
第一项

(注: 此处的“一”及后面的其他数字, 只是代码, 不具有序号含义)

多功能压杆试验台及压杆实验

——介绍一种多功能的小型力学试验台

——揭示压杆支承方式对其承载力的显著影响

1 研制目的·概况·升级

本试验台的原型, 是针对材料力学教学中的一个难点, 又是一个重点内容——压杆稳定而研制的。其目的是增加学生对压杆承载及其平衡状态的感性知识, 加深对压杆承载特性的认识; 为帮助学生理解理想压杆是实际压杆的一种抽象, 并正确认识二者的联系与差别; 并使学生亲身感受 and 实际量测不同的支承条件(约束), 对同一压杆承载力的显著影响。所以, 该设备一投入教学实验, 就深受学生的欢迎。

本装置由试验台台体、多功能弹性压杆试件和上、中、下三套支座组成。在实验时可由学生自主组装成几十种支承方式的压杆。试件用弹簧钢制作, 它的允许变形很大, 因此, 压曲后的挠曲线特征十分明显。且在此基础上, 随着新型力学实验教学系列项目的研制和投入使用, 该试验台的用途不断拓宽, 除压杆承载力测定、压屈现象及挠曲线特征的观察实验之外, 还可兼做其他力学实验与小型结构的静载实验。

经过近十年的不断改进和完善, 逐步实现了数字化和智能化。该实验台的最新型号, 已配备**多功能力学实验系统**, 即在原先的通过电脑实现力与位移数据自动采集、存储, 自动绘图、打印等功能的基础上, 又增加了 16 通道应变自动采集的软硬件设置, 并预留出继续扩充的功能, 以方便多点应变测量(尤其是小型结构试验), 并能自动形成读数差列表。这样就可使实验者摆脱反复的“拨点—读数—记录—算读数差”等烦琐的事务性工作, 以使大家的精力集中于实验现象的观察、思考与分析, 从而提高了实验课的效益和趣味性。

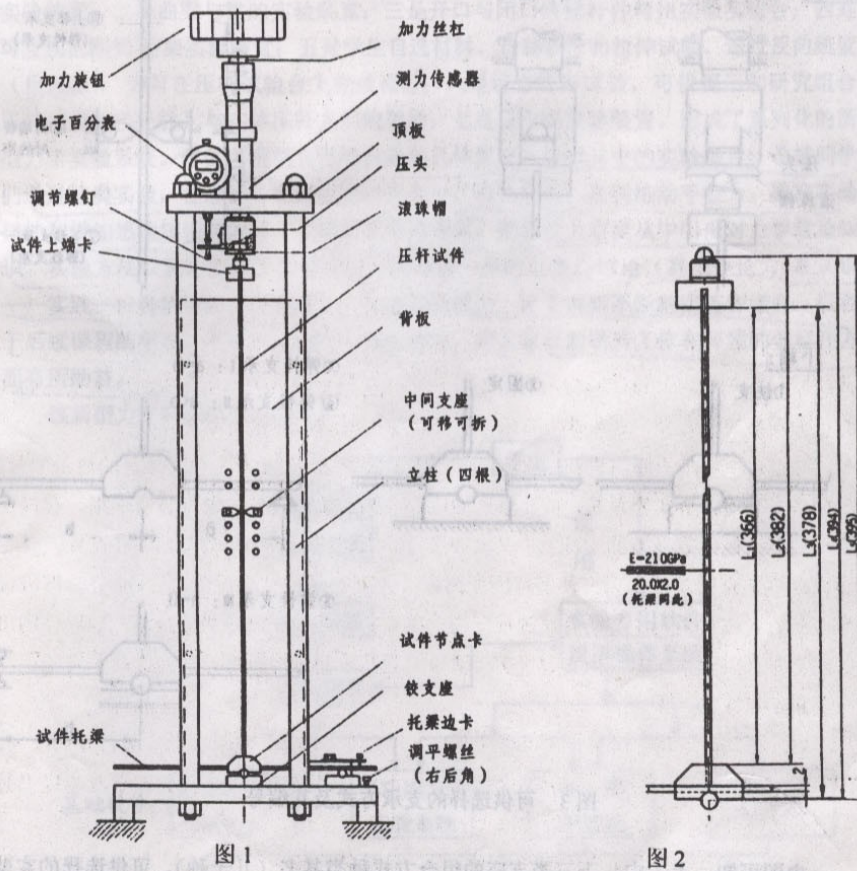
由此可知, 该装置已是一种相对价廉的台式力学实验仪, 利于实验室多台并列配置, 利于学生动手和自主实验。这就为今后的材料力学(及结构力学)实验教学改革提供必要的基础性硬件, 也是日后开展虚拟力学实验的前期工作。

