

21 世纪高等学校工科力学实验系列教材

结构力学实验

■ 刘礼华 欧珠光 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



世纪高等学校工科力学实验系列教材

结构力学实验

■ 刘礼华 欧珠光 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构力学实验/刘礼华,欧珠光编著. —武汉:武汉大学出版社,
2006.7

21 世纪高等学校工科力学实验系列教材

ISBN 7-307-05071-4

I. 结… I. ①刘… ②欧… III. 结构力学—实验—高等学校—
教材 IV. O342-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 044557 号

责任编辑:李汉保

责任校对:黄添生

版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北新华印务有限责任公司

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:325 千字

版次:2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-05071-4/O · 342 定价:20.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售
部门联系调换。

内 容 简 介

根据结构力学实验的目的与要求,本书分成结构力学实验与结构力学实验基础知识两部分。主要内容为:1. 介绍实验的目的、意义、要求、类型、测试系统仪器及实验模型设计简介,然后介绍4个结构几何组成规律及优化实验,11个静力学实验及14个结构动力学实验,16个综合性自选设计实验。2. 围绕结构力学实验所需的常用实验设备、模型设计制作、实验语言分析和实验数据处理等作简单介绍。

本书可以作为高等学校工科本科生实验课教材,也可以供土木建筑工程、建筑学、水利工程、电力工程以及相关技术人员参考。

高等学校工科力学实验系列教材编委会

主任委员:朱以文

副主任委员:侯建国 彭 华

委 员:(以姓氏笔画为序)

陈思作 徐远杰 梁枢果 傅旭东 曾又林

序

力学课程是工科专业的重要技术基础课,实验力学课程是其重要的组成部分。任何科学技术的发展,都伴随着科学实验而共同存在。未经过实验或实践检验过的理论,有可能是错误的理论。世界上许多重大科技发明、创造,大多是大量科学实验的结果。

以力学实验而言,其重要性更为直接。设计一个构件或结构,必须考虑其强度、刚度、稳定性,动态结构还需研究其动力特性,以求得在安全条件下的最大经济效果。为此,已经形成了理论力学、材料力学、结构力学、岩土力学、断裂力学、弹塑性力学等一系列理论及相应计算方法,这些学科在解决实际问题中起着重要的作用。但是这些学科的基本理论,许多是建立在若干简化的假定上的,都来自大量实验资料的归纳和总结;而判断理论及计算的结果正确与否,也需要实验或实践来检验。

虽然如今科学计算已经与理论分析和实验技术相并列,成为第三种科学方法,并被提到一个重要的高度。但是力学实验技术无论是作为认识和检验真理的最终的标准,还是作为直接解决实际工程中的力学问题的重要手段,仍然有着不可替代的地位。

对于已经有了数学模型的力学问题,从理论上讲可以用分析手段求解,但除了个别简单问题外,实际上是难以求得理论解的;随着计算机技术的发展,使科学计算方法,如有限元法、边界元法等方法能解决大量以前无法用理论分析方法解决的问题。但是数值计算方法仍然来自于理论模型,仍然是在理论模型的基本假定下进行数值计算的。对于新型或复杂结构形式、采用新材料的结构以及复杂工作条件下的力学问题,理论分析和数值计算所引入的假设和简化的合理性还未得到证实之前,往往首先需要用实验的结果进行校核和验证。

广义地讲,若把科学计算和数值仿真视为一种数值实验,实验力学的范围也可以涵盖数值计算技术。实际上实验力学已经与计算机技术和现代测试技术日益紧密结合,使实验力学有了很大的发展。这个发展已体现在两个方面,其一是应用计算机技术对实验数据进行采集和处理;其二是实验方法和数值计算方法相结合而产生的实验和数值分析杂交技术。该技术综合了两者的优势,在减少实验工作量和计算机工作的同时,还提高了实验成果的精度和可靠度,这已经成为现代实验力学的概念。

基于对实验力学以上的认识,我们组织编写了这套实验力学教材,力图在让学生学到基本实验技能的同时,也让他们开拓视野,并认识到实验力学新发展的前景。

在本系列教材中,实验内容的选取,实验方法和设备的介绍与阐述,既与力学的理论教学相呼应,尽可能达到力学课程的基本要求,又具有一定的独立性,并尽量体现教学改革和创新思维的成果。

我们相信,通过对本系列教材的学习和实践,可以使学生掌握力学实验的基本知识、基本技能和基本方法,同时也可以对学生的创新能力、实践能力进行一定的培养,从而对养成学生的科学习惯,提高科学素质起到重要作用。

参加编写本系列教材的教师为:

《材料力学实验》:朱铨庆,彭华,林树,曹定胜,乐运国,陈士纯;

《结构力学实验》:刘礼华,欧珠光;

《动力学实验》:刘礼华,欧珠光;

《岩土力学实验》:侍倩,曾亚武。

本系列材料所述内容的形成和不断完善是这些老师多年教学实践的积累,字里行间闪现着老师们辛勤的汗水与智慧。同时得到各位同事、同学和校内外同行的启发和帮助,武汉大学教务部和武汉大学土木建筑工程学院的领导也给予了很大的支持,特向他们表示敬意。谨此为序。

朱以文

2006年3月

前言

随着我国土木与水利工程建设事业的蓬勃发展,高等教育对力学教学的要求也越来越高。为适应当前力学课程教学的改革和发展,配合《结构力学课程教学基本要求》所规定内容的具体教学,在武汉大学创建国家力学实验教学示范中心;为进一步推动结构力学课程的深化改革,面向 21 世纪社会主义现代化建设培养更多的既能动脑,又能动手的合格科技人才。我们系统地总结了过去教学实践经验,将过去和现在对本科生教学开过的一些实验课内容作适当的筛选、加深和拓宽,编写成这本《结构力学实验》教材。

实验可以出理论、验证理论和发展理论,同时还可以为实践提供宝贵经验。在力学理论的发展中,力学实验也是最有效的实践检验。结构力学实验也曾为结构力学理论的验证和发展作出了重要贡献。纯弯曲梁截面上的应力分布规律理论,从假定到简单实验,从理论到实验验证,是历经了二百多年的实践和实验才得到的。结构力学理论中的几何不变体系的组成规则,是判断体系能否作为结构的重要规则,这些规则源于实践,亦可以通过简单的实验加以验证。此外,在简单结构的优化研究中,从经济、安全与合理的角度看,当受力、支座约束、截面积、材料和跨度等相同的条件下,拱结构比梁结构好,桁架比空腹梁优越,空腹梁比实心梁好,工字截面梁比矩形截面梁好,矩形截面梁比圆形截面梁好,在矩形截面梁中,截面的高比宽大才好,但截面的高过大又容易失稳等理论,亦可以通过一些简单实验加以证实。同样,桁架结构中的零杆,线性体系互等定理中的位移互等定理等诸多力学理论均可以通过实验加以验证。可见,力学实验对力学理论的创立、验证和发展是多么重要。

在结构力学中,实验与理论一样重要。理论分析虽然给出了结构内力、变形计算的方法与公式,但对一些几何形状复杂、变形较大、材料不均、受力复杂、有静有动等结构,在计算时不得不对其作一些假设,使其理想化。这样,往往会碰到一些力学模型如何建立的问题、非线性问题和数学计算问题。即使可以用目前较先进的有限元计算方法,通过计算机计算,所得的结果也只是近似的或不准确的。因此,通过实验验证就显得更加重要。此外,在结构动力计算中,如某些结构阻尼问题,无法用理论计算来求得,必须通过实验来获取。可见,结构力学理论不是万能的,必须重视结构力学实验,结构力学这一学科才是完整的。

此外,结构力学实验还可以增强学生对结构力学这一学科的感性认识,纠正学生重理论轻实践的不正确想法。虽然结构力学的许多理论和方法都比较经典和古老,而且,并非每个问题都要通过实验来验证,但是,结构力学的一些理论和方法对学生来说是一种全新的知识,学生是第一次接触这些知识,如果再通过一些实验、实践的教学环节,加强学生对这些力学理论的理解和吸收会大有好处。例如通过简单的静力学实验让学生理解桁架结构零杆的存在;通过梁截面优化实验,使学生更加清楚矩形截面的高比宽大才好,但高过于大又会引起失稳问题;通过结构动力学实验使学生清楚地看到结构的振动模态,等等。

