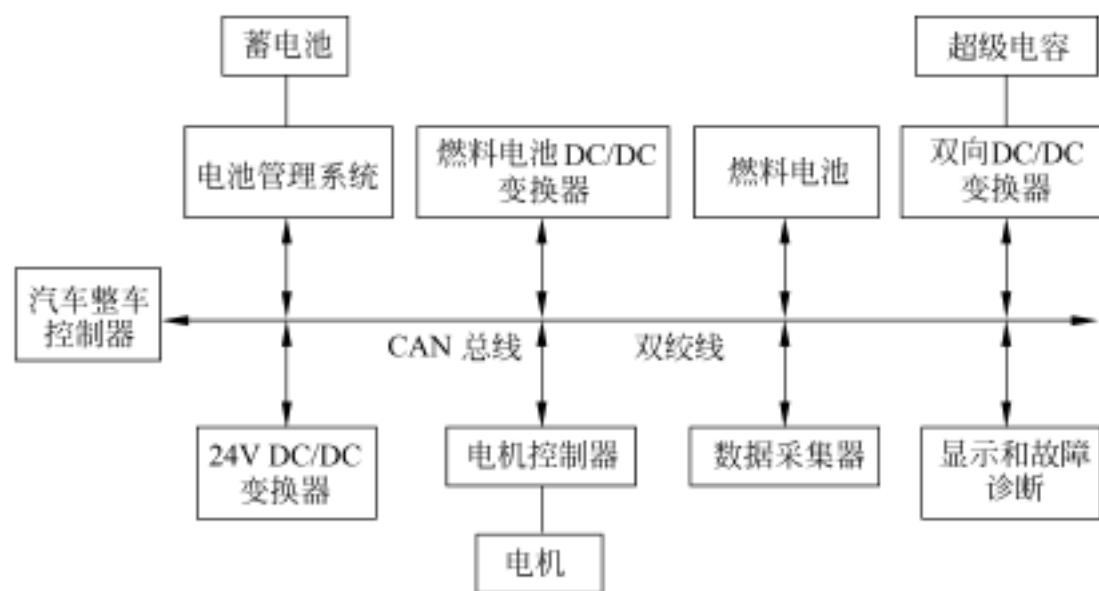


图 5-8 燃料电池混合动力汽车的网络结构

1. CAN 的技术特性

CAN 总线的主要技术特性可概括如下。

(1) CAN 总线为多主站工作方式,网络上的任一节点均可在任意时刻主动向网络上的其他节点发送信息,而不分主从,通信方式灵活。

(2) CAN 网络上的节点信息分成不同的优先级,可满足不同的实时要求。

(3) CAN 采用非破坏性总线仲裁技术,当多个节点同时向总线发送信息时,优先权较低的节点会主动退出发送,而最高优先级的节点可不受影响继续传输数据。

(4) 通信速率在 250Kb/s 的情况下,CAN 的直接通信距离最远可达 100m,在汽车应用中已经足够了。

(5) CAN 只需通过报文滤波即可实现点对点、一点对多点及全局广播等几种方式传送接收数据,无需专门“调度”。

(6) CAN 总线每帧数据都含有 CRC 校验及其他校验措施,数据出错率低。

(7) 当节点严重错误时,具有自动关闭功能,以切断该节点与总线的联系,使总线上的其他节点及通信不受影响,具有较强的抗干扰能力。

2. CAN 模型结构

考虑到系统设计的开放性要求,CAN 网络是依照开放系统互连规范按层次结构设计。按照 ISO 制定的 OSI 7 层网络通信模型的要求,并考虑到作为工业测控的底层网络,其信息传输量相对较少,信息传输的实时性要求较高,现场连接方式也较简单,所以,CAN 网络的设计只采用了符合 OSI 规范的 3 层结构模型,即物理层、数据链路层和应用层,如图 5-9 所示。

CAN 的数据链路层又分为逻辑链路控制 (LLC) 子层和媒体访问控制 (MAC) 子层。物理层的功能是定义信号如何传输,并完成电气连接,实现驱动器/接收器特性;MAC 子层是实现 CAN 协议的核心,它的功能主要是传送规则,即控制帧结构、执行仲裁、错误检测、出错标定和故障界定;LLC 子层的功能主要是报文滤波、超载通知和恢复管理。网络的物理层和链路层的功能是由 CAN 接口器件完成的,而应用层的功能则由微处理器来完成。

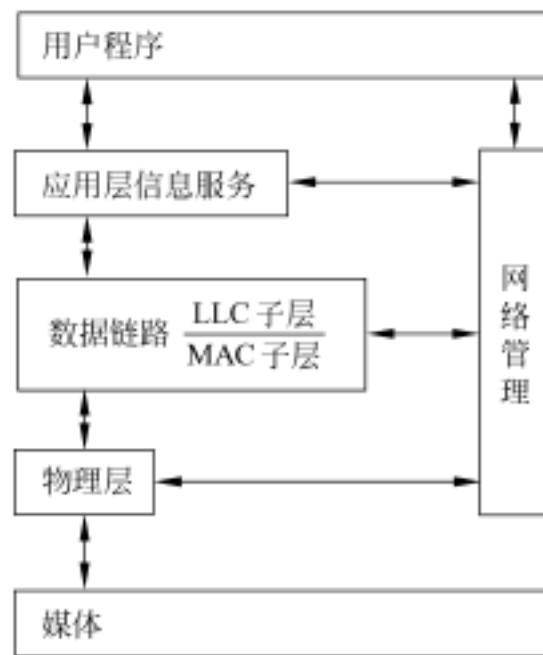


图 5-9 CAN 模型分层结构

5.4.2 CAN 总线的技术规范和网络协议

CAN 总线的规范可以追溯到 1991 年 9 月 Philips 半导体公司制定并发布的 CAN 技术规范 (Version 2.0)。该技术规范包括 A 和 B 两部分。2.0A 给出了 CAN 报文标准格式,而 2.0B 给出了 CAN 报文标准和扩展的两种格式。这里对 CAN 总线的报文及其帧格式作一点简介。

CAN 总线上不同格式的信息叫做报文。报文是 CAN 总线通信的一个基本单位(帧)。报文中采用的具体格式就是帧格式。在 CAN 总线通信系统中,报文有 4 种帧格式,以分别用于 CAN 节点间数据交换和数据控制。

(1) 数据帧 将数据由发送器传至接收器,包含需要传送的参数数据。

(2) 远程帧 由某个 CAN 节点发送,以请求发送具有相同标志符的数据帧。

- (3) 出错帧 由任何检测到总线错误的单元发送。
- (4) 超载帧 用于提供当前的和后续的数据帧之间的附加延迟。

数据帧和远程帧均有标准格式和扩展格式,它们之间的主要区别在于标识符的长度,具有 11 位标识符的帧称为标准帧,而包括 29 位标识符的帧称为扩展帧。标准格式和扩展格式的数据帧结构如图 5-10 所示。

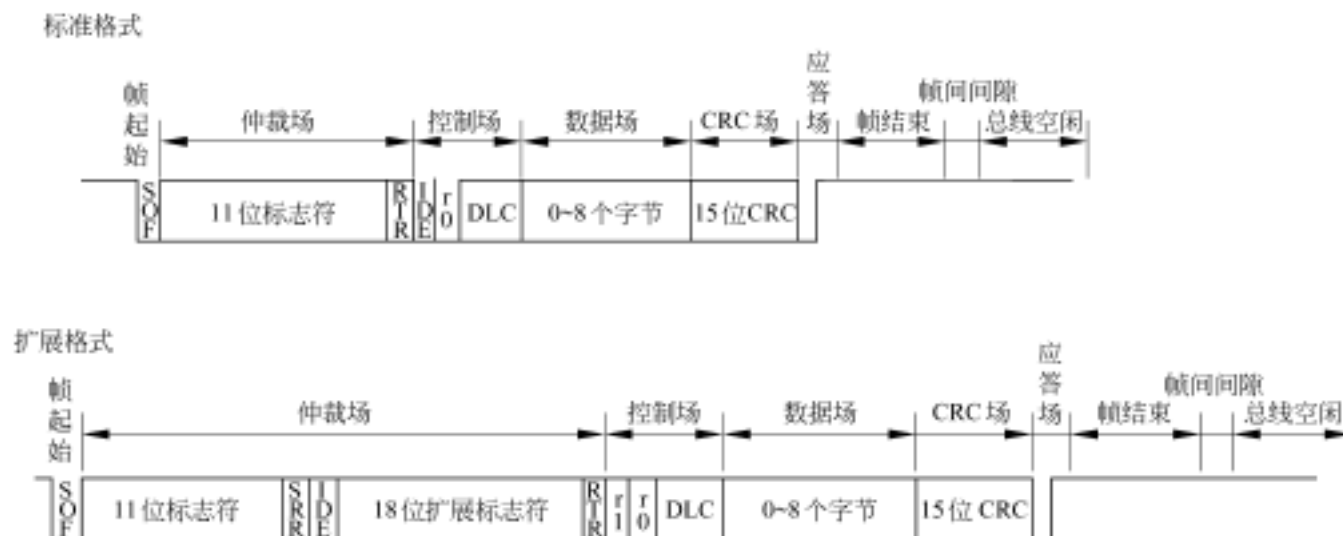


图 5-10 数据帧标准格式与扩展格式

虽然标准帧是短结构,传输时间短,但是对于复杂的系统 11 位标识符可能会不够用,所以 SAE J1939 标准中建议采用扩展帧,并且此协议完全是基于扩展帧来定义和规定的。一个完整的 CAN 通信协议包括了很多方面的内容(物理层、数据链路层等)。目前由于物理层和数据链路层的实现可以通过集成的芯片来独立完成(这方面的具体工作变成了如何选择芯片、如何进行抗干扰设计的问题),所以协议的重点应该是对数据帧的扩展格式进行具体的规定。

从图 5-10 可以看出,扩展格式是由仲裁场(主要是 29 位标识符)、最多 8 个字节的数据场、控制场、CRC 场等组成的。其中,控制场只给出数据场的字节长度等辅助信息,CRC 场中的循环冗余码是由 CAN 控制器芯片自动计算得出。所以,真正需要定义的是仲裁场中的 29 位标识符和数据场中具体的数据格式(分辨率、偏移量等)。

当前,我国适用于燃料电池电动汽车 CAN 总线通信的国家或行业标准尚未形成。因此,在“十五”国家“863”电动汽车重大科技专项中,已将制定相应的 CAN 总线通信标准和通信数据格式等内容列入科技攻关课题,组织相关领域的科研人员进行研究工作。但是,为了整车开发项目的需要,各个整车项目承担单位已经根据各自汽车动力系统零部件的特征,顺应国际上开放型、标准化的大趋势,参照国际标准 SAE J1939,制定了一些简单实用的 CAN 通信系统规范。今后随着项目进展不断完善,逐步形成具有自主知识产权的中国电动汽车 CAN 通信系统应用规范。

5.4.3 CAN总线在燃料电池汽车上的应用举例

图 5-11 给出了一个基于 CAN 总线的“燃料电池 + 辅助电池”的燃料电池汽车控制系统的应用实例。

该车是由 Solectria 公司和 International Fuel Cells 公司联合开发的 22 座客车,总质量 10500kg,由两个 Solectria AC90 感应电机驱动。图中 DMoC645 为 Solectria 公司基于 DSP 的智能电机控制器,并且带有 CAN 接口。燃料电池为 International Fuel Cells 公司的 PC36 型 75kW 质子交换膜燃料电池,采用环境压力供应空气,不需要空气压缩机。燃料电池通过一个 Solectria DC345 直流/直流变换器后与电池耦合。电池为 110Ah、总电压 336V 的铅酸电池组。

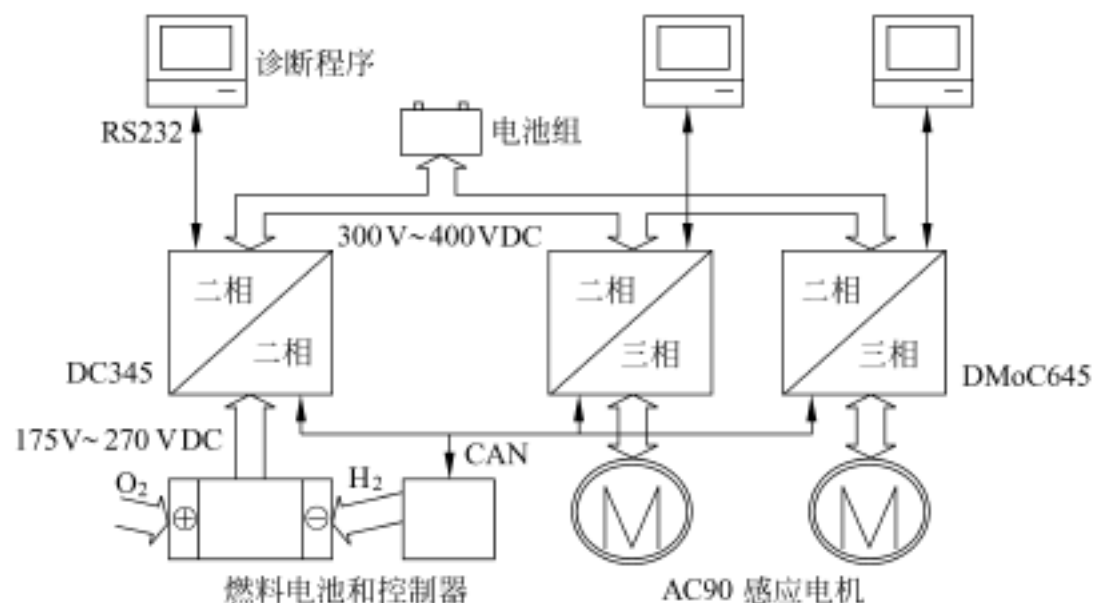


图 5-11 CAN 总线在燃料电池汽车上的应用实例

5.5 线控技术简介

当前,世界汽车电子产业正处于汽车技术大革命和汽车产业大调整的发展时期。随着科学技术的发展,人们对汽车的动力性、经济性、安全性、操纵性及舒适性提出了更高的要求,各种新的电子装置在汽车中被广泛应用,汽车电子化程度越来越高。汽车电子技术是汽车技术与电子技术完美结合的产物。汽车电子化是当前汽车发展的重要标志。从目前汽车所使用的电子设备价格比例来看,欧美汽车中电子设备占整车价格的 15%~20%。线控技术(X-by-wire)的设计概念源于航空航天领域,目前在汽车传动系控制中应用逐渐增多,尤其在混合动力电动汽车中的应用更为广泛。

燃料电池混合动力汽车的能量源和动力源本身都是电气装置,所以 X-by-wire 的设想最容易在电动汽车上实现。

1993年,美国能源部、商务部、贸易部、国防部、环保局、宇航局、国家科学基金会七个政府部门与美国三个最大的汽车制造公司——克莱斯勒、福特和通用,建立了新一代汽车合作伙伴关系(partnership for a new generation of vehicles, PNGV),目标是开发新一代汽车技术,以增强美国汽车工业的实力。1998年至2002年期间,美国国家科学基金会(NSF)资助美国国家电力电子中心(由美国Virginia和美国Wisconsin等四所大学组建)研发汽车电子动力驱动系统、电子伺服控制系统和各种车辆专用IC模块,提高汽车电子电气部件的可靠性,降低其成本和抢占汽车电气自动化技术的制高点,增强在国际市场的竞争力。

线控的汽车电子伺服系统在未来将是十分重要的技术,该技术可将各独立系统(如转向、制动、悬挂等)由计算机统一综合调控,使汽车的操纵性、安全性以及汽车的总体结构大大改善,设计的灵活度也大大增加。目前,电子动力转向和线控制动系统已经在一些欧洲车型上被采用,其中已经削减了相当多的机械部件,如传动机构、管路、液压泵等。汽车电子伺服技术是具有革命性的技术,随着该技术的使用,许多传统的机械部件将会在未来的汽车上消失,而越来越多的车用伺服电机将出现在未来的汽车上。

美国通用汽车公司已开发出了新型燃料电池汽车“Hy-wire”(参见3.7.1节)。它的特点是融合了燃料电池技术与线控技术。美国通用汽车公司在2002年1月的底特律车展上展示了相同构思的概念车“Autonomy”,但只是模型。Hy-wire是全世界首款燃料电池与“线控”技术相结合的“可以行驶的”车辆。

通用汽车公司在公开了Autonomy之后,仅用了8个月时间便开发出了Hy-wire。Hy-wire继承了Autonomy的理念——将行驶所需的全部功能都包括在薄底盘之内,在厚度仅为27.9cm(11英寸)的薄底盘中,包括了所有行驶所需的功能,在由此实现的平坦地板上,覆盖了确保5名乘员舒适乘坐的宽敞车体。使用“X-by-wire”技术后,方向盘改为方向操纵杆,同时,此前驾驶所需要的加速踏板及制动踏板也被取消。

参考文献

- 1 程军.亿恒(西门子)C166系列16位单片机原理与开发.北京:北京航空航天大学出版社,2001
- 2 Labrosse J J著.μC/OS-II:源码公开的实时嵌入式操作系统.邵贝贝译.北京:中国电力出版社,2001
- 3 阳宪惠.现场总线技术及其应用.北京:清华大学出版社,1999
- 4 Society of Automotive Engineers. SAE HS-1939. SAE Truck and Bus Control and Communications Network Standards Manual. USA: Society of Automotive Engineers, Inc. 2001
- 5 陈杨,刘曙生,龙志强.基于CAN总线的数据通信系统研究.测控技术,2000,19(10):53~55

- 6 程军,崔继波,苟凯英.车辆控制系统 CAN 总线通信的实施方案.汽车工程,2001,23(5):300~305
- 7 田光宇,朱元,刘凌等.基于双口 RAM 的控制器局域网(CAN)通信系统.中国实用新型专利,02257177.9
- 8 朱元.混合动力电动汽车能量管理策略的四步骤设计方法:[博士学位论文].北京:清华大学汽车工程系,2003
- 9 楼栋.混合动力客车动力系统的仿真和中央控制器的研究:[硕士学位论文].北京:清华大学汽车工程系,2001
- 10 赵立安.燃料电池城市客车整车控制器仿真与样机实现:[硕士学位论文].北京:清华大学汽车工程系,2003
- 11 <http://www.hirain.com/solution/autoecu/index.htm>
- 12 Pentastar Electronics, Inc. Conceptual design report for a direct hydrogen proton exchange membrane fuel cell for transportation application. DOE/CE/50390-9.1995.09
- 13 <http://www.gz-today.com/news/article/19855.html>
- 14 <http://www.pcmi.com.cn/hyxx/h130.htm>

燃料电池电动汽车及关键部件试验

6.1 燃料电池电动汽车整车性能试验

关于燃料电池电动汽车的整车性能试验,我国目前尚没有制定相应的性能试验标准,因此整车性能试验方法主要参照 GB/T 18385—2001《电动汽车 动力性能 试验方法》和 GB/T 18386—2001《电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法》这两个国家标准来制定。但应该指出的是,上述标准在制定时主要针对总质量 3500kg 以下且最高车速大于等于 70km/h 的纯电动汽车,目前国家有关标准制定机构正在着手修改上述的两个标准,使之能够适用于总质量大于 3500kg 的纯电动车辆。对于采用混合动力驱动方案的燃料电池电动汽车,由于目前混合动力汽车的技术标准正在制定过程中,因此其整车性能试验方法也主要参照上述两个标准执行。

燃料电池电动汽车的整车性能试验主要包括动力性能和燃料经济性两大类试验,鉴于燃料电池汽车与纯电动汽车有较大的差异,因此在试验条件、试验车辆准备、试验顺序和试验方法等方面的规定需要根据燃料电池电动汽车的特点进行相应的调整。

本章主要介绍燃料电池汽车关键部件,例如,质子交换膜燃料电池系统、辅助蓄电池组及其管理系统、超级电容、驱动电机及其控制系统等的试验方法和规范。

6.2 质子交换膜燃料电池试验

燃料电池试验主要包括燃料电池堆和燃料电池系统两部分,其中燃料电池堆的试验包括质子交换膜、催化剂、极板和堆本身的相关性能试验,这部分试验主要由燃料电池堆的研制单位开展,国内外也已制定了相应的试验规范和标准。从整车应用的角度出发,设计者更关心燃料电池系统的性能,因此本节只介绍燃料电池系统的相关试验方法。

为了节约人力、时间和经费,在燃料电池汽车研究与试制的初期阶段,应该尽

量在实验室内进行大量的燃料电池系统动态仿真试验,通过试验台模拟各种车辆的实际运行工况,同时采集和记录试验数据,为整车的参数匹配和建模仿真提供可靠的依据。试验是建模的基础,反过来也是燃料电池系统模型正确与否的重要验证环节。

据有关资料估计,如果 $4/5$ 的道路试验能以燃料电池系统台架试验代替,将使汽车的研制周期缩短至原来的 $1/4$,而且完成相同内容的试验,台架试验的费用仅为整车道路试验的 $1/3$ 。所以和传统的内燃机车辆一样,首先做好燃料电池系统的台架试验是很有必要的。

6.2.1 影响燃料电池性能的主要工作参数

影响质子交换膜燃料电池特性的主要工作参数有:燃料电池的工作温度、气体的工作压力、气体的流量、排气背压等。

(1) 工作温度 燃料电池的工作温度对燃料电池的输出特性的影响比较显著。随着温度的升高,燃料电池的内阻减小。在相同电流密度条件下,燃料电池的工作温度越高,燃料电池的工作电压随之增大。随着温度的升高,加速了反应气体向催化剂层的扩散,加速了质子从阳极向阴极的运动及生成物水的排出,这些都会对燃料电池性能的提高起到积极的作用。

(2) 工作压力 反应物的工作压力对燃料电池堆的功率密度影响比较明显,一般来说,工作压力越高,功率密度越大。通常,燃料电池质子交换膜两侧的压力是保持平衡的,这样可以将气体通过交换膜的扩散减小到最低程度,因为这种扩散不仅会造成燃料电池工作电压的降低,而且扩散严重会导致氢氧混合物的爆炸。

(3) 动态特性 如果燃料电池系统的燃料、氧化剂的供给足够多,理论上燃料电池系统可以适应工况的变化。燃料电池系统之所以存在瞬态响应时间问题,主要是由于燃料和氧化剂供给方面存在着滞后,尤其是氢-空型的燃料电池,空气压缩机存在很大的惯性,这是影响其动态特性的主要因素。

6.2.2 燃料电池试验的主要内容

根据燃料电池电动汽车动力系统的需求,主要从以下几个方面考察燃料电池系统的性能。

(1) 不同温度下的功率输出特性(功率-电流特性,电压-电流特性) 首先,在额定工作温度($70 \sim 80$)下应能够持续提供额定功率;其次,在较低温度(如常温)运行时也能够提供足够的功率和电压。

(2) 过载能力 能够提供一定时间的过载功率,以适应燃料电池汽车起步加速、爬坡、超车等需要大功率的行驶工况。

(3) 启动特性 从冷态启动到正常工作的时间尽量短。

(4) 动态性能 瞬态响应时间和过渡特性,在大幅度变载(对应车辆突然加速

和减速)时动态响应应足够快,同时输出电压在允许值范围内变化。

(5) 效率特性(效率-功率曲线、效率-电流曲线等) 该试验的目的是为车辆的系统匹配提供参考依据。

(6) 不同的运行参数对燃料电池输出性能的影响 例如燃料及氧化剂的压力、流量、排气的背压、工作温度等参数的影响。该试验的目的是优化燃料电池系统的运行参数,同时可以提供建模所需的数据。