此外, 这套实验系统中的自动量测仪器, 其功能已超越了实验台自身的要求。它可**单独作为自动化的静态应变多点测量系统使用**, 且只需低档计算机的支持。这也体现了

我们对实验教学设备的设计意图——机多用，多重选择，预留发展空间。

2 结构与功能简介

2.1 结构 试验台的结构简图如图1所示。它由底板、顶板和四根立柱构成加力架。在顶板上安装了加力和测力系统。采用螺旋加力方式，拧进顶部的旋钮使丝杠顶推压头向下运动，即可对试件加载。测力传感器中的弹性敏感元件置于丝杠和压头的芯轴之间。位移传感器为机电百分表^{*}，也装于顶板，通过承托卡感知压头的位移。这两种传感器的弹性元件上的电阻应变片均联接成全桥电路，输出的应变信号电缆接入仪器的相应插



* 不同于一般机械百分表，它内部有一根贴了应变片的悬臂梁，借以输出位移信号。

座，经放大和模数(A/D)转换，在计算机上直接显示为力值和位移值。多功能的弹性压杆试件如图2所示，其压杆和托梁均由弹簧钢制成，经热处理后具有很高的强度，故允许变形量很大。用节点卡将二者正交固接。试件上端装有接头卡。压杆经特殊工艺磨制，初曲率极小。各种支承条件下压杆计算长度，请参考图中的有关尺寸(L_1)。

试验台配备的支座有：下铰支座2副；中间支座卡1副；上铰支座(滚珠帽)1个。并配木质仪器箱一个，便于保管。

2.2 支承方式 供实验时选择压杆支承方式及其编号如图3所示。

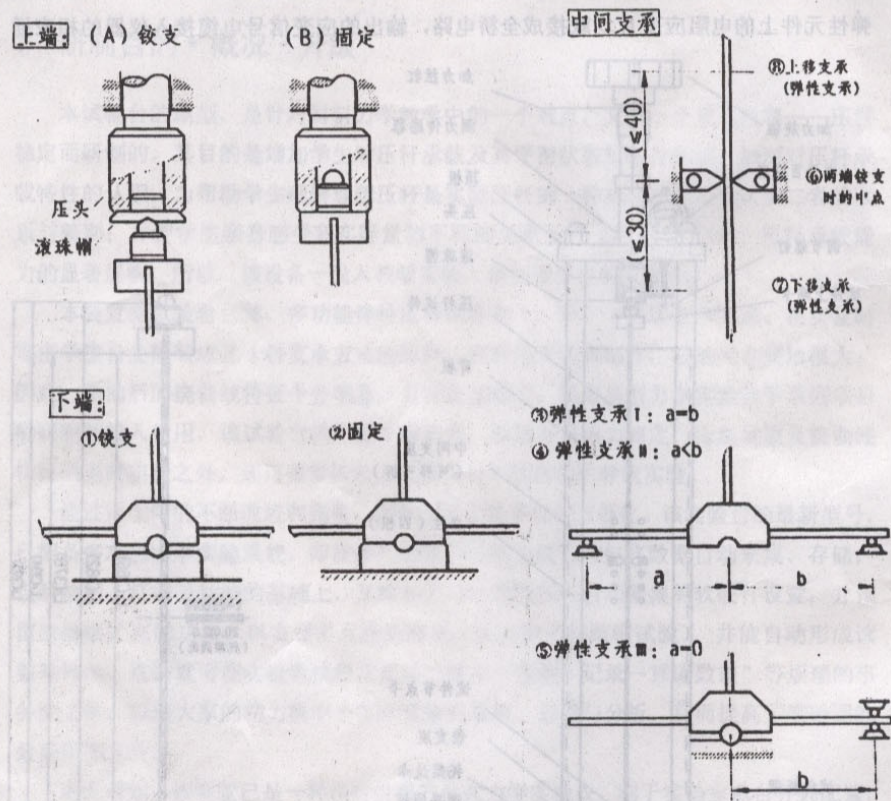


图3 可供选择的支承方式及其编号

由图可知，上、中、下三类支座的组合方式种类甚多(几十种)。可供选择的实验项目，除几种典型的约束条件($\mu=0.5, 0.7, 1.0$ 和两端铰支加中点支承)之外，还可做各

