



普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

高校土木工程专业  
指导委员会规划推荐教材

# 建筑结构试验

湖南大学 易伟建 张望喜 编著  
同济大学 姚振纲 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

# 建筑结构试验

湖南大学 易伟建 张望喜 编著  
同济大学 姚振纲 主审

中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

建筑结构试验/易伟建, 张望喜编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-07569-6

I. 建... II. ①易... ②张... III. 建筑结构-结构试验-高等学校-教材 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 065062 号

**普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材**

**建筑结构试验**

湖南大学 易伟建 张望喜 编著

同济大学 姚振纲 主审

\*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{1}{4}$  字数: 347 千字

2005 年 7 月第一版 2006 年 7 月第二次印刷

印数: 4001—6000 册 定价: 23.00 元

ISBN 7-112-07569-6

(13523)

**版权所有 翻印必究**

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书根据土木工程专业教学要求编写，以结构试验的基本理论和基础知识为重点，注重理论与实际相结合。在章节安排上，大体与王济川教授主编的《建筑结构实验》（第二版）相同。其内容包括绪论、结构实验设计原理、结构静载试验、结构动载试验、结构非破损检测与鉴定、结构模型试验、试验数据的处理和分析等七章。

本书可作为大学本科土木工程专业专业课教材，也可供从事土木工程专业技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑：王 跃 牛 松

责任设计：董建平

责任校对：刘 梅 王金珠

# 前 言

结构试验既是一门科学又是一种技术，是研究和发展土木工程新结构、新材料、新工艺以及检验结构分析和设计理论的重要手段，在结构工程科学研究和技术创新等方面起着重要作用。目前，结构试验已成为土木工程专业学生必修的一门专业课程。本书根据土木工程专业教学要求编写，以结构试验的基本理论和基础知识为重点，注重理论与实践相结合，能使读者全面地掌握结构试验的基本方法与技能，以适应土木工程结构设计、施工、检测鉴定和科学研究工作的需要。

湖南大学早在 20 世纪 70 年代就开始编写建筑结构试验的教材，在本书编写过程中参考了湖南大学王济川教授主编的《建筑结构试验》(第二版)，注意到土木工程结构试验领域的新发展，对我国近年来在结构试验方面新的研究成果与先进技术、仪器设备也作了介绍。本书在内容的编排上，既注重全书的系统性，又考虑到每一章节的相对独立性，以便于读者学习。

本书章节的安排，大体与王济川教授主编的《建筑结构试验》相同。考虑到现代振动测试技术的要求，在第 4 章中，增加了振动理论基本知识的内容，以便和相应的测试与分析方法衔接。此外，本书中的部分内容超出本科教学大纲的要求，可供研究生教学和科研及工程实践参考。

在本书的编写过程中，参考了近年来国内各高校出版的结构试验的教材和专著，引用了学术论文中与结构试验方法相关的内容，特此表示感谢。本书由同济大学姚振纲教授审稿，也在此表示深深的谢意。

由于编者的水平与实践经验有限，书中有不当和遗漏之处，敬请读者批评指正。

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 结构试验的目的 .....	2
1.2 结构试验的分类 .....	3
1.3 结构试验技术的发展 .....	7
1.4 结构试验课程的特点 .....	9
<b>第2章 结构试验设计原理</b> .....	10
2.1 概述 .....	10
2.2 结构试验设计的基本原则 .....	10
2.3 测试技术基本原理 .....	16
<b>第3章 结构静载试验</b> .....	18
3.1 静载试验加载设备 .....	18
3.2 试验装置的支座设计 .....	27
3.3 应变测试技术 .....	32
3.4 静载试验用仪器仪表 .....	40
3.5 试验准备与实施 .....	51
3.6 结构静载试验示例 .....	62
<b>第4章 结构动载试验</b> .....	74
4.1 概述 .....	74
4.2 结构动载试验的仪器仪表 .....	76
4.3 结构振动测试 .....	97
4.4 结构抗震试验 .....	121
4.5 结构疲劳试验 .....	140
<b>第5章 结构非破损检测与鉴定</b> .....	145
5.1 概述 .....	145
5.2 混凝土结构的非破损检测 .....	146
5.3 钢结构检测 .....	160
5.4 砌体结构非破损检测 .....	165
5.5 结构现场荷载试验 .....	171
5.6 结构可靠性鉴定 .....	175
<b>第6章 结构模型试验</b> .....	179
6.1 概述 .....	179