6.2.3 燃料电池测试系统的基本结构

一般来说,燃料电池测试系统(图 6-1)包括以下几个主要部分。

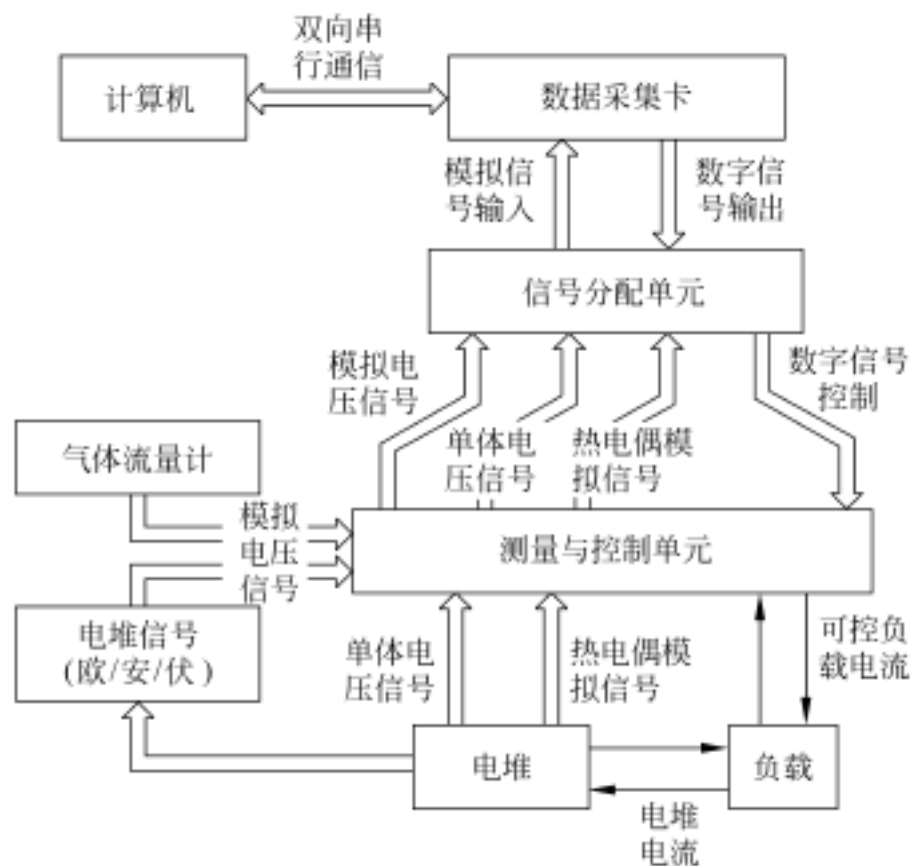


图 6-1 燃料电池测试系统部件组成与信号流图

(1) 燃料储存和供给部分 主要包括储氢瓶、供氢管路、流量及压力传感器、流量控制阀等。

(2) 氧化剂供给部分 主要包括空压机(或鼓风机)、储气罐、压力仪表、差压传感器等。

(3) 冷却系统温度测量 主要包括堆进出口水温的测量。

(4) 载荷模拟系统 载荷模拟系统可以有两种方案,其一:选择电阻箱来模拟负荷,由脉宽调制控制器实现负荷的变化;其二,选择电机作为燃料电池的载荷,然后再连接测功器,通过调节测功器的励磁来实现载荷的变化。模拟工况可以采用 USABC(美国先进电池联合体)的 DST 试验工况(图 6-2),也可以选择其他的工况,视应用情况和目的而确定。

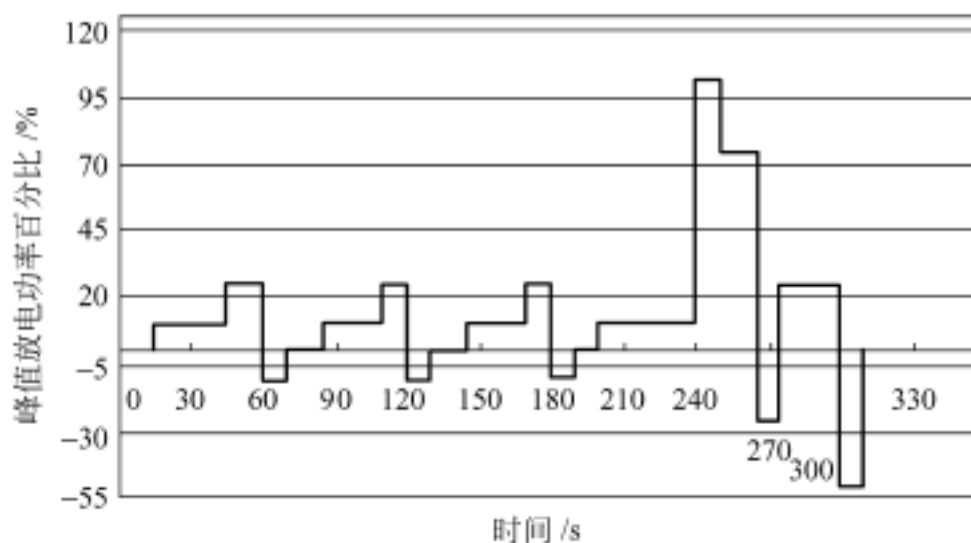


图 6-2 USABC 的 DST 试验工况

(5) 氮气的供给设施。

(6) 安全防护设施 主要包括氢安全防护和高低压电气安全防护等。

(7) 控制与数据采集系统 主要功能包括试验数据的采集、处理、保存,同时可以对试验参数,例如燃料的供给量、氧化剂的压力、氢气与氧化剂的压差、冷却水的温度、输出的电流和电压等进行控制。

人机交互界面一般由 PC 机实现,PC 机与数据采集卡之间进行通信,可实现多通道的高速和低速数据采集,并且实现对负载、供气系统、冷却系统等控制(图 6-3)。

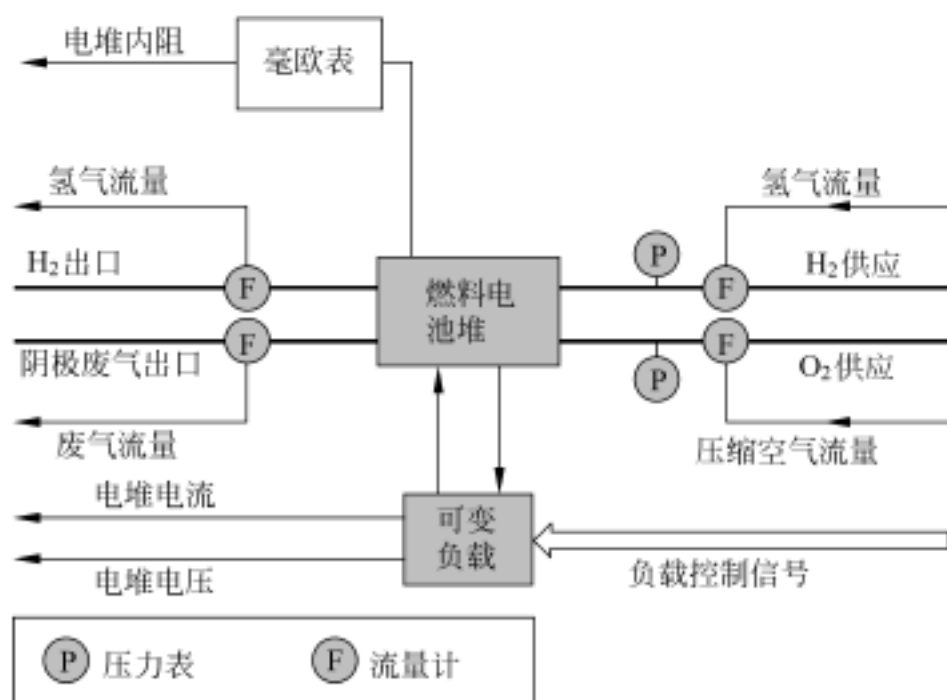


图 6-3 传感器与控制信号流图

对控制与数据采集的硬件系统要求:具有足够的采样速度和采样精度;与软件系统相结合,尽可能将采样失真概率降低到最小限度。

对控制与数据采集软件的要求:

能够直接在计算机的屏幕上实时显示各测量参数,记录并保存所有的测试数据,必要时可以回放测试过程;

能够绘出要求的曲线,进行数据处理;

能够系统地完成试验对象参数的标定,实现数据采集部分的校正;

能够控制试验对象的关键参数,做好安全保护工作。

6.2.4 燃料电池系统的稳态和动态特性

1. 稳态特性

在燃料电池的负载逐渐增加或逐渐减小的过程中,燃料电池的电压-电流输出特性曲线是不重合的,如图 6-4 所示。虽然负荷改变值是一致的,但是对应的电压-电流输出特性曲线却存在差异。这主要是由于交换膜中的水含量导致的。交换膜中的水一是来自加湿蒸汽,在堆的温度、压力一定时,该部分的值基本保持恒定;二是来自反应产生的水,该部分与燃料电池堆的负载存在函数关系,外部负载越大产生的水越多。当负载增加的时候,由于反应产生水需要时间,所以膜的湿度达不到要求,导致输出电压降低;当负载减小的时候,膜的湿度能够处于较好值,所以输出电压较负载增加时有所升高。

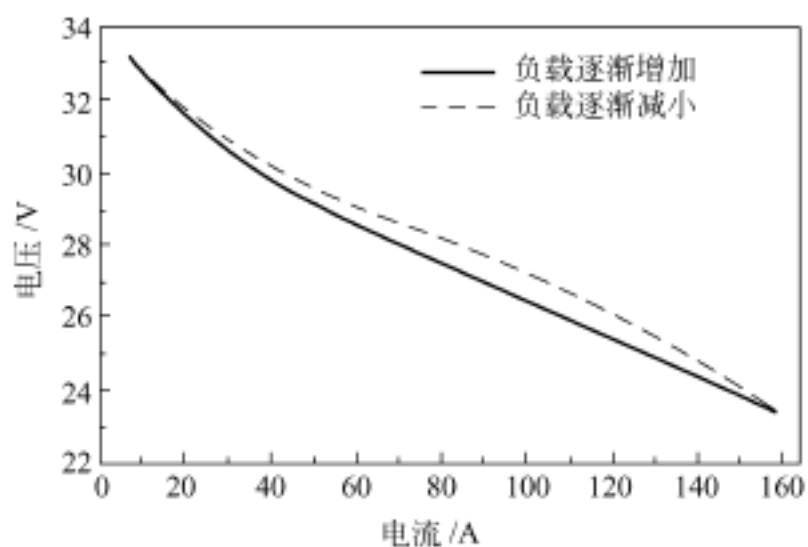


图 6-4 72 时的电堆极化曲线

此外,燃料电池的电压-电流输出特性受温度的影响很大,图 6-5 为不同温度时燃料电池的典型输出特性曲线,对于特定的燃料电池必须通过试验了解在整个温度范围内燃料电池的伏安特性。

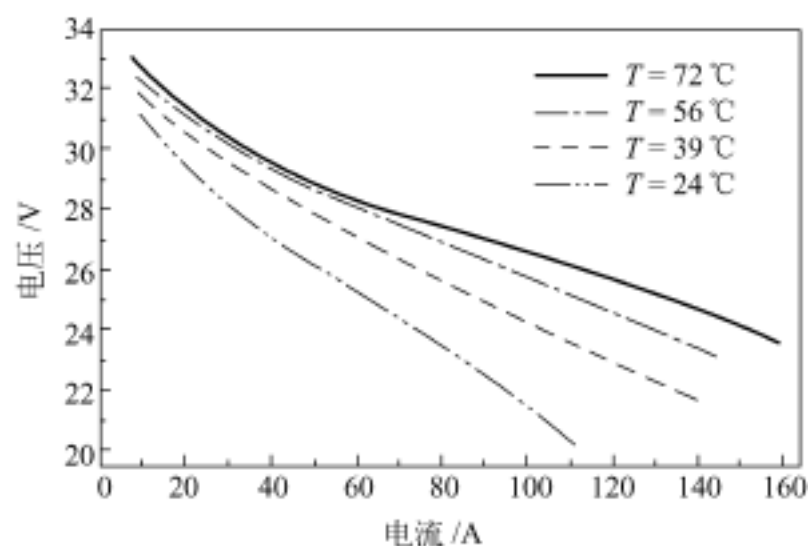


图 6-5 不同温度下的极化曲线

2. 动态特性

(1) 启动性能 可以用燃料电池系统从发出启动命令,到能维持自身工作(随时可以对外输出功率)的时间来评价其启动性能。一般来讲,质子交换膜燃料电池系统的启动性能与质子交换膜的加湿情况、堆的温度、氢气和氧气(或空气)的压力控制等情况有关。

(2) 燃料电池的负荷阶跃变化特性 当燃料电池系统接收到某一负荷变化的指令后,燃料电池系统对外输出功率随负荷变化的瞬态反应情况为燃料电池的负荷阶跃变化特性。图 6-6 为变负载下的电压与电流的瞬态变化过程。一般来讲,燃料电池堆对负荷变化的响应时间少于 0.05s。如图 6-7 所示,在某一负载改变的过程中,出现电流的剧烈波动,电流升至 130A,电压降至 24V,0.05s 后电流稳定在 70A,电压稳定在 26V。

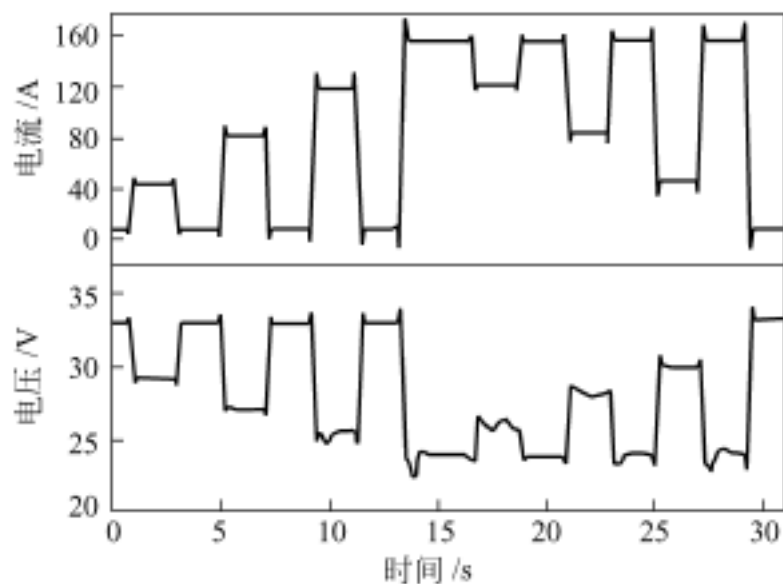


图 6-6 变负载下的电压与电流的瞬态变化过程

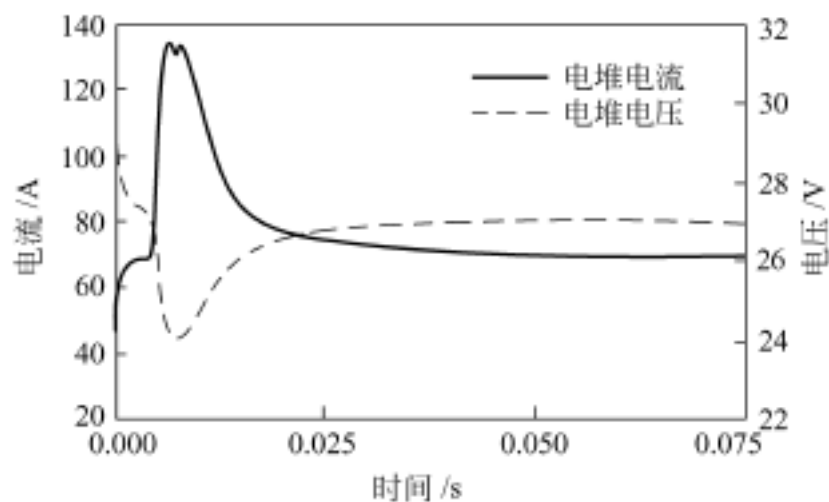


图 6-7 电压电流瞬态变化过程

6.2.5 燃料电池的测试

为了对燃料电池系统进行测试、考核和评估,需要制定一套燃料电池系统性能测试规范。测试规范主要包括有关术语的定义、试验系统的组成、试验工况、试验内容和测试方法等。

1. 术语定义

(1) 燃料电池系统 由燃料电池堆及其辅助系统组成,在外接氢源条件下可以正常工作,直接对外提供电能。其中辅助系统包括氢气供给系统(不包括气瓶至一级减压阀部分)、空气供给系统(包括专用于空压机或鼓风机的DC/DC、DC/AC变换器)、水/热管理系统、系统控制和安全保障系统等。

(2) 燃料电池发动机 能将氢燃料的化学能通过燃料电池系统、DC/DC变换器、驱动电机及其控制系统直接转换为旋转式机械能而对外做功的系统。

(3) 标定工况 用于标示燃料电池系统功率指标而指定的燃料电池系统工作状态,以功率为标志。

(4) 怠速工况 能维持(燃料电池系统)自身工作,而不对外输出功率的工况。

(5) 启动时间 燃料电池系统由接到启动命令至怠速工况所经历的时间。

(6) 有效功率 燃料电池堆输出功率减去燃料电池系统的辅助系统消耗功率所剩的功率,即燃料电池系统净输出功率(图6-8中主DC/DC前的输出功率)。

(7) 标定功率 在标定工况时的有效功率,燃料电池系统能够在此功率下持续工作一定时间。

(8) 过载功率 在超过标定功率的负载情况下,按规定运行时间进行试验时,燃料电池系统和电池堆所能达到的功率。一般规定运行时间3min~5min;过载功率统一规定为120%标定功率。

(9) 电堆效率 燃料电池堆所消耗燃料的能量转化为输出功的百分比。

(10) 燃料电池系统效率 燃料电池系统所消耗燃料的能量转化为有效功的百分比,在此规定以氢气低热值(LHV)计算。

(11) 燃料电池系统体积功率密度 燃料电池系统单位体积的有效功率。

(12) 燃料电池系统质量功率密度 燃料电池系统单位质量的有效功率。

2. 试验系统

测试对象为电池堆及其附属系统集成的燃料电池系统,负载系统由“DC/DC变换器—电机控制器(逆变器)—电机—测功机”组成(图6-8)。燃料电池系统在试验台上的主要接口包括氢气供给系统接口、氢气放空管接口、氮气瓶接口、启动蓄电池组接口、电能输出接口、测试系统各种传感器接口、整车控制器接口等。

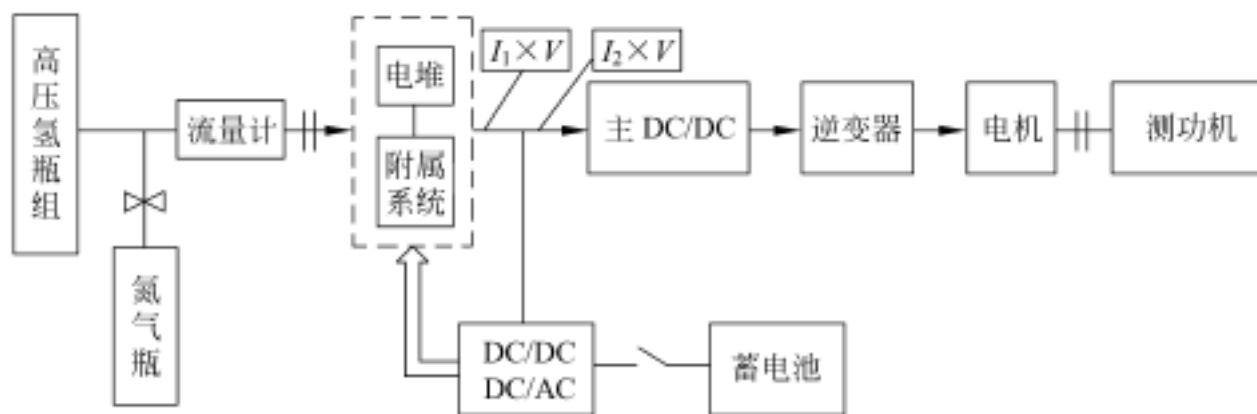


图 6-8 燃料电池试验系统

3. 测试项目及测试工况

试验系统主要测试电池堆输出功率、燃料电池系统有效功率、动力系统有效功率以及燃料消耗量等。燃料电池系统有效功率的测量点设在主 DC/DC 之前。

测试工作将分别考核电池堆和燃料电池系统的性能,以便分别对其进行性能评估和技术的改进。主要包括如下测试项目。

- (1) 系统常温启动性能测试;
- (2) 燃料电池系统按工况法性能测试;
- (3) 燃料电池系统环境温度适应性考核;
- (4) 安全性和水平衡情况的检测;
- (5) 燃料电池系统及电池堆功率密度检测;
- (6) 燃料电池系统振动性测试;
- (7) 燃料电池系统工况循环测试;
- (8) 燃料电池堆可靠性考核。

4. 试验过程及测试方法

1) 试验前的准备

按照燃料电池系统研制单位提供的燃料电池系统在试验前应该准备的步骤,进行试验前的准备工作和试验台的校准工作。

2) 燃料电池系统常温启动性能测试

在环境温度 $10 \sim 40$ 、燃料电池系统附属系统由外界供电的条件下,按照试制方提供的启动操作方法启动燃料电池系统。启动前不允许预热。启动成功后停机冷却,连续启动三次,每次间隔时间不少于 5min。记录环境温度、环境湿度、进气温度、进气压力、冷却液温度、启动时间,记录启动过程中电池堆输出电流、电压、蓄电池向空压机供电电流随时间变化的历程。

对不同试制方所提供的燃料电池系统做启动测试时,选择环境温度基本相同,相差小于 5 。

3) 燃料电池堆和燃料电池系统按工况法试验

燃料电池系统启动成功后,附属系统由燃料电池系统提供电能(DC/AC 变换器由测试装置提供),按照表 6-1 所示的工况法测试循环模式来运行燃料电池系统,在各个工况点时,分别测取氢气消耗量、电池堆的输出电流电压、燃料电池系统净输出的电流电压;记录电机转速、转矩和功率;测量空压机或鼓风机的功耗;记录进气温度、进气压力、冷却水温度、环境温度和湿度等;在标定工况和过载工况时,记录燃料电池系统输出电流和电压随时间变化的历程。

试验过程中,燃料电池系统进气口(上游 6cm 处)温度不超过 45 。

4) 燃料电池系统环境温度适应性考核

(1) 燃料电池系统高温环境适应性。在燃料电池系统实验室,创造燃料电池系统进气温度介于 $45 \sim 55$ 的工作环境,散热器放在实验室内,使燃料电池系统在标定功率工况运行 20min。记录电池堆冷却液进出口温度、空压机或鼓风机功耗、电池堆性能和燃料电池系统性能等。

(2) 燃料电池系统冷启动能力。在冬季,选择室外最低环境温度在 (-15 ± 2) 的时间,从晚 18:00 至第二天早 9:00 时间段内,将带有正常量冷却液(可以不带加湿水)的燃料电池系统(或装在车上的燃料电池系统)在室外放置 12h 后,加注加湿水,进行 5 次启动,启动成功后停机等待 3min 进行下次启动。记录环境温度、冷却液温度、启动成功次数及次序等。

如果 5 次不能成功启动,则进入温度 0 的室内,停车 5min 进行启动试验 5 次,启动成功后停机等待 3min 进行下次启动。记录环境温度、冷却液温度、进入室内的时间、启动成功次数及次序等。

表 6-1 测试循环工况(以额定功率 100kW 的燃料电池系统为例)

工况号	工 况	燃料电池系统(有效功率/ 标定功率) %	工况稳定运行时间/ min
1	怠速	0	5
2	部分负荷	最大冷机加载量*	2
3	怠速	0	10
4	部分负荷	20	2
5	部分负荷	60	2
6	标定工况	100	60
7	部分负荷	80	2
8	部分负荷	40	2
9	怠速	0	2
10	部分负荷	50	2
11	过载工况	120	3
12	部分负荷	30	2
13	怠速	0	3

* 最大冷机加载量:在燃料电池系统从启动进入怠速运行 5min 后,燃料电池系统所能达到的最大输出功率,该功率值可由燃料电池系统试制单位指定。

5) 安全性和水平衡情况的检测

在进行燃料电池系统常温启动性能测试、工况法性能测试和高温环境适应性考核测试之后,依次进行以下检测:

(1) 对燃料电池系统冷却液箱中的气相氢浓度进行测试,应小于等于 0.5%。

(2) 对燃料电池系统绝缘性进行测量,条件及方法与性能试验相同,对比差异。

(3) 对冷却液和加湿用的去离子水进行电导率测量,条件及方法与性能试验相同,对比差异。

(4) 对燃料电池系统的水平衡情况进行检测,检查燃料电池系统内加湿去离子水和冷却液的保有量是否与试验前所加注的量相等,记录短缺量。从燃料电池系统启动试验到高温适应性试验期间,如果为燃料电池系统添加去离子水或冷却液,必须对所加的量进行称重并作记录。

6) 燃料电池系统及电池堆功率密度检测

测量燃料电池系统、电池堆的质量和体积,根据燃料电池系统标定功率,分别计算燃料电池系统、电池堆的质量比功率和体积功率密度。

7) 燃料电池系统振动性能测试方法

(1) 将燃料电池系统固定在振动试验台上,上下方向与装车一致,在不工作状态下进行试验。

(2) 振动试验机的振动波形为正弦波,加速度波形失真应不超过 25%,测试传感器安装在燃料电池系统关键部件的部位,如电池堆、氢气系统管件接头等,至少 6 处。

(3) 首先按表 6-2 进行扫频振动试验,寻找燃料电池系统关键部件的共振频率。

(4) 再按照表 6-3 进行共振试验,选择每个关键部件共振频率,分别进行 1h 共振试验。

(5) 燃料电池系统经振动试验后,检查燃料电池系统零部件有无损坏,紧固件有无松脱现象,有无漏气、漏水和漏电现象。

(6) 试验后还应检测燃料电池系统标定工况和过载工况时的电流电压。

(7) 整理检测结果,填写测试报告,给出关键部件的共振频率,明确振动试验后的检查结果和性能测试结果。

表 6-2 扫频振动试验参数要求

扫频范围/ Hz	加速度/ (m/s^2)	扫频次数
0.5 ~ 80	2(0.5Hz ~ 2Hz) 5(2Hz ~ 80Hz)	6

表 6-3 共振试验参数要求

振动频率/ Hz	加速度/ (m/s^2)	试验时间/ h
共振频率 (由扫频振动试验测得)	4(0.5Hz ~ 2Hz) 10(2Hz ~ 80Hz)	每个共振点振动 1h, 选择 4 个共振频率, 累计振动 4h