种弹性支承条件下的定性和定量（压杆承载力测定）试验，学生选择的余地很大，也便于因材施教，分类指导。

3 主要技术数据

试验台重：10kg

外形尺寸：200×200×610mm³

最大荷载：3kN

压头的最大行程：16mm

测力传感器示值误差：≤2%

轴向位移测量误差：≤0.05mm

台体顶、底板中心偏离：≤1mm

试件截面尺寸：20×2mm²（各特征长度已标注于图2）

试件材料为弹簧钢(60Si2Mn)并经热处理，其弹性模量： $E=210\text{GPa}$

试件初弯曲（ δ/L ）：≤1/10,000

4 实验操作与指导

4.1 实验准备

首先预习本实验指导书，课前选定实验方案，计算相应的临界力。对于弹性支承情况，还须试作稳定分析。实验操作步骤：

① 按图3安装、调整支座，并仔细检查是否符合设定状态。调整底板调平螺丝（右后角），使台体稳定。

② 将力和轴向位移传感器电缆接入仪器（图4）的相应输入口，接好与计算机并口的连接电缆和电源线，打开电源开关。实验前仪器已作好力与位移的标定，计算机上显示的数值即为力值（N）和位移值（mm）。

③ 本实验只用到该仪器中的力与位移数据采集。实验时，只需在屏幕上调用“MultiTest.exe”（多功能力学实验系统）程序。随之出现主窗口，列出四种实验类型：压杆、应变测量、拉伸和重新校准等。单击压杆实验的图片，即弹出各种压杆实验方案菜单，其中模式1~4为典型约束，模式5为各种弹性约束情形。若要阅读程序使用说明书，只需单击“说明书”按键即可弹出（或见本书后面的附录）。

4.2 定性实验·观察与思考

当试验模式选定之后，系统进入压杆试验窗口，单击“准备实验”，系统显示出实时的荷载位移数值，这时要进行荷载，位移传感器初始状态的调整。

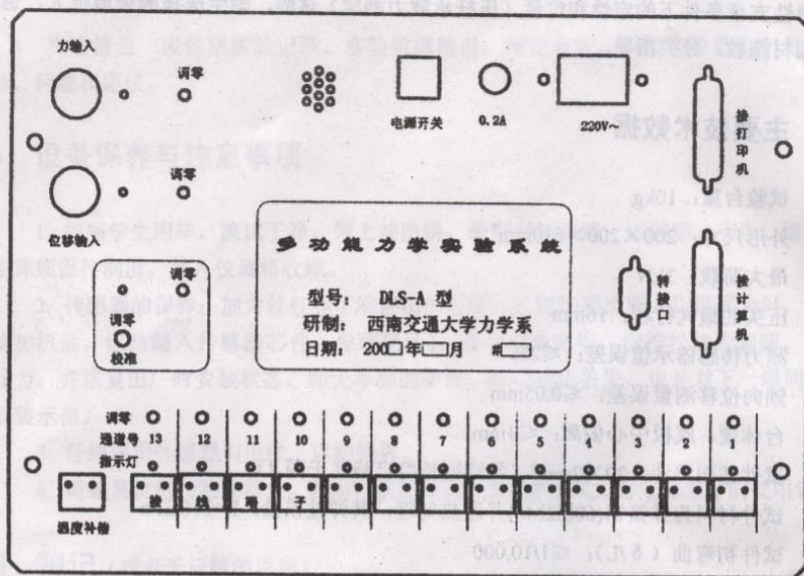


图 4

设定初始状态：松开加力旋钮，再慢慢拧进，当见到所显示的力值稍微改变时，即可调整百分表下的调节垫，使百分表指针读数达到 5mm 左右。用螺丝刀分别调整力与位移的调零电位器，使屏幕显示的力与位移值接近于零（或最小）。