6.2 相似理论 .....	181
6.3 结构模型设计 .....	191
6.4 模型的材料、制作与试验 .....	200
<b>第7章 试验数据的处理和分析</b> .....	<b>205</b>
7.1 概述 .....	205
7.2 试验数据的整理和转换 .....	205
7.3 测试数据的误差 .....	207
7.4 试验数据的表达方式 .....	217
<b>附录</b> .....	<b>228</b>
附录1 电阻应变片粘贴工艺、工作特性等级及常用胶粘剂和防潮剂 .....	228
附表 1-1 电阻应变计单项工作特性各等级的技术要求 .....	229
附表 1-2 应变计应测和评级工作特性项目表 .....	230
附表 1-3 常用电阻应变计胶粘剂 .....	231
附表 1-4 常用电阻应变计防潮剂 .....	233
附录2 回弹法测强数据表(部分) .....	234
附表 2-1 测区混凝土强度换算表 .....	234
附表 2-2 泵送混凝土测区混凝土强度换算修正值表 .....	238
附表 2-3 非水平状态检测时的回弹值修正值 .....	238
附表 2-4 不同浇筑面的回弹值修正值 .....	239
附录3 结构试验指导书 .....	240
试验一 电阻应变片灵敏系数的测定 .....	240
试验二 预制钢筋混凝土空心板鉴定试验 .....	241
试验三 简支钢桁架非破损试验 .....	247
试验四 钢筋混凝土简支梁试验 .....	251
试验五 钢筋混凝土短柱破坏试验 .....	255
<b>参考文献</b> .....	<b>258</b>

# 第1章 绪 论

传统的结构工程科学由建筑材料、结构力学和结构试验组成。现代结构工程科学中结构设计理论和结构计算技术的发展,使结构工程科学成为一门相对完整的工程科学。结构试验是结构工程科学的一个重要组成部分。百余年来,结构试验一直是推动结构理论发展的主要手段。

最早的结构试验,是意大利科学家伽利略在17世纪完成的(图1-1)。也是从伽利略的时代开始,人们对材料力学进行系统的研究。18世纪,法国科学家容格密里在一根简支木梁的横断面上开槽,塞入硬木块。试验证明,这种梁的承载能力丝毫不低于整体的未开槽的木梁。这就表明木梁上半部分存在压应力,下半部分存在拉应力,中间有一中性层。这个试验,奠定了材料力学受弯构件计算理论的基础。19世纪到20世纪初期,近代的大型工程结构的建造,大多直接或间接地依赖于结构试验的结果。



图 1-1 伽利略的悬臂梁试验

现代计算机技术和计算力学的发展,以及长期以来结构试验所积累的成果,使结构试验不再是研究和发展结构理论的惟一途径。结构工程师也有能力利用计算机处理大型复杂结构的设计问题。但结构试验仍是结构工程科学的主要支柱之一。例如,钢筋混凝土结构、砌体结构的设计理论主要建立在试验研究的基础之上。

结构试验是结构工程科学发展的基础,反过来,结构工程科学发展的要求又推动结构试验技术不断进步。高层建筑、大跨径桥梁、大型海洋平台、核反应堆安全壳等大型复杂结构的出现,对结构整体工作性能、结构动力反应以及结构在极端灾害性环境下的力学行为提出更高要求。与此同时,计算机技术和其他现代工业技术的发展,也为结构试验技术的发展提供了广阔的空间。