8) 燃料电池系统工况循环测试方法

按表 6-1 中规定的燃料电池系统工况法性能测试的 13 种工况,进行 20 次循环考核。测试过程中,工况之间的过渡时间不做限定,但不能无故停机,要求各工况下的功率偏差小于 2kW,第 1 次和第 20 次循环在标定工况和过载工况下的功率偏差小于 1kW。

试验过程中要如实记录故障发生情况、故障停机原因及排除所用时间、保修内容及所用时间、更换的零件及损坏情况等。

每次循环都要记录各工况时的电流、电压和环境温度,标定工况每隔 10min 记录一次数据。

考核试验报告包括:20 次燃料电池系统工况循环的性能,第 1 次循环与第 20

次循环的性能对比,故障记录表等,并附录试验记录情况。

9) 燃料电池堆可靠性考核测试方法

按图 6-9 所示工况对燃料电池堆进行连续 500h 可靠性考核试验。每循环 10h,连续运行 50 循环。试验过程中要如实记录故障发生情况、故障停机原因及排除所用时间;每循环都要记录各工况时的电流、电压和环境温度,每隔 30min 记录一次数据。

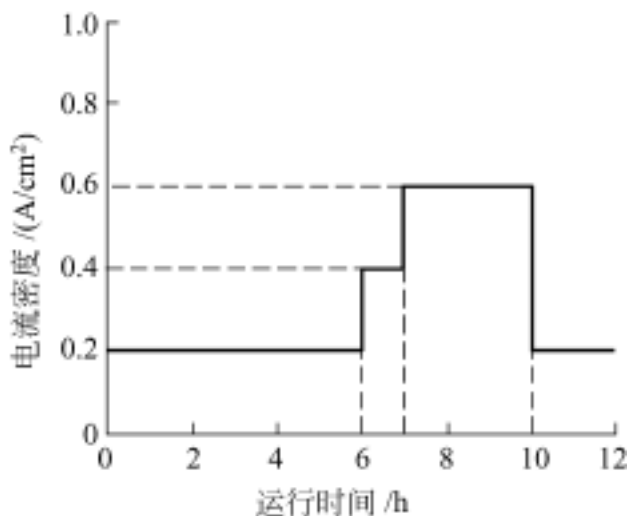


图 6-9 燃料电池堆 500h 可靠性测试循环工况

测试报告包括:第 1 次循环与第 50 次循环电池堆的性能对比,汇总故障记录并附试验记录情况。

6.3 蓄电池组及管理系统试验方法

6.3.1 蓄电池组的试验标准

目前国内外研制的燃料电池汽车越来越多采用了燃料电池与蓄电池组混合驱动的方案,燃料电池混合驱动系统是一个复杂的系统,与纯蓄电池电动汽车相比,组成部件更多,系统集成难度更大。蓄电池组及其管理系统作为燃料电池汽车的重要部件,在进行整车集成前必须进行严格的测试。

目前,国家对电动汽车用氢-镍电池和锂离子电池均有相应的国家标准和技术指导性文件,即 GB/T 18332.2—2001 和 GB/Z 18333.1—2001。这两份文件主要是针对蓄电池单体和模块的技术标准和相关测试方法。

由于电池技术的限制,电动汽车用动力电池系统一般由大量的电池单体通过串并联方式组成一个高电压、大容量的电池组。由于电池制造工艺和技术的影响,电池组内各单体间存在内阻、电压、容量和温度等不一致问题,通常也称作电池组的一致性 or 均匀性问题。电动汽车用动力电池组的性能与电池单体的性能既有联系又有区别,电池组的测试方案中必须获取电池组均匀性表现的参数,分析各种不

一致性的参数对电池组性能影响的表现形式和相对重要性,为电池组的选取、电池管理系统设计和电池本身的设计制造提供重要依据。同时,从整车集成的需求出发,电池组测试需要为整车的设计、建模、仿真计算、管理系统的设计和控制策略调整提供必要的参数。因此必须拟定适合于电池组测试的测试规范。美国 USABC 和 FreedomCAR 计划的两份电池测试规范可以作为这方面工作的重要参考。

对电池组及管理系统的测试应达到以下目标。

(1) 检验电池单体是否达到国家标准,即电池单体应满足 GB/T 18332.2—2001 或 GB/Z 18333.1—2001 中对外观、极性、放电容量、荷电保持与恢复能力、循环寿命、耐振动性、安全性等指标的要求。

(2) 测试电池单体或模块在不同温度、不同电流下的充放电特性。

(3) 测试电池组整体在不同温度、不同电流下的充放电特性和均匀性参数。

(4) 根据燃料电池汽车的整车性能要求和仿真结果,测试实际工况下电池组的工作特性和部分极限条件,如回馈制动和短时间大电流输出时的电池工作特性。

(5) 进行电池组模型参数辨识并验证模型仿真结果。

(6) 检验电池管理系统能否正常进行温度、电压和电流监测,执行热管理及 SOC 估计等功能。

以上几点基本构成了电动车辆用动力电池组测试应该包括的内容。其中一些需要花费大量时间和在特殊设备上进行的测试项目,应委托独立的测试中心或者由电池设计、生产单位完成。只有与整车设计和仿真密切相关的重要测试才应该由整车设计集成单位完成。

6.3.2 国内外电池测试规范介绍

1. 电动道路车辆用氢-镍电池国家标准和电动道路车辆用锂离子 电池国家标准化指导性技术文件

由于电动车辆研究和车用先进电池研究的发展,国家质量监督检验局先后颁布了 GB/T 18332.2—2001(电动道路车辆用金属氢化物镍蓄电池国家标准)和 GB/Z 18333.1—2001(电动道路车辆用锂离子蓄电池国家标准化指导性技术文件)。这两个国家标准和指导性技术文件分别规定了电动道路车辆(包括电动汽车、电动摩托车等)用密封金属氢化物镍蓄电池和锂离子蓄电池(以下分别简称氢-镍电池和锂离子电池)的要求、试验方法、检验规则、标志、运输和储存。其中 GB/T 18332.2—2001适用于额定电压 12V 的氢-镍电池模块,GB/Z 18333.1—2001适用于额定电压 21.6V 和 14.4V 的锂离子电池模块。

GB/T 18332.2—2001 和 GB/Z 18333.1—2001 中分别对氢-镍电池和锂离子电池的分类与命名、产品品种、外形尺寸、质量、外观、极性、出厂检验、标志、包装、运输和储存做出了规定。对氢-镍电池性能试验条件,包括试验环境条件、测量仪

器仪表、量程、准确度和具体测试方法做出了规定。

氢-镍电池的国家标准和锂离子电池的国家标准化指导性技术文件(以下均简称国标)是对由少量电池单体组成的模块性能的最低要求。燃料电池电动汽车对车用动力电池组性能要求的深度和广度都高于国标。国标中对于电池性能的标准测试方法可以作为车用动力电池组性能测试方法的重要参考。由于车用高功率、高能量型氢-镍电池和锂离子电池技术的不断发展,GB/T 18332.2—2001和GB/Z 18333.1—2001中一些具体的参数和试验步骤可能不一定适合最新型的车用电池。

2. 美国 FreedomCAR 电池测试标准

美国 FreedomCAR 计划的一个分支机构——电化学储能组(electrochemical energy storage team)制定了 FreedomCAR 混合动力电动汽车用辅助电池试验手册(FreedomCAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles),目前的最新版本是 2003 年 10 月发布的。该电池试验手册制定了一系列方法,用于测试适用于混合动力电动汽车用的辅助电池的特性和循环寿命性能。该手册的试验对象包括电池单体、模块和整个电池系统,但是不包括电池管理系统。测试目标是确定待测对象能否满足 FreedomCAR 提出的电化学储能装置性能综合指标。这些指标中有一部分是功率密度、能量密度等特性的指标,对于单体、模块和电池组都可以直接应用。另一部分是总能量、总功率等指标,通常需要一定数量的电池单体进行串并联才可以达到。因此,该手册中有一个特殊的参数 BSF(battery size factor),表示对于某种特定的单体或模块,能满足 FreedomCAR 储能目标的最少个数。如果仅选取部分单体或模块进行测试,很多试验参数和指标都需要除以 BSF。

一般将 FreedomCAR 电池试验手册中的试验分为三大类:特性试验、寿命试验和性能鉴定试验。特性试验测试电池的基本性能,包括:静态容量、脉冲功率特性、自放电、冷启动、热性能和效率试验。寿命试验测试在不同温度、荷电状态和其他载荷条件下电池性能随时间的变化,包括循环寿命试验和日期寿命试验。性能鉴定试验测试在寿命试验的开始、结束和不同阶段测试电池基本性能的变化。FreedomCAR 对试验环境的要求是,除非有特殊要求,试验一般在环境温度 30 下进行,而且最好在温控箱中。在任何两个试验间至少间隔 60min,以使电池达到稳定的电压和温度。所有的试验图(test profile)(除了脉冲功率特性试验和日期寿命试验)中要求的功率都要除以 BSF。电池制造者应该提供 BSF 的数值,如果没有提供,那么将由脉冲功率特性试验(HPPC)确定 BSF。在低电流 HPPC 试验中,能满足 FreedomCAR 储能目标中 130% 功率目标和 100% 能量目标的电池最少个数将被确定为 BSF 的值。

该测试手册中比较重要的测试如下所示。

(1) 静态容量测试(static capacity test) 使用 $1C_1$ (1h 率) 电流恒流放电测试电池容量。由于适用于纯电动的比较低的放电率不适合混合动力电动汽车上电池的使用环境,因此用 $1C_1$ 电流作为各种试验的标准电流。这与传统的电池测试规范和国内的两个标准均不一致。

(2) 混合脉冲功率特性试验(hybrid pulse power characterization test) 用于确定电池在可用负荷和电压范围内的动态功率容量。首要目标是建立以下两个量与 DOD(depth of discharge, 放电深度) 的函数关系:

最大放电功率 在不同的 DOD 下, 用一个 10s 长的放电脉冲可将电池放至最低放电允许电压时的放电功率。

最大充电功率 在不同的 DOD 下, 用一个 10s 长的充电脉冲可将电池充至最高充电允许电压时的充电功率。

混合脉冲功率特性试验的次要目标是通过试验中电压变化曲线的研究, 确定电池在充电、静置和放电过程中的电压响应时间常数, 从而确定电池欧姆内阻和极化内阻与 SOC 的函数关系。

(3) 自放电试验 测试由于电池静置一段时间以后的容量损失。

(4) 冷启动试验 测试电池在低温下(一般为 -30)的 2s 功率性能。

(5) 热性能试验 通过在 FreedomCAR 工作温度范围目标 ($-30 \sim 52$) 内选择不同温度进行试验, 包括静态容量试验、低电流 HPPC 试验和/或冷启动试验, 测试环境温度对电池性能的影响。

(6) 能量效率试验 测试电池在不同 SOC 下的充放电能量效率。

FreedomCAR 的试验手册还包括循环寿命试验、时间寿命试验、鉴定性能试验、阻抗频谱试验和热管理载荷试验的试验方法。

该手册不但给出了对电池的性能指标要求、试验方法, 还给出了详细的数据分析办法和电池试验大纲。对于拟定适合于燃料电池汽车的电池组测试方法有很重要的参考意义。但是, 该手册的试验目的是检测电池能否达到 FreedomCAR 提出的电化学装置的性能指标, 所有的试验都是围绕检测达标来设计的, 与整车设计单位的电池组检测和试验目的并不完全一致, 对于其中的试验方案不能盲目照搬。

3. 美国 USABC 电池测试标准

USABC 电池试验方法手册是由美国先进电池联合体和能源部国家实验室的职员组成的小组制定的, 它是基于在阿贡(Argonne) 国家实验室、爱达荷(Idaho) 国家工程与环境实验室 (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL) 和 Sandia 国家实验室的经验和方法制定的。该手册总结了由美国先进电池联合体发起的蓄电池试验方法的信息, 主要用来测试与 USABC 中期和远期蓄电池要求相关的特定的电池性能特性。在该手册中, 一般意义的蓄电池是指满荷电状态的蓄电池组、蓄电池模块和蓄电池单体。

图 6-10 展示了 USABC 试验过程的流程图。整个过程由下述的几个通用步骤组成：蓄电池或试验设备的验收,详细试验计划的制定；按照制造商的建议试运行试验；电气性能试验,包括一组强制性的主要试验和可选的通用的或特定的试验；或者进行寿命循环试验,或者进行典型的安全/破坏试验；试验后分析。

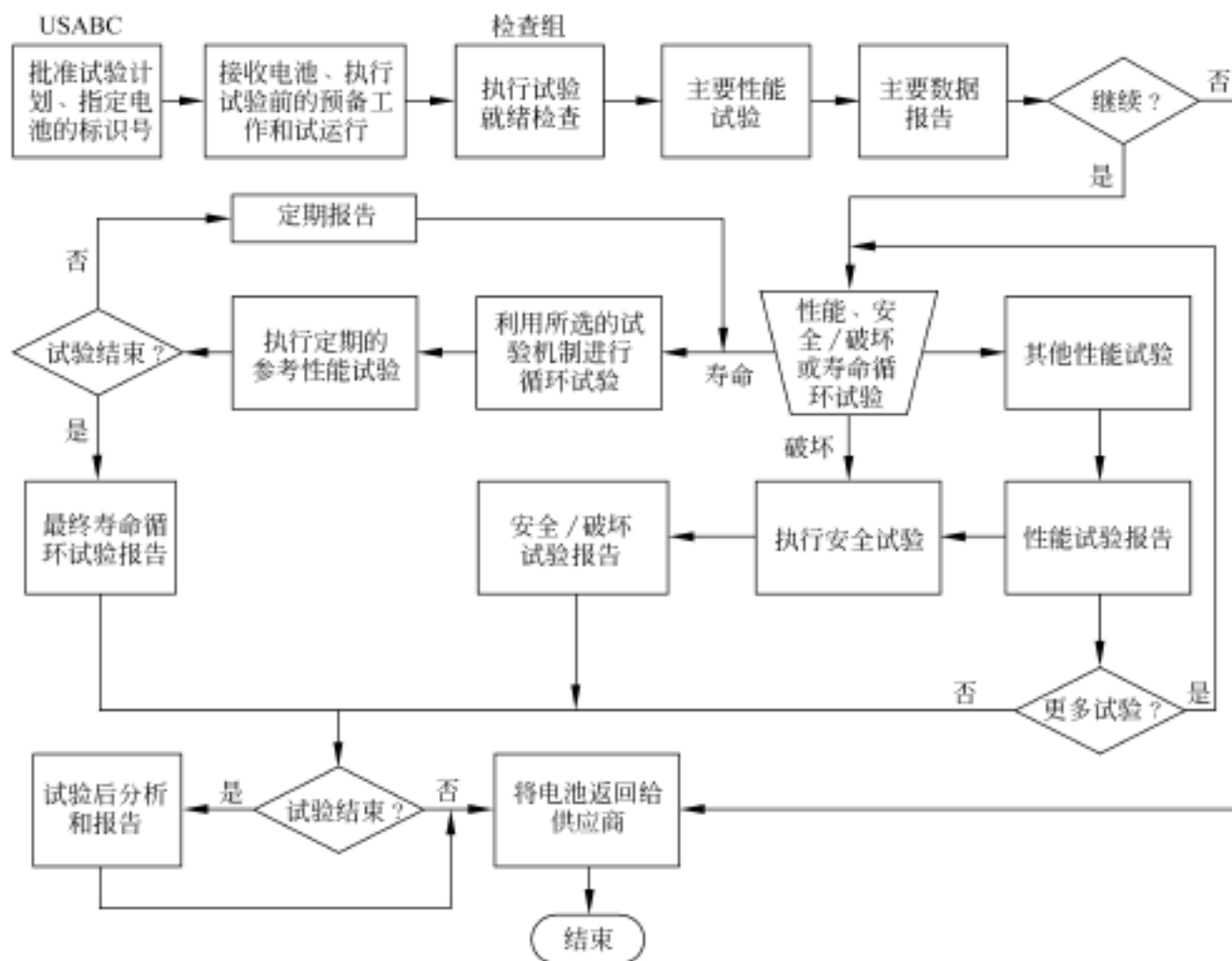


图 6-10 USABC 蓄电池试验流程图

试验流程图中包括以下比较重要的测试。

(1) 恒流放电试验 判定在可重复的、标准的条件下,被测对象的有效容量。用一系列不同的电流进行试验,简单说明放电率对容量的影响。其中最重要的是采用 3h 率(电流为 $1/3C_3$) 试验,这与 FreedomCAR 的测试手册的要求不一致, FreedomCAR 是以 1h 率(电流为 $1C_1$) 作为标准。

(2) 恒功率放电试验 进行一系列的恒功率放电/充电试验循环,以确定作为放电深度的函数的电压和功率的关系。该试验与电动汽车等速行驶对电池的要求相似。

(3) 变功率放电试验 该试验是为了测试电动车的行驶特性对电池寿命和性能的影响(包括回馈制动)。使用的变功率放电方法包括比较苛刻的基于标准联邦城市行驶工况(FUDDS)的 FUDDS 方法和进行了部分近似和简化的 DST 方法。

(4) 特殊性能试验 包括部分放电、静置(自放电)、持续爬坡、温度特性、振动、充电优化等试验。

USABC 试验手册与 FreedomCAR 试验手册都是在电池测试领域极为重要的参考文献,都给出了详细的测试标准、过程、数据处理方法、试验大纲等。

6.3.3 电池组试验方法

综合考虑国家“863”电动汽车重大专项中对车用动力电池及管理系统的性能要求,参考国内外电池检验和测试规范,本书作者所在科研组制定的电池组试验规范主要包括以下内容。

(1) 电池单体基本性能的测量 测量电池单体的外观、极性、放电容量、荷电保持与恢复能力、循环寿命、耐振动性、安全性等指标。这部分指标包括国标规定的电池应该满足的最基本性能和应测量的最基本电池参数。只有电池单体的基本性能和基本参数达标,电池组的性能才有可能达标。这一部分测试包括的参数比较简单,测量中需要一些特殊的测试设备和仪器,一般应由相关的国家检测中心进行。

(2) 电池组放电终止标准的确定 由于氢-镍电池和锂离子电池在放电末期都有电压显著下降的现象,而且电池模块的过放电会引起模块性能不可逆的衰退,从而引起整个电池组性能的下降。因此对于氢-镍电池组和锂离子电池组,判断 $SOC = 0$,即放电终止的条件均为组内任何一个单体(或模块)的电压低于放电终止电压(氢-镍电池单体为 $1.0V$,锂离子电池单体为 $2.8V$)。

(3) 电池组基本充电终止标准的确定 由于氢-镍电池恒流充电末期有可能出现电池电压下降,一般应记录电池组累计充入电量,当累计充入电量达到电池组额定容量(考虑充电效率)时即判定电池组 $SOC = 1$,充电终止。对于锂离子电池组,一般用电池组内任何一个单体到达充电终止电压 $4.2V$ 作为电池组充电终止条件。

(4) 电池组容量测试 由于电池组均匀性的影响,电池组容量一般低于组成电池组的模块或单体的容量。对整个电池组应该至少进行 $3h$ 率和 $1h$ 率容量测试,获取电池组实际容量。

(5) 温度特性测试 由于电池组均匀性的影响和组内各模块通风条件的不同,在电池组工作过程中各模块的温度变化各不相同。对车用电池组应采取与车载使用时相同的通风散热条件,在容量试验和仿真工况试验中记录每个模块的温度变化,获取电池组充放电温度变化规律和初步的温度场分布状况。

(6) 电压均匀性测试 电池组内的电压、内阻和容量的均匀性在使用过程中主要体现为模块电压的不一致。对电池组进行仿真工况试验,可以获取不同 SOC 下,电池组稳定工作和变电流过渡过程中电压均匀性的表现和变化,为电池组建模和性能仿真提供必要的参数。

(7) 管理系统测试 检验电池管理系统是否能够准确测量电池电压、电流、温度,估计电池组 SOC,并和整车管理系统进行通信。

6.4 超级电容试验

6.4.1 试验目的与试验规范

除了研究超级电容特性,建立超级电容动态模型外,探索适合电动车辆用超级电容的试验研究方法,建立超级电容性能检测试验规范也是燃料电池电动汽车研究的一个重要内容。

研究型试验规范和检测型试验规范并不完全相同。前者以试验对象的物理化学模型为基础制定,以研究试验对象特性、识别特性参数为目的。而制定检测型试验规范的主要目的在于以下几点:

- (1) 制定一种可执行的检测电动车用超级电容性能的专用试验规范;
- (2) 制定一种可以评估不同超级电容技术及使用布置方案先进性的评价方法;
- (3) 检测超级电容技术上的不足和缺陷,指明未来的研究发展方向;
- (4) 对超级电容的试验方法和试验报告格式进行规范化,以利于不同产品的比较。

国外很多公司和实验室都在开展超级电容试验规范的研究。美国先进电池联合体和美国能源部在共同制定的 USABC 电池试验手册(1994年10月版)中给出了一部比较完整的车用超级电容试验规范。其中以大电流直流充放电试验为主,包括恒流充放电试验、恒功率充放电试验等。而使用 PFUDS 循环工况来测试超级电容在实车环境中的表现是其特点之一。目前大多数超级电容试验规范都是根据 USABC 给出的试验规范修订而成的。

在美国能源部支持的 FreedomCAR 项目(前身为 PNGV 项目)中,爱达荷国家工程和环境实验室负责检测各大公司送检的超级电容。他们在试验中借鉴了 PNGV 电池试验手册,根据其相关条目和试验方法对超级电容开展试验工作,其中使用 L-HPPC 试验方法,来检测超级电容对于车辆工况要求的满足程度。

6.4.2 超级电容试验内容

1) 超级电容容量试验

在超级电容容量试验中选择一系列电流,使得超级电容从可用最低电压 V_{\min} 到可用最高电压 V_{\max} 范围内恒流充放电,充放电完成后保持末电压一段时间(10s)以建立稳定电压,如图 6-11 所示。每个电流等级充放电时进行 5 个以上循环,取

后3个循环来计算平均值,用式(6-1)~式(6-5)分别计算电容量、能量密度和充放电效率。

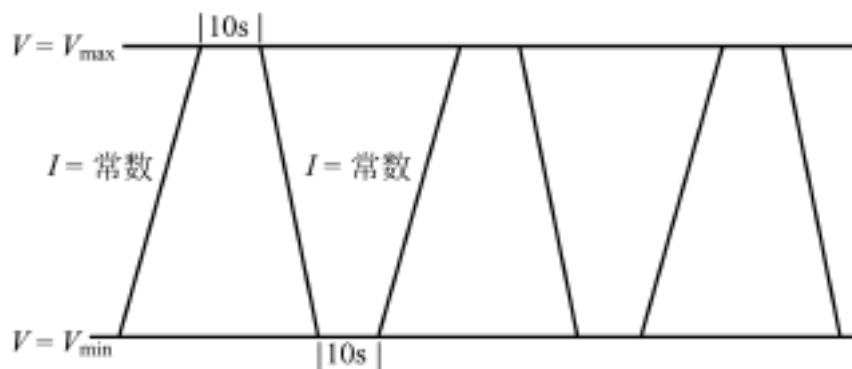


图 6-11 超级电容恒流充放电试验图

(1) 电容的计算

理想电容
$$C_{\text{test}} = \frac{I_{\text{test}} \times t_{\text{test}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (6-1)$$

式中, C_{test} , I_{test} , t_{test} 分别为电容器的电容(F)、电流(A)和时间(s), V_{max} 和 V_{min} 分别为电容器试验最高电压(V)和最低电压(V)。

(2) 能量密度的计算

质量能量密度
$$M = \frac{E_{\text{max}}}{M} \quad (6-2)$$

体积能量密度
$$V = \frac{E_{\text{max}}}{V} \quad (6-3)$$

式中, M 和 V 分别为质量能量密度($\text{W} \cdot \text{h} / \text{kg}$)和体积能量密度($\text{W} \cdot \text{h} / \text{L}$), E_{max} 为试验电容器所放出的能量($\text{W} \cdot \text{h}$), M 和 V 分别为电容器的质量(kg)和体积(L)。