工程力学实验的基本内容应该结合理论力学、材料力学和结构力学的教学内容,精选和

创新一批与之相适应的实验,这些实验既要便于教学安排,又要能反映出所学的力学基础知识和原理,同时这些实验还要系列化和层次化,能够显著地提高教学效果。

根据我们对工程力学实验教材的调研,从工程力学的角度来看,其内容并不完善,特别是关于结构力学内容方面的实验就更少。因此,根据《结构力学课程教学基本要求》,在编写《结构力学实验》这一教材的过程中,我们精选和创新了一批结构几何组成规律实验、结构静力学实验和结构动力学实验。《结构力学实验》的内容尽可能结合结构力学的理论教学,服务于理论教学。例如《结构力学》首先介绍什么样的体系可以作为承受力的结构?什么样的结构最优?书中给出了“结构”、“最优结构”的定义和理论。这些定义和理论对初学的学生来说不太容易理解。因此,我们设置了简单的“几何组成规律”和“结构优化”实验来增强学生对一些理论、抽象概念的理解和记忆。通过桁架零杆的测试实验,更是使同学明白了零杆的理论和作用,零杆虽不受力,但零杆不可或缺,从而增强了对“几何不变体系”作为“承受力的结构”的必要性。我们安排了 11 个结构静力学实验,这些实验可以帮助学生理解三个问题:1. 通过实验验证理论计算结果;2. 理论计算比较难的问题可以通过实验求解;3. 在结构力学中理论与实验都很重要,一个都不能缺。动力学实验有 14 个,主要让学生学会四个方面的问题:1. 测试结构的自由振动参数,如自振频率(周期)、振动幅值、振动模态与阻尼等;2. 测试结构的振动响应,如振动响应加速度、振动响应应变应力、位移等;3. 测试机械中转动部件的振动响应;4. 结构的隔震、防震和消震的实验。这些实验均有助于验证和发展已经很成熟的振动理论。

本书中一共选取 29 个基础实验,其中有较简单亦有较复杂的,有内容单一的,有内容稍微综合的,有同一实验目的而用不同结构或方法的,有用一般常规的仪器和传统方法,亦有用较先进的仪器和较现代的实验方法的,总的目的是为不同层次、不同专业的学生、不同条件的实验室选题,学生们不一定每个实验都要做。

为了取得较好的实验成果,要根据不同的实验目的,用不同的实验方法,选取不同的信号采集传感器,测试系统的信号放大、显示、记录、储存及分析处理等仪器装置,在本书中,我们根据结构力学实验的需要作专门介绍。此外,在结构力学实验中,不论静力学实验或动力学实验,用得最多的是应变片测试,我们把“电阻应变片测量技术在结构力学实验中的应用”作为一章编写在书中。

结构力学的实验对象,从大的方面可以分为结构的原型和模型两种。模型实验涉及到实验模型的制作问题。为了使模型实验的结果能反映原型的客观规律,其模型必须与原型相似,必须遵循相似理论定律,为此,我们编写了一节专门介绍结构力学实验模型的设计简介。

实验资料、数据的整理与分析,根据实验方法的不同而有不同的处理过程,传统方法是将原型数据系统化,通过计算制成图表和曲线,或用数学表达式来反映结构的力学性能及其规律等。在这一过程中,要掌握各种实验曲线、图形的画法;挠度、应力的计算方法;振动记录图的分析、处理和振动参数的确定方法。实验的目的在于认识事物的内在规律性,由于测量数值与真值之间始终存在误差,为了认识误差、使误差减少到最低程度,使实验结果符合客观实际,需要掌握误差分析和数据处理的方法,为此,本书又用一章介绍结构力学误差分析和数据处理的内容。

本书还列举了 3 个结合工程实际的综合性、自行设计的创新性实验,推举了 13 个实验

题目,供学生参考和选择实验。

本教材具有在实验内容方面简洁创新、实验方法方面科学严谨和实验技术方面先进可靠的优点。本教材的出版必将进一步推动结构力学课程的深化改革,为面向 21 世纪社会主义现代化建设培养科技人才,作出应有的贡献。

本书经反复探索,几易其稿,作者深深体会:

1. 《结构力学实验》是一门实践性很强的专业技术基础课程,该课程与《结构力学》课程一样是同等重要的课程。《结构力学实验》的最大特点是离开实践就无法真正掌握它,离开了它就不可能真正把《结构力学》这一学科学好。力学工作者一定要改变过去那种重理论轻实验的思想,开好《结构力学实验》课。

2. 本教材编写了 29 个基础实验,不是要求每个实验都要同学去做,要根据不同专业、不同教学目的与不同的实验条件,自行选用。

3. 在教材中编写的实验方法、实验的仪器和测试系统,与数据处理分析、模型制作、误差分析等,只有通过学生的具体实验才能理解和掌握。因此,学好本书的关键是每个学生都要动手、动脑,熟悉各种仪器设备的性能、安装、制作、测量布置和参数的测读,熟悉实验的全过程,才能学好本课程。

4. 综上所述,现代科学研究应包括理论研究和实验研究两方面,结构力学这一学科也是如此,除了其基本理论与方法外,其实验也是所有工程技术人员的重要专业技术基础课程。一个合格的工程师或高级工程师,若不懂得实验的理论和技術,就很难在工程设计和施工中取得突出的好成就,更谈不上在本学科有更大的建树。