《建筑结构试验》是土木工程专业的一门专业课。这门课程主要介绍结构试验的理论和方法。通过这门课程的学习,掌握结构试验的基本原理,了解结构试验的仪器、仪表和试验设备,在结构试验中,进一步认识结构性能并培养进行结构试验的能力。

结构试验的任务是基于结构基本原理,使用各种仪器仪表和试验设备,对结



构物受作用后的性能进行观测,通过量测的数据,如变形、应变、温度、振幅、频率、裂缝宽度等,了解并掌握结构的力学性能,对结构或构件的承载能力和使用性能做出评估,为验证和发展结构理论提供试验依据。

结构试验以实证的方式反映结构的实际性能,它为工程实践和结构理论提供的依据是其他方法所不能取代的。

## 1.1 结构试验的目的

根据不同的试验目的,结构试验一般分为研究性试验和鉴定性试验。

研究性试验通常用来解决下面两方面的问题:

(1) 通过结构试验,验证结构计算理论或通过结构试验创立新的结构理论。随着科学技术的进步,新方法、新材料、新结构、新工艺不断涌现。例如,高性能混凝土结构的工程应用,高温高压工作环境下的核反应堆安全壳,新的结构抗震设计方法,全焊接钢结构节点的热应力影响区等。一种新的结构体系、新的设计方法都必须经过试验的检验,结构计算中的基本假设需要试验验证,结构试验也是新的发现的源泉。结构工程科学的进步离不开结构试验。我们称结构工程为一门实验科学,就是强调结构试验在推动结构工程技术发展中所起的作用。

(2) 通过结构试验,制定工程技术标准。由于工程结构关系到公共安全和国家经济发展,建筑结构的设计、施工、维护必须有章可循。这些规章就是结构设计规范和标准、施工验收规范和标准以及其他技术规程。我国在制定现行的各种结构设计和施工规范时,除了总结已有的工程经验和结构理论外,还进行了大量的混凝土结构、砌体结构、钢结构的梁、柱、板、框架、墙体、节点等构件和结构试验。系统的结构试验和研究为结构的安全性、使用性、耐久性提供了可靠的保证。

鉴定性试验通常有直接的生产性目的和具体的工程对象,这类试验主要用于解决以下三方面的问题:

(1) 通过结构试验检验结构、构件或结构部件的质量。建筑工程由很多结构构件和结构部件组成。例如,在钢筋混凝土结构和砖混结构房屋中,大量采用预制混凝土构件。这些预制构件的产品质量必须通过结构试验进行检验。后张法生产的预应力混凝土结构,锚具等部件是结构的组成部分,其质量也必须通过试验进行检验。大型工程结构建成后,如大跨桥梁结构要求进行荷载试验,这种试验可以全面综合地鉴定结构的设计和施工质量,并为结构长期运行和维护积累基本数据。结构试验也是处理工程结构质量事故的常用方法之一。

(2) 通过结构试验确定已建结构的承载能力。结构设计规范规定,已建结构不得随意改变结构用途。当结构用途需要改变,而单凭结构计算又不足以完全确定结构的承载能力时,就必须通过结构试验来确定结构的承载能力。已建结构随

着使用年限的增加,其安全度逐渐降低,结构可靠性鉴定的主要任务就是确定结构的剩余承载能力。结构遭遇极端灾害性作用后,如火灾、地震灾害,结构发生破损,在对结构进行维护加固前,也要求通过试验对结构的剩余承载能力做出鉴定。

(3) 通过结构试验验证结构设计的安全度。这类试验大多在实际结构开始施工前进行。设计规范称之为“结构试验分析方法”。结构试验的主要目的是由试验确定实际结构的设计参数,验证结构施工方案的可行性和结构的安全度。试验对象多为实际结构的缩小比例模型。例如,大跨度体育场馆屋盖结构和高耸结构的风洞试验,前者通过试验确定结构的风压设计参数,后者通过试验确定结构的风振特性;又如,在地震区建造体形复杂的高层建筑,通常要进行地震模拟振动台试验,试验结果和计算结果相互验证,以确保结构的安全。

