



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校力学教材  
Textbook in Mechanics for Higher Education

# 实验力学

戴福隆 沈观林 谢惠民 主编  
Dai Fulong Shen Guanlin Xie Huimin

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校力学教材  
Textbook in Mechanics for Higher Education

# 实验力学

戴福隆 沈观林 谢惠民 主编  
Dai Fulong Shen Guanlin Xie Huimin  
何小元 何存富 刘战伟 副主编  
He Xiaoyuan He Cunfu Liu Zhanwei

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了实验力学的各种方法的基本原理、实验技术和应用。全书分为应变电测与传感器技术和超声波检测新技术、光学测试技术两篇。第1篇包含应变电测和传感器技术基本原理、应变计、传感器、测试仪器、静、动态应力应变测量技术、特殊条件下的应力测量技术和测量数据处理方法、超声波检测新技术等内容。第2篇包括光学基础知识、光弹性的基本原理和方法、全息干涉法、全息光弹性法、云纹法、云纹干涉法、散斑干涉法和数字图像相关方法及其应用等内容。

本书可供高等院校工程力学、航空航天、机械、土建等专业本科生和研究生作为教材和参考书,亦可供有关专业教师和科研人员参考。

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

实验力学/戴福隆,沈观林,谢惠民主编.--北京:清华大学出版社,2010.7

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材,高等院校力学教材)

ISBN 978-7-302-22570-6

I. ①实… II. ①戴… ②沈… ③谢… III. ①实验应力分析—高等学校—教材  
IV. ①O348

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第074960号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:31.25 插 页:1 字 数:648千字

版 次:2010年7月第1版

印 次:2010年7月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:49.80元

---

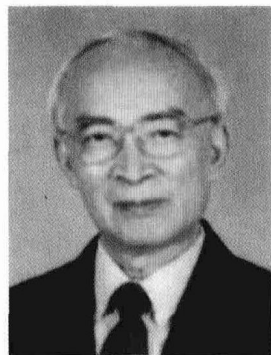
产品编号:009418-01

## 主编介绍



**戴福隆(1932.5— )** 1953年7月毕业于南京工学院土木工程系。毕业后在清华大学任教,1984年晋升教授,1985为博士生导师。曾出访并任美国弗吉尼亚工学院、美国韦恩州立大学、新加坡南洋理工大学等院校客座教授。主要从事激光技术和近代光学为主要技术手段的现代光测力学研究。在全息光弹法的测量方法和技术、云纹干涉法的实验理论、方法、实验技术以及在细观力学、材料科学和微电子封装等领域取得重要研究进展。相关研究成果获得1982和1997年国家发明三等奖,1989年国家发明四等奖,1988、1995和1997年国家教委科技进步二等奖,1997年国防科工委科技进步二等奖,以及1979年全国科学大会奖。发表论文200余篇,论著7种。

先后担任中国力学学会第二、三、五、六届理事会理事,实验力学专业委员会第一、二、三届副主任委员和第四、五届主任委员,中国《力学学报》第四、五、六届编委会常务编委,《实验力学》学报副主编、主编。



**沈观林(1935.10— )** 1953—1957年清华大学土木系工业与民用建筑专业学习,1957—1959年清华大学工程力学研究班学习,毕业后在工程力学系任教,清华大学教授。长期从事固体力学、实验力学和复合材料力学教学和科研,曾获国家教委科技进步二等奖(1993),参编的《实验应力分析》和《振动量测与应变电测基础》分别获清华大学优秀教材二等奖;编著《复合材料力学》(1996),新主编《复合材料力学》教材(2006),参编《应变电测与传感技术》专著(1991)和

《应变电测与传感器》教材(1999)等;曾获清华大学教学成果二等奖(复合材料力学课程)(1996),清华大学实验技术成果二等奖、三等奖多项(1994—1996);负责起草《电阻应变计》国家标准(GB/T 13992—1992)主编标准培训班讲义;历任全国应变计及其应用技术专业委员会副主任委员,现任应力测试专业委员会委员;1986年以来先后在专业核心刊物、重要刊物及各种学术会议上发表学术论文六十余篇。