结构力学实验属于较复杂的教学工作,由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2003 年 8 月于武汉大学

学生实验守则

结构力学实验是结构力学课程教学的重要实践性环节之一。为了保证实验教学的质量,培养学生独立地进行科学实验的能力,并养成文明实验的优良作风,特制定本守则,要求学生必须做到:

1. 在实验课前,分好实验小组,预习本书中指定实验项目和有关实验机、仪器、仪表的相应章节内容,了解实验的目的与要求、实验原理、实验步骤、实验机与仪器的使用方法、操作规程、数据处理方法等,并写出预习报告。在上实验课时,由实验指导教师检查预习情况。凡未进行预习或无故迟到者,指导教师有权停止其实验。

2. 进入实验室就是进入实验课堂,要服从指导教师的安排。应严格遵守实验课堂纪律和实验室的一切规章制度,注意保持安静,不得高声喧哗与打闹,不准吸烟,不准随地吐痰和乱丢纸屑,不准乱动实验室内与本次实验无关的机器、仪器、仪表和其他实验设施。

3. 在做实验时,应严格遵守操作规程,切实注意实验设备和人身安全。违犯操作规程或不听从指导教师的指导,从而造成实验设备损坏事故者,按学校有关规定进行处理;若发现实验设备出现故障或异常现象时,应立即停止操作,关闭电源,并报告指导教师及时处理。

4. 在实验过程中,实验小组每个成员要分工明确,密切配合,协调一致,认真操作,仔细观测实验现象,如实记录实验数据,主动锻炼自己独立动手和分析问题的能力。这是培养学生独立进行科学实验,积累实验技能所必经的实践过程。

5. 在实验结束时,应立即将实验机复原,把实验仪器、仪表、工具等清理归还,将实验场地整理干净。这将有助于培养学生良好的实验习惯和文明的工作作风;应及时将实验数据交实验指导教师审阅,经指导教师审定后,方可离开实验室。

6. 在课外应及时独立地写出实验报告,并按指导教师规定时间交送实验报告。实验数据处理按“四舍六入五单双法”进行,力求真实和准确。对示意图形、关系曲线、记录表格和计算公式,力求正确、整洁和清楚。文字说明通顺,书写工整。不得臆造数据,不得抄袭他人的实验报告。对于不符合要求的实验报告,指导教师有权退回令其重做。

目 录

第一篇 结构力学实验

第 1 章 结构力学实验概论	3
§ 1.1 结构力学实验的目的、意义及要求	3
§ 1.2 结构力学实验的类型	3
§ 1.3 结构力学实验的主要内容、测试系统及仪器	3
§ 1.4 结构力学实验模型设计简介	6
第 2 章 结构的几何组成规律与优化实验	15
§ 2.1 结构的几何组成规律实验(实验一)	15
§ 2.2 结构优化实验	19
§ 2.3 桁架零杆的检测实验(实验四)	22
第 3 章 结构静力学实验	25
§ 3.1 结构在静力作用下的内力实验	25
§ 3.2 结构的静变形实验	34
§ 3.3 结构的稳定性实验	38
§ 3.4 结构的影响线实验	44
第 4 章 结构动力学实验	50
§ 4.1 自由振动的主要参数实验	50
§ 4.2 结构振动的响应实验	63
§ 4.3 单盘转子动力学实验	73
§ 4.4 结构的隔震、防震、消震实验	78
第 5 章 工程实例与自选设计实验	82
§ 5.1 压力钢管补强加固的实验研究	82
§ 5.2 高层建筑结构坍塌破坏的实验研究	96
§ 5.3 某钢厂烧结分厂筛粉楼的振动测试研究	105
§ 5.4 综合性实验的课题推荐	118

第6章 结构力学实验误差分析和数据处理	120
§ 6.1 误差的基本概念及其分析	120
§ 6.2 实验数据处理	126

第二篇 结构力学实验基础知识

第7章 结构力学实验常用设备简介	137
§ 7.1 信号采集设备	137
§ 7.2 信号放大设备	152
§ 7.3 信号显示记录设备	157
§ 7.4 激振设备	168
§ 7.5 结构动力学测试系统的标定	174
第8章 电阻应变片测量技术在结构力学实验中的应用	177
§ 8.1 电阻应变片的工作原理及分类	178
§ 8.2 电阻应变片的工作特性	179
§ 8.3 电阻应变片的粘贴与防护	183
§ 8.4 电阻应变测量中的电桥原理及电桥的应用	184
§ 8.5 静态应变测量	189
§ 8.6 动态应变测量	195
参考文献	204