开始实验：为了消除零点偏离对实验结果的影响，先单击“零点读数”，系统自动记录实时的零点数值并在尔后的读数中予以扣除。再单击“开始实验”，设备进入试验状态。缓慢地转动加力旋钮加力，反复观察试件变形现象及弹性曲线特征；体味加力时的手感，注意有无突然松弛、试件突然变弯、压力突然下降现象？若有，则是此时试件是从直线状态平衡瞬即跳至微弯状态平衡（参见[附记 1]）。注意观察在继续拧进时的读数及计算机屏幕显示的力与位移（ $P-\Delta$ ）曲线与此前有何变化等情况，反复数次。每次加载结束时，须按“停止实验”键。应轮换操作，使大家都能亲身感受这类现象，并熟悉操作。

★ 思考与讨论

① 这个加载过程中，压杆平衡状态的性质（状态的稳定性）有何变化？如何解释平衡状态“跳跃”的机理？为何在有的情况下却又没有这种现象？

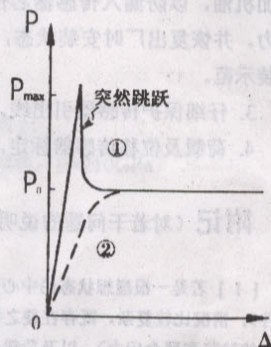
② 仔细对比每次出现的峰值 P_{max} ，可见到该值是不稳定的；有时甚至差别很大，为什么？它是否对应于理想压杆的 P_{cr} ？

③ 试件压弯之后，尽管你不断地强迫试件增加变形量^{*}，但荷载，或者说试件的抗力却变化不大。能否说在这种**变形式试验机**^{**}上的压杆，弯曲后的平衡状态仍是稳定的？假若施加的荷载是重力的话，那将是什么情况？进一步思考：静定桁架和超静定桁架中的压杆失稳的后果有何差别？

④ 在你所选择的支承条件下，压杆长度 L 是多少？应取何值才比较合理？其原则是什么？（参见图 2 及后文的[附记 2]）

4.3 定量实验

重新仔细调整试件的安装，确认它符合你的支承状态；再调力 P 和位移 Δ 的零点；按照前述的加载操作，先慢(直线状态)，后快而连续地加载，计算机即可采集并画出一条较好的曲线，同时显示所采到的最大荷载 P_{\max} 和压杆的极限荷载 P_{jx} 值。请注意，在程序中设定的 P_{jx} 是当柱顶的轴向位移 Δ 达到你所设定的最大值 Δ_{\max} 的 30% 时的力值，如你不满意，可单击“屏幕处理”的下拉菜单中的“曲线取数”。鼠标在屏幕上呈一个“+”号，移动至曲线上你所认定的点处，单击即自动填入 P_{jx} 的新值，形成你所满意的记录，予以保存。以上的实验过程应重复多次，方可鉴别。实验完毕，打印结果或存盘，回去整理分析。



实验中计算机根据所采集的数据，绘出的曲线，可有如图 5 中①、②两种形态（参见[附记 2]）。

图 5 $P-\Delta$ 曲线的可能形态

★ 思考与讨论：

由图 5 可见，实验中的压杆可能出现两个特征压力值 P_{\max} 和 P_0 ，为什么不应将 P_{\max} 而将 P_0 作为实验压杆的极限承载能力的衡量指标 (P_{jx})？为什么 P_{jx} 与相应的理想压杆临界力 P_{cr} 值相对应？

★ 实验结果整理（参考格式）

支承方式	杆件长度 $L(\text{mm})$	柔度 $\lambda = \mu L / i$	理论临界力 $P_{cr}(\text{N})$	极限荷载 $P_{jx}(\text{N})$	$\frac{P_{cr} - P_{jx}}{P_{cr}} \cdot 100\%$

^{*} 为简化测量装置，在此采用轴向位移 Δ 替代试件的侧向位移（挠度） f ，因为二者在数学上是相关的。例如，在两端铰支条件下，其关系式为 $f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\Delta}$ 。推导见后面的[附记 3]。

^{**} 指采用机械或液压装置，强迫试件变形的试验机，而将试件对夹具（压头）的抗力大小，当作施加于试件的“荷载”值。现代试验均采用此加载方式。它有别于老式的砝码—杠杆系统的重力式加载方式。前者为一超静定系统的内力，后者为静定系统的外力。