**谢惠民(1965.4— )** 分别于1986,1989,在北京理工大学获得固体力学专业学士和硕士学位,于1993年3月在清华大学获固体力学专业博士学位,在博士毕业后留校任教,一直从事实验力学的教学和科研工作。现任清华大学教授、博士生导师、固体力学研究所副所长,教育部应用力学重点实验室副主任;*Optics and Lasers in Engineering* 副主编(中国区);*Strain* 编委;*The Journal of Strain Analysis for Eng. Design* 编委;中国力学学会理事;中国力学学会实验力学专业委员会主任委员。近期一直从事实验力学测试方法和技术及其应用研究。近期主要研究与开发近代实验力学方法,作为项目负责人和学术骨干承担国家自然科学基金和部级项目10余项。相关研究成果已发表于国内外重要学术刊物,共计90余篇。先后获得了多项学术奖励,包括:国家发明三等奖(1997,排名第二)、教育部技术发明一等奖(2007,排名第二)。2005年入选教育部新世纪优秀人才支持计划,2006年获得国家杰出青年科学基金。

# 前 言

实验力学是人类认识自然现象和为解决工程问题的需要而发展起来的。几十年来实验力学学科发展迅速,在国民经济建设和国防建设中发挥了重要作用,解决了许多技术难题。

实验力学的发展动力来源于力学理论发展和工程应用的实际需要。在科学技术飞速发展的今天,实验力学学科面临着前所未有的挑战,如天空飞行器的可靠性评价、高速列车的安全、微重力下的测试技术、生物活体组织的力学行为、微/纳米器件的力学行为、新型功能材料的力学行为和深空探测技术等。

经典的实验力学包括应变电测方法和各种光测方法,如光弹性法、贴片光弹法、全息光弹法、全息干涉法、云纹法、云纹干涉法、散斑干涉法等。近年来计算机和图像处理技术发展迅速,出现了电子散斑法和数字散斑相关法,数据的自动化采集和处理提高了实验效率和精度。

本书结合作者多年教学经验和近年来国内外发展的最新研究成果,全面、系统地介绍实验力学的各种测试方法的基本原理和实验技术,并列举各种应用。

本书内容分两篇,第1篇为应变电测与传感器技术和超声波检测新技术,共8章。第1~7章由沈观林编写,第8章由何存富、焦敬品编写。第2篇为光学测试技术,包括第9章~16章。第9章由刘战伟、刘先龙、蒯书田编写,第10章由戴福隆编写,第11章由戴福隆、谢惠民编写,第12章由戴福隆、刘战伟编写,第13章由谢惠民、方萃长编写,第14章由戴福隆、谢惠民编写,第15章由何小元编写,第16章由潘兵编写。全书由戴福隆、沈观林、谢惠民统稿。

在本书编写过程中,亚敏、唐敏锦参加一部分编稿和制图工作,特此致谢。

本书可供高等院校工程力学、航空航天、机械、土建等专业本科生和研究生作为教材和参考书,亦可供有关专业教师和科研人员参考。

由于编者经验和水平有限,书中难免存在不当甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2010年5月

# 目 录

## 第 1 篇 应变电测与传感器技术和超声波检测新技术

<b>第 1 章 概论</b> .....	3
1.1 实验力学应变电测技术发展概况 .....	3
1.2 应变电测与传感器技术的特点 .....	4
1.3 应变电测与传感器技术的各种应用 .....	5
<b>第 2 章 电阻应变计</b> .....	15
2.1 电阻应变计的基本构造和工作原理 .....	15
2.2 电阻应变计的各项特性 .....	19
2.3 电阻应变计的种类 .....	30
2.4 电阻应变计选择和粘贴使用方法 .....	34
2.5 其他应变计简介 .....	38
<b>第 3 章 应变测量仪器</b> .....	47
3.1 引言 .....	47
3.2 电桥测量电路 .....	48
3.3 应变计各种接桥方法 .....	56
3.4 应变测量仪器的种类 .....	60
3.5 电阻应变仪的基本工作原理 .....	63
3.6 电阻应变仪的技术指标及其检定 .....	65



