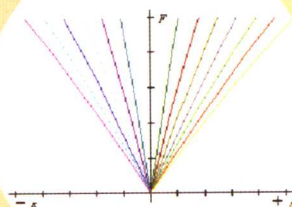


西南交通大学323实验室工程系列教材

材料力学综合实验

郑世瀛 陈时通 邢建新 著

CAILIAO LIXUE
ZONGHE SHIYAN



TB301-33

TB301--33

13

2006

西南交通大学 323 实验室工程系列教材

材料力学综合实验

郑世瀛 陈时通 邢建新 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书系为适应现代工科人才培养要求,加强实践教学环节,提供学生个性化发展空间,加强创新型、设计型实验的综合训练而编写的;也是作者自主研发的新型实验系统的使用指南。该系统是集力学、机械知识、电子信息技术和现代力学测试手段于一体的小型设备,并配备了具有明确工程背景的实验结构。它能深化力学知识,拓展学生思路,激发学生的浓厚兴趣,提高实验的效益,并含有科研和创新训练意味。

本书适用于工科力学教学,也可作为研究生和专科生的参考用书,还可作为非工科专业学生学习力学概论的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学综合实验 / 郑世瀛, 陈时通, 邢建新著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2006.8
(西南交通大学 323 实验室工程系列教材)
ISBN 7-81104-323-8

I. 材... II. ①郑...②陈...③邢... III. 材料力学
—实验—高等学校—教材 IV. TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 058040 号

西南交通大学 323 实验室工程系列教材

材料力学综合实验

郑世瀛 陈时通 邢建新 著

*

责任编辑 孟苏成

责任校对 陈雪霖

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 3.5

字数: 86 千字 印数: 1—3 000 册

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-323-8

定价: 7.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书所介绍的新型力学实验，其基础工作是新型实验的设计与实验装置的研制，而研制的思路则源于我们对实验教学改革目标的设想与期望。我们迄今在这个方向所迈出的一步，也仅是将思考与实践相结合的一种探索，尚需实际教学的不断考核和改进。

在力学课程的学习阶段，就设法引导学生接触工程实际中的力学问题，即接触实际承力结构（模型）的力学行为，并深入地思考和分析，从中积累一些重要的感性和理性知识储备。同时尽力给学生以主动权，以调动他们的学习积极性，改变传统的力学实验课指定学生实验的被动局面。

创造性人才的基础是扎实的基本理论和综合运用所学知识的能力。对理工科学生而言，还有非常重要的一点是动手能力的训练，让他们接触各种设备，了解其功能、原理和构造。以此为目标而开发的新型实验项目，其参加者首先面临的是“做什么？”，即需参考实验指导书，选择自己的实验内容；然后，做好实验前的理论准备和初步分析；进而构思和设计实验过程；在实验室完成安装、操作、反复试验，直至完成量测数据记录的全过程；最后，整理结果，经思考分析，写出书面报告并交流。事实上，在这个过程中，势必涉及广泛的各种实际操作技能，这无疑是对参与者诸多素养的训练和检验。至于面对实验结果，可能产生某种困惑，又经过努力走出困惑，获得新知，乃是一种可喜的回报。甚至遭遇挫折与失败，那更是一种磨砺和宝贵的成长经历。

这些新型实验，从内容到形式都应是开放式的。希望教师既是指导者，又能和学生一道，以参与者的姿态共同探讨，教学相长，使力学的理论教学和实验教学内容能与时俱进，推陈出新，不断完善，不断提高。

客观形势在发展，科学技术在进步，市场经济需要具有良好素质的创新型、综合型的又有个性特色的人才，这正是实验教学事业发展的良机。

诚然，转变观念，直至形成学校上上下下都广泛重视实验教学、研究实验教学，不断落实、提高实验教学质量 and 效益的氛围，可能还需一些时日。但社会的需求，必将催促它的不断成熟。

我们迄今所做的工作，仅仅是汇入这一事业中的点滴水源，甚或，仅作为一个“靶子”。有了它，可以试，可以点评，可以从中吸取教训，否则只是纸上谈兵。将来，纵使全否定了，也一定会有更好的新内涵、新形式取代它。犹如山巅之裸岩，风化、剥落，终为山下的林木增土、增肥。果若如此，吾心足矣！