(3) 充放电效率的计算

能量效率
$$E = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \times 100\% \quad (6-4)$$

库仑效率
$$Q = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\% \quad (6-5)$$

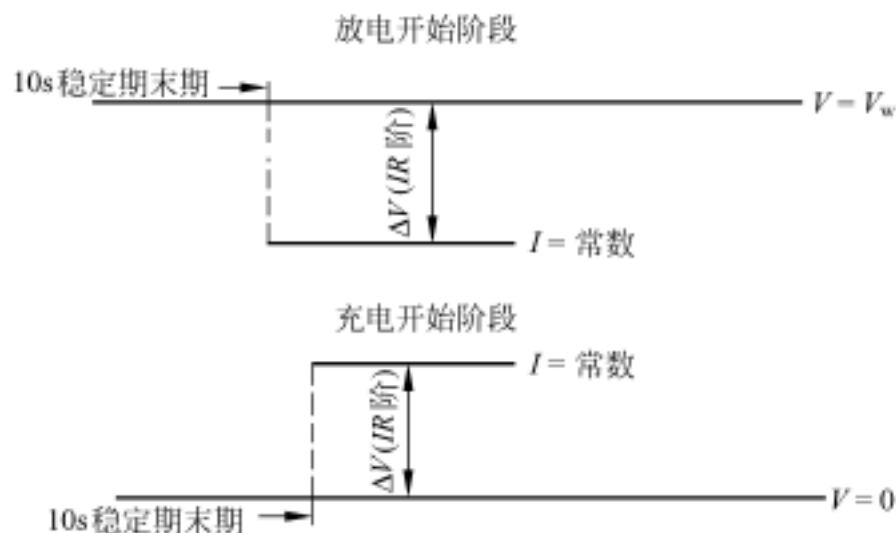
式中, E 和 Q 分别为能量效率和库仑效率, E_{in} 和 E_{out} 分别为电容器充入和放出的能量($\text{W} \cdot \text{h}$), Q_{in} 和 Q_{out} 分别为电容器充入和放出的容量($\text{A} \cdot \text{h}$)。

2) 等效串联内阻 R_{ESR} 的试验

通过测量充放电试验中的电压突变来计算 R_{ESR} , 试验数据取自上述恒流充放电循环试验。 V 的读取应该选取 10s 稳定期末端和充放电开始后 0.1s 以内的电压突变值, 如图 6-12 所示。等效串联内阻用式(6-6)计算。

$$R_{\text{ESR}} = \frac{V_{\text{IRS}}}{I} \quad (6-6)$$

式中, V_{IRS} 为电压突降值(V), I 为恒流放电电流(A)。

图 6-12 等效串联内阻 R_{ESR} 测量试验示意图

3) 恒功率试验

恒功率试验的目的是为了测试电容在不同放电功率等级下的放电性质。通过控制放电功率,控制超级电容的功率密度为 $50\text{ W/kg} \sim 500\text{ W/kg}$,控制放电电压为 $0.5V_{\max} \sim 1V_{\max}$ 。电容器应该以 I_n (其值用式(6-12)计算)充电,保持电压稳定 10s,然后恒功率放电,到 $0.5V_{\max}$ 保持电压稳定 10s。每个功率试验进行 3 个充放电循环。

试验步骤:选定 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500W/kg, 进行恒功率试验。

可用能量密度及充放电效率分别由式(6-7) ~ 式(6-9)计算。

$$\text{质量能量密度} \quad \frac{E_{\max}}{M} = \frac{(VI t)_{\text{discharge}}}{3600 \cdot M} \quad (6-7)$$

$$\text{体积能量密度} \quad \frac{E_{\max}}{V} = \frac{(VI t)_{\text{discharge}}}{3600 \cdot V} \quad (6-8)$$

$$\text{能量效率} \quad = \frac{(VI t)_{\text{discharge}}}{(VI t)_{\text{charge}}} \times 100\% \quad (6-9)$$

式中, E_{\max} 为放出的能量(W·h), V , I , t 分别为电容器充(放)电时的电压(V)、电流(A)和时间(s), M , V 分别为电容器的质量(kg)和体积(L)。

4) 循环工况试验

循环工况试验的目的是以功率循环来模拟实际负载情况,检验电容在实际使用过程中的性能。循环工况的设计是根据实车运行过程对于储能系统的要求而制定的。USABC 试验手册中给出了一个参考循环工况 PSFUDS,这是根据美国 FUDS 城市道路工况设计的。

5) 漏电试验

漏电试验的目的是测定电容在静态下自衰减率。漏电电流 I_L 在保持工作电压 V_{\max} 恒定时必然出现,这是由于并联电阻 R_p 存在而造成的,并联电阻 R_p 由

式(6-10)计算。测量漏电电流需要持续一段时间,一般在3h以上。电容充电到工作电压 V_{\max} 并保持恒定3h。第1h每隔1min测取漏电电流1次,后2h每隔5min测取1次。电压保持 $(V_{\max} \pm 0.01)V$ 。记录3h中的漏电电流-时间曲线。根据式(6-10)分别计算0.5,1.0,2.0,3.0h处的 R_p 值。

$$\text{并联电阻} \quad R_p = \frac{V_{\max}}{I_L} \quad (6-10)$$

6) 自放电试验

自放电试验的目的是测量电容充电达到工作电压 V_{\max} 后的自放电幅度。通过测量充电后电容在开路状态下的电压降来测取电容自衰减的程度。

电容充电到 V_{\max} , 保持 $(30 \pm 1)\text{min}$ 。然后断开,成开路状态。测量电容在72h内电压变化。前3h内每隔1min测取1次电压变化。剩余部分每个10min测取1次。作出72h内电压随时间变化的曲线,自放电能量损失系数 $SDLF$ 根据式(6-11)进行计算。

$$\text{自放电能量损失系数} \quad SDLF = 1 - \left[\frac{V}{V_{\max}} \right]^2 \quad (6-11)$$

式中, V 为经过不同的时间间隔后测量的实际电压值(V)。计算 $t=0.5, 1, 8, 24, 36, 72\text{h}$ 处的值。

7) 循环寿命试验

循环寿命试验通过测量电容性能随循环次数增加而发生的变化,测试电容的性能稳定性。使用恒流充放电做循环试验,记录电容失效前的循环次数。在 (25 ± 3) 情况下使电容达到热平衡。使电容的初始电压为 $V_{\max}/2$, 然后以电流 I_n (用式(6-12)计算)进行充电,将电压充到 V_{\max} 并保持 $(10 \pm 0.50)\text{s}$ 的时间间隔。然后以 I_n 放电到 $V_{\max}/2$, 同样保持 $(10 \pm 0.50)\text{s}$ 。设置 I_n 的目的在于控制试验时间。试验过程中重复这个过程。

$$\text{电流值} \quad I_n = \frac{V_{\max} C}{40} \quad (6-12)$$

在循环寿命试验之前首先进行电容性能试验,然后在经过 $1000 \pm 25, 4000 \pm 100, 10000 \pm 250, 40000 \pm 1000, 100000 \pm 2500, 150000 \pm 2500, 200000 \pm 2500$ 次循环后,分别进行电容性能试验,计算电容性能变化,记录电容失效时的循环次数。

性能试验包括以下部分:恒流充放电试验、漏电试验、恒功率放电试验,记录试验中的各项性能指标,当电容量降低20%时,认为试验结束。

8) 温度特性试验

由于温度对于电容储存能量及充放电功率等都有影响,本试验的目的在于测量电容在温度变化时的性能变化。通常在3个不同温度等级 $((25 \pm 3)$ 、 (45 ± 3) 和 (-25 ± 3))下进行电容性能试验。性能试验主要包括以下内容:恒流充放电试验、等效串联内阻测定实验、漏电试验、恒功率放电试验、循环工况试验。在试验过程中,同时观察电容在温度变化下是否有外在损伤。

图 6-13 为典型的超级电容试验内容及试验流程图。

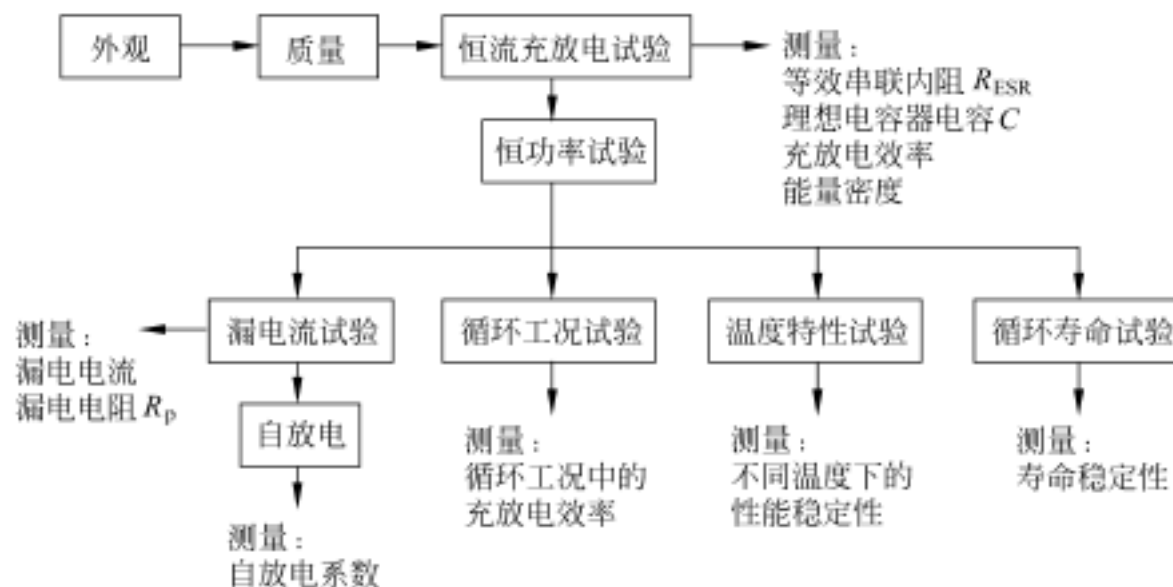


图 6-13 超级电容试验规范试验序列

6.4.3 超级电容试验设备

超级电容试验所需试验设备基本要求与电池试验设备相近,可以进行恒流、恒压、恒功率试验以及可编程的循环工况试验等项目,但因超级电容的一些自身特性,对超级电容试验设备的性能要求更高,主要体现在以下几点:

(1) 在电动车辆驱动系统中,超级电容的主要应用场合是大功率脉冲充放电工作,因此试验台应该具有足够大的容量,可以进行大电流,高功率充放电试验。

(2) 超级电容的动态过渡过程非常短暂,为了能够更好地研究超级电容的动态过程,对数据采集设备的采样频率要求比较高,采样时间间隔最好能小于 10ms。这就使记录一个完整工况所需记录的数据量比较大,因而要求有足够的记录容量。

(3) 尽管研究以超级电容的直流特性为主,但其交流性能也是其特性的一个重要方面,因此试验台应该可以进行频率范围比较宽广的交流试验,频率范围一般应该在 0.01 Hz ~ 5 kHz。在这个频率范围内,试验台给出的电压信号应该小于每单体 0.02 V。

(4) 对于超级电容组的试验台,除了以上要求外,还应该具有多通道数据采集设备,可以同时监测所有受测模块的电压、电流以及温度等状态信息。

6.5 驱动电机及控制器试验

6.5.1 驱动电机及控制器试验目的

电动汽车用驱动电机及控制器的工作条件恶劣,工作负荷与转速变化范围大,且变化剧烈,空间受到很大限制。对电机及控制器的比功率和性能要求严格,对安

全性和可靠性要求高。同时,实现电机及其控制器的最佳匹配与整合,并将两者作为一个系统来考核、检验和评价是必要的。电机及其控制器除了遵守和满足现有的相关标准和法规外,还应提出相关的试验技术规范,以便于科学、准确、全面地对电动汽车电机及其控制器进行评价和性能对比。

我国已经于2001年制定颁布了GB/T 18488.1—2001《电动汽车用电机及其控制器技术条件》国家标准,该标准规定了驱动电机及其控制器通用技术条件。

6.5.2 驱动电机及控制器试验分类

试验主要分为型式试验、常规试验与研究性试验三类,对于新设计的电机及其控制器,必须进行型式试验与常规试验,这些试验属强制性试验。强制性试验分两阶段进行,首先进行型式试验的性能试验部分,在性能满足要求的前提下,再进行型式试验的其余部分和常规试验。研究性试验是为获得补充性资料进行深入研究所需要的,为非强制性试验。

6.5.3 型式试验

型式试验的结果是新产品验收和型式认证的主要依据。进行型式试验的新产品必须抽试1~2(台)套样品,如有项目不合格,该项目复试样品数量加倍,重检仍不合格,则判定为不合格。对于新设计研制的电机及其控制器,检验内容由设计任务书或合同条款确定,对于定型新产品,检验内容由产品标准或相关规定确定。

1. 环境试验

1) 温度、湿度和热态绝缘电阻试验

(1) 将电机及其控制器放在环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$,相对湿度为95%条件的湿热试验室(箱)内进行湿热试验,试验时间为48h。湿热试验后,立即测量电机及其控制器的绝缘电阻值。热绝缘电阻按照国标GB/T 12665规定的方法进行。

(2) 将电机及其控制器放在低温箱内,使箱内温度下降至 -20°C ,至少保持30min,在低温箱内通电后,检查电机能否正常运行4h。

2) 定频振动和扫频振动

(1) 定频振动。将电机及其控制器固定在振动台上,定频振动频率为67Hz,振动加速度为 110m/s^2 ,试验时间:上下方向振动为4h,左右方向为2h,前后方向为2h,振动后不会有机机械损伤、变形和紧固部位的松脱现象,通电后能正常工作。

(2) 扫频振动。进行上下方向的扫频振动试验,频率范围在25Hz~60Hz时,振动的位移幅值为0.78mm,扫频一次时间为15min,扫频次数为14次;在60Hz~200Hz时,振动加速度为 110m/s^2 ,扫频一次为15min,扫频次数为14次。试验后不会有机机械上的损坏、变形和紧固部分的松动现象,通电后能正常工作。

3) 盐雾试验

按照 GB T 2423.17—1993 规定的试验方法进行盐雾试验。电机及其控制器在试验箱内处于正常安装状态,试验持续时间为 16h。试验结束后,用蒸馏水洗清表面盐沉积物,水温 < 35 ,然后到标准的大气条件下恢复 1h ~ 2h,通电后能正常工作。

2. 温升试验

温升试验是电机及其控制器在额定运转条件下测得,可与电机及其控制器的连续额定特性试验、短时过载特性试验同时进行。为了缩短达到稳定温度的时间,可在起始试验阶段增加负载或者减少电机的冷却强度。额定条件下运转至少 2h,试验最后 1h 内定子铁心温度变化小于 2K 即可认为已达到稳定的温度。

电机及其控制器试验时应带有与实际使用条件相同的通风冷却设施,影响电机及其控制器温升的所有部件都应装备齐全,试验装置应尽量与车辆实际行驶条件等效。

在温升试验中,主要测量电机及控制器部件的温度和冷却介质(空气或液体)的温度,主要采用温度计法和电阻法等方法。

根据国标 GB T 11021 中规定的各种绝缘等级,核查试验最高温度是否在规定的温度最高限值内。

3. 特性曲线试验

1) 电机连续额定输出功率特性试验

在额定电压和额定负载下,与车辆上等同的冷却条件下进行试验。当电机及其控制器发热部件 1h 内温度变化不超过 2K 时电机达到热平衡,开始进行电机连续额定输出功率特性试验。测量控制器的输入电压 E 、输入电流 I 、电机的输出转矩 M_e 和转速 N_e ,用式(6-13)和式(6-14)分别计算控制器输入功率 P_{CI} 和电机转轴的输出功率 P_e ,电机及其控制器的整体效率 由式(6-15)计算。

$$P_{CI} = \frac{EI}{1000} \quad (6-13)$$

$$P_e = \frac{M_e N_e}{9549} \quad (6-14)$$

式中, M_e 为电机输出转矩(N · m); N_e 为电机转速(r/ min)。

$$= \frac{P_e}{P_{CI}} = \frac{M_e N_e}{9\ 549 EI} \times 100\% \quad (6-15)$$

按照温升试验的规定,检查控制器及电机各部分的温度是否在允许的限值内。测试电机转速小于额定转速的恒转矩特性和大于额定转速的恒功率特性时,整个转矩-转速特性曲线上的测量点应在 10 点以上。

2) 高效区特性试验

在与电机连续额定特性试验相同条件下,确定在电机及其控制器的整体效率

0.85 的效率特性范围内或在 $\eta = 0.75 \sim 0.95$ 范围内,不同负载条件下的转矩与转速特性区,不少于 5 条特性曲线。

3) 短时过载特性试验

对于规定的最大过载转矩及其对应的转速与持续时间、最大过载功率及其转速与持续时间,应经过至少两次试验加以验证。

4. 最高工作转速和超速试验

1) 最高工作转速试验

在额定电压下,测试电机带负载运转所能达到的最高转速。引用国标 GB/T 18488.1—2001 中 5.22 节要求,最高工作转速持续时间不少于 3min。

2) 超速试验

电机在热状态下,能承受 1.2 倍最高工作转速试验,持续时间为 2min,并能保证机械部件不发生有害变形。

5. 馈电试验

给电源馈电试验的方法有 3 种,试验时可任选其中一种方法。

1) 在电动车辆上试验

当电机转速达到额定转速时,让电机作为发电机状态运行,测量馈电试验开始时的车速 V_1 和馈电结束时的车速 V_2 ,记录馈电试验开始时刻 t_1 和馈电结束时刻 t_2 ,同时测量馈电过程中电源两端的电压 u 、输入电源的电流 i 。

$$\text{车辆行驶的动能} \quad W_1 = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (6-16)$$

式中, m 为汽车质量; δ 为汽车旋转质量换算系数。

$$\text{馈电效率} \quad = \frac{W_2}{W_1} \quad (6-17)$$

式中, W_2 为馈电过程中给电源的能量。

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_2} u i dt \quad (6-18)$$

2) 惯性飞轮试验

在电机输出轴上装上惯性飞轮,当电机转速达到额定转速时,惯性飞轮的角速度为 ω_1 ,开始馈电。馈电试验结束时,惯性飞轮的角速度为 ω_2 ,记录馈电试验开始时刻 t_1 和馈电结束时刻 t_2 ,同时测量馈电过程中电源两端的电压 u 、输入电源的电流 i 。

$$\text{电机回馈能量} \quad W_1 = \frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (6-19)$$

式中, J 为惯性飞轮的惯量。

馈电效率计算同式(6-17)。

3) 发电试验

电机由原动机拖动,控制器接入 125% 额定电压值的电源,在不同的转速下进行发电试验。

6. 接触电流试验

应在电机及其控制器温升试验后测量接触电流,试验时电机控制器的输入电压和电机电压皆为额定电压的 125%,接触电流应在控制器或电机上触及的金属部分与地之间测量。

7. 防水防尘试验

按照 GB/T 4942.2—1993 中的方法进行防水防尘试验。

8. 电磁兼容性试验

(1) 辐射干扰试验。按照 GB 14023—2000 中第 5 章辐射干扰的测试方法进行试验。

(2) 电磁抗干扰试验。按照 GB/T 17619—1998 中第 4 章规定的测量方法和表 1 规定的抗干扰性电平要求进行试验。

9. 耐久性试验

电机及其控制器在额定电压、额定转速和额定负载转矩的条件下进行耐久性试验,首次无故障工作时间应不小于 3000h。

6.5.4 电机常规试验

常规试验是用来检验每一台正确安装的电机及其控制器能否承受规定的耐电压试验,并在机械和电气方面处于良好的工作状态。其试验项目和试验方法按照国家标准 GB/T 18488.1—2001《电动汽车电机及其控制器技术规范》中相应的规定进行。

目前,从全球范围看,燃料电池汽车技术尚处于研究开发、试验示范阶段,许多技术还不成熟,其中包括整车及其关键零部件的试验方法和标准在内。以上介绍的试验方法和标准是作者及其所在的科研团队多年从事电动汽车及燃料电池汽车研究开发工作的经验总结,以及与国内外同行交流和学习之所得。随着燃料电池汽车技术的不断发展和进步,燃料电池汽车从研究开发与试验示范逐步走向产业

化,更加完善和齐全的试验方法和标准将会出现。本书附录为作者收集的国内外电动车辆设计、试验标准。

参考文献

- 1 GB/ T 18385—2001 中华人民共和国国家标准:电动汽车 动力性能 试验方法 .北京:中国标准出版社,2001-7-12
- 2 GB/ T 18386—2001 中华人民共和国国家标准:电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法 .北京:中国标准出版社,2001
- 3 USABC and DOE (Department of Energy) National Laboratories . ELECTRIC VEHICLE BATTERY TEST PROCEDURES MANUAL, Revision 2, January 1996, PDF version
- 4 INEEL (Idaho National Engineering & Environmental Laboratory) . PNGV Battery Test Manual, Revision 3, February 2001, PDF version
- 5 INEEL . FreedomCAR Battery Test Manual For Power—Assist Hybrid Electric Vehicles, October 2003, PDF version
- 6 GB/ Z 18333 .1—2001 中华人民共和国国家技术性文件 .电动道路车辆用锂离子蓄电池 .北京:中国标准出版社,2001
- 7 GB/ T 18332 .2—2001 中华人民共和国国家标准:电动道路车辆用金属氢化物镍蓄电池 .北京:中国标准出版社,2001
- 8 管华 .电动汽车用先进电池组试验研究及性能仿真:[硕士学位论文] .北京:清华大学汽车工程系,2003
- 9 李海晨 .车用超级电容特性的试验研究:[硕士学位论文] 北京:清华大学汽车工程系,2003
- 10 GB/ T 18488 .1—2001 中华人民共和国国家标准:电动汽车用电机及其控制器技术条件 .北京:中国标准出版社,2001
- 11 赵静炜 .电动车辆标准目录 .汽车标准化 2004(7):4~7

燃料电池汽车供氢系统、氢源及氢安全

7.1 氢的基本性质

氢是自然界最丰富的元素之一。在地球上,氢主要以化合态形式存在于水和化石燃料中。氢的单质——氢气是一种无色、无味的气体,在 1atm 和 273K 状态下,密度为 0.089g/L,是最轻的气体。

氢气有气、液、固三态,氢的临界点温度很低。所谓临界点代表物质的这样一类特性:气态物质在温度高于其本身的临界温度时,无论施加多么大的压力也不能液化,只有当温度达到或低于临界温度时,加压才能液化。氢气的临界温度是 -239.96 (33.19K),远远低于常温 25 (298.15K),所以在常温下氢气是一种永恒气体,氮气和氧气也是属于临界温度远低于常温的气体,很难液化。而临界温度高于常温的气体很容易液化,这是因为在常温下给它加压就液化了,如水、氨气、二氧化硫等就属于易液化气体。因此氢液化时,往往不能依靠直接降温(因为低温源不容易得到),而只能够通过高压气体的绝热膨胀来获得所需要的超低温,然后才能液化。盛液态氢的容器必须是略有出口的,允许少部分液态氢蒸发逸失来保持液态氢的低温。这样就给液态氢的使用带来许多问题,逸散的氢气容易与空气混合,在与空气形成的混合气体中氢气的体积浓度为 4.0% ~ 75% 时,就构成爆炸性的混合物,有引爆的潜在危险。

物质的临界点除临界温度外,还有临界压力和临界体积参数。氢的临界压力为 12.98atm,即在临界温度 -239.96 (33.19K)时,施加 12.98atm 的压力,氢气便可液化。而在 1atm 下,氢的液化温度为 -252.75 (20.4K),此时液氢的密度为 71g/L,在同样条件下氢气的凝固温度为 -259.25 (13.9K),固态氢的密度为 89g/L。临界体积指在临界点时,每摩尔物质所占的体积。因此氢气经液化或固化之后,其质量密度和能量密度都大大提高,这对提高储存、运输和使用的效率比较有利。

总之,氢的各种性质决定了它是一种非常好的能量载体,具有如下特点:

(1) 质量能量密度高,使用方便;

- (2) 资源丰富,制取方法多,可获取性大;
- (3) 可以大量存储和长距离运输;
- (4) 是清洁能源。

因此氢不仅可用作固定动力厂和生活用的能源,还可以用作各种交通运输工具的能源。

目前,我国正在开展燃料电池汽车的研究,其中质子交换膜燃料电池是近几年研究最广泛、技术发展最为迅速的燃料电池。由于其电解质采用高分子膜,具有构造简单、启动快、工作温度较低等优势,因此最适宜为汽车等交通工具提供动力。而且由于质子交换膜燃料电池具有很高的比能量和比功率,可以实现零排放,具有低温启动等优点,因此是未来电动汽车最理想的动力源。在 PEMFC 中,氧是燃料电池中常用的氧化剂,它能很方便地从空气中获取。氢气是燃料电池常用的燃料,而在地球周围单质氢是极少的,在地壳中的某些特定条件下虽然也有氢气存在,但都难于开采与收集。因此正如福特公司的一名高级技术人员指出的,解决氢源的问题比解决燃料电池本身更有意义,未来大规模推广使用燃料电池必须要解决氢源问题。