## 1.2 结构试验的分类

根据结构试验的目的的不同,结构试验可分为研究性试验和鉴定性试验。我们知道,结构试验本质上是通过试验了解结构的性能,其中,最重要的因素就是在结构试验中模拟实际结构所处的环境。这里所说的环境,包括温度、湿度、地基、荷载、地震、火灾等各种因素。根据这些因素,可以对结构试验做出不同的分类。

### 1.2.1 原型及模型结构和构件试验

这是根据试验对象做出的分类。在这类结构试验中,试验对象的尺寸与实际结构尺寸相同或接近,因而可以不考虑结构尺寸效应的影响。完全足尺的原型结构试验一般用于鉴定性试验,大多在工程结构现场进行。我国最早进行的大型结构原型试验项目之一是1957年武汉长江大桥的静动载试验。原型结构的现场试验大多为非破坏性试验,而在实验室内进行的结构构件试验,则以破坏性试验为主。由于结构构件的性能有可能与结构尺寸的大小有关,例如,钢筋混凝土受弯构件的裂缝宽度,与钢筋直径、混凝土保护层厚度等因素有关,在研究采用粗钢筋配筋的混凝土受弯构件的裂缝性能时,构件的尺寸就应接近实际结构构件的尺寸。

虽然结构可以分解为梁、柱、板、墙体、节点等基本构件,但是近年来,结构工程师和研究人员越来越重视结构整体作用。因此,也有不少用于研究目的的足尺结构试验。我国自20世纪70年代以来,先后进行了装配整体式框架结构、钢筋混凝土框架轻板结构、配筋砌体混合房屋结构的足尺结构试验。这类大型结构试验,不受尺寸效应影响,能够更全面地反映结构构造和结构各部分之间的相互作用,有着构件试验或模型试验不可取代的研究意义。进入21世纪,国内不

少高等院校和研究机构开始着手大型结构实验室的建设,大型足尺结构试验在实验室内进行,能够将试验进行到破坏阶段,从而掌握足尺结构的全过程性能。同时能减少环境因素的影响,得到更精确的试验数据。

原型结构试验的投资大,试验周期长,加载设备复杂,不论是鉴定性试验还是研究性试验都受到许多限制。有些大型结构不可能进行足尺结构的破坏性试验,在实际结构上进行试验,只能得到结构使用阶段的性能。因此,在实验室进行的大量结构试验均为模型试验。所谓模型结构试验,是指被试验的结构或构件与原型结构在几何形状上基本相似,各部分结构或构件的尺寸按比例缩小,模型结构有原型结构的主要特征。例如,为研究风对结构的作用而进行的结构风洞试验,模型结构尺寸与原型结构尺寸之比可以达到1:100左右。结构的地震模拟振动台试验也常采用大比例缩尺模型。

与原型结构试验相比,模型结构试验的关键之一是模型结构的设计与制作。模型必须根据相似理论设计,模型所受的荷载也应符合相似关系。使得模型的力学性能与原型相似。这样,就可以从模型试验的结果推断原型结构的性能。模型试验常用于验证原型结构设计的设计参数或结构设计的安全度,也广泛应用于结构工程科学研究。对于混凝土结构和砌体结构,模型试验的另一关键是缩小尺寸的模型存在尺寸效应,对这类模型试验的结果必须经过校正以消除尺寸效应的影响。

### 1.2.2 结构静载试验

根据结构试验中被试验的结构或构件所承受的荷载对结构试验做出分类,可分为静载试验和动载试验两大类。

静载试验是建筑结构最常见的试验。所谓“静力”一般是指试验过程中结构本身运动的加速度效应即惯性力效应可以忽略不计。根据试验性质的不同,静载试验可分为单调静力荷载试验,低周反复荷载试验和拟动力试验。