作 者

2006 年 5 月

目 录

绪 论	1
第 1 项 多功能力学实验系统·压杆实验	
——介绍一种多功能力学试验系统及其使用、揭示压杆支承方式对其承载力的显著影响	3
1 研制目的	3
2 压杆试验台的结构与功能	5
3 主要技术数据	6
4 实验操作与指导	7
5 设备保养与注意事项	9
6 附记（对若干问题的说明）	9
第 2 项 组合压杆实验	
——揭示组合压杆与实体（腹）压杆之间的巨大差异，提供一种警示	11
1 研制目的	11
2 构造与试件安装	11
3 实验内容与操作	12
4 实验报告	13
第 3 项 可变夹角的桁架单元实验	
——揭示结构构形与其力学行为的关系、尝试预应力对结构行为的影响与分析	14
1 研制目的	14
2 结构简介	14
3 实验装置的主要参数	15
4 大夹角桁架实验	15
5 小夹角桁架实验（理论分析难度较大）	16
6 预应力条件下的试验（难度更大）	17
第 4 项 刚架与桁架实验	
——揭示计算简图与实际结构的关系	18
1 研制目的及结构简介	18
2 刚架实验	19
3 桁架实验 I（斜杆受拉）	21
4 桁架实验 II（斜杆受压）	22
5 桁架实验 III（斜杆受压，加预应力）	22
6 实验报告（对照、思考、分析与讨论）	22

第5项 叠合梁实验	
——浅尝力学中接触问题的复杂性	23
1 研制目的及结构简介	23
2 实验安装	24
3 实验方案与实验操作	24
第6项 曲梁与拱的实验	
——揭示约束条件与构件承载力的关系, 揭示超静定结构与静定结构的显著差异	26
1 研制目的	26
2 实验装置简介	26
3 实验装置的主要参数	27
4 二铰拱实验	27
5 简支曲梁实验	29
6 无铰拱实验	29
7 说明	29
第7项 自选材料的力学性能测定	
——扩大材料试验范围、拓宽材料知识	30
1 研制目的	30
2 反向器的构造	31
3 试样制备	31
4 实验操作	31
5 实验报告	31
第8项 薄壁杆件弯曲与扭转实验	
——揭示开口与闭口薄壁杆件力学行为的悬殊差异	33
1 研制目的	33
2 结构简介	33
3 挠度、扭转角与弯曲中心的测量及数据整理	34
4 提供选择的实验项目与操作要点	35
附录 多功能力学实验系统软件使用说明	37
1 主窗口	37
2 压杆试验	38
3 应变测量试验	41
4 拉伸试验	45
5 仪器校准	46
6 其他操作	48
参考文献	49

绪 论

实验教学和其他实践环节，事关未来人才的素质培养。为使同学们在材料力学的理论学习及前期实验的基础上，更进一步加深对工程结构或构件的承力、变形与平衡状态问题的理解，拓宽思路，特设计了一套新型力学实验系统，以支撑设计型、综合型实验的开设。

近年来，作者在原先研制的小型化力学实验装置——多功能压杆试验台的基础上，继续做了两方面的工作：第一，对该实验台进行了完善与升级，融入了现代信息技术，扩充了功能，使之成为多功能力学实验系统（见图 0.1），提高了训练的档次；第二，研制开发了若干套实验装置，它们都属于基础力学实验，又有明确的工程背景，且每套装置都含有多重实验方案，内容有深有浅，分析的难度有高有低，为同学们提供了广泛的选择余地，以利因材施教和探讨适合个性化发展的新型教学模式。

