

高等院校教材

工程力学实验教程

王谦源 陈凡秀 韩明岚
张黎明 陈建林

编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

高等院校教材

工程力学实验教程

王谦源 陈凡秀 韩明岚 编著
张黎明 陈建林

科学出版社

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,根据教育部关于建设国家实验教学示范中心的指导思想编写的非力学类专业工程力学实验教材。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、投入小、受益面大的编写原则,不仅包含了原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,还推出了极具特色和创新的综合设计实验。

全书按照实验性质和实验方法划分为8章,依次为:绪论;实验数据的统计处理;理论力学实验;材料力学性质检测实验;电测应力分析实验;光测力学实验;综合设计实验;材料试验机,介绍的实验项目共计30余个。

本书可作为普通高校非力学专业大学本科生的工程力学实验教学用书,也可作为力学专业本科生、工程实验技术人员和实验教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验教程 / 王谦源等编著. —北京:科学出版社,2008

(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-023069-0

I. 工… II. 王… III. 工程力学-实验-高等学校-教材 IV. TB12-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第149441号

责任编辑:匡敏 毛莹 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年9月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年9月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—4 000 字数:200 000

定价:18.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

涵盖理论力学与材料力学内容的工程力学,对于相当多的工科专业来说,是一门专业基础课。学习它的意义在于:从工程应用的角度为初学者建立一个从质点、刚体到简单杆系变形体的静力、动力等力学问题基本概念和基本规律的基础。

对于工程力学课程的学习主要体现在基础性和实用性两方面。基础性在于它弥补了大学物理中力学部分所没有涉及的内容,尤其是对于工程零件、构件乃至简单结构运动学、动力学和简单变形体力学的描述。实用性在于它当中的很多内容,已经在工程中获得了直接的应用。通过对该课程的学习,学生应达到如下预期目标:

1. 掌握工程力学研究问题的理论和实验方法;
2. 学会解决工程实际问题的技能;
3. 为后续课程相应知识的学习奠定基础。

王谦源教授等编写的这本工程力学实验教程,瞄准工程力学课程的预期目标,兼顾其基础性和实用性,具体体现在以下五点:

1. 恰当地处理基础性和实用性这两个特性的平衡。“平衡的支点”如果选取不当,给学生构筑的该学科的知识结构将是不稳定的。

2. 适当地调整理论教学与实验教学的比例。二者比例若偏重于一方,学生就会对工程力学产生误解,以为它是纯理论的学科或纯实验的学科,从而不能很好地理论联系实际。

3. 正确认识课程的归纳与演绎的本质。理论力学主体上是演绎法体系,材料力学主体上是归纳法体系,二者的有机结合将展示给学生一个全面的逻辑系统。

4. 对于演绎体系为主的课程,多为借助实验验证和演示理论推演的结论,起到实验检验理论的作用;对于归纳体系为主的课程,多为借助实验得到创建理论所需的基础出发点,起到基于实验探索理论的作用。

5. 基础性与实用性兼具给我们带来知识、能力、素质三要素的思考。基础性课程的讲授以知识为载体,表现能力的生动作用,并使学生看到能力在知识创新过程中的活力,其素质也可以得到提升;而在课程的实用性方面,往往

因为知识的好用,而没能对能力与素质给予足够的重视。

如果我们注意到上述五个方面,就会发现对于学生能力的培养和素质的提高,工程力学课程是其他课程不可替代的,其中,工程力学实验又具有其理论课程无法实现的作用。

王谦源教授长期带领团队从事工程力学的教学,为了适应 21 世纪实验和创新人才培养的要求,选择了一项富于挑战性的任务,编写了这本工程力学实验教程,他们在该教程中做了多方面的努力:

1. 教学思想具有先进性和前瞻性,强调实践教学在创新人才培养中的重要作用,强化实验环节,反映新的实验规范、实验技术和实验方法。
2. 单独为实验教学设课,不再把实验教学单纯依附于理论教学,要求开设理论教学 20% 的学时的实验课。
3. 由基础型实验(单纯的验证性、演示性)扩展到提高型实验(综合性、设计性、应用性),上升到具有探索性质的创新型实验。
4. 对于材料力学的实验教学内容有了较大的调整和更新,对于理论力学的实验教学内容开展了积极的尝试。
5. 教程中理论力学和材料力学的比重权衡和内容融通处理得当。
6. 力求设备投入少,做到一机多用。
7. 解决了新老机器的取舍问题。