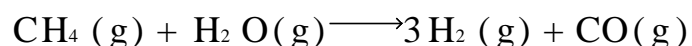
在本章里,将分别就氢气的制备、分离纯化、输配、储存以及氢安全等问题进行探讨。

7.2 氢的制备方法

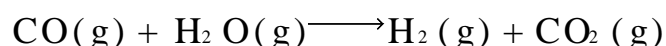
7.2.1 化石燃料的转化

1. 从天然气或裂解石油气制氢

从天然气或石油气裂解制取氢气是现在大规模工业制氢的主要方法。虽然上述两种原料都可以通过热分解而产生氢气,但最常用的是它们与水蒸气的反应,这类反应可以在 1100℃ 下进行,反应方程式如下:



式中,(g)代表气体。这个反应是吸热反应,吸热量 $H = 204.6\text{kJ/mol}$ 。这份热量一般是用甲烷 CH_4 在空气中燃烧来提供的。气体产物中的 CO 可通过与水蒸气的变换反应转化为氢气和 CO_2 ,反应方程式如下:

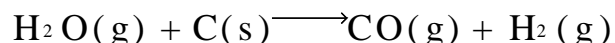


最终产物中的 CO_2 可通过高压水洗除去(用于制纯碱或尿素的原料气),所得氢气可直接用为工业原料气。如果要作为燃料电池的用气,还需要对其中的 CO 等杂质进行进一步的处理。

由于甲烷中氢碳比例最高,因此用甲烷作为制氢的原料最为理想,每生产 1kg 氢气,副产品为 5.5kg 二氧化碳,这与用任何其他同样质量的烃类或煤炭为原料来制取氢气相比,获得的氢气量是最高的,所以制氢成本也最低。

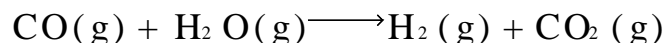
2. 从焦炭或白煤制氢(水煤气法)

过热水蒸气在高于 1000 的温度下通过赤热的焦炭,即发生水煤气反应:



式中,(g)代表气体,(s)代表固体。这个反应是吸热反应,在实际生产中常是交替地向发生炉通入空气使焦炭燃烧来产生足够的炉温,再通入水蒸气。

令水煤气和水蒸气一起通过装填有氧化铁钴催化剂的变换炉(400 ~ 600),将 CO 和水蒸气变换为氢气和 CO₂:

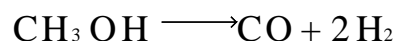


在加压下用水洗除 CO₂,然后经过铜洗塔,用氯化亚铜的氨水溶液洗除剩余的 CO 和 CO₂。这样得到的氢气中含有氮气,所以主要用于合成氨工业中作为原料气。

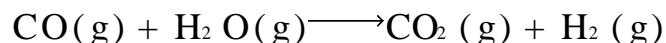
采用以上方法制氢,每生产 1kg 氢气要产生二十几千克的二氧化碳,为甲烷法制氢产生的 CO₂ 质量的 4~5 倍。所以此法相对甲烷法来说很不经济,但在没有天然气供应的地方,用焦炭或煤来制取氢气,仍是我国小合成氨工业中最常应用的工艺。

3. 从甲醇制氢

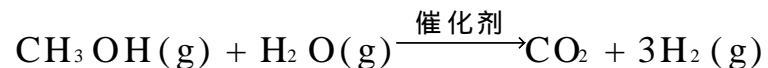
甲醇制氢的反应方程式为



分解产物混合气中的 CO 也可以通过变换反应与水蒸气作用转化为氢气和二氧化碳:



所以总反应是



将反应产物——混合气——通过钯管扩散,即得到基本纯净的氢气。从甲醇生产氢气的装置流程图如图 7-1 所示。

从化石燃料制氢,是制氢的主要方法,途径很多,表 7-1 列出了可供选择的途径。在表 7-1 中,也列入氨、胂等化学原料制氢方法。从规模制氢的角度看,化石燃料制氢技术成熟,与其他方法相比,成本较低,能耗较小。

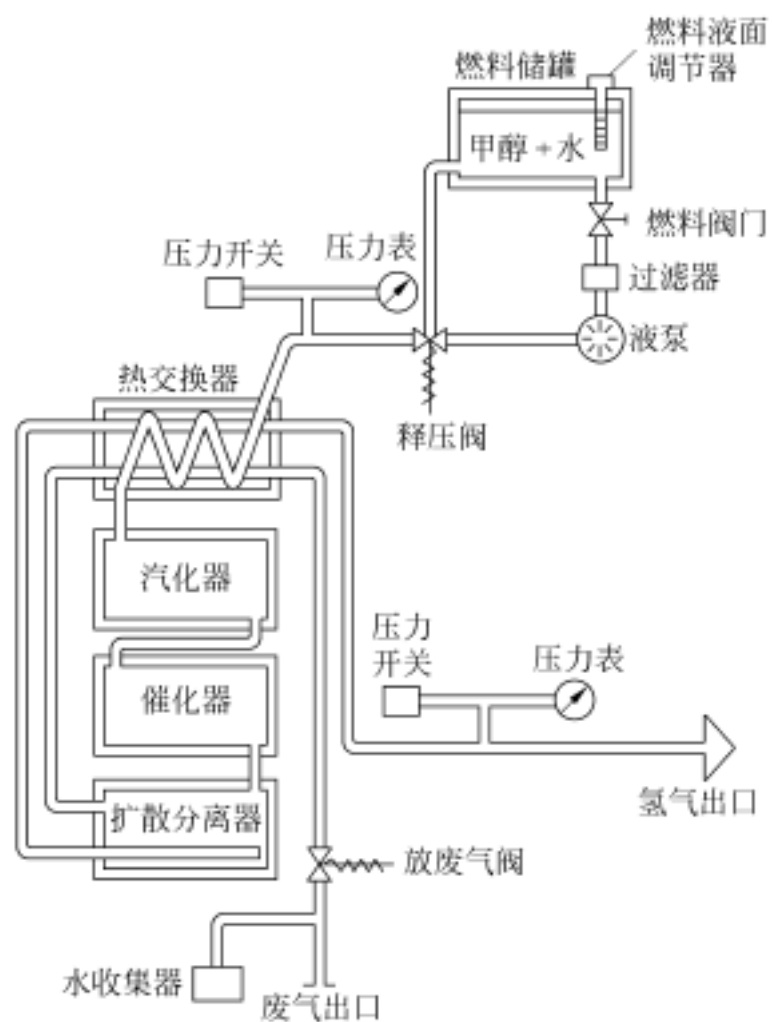


图 7-1 从甲醇制取氢气的设备流程图

表 7-1 化石燃料制氢方法比较

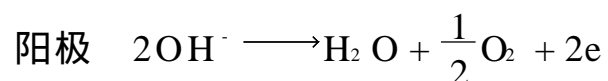
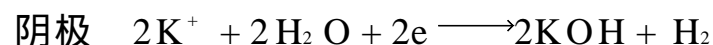
制氢方法	优缺点
天然气重整	运输与存储转化技术成熟,气体纯净,费用低;产物中 CO 需分离或进一步转化
水煤气法	费用低; 产物中 CO 需分离或进一步转化,可能含尘与硫
烃水蒸气重整	转化温度高,催化剂易失活
烃部分氧化	转化温度高,催化剂易失活
烃自热重整(ATR)	原料供给方便,可自行维持热平衡,产物中 CO 含量低; 需高活性和稳定性的催化剂
醇水蒸气重整	转化温度低,氢浓度高,产物中 CO 含量低; 需高活性和稳定性的催化剂
醇分解	转化温度低; 需高活性和稳定性的催化剂,产物中 CO 含量高

续表

制氢方法	优缺点
醇自热重整(ATR)	可自动热平衡,产物中CO含量低,适于装车使用,原料供给方便; 需高活性和稳定性的催化剂
氨分解	产物中无CO; 转化温度高
肼分解	可自动热平衡; 有毒易爆

7.2.2 水电解制氢

纯水是电的不良导体,所以电解水制氢时要在水中加入电解质来增大水的导电性。一般电解水操作都用15%氢氧化钾溶液作电解质,电极反应为



作为电解水电极的最理想金属是铂系金属,但这些金属非常昂贵,在实际生产中采用的是镀微量铂的镍电极或镀镍的铁电极,电解时两电极之间的电压约为1.5V,电解水的电解装置主要分为槽式和压滤式两种。

为了将阴阳两极分别产生的氢气和氧气分开,以取得纯净的气体,也为了避免氢气与氧气互相混合造成意外事故,阴极和阳极之间常用以镍铬丝网为衬底的石棉布分开,分成为阴极室和阳极室,分别用导管并联,把产生的气体导出,隔膜布的微孔允许 K^+ 和 OH^- 离子通过,但又使电解液在微孔处有足够大的表面张力,可以防止气体渗透。

除了上述的常温电解水制氢工艺外,德国在1976年开始进行水蒸气高温电解制氢的研究,到目前为止已经基本达到成熟阶段,据报道,此工艺比常温电解水可节省电力20%。高温电解水蒸气的电极是由固体电解质(掺有氧化钇的多孔熔结二氧化锆)组成的空心管子,内外侧镀有适当的导电金属膜,内侧为阴极,外侧为阳极。水蒸气由管子内侧通入,从阴极流经固体电解质而流向阳极。电解产生的氢气由管子的内侧放出,氧气由管子的外侧放出。总体电解槽由许多电解管平行布置,总体电压最高可达1200V,其流程图见图7-2所示。

令200℃的过热水蒸气通过热交换器,电极室的温度为1000℃,由电极放出的高温氢气和氧气通入热交换器,将输入的水蒸气预热到900℃,输出的氢气则降温

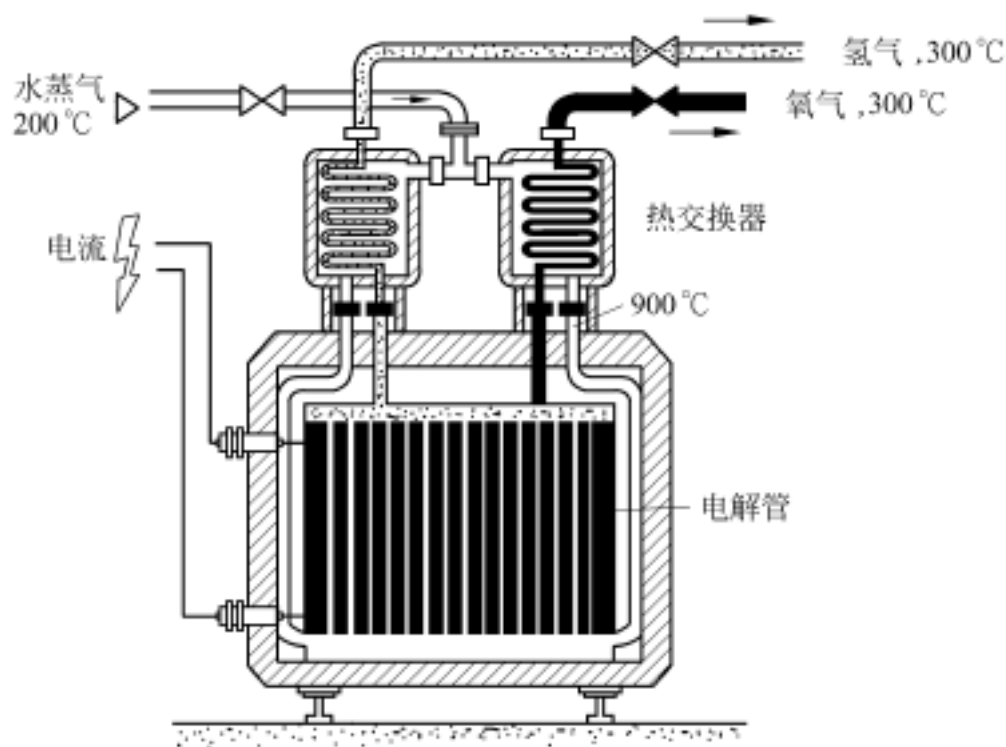


图 7-2 高温电解水蒸气的流程图

到 300 ，导出电解槽。预热到 900 的水蒸气进入电解槽，在 1000 经电极反应被电解成氢气和氧气。

高温电解水蒸气的制氢工艺虽然有极高的电流效率，但其生产的氢气成本仍然高于由化石燃料生产出来的氢气。从长远来说，化石燃料的资源总是有限的，因此采用高温电解水蒸气的制氢工艺还是有一定的发展潜力，尤其对拥有丰富水电和核电资源的国家。

电解水工艺所制取的氢气浓度通常高于 99.5%，其余的为氮气及少量的氧气，生产 1m^3 的氢气能耗约为 $4.5\text{kW}\cdot\text{h} \sim 5.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。水电解所产生的氢气，不需要精制，可直接供 PEMFC 使用。

电解水制氢消耗的是电能。电能的主要来源有火力发电、水电、核电、太阳能发电、风力发电等。目前我国电主要来自火力发电。1999 年全国总发电量为 $1.231 \times 10^{12}\text{kW}\cdot\text{h}$ ，其中火电 $1.005 \times 10^{12}\text{kW}\cdot\text{h}$ 、水电 $0.213 \times 10^{12}\text{kW}\cdot\text{h}$ 、核电 $0.0148 \times 10^{12}\text{kW}\cdot\text{h}$ 。其中煤发电大约占 78% 左右。因此，目前我国电解水制氢所耗的一次能源主要为煤。

7.2.3 含氢工业尾气回收氢

从合成氨、炼油厂等大型工业排放气中可以回收氢。表 7-2 列出了常见工业排放气的典型组成。

表 7-2 常见工业排放气典型组成

富氢排放气	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	O ₂	其他
甲醇厂排放气	80.0	2.0	2.6	14.0	—	—	1.0	—	0.4
加氢裂解尾气	66.2	—	—	23.4	1.7	2.9	—	—	5.8
CO 厂氢气	97.0	1.9	—	0.40	—	—	0.09	—	0.56
催化重整副产气	60.0	—	—	17.0	11.3	7.3	—	—	4.4
芳烃生产	96.6	—	—	3.4	—	—	—	—	—
加氢精制尾气	77.5	—	—	15.9	3.7	2.9	—	—	—
氨厂弛放气	60.0	—	—	12.0	—	—	24.8	—	3.2
催化裂解干气	60.8	1.3	2.0	10.3	3.0	0.8	21.8	—	—
氯碱厂尾气	99.86	—	—	—	—	—	0.08	0.06	—
乙烯脱甲烷塔尾气	61.1	1.1	—	36.7	0.7	—	0.4	—	—
焦炉气	60.0	6.5	2.5	22.5	—	—	6.5	0.5	1.5
甲苯脱烷基尾气	60.9	—	—	37.5	1.0	0.2	—	—	0.4
乙烯厂尾气	84.4	0.2	—	15.4	—	—	—	—	—

7.2.4 可再生资源制氢技术

发展中的可再生资源制氢技术主要包括生物质制氢、太阳能光解制氢、城市固体废物气化制氢等技术,从可再生资源获取能源被认为是人类解决化石能源日益枯竭问题的有效途径之一。

7.2.5 车载制氢技术

可用于车载制氢的燃料可以是醇类(甲醇、乙醇、二甲醚等)、烃类(汽油、柴油、甲烷、液化石油气(LPG)等),还有其他类型的物质也可以作为制氢原料,如金属或金属氢化物等。

1. 车载醇类制氢

从技术上看,醇类燃料车载制氢是相同的,制氢的温度较低,制氢反应容易实现。一般包括了重整、变换、一氧化碳脱除及燃烧等几个过程。图 7-3 给出了车载甲醇重整制氢的系统原理图。

表 7-3 为甲醇、乙醇、二甲醚(DME)车载制氢比较。由于甲醇是大宗化工产品,在能源与环保的压力下,世界许多国家,特别是我国对甲醇作为汽车替代燃料,

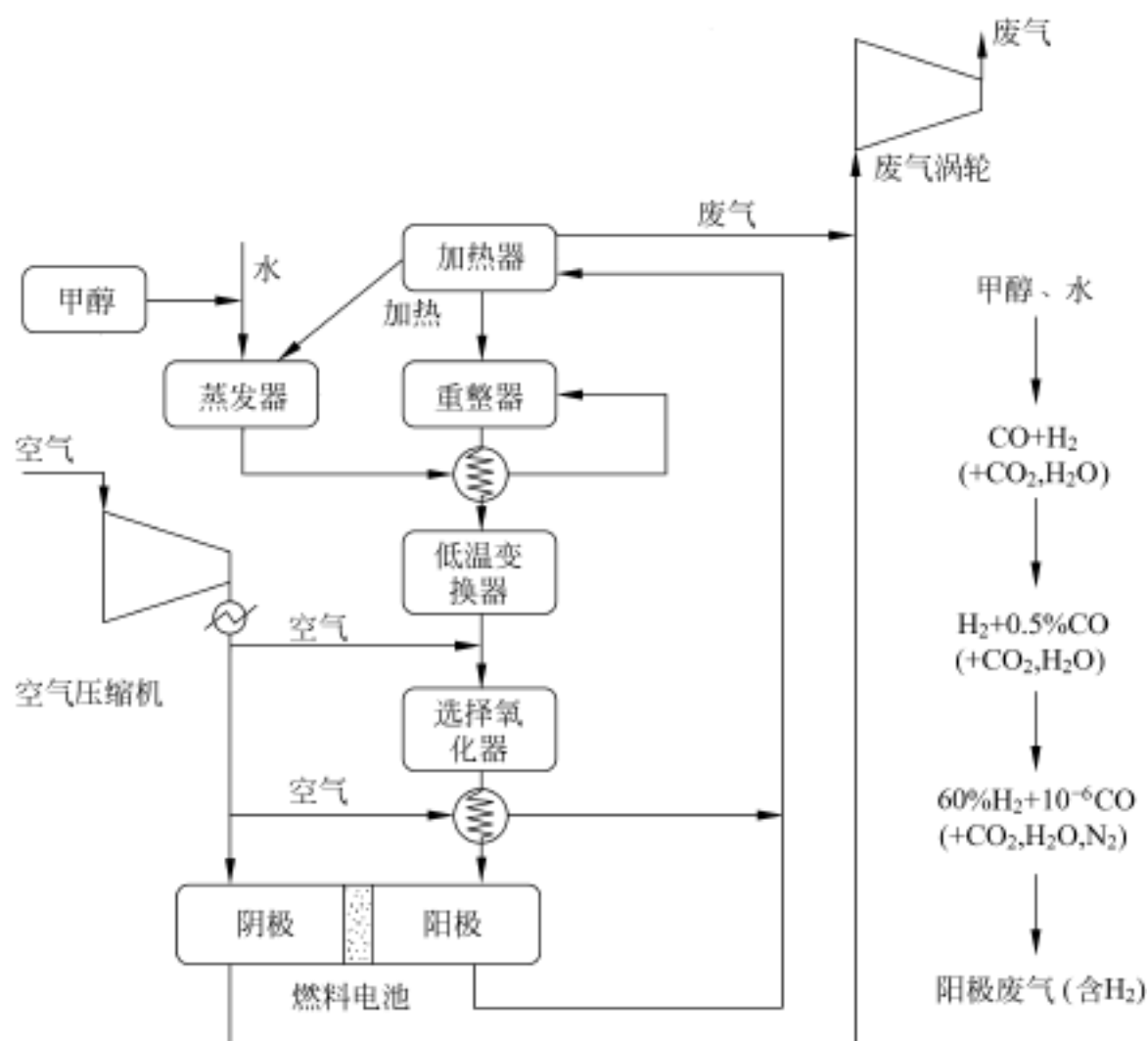


图 7-3 车载甲醇制氢系统原理图

已经作了大量的工作,在部分地区有甲醇汽车在使用,也有用甲醇添加汽油作燃料的。特别要注意的是,甲醇重整制氢燃料电池汽车,如戴姆勒-克莱斯勒公司的Necar-5已经开发成功,并于2002年6月4日完成了横穿美国东西部的壮举,行程3000余英里。这充分证明甲醇车载重整制氢燃料电池汽车的技术可行性。

表 7-3 醇醚类燃料车载制氢比较

燃料	优缺点
甲醇	常规液体燃料,大宗化工产品,原料易得;主要从天然气和煤制备,也可以用生物质制取;车载重整比高级醇或烃类容易;能量密度 22.7GJ/t;用于车用替代燃料有一定的历史
乙醇	可以从生物质制备;从合成气合成比甲醇难;毒性比甲醇小,能量密度 30GJ/t;车载重整比甲醇难
二甲醚	性质类似于液化石油气;液化储存压力 2MPa;无毒;能量密度 33GJ/t;车载制氢技术与甲醇基本相同

2. 车载烃类制氢

烃类燃料包括柴油、汽油、LPG 及天然气。天然气由于是气体燃料,车载储运困难,且车载重整所需温度很高,因而一般不作为燃料电池车载重整制氢的燃料。从石油炼制的烃类燃料,主要是汽油、柴油及 LPG 等。烃类制氢过程均包括氧化重整、高温变换、脱硫、低温变换、一氧化碳净化及燃烧等过程。图 7-4 给出了车载汽油重整制氢的系统原理图。

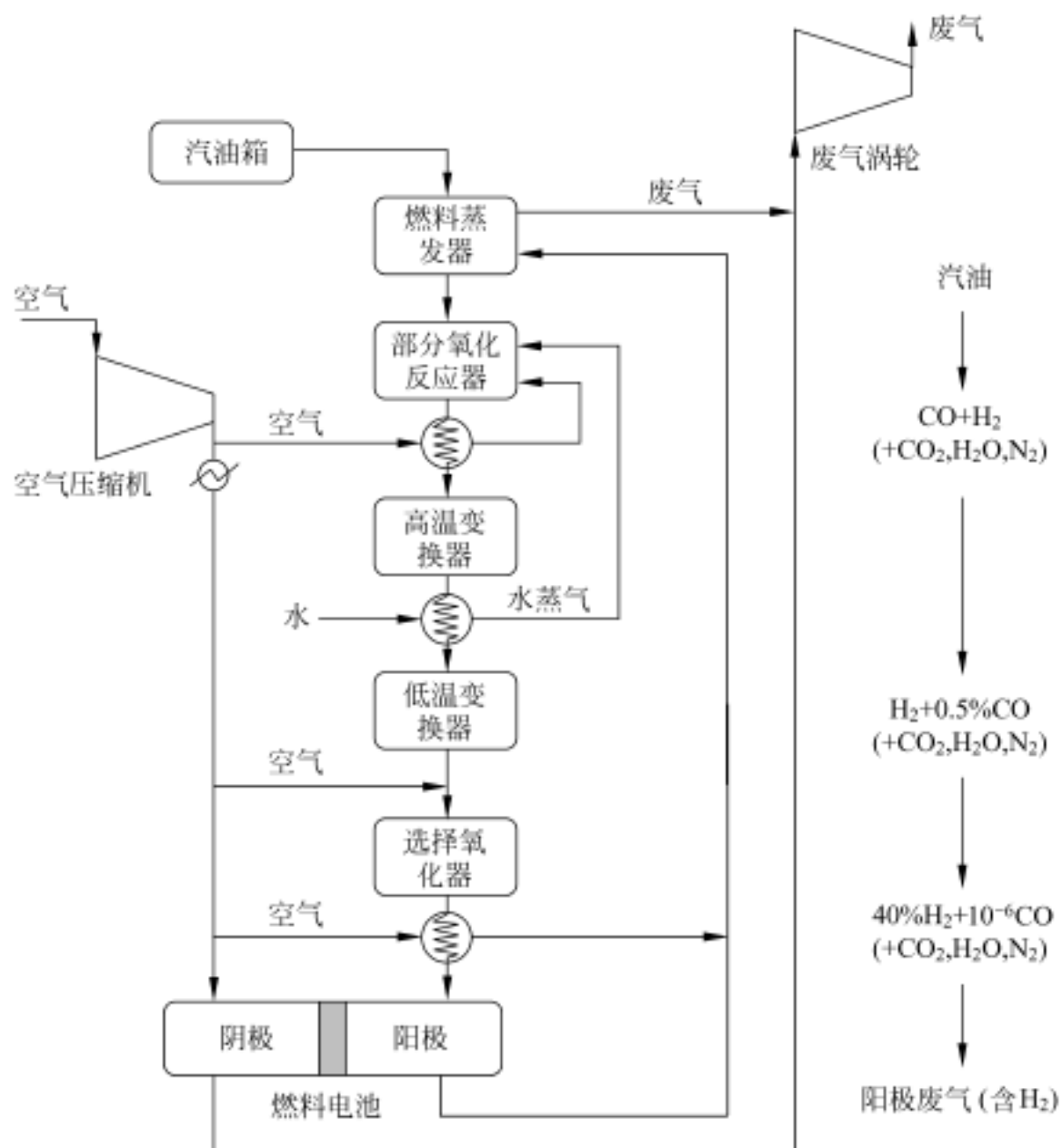


图 7-4 车载汽油重整制氢的系统原理图

烃类制氢比醇类制氢难度大,主要表现在重整的温度高和硫的脱除。目前已经开发出来的烃类车载重整燃料电池汽车的车型之一是美国通用公司的 25kW Chevrolet-10 汽油重整示范车。