第 一 篇

结构力学实验

第1章 结构力学实验概论

§ 1.1 结构力学实验的目的、意义及要求

结构力学的研究对象是杆系结构。主要任务是研究杆系构成的组成规律和合理形式,以及在荷载等因素作用下的内力(强度)、变形(刚度)、稳定性及动力响应的计算原理和计算方法。

根据结构力学的计算原理和计算方法所得的杆系结构,仅仅是一种理论成果,该成果是否最合理?是否真正符合实际要求?还必须通过实验加以验证。此外,当制定设计规范、规程和对结构物的使用寿命评估、安全监控、加固评估等,也必须通过实验获得相关信息和论据。因此,结构力学实验的目的是:(1)使学生了解实验可创造理论、实验可验证理论、实验可为实践提供经验,反之,又可以用理论指导实验,理论与实验相辅相成、互相促进,使结构力学这一学科蓬勃发展;(2)使学生认识结构力学实验是保证工程结构的正确设计和安全运行所必不可少的重要环节,一定要认真参与实验;(3)培养学生使用多种实验仪器的能力和结构力学实验的基本功;(4)提高学生对结构力学综合实验的设计、组织和创新能力。

§ 1.2 结构力学实验的类型

结构力学实验的种类很多,这里只从三方面分类如下:

1. 从测试对象方面分:(1)结构的模型实验;(2)结构的原型实验。
2. 从力学性能方面分:(1)结构的静力实验;(2)结构的动力实验。
3. 从实验用途方面分:
(1)基础性实验;(2)提高和综合性实验;(3)创新和工程模拟实验。

根据上面的分类,本书所述的实验将分为结构的几何组成规律与优化实验、结构静力学实验、结构动力学实验和结构力学综合性自选设计实验四部分。其中有基础实验 27 个,综合性创新实验的典型例子 2 个,还推荐综合性创新实验 14 个,供老师和同学根据不同层次和具体条件进行选择。

§ 1.3 结构力学实验的主要内容、测试系统及仪器

1.3.1 实验的主要内容

1. 静力方面

- (1)结构的几何不变性;

(2) 结构的内力(应力)、变形(应变);

(3) 结构的稳定性。

2. 动力方面

(1) 振动幅值(位移、速度、加速度);

(2) 振动频率(振动周期);

(3) 振动相位:相角、振型、节点;

(4) 动平衡;

(5) 结构阻尼;

(6) 共振放大系数。

1.3.2 实验的测试系统框图

1. 静态测试系统框图,如图 1—1 所示

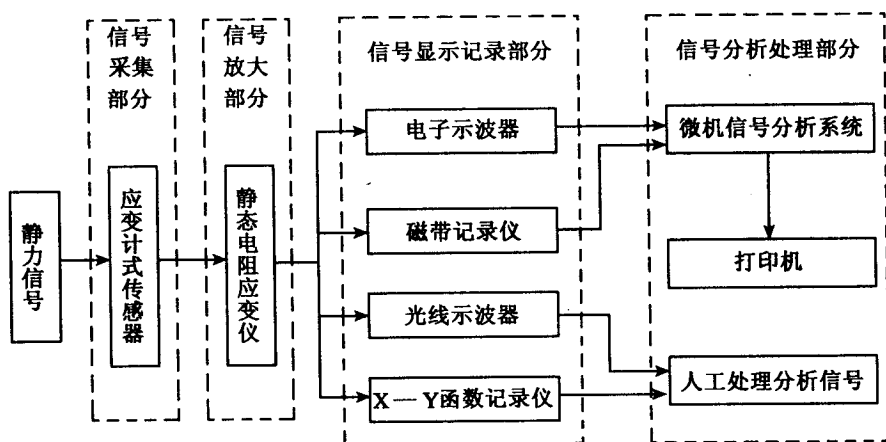


图 1—1

2. 动态测试系统框图,如图 1—2 所示

从上述可知,实验的测试系统大致可以归纳为信号采集、信号放大、信号显示记录储存、信号分析与处理等四大部分。

1.3.3 测试系统常用仪器

1. 静态测试仪器

(1) 信号采集——传感器

传感器的功能是把被测的机械变形的物理量转换为电信号,以供二次仪表放大、显示、记录、分析的元件。常用的传感器有:应变片、应变计式的电桥盒等。

(2) 信号放大器

信号放大器的功能是将传感器输出的信号放大,以便在示波器显示,记录设备记录和储存,分析设备进行数据处理或信号分析等。常用的放大器有静态电阻应变仪。

(3) 信号显示与记录设备