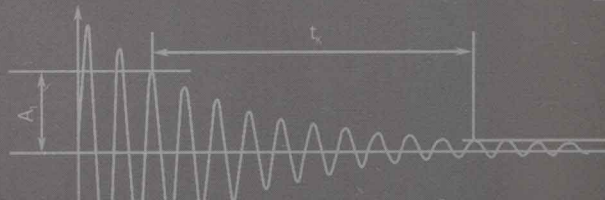
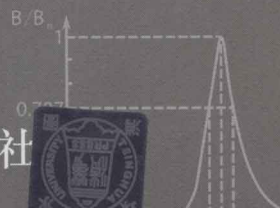
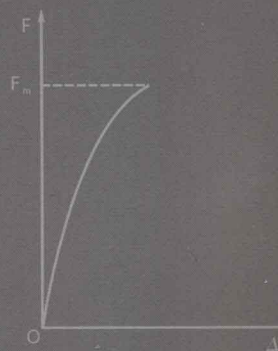
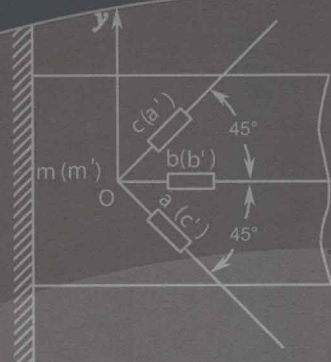
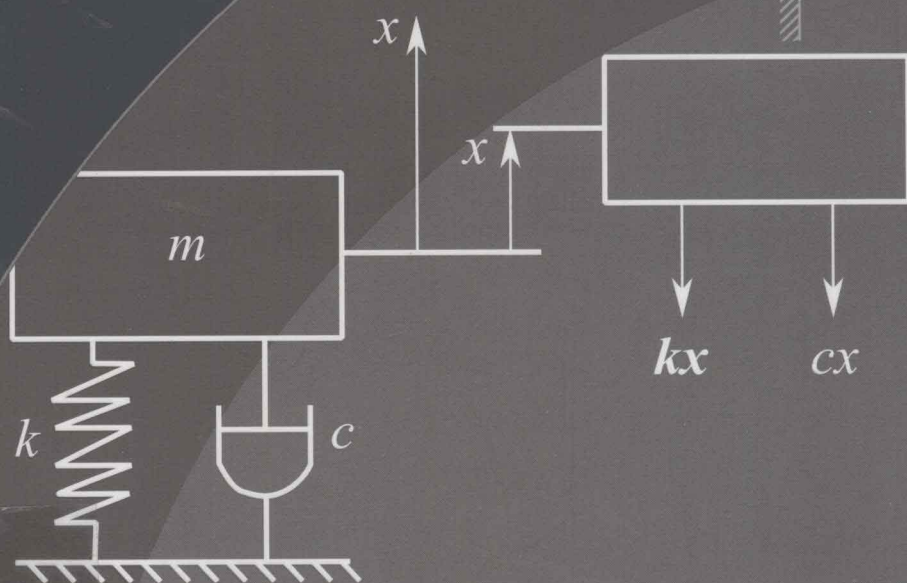


高等院校土木工程专业本科精品教材

力学实验教程

贾杰 丁卫 主编



清华大学出版社

力学实验教程

贾 杰 丁 卫 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是为适应“加强实践教学、培养创新人才”的新世纪力学实验教学改革要求,基于清华大学出版社“普通高等院校土木工程专业本科精品教材”而编写的非力学类专业力学实验教材。本书从一般高校的实验教学现状和改革要求出发,贯彻“内容先进、思想前瞻、覆盖面广”的编写原则,不仅包括了材料力学教学大纲规定的全部教学内容,同时纳入了理论力学实验、流体力学实验和光测力学实验,还推出了极具特色和创新的综合设计试验。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

力学实验教程/贾杰,丁卫主编. —北京:清华大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-302-29909-7

I. ①力… II. ①贾… ②丁… III. ①力学—实验—高等学校—教材 IV. ①O3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 202266 号

责任编辑:封秀敏

封面设计:张 玥

责任校对:王 瑶

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:天津泰宇印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm×260 mm

印 张:18

字 数:427 千字

版 次:2012 年 9 月第 1 版

印 次:2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:36.00 元

前 言

教育部面向 21 世纪“工科本科力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目于 1996 年 1 月启动,2000 年,教育部高等教育司主持制定“十五”普通高等学校教材建设规划时,考虑到即将进行的“全国实验教学示范中心”立项建设工作需要,将“工程力学实验”教材列入“十五”国家教材建设重点项目,这都对现阶段的力学实验教学提出了新的要求和挑战。

根据我国普通高等学校所开设的基础力学课程系列,结合多年来从事基础力学教学的经验,编者对实验教学改革进行了认真总结。力学实验课程不仅可以帮助学生深入理解、掌握课程的理论内容,更重要的是可以帮助学生提高动手能力,培养创新精神,还可以使学生利用实验手段观察力学实验现象,探索力学实验规律,训练力学实验基本技能,为解决工程实际力学问题奠定良好的力学实验基础。