3.7	数字应变测量系统及数据采集系统	73
<b>第4章</b>	<b>静、动态应力应变测量技术</b>	80
4.1	静态应力应变测量技术	80
4.2	动态应力应变测量技术	89
4.3	数字信号处理	97
<b>第5章</b>	<b>特殊条件下的应力测量技术</b>	124
5.1	高低温条件下的应力测量技术	124
5.2	高压液下的应力测量技术	134
5.3	运动构件应力测量技术	140
5.4	残余应力测量	150
5.5	应变电测方法在其他领域中的应用技术	158
<b>第6章</b>	<b>传感器</b>	173
6.1	传感器的一般特性	173
6.2	应变计式传感器的基本原理与设计	181
6.3	各种应变计式传感器的构造和特性	188
6.4	压阻式传感器	206
6.5	压电式传感器	209
6.6	电容式传感器	214
6.7	电感式传感器	218
<b>第7章</b>	<b>测量数据处理与表示</b>	224
7.1	概述	224
7.2	基本概念	224
7.3	概率统计的基础知识	227
7.4	测量仪器的误差、准确度和不确定度	229
7.5	标准不确定度的评定	230
7.6	异常值	233
7.7	系统误差	236
7.8	最小二乘法	238
	附录	241
<b>第8章</b>	<b>超声波检测新技术</b>	248
8.1	概述	248
8.2	超声波	249

8.3	超声波的传播 .....	255
8.4	超声导波检测新技术 .....	262
8.5	超声波换能器 .....	271
8.6	超声波检测新技术的应用实例 .....	275
<b>第 1 篇参考文献 .....</b>		<b>286</b>

## 第 2 篇 光学测试技术

<b>第 9 章 光学基础知识 .....</b>	<b>291</b>
9.1 光波 .....	291
9.2 光波的叠加 .....	294
9.3 光波的干涉 .....	295
9.4 光波产生干涉的条件 .....	296
9.5 杨氏干涉实验 .....	297
9.6 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 基尔霍夫衍射公式 .....	298
9.7 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射 .....	300
9.8 狭缝衍射 .....	303
9.9 光的空间频率 .....	309
9.10 傅里叶变换及其性质 .....	311
9.11 透镜的傅里叶变换特性 .....	317
9.12 空间滤波器及其应用 .....	321
9.13 光的偏振 .....	326
9.14 激光 .....	330
<b>第 10 章 光弹性的基本原理和方法 .....</b>	<b>335</b>
10.1 平面问题的光力定律及基本测量装置 .....	335
10.2 等色线的特性分析 .....	338
10.3 等倾线的特性分析 .....	342
10.4 圆偏振光干涉装置及其应用 .....	346
10.5 边界应力的确定及内部应力的计算 .....	351
10.6 一般光弹仪中的若干问题 .....	356
10.7 三向光弹性的一般方法 .....	361
10.8 散光法 .....	365
10.9 光弹性贴片法 .....	373

<b>第 11 章</b>	<b>全息干涉法</b> .....	378
11.1	全息照相 .....	378
11.2	两次曝光法测定位移 .....	381
11.3	位移场的定量分析 .....	382
11.4	激光和相干性 .....	383
<b>第 12 章</b>	<b>全息光弹性</b> .....	385
12.1	单次曝光测等差线 .....	385
12.2	两次曝光测定等和线 .....	387
12.3	等和线及等差线的分离 .....	388
12.4	图像全息光弹性 .....	390
<b>第 13 章</b>	<b>云纹法</b> .....	393
13.1	云纹法的基本原理 .....	393
13.2	二维位移场位移及应变的测定 .....	397
13.3	条纹级数的确定及确定应变的正负 .....	400
13.4	提高云纹法测量精度的几种方法 .....	402
13.5	影子云纹法 .....	404
13.6	反射云纹法 .....	408
13.7	高分辨率显微镜扫描云纹法 .....	411
<b>第 14 章</b>	<b>云纹干涉法</b> .....	416
14.1	衍射光栅 .....	416
14.2	面内位移场 .....	420
14.3	三维位移场 .....	427
14.4	应变场 .....	428
14.5	三维位移导数场 .....	434
14.6	弯曲板的曲率场 .....	436
14.7	高温云纹干涉技术 .....	439
<b>第 15 章</b>	<b>散斑干涉法</b> .....	443
15.1	散斑的形成 .....	443
15.2	散斑的记录 .....	444
15.3	双曝光散斑图的分析 .....	445
15.4	散斑照相法的应用 .....	447