在单调静力荷载试验中,试验加载过程从零开始,在几分钟到几小时的时间内,试验荷载逐渐单调增加到结构破坏或预定的状态目标。钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构的设计理论和方法就是通过这类试验而建立起来的。

低周反复荷载试验属于结构抗震试验方法中的一种。房屋结构在遭遇地震灾害时,强烈的地面运动使结构承受反复作用的惯性力。在低周反复荷载试验中,利用加载系统使结构受到逐渐增大的反复作用荷载或交替变化的位移,直到结构破坏。在这种试验中,结构或构件受力的历程有结构在地震作用下的受力历程的基本特点,但加载速度远低于实际结构在地震作用下所经历的变形速度,为区别于单调静力荷载试验,有时又称这种试验为伪静力试验。

结构拟动力试验也是一种结构抗震试验方法。结构拟动力试验的目的是模拟结构在地震作用下的行为。在结构拟动力试验中,将试验过程中量测的力、位移

等数据输入到计算机中,计算机根据结构的当前状态信息和输入的地震波,控制加载系统使结构产生计算确定的位移,由此形成一个递推过程。这样,计算机和试验机联机试验,得到结构在地震作用下的时程响应曲线。

静载试验所需的加载设备较为简单,有些试验可以直接采用重物加载。由于试验进行的速度很低,可以在试验过程中仔细记录各种试验数据,对试验对象的行为进行仔细的观察,得到直观的破坏形态。例如,在钢筋混凝土梁的受弯试验中,需要观测并记录截面的应变分布、沿梁长度方向的挠度分布、荷载-挠度曲线、裂缝间距和裂缝宽度、破坏形态等,这些数据和信息都通过静载试验获取。

按荷载作用的时间长短,结构静载试验又可分为短期荷载试验和长期荷载试验。建筑材料具有一定的粘弹性特性,例如,混凝土的徐变和预应力钢筋的松弛。此外,影响建筑结构耐久性的因素往往是长期的,例如,混凝土的碳化和钢筋的锈蚀。在短期静力荷载试验中,忽略了这些因素的影响。当这些因素成为试验研究的主要对象时,就必须进行长期静力荷载试验。长期荷载试验的持续时间为几个月到几年不等,在试验过程中,观测结构的变形和刚度变化,从而掌握时间因素对结构构件性能的影响。在实验室条件下进行的长期荷载试验,通常对试验环境有较严格的控制,如恒温、恒湿、隔振等,突出荷载作用这个因素,消除其他因素的影响。除在实验室进行长期荷载试验外,在实际工程中,对结构的内力和变形进行长期观测,也属长期荷载试验。这时,结构所承受的荷载为结构的自重和使用荷载。近年来,工程师和研究人员较为关心的“结构健康监控”,就是基于长期荷载试验所获取的观测数据,对结构的运行状态和可能出现的损伤进行监控。

### 1.2.3 结构动载试验

实际工程结构大多受到动力荷载作用,如铁路或公路桥梁、工业厂房中的吊车梁,风对大跨结构和高耸结构的作用,地震对结构的作用也是一种强烈的动力作用。结构动载试验利用各类动载试验设备使结构受到动力作用,并观测结构的动力响应,进而了解、掌握结构的动力性能。

#### 1. 疲劳试验

当结构处于动态环境,其材料承受波动的应力作用时,结构内某一点或某一部分发生局部的、永久性的组织变化(损伤)的一种递增过程称之为疲劳。经过足够多次应力或应变循环后,材料损伤累积导致裂纹生成并扩展,最后发生结构疲劳破坏。结构或构件的疲劳试验就是利用疲劳试验机,使构件受到重复作用的荷载,通过试验确定重复作用荷载的大小和次数对结构承载力的影响。对于混凝土结构,常规的疲劳试验按每分钟 400 次到 500 次、总次数为 200 万次进行。疲劳试验多在单个构件上进行,有为鉴定构件性能而进行的疲劳试验,也有以科学研究为目的的疲劳试验。