4.4 实验报告 应包括实验记录、实验数据整理,理论分析,以及实验后的印象、思考、问题和建议。

5 设备保养与注意事项

1. 每届学生用毕,擦试干净,须上油防锈,最好用布擦抹一层硅脂;支座、滚轴及滚珠须保持润滑。装入仪器箱收藏。

2. 传感器的保养:加力丝杠和下端伸出的芯轴,只能加润滑脂(用硅脂为好,不能滴加机油,以防漏入传感器芯件,导致损坏)。每次实验完毕,应拧松加力旋钮,不使受力。并恢复出厂时安装状态,即无单独的零件。既可防止丢失,也是对下一组同学作安装示范。

3. 仔细保护传感器引出线,以防损坏。

4. 荷载及位移传感器标定,需用荷载标定器,详见挂框式力标定器盒中的使用说明。

6 附记(对若干问题的说明)

[1] 若是一根理想状态的受压直杆,则不会发生弯曲变形。而实际的受压杆(如本实验中的试件),情况比较复杂,既存在使之被压屈的因素,诸如自身的初弯曲,材质的不均匀性(包括内部或表面的缺陷和残余应力),以及荷载偏心等;又有阻碍其被压弯的附加约束,如各种形式的摩擦因素。本实验所用的试件,在加工(选材、热处理和磨制)与安装中,由于采取一系列的工艺措施,使偏心因素降至最低,加上必然存在的杆端摩擦(铰支时,即使有润滑脂,其初始的静摩擦仍不可小视,只有当杆端力矩超过最大静摩擦力矩时方能转动);若试件安装位置恰当,便可达到很高的初始承载力(甚至数倍于欧拉临界力),杆件仍无显见的弯曲, $P-\Delta$ 关系也呈现为直线。当压杆(系统)内能达到一定水平,打破前述两种长消因素的平衡之后,就会突然弯曲,抗力突降,而后维持一段相对稳定的过程。如你选一端或两端固结的情形,则不易找准位置,容易造成初始偏心,也就见不到上述现象了。

[2] 确定压杆长度,实际上是一个压杆的计算简图问题,也是力学在工程应用中遇到的首要问题。从临界力的公式可知,压杆长度 L 是一个很敏感的值。在本实验中,两端固结的情形最为简单, L 等于可变形部分的长度 (L_1)。两端铰支时,则宜取铰支中心的距离 (L_2)。因为,虽然它的两端接头部近乎刚性,但当它发生转动之后,会导致可变形段的端部偏离压杆轴线,产生附加的端弯矩,增加了全杆的变形。况且,即使端部不加粗,也因为该段弯矩很小,所以该局部刚度大小的影响,远小于偏转所致的弯矩对整根压杆的变形和承载力的影响。因此选 $L=L_2$ 是合理的。理解了这两种情形,其他支承条件下的杆长确定也就没有问题了。

[3] 柱顶轴向位移 Δ 与最大侧向位移 f 的关系的推导。不同支承条件下 $\Delta-f$ 关系有所不同,现以两端铰支为例(图6)。令原杆长为 l ,最大挠度为 f ,杆端沿轴向位移为 Δ ,任意点 x 处侧向位移为 y ,有 $y = f \sin \frac{\pi x}{l}$, $y' = \frac{\pi f}{l} \cos \frac{\pi x}{l}$ 。挠曲后的轴线 S 的微段 $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + y'^2}$, 设 $l = S$ (弹性压杆,压屈时轴向平均应变很小), 所以有

$$l = \int_A^B ds = \int_0^{l-\Delta} \sqrt{1+y'^2} dx = \int_0^{l-\Delta} (1 + \frac{1}{2}y'^2) dx \quad (\text{用马克劳林级数展开 } \sqrt{1+y'^2}, \text{ 取前二项})$$

$$= l - \Delta + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi f}{l} \right)^2 \int_0^{l-\Delta} \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx = l - \Delta + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi f}{l} \right)^2 (l - \Delta)$$

由此得 $\Delta \approx \frac{\pi^2}{4l} f^2$ 或 $f \approx \frac{2}{\pi} \sqrt{l\Delta}$ (因 $\Delta \leq f \leq l$, 此式精度很高, 尤其是在小位移条件下)

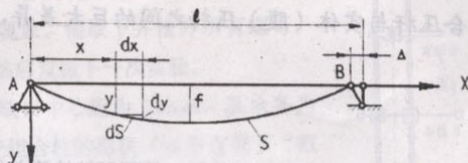


图 6