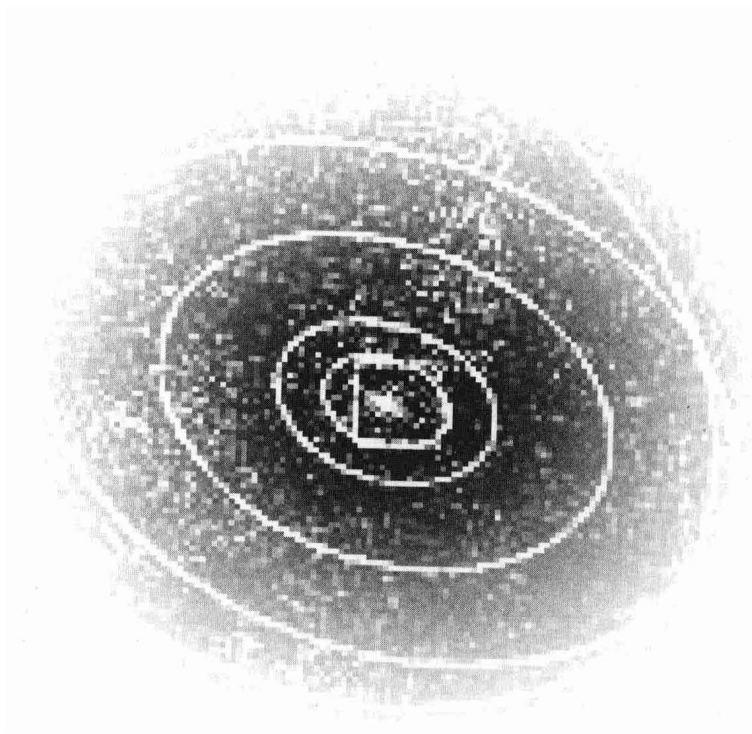
---

15.5	散斑照相法测量的范围	449
15.6	双光束散斑干涉法	450
15.7	错位散斑干涉法	453
15.8	电子散斑干涉术	454
15.9	数字散斑干涉术	457
15.10	电子散斑测量变形的几种典型的光路布置	458
15.11	电子散斑形貌测量术	463
15.12	电子散斑振动测量术	464
15.13	使用光纤的电子散斑干涉光路	465
15.14	电子散斑干涉中的相移技术	466
<b>第 16 章</b>	<b>数字图像相关方法</b>	<b>470</b>
16.1	引言	470
16.2	数字图像相关的基本原理	472
16.3	相关函数的几种数学形式	474
16.4	提高数字图像相关法中计算速度的方法	476
16.5	数字图像相关中的亚像素位移测量算法	477
16.6	全场应变场测量方法	484
16.7	应用实例	485
<b>第 2 篇</b>	<b>参考文献</b>	<b>488</b>

第1篇

*Part 1*

应变电测与传感器技术  
和超声波检测新技术





# 第 1 章

# 概 论

## 1.1 实验力学应变电测技术发展概况

早在 1856 年 W. Thomson 铺设海底电缆时,就发现了电缆的电阻值随海水深度不同而变化,从而对铜丝和铁丝进行拉伸试验,得出结论:铜丝和铁丝的应变与其电阻变化成不同的函数关系,且由于应变而产生的微小电阻变化可用惠斯顿电桥进行测量。这些结论正是应变电测技术的理论基础,它指出应变可转换成电阻变化并用电学方法测量。

1936—1938 年, E. Simmons 与 A. Ruge 等人制出纸基丝式电阻应变计,并由美国 Baldwin Lima Hamilton(简称 BLH)公司专利生产,取他们名字字首命名为 SR-4 型号。1952 年英国 P. Jackson 制出第一批箔式电阻应变计。1954 年 C. S. Smith 发现锗硅半导体的压阻效应,1957 年制出了第一批半导体应变计,后来 W. P. Mason 等人应用半导体应变计制作传感器。此前已出现用电阻应变计制作各种传感器,后来还出现了其他各种电学传感器,用它们可测量力、压强、荷重、位移和加速度等物理量。电阻应变计也已研制出多种类型,如用于高温、低温的应变计及半导体应变计品种规格已达 2 万多种,各种传感器也品种繁多,应用范围也日益广泛。与此同时出现了不同类型的测试仪器,随着电子技术的发展,测试仪器由手工操作、数字显示发展到可进行自动数据采集显示打印、软盘记录、数据传送处理分析的多功能测量系统。总之,这种应变电测与传感器技术(简称电测技术)已广泛应用于各种工程结构、机械设备及其模型的应力、应变、受力和变形、运动等测量分析,并可用于各种特殊环境条件下进行力学量测量,而且测量精度、质量和技术水平均不断提高。