## 2. 动力特性试验

结构动力特性是指结构物在振动过程中所表现的固有性质,包括固有频率(自振频率)、振型和阻尼系数。结构的抗震设计、抗风设计与结构动力特性参数密切相关。在结构分析中,采用振型分解法求得结构的自振频率和振型,称为模态分析。用实验的方法获得这些模态参数的方法称为实验模态分析方法。测定结构动力特性参数时,要使结构处在动力环境下(振动状态)。通常,采用人工激励法或环境随机激励法使结构产生振动,同时量测并记录结构的速度响应或加速度响应,再通过信号分析得到结构的动力特性参数。动力特性试验的对象以整体结构为主,可以在现场测试原型结构的动力特性,也可以在实验室对模型结构进行动力特性试验。

## 3. 地震模拟振动台试验

地震时强烈的地面运动使结构受到惯性力作用,结构因此倒塌破坏。地震模拟振动台是一种专用的结构动载试验设备,它能真实的模拟地震时的地面运动。试验时,在振动台上安装结构模型,然后控制振动台按预先选择的地震波运动,量测记录结构的动位移、动应变等数据,观察结构的破坏过程和破坏形态,研究结构的抗震性能。地震模拟振动台试验的时间很短,通常在几秒到十几秒内完成一次试验,对振动台控制系统和动态数据采集系统都有很高的要求。地震模拟振动台是结构抗震试验的关键设备之一,大型复杂结构在地震作用下表现出非线性非弹性性质,目前的分析方法还不能完全解决结构非线性地震响应的计算,振动台试验常常成为必要的“结构试验分析方法”。

## 4. 风洞试验

工程结构风洞实验装置是一种能够产生和控制气流以模拟建筑或桥梁等结构物周围的空气流动,并可量测气流对结构的作用,以及观察有关物理现象的一种管状空气动力学试验设备。在多层房屋和工业厂房结构设计中,房屋的风载体型系数就是风洞试验的结果。结构风洞试验模型可分为钝体模型和气弹模型两种。其中,钝体模型主要用于研究风荷载作用下,结构表面各个位置的风压,气弹模型则主要用于研究风致振动以及相关的空气动力学现象。超大跨径桥梁、大跨径屋盖结构和超高层建筑等新型结构体系常用风洞试验确定与风荷载有关的设计参数。

除上述几种典型的结构动载试验外,在工程实践和科学研究中,根据结构所处的动力学环境,还有强迫振动试验、周期抗震试验、冲击碰撞试验等结构动载试验方法。

### 1.2.4 结构非破损检测

结构非破损检测是以不损伤结构和不影响结构功能为前提,在建筑结构现场,根据结构材料的物理性能和结构体系的受力性能对结构材料和结构受力状态

进行检测的方法。

现场检测混凝土强度的有回弹法, 超声一回弹综合法, 拔出法, 还有使结构受到轻微破损的钻芯法等方法。检测混凝土内部缺陷的有超声法、脉冲回波法、X 射线法和雷达法等方法。还可以用非破损的方法检测混凝土中钢筋的直径和保护层厚度。

检测砂浆和块体强度可用回弹法、贯入法等方法。检测砌体抗压强度的有冲击法、推出法、液压扁顶法等方法。

检测钢结构焊缝缺陷的有超声法、磁粉探伤法、X 射线法等方法。

对原型结构进行使用荷载试验, 检验结构的内力分布、变形性能和刚度特征, 试验荷载不会导致结构出现损伤, 这类荷载试验属于非破损检测方法。

采用动力特性试验方法进行结构损伤诊断和健康监控, 也是非破损检测中的一种重要方法。

## 1.3 结构试验技术的发展

现代科学技术的不断发展, 为结构试验技术水平的提高创造了物质条件。同样, 高水平的结构试验技术又促进结构工程学科不断发展和创新。现代结构试验技术和相关的理论及方法在以下几个方面发展迅速。