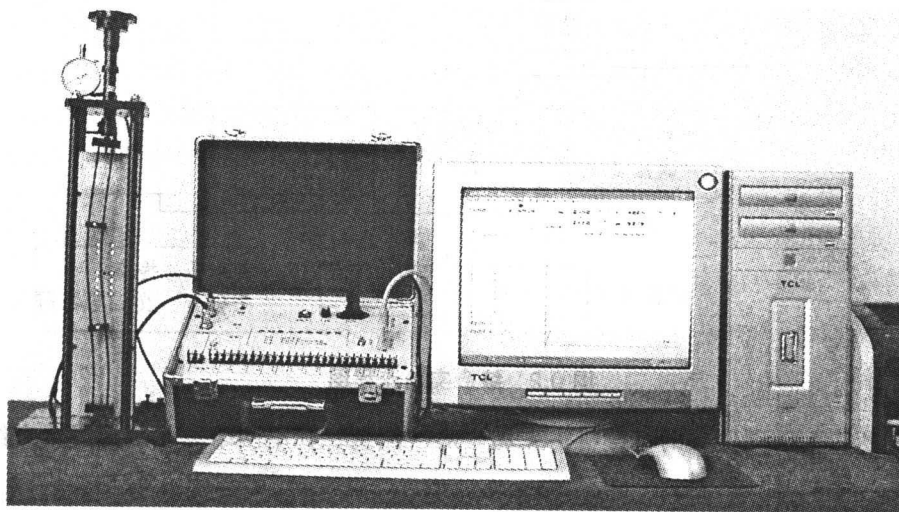


图 0.1 多功能力学实验系统

这些新型实验装置包括：

- (1) 弹性压杆实验：实腹压杆和组合压杆（模拟格构柱）·约束与承载能力。
- (2) 可变夹角的桁架单元实验：揭示结构构形与其力学行为的关系·线性与非线性。
- (3) 刚架与桁架试验：揭示结构计算简图与实际结构的相关性差异。
- (4) 叠合梁实验：浅尝力学中接触问题的复杂性。
- (5) 曲梁与拱实验：揭示静定与超静结构的悬殊差异。
- (6) 自选材料的力学性能测定：扩大实验材料范围，拓宽材料知识。
- (7) 薄壁杆件弯扭实验：揭示开口与闭口薄壁杆的悬殊差异。

同学们可根据自己的兴趣和具体情况，任选其中的实验项目来做。希望同学们通过这类

综合性实验，在理论与实践的紧密结合中，接受磨砺；在训练动手能力、提高实验技能和增加感性知识的同时，加深对理论的理解；更希望大家能从中引出对力学理论知识、实验方法以及它们在工程中的应用问题的进一步思考与讨论（甚或争论）；在认识—实践—再认识的不断循环中，锻炼和增强自己的能力与才干，以利于后续课程的学习；也希望通过这些教学环节，对大家日后尽快适应工作和环境的多样性方面有所助益。

下述的实验流程图（见图 0.2），可形象地归纳和呈现本综合实验的整个过程。从中不难看出，它实质上就是科研工作的雏形和预演。

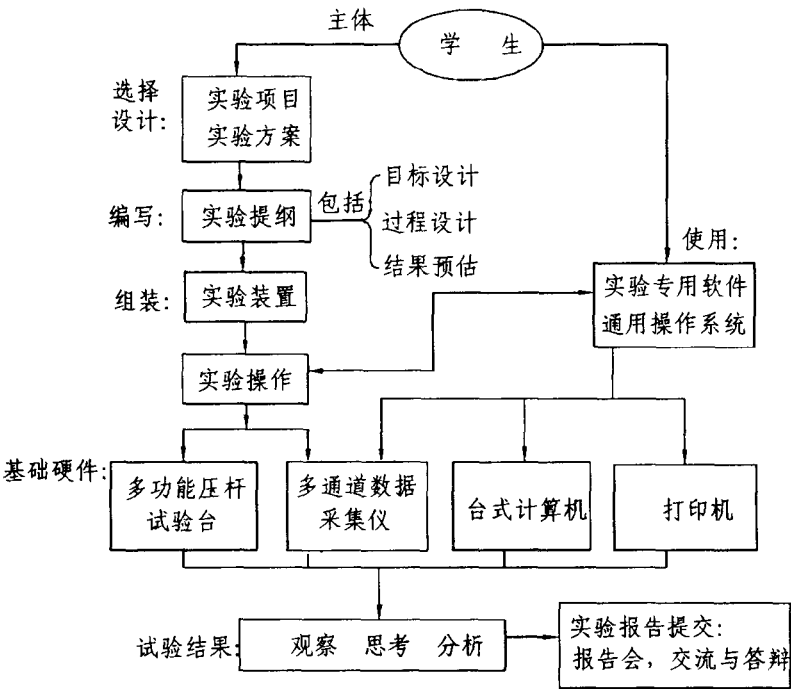


图 0.2 综合实验流程图

上图所列的基础硬件中的打印机，无需一对一配套，利用网络技术（无线或有线）可以方便地实现共享。

第 1^①项 多功能力学实验系统·压杆实验

——介绍一种多功能力学试验系统及其使用、
揭示压杆支承方式对其承载力的显著影响

1 研制目的

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；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；并使学生亲身感受和实际量测不同的支承条件（约束）对同一压杆承载能力的显著影响。