为适应我国高等学校教育改革的要求,近年来,力学实验教学无论从实验内容、实验方法及实验手段等方面均发生了很大变化。基本实验质量得到全面提升,一批新开发的综合性、设计性、创新性实验逐渐成熟。因此,编写一本定位得当的力学实验教材成为一项迫切的任务。

本书内容可以划分为基本实验和提高(扩展)性实验两大部分,具体内容如下:第 0 章绪论;第 1 章数据统计与误差分析;第 2 章至第 6 章是基本实验,包括理论力学实验、材料力学实验和流体力学实验;第 7 章至第 8 章是提高(扩展)性实验,包括光测力学实验和综合性、设计性及研究性实验;第 9 章实验力学竞赛试题汇总。

本书由贾杰任第一主编,丁卫任第二主编,李仲秋任第一副主编,赵立军任第二副主编,全书由贾杰统稿。编写组成员及分工如下:东北林业大学贾杰(第 6 章、第 8 章、第 9 章、附录)、东北林业大学丁卫(第 2 章、第 3 章、第 7 章)、哈尔滨师范大学李仲秋(第 0 章、第 1 章)、东北农业大学赵立军(第 4 章、第 5 章)。

本书的编写受黑龙江省高等教育教学改革项目“基于加强工程素质和创新能力材料力学实验课程教学改革研究”项目资助以及东北林业大学重点课程建设项目资助。

本书承蒙哈尔滨工业大学关威副教授审阅,并提出了许多精辟而中肯的修改意见,在此致以深深的谢意。在本书编写过程中,参考了一些理论力学、材料力学和工程力学等方面的教材,同时参阅了许多同行的各种工程力学、材料力学的实验教材,在此谨向这些教材的作者表示衷心的感谢。此外,硕士研究生鲍玉冬、赵越、周一龙等负责了部分插图的绘制修改工作,在此一并表示感谢。

限于编者水平,书中难免存在一些错误和不妥之处,诚请读者批评指正。

编者

2012 年 8 月

目 录

0 绪论	(1)
0.1 力学实验的地位	(2)
0.2 力学实验的任务	(4)
0.3 力学实验的内容	(5)
0.4 力学实验的方法	(6)
0.5 力学实验的要求	(6)
1 数据统计与误差分析	(8)
1.1 概述	(8)
1.2 数据的记录和计算	(9)
1.3 基本概念	(11)
1.4 误差的分析和控制	(13)
1.5 误差传递定律及其应用	(21)
1.6 实验数据处理	(23)
1.7 量纲分析	(29)
1.8 相似理论	(31)
2 理论力学实验	(39)
2.1 单自由度系统自由振动	(39)
2.2 单自由度系统受迫振动	(45)
2.3 摩擦因数的确定	(50)
2.4 隔振系数测定	(53)
2.5 科氏加速度与科氏惯性力演示实验	(56)
2.6 连杆质心与转动惯量的测定	(58)
2.7 动力学综合演示	(61)
2.8 单圆盘转子的临界转速测定实验	(69)
3 材料力学实验 I ——力学性能实验	(74)
3.1 材料的分类	(74)
3.2 材料的力学性能指标	(74)
3.3 材料的拉伸与压缩实验	(78)
3.4 金属材料的扭转实验	(90)
3.5 测定平面应变断裂韧性 K_{IC} 的实验	(97)
3.6 超声法测定材料的弹性常数实验	(106)
3.7 温度对材料力学性能的影响实验	(109)
3.8 冲击实验	(110)

4 材料力学实验Ⅱ——应变电测技术基础	(114)
4.1 概述	(114)
4.2 电阻应变计	(115)
4.3 电阻应变计的工作原理	(120)
4.4 应变测量电路原理及电测技术	(122)
4.5 应变测量仪器	(128)
5 材料力学实验Ⅲ——电测应力分析实验	(137)
5.1 梁的弯曲正应力实验	(137)
5.2 电阻应变法测量材料拉伸时的弹性常数	(142)
5.3 偏心拉伸(拉、弯或压、弯组合)内力素测定实验	(145)
5.4 弯扭组合变形时主应力分析	(147)
5.5 等强度梁实验	(151)
5.6 电阻应变片灵敏度系数标定实验	(154)
5.7 压杆稳定性实验	(157)
6 流体力学实验	(162)
6.1 流体静压强测定	(162)
6.2 流体黏性效应显示	(163)
6.3 流体的相对平衡	(164)
6.4 烟风洞流谱显示	(167)
6.5 流体流动状态判别	(169)
6.6 沿总流的能量方程	(171)
6.7 毕托管测速	(174)
6.8 流体动量方程	(176)
6.9 直管沿程水头损失测定	(178)
6.10 机翼表面压强分布测定	(181)
6.11 激光多普勒测速	(186)
6.12 平面狭缝流动流场显示	(188)
6.13 圆柱绕流阻力	(189)
6.14 平板边界层测试	(193)
6.15 热线热膜风速计探针的校准	(197)
6.16 曲面边界层测速	(199)
7 光测力学实验	(203)
7.1 光测力学的发展	(203)
7.2 光学基本知识	(204)
7.3 光弹性实验原理	(208)
7.4 光弹性基本实验	(209)
7.5 云纹干涉技术	(212)
7.6 电子散斑干涉技术实验	(218)