### 1.3.1 先进的大型和超大型试验装备

在现代制造技术的支持下, 大型结构试验设备不断投入使用, 使加载设备模拟结构实际受力条件的能力越来越强。例如, 电液伺服压力试验机的最大加载能力达到 50000kN, 可以完成实际结构尺寸的高强度混凝土柱或钢柱的破坏性试验。计划建设的地震模拟振动台阵列, 由多个独立振动台组成, 当振动台排成一列时, 可用来模拟桥梁结构遭遇地震作用, 若排列成一个方阵, 可用来模拟建筑结构遭遇地震作用。复杂多向加载系统可以使结构同时受到轴向压力、两个方向的水平推力和不同方向的扭矩, 而且这类系统可以在动力条件下对试验结构反复加载。以再现极端灾害条件为目的, 大型风洞、大型离心机、大型火灾模拟结构试验系统等试验装备相继投入运行, 使研究人员和工程师能够通过结构试验更准确的掌握结构性能, 改善结构防灾抗灾能力, 发展结构设计理论。

### 1.3.2 基于网络的远程协同结构试验技术

互联网的飞速发展, 为我们展现了一个崭新的世界。当外科手术专家通过互联网进行远程外科手术时, 基于网络的远程结构试验体系也正在形成。20 世纪末, 美国国家科学基金会投入巨资建设“远程地震模拟网络”, 希望通过远程网

网络将各个结构实验室联系起来,利用网络传输试验数据和试验控制信息,网络上各站点(结构实验室)在统一协调下进行联机结构试验,共享设备资源和信息资源,实现所谓“无墙实验室”。我国也在积极开展这一领域的研究工作,并开始进行网络联机结构抗震试验。基于网络的远程协同结构试验集合结构工程、地震工程、计算机科学、信息技术和网络技术于一体,充分体现了现代科学技术渗透、交叉、融合的特点。

### 1.3.3 现代测试技术

现代测试技术的发展以新型高性能传感器和数据采集技术为主要方向。传感器是信号检测的工具,理想的传感器具有精度高、灵敏度高、抗干扰能力强、测量范围大、体积小、性能可靠等特点。新材料,特别是新型半导体材料的研究与开发,促进了很多对于力、应变、位移、速度、加速度、温度等物理量敏感的器件的发展。利用微电子技术,使传感器具有一定的信号处理能力,形成所谓的“智能传感器”。新型光纤传感器可以在上千米范围内以毫米级的精度确定混凝土结构裂缝的位置。大量程高精度位移传感器可以在1000mm测量范围内,达到 $\pm 0.01\text{mm}$ 的精度,即0.001%的精度。基于无线通信的智能传感器网络已开始应用于大型工程结构健康监控。另一方面,测试仪器的性能也得到极大的改进,特别是与计算机技术相结合,数据采集技术发展迅速。高速数据采集器的采样速度达到500M/秒,可以清楚的记录结构经受爆炸或高速冲击时响应信号前沿的瞬态特征。利用计算机存储技术,长时间大容量数据采集已不存在困难。

### 1.3.4 计算机与结构试验

毫无疑问,计算机已渗透到我们的日常生活中,甚至成为我们生活的一部分。计算机同样成为结构试验必不可少的一部分。安装在传感器中的微处理器,数字信号处理器(DSP),数据存储和输出,数字信号分析和处理,试验数据的转换和表达等,都与计算机密切相关。离开了计算机,现代结构试验技术不复存在。特别值得一提的是大型试验设备的计算机控制技术和结构性能的计算机仿真技术。多功能高精度的大型试验设备(以电液伺服系统为代表)的控制系统于上世纪末告别了传统的模拟控制技术,普遍采用计算机控制技术,使试验设备能够完成复杂、快速的试验任务。以大型有限元分析软件为标志的结构分析技术也极大的促进了结构试验的发展,在结构试验前,通过计算分析预测结构性能,制订试验方案。完成结构试验后,通过计算机仿真,结合试验数据,对结构性能做出完整的描述。在结构抗震、抗风、抗火等研究方向和工程领域,计算机仿真技术和结构试验的结合越来越紧密。