本系统的机械部分由四柱式压杆试验台台体、力及位移传感器、多功能弹性压杆试件和上、中、下三套支座组成。实验时，可由学生自主组装成近百种不同的支承方式的压杆。试件用弹簧钢制作，它的容许变形量很大，压曲后的挠曲线特征十分明显。在此基础上，随着新型力学实验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，如小型结构模型的静载实验。

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，已经是一套多功能力学实验系统（见图 0.1），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 通道的数据自动采集仪（见图 1.1），

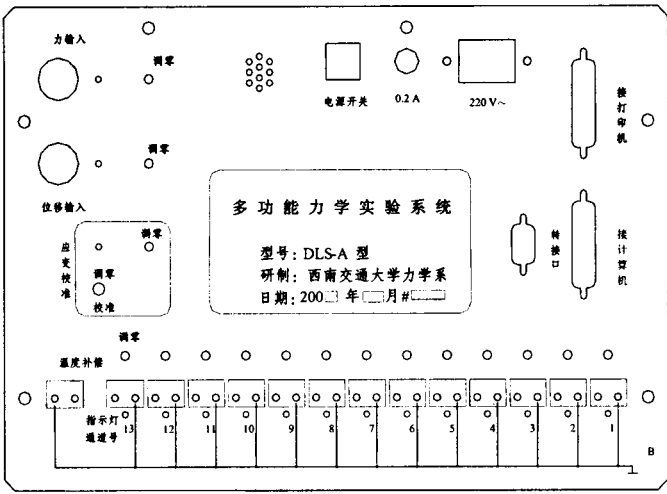


图 1.1 数据采集仪面板图

① 此处的“1”，只是代码，不具有实验顺序号含义，下同。

并完成了软件升级。同时预留出继续扩充的功能，以方便多点应变测量，尤其是小型结构模型试验，还能自动形成读数和读数差列表，实时绘出 $F-\Delta$ 及 $F-\varepsilon$ 曲线。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，以便在实验中集中精力于实验现象的观察、思考与分析。这不但提高了实验课的效益和趣味性，更有利于实验中的实时监控。实验记录格式如图 1.2 所示，多点应变测量的接线电路如图 1.3 所示。