8 综合设计实验	(222)
8.1 概述	(222)
8.2 静定桁架结构设计与应力分析实验	(222)
8.3 超静定桁架结构设计与应力分析实验	(225)
8.4 刚架组合设计与应力分析实验	(228)
8.5 薄壁构件拉伸实验	(230)
8.6 组合梁力分析实验	(233)
8.7 预应力梁实验	(234)
8.8 薄壁圆筒受内压、弯、扭组合荷载作用时内力素及主应力的测定	(235)
8.9 测定压杆临界力的振动方法	(237)
8.10 大挠度压杆稳定性实验	(239)
8.11 单项增强复合材料弹性常数测定实验	(241)
8.12 表面残余应力测定实验	(243)
9 实验力学竞赛试题汇总	(249)
9.1 首届基础力学实验竞赛试题	(249)
9.2 各省市基础力学实验竞赛试题汇总	(255)
附录	(272)
参考文献	(280)

0 绪 论

人类活动大致概括为群体利益调整、生产改造自然和科学探索实验三个方面。其中,科学探索实验是进行科学研究的重要方法,科学史上许多重大发明就是依靠科学实验而得到的,许多新理论的建立也要靠实验来验证。各种力学课程的形成与发展,是理论与实验交错实施、相辅相成、互相依赖和互相促进的。工程设计的一个首要问题,必须确切知道材料的力学性能以及力学性质,这些必须通过实验测试才能确定。另外,近代新型结构和材料日新月异,其在形状和受荷载方面都比较复杂时也须借助于实验方法来分析确定,以及用实验方法验证有限元法和解析法的正确性等,在这方面给学生启发式教学是必需的。

因此,力学实验课在各种力学课程的教学和学习中有着重要的地位,它将巩固和加深学生对课堂上所讲授的理论和概念的理解,并对材料和构件的力学性质有一个直观的认识,以便更好地接受工程中的一些力学概念,如塑性、脆性和强度等。另外,力学实验作为工程测试的入门课程,使学生了解工程测试的基本原理和技术手段,对提高学生的思维能力、科研动手能力和培养学生对实际工程的测试技能都有很大的帮助。

力学是研究力对物体效应的学科。它和其他自然科学一样,是从生活、生产实践中总结出来,又去指导生活和生产实践的。20 世纪以前,推动近代科学技术与社会进步的蒸汽机、内燃机、船舶、桥梁等,都是在力学知识的积累、应用和完善的基础上逐渐形成和发展起来的。20 世纪后,许多高科技产物,如大跨度桥梁(见图 0-1)、火箭(见图 0-2)、新型建筑(见图 0-3)、大型水利工程(见图 0-4)等更是与力学的指导密不可分的。



图 0-1 大跨度桥梁

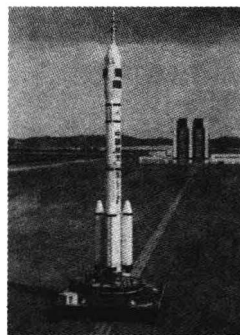


图 0-2 运载火箭

此外,工程实际中构件的几何形状和承受的荷载都十分复杂,构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据,因此,必须借助实验应力分析手段才能解决。