## 1.4 结构试验课程的特点

结构试验是土木工程专业的一门专业课，这门课程与其他课程有很密切的关系。首先，它以建筑结构的专业知识为基础。设计一个结构试验，在试验中准确地量测数据、观察试验现象，必须有完整的结构概念，能够对结构性能做出正确的计算。因此，材料力学、结构力学、弹性力学、混凝土结构、砌体结构、钢结构等结构类课程形成本课程的基础，掌握本课程的理论和方法，也将对结构性能和结构理论有更深刻的理解。其次，结构试验依靠试验加载设备和仪器仪表来进行，了解这些设备和仪器的基本原理和使用方法是本课程一个很重要的环节。掌握机械、液压、电工学、电子学、化学、物理学等方面的知识，对理解结构试验方法是很有好处的。此外，电子计算机是现代结构试验技术的核心，结构试验中，运用计算机进行试验控制、数据采集、信号分析和误差处理，结构试验技术还涉及到自动控制、信号分析、数理统计等课程。总之，结构试验是一门综合性很强的课程，结构试验常常以直观的方式给出结构性能，但必须综合运用各方面的知识，全面掌握结构试验技术，才能准确理解结构受力的本质，提高结构理论水平。

在对结构进行鉴定性试验和研究性试验时，试验方法必须遵守一定的规则。近年来，我国先后颁布了《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)，《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—1996)等专门技术标准。对不同类型的结构，也用技术标准的形式规定了检测方法。这些与结构试验有关的技术标准或在技术标准中与结构试验有关的规定，有确保试验数据准确，结构安全可靠，统一评价尺度的功能，其作用与结构设计规范相同，在进行结构试验时必须遵守。

结构试验强调动手能力的训练和培养，是一门实践性很强的课程。学习这门课程，必须完成相关的结构和构件实验，熟悉仪器仪表操作。除掌握常规测试技术外，很多知识是在具体试验中掌握的，要在试验操作中注意体会。



## 第2章 结构试验设计原理

### 2.1 概 述

结构试验一般可分为试验规划与设计、试验技术准备、试验实施过程、试验数据分析与总结等四个阶段。

#### 1. 试验规划与设计

结构试验是一项细致而复杂的工作，试验前应当认真规划，编制试验大纲。结构试验大纲的内容包括：试验任务分析，试件设计，试验装置与加载方案设计，观测方案设计，试验中止条件和安全措施。

#### 2. 试验技术装备

一个试验能否达到预期目的，很大程度上取决于试验技术准备。这一阶段的工作包括：试件制作，预埋传感元件，安装试验装置及试件，安装测量元件，调试标定仪器设备，相关材料性能测试等。

#### 3. 试验实施过程

试验实施过程主要是操作仪器设备，对试件的反应进行观测。这一阶段的工作包括：记录试件初始状态，采集并记录试验数据，观察并记录试件特征反应（如裂缝、破坏形态、声音、热特征、环境特征和其他信息）。

#### 4. 试验数据分析与总结

试验结束后，及时整理试验数据，撰写试验报告。这一阶段的工作包括：整理试验结果，判断异常数据，绘制试验曲线图表，分析试验误差，分析并总结试验现象。

结构试验的以上四个环节，环环相扣，任何疏忽大意都将影响试验结果，本章主要讨论结构试验设计的基本原理及试验设计与规划。

### 2.2 结构试验设计的基本原则

如果将工程结构视为一个系统，所谓“试验”，是指给定系统的输入，并让系统在规定的条件下运行，考察系统的输出，确定系统的模型和参数的全过程。从这一定义，可以归纳结构试验设计的基本原则如下：

#### 1. 真实模拟结构所处的环境和结构所受到的荷载

建筑结构在其使用寿命的全过程中，受到各种作用，并以荷载作用为主。要