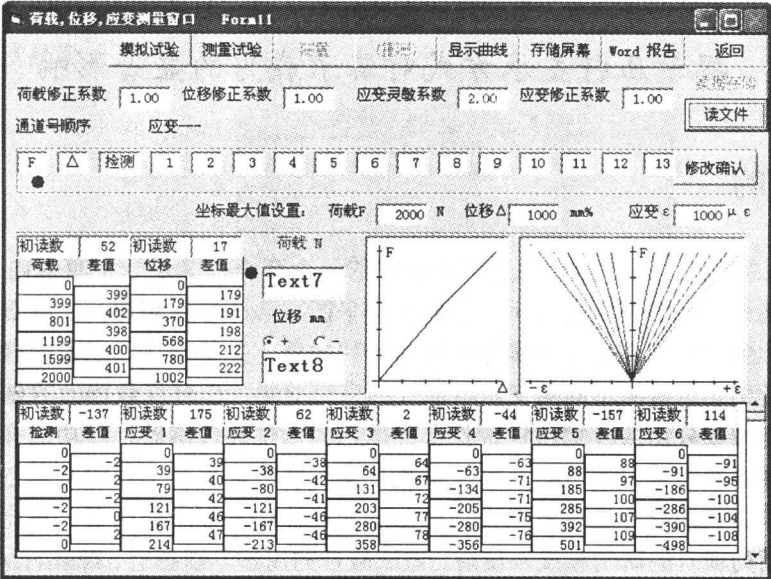


图 1.2 记录格式

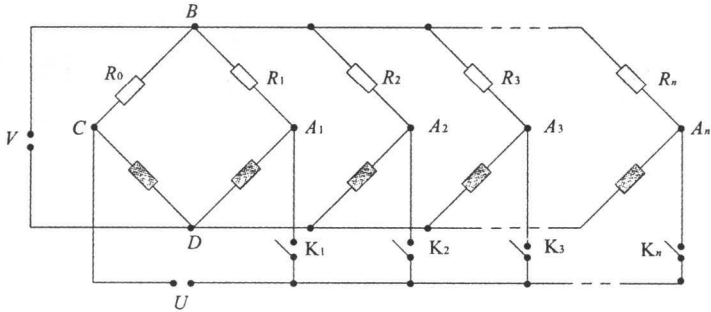


图 1.3 多点应变测量电路图

R_i ——工作片
 R_0 ——温度补偿片（共用）
——精密电阻（120Ω）
 K_i ——程控电子开关
 V ——供桥电源
 U ——电桥输出

由此可见，该装置已成为一种通用的台式力学实验仪，方便操作，利于实验室多台并列配置，并可组成局域网，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）实验教学改革提供了必要的基础性硬件，也为日后扩展学生视野、开展虚拟力学实验打下了基础。

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，它可单独作为程控应变仪使用，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——一机多用，多重选择，预留发展空间。

本系统的计算机软件使用说明，详见本书后面的附录。程序的文件名为 **MultiTest.exe**，它包括四类力学实验数据采集模式：压杆实验、应变测量实验、拉伸实验、仪器校准实验。

2 压杆试验台的结构与功能

2.1 结 构

多功能力学实验系统中的压杆试验台，其结构简图如图 1.4 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。拧进加力旋钮，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^①，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连接成全桥电路，输出的应变信号接入数据采集仪的相应插座，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 (实验前需做好校准工作)。

多功能的弹性压杆试件，如图 1.5 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，允许变形量很大，而且经特殊工艺磨制后，初曲率极小。下端用节点卡将试件和托梁正交固接，上端装有接头卡。各种支承条件下压杆的计算长度，请参考图中的有关尺寸 (L_i)。