总之,该教程努力建立起一套完整、系统和先进的工程力学实验课程体系:回顾了力学实验的科学地位,梳理了工程力学实验教学的任务、内容和方法;按实验性质和实验方法划分章节的编排体系;细致入微地介绍相关的背景知识或发展概况,努力拓宽读者对于力学实验的认识空间;在把握实验教学主线的时候,尽可能反应新思想、新技术、新方法。

鉴于该教程具有上述提到的诸多优点,而且在教学内容、教学学时和使用设备上考虑了一般院校的实际情况,具有较好的普遍适应性,因此谨向教授和学习工程力学、理论力学和材料力学相应实验课程的读者们推荐。

隋允康*

* 北京工业大学校学术委员会副主任兼秘书长,力学学科负责人,工程力学部主任,力学博士后流动站、博士点和硕士点负责人,国家级精品课程材料力学责任教授,国家级工程力学实验教学示范中心主任,国家级力学教学团队负责人。

前 言

原本没有写书的打算,但是当想选一本满足实验教学和探索要求的教材时,却遇到了困难。细想起来也不奇怪,十几年的改革已使力学实验教学发生了很大的变化。一是在理念上,力学实验教学已从过去的辅助理论教学转变到相对独立的一个创新能力培养环节;二是教学内容从以验证性、演示性实验为主拓展到综合性、设计性,甚至研究性实验,实验学时也要求增加到理论课时的20%;三是随着教学资源的整合和实验中心的成立,力学实验教学开始独立设课或独立组织,教学范围延伸到了理论力学甚至结构力学;四是教学设备开始步入计算机操作和控制时代。原来相对稳定、统一的教学内容和设备水平被打破,呈现出一种“百家争鸣”、变革和探索的局面,因此也就难以出现统领全局、适合众多需求的力学实验教材。在这种背景下,要求力学实验教材的统一既不科学也不现实,但只要定位得当,同样可以出好教材。正是由于近几年出现的一批优秀教材才为本书编写提供了丰富的参考和研究资料。

本书编写致力于解决以下四个问题:

(1) 面向一般高校。在教学内容、教学学时和使用设备上考虑一般院校的实际情况,有较好的普遍适应性。实验教材不可能对每个学校都适合,但主要内容或大部分内容适合比较多的学校是可以做到的。

(2) 常规实验要重视基本原理、方法和操作;综合设计实验要有特色,易推广,能提供比较大的创新设计空间。使读者通过力学实验受到再现基本理论、运用综合知识、认识工程问题、提高实验能力的基本训练。

(3) 教学内容和思想要有先进性和前瞻性。要反映新的实验规范、实验技术和实验方法,至少开辟这样的窗口,指出新的思路和途径。

(4) 设备投入少,占用空间小。力求一般实验容易开出,投入不大,做到不难,一机多用。

为了实现这些目标,本书编写中重点做了四个方面的努力和尝试:

(1) 拉伸与压缩、扭转、冲击、疲劳等材料力学性能检测实验尽量采用新规范、新符号,实验设备为通用试验机,实验方法与设备操作新老兼顾;设备介绍既不过细,也不致太笼统,重在基本结构、原理和使用上达到以小见大、触类旁通的目的。对于弹性模量、弯曲正应力、弯扭组合等电测实验,突出基本原

理和方法,即使所用设备不同,仍能起到指导作用。

(2) 选用“XL3418T 材料力学综合设计试验台”为电测实验和设计创新实验的教学平台。首先这是因为该试验台是在原“材料力学多功能试验台”基础上开发的,保留了原试验台的全部功能,而原试验台为定型产品,生产厂家不少,已被包括重点高校在内的很多高校选用。这样即使不换新试验台,也不会影响本书的使用。其次 XL3418T 型试验台有一个非常好的创新设计平台,能够设计出数十种桁架、刚架、压杆组合等结构形式,对培养学生的创新设计思维和力学分析能力十分有利。这个试验台综合设计能力强,价格不贵,市场前景好。

(3) 理论力学实验设备选用了浙江大学庄表中教授开发的“理论力学创新与应用演示教学系统”。因为这套系统的组成相对固定,已被很多高校选用。这次教材编写完成了部分代表内容的教学体系构件工作,有利于充分发挥该系统的教学作用。

(4) 努力建立一种比较完整、系统和先进的工程力学实验课程体系。为此,在绪论中总结回顾了力学实验的科学地位,论证梳理了工程力学实验教学的任务、内容和方法;确立了按实验性质和实验方法划分章节的编排体系,纳入了“实验数据的统计处理”一章内容;每章有概述,介绍相关的背景知识或发展概况,努力拓宽读者的力学实验认识空间。在内容安排上没有完全拘泥于实验学时的多少,在把握实验教学主线的时候,尽可能反映新思想、新技术、新方法,所以光测力学实验一章介绍了一些新方法。