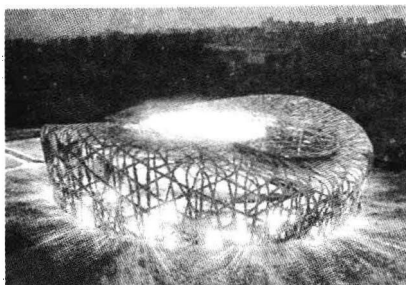


图 0-3 鸟巢

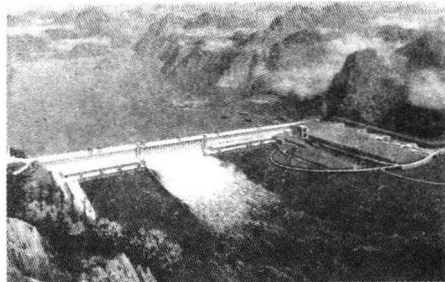


图 0-4 水利发电站

0.1 力学实验的地位

从力学的发展史看,力学实验是力学科学建立的基础和发展的基本方法。力学的许多重要理论都直接间接地和力学实验相联系。

在 17 世纪以前的古代和中世纪,无论欧洲还是中国都已有关于杠杆平衡、重心、浮力、强度和刚度以及匀速直线运动和匀速圆周运动等一些力学概念的描述。古埃及金字塔、古罗马斗兽场、中国的都江堰及赵州桥等著名建筑也说明古人的力学经验积累已达到相当高的水平,但力学理论却是在人们重视和采用力学实验方法之后才逐步形成和建立的。“实验”作为一种科学研究方法最早由达·芬奇(1452—1519)提出和运用,他因此在自然科学方面作出了巨大的贡献。达·芬奇研究过杠杆平衡、斜抛体和自由落体的运动以及摩擦对物体运动的影响,还做过铁丝的拉伸强度实验等。伽利略(1564—1642)发展了达·芬奇的实验研究方法,创立了对物理现象进行实验研究并把实验方法与数学方法、逻辑论证相结合的科学研究方法。正是由于伽利略善于观察和思考,善于设计和运用实验方法,善于总结和分析,才有了著名的比萨斜塔落体实验、小球斜面滚动实验,也才有了摆的运动规律、惯性定律、落体运动定律以及相对性原理等重要理论的提出,从而奠定了经典力学的基础。伽利略在晚年(1638 年)出版的历史巨著《关于两门新科学的谈话和数学证明》一书中,除了动力学外,还有不少关于材料力学的内容。他讨论的第一个问题是直杆轴向拉伸问题,得到承载能力与横截面面积成正比,而与长度无关的正确结论;讨论的第二个问题是关于梁的弯曲实验和理论分析,正确地断定了梁的抗弯能力和几何尺寸的力学相似关系。他还注意到空心梁“能大大提高强度而无需增加质量”。因此,该书不仅是动力学的第一部著作,还被看做材料力学开始形成一门独立学科的标志。

在 17—18 世纪末的近两百年中,经典力学得以建立的一个重要原因,是伴随着欧洲资本主义生产方式陆续取代封建的生产关系,以及商业和航海迅速发展对科学技术的需要,由伽利略发展和培根倡导的实验科学开始兴起,使得技术上的工匠传统和学者传统走向结合。17 世纪中叶,欧洲各国纷纷成立科学院,如英国皇家学会、法国科学院、罗马科学与数学科学院、柏林科学院等,并为加强学术交流创办科学期刊。好多国家甚至为满足航海需要悬赏解决经度的测定问题,促进了天文观测和对天体运行规律的研究。那是科学史上的一个灿烂时代,一大批科学家因为著名的实验、发明和发现而被载入史册。在伽

利略前后,有第谷(1510—1001)的30年天文观测,盖利克(1602—1686)的马德堡真空半球实验,胡克(1635—1703)的弹簧受力实验、重力实验,库仑(1736—1806)的扭秤发现和扭转实验,卡文迪什(1731—1810)测量万有引力的扭秤实验等。这一时期开展的实验研究和积累的丰富观察资料,不仅促成了经典力学的建立,还对数学学科的发展产生了深远影响,促进了技术进步。望远镜和摆钟就是这一时期分别由伽利略和惠更斯(1629—1695)发明的。科学界也公认,如果没有伽利略、开普勒(1571—1630)、惠更斯、胡克等在惯性、引力、行星运动、加速度、摆的运动等方面的研究和成果积累,就不会有牛顿(1642—1727)三大力学定律的问世。牛顿能够完成三大力学定律的总结工作,除了当时的资料积累已经相当丰富外,很重要的一个原因是牛顿善于运用数学总结和分析。事实上,微积分就是牛顿在总结切线、求积、瞬时速度以及函数的极大值、极小值等与运动有关问题的数学方法过程中创立的。他运用自己创立的微积分论证力学定律,从而把经典力学确立为完整而严密的体系。对微积分同样作出巨大贡献的莱布尼茨(1646—1716)也有着非凡的物理学成就背景。他在1684年发表的《固体受力的新分析证明》一文中指出,纤维可以延伸,其张力与伸长成正比,因此他提出将胡克定律应用于单根纤维。这一假说后来在材料力学中被称为马里奥特-莱布尼茨理论。

基于实验在力学学科发展中的作用,著名力学专家武际可教授将实验分为三类:第一类指对建立新领域起开创作用的实验,如1883年雷诺关于管流转变为湍流的实验导致湍流理论的发展;第二类指验证已有理论的验证性实验,如1798年卡文迪什测定引力常数的实验;第三类指通过如光弹实验等模拟实验获得理论解得求解问题的实验。力学学科经过200多年的发展,早已脱胎于物理学,形成了理论力学、材料力学、弹性力学、结构力学、塑性力学、流体力学、断裂力学、振动理论等众多分支。特别是随着计算机的出现和数值计算的迅速发展,使得过去无法求解的问题有了计算分析方法,其在某种程度上也可取代传统实验,但它不能从根本上代替实验,也许永远不能,其原因是:

(1) 经典力学研究的是宏观问题,进入细观和微观层面后,许多理论不再适用,需要根据实验观察建立新的理论。

(2) 对于当今大量采用的复合材料、复杂结构材料以及岩体类非均质各向异性材料,尚需通过大量的实验研究,解决本构关系问题。

(3) 计算机解决工程问题至少要有两个先决条件,一是准确获得材料常数,二是力学模型反映实际。前一个问题需要通过实验解决,对于后一个问题,即使解决了本构关系,在边界条件处理上也很难做到与实际完全相符。

与20世纪以前的力学工程相比,人们在当代航空航天、核能技术、大型桥梁水坝建筑、深井开采等工程领域遇到的力学问题更为复杂。这一方面使得力学实验规模日益扩大,如做流体力学实验用的风洞、激波管、水洞、水池,以及做动态强度实验用的振动台、离心机、轻气炮等就需要复杂的机器设备和精密的控制测量仪表,需要多种技术人员协同工作和强大的能源保证才能完成;另一方面,力学实验进入工程现场,适时观测、遥测和预报逐渐成为质量监控预防灾难的重要手段,许多重点攻关项目甚至直接做原位原型荷载实验。

因此,对于21世纪的工程人才培养,加强力学实验教学仍然具有十分重要的意义。

(1) 实验方法是发展科技的基本方法。如果说经典力学的产生是依靠实验和数学两

大方法的话,现在则需要加上一个计算机,即实验、数学加计算机。无论是从事科学研究还是解决工程问题,都需要有良好的实验能力和素养。

(2) 经典力学不仅是现代力学的基础,也是目前工程设计和力学分析的基本方法和依据。只有将理论学习和实验观察与分析相结合才能把握其精髓,提高力学的理论与分析水平。

(3) 力学实验能力是工程人才的专业基本能力。由于工程结构的复杂性和设计要求的不断提高,对力学实验的依赖性越发增强,工程技术人员需要了解和掌握常规的力学检测和力学分析手段,具备良好的实验分析能力和观察意识。

0.2 力学实验的任务

力学实验教学的任务是由工程人才的培养要求和力学的教学内容决定的。

虽然我国目前把力学划为各种具体的二级学科,但作为教学课程,其内容却不是独立的。按照经典力学的划分,它应包括理论力学、材料力学、结构力学等分支以及近代固体力学和流体力学分支的一些内容。这些力学分支作为课程单独开设时,通常不冠以具体力学名称。其中,工程力学一般作为不单独开设分支力学课程的短学时力学课程,并且根据不同的专业要求有不同的内容组合和教学侧重。在内容选取上以理论力学,特别是静力学和材料力学组合的居多。面向土建类专业,包括部分结构力学内容的又多称建筑力学。

力学实验教学的情况则有所不同。过去在非力学专业的基础力学教学中,主要开设材料力学和流体力学实验,并且主要是作为理论教学的一个辅助环节开设一些验证性、演示性实验,理论力学和结构力学不开设实验课程。为适应 21 世纪的人才培养要求,我国提出了加强实践教学,培养创新人才的教育思想。在这一思想指导下,实践教学的功能和地位得到加强,主要体现在以下三个方面:

(1) 改变重理论、轻实践的教育教学思想,强调实践教学环节在创新人才培养中的重要作用。

(2) 实验教学由单纯的验证性、演示性实验扩展到设计性、综合性或研究性实验,培养学生的实验和创新能力。

(3) 实验教学不再单纯依附于理论教学,要求独立组织或单独设课。学时也要求提高到理论教学的 20%。

在这一背景下,高校力学专业教师不仅对材料力学的教学内容有了较大的更新和调整,纷纷进行综合、设计实验的教学探索,而且积极开展了理论力学的实验教学尝试。在教学管理和组织上,力学实验室从逐步走向独立到整合相关资源成立校级力学实验中心,为实验教学某种程度上的独立运行或独立授课创造了条件。因而,将理论教学分散组织的各分支力学实验课作为一个整体,统一进行安排和组织成为可能,形成了力学实验课的基本架构。

简言之,力学实验课程并非是和力学理论课程简单配套的实验教学环节,也不是科学研究意义上的力学实验。实际上,它是非力学专业基础力学有关实验教学环节的总称。当然,如工程力学的内容组合有所不同一样,工程力学实验的内容也因各校的教学组织不

同而有所不同。本书以材料力学实验为主,包括部分理论力学和结构力学实验内容以及流体力学实验内容,教学任务概括为以下几个方面:

(1) 通过实验观察、验证和了解各力学内容的一些重要理论和原理,巩固力学知识,深化对力学理论的认识。

(2) 掌握材料力学性质或常数的常规测定方法,了解材料的变形与破坏现象,了解材料的常用检测设备和使用方法。

(3) 掌握应力分析的常规方法,了解有关设备仪器的原理和使用方法。

(4) 通过实验误差的原因分析,认识工程问题的复杂性和力学简化模型的局限性,提高力学分析和实验能力。

(5) 进行科学实验的基本训练,培养学生严谨认真的工作作风、实事求是的科学态度、分工协作的团队精神,增强观察和发现、分析和解决工程实际问题的能力。

0.3 力学实验的内容

力学实验教学的内容是根据其教学任务和目的设计安排的,与科学研究实验和工程服务实验相比既有区别又有联系。“区别”指一些原理性、认识性或设计性实验,如弯曲正应力、偏心拉伸、桁架设计等虽然来自于工程的典型模型,但主要是为教学服务的,不具有具体的科研和应用意义;“联系”指实验的方法、所用的设备仪器及涉及力学性质或常数测定的一些实验与科研和工程应用密不可分。

按照实验教学示范中心的评审标准,力学实验教学的内容按层次分为三类:第一类是基础型实验,包括验证性、演示性等实验教学内容;第二类是提高型实验,包括综合性、设计性、应用性等实验;第三类指具有探索性质的创新型实验。本书采用按照实验性质和实验方法划分的方法,将力学实验内容划分为以下六类:

(1) 理论力学实验。主要包括摩擦系数测定实验,不可见轴转速测试实验,功率、转速、扭矩关系实验,单自由度振动实验,三线摆测转动惯量实验等内容。由于理论力学实验相对独立,单独列为一章。

(2) 材料力学性能检测实验。包括材料拉伸、材料压缩实验,材料扭转实验,材料冲击、疲劳实验等。这部分实验的特点是所用设备和实验方法与科研和工程实验基本相同,在实验教学中具有十分重要的地位。

(3) 电测法应力分析实验。包括弹性模量测定、弯曲正应力、偏心拉伸、弯扭组合等实验。其中大部分是验证性实验,但电测法是实验应力分析的主要方法,应变测量设备和方法与工程和科研实验的完全相同。

(4) 流体力学实验。包括流体静压强的测定、流体流动状态的判别以及激光多普勒测速等实验。大部分实验属于应用性实验,能使学生对理论内容的理解。

(5) 光测应力分析实验。包括光弹、云纹干涉、电子散斑以及数字散斑相关测量等几种方法的实验,既有演示性实验,也有提高或研究型实验。其中后三种光测法反映了国内比较先进的光测应力分析技术。

(6) 综合设计性实验。主要利用已经开发并面世的材料力学综合设计实验台,开展桁架设计实验,刚架、压杆组合设计实验,桁架、刚架(或压杆)组合设计实验等。这部分实

验模拟工程实际较好,结构设计形式多,可作为结构力学设计实验内容。

实验教学的一个特点是教学内容与设备仪器紧密相关。因此,教学内容还包括主要设备仪器的原理和使用介绍。

0.4 力学实验的方法

实验教学方式与理论教学方式有着显著的不同,它是通过一定的检测或观测手段,模拟一个典型工程或生产生活实际的发生与发展过程认识理论探索未知的。学习、发现与训练的过程主要体现在动手操作、读取信息、分析总结几个主要环节上,在教学方法上概括为以下四个重要环节:

(1) 实验预习。通过实验预习明确实验的目的、任务、原理、步骤和要求,以及使用的主要设备仪器、原理和使用注意事项,对实验过程中可能出现的问题和结果有所准备。

(2) 实验准备。检查设备仪器的运行是否正常;必备的工具、量具、材料、器件是否齐全,摆放位置是否恰当;明确各成员分工和岗位。

(3) 实验操作。严格按照操作规程操作设备仪器和读取记录数据,分析判断实验过程是否正常。发现不正常情况及时请教指导老师或中止实验。

实验操作完成后要请指导老师检查验收。验收合格后,按要求切断电源,整理现场,将设备仪器、量具、工具等归还原位,摆放整齐。

(4) 撰写实验报告。实验报告是实验的重要环节,其作用不只是提交和报告实验结果,还起着保存原始实验数据、实验状态和实验条件的作用。写好实验报告,应注意:

- ① 按照实验要求填写实验的名称,所用设备、仪器、量具的名称、型号与精度,实验条件、实验状态以及实验人员和分工等有关资料;
- ② 整理分析原始记录数据,对于可疑的异常数据尽可能保留,不能随便剔除;
- ③ 根据实验目的和要求的不同,分析表示实验结果,实验分析要严谨科学,实事求是,充分尊重原始数据,不要轻易放过可疑数据和异常现象;
- ④ 结果表达要清晰、简洁、规范,文字表述要层次清楚,语言流畅。

0.5 力学实验的要求

力学实验的条件一般是在常温、静载条件下进行,力学实验所涉及的物理量并不多,主要是测量作用在试样上的力和变形。荷载一般要求较大,由几千牛顿到几百千牛顿,故设备较大,例如万能试验机。而试样的变形相对比较小,有时可以小到 0.001 mm ,相对变形可小到 $10^{-6} \sim 10^{-5}$,因而变形测量设备必须精密。在进行实验时,力与变形要同时测量,非一人所能为之。因此,材料力学实验大都是 2~4 人一组,这就要求实验小组成员要有很好的配合与协作。实验时(尤其是初学者)应注意以下几方面:

1) 实验前的准备工作

首先要明确实验目的、原理和步骤,然后选定被测样品或实验装置的加载方式及加载部位。根据材料的极限强度或实验要求制定加载方案(衰减挡设定、加载速率设定、实验最大极限荷载设定等)。

参加实验的同学应严格遵守操作规程和实验室的规章制度,听从实验室指导教师的

指挥和安排。实验小组的成员,应分工明确,相互配合,在小组长(负责加载者)的统一领导下完成实验。

2) 实验操作并测取数据

在实验过程中,要密切观察实验现象。小组成员虽有分工,但要及时轮换,每个学生都要自己动手完成所有实验内容。现在大多数实验设备都用计算机控制,因此要注意根据图形随时记录一些相关数据,并保存自己的图形和数据,严禁删除别人的文件或重叠别人的文件名。

除实验教程中规定的实验方案外,学生也可以根据实际目的、原理自己设计实验方案,经主管教师认可后实施。

3) 数据整理并书写报告

顾名思义,实验报告是对所做实验的一个综合总结。通过实验报告的书写,培养学生准确有效地用文字来表达实验结果的能力。因此,要求学生在动手完成实验的基础上,用自己的语言简明扼要地叙述实验目的、实验仪器设备、实验原理与方法、实验步骤,实验数据列表、数据计算、实验结果,实验结论、实验现象或结果的分析与讨论等内容。要求每个同学独立地写出实验报告,并做到字迹工整、图表简明。

1 数据统计与误差分析

1.1 概述

无论力学实验中的哪一个具体的实验,一般都需要以各种相应的方式测量出材料或者构件的力、位移、应力、应变等物理量,而每一个实验的条件又因地、因人、因物、因景等不尽相同,因而即便是本质一样的实验,其结果仍会存在差异。由于实验过程中受到主、客观多方面因素的影响而导致观测的数据存在多种误差甚至错误,就需要对读取的数据进行分析判断,去伪存真,并对数据的可靠性作出基本估计。因此,如何把握实验结果的真实程度,需要以数据统计等理论为基础,进行数据分析、整理、处理等工作。充分研究科学实验和测量过程中存在的误差,具有重要的意义。

(1) 正确认识误差的性质,分析产生的原因,以减小误差或消除某些误差。

(2) 正确处理数据,以便得到接近真值的数据和结果。

(3) 合理设计和组织实验,正确选用仪器与测量方法,从而在一定条件下得到最佳结果。

在研究材料的力学性质时,首先通过实验测出性质参数,研究其规律,如数据的分布、测量的不确定度、参数间的关系、样本测试与个体测试的结果的误差等;然后建立其理论,并在工程中加以应用;最后通过实验来进行验证,以完善之。就实验进程而言,在实验中和实验后,需对采集到的数据进行整理换算、统计分析和归纳演绎,以得到代表力学性质的公式、图像、表格、数学模型和数值等,这就是数据处理。采集得到的数据是数据处理过程的原始数据,这些原始数据量大并且有误差,有时杂乱无章,有时甚至有错误,鉴于此,必须对原始数据进行顺应力学规定、符合科学规律的处理,才能得到公认的、可靠的实验结果。实验是一门科学,为此,在做好实验操作的基础上,数据的统计处理显得十分重要。

数据处理的内容和步骤包括数据的记录和修约、数据的误差分析、数据的表达、数据的统计分析。

量纲分析和相似理论是力学实验的基础理论之一,已在许多科学领域得到应用。量纲分析与相似理论主要研究结构模型与结构原型之间的物理现象相似性及其数量转换关系的规律。

前人已经给物质世界的各种硬性、软性研究对象规定了公认的物理量,为了继续研究的方便和效率,对新的研究对象的描述最好也利用前人的经典科学阐述,为了便于学界、工程界理解和借用,所涉及研究对象的物理量当然与相关的理论体系相契合为好。这样,新研究的物理本质才可借经典的理论框架被大家所认同,因为基本物理量的构建已被世人所约定,这与其说是“爱屋及乌”式的因循守旧,不如说是“一叶知秋”式的别开生面。

限于投资或其他条件,一些实验不能以产品同样的尺寸大小或与产品同样的质地的

方式进行;有些实验由于方法所限只能在与研究对象相似的模型上进行,如光弹性实验;一些实验则通过乙种媒介进行而达到在甲种媒介里的效果,如无人会拿体温计去测钢水的温度,而是采用其他方法。那么,类似这些实验的结果是如何反映被模拟的物件的本质的呢?它们之间的数值关系如何?抑或说它们的函数关系怎么样?本章主要结合力学实验,介绍实验观测数据的常用数学统计方法和数据处理方法。