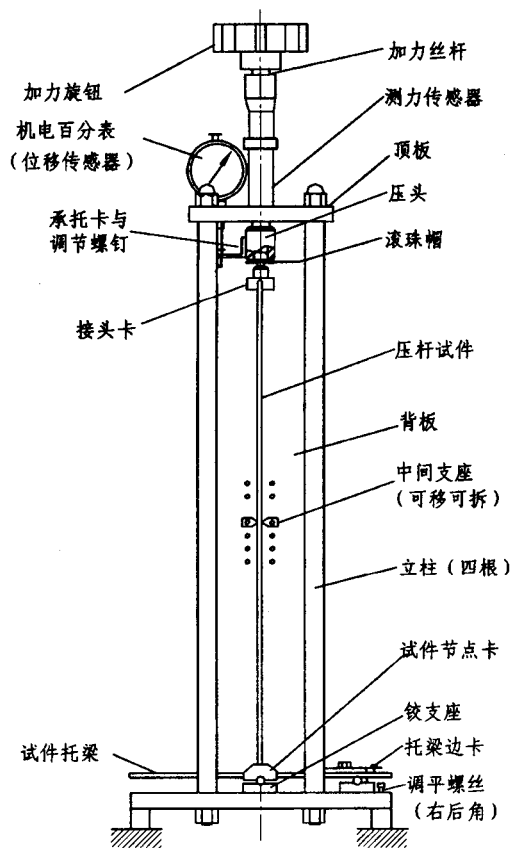


图 1.4 多功能压杆试验台

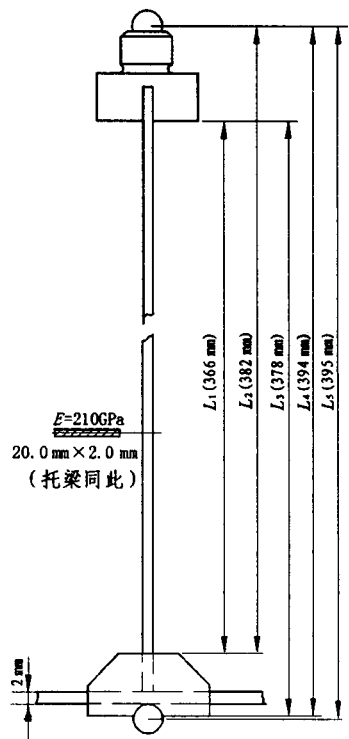


图 1.5 多功能压杆

① 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。

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 1 个，便于保管。

2.2 支承方式

供实验时选择压杆支承方式，如图 1.6 所示。

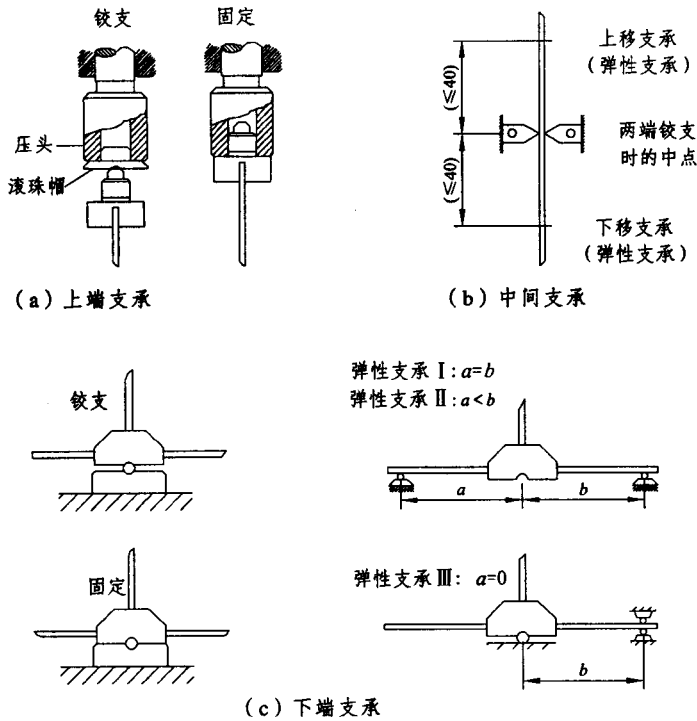


图 1.6 可供选择的支承方式及其编号

由图 1.6 可知，上、中、下三类支座的不同组合，构成了各种各样的实验项目（可达百种之多）以供选择。其中，除了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，同学们选择的余地很大，也便于老师因材施教，分类指导。

设计弹性支承的压杆实验，目的在于模拟刚架（框架）结构中承压柱的工作状态。其承载能力分析，在一般教材中未作介绍，无现成公式，需由同学们根据所学的压杆理论知识自行推导。这无疑是对该理论掌握程度的考核，虽有一定难度，但仍属于“蹦一蹦，够得着”的范围，是基础力学知识的一次综合应用训练。若能迎接这一挑战，通过自己的努力，登上这一台阶，定有助于夯实大家的力学基础。

3 主要技术数据

试验台重：10 kg
最大荷载：3 kN

外形尺寸：200 mm×200 mm×610 mm
压头的最大行程：16 mm

测力传感器示值误差： $\leq 2\%$ 轴向位移测量误差： $\leq 0.05\text{ mm}$

试件截面尺寸： $20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ （各特征长度已标注于图 1.5）

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

试件初弯曲（ δ/L ）： $\leq 1/10\,000$ ，其中 δ 为自身弯曲的中点挠度

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，计算相应的理论临界力，写出实验提纲。对于弹性支承情况，还须试做稳定分析。实验操作步骤如下：

（1）调整底板调平螺丝（右后角），使台体稳定。按图 1.6 安装压杆、调整支座，并仔细检查是否符合设定状态。

（2）将力和轴向位移传感器电缆接入仪器（见图 1.1）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轴向位移数据采集。实验时，只需在屏幕上调用“MultiTest. exe”程序，在主窗口所列的四种实验类型中，单击压杆实验的图片，即可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，只需单击主窗口上的“说明书”按键，即可弹出（或见本书后面的附录）。

4.2 定性实验

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和位移数值，指示灯往复跳动。这时要进行荷载和位移传感器初始状态的调整。

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螺钉，使百分表指针读数达到 5 mm 左右。用螺丝刀分别调整仪器上的力与位移的调零电位器，使屏幕显示的力与位移值大致接近于零。