3. 车载其他制氢方法

金属或金属氢化物水解制氢也可以在车上使用。这类方法的特点是制氢速率较快,氢的纯度高。戴姆勒-克莱斯勒公司曾宣布试制成功了以微型客车“Town&Country”为原型的燃料电池汽车。该车采用了通过硼氢化钠与水进行反应来制取氢气,反应方程式如下:

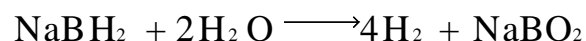


表 7-4 列出了这一类可能的物质及水解反应式。高能耗和高成本以及原料制备过程的高排放是这类制氢方法的共同缺点,所以这类氢源只能用于特殊的场合,而不适合于大规模的汽车业。

表 7-4 几种金属和金属氢化物水解制氢反应及理论储氢容量

物质	反应方程式	理论储氢质量比
LiBH ₄	$\text{LiBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{LiOH} + \text{H}_3\text{BO}_3$	36.4%
NaBH ₄	$\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{NaOH} + \text{H}_3\text{BO}_3$	21.1%
KBH ₄	$\text{KBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{KOH} + \text{H}_3\text{BO}_3$	14.8%
NaAlH ₄	$\text{NaAlH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{NaOH} + \text{H}_3\text{AlO}_3$	14.8%
NaH	$\text{NaH} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{H}_2$	8.3%
KH	$\text{KH} + \text{H}_2\text{O} = \text{KOH} + \text{H}_2$	5%
Fe	$3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$	4.8%
Al	$2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$	11.1%

7.3 氢分离纯化技术

提纯氢气主要有三种方法,即深冷分离法、变压吸附法(PSA)和膜分离法。深冷分离是将气体液化后蒸馏的方法,适宜在大量氢气制造时使用,产品纯净。变压吸附是基于不同气体在吸附剂上的吸附能力不同而实施的分离方法。膜分离法是基于气体透过高分子薄膜的速率不同而实施的分离。变压吸附法和膜分离法这两种后起的技术目前也已足够成熟,各有其独特的优点。与深冷分离方法相比,这两种技术不必把氢气进行深冷液化,因此能耗低。表 7-5 比较了这三种分离方法的技术特点及应用范围。

表 7-5 适于氢气分离的深冷、PSA 及膜分离等技术的比较

项目	深冷过程	PSA	膜分离
原理	据沸点不同进行液化、蒸馏	在吸附剂上吸附、脱附	膜的选择透过
装置规模	大 > 10000Nm ³ /h	中、小 5000Nm ³ /h	中、小、超小 5000Nm ³ /h
气体纯度	非常高	非常高	高
产品形态	液态或气态	气态	气态
优/缺点	可大规模生产,产物含水量低	无噪音,产物含水量低/ 吸附塔需自动切换,吸附剂寿命应超过 10 年	低压,安全,操作连续、简单, 无噪音/产物含水量高

不同的氢储运及车载应用方式对氢气的纯度要求不同。表 7-6 为氢气的国家标准。高压氢选用的是纯氢,而其他的氢储运方式所用的氢气则必须为高纯氢或超纯氢。表 7-7 为氢气不同纯化深度的成本比较。从表中可知氢气的纯度越高则成本越大。

表 7-6 国家纯氢、高纯氢和超纯氢质量技术指标(体积分数)*

项 目	指 标		
	超纯氢	高纯氢	纯氢
氢纯度/ %	99.9999	99.999	99.99
氧含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	0.2	1	5
氮含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	0.4	5	60
一氧化碳含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	0.1	1	5
二氧化碳含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	0.1	1	5
甲烷含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	0.2	1	10
水分含量(小于等于)/ 10 ⁻⁶	1.0	3	30

* 中华人民共和国国家标准《纯氢、高纯氢和超纯氢》GB/T 745—1999。

表 7-7 氢气不同纯化深度的费用比较*

氢气纯度(体积分数)	99%	99.99%	99.999%	99.9999%
净化、纯化费用/ (元/ m ³)**	0.30~0.40	0.50~0.60	约 1	约 5

* 采用天然气制氢、变压吸附纯化方法;

** 标准状态下。

7.4 氢的输配

氢的输配方式多样,具体采用何种输配方式要根据氢的用途、使用方式、地点、用量大小、用户的分布情况、输氢距离和输氢成本等因素综合考虑。

根据输送过程中氢的状态不同,可以分为:气体氢输送、液体氢输送和固体氢输送,其中前两种是当今正在使用的方式。针对不同的输送距离、用氢要求和用户的分布情况,气体氢或液体氢可以采用管网的方式,或通过储氢容器装在车、船上进行输送。管网输送一般适合于短距离、用户集中的输配场合;而车、船转运则适合于运输距离远、用户分布比较分散的场合。

随着燃料电池汽车技术的不断发展,燃料电池汽车数量不断增加,氢的生产和供应问题将成为一个制约燃料电池汽车发展的瓶颈,在当前的技术发展状况下,中短期内可以采用的氢的生产、储存和运输方法主要如下。

(1) 氢气由大型重整制氢厂生产,采用天然气为原料,根据加氢站的分布范围不同,氢气可分别通过车船或小规模管网等方式运到加氢站,为车辆进行液体氢加注或以高压氢方式加注,如图 7-5 所示。

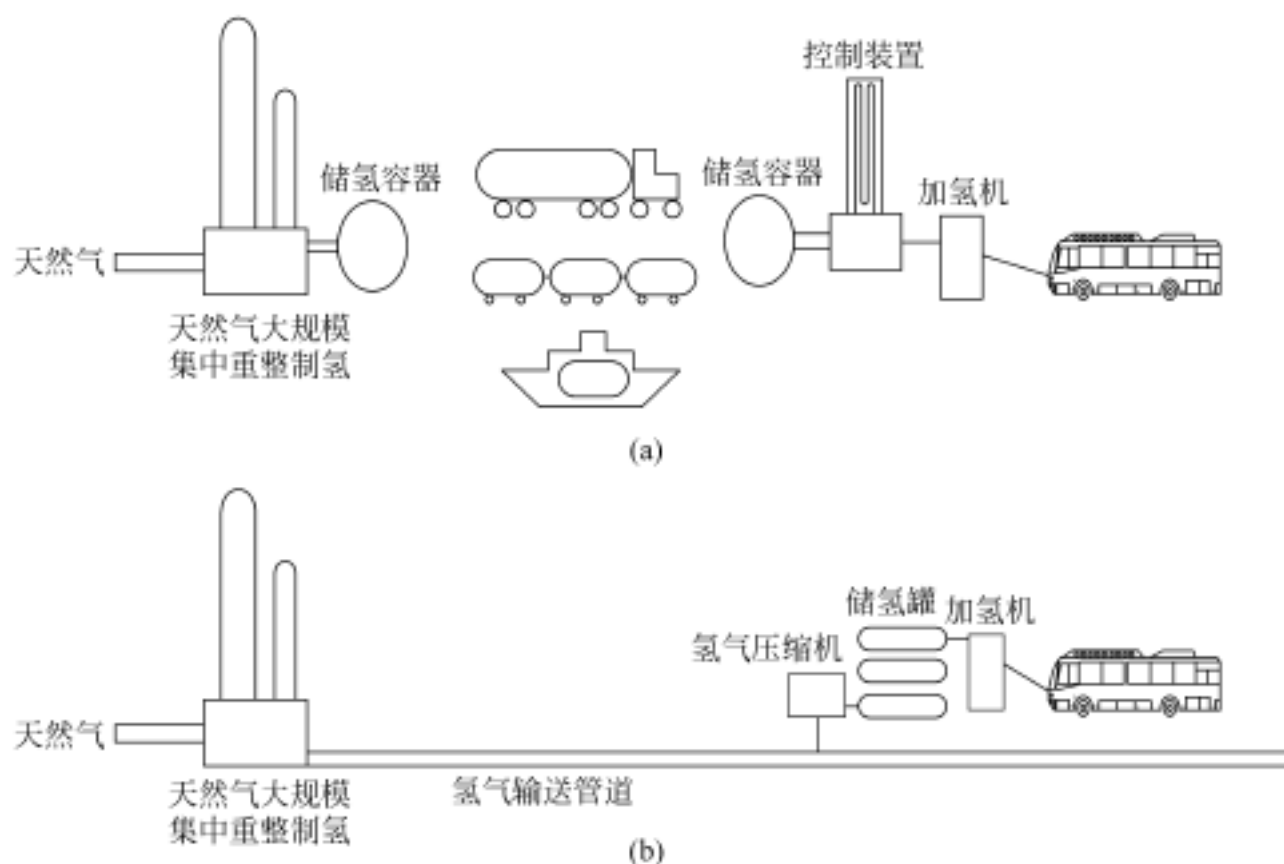


图 7-5 大型工厂天然气重整制氢

(2) 氢气由化工厂或炼油厂的副产品尾气中获取,进行分离纯化后,通过车船或管网等方式运到加氢站,为车辆进行液氢加注或高压氢方式加注,如图 7-6 所示。

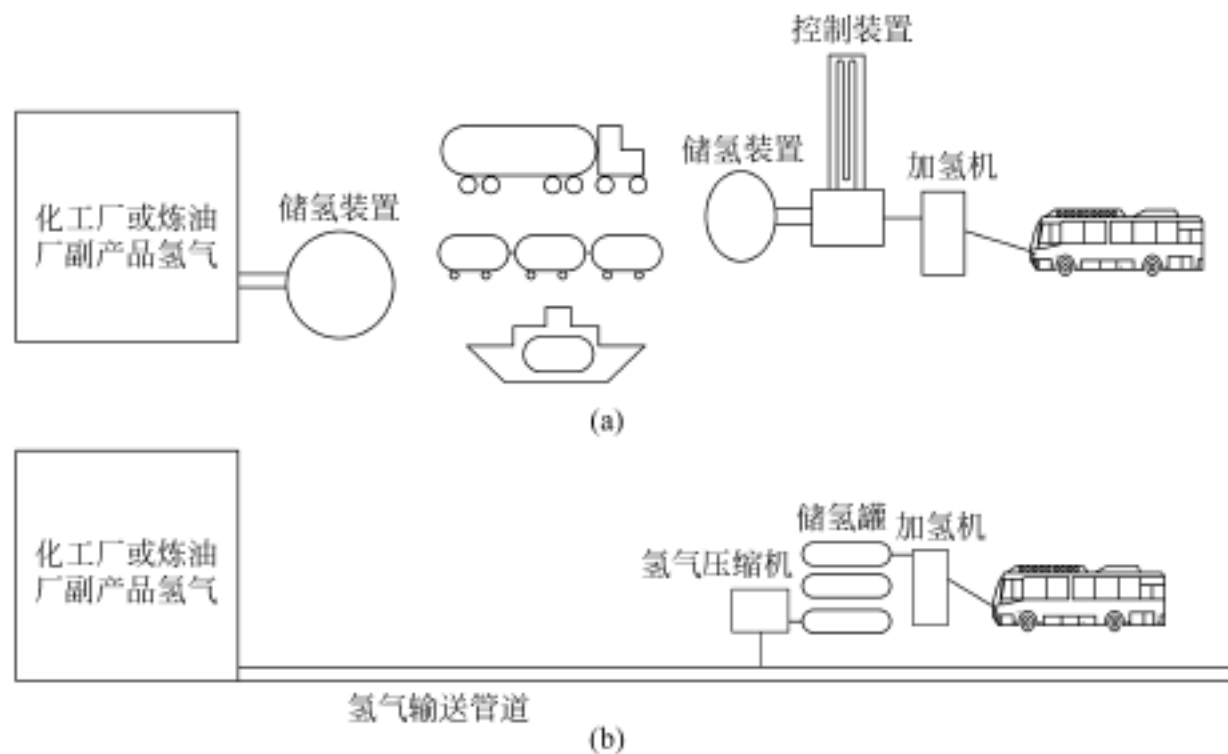


图 7-6 化工厂副产品气制氢

(3) 利用现有的天然气汽车加气站管网,进行天然气站内重整制氢,制取的氢气储存在高压容器中,其方案如图 7-7 所示。



图 7-7 天然气站内重整制氢

(4) 电解水制氢。一般有两种方式,一种是采用电解水制氢站方式生产氢,就地储存加注,该方案如图 7-8(a) 所示;另一种是由专业的电解水制氢工厂生产氢气,通过车船或管网等方式运到加氢站,该方案如图 7-8(b) 所示。

从长远来看,随着使用氢的燃料电池汽车数量的增加,必须寻找其他制氢的办法,美国普林斯顿大学的 Joan M. Odgen 提出如下的长期氢源供应的方案。

(1) 利用城市固体垃圾(municipal solid waste, MSW)或有机生物物质通过气化来制氢,其方案图如图 7-9 所示。据分析估计,像洛杉矶这样的大城市,每天产生的城市固体废物经过气化后可以产生大约(1000~1400)万 Nm^3 的氢气,大约可以供应(300~400)万辆轿车使用。

(2) 利用太阳能、风能、水力能和地热能制氢,其方案如图 7-10 所示。

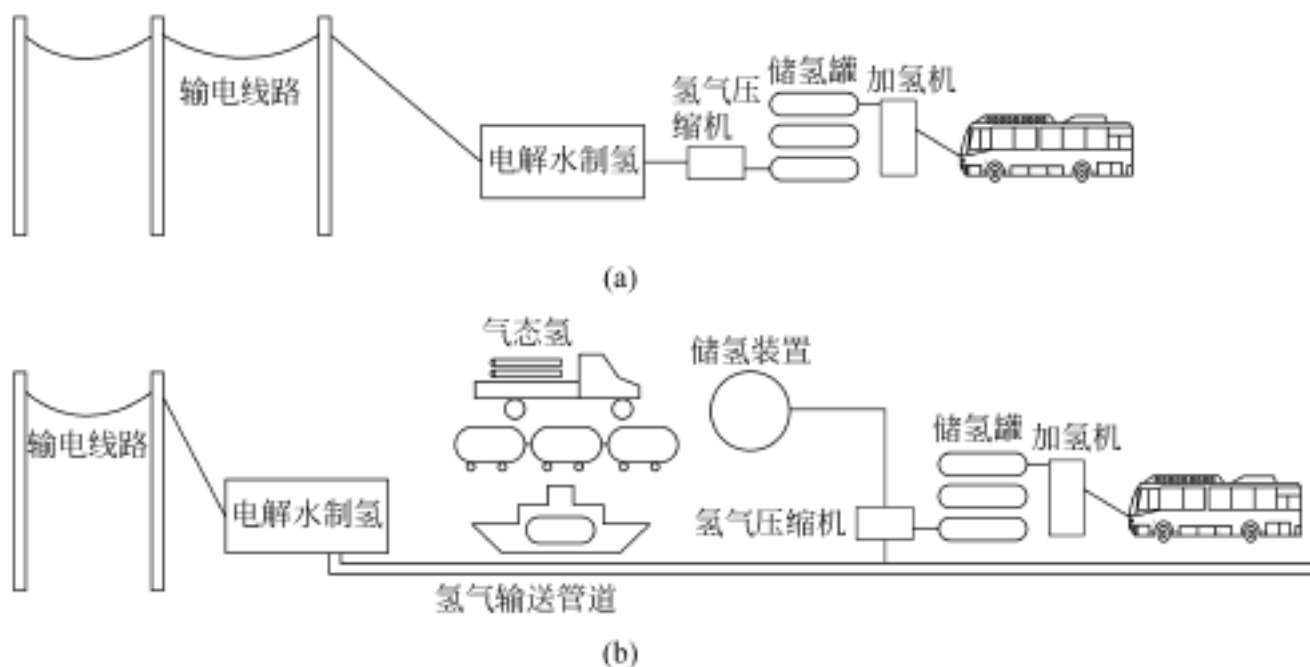


图 7-8 电解水制氢方案

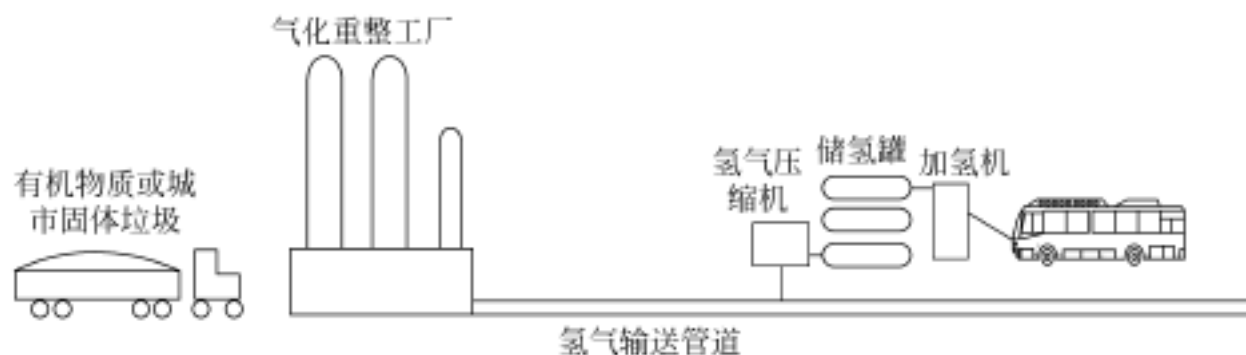


图 7-9 利用城市固体垃圾或有机物质制氢

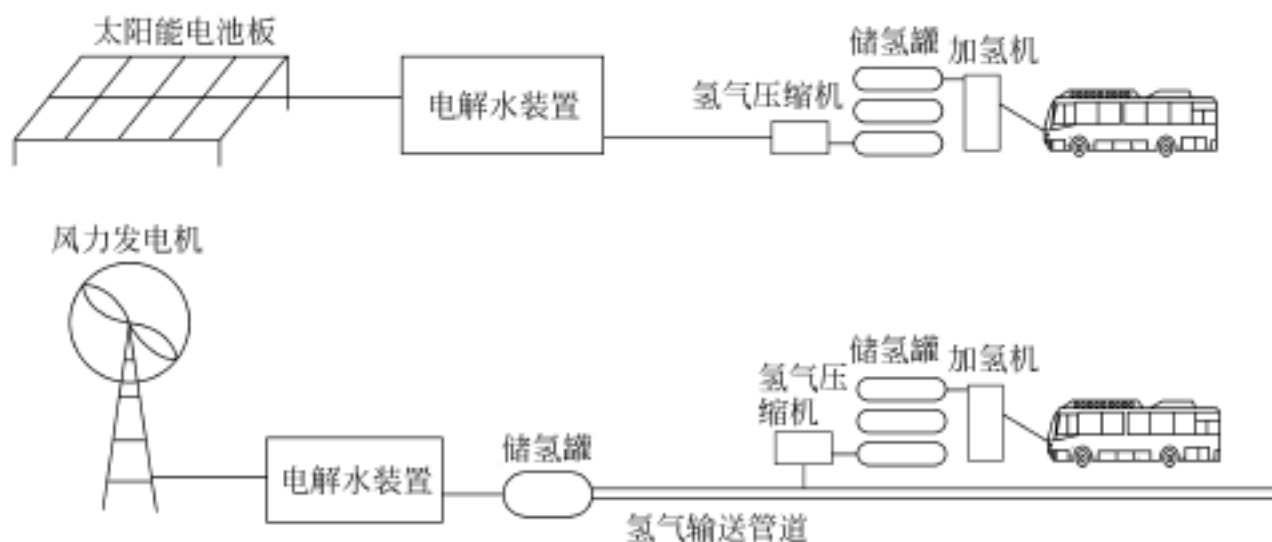
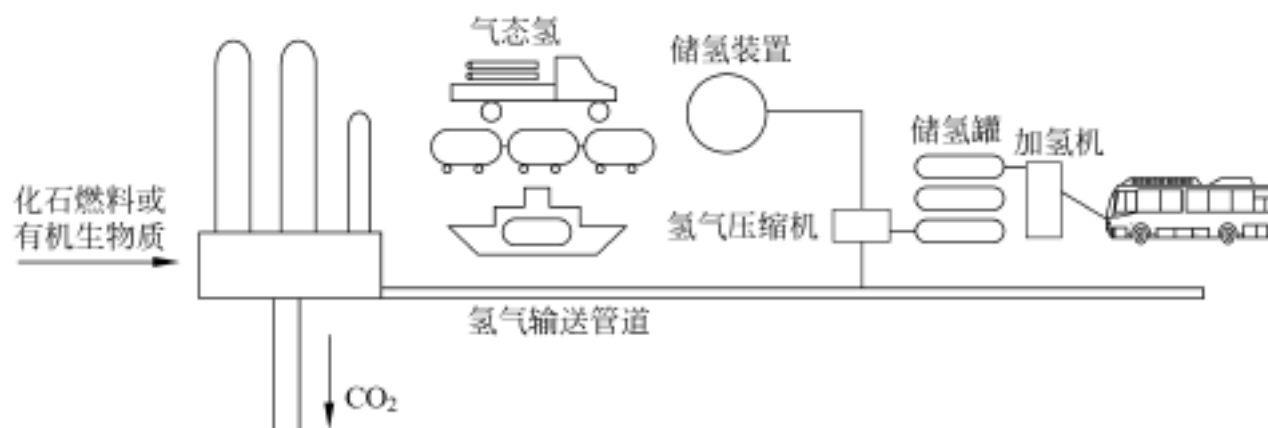


图 7-10 太阳能和风能电解水制氢

(3) 利用其他化石燃料或有机生物质制氢,同时将此过程中的温室气体 CO_2 进行地下埋藏处理,该方案如图 7-11 所示。

图 7-11 化石燃料或生物质制氢(副产品 CO₂ 采用地下埋藏处理)

下面将对氢制备后到加氢站之前,包括氢纯化分离、储存运输过程中各种方法的能耗及费用进行比较。运输距离假设为短距离 161km,长距离 1609km。高压氢气储存压力为 30MPa。各种方法的说明、能耗和费用比较如表 7-8~表 7-10 所示。

表 7-8 术语介绍

缩写	方法说明
CGT	纯化,压缩储存(30MPa),公路运输
CGR	纯化,压缩储存(30MPa),铁路运输
PIPELINE	纯化,压缩(10MPa),管道输送,压缩储存(30MPa)
LHT	纯化,液化储存,液氢公路运输
LHR	纯化,液化储存,液氢铁路运输
MHT	纯化,压缩(2MPa)、金属储氢,公路运输
MHR	纯化,压缩(2MPa)、金属储氢,铁路运输

表 7-9 各种氢储运方法的能耗比较*

项目	GJ						
	CGT	CGR	PIPELINE	LHT	LHR	MHT	MHR
纯化	0.0014	0.0014	0.0014	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
储存	0.436	0.436	0.436	1.262	1.262	0.131	0.131
运输(161km)	0.0225	0.0025	0.0006	0.0160	0.0018	0.0802	0.0089
运输(1609km)	0.2246	0.0249	0.0006	0.1604	0.0178	0.8022	0.0888
合计(161km)	0.460	0.440	0.438	1.280	1.265	0.213	0.141
合计(1609km)	0.662	0.462	0.438	1.424	1.281	0.935	0.221
能量效率(161km)	69%	69%	70%	44%	44%	82%	88%
能量效率(1609km)	60%	68%	70%	41%	44%	52%	82%

* 储运能产生单位能量(GJ)的 H₂ 所需消耗的能量。

从能耗方面比较,氢的压缩或液化是耗能的主要过程。金属储氢的效率高,但长距离公路运输时耗能大。液氢的效率最低,因为氢液化耗能很大。显然,长距离运输,铁路比公路有优势。

表 7-10 各种氢储运方法费用比较

元/ m³*

运输距离	项目	CGT	CGR	PIPELINE	LHT	LHR	MHT	MHR
161km	纯化	0.40	0.40	0.40	1.00	1.00	5.00	5.00
	储存	0.25	0.25	0.25	0.84	0.84	0.30	0.30
	运输	0.98	1.57	0.10	0.05	0.09	0.57	1.62
	合计	1.63	2.23	0.75	1.89	1.93	5.86	6.92
1609km	纯化	0.40	0.40	0.40	1.00	1.00	5.00	5.00
	储存	0.25	0.25	0.25	0.84	0.84	0.30	0.30
	运输	7.24	1.76	1.00	0.36	0.10	4.11	2.27
	合计	7.89	2.41	1.66	2.20	1.94	9.41	7.57