在投笔收稿之际,深感此项工作的艰辛,很多同事也为此付出了很多劳动。参与编写或提供素材的情况如下。第 3 章:韩明岚;第 4.2~4.5 节:陈建林、纪彩虹;第 4.6~4.7 节:陈凡秀、陈建林;第 5.3~5.5 节:陈建林;第 5.6~5.8 节:张黎明;第 6 章:陈凡秀;第 7.2~7.5 节:张黎明;第 8.2~8.5 节:陈建林、纪彩虹、高倩。其余章节由本人主笔,并负责了全部章节的修改、提炼、补充完善或重写工作。另外,马鸿洋、张效伟以及硕士研究生李光辉、韩立亮等负责了部分插图的绘制修改工作。

由于作者水平有限,存在不当与错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

王谦源

2008 年 8 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 实验与力学实验的地位	1
1.2 工程力学实验教学的任务	3
1.3 工程力学实验教学的内容	5
1.4 工程力学实验教学的方法	6
第 2 章 实验数据的统计处理	7
2.1 概述	7
2.2 数据记录与计算法则	7
2.3 误差分析	8
2.4 随机误差的统计分析方法.....	11
2.5 数据表示方法.....	13
第 3 章 理论力学实验	20
3.1 概述.....	20
3.2 ZME-1 多功能试验台简介	20
3.3 演示实验.....	23
3.4 摩擦因数测定.....	31
3.5 微型电机效率测定.....	34
3.6 等效方法求转动惯量.....	38
3.7 自激振动.....	41
第 4 章 材料力学性质检测实验	45
4.1 概述.....	45
4.2 拉伸实验.....	45
4.3 压缩实验.....	53
4.4 扭转实验.....	57
4.5 剪切弹性模量 G 的测定实验	62
4.6 冲击实验.....	64

4.7	金属疲劳实验	67
第5章	电测应力分析实验	74
5.1	概述	74
5.2	应变电测原理与技术	75
5.3	弹性模量和泊松比测定实验	81
5.4	梁的纯弯曲正应力实验	83
5.5	等强度梁实验	86
5.6	薄壁圆筒的弯扭组合变形实验	89
5.7	偏心拉伸实验	93
5.8	压杆稳定实验	96
第6章	光测力学实验	100
6.1	光测力学的发展	100
6.2	光弹实验原理	101
6.3	光弹性基本实验	111
6.4	云纹干涉技术	115
6.5	电子散斑干涉技术实验	123
6.6	剪切电子散斑干涉技术实验	127
6.7	二维数字散斑相关测量实验	133
第7章	综合设计实验	138
7.1	概述	138
7.2	XL3418T 材料力学综合设计试验台简介	138
7.3	静定桁架结构与应力分析实验	143
7.4	超静定桁架结构与应力分析实验	146
7.5	刚架组合设计与应力分析实验	150
7.6	薄壁构件拉伸实验	153
第8章	材料试验机	156
8.1	概述	156
8.2	液压式万能材料试验机	156
8.3	电子万能试验机	159
8.4	扭转试验机	163
8.5	电子扭转试验机	167
8.6	微机控制高频疲劳试验机	170
	参考文献	176

第 1 章 绪 论

1.1 实验与力学实验的地位

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或间接地和力学实验相联系。按照武际可先生的说法,“力学本质上是一门观察和实验科学”。

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,但作为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(Leonardo di ser Piero da Vinci, 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(Galileo Galilei, 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,才有了比萨斜塔落体实验、小球斜面滚动实验等著名实验,也才有了摆的定律、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重量”。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 世纪初至 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,是伴随欧洲资本主义生产方式陆续取代封建的生产关系,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。好几个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、发明和发现而彪炳史册。在伽利略前后,有第谷(Tycho Brahe, 1510~1601)的30年天文观测,盖利克(Otto von Guericke, 1602~1686)的马德堡真空半球实验,胡克(Hooke Robert, 1635~1703)的弹簧受力实验、重力实验,库仑(Charlse-Augustin de Coulomb, 1736~1806)的扭秤发现和扭转实验,卡文迪什(Henry Cavendish, 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(Christiaan Huygens, 1629~1695)发明的。科学界也公认,如果没有伽利略、开普勒(Johannes Kepler, 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(Sir Isaac Newton, 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,很大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。即便是对微积分同样作出巨大贡献的莱布尼茨(Gottfried Wilhelm von Leibniz, 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。

对于实验在力学学科发展中的作用,武际可先生分为三类:第一类指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的求解问题的实验。工程力学属于经典力学范畴,经过200多年的发展,力学早已脱胎于物理学,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。特别是计算机的出现和计算科学的迅速发展,使得过去无法求解的问题有了计算分析方法,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,这是因为:

(1) 经典力学研究的是宏观和中观问题,进入细观和微观层面后,许多理论不再适应,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,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、遥测和预报正在成为质量监控预防灾害的重要手段,许多重点攻关项目甚至直接做原位原型荷载实验。

因此,面向 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,具有良好的实验分析和观察意识。

1.2 工程力学实验教学的任务

工程力学实验教学的任务是由工程人才的培养要求和工程力学的教学内容决定的。

虽然我国目前把工程力学划为力学下的一个二级学科,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,通常不冠工程力学名称。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名称,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。

工程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实验课。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,实验教学的功能和地位得到加强,主要体现在三个方面:

- (1) 改变重理论轻实践的教育教学思想,强调实验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,不仅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的独立运行或独立设课创造了条件。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,形成了工程力学实验课的基本架构。

简言之,工程力学实验课并非是和工程力学理论课简单配套的实验教学环节,也不是科学研究意义上的工程力学实验。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,像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。本书以材料力学的实验为主,包括部分理论力学和结构力学实验内容,教学任务概括为以下几个方面:

- (1) 通过实验观察、验证和了解工程力学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。

1.3 工程力学实验教学内容

工程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也有联系。“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、桁架设计等虽然是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,工程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,将工程力学实验内容划分为五类:

(1) 理论力学实验。主要包括动静滑动摩擦系数测定实验,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) 材料力学性质检测实验。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完全相同。

(4) 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。

(5) 设计性实验。主要利用已经开发并面市的材料力学综合设计试验台,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。

实验教学课的一个特点是教学内容与设备仪器密切相关。因此,教学内容还包括主要设备仪器的原理和使用介绍,本书将其单独列入一章。

1.4 工程力学实验教学的方法

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;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,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;结果表达要清晰、简洁、规范,文字表述要层次清楚,语言流畅。

第 2 章 实验数据的统计处理

2.1 概 述

工程力学实验是通过实验观测的数据获得力学内在规律的。由于实验过程受到主、客观多方面的影响,观测的数据通常存在多种误差甚至错误,这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,这个过程就是数据的统计分析。要想根据观测的数据获得力学内在规律,还需运用表格、图像、公式、数学模型或统计数值等方法清晰、简洁地表示输入输出量之间的关系,这个过程称为数据处理。本章主要结合工程力学实验,介绍实验观测数据的常用数学统计方法和数据处理方法。

2.2 数据记录与计算法则

2.2.1 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。例如,力学实验中的荷载、位移、应变显示,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,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、0.03020 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。

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，必须采用与观测设备精度相应的位数记录数据。

2.2.2 有效数字运算法则

在数据处理中要对大量的有效数字进行运算，这就涉及运算结果的取位和舍入等问题，必须按照一定规则进行。常用的基本运算法则如下：

(1) 记录数据时，只保留 1 位可疑数字。

(2) 有效数字以后的数字舍弃方法是“四舍六入五凑双”，即若末位有效数字后的第一位数字大于 5，则在末位上增加 1；若小于 5 则舍去不计；若等于 5 而末位数为奇数时增加 1，为偶数则舍去不计。

(3) 计算有效数字位数时，如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) 进行加减法运算时，各数小数点后需保留的位数要与各数中小数点后位数最少的相同。例如， $12.58 + 0.0081 + 4.546$ 应写为 $12.58 + 0.01 + 4.55 = 17.14$ ，而不应算成 17.1341。

(5) 进行乘除法运算时，各因子保留的位数以有效数字最少的为准，所得积或商的有效数字位数也应与原来各数中有效数字最少的那个数相同。例如， $0.0121 \times 25.64 \times 1.05782$ 应写为 $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$ 。虽然这后 3 个数的乘积为 0.3283456，但只应取其积为 0.328。

(6) 大于或等于 4 个的数据计算平均值时，有效位数增加 1 位。

2.3 误差分析

2.3.1 真值与误差

被测物理量的实际值称为真值。真值是根据统一制定的标准定义的，这种标准是以长期不变的基准实物和标准器具的数值规定的，如 1m 长就规定为氦 86 原子在真空中的波长的 1650763.73 倍等。有时真值可以用理论公式表达，如三角形的内角和为 180° 等。但绝对的真值是无法获得的，因为大量广泛的测量工作无法让我们的测量仪器和国家标准比对，只能通过国家建立的多级计量检定网按照逐级计量传递关系对比。通常某一级仪器以比它高一级的标准器为比较基准，并将其基准量当做真值，称为相对真值。