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自动扣除。再单击“开始实验”，系统进入试验状态。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；体会加力时的手感；注意有无突然松弛、试件突然变弯、压力突然下降现象。若有，则试件此时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（ $F-\Delta$ ）曲线与此前有何不同等情况，反复数次。每次加载结束时，需按“停止实验”键，令系统停止采集和绘图。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）在整个加载过程中，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 $F_{\max}$ ，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 F_{cr} ？

(3) 试件压弯之后，尽管你不断地强迫试件增加变形量^①，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^②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，那将是什么情形？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 1.5 及附记(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；按照前述的加载操作，注意先慢（直线状态）后快，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 $F_{\max}$ 和压杆的极限荷载 F_{jx} 值。请注意，在程序中设定的 F_{jx} ，是当柱顶的轴向位移 Δ 达到所设定的横坐标最大值 $\Delta_{\max}$ 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”。鼠标在屏幕上出现一个“+”号，将它移动至曲线上你所认定的点处，单击即自动填入 F_{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，用“存储屏幕”或“屏幕打印”方式保存或打印结果，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 1.7 中①、②两种形态（参见附记）。

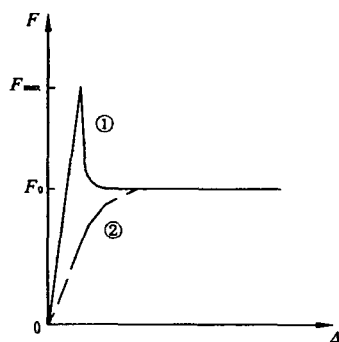


图 1.7 $F-\Delta$ 曲线的可能形态

思考与讨论：

由图 1.7 可见，实验中的压杆可能出现两个特征压力值 $F_{\max}$ 和 F_0 ，为什么不应将 $F_{\max}$ 而将 F_0 作为实验压杆的极限承载能力的衡量指标 F_{jx} ？为什么 F_{jx} 与相应的理想压杆临界力 F_{cr} 值相对应？

4.4 实验数据记录与处理

实验数据记录与处理可参见表 1.1。

① 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 ，这与教材中的描述有所不同。但因 Δ 与 f 二者在数学上毕竟是相关的，并不影响压屈现象物理本质的讨论。在两端铰支条件下，其关系式为

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\Delta}, \text{ 推导见后面的附记 (3).}$$

② 指采用机械或液压装置强迫试件变形的试验机。它将试件对夹具（压头）的抗力大小当作施加于试件的“荷载值”。现代试验机均采用此加载方式。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。教科书中介绍的材料或结构的力学行为，都是根据变形式试验机上的实验现象和实验结果来描述的。

表 1.1 实验数据整理 (参考格式)

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

4.5 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。最后, 你的报告还要在小组和班上进行交流和答辩。

5 设备保养与注意事项

(1) 每届学生用毕, 擦拭干净, 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, 使其处于不受力状态, 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, 详见本书后面附录之“5 仪器校准”。

6 附记 (对若干问题的说明)

(1) 若是一根理想状态的中心受压直杆, 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, 又有阻碍压屈的附加约束, 如各种形式的摩擦因素。

由于本实验所用的试件在加工 (选材、热处理和磨制) 与安装中采取了一系列的工艺措施, 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, 只有当迫使杆端转动的力矩超过最大静摩擦阻力矩时方能转动), 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), 而杆件仍无显见的弯曲, $F-\Delta$ 关系仍呈直线状。当压杆 (系统) 积蓄的弹性能达到一定水平, 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, 也就可能见不到上述现象了。之所以要采取各种工艺措施, 使试件尽可能接近“理想压杆”, 就是为了让同学们见识两种不同的平衡状态。

(2) 确定压杆长度, 实际上是一个压杆的计算简图问题, 这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 就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_5)。因为，虽然它的两端接头近乎刚性，但当它发生转动之后，会导致可变形段的端部中心偏离压杆轴线，产生附加的端弯矩，从而增加了全杆的变形。况且，即使端部不加粗，也因为该段弯矩很小，其变形甚微，所以该局部刚度大小的影响，远小于偏转所致的附加弯矩对整根压杆的变形和承载力的影响。因此，选 $L=L_5$ 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 Δ - f 关系有所不同，现以两端铰支为例 (见图 1.8)。令原杆长为 l ，最大挠度为 f ，杆端的轴向位移为 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