* 标准状态下。

费用分析表明,管道压缩氢气的储运方法比其他方法更经济。液氢的费用主要在于氢的纯化及液化费用和液氢储罐的折旧。金属氢化物储氢方法最不经济,因为超纯氢的制备费用很高,低的储氢容量导致运输费用很大,储氢材料的费用也很高。

在可实用的氢储运方法中,综合考虑成本、能耗、技术可行性等多种因素,高压氢气储运虽然安全性差,但还是当前燃料电池汽车规模化应用最可行的方案。

7.5 燃料电池汽车车上供氢系统

燃料电池汽车车上供氢系统可分为车载储氢和车载制氢两大类。本节只介绍车载纯氢储存技术,车载制氢技术已在 7.2.5 节中介绍。

车载纯氢储存方法主要分为高压氢气储存、液态氢储存、金属储氢、活性炭吸附储氢和碳纳米材料储氢等几种。

7.5.1 高压氢气储存

1) 车载高压氢气储存供应系统的基本结构

如图 7-12 和图 7-13(由“北京蓝天达清洁燃料技术公司”提供)所示,车载高压氢气储存供应系统由储气瓶组、压力表、滤清器、减压器、单向阀、电磁阀、手动截止阀及管路等组成。

在给储气瓶组加氢气时,加氢站的压缩氢气由压力表 3(图 7-12)附近的加气口压入,经客车中部的管路 11(图 7-13)、三通 9、单向阀 8 和管路 7 到达汇流排 12,

由汇流排 12 进入储气瓶组 1。

当燃料电池用氢气时,压缩氢气由储气瓶组 1 经汇流排 12、电磁阀 10 和三通 9 到达管路 11。管路 11 的氢气再经过压力表附近的气路、客车后部的滤清器 4 和减压器 5,到达燃料电池 6。

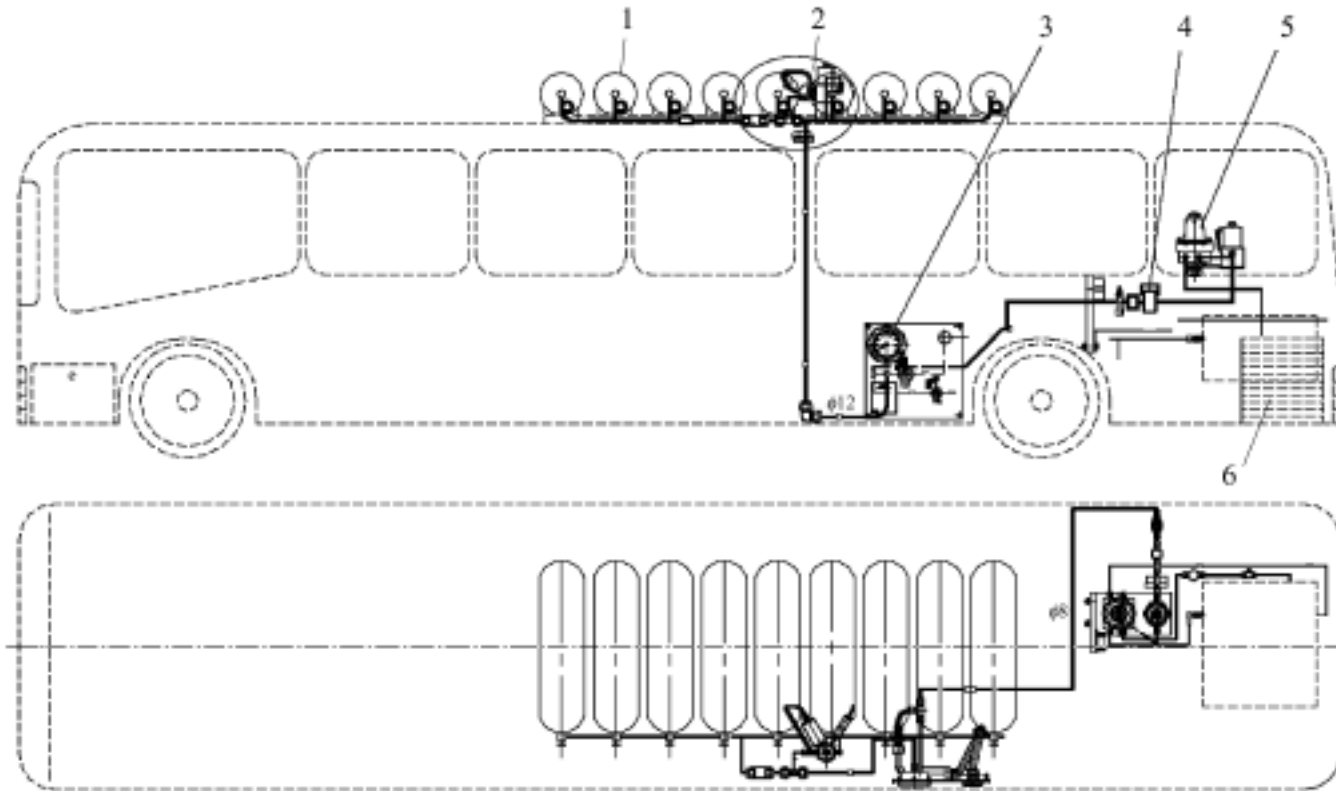


图 7-12 车载高压氢气储存供应系统简图

1—储气瓶组; 2—车顶控制气路(详细情况见图 7-13); 3—压力表; 4—滤清器;
5—减压器; 6—燃料电池

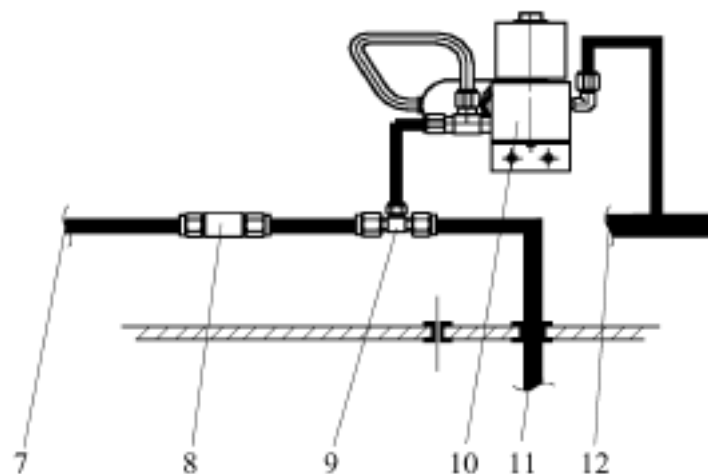


图 7-13 车顶控制气路

7—管路; 8—单向阀; 9—三通; 10—电磁阀;
11—管路; 12—汇流排(与管路 7 连通)

为了安全上的需要,该系统还配有保护装置:

(1) 在高压管路部分,设置了过流安全保护装置。若发生意外,在超过设计安

全流量时,则不需借助任何外力迅速自动切断气路;当故障排除后,只需对电磁阀进行数秒钟的通电,又可恢复正常运行。

(2) 在低压管路部分,设置了发动机供气安全保护装置。当发动机无论因何原因出现故障不能正常运转时,因控制信号的消失使电磁阀自动关闭,切断发动机供气气路,从而保证了供气系统的供气安全。

2) 车载高压氢气储存方法应用情况

用氢气压缩机把氢气压缩灌入到车上携带的压力容器中,是目前最简单和最常用的车载纯氢储存方法。仅就世界已有的燃料电池大客车示范项目而言,采用这种车载储氢方法的就占了大多数。

新飞人工业公司(New Flyer Industries Ltd)于1993年展示的燃料电池大客车概念车(燃料电池功率为90kW,续驶里程为400km)和1998年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为205kW)都装用了巴拉德公司生产的质子交换膜燃料电池,采用车载压缩氢气方法供氢。

戴姆勒-克莱斯勒公司于1997年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为205kW,续驶里程为250km)、1999年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为205kW)和2003年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为205kW,续驶里程为250km)都装用了巴拉德公司生产的质子交换膜燃料电池,采用车载压缩氢气方法供氢。其中2003年展示的车上储气罐最大工作压力为35MPa。

德国尼奥普兰公司于2000年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为80kW,续驶里程为250km)采用车载压缩氢气方法供氢。

日本丰田公司2001年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为160kW,续驶里程为300km)和2002年展示的燃料电池大客车(燃料电池功率为180kW,续驶里程为300km)都装用了丰田公司生产的质子交换膜燃料电池,采用车载压缩氢气方法供氢,储气罐最大工作压力为35MPa。

Irisbus(雷诺和依维柯的合资厂)于2001年推出的燃料电池大客车,装用UTC Fuel Cells公司生产的60kW质子交换膜燃料电池,采用车载压缩氢气方法供氢。

德国曼公司于2000年展示的燃料电池大客车“巴伐利亚1号”(MAN Bavaria-1),装用西门子公司生产的120kW质子交换膜燃料电池,最高车速为80km/h,续驶里程为250km,采用车载压缩氢气方法供氢,储气罐容积为1548L。

3) 车载高压氢气储存的技术问题

耐高压的氢压力容器及材料是车载高压氢气储存方法的关键。我国大量使用的是钢瓶储氢,以合金钢制成的压力容器,储氢压力为15MPa时,氢的装载量仅占容器质量的1%,体积储氢容量约0.008kg/L,不太适用于车载储氢。特种高强度奥氏体钢材料制成的容器,氢的装载量可达容器质量的2%~6%。

国外储氢钢瓶典型的工作压力范围为15MPa~40MPa,常用工作压力为

20MPa。目前国外非常重视先进的高压储氢容器的开发,技术较成熟的是合金铝容器,外用碳纤维加强,内胆为抗氢脆的聚合物材料。据报道,QUANTLTM公司的Advanced Type 型高压氢容器,储氢压力为35MPa,体积为145L,质量为45kg,能储存3kg氢气,质量储氢容量达6%,体积容量为0.02kg/L。这类储氢容器正处于研发阶段,运用了特殊材料,估计成本很高。

最近国内一些单位也在研制工作压力为20MPa的复合材料气瓶。

车载高压氢气储存技术是目前最简单和最常用的方法,但也存在安全和实施方面的问题:

(1) 在安全性方面:高压容器本身就需要特殊的照顾与维护,况且容器中装的是易燃、易爆、易渗漏的氢气,车祸时可能有严重的后果。

(2) 在实施方面:容器压力愈高,充氢站的建设,压缩运行所花的代价愈高。

7.5.2 液态储氢

1) 车载液态储氢系统结构

车载液氢储氢系统(图7-14)由客车顶部(轿车及轻型车在地板下或侧后方)的液氢储藏罐、压力控制装置及管路等组成。其中,设在客车顶部的液氢储藏罐为直径420mm,长5m的圆柱体。

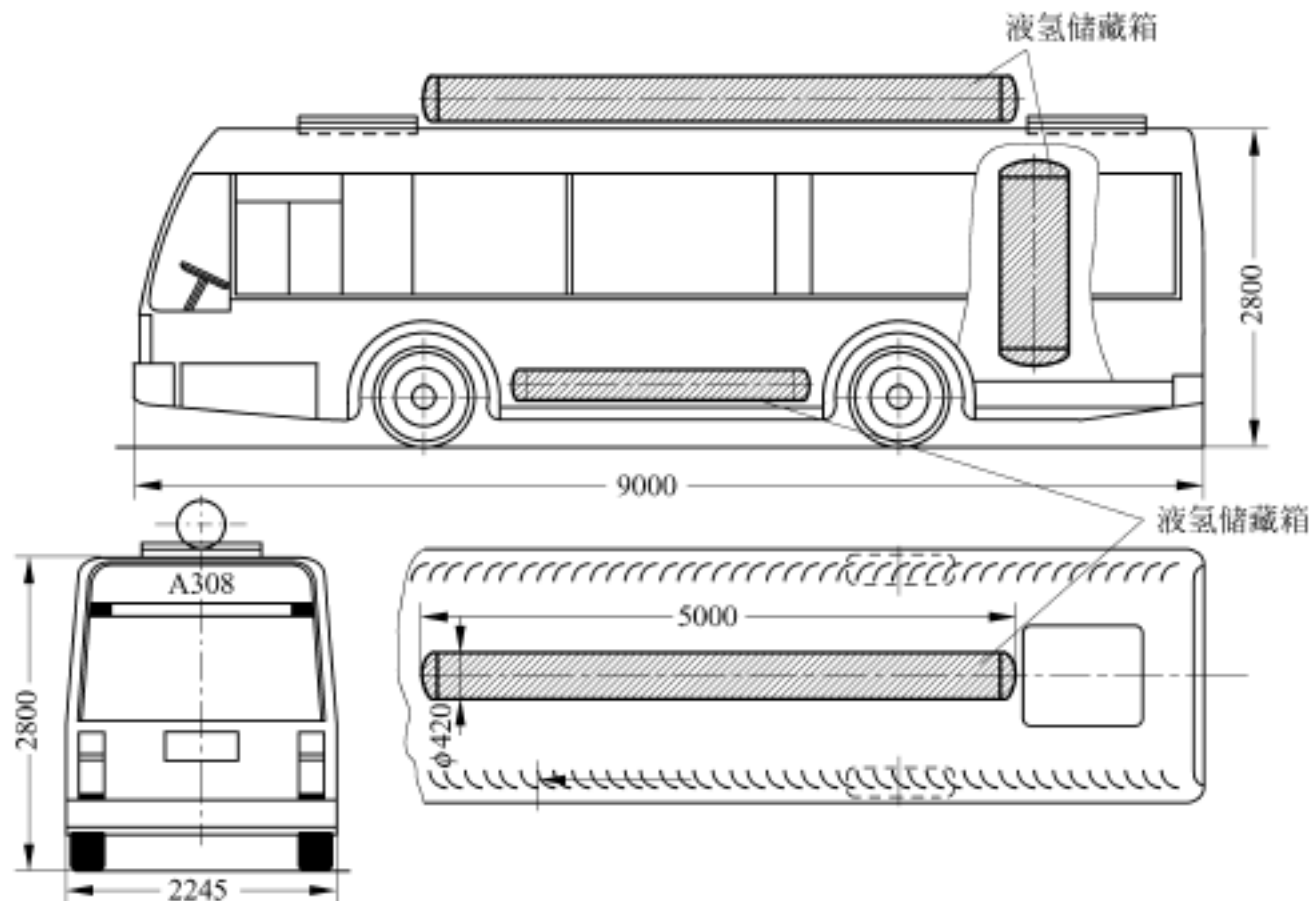


图7-14 城市公共汽车液氢储藏系统

典型的液氢储藏罐结构如图7-15所示,由于氢气的液化温度非常低,通常在

- 253 以下,因此,其结构设计主要考虑绝热问题。从图中可以看出,其外壳由超绝热材料包裹,设有(液氢)进出口、安全排气管。其内部装有液位计和压力(控制)装置。

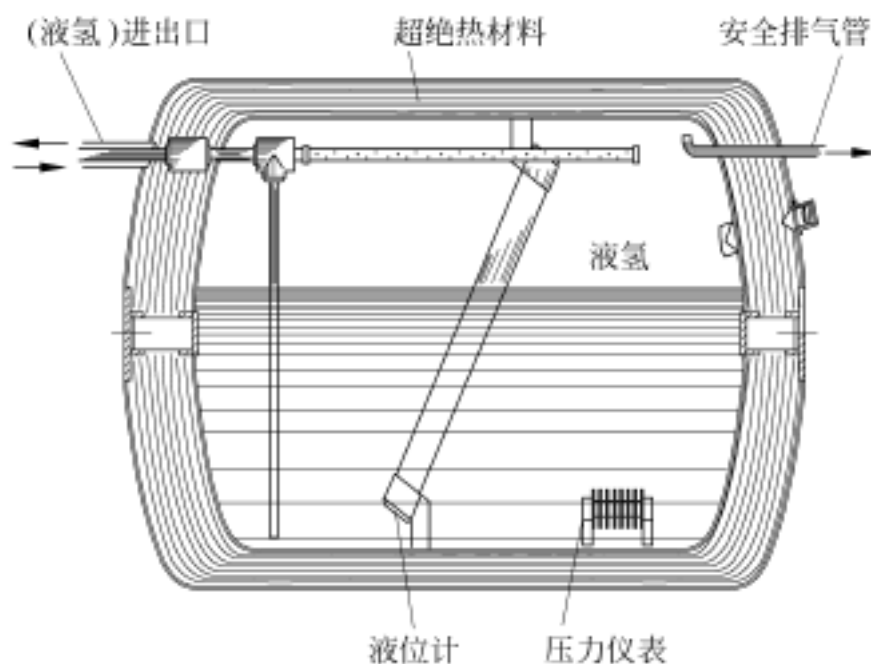


图 7-15 液氢储藏罐结构示意图

由于液氢在气化过程中要吸收大量的热量,因此在车载液氢系统中还应包括热交换和压力调节系统。图 7-16 为通过外部热交换和内部电加热而调节液氢储藏罐压力的系统。内置电加热器和外部热交换器都可以提供热量,加速液氢气化,控制容器内部氢气的压力,以便根据燃料电池的需要提供氢气。

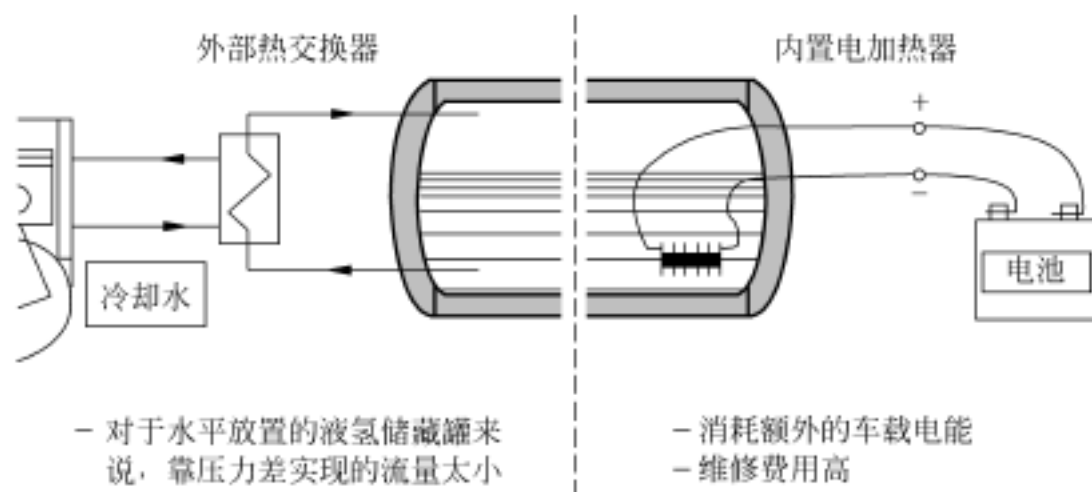


图 7-16 液氢储藏罐

由于内置电加热器加热时需耗费大量的电能,所以使用起来不经济。更好的方法是在容器内放置热盘管(图 7-17)。经过这个盘管,一部分被分离和加热过的氢气被返回,将热量传给液氢储藏罐内的气态和液态氢,再由外部的热交换器的热水加热。这样的循环很容易通过三向阀对罐内的压力变化进行控制。当液氢储藏罐内

压力降低时,被加热的氢气开始在储罐和外回路之间进行循环。这种方法的主要优点是冷却水中的热量可被再利用,并且在液氢储罐内不需要加装其他部件。

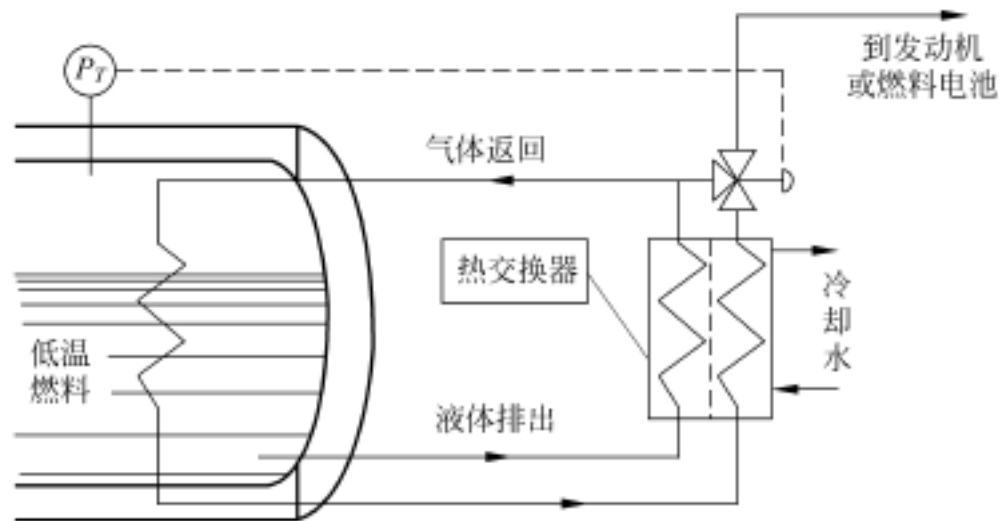


图 7-17 利用返回的热气调节液氢储藏罐压力的系统

如图 7-18 所示为液氢储藏罐真空压力控制系统。通过该系统可以控制液氢储藏罐内外壳之间的真空度,调节真空绝热程度,从而达到控制氢气输出压力的目的。

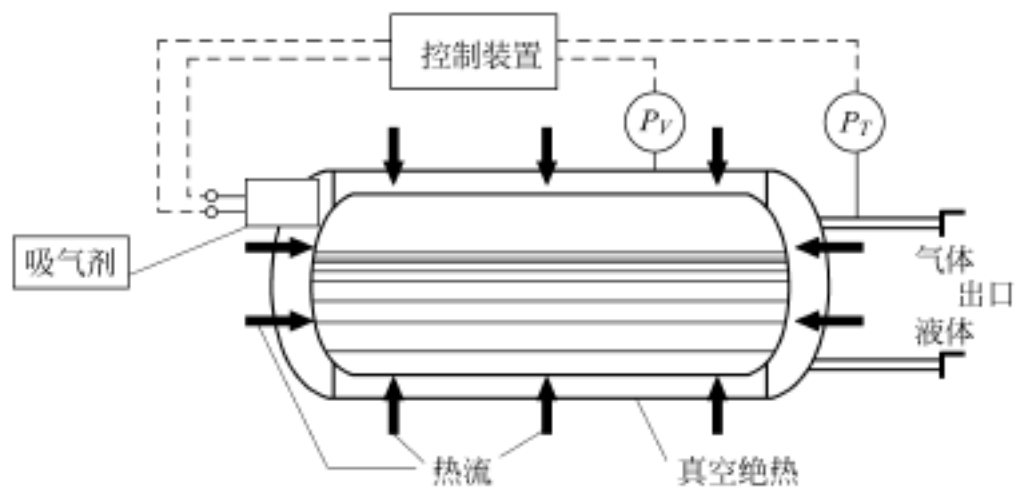


图 7-18 液氢储藏罐真空压力控制系统

2) 车载液氢储存方法应用情况

在一些燃料电池电动大客车和燃料电池轿车中,已经采用了车载液氢储存方法。

德国曼公司研制的燃料电池大客车,装用 Nuvera 公司生产的 150kW 质子交换膜燃料电池,采用车载液氢方法供氢。液氢罐容积为 700L。

Van Hool 公司 1995 年展示的燃料电池大客车,装用 Elenco 公司生产的 78kW 磷酸型燃料电池,续驶里程为 300km,采用车载液氢方法供氢。液氢罐容积为 700L。

Macchi-Ansaldo 公司 1997 年展示的氢燃料电池大客车,装用 Nuvera 公司生

产的 45kW 质子交换膜燃料电池, 续驶里程为 400km, 采用车载液氢方法供氢。液氢罐容积为 600L。

在德国戴姆勒-克莱斯勒公司研制开发的 NECAR(new electric car)系列燃料电池电动汽车中, 1999 年展示的 NECAR-4 型采用液氢为燃料。

美国通用汽车公司 1999 年研制开发的“氢动一号”燃料电池轿车也采用液氢为燃料。

3) 车载液态储氢的技术问题

液氢是密度仅为 0.07kg/L (-253°C) 的液体。液氢储藏罐是一种双层壳的容器, 层间抽高真空并兼以多层反辐射薄膜缠绕内胆等方法绝热。以 10kg 左右的液氢为例, 容器的质量容量可达 10% 以上, 远高于其他的储氢方法。实际上, 国外所演示的燃料电池汽车中, 整车综合性能最好的是以液氢为燃料的, 如戴姆勒-克莱斯勒公司的 NECAR-4, 以及通用公司的“氢动一号”等。其根本原因就是液氢储存燃料系统的体积与质量最小。