1.2 数据的记录和计算

实验中,需要记录各种数据、数字,在实验报告里除了记下机具的呈值精度以外,还需要大量地采写仪器仪表所呈读数,虽然一些仪器仪表的读数已经数码化、便利化,但仍有不少的数据采集依靠人工,况且现场需要进行某些简小的计算。这里主要叙述实验行为主体应遵循的科学规则。

1.2.1 有效数字

根据观测结果记录数据时,首先要明确有效数字的概念,以便正确地读取和记录数据。

通常称一个数字中任何一个有意义的数字为有效数字。所谓有意义,就是说数字具有可信性。因为任何测量值都存在误差,都是用测量的近似值代替测量值。在记录实验数据时,已暗示它的最后一位数字是估计值,是可疑的,即只允许末一位数是可疑的,其余各位数必须都是有意义的数字。例如,力学实验中的荷载、位移、应变,过去大多是用一组度盘显示的,在量具中,现在仍大量使用刻度。最小刻度线以下的一位,即两个最小刻度线之间的数字,根据观测者的判断读出被认为是可信的,可以称为有效数字。再下一位数字即使能够读出也认为不可信,不能称为有效数字,应当剔除。

在有效数字的记录中要注意“0”的不同角色,选择正确的记录方法。

当“0”处于有效数字之间时为有效数字,例如 32.06 为 4 位有效数字。

当“0”处于第一个非“0”有效数字之前时为非有效数字,如 0.0086 的有效数字为 2 位。这种情况下通常是由于单位变换,小数点前移造成的。

当“0”处于最末位,只要前面有小数点,就认为是有效数字,如 3.200、30.20、0.030 20 等一组数的有效数字为 4 位。这种情况的“0”可看做读取的有效数字刚好为“0”,不能随便去掉。

当“0”处于最末位,而前面没有小数点时,情况不同。例如,12 000 无法确定是几位有效数字。若写成 1.2×10^4 ,表示有效数字为 2 位;若写成 1.20×10^4 ,表示有效数字为 3 位。此例表明当没有小数点时,为了避免混淆,可采用指数形式表示,即写成一个小数与相应 10 的整数幂的乘积。

显然,有效数字的位数取决于测量仪器的精度,不能随意增减,必须用与观测设备精度相应的位数来记录数据。

1.2.2 数据修约

1. 进舍规则

记录测量数据时,只保留一位可疑数字。一般在可疑数字上有 ± 1 个单位或下一位不超过 ± 5 个单位的误差。当有效数字确定后,其余数字应舍弃,其修约办法按国家相关规定概括为“四舍六入,五单双”,具体方法如下。

(1) 末尾数 4 舍 6 入,即应舍弃的第一位数字小于 5 则舍去,若第一位数字大于 5 或其后至少还有一位除 0 以外的任何数字,则保留的最后一位数字上要加 1。

(2) 当舍弃的第一位数字正好是 5 且在 5 以后没有数字只有 0 时,若 5 的前一位数字为奇数时,末位数加 1;若 5 的前一位数字为偶数时,则保持不变。

(3) 计算有效数字位数时,若第一位数字大于或等于 8,则可多算一位。例如,9.15 虽然只有 3 位,但可作 4 位看待。

(4) 大于或等于 4 位的数据计算平均值时,有效位数增加一位。

(5) 举例说明如下:

7.356 修约至 3 位有效数字时为 7.36(入);

0.733 修约至 3 位有效数字时为 0.733(舍);

4.2154 修约至 3 位有效数字时为 4.22(入);

8.275 修约至 3 位有效数字时为 8.28(入);

13.45 修约至 3 位有效数字时为 13.4(舍)。

2. 修约间隔

修约间隔是确定修约保留位数的一种方式。修约间隔的数值一经确定,修约值即为该数值的整数倍。如指定修约间隔为 0.1,则修约值应在 0.1 的整数倍中选取,相当于将数值修约到一位小数。若指定修约间隔为 100,则应将数值修约到“百”位。

3. 特殊修约

(1) 负数修约。当负数修约时,应先将它的绝对值按上述规定进行修约,然后再修约值前面加上符号。

(2) 0.2 单位修约。将拟修约的数值乘以 5,按指定数位依进舍规则修约,所得数值再除以 5。

例如,将 453 修约到“百”数位的 0.2 单位。

$453 \times 5 = 2265$,修约到“百”数位为 2300,则有 $2300/5 = 460$ 。

(3) 0.5 单位修约。将拟修约的数值乘以 2,按指定数位依进舍规则修约,所得数值再除以 2。

例如,将 123.52 修约到“十”数位的 0.5 单位。

$123.52 \times 2 = 247.04$,修约到“十”数位为 250,则有 $250/2 = 125$ 。

1.2.3 运算法则

1. 加减法运算

进行加减法运算时,各数所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点以后的最少位数相同,或以小数点后位数最少者为准,再在其余各数小数点后多取一位,但最后结果应