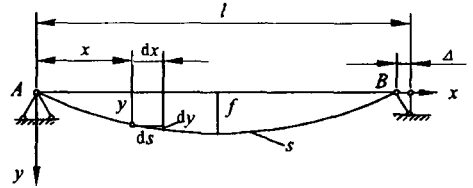


图 1.8

的轴线 s 的微段 $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx\sqrt{1 + y'^2}$ ，设

$s = l$ (因为弹性压杆承载力较低，压曲后平均轴向应变很小)，所以有

$$\begin{aligned} l &= \int_A^B ds = \int_0^{l-\Delta} \sqrt{1 + y'^2} dx = \int_0^{l-\Delta} \left(1 + \frac{1}{2} y'^2 \right) dx \quad (\text{用马克劳林级数展开 } \sqrt{1 + y'^2}, \text{ 取前二项}) \\ &= l - \Delta + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi f}{l} \right)^2 \int_0^{l-\Delta} \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx = l - \Delta + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi f}{l} \right)^2 (l - \Delta) \end{aligned}$$

由此得

$$\Delta \approx \frac{\pi^2}{4l} f^2 \text{ 或 } f = \frac{2}{\pi} \sqrt{l\Delta}$$

因 $\Delta \ll f \ll l$ ，此式精度很高，尤其是在小位移条件下。

第 2 项 组合压杆实验

——揭示组合压杆与实体（腹）压杆之间的巨大差异，
提供一种警示

1 研制目的

压杆（柱）是工程结构中极为重要的承力构件。前面所做的简单压杆的理论分析和实验研究，提供了压杆的基础知识，但它仅仅是关于单根弹性实体压杆的知识。而在金属结构（多为钢结构）中，为轻型化或节约的目的，往往用几根角形、槽形或工字形等型材做成组合截面压杆或格构柱。这种组合柱的力学行为与简单的实体压杆，即使仍在弹性范围内，也有很大的差别。因为涉及整体的结构因素。压曲过程中 $F-\Delta$ 曲线一般已无明显的“平台”，极限承载力 F_{jx} 的确定和理论计算也更为复杂，需要不同的判据，正因为如此，由于设计、施工或应用不当而造成的重大工程事故不胜枚举，应引起大家的高度警惕。

设计本实验有多重目的。第一，通过实验，使同学们亲身感受组合压杆与简单压杆的显著差异，从中获取组合压杆力学行为的感性知识；第二，将同一组合柱的承压构件之间作不同方式和不同密度的连接（模拟缀板），从其承载能力的变化及对照中，总结其规律性，以便充分认识组合柱中缀板（或斜缀条）的重要作用；第三，通过实测和数据整理（估算承载能力的上下限）认识到在组合柱的承载能力计算中，不能简单地将它当作实体（腹）杆，用平行移轴公式计算其截面惯性矩，以及与之相关的柔度值。因为它与“平面假设”有明显的背离。这些知识，对力学在工程中的应用、后续课程的学习和将来从事结构设计与研究工作是不可缺少的。

该实验仍使用多功能力学实验系统，操作方法同前。

2 构造与试件安装

该组合压杆试件也设计成多功能的，如图 2.1 所示。其中，两承压杆与前面的简单压杆的材料、截面和长度尺寸相同。两头用端卡座固结。杆间的连接卡有三种类

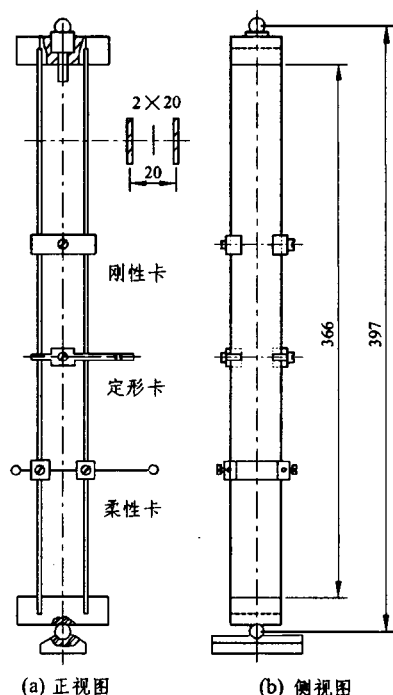


图 2.1 组合压杆