很显然, 由于低温容器的热漏损及液氢的生产、储存、运输、向车上加注和氢液化必须消耗大量的能量等问题, 使得目前实施规模化的车载液态储氢是非常困难的。

7.5.3 金属储氢

金属氢化物储氢是金属与氢形成氢化物的储氢方法。将金属氢化物加热, 则金属氢化物分解脱氢而得 H_2 。表 7-11 列出了几种典型的金属氢化物储氢体系。

表 7-11 几种典型的金属氢化物储氢体系

体系	含氢质量分数/ %	分解温度 [*] /	能量密度/ (MJ/ kg)
TiCr ₂ / Ti Cr ₂ H	1.20	-20	1.4
TiCrO/ TiCrOH	1.30	130	1.4
FeTi/ FeTiH ^{**}	1.00	-6	1.2
LaNi ₅ / LaNi ₅ H ₆	1.37	20	1.5
Mg ₂ Al ₃ / Mg ₂ Al ₃ H ₄	3.00	230	3.6
Mg ₂ Ni/ Mg ₂ NiH ₄	3.16	250	3.8
Mg/ MgH ₂	7.66	284	9.0

* 在 100kPa 时的分解温度;

** FeTiH 尚可进一步吸氢生成 FeTiH₂, 含氢量达 2% 左右。

表 7-11 中分解温度高于 100 的体系中, 即使是含氢量高的金属氢化物, 也不宜在燃料电池汽车中使用。因为低温燃料电池 (PEMFC) 的最高工作温度不超过

90 ,它们提供的废热将不能使这些氢化物分解。

金属氢化物储氢与高压容器储氢相比的特点如下:

(1) 单位质量的储氢量并不高,储氢材料加上容器后,单位质量的储氢量低于高性能材料的压力容器,分解温度低于 100 的体系储氢比为 1.5% (质量分数) 以下。

(2) 单位体积的储氢容量有所提高,为 0.05 kg/L。

(3) 储氢压力为 1MPa~2MPa,远低于压力容器,提高了安全性,对充氢站要求及充氢能耗要求皆降低。

(4) 金属氢化物对氢气中的少量杂质如 O_2 , H_2O , CO 等有一定的敏感度,高于燃料电池电极催化剂的敏感度,因而提高了对原料氢的质量要求。

(5) 金属氢化物存在机械强度、反复充放后的粉碎等问题。目前,金属氢化物可反复充放的次数不多且价格昂贵,所以以金属氢化物作为储氢方法在燃料电池汽车上的运行费用是很高的。

储存金属氢化物的容器要能够耐高压,还要有足够的换热面积,能够迅速的传递吸氢和放氢反应过程中释放或者需要的热量。

7.5.4 活性炭吸附储氢

活性炭低温吸附具有相当好的储氢能力,在 -196 ,4.2MPa 时,活性炭的储氢质量分数约 5%。但是考虑到 -196 的低温及 4.2MPa 的压力,兼有高压容器法和液氢法的弱点,在燃料电池汽车上应用也不是可行的方法。

7.5.5 碳纳米材料储氢

纳米碳管被认为是一种非常有潜力的高容量的储氢材料,1998年,Chambers、Rodriguez、Baker 等报道,在 12MPa 下,每克纳米石墨纤维可储氢气 2g,比现有的各种储氢技术的储氢容量高 1~2 个数量级。然而,目前对此报道的结论仍有很大争议,所以还不能评价其应用前景。而另外一些研究者则报道纳米碳管在室温下其储氢质量分数达到 6.5% (满足美国能源部燃料电池汽车对储氢材料要求的基准),但这一结果有待进一步验证。此外,纳米碳管目前还未解决其规模制备的方法,因此价格昂贵。即使纳米碳管有较高的储氢容量,但纳米碳放氢难,放氢的容量低,放氢速率低,实际应用困难。其技术的发展还难以预测,至少在较短的时间内,在燃料电池汽车上应用是不现实的。

现阶段车载储氢技术的现状及国际能源署的预定目标见表 7-12。

不同的储氢方法对氢气纯度的要求也不尽相同。表 7-13 为各种储氢方法对氢气纯度的要求。高压储氢用的是纯氢,而其他储氢方法要求的是高纯氢或超纯氢,因此导致氢的提纯分离能耗成本很高。

表 7-12 车载储氢技术的现状及国际能源署的预定目标

项 目	高压储氢 (25MPa)	液氢 (-253 以下)	金属储氢
国外现状	2% ~ 6%	5% ~ 7.5%	< 2%
	20kg/ m ³	40kg/ m ³	约 50kg/ m ³
IEA 预定目标	> 5% , > 50kg/ m ³		

注:表中百分比为质量分数。

表 7-13 各种储氢方法对氢气纯度的要求及提纯分离成本*

储氢方法	高压氢	液氢	金属储氢	活性炭	纳米碳管
氢气纯度要求	纯氢	高纯氢	超纯氢	超纯氢	超纯氢
	99%	99.999%	99.9999%	99.9999%	99.9999%
成本/(元/ m ³)* *	0.3~0.4	约 1	约 5	约 5	约 5

* 以天然气制氢为原料的变压吸附纯化方法计算,表中百分比为体积分数;

* * 标准状态下。

车载纯氢方案的燃料链中,氢的储运是瓶颈,成本是关键。我国发展燃料电池汽车过程中,在样车研制和示范运行阶段,可选用的方案是高压储氢或金属储氢。在纯氢方案中,从成本与能耗看,高压储氢具有一定的优势。

7.6 燃料电池汽车氢安全系统

7.6.1 燃料电池汽车氢安全控制系统

整车氢安全控制系统主要包括氢泄漏监测及报警处理系统等。在某些燃料电池汽车内安装有氢泄漏监测系统,该系统由安装在车顶部的储氢瓶舱、乘客舱、燃料电池发动机舱以及发动机水箱附近的 4 个催化燃烧型传感器和安装在车体下部的一套监控器组成,传感器实时检测车内氢的体积分数,当有任何一个传感器检测到氢的体积分数超过氢爆炸下限(空气中的氢体积分数为 4%)的 10%、30% 和 50% 时,监控器会分别发出 级、 级、 级声光报警信号,同时通知安全报警处理系统采取相应的安全措施。氢安全报警处理系统的电气原理框图如图 7-19 所示。

氢安全报警处理系统接收到 级报警信号时,由报警处理单元启动声光报警系统;同时通过固态继电器给驾驶室提供一个信号,使驾驶控制系统的一个继电器吸合,通过声光报警通知司机有氢气泄漏,司机通过手动开关关闭燃料电池发动机和氢气瓶组出口的电磁阀,并采取其他相应的处理措施。

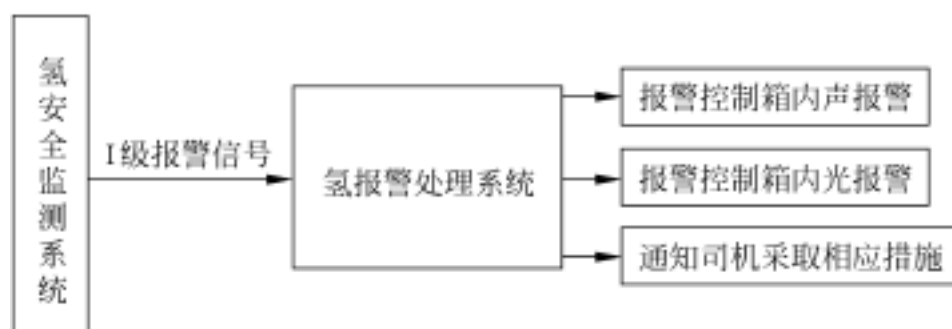


图 7-19 实验样车氢安全报警处理系统的原理框图

7.6.2 燃料电池汽车车库的氢安全系统

车库是存放燃料电池汽车的地方,由于车上备有多个氢气储气瓶,因此设置车库的氢安全控制系统十分必要。此外,还应采取防静电和防爆措施以及制定并遵守严格的氢安全操作规程等。

1) 车库氢安全控制系统

车库中的氢安全控制系统主要包括氢泄漏监测及报警处理系统,能自动送、排风的设施等。在燃料电池汽车车库内安装有氢泄漏监测系统,该系统由安装在车库顶部的多个催化燃烧型传感器和安装在控制室的一套监控器组成。传感器实时检测车库内氢的体积分数,当有任何一个传感器检测到氢的体积分数超过氢爆炸下限的 10%、30% 和 50% 时,监控器会分别发出 级、 级、 级声光报警信号,同时通知安全报警处理系统采取相应的安全措施。氢安全报警处理系统的电气原理框图如图 7-20 所示。

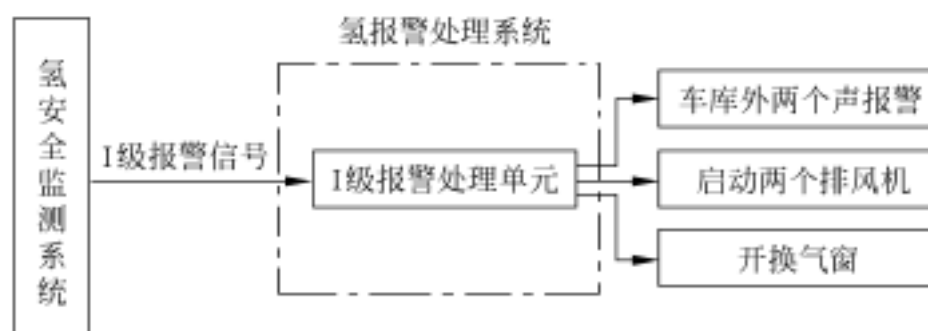


图 7-20 车库氢安全报警处理系统的原理框图

氢安全报警处理系统接收到 级报警信号时,由报警处理单元启动车库外声报警系统;同时自动通过电磁阀打开车库上部的换气窗,并开启车库顶部的排风机排风。排风机采用防爆电机。排风机和换气窗也可以通过控制箱上的控制按钮手动操作。

2) 燃料电池汽车防静电设施

燃料电池汽车车体底部设有接地导线。这些接地导线可以将加氢时及汽车行驶过程中产生的静电泄放回大地,以保证整车的安全。

3) 燃料电池汽车防爆措施

燃料电池汽车上的氢检测传感器均选用防爆型,氢安全处理系统中所用的继电器选用防爆固态继电器,一方面可以避免继电器动作时产生电弧,另一方面可以防止机械式继电器由于客车行驶中的振动引起误动作。当氢安全系统报警时,汽车上严禁使用电源插座、接触器、继电器以及机械开关等可能引起电弧的用电装置,以确保安全。燃料电池汽车存有氢气时,车内严禁进行电焊等可能引起火花、电弧的操作。

4) 燃料电池汽车氢安全操作规程

根据实验过程和步骤,制定严格的氢安全操作规程,主要有:

- (1) 严禁在车库内对燃料电池汽车进行大规模的加氢操作。
- (2) 发动机启动前,对管路的气密性检查。
- (3) 调试及发动机启动前用氮气吹扫管路。调试时必须由专人配备便携式氢浓度探测仪检查氢泄漏情况。
- (4) 雷雨天气禁止做氢气系统调试及实验。
- (5) 任何工作人员发现安全问题有权要求停止调试等。

在调试及燃料电池汽车进库、出库过程中要严格遵守用氢安全规程,以确保安全。

5) 氢安全标准和规范

虽然氢燃料电池汽车的研究和开发主要是近几年的事,但国际上有关燃料电池汽车氢安全技术标准和规范的工作非常活跃。因此,有关燃料电池汽车氢安全的研究工作必须引起研究人员的重视,以适应氢燃料电池汽车研究和推广应用不断发展的迫切需求。

国际上有关燃料电池汽车氢安全技术标准和规范主要国际组织有:

国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO),
国际电工委员会(International Electrotechnical Committee, IEC),
美国汽车工程师学会(Society of Automobile Engineer, SAE)。

ISO 相关标准(或讨论稿)如下:

- ISO/ DIS 13985 液氢—车用燃料罐;
- ISO/ WD 15866 气态氢混合物和氢燃料—加氢站;
- ISO/ CD 15869 气态氢混合物和氢燃料—车用燃料罐;
- ISO/ WD PAS 15916 氢系统安全基本要求;
- ISO/ AWI 17268 气态氢—车用加氢连接装置;
- ISO 6469 道路电动车辆安全细则。

IEC TC 105 相关标准(或讨论稿)有:

- WG1 术语;

WG2 燃料电池模块;
WG3 固定用燃料电池安全性;
WG4 性能;
WG5 安装;
WG6 动力系统;
WG7 便携式燃料电池。

SAE 相关标准(或建议稿)如下:

J2578 燃料电池汽车总体安全操作建议;
J2579 燃料系统安全操作规程建议;
J2600 高压氢加注连接装置。

例如,IEC TC 105 (燃料电池动力系统安全总则)和 SAE J2578(燃料电池汽车总体安全操作建议)中,都对通风提出以下要求:通风速率的设计原则是保证可燃气体的浓度低于最低燃烧极限的 25%;强制通风时,要有开启通风气流和关闭燃料源的互锁装置等。

参考文献

- 1 陈丹之.氢能.西安:西安交通大学出版社,1999
- 2 申泮文.21世纪的动力氢与氢能.天津:南开大学出版社,2000
- 3 车载氢源基础设施预研报告.中科院大连化学物理研究所,2002
- 4 李青,杨健慧,李强.实用氢能源基础设施系统.中国科学院理化技术研究所,2002
- 5 Ogden J M, Steinbugler M M, Kreutz T G. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. Journal of Power Sources, 1999, 79: 143 ~ 168
- 6 Michel F, et al. On-board equipment for liquid hydrogen vehicles. Hydrogen Energy, 1998, 23 (3): 191 ~ 199
- 7 Joan M. Ogden. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24: 709 ~ 730
- 8 <http://www.fuelcells.org/fct/buses.pdf>

附录

国内外电动汽车标准目录

1	GB/ T 18332 .1—2001 电动道路车辆用铅酸蓄电池
2	GB/ T 18332 .2—2001 电动道路车辆用金属氢化物镍蓄电池
3	GB/ T 18333 .1—2001 电动道路车辆用锂离子蓄电池
4	GB/ T 18333 .2—2001 电动道路车辆用锌空气蓄电池
5	GB/ T 18384 .1—2001 电动汽车 安全要求 第1部分:车载储能装置
6	GB/ T 18384 .2—2001 电动汽车 安全要求 第2部分:功能安全与故障防护
7	GB/ T 18384 .3—2001 电动汽车 安全要求 第3部分:人员触电防护
8	GB/ T 18385—2001 电动汽车 动力性能 试验方法
9	GB/ T 18386—2001 电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法
10	GB/ T 18387—2001 电动车辆的电磁场辐射强度的限值和测量方法 带宽 9kHz ~ 30MHz
11	GB/ T 18388—2001 电动汽车 定型试验规程
12	GB/ T 18487 .1—2001 电动车辆传导充电系统 一般要求
13	GB/ T 18487 .2—2001 电动车辆传导充电系统 电动车辆与交流/直流电源的连接要求
14	GB/ T 18487 .3—2001 电动车辆传导充电系统 电动车辆与交流/直流充电机(站)
15	GB/ T 18488 .1—2001 电动汽车用电机及其控制器技术条件
16	GB/ T 18488 .2—2001 电动汽车用电机及其控制器试验方法
17	ISO 6469 .1—2001 电动道路车辆 安全要求 第1部分:车载储能系统
18	ISO 6469 .2—2001 电动道路车辆 安全要求 第2部分:功能安全方式和故障防护
19	ISO 6469 .3—2001 电动道路车辆 安全要求 第3部分:人员触电防护
20	ISO 8713—2002 电动道路车辆 词汇
21	ISO 8714—2002 电动道路车辆 参考能量消耗量和续驶里程 乘用车和轻型商用车
22	ISO 8715—2001 电动道路车辆 道路操纵特性
23	IEC 60718—1997 电动道路车辆的供电设备
24	IEC 60783—1984 电动道路车辆的电缆和连接器
25	IEC 60784—1984 电动道路车辆用仪表

续表

26	IEC 60785—1984 电动道路车辆用旋转电机
27	IEC 60786—1984 电动道路车辆用控制器
28	IEC 61382—1—1996 电动道路车辆驱动用镍镉可充电电池和蓄电池 第1部分 动态放电性能试验和动态耐久性试验
29	IEC 61851 .1—2001 电动道路车辆传导型充电系统 第1部分 一般要求
30	IEC 61851 .21—2001 电动道路车辆传导型充电系统 第21部分 电动车辆与直流/交流连接要求
31	IEC 61851 .22—2001 电动道路车辆传导型充电系统 第22部分 电动车辆交流充电站
32	IEC 62196 插头、插座、车辆耦合器和车辆接口——电动车辆传导充电
33	SAE J551/ 5—1997 电动汽车电磁场强度(带宽 9kHz~30MHz)的特性和测量方法
34	SAE J1495—2001 蓄电池火花延缓通风系统试验规程
35*	SAE J1634—1999 电动汽车能量消耗和续驶里程试验方法
36	SAE J1654—1994 高压电缆
37*	SAE J1666—1999 电动汽车加速、爬坡能力和减速试验方法
38	SAE J1673—1996 电动汽车高压电缆设计
39	SAE J1711—1999 混合动力汽车排放和能量消耗量试验方法
40	SAE J1715—1994 电动汽车术语
41	SAE J1718—1997 电动乘用车和轻型货车蓄电池充电期间氢气排放物的测量方法
42	SAE J1766—1998 电动和混合动力电动车辆蓄电池碰撞完整性试验推荐规程
43	SAE J1772—2001 SAE 电动车辆传导充电连接器
44	SAE J1773—1999 SAE 电动车辆感应充电连接器
45	SAE J1797—1997 电动车辆蓄电池组组装的推荐规程
46	SAE J1798—1997 电动车辆蓄电池组性能评价的推荐规程
47	SAE J2288—1997 电动车辆蓄电池组循环寿命试验
48	SAE J2289—2000 电驱动蓄电池包系统功能要求
49	SAE J2293 .1—1997 电动汽车能量转换系统 第1部分:功能安全和系统构造
50	SAE J2293 .2—1997 电动汽车能量转换系统 第2部分:通讯信号和功能要求
51	SAE J2344—1998 电动车辆安全导则
52	SAE J2380—1998 电动车辆蓄电池的振动试验
53	SAE J2464—1999 电动车辆蓄电池滥用试验

续表

54	SAE J2574—2002 信息报告 燃料电池电动汽车术语	
55	SAE J2578—2002 燃料电池汽车一般安全的推荐规程	
56	SAE J2600—2002 压缩氢气车辆燃料连接装置	
57	SAE J2711—2002 大型混合动力汽车、传统汽车能量消耗及排气污染物试验方法推荐规程	
58	JEVS C 601—2001 电动车辆充电用插头插座	
59	JEVS Z 101—1987 电动车辆试验方法通则	
60	JEVS Z 102—1987 电动汽车最高速度试验方法	
61	JEVS Z 103—1987 电动汽车续驶里程试验方法	
62	JEVS Z 104—1987 电动汽车爬坡能力试验方法	
63	JEVS Z 105—1988 电动汽车能量消耗量工况试验方法	
64	JEVS Z 106—1988 电动汽车能量消耗量等速试验方法	
65	JEVS Z 107—1988 电动汽车电动机及控制器联合试验方法	
66	JEVS Z 108—1994 电动汽车 续驶里程及能量消耗的测量(充电器充电)	
67	JEVS Z 109—1995 电动汽车 加速性能的测量	
68	JEVS Z 110—1995 电动汽车 最大巡航速度的测量	
69	JEVS Z 111—1995 电动汽车 参考能量消耗的测量(电池输出)	
70	JEVS Z 112—1996 电动车辆爬坡试验方法	
71	JEVS Z 901—1984 电动车辆 技术参数标准格式(主要技术参数表)	
72	JEVS Z 804—1993	电动汽车 控制器、指示器和信号装置的标志
	JEVS Z 804—1988	
73	JEVS Z 801—1985	电动汽车术语 车辆
	JEVS Z 805—1998	
74	JEVS Z 803—1986	电动汽车术语 电机和控制装置
	JEVS Z 806—1998	
75	JEVS Z 802—1988 电动汽车术语 电池和充电器	
	JEVS Z 807—1998 电动汽车术语 电池	
76	JEVS Z 808—1998 电动汽车术语 充电器	
77	JEVS Z 901—1995 电动车辆 技术参数标准格式(主要技术参数表)	
78	JEVS E 701—1994 电动汽车 电动机及控制器联合驱动测量	

续表

79	JEVS E 702—1994 电动汽车车上使用的等效电机的动力测量(扭矩和速度测量)
80	JEVS D 001—1995 电动汽车铅酸蓄电池尺寸和构造要求
81	JEVS D 002—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池尺寸和构造
82	JEVS D 701—1994 电动汽车铅酸蓄电池的容量试验方法
83	JEVS D 702—1994 电动汽车铅酸蓄电池的能量密度试验方法
84	JEVS D 703—1994 电动汽车铅酸蓄电池的功率密度试验方法
85	JEVS D 704—1997 电动汽车铅酸蓄电池工况寿命试验方法
86	JEVS D 705—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池容量试验方法
87	JEVS D 706—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池能量密度试验方法
88	JEVS D 707—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池特殊功率和峰值功率密度试验方法
89	JEVS D 708—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池特殊功率寿命试验方法
90	JEVS D 709—1999 电动汽车用镍金属混合密封蓄电池放电容量试验方法
91	JEVS D 710—2002 电动汽车电池充电效率试验方法
92	JEVS D 711—2003 混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池容量试验方法
93	JEVS D 712—2003 混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池能量密度试验方法
94	JEVS D 713—2003 混合动力汽车用密封型 Ni-MH 电池输出及输入密度试验方法
95	JEVS G 101—1993 电动汽车 在经济充电站的快速充电系统的充电能力
96	JEVS G 102—1993 电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的铅酸蓄电池
97	JEVS G 103—1993 电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的充电接头
98	JEVS G 104—1995 电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用通讯协议
99	JEVS G 105—1993 电动汽车 在经济充电站的快速充电系统使用的连接器
100	JEVS G 106—2000 电动车辆感应充电系统一般要求
101	JEVS G 107—2000 电动车辆感应充电系统人工连接器
102	TG G101—1997 电动汽车用 AC200V 充电系统
103	TG G102—2001 电动汽车充电设备安装要求
104	TG D001—1999 电动汽车用 VRL 蓄电池安全导则
105	TG Z001—1999 电动汽车充电信息安全显示导则
106	TG Z002—1999 电动汽车高电压部件安全显示导则
107	TG Z101—1999 电动汽车电能量测量方法

续表

108	JIS D1301—2001 电动汽车续驶里程及燃料消耗率试验方法
109	JIS D0112—2000 电动汽车术语 车辆
110	JIS D0113—2000 电动汽车术语 电机和控制装置
111	JIS D0114—2000 电动汽车术语 电池
112	JIS D0115—2000 电动汽车术语 充电器
113	EN 1821 .1—1996 电驱动道路车辆 道路操纵特性试验方法 第 1 部分:纯电动汽车
114	EN 1821 .2—1999 电驱动道路车辆 道路操纵特性试验方法 第 2 部分:热电混合动力汽车
115	EN 1986 .1—1996 电驱动道路车辆 能量特性测量方法 第 1 部分:纯电动汽车
116	EN 1986 .2—1996 电驱动道路车辆 能量特性测量方法 第 2 部分:热电混合动力汽车
117	EN 1987 .1—1997 电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 1 部分:车载储能装置
118	EN 1987 .2—1997 电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 2 部分:功能安全方式和故障防护
119	EN 1987 .3—1998 电驱动道路车辆 安全特殊要求 第 3 部分:用户触电防护
120	EN 12736—2001 电驱动道路车辆 车载充电器充电过程中传播噪声 声音功率水平的测量
121	EN 13444 .1—2001 电驱动道路车辆 混合动力汽车排气测量 第 1 部分:热电混合动力汽车
122	EN 13447 .1—2001 电驱动道路车辆 术语
123	ECE R100 关于在结构和基本安全方面电动车辆型式认证的统一规定
124	ECE R83 HEV 排气污染物测量补充规定
125	ECE R101 HEV 能耗测量补充规定

注:

1.“*”所注标准由于在 ISO 提出的新标准中涵盖了相关部分内容,已于 2003 年作废,但由于其内容比较详细,这里仍然引入作为参考。

2.“TG”为日本电动车协会技术导则;“JEVS”和“JIS”为日本标准;“EN”为欧洲标准。