## 1.2 应变电测与传感器技术的特点

这里主要介绍以电阻应变计为敏感元件时,应变电测技术的主要特点和优点。其他电学敏感元件则稍有差别,如尺寸较大、不适应于某些特殊环境等。其主要特点和优点如下。

(1) 电阻应变计尺寸小、重量轻,一般不会干扰构件的应力分布,安装(如粘贴)方便。

(2) 测量灵敏度高,最小应变读数可达  $10^{-6}$  (1 微应变,  $\mu\text{m}/\text{m}$ ), 常温静态应变测量精度可达 1%~2%。

(3) 测量应变量程大,一般为 1%~2% ( $10^4 \sim 2 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{m}$ ), 特制的大应变电阻应变计可测量 10%~25% ( $10 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{m}$ ) 的应变。

(4) 常温箔式电阻应变计最小栅长为 0.2 mm, 可测量应力集中处的应变分布。

(5) 频率响应高,可测量静态到 50 万赫兹的动态应变。

(6) 测量输出为电信号,采用电子仪器容易实现测量过程自动化和远距离传递,测量数据可数字显示、自动采集、打印、存储和计算机处理分析。也可利用无线电发射和接收方式进行遥测。

(7) 可在高温、低温 ( $-269 \sim +1000^\circ\text{C}$ )、高压(几百兆帕)液下,高速旋转(几万转/分)、强磁场(大于 10 万高斯)和(或)核辐射等特殊环境中进行结构应力、应变测量。

(8) 用电阻应变计配合专门弹性元件制成各种传感器,用于测量力、荷载、压强、扭矩、位移和加速度等物理量。这些应变计式传感器的测量精度可达 0.5%~0.01%,工业上可广泛用于自动化监测控制,商业上普遍用于称重、计量自动化,工程和科学实验中用于实验自动化和控制装置。

后来发展的其他应变传感元件,如电容应变计等,可用于高温结构长期应变测量;其他各种电学传感器可用于测量和控制。

这种技术的限制和主要缺点如下。

(1) 应变电测方法通常为逐点测量,不易得到构件的全域性应力应变分布。

(2) 一般只能测量构件表面上的应变,对于塑料、混凝土等可安装内埋式应变计的构件,可测量其内部应变。

(3) 应变计所测应变值是其敏感栅覆盖面积内构件表面的平均应变,对于应力梯度很大的构件表面或应力集中的情况应选用栅长很小的应变计(如栅长为 0.2~1.0 mm),否则测量误差较大。



## 1.3 应变电测与传感器技术的各种应用

应变电测技术几十年来广泛应用于各种工程结构的实验应力分析,并且制成各种传感器应用于各领域。下面简要列举一些实际例子。

### 1.3.1 航空航天工程

#### 1) 美国波音公司 Boeing 767 飞机静力结构试验

美国波音公司 Boeing 767 飞机静力结构试验采用了 2204 个单个应变计, 1162 个应变花, 使用应变测量仪器约 4100 个通道, 在飞机结构上采用 120 个液压加载器。试验中测量飞机结构在静载下很多部位的应力应变, 使用费用约 4100 万美元。

#### 2) 我国某型号飞机飞行载荷测量

飞机在飞行中结构承受各种载荷, 除了飞机重力、惯性力外, 还有发动机推力和空气动力。试验人员采用应变电测方法测量了某型号飞机尾翼在飞行中的载荷。在垂直尾翼主梁等处布置各应变计测量弯矩、剪力和扭矩。在地面上用加载校准试验, 建立作用载荷与应变的关系, 在垂直和水平尾翼上分别有 18 个和 15 个加载点。飞行试验, 飞行了 35 个架次, 试飞周期为 2~3 年, 测量了各种机动飞行时的飞行参数和垂直、水平尾翼的机动载荷。

#### 3) 导弹端头结构模拟热应力试验

我国某型号导弹采用碳-碳复合材料作端头, 为研究端头在快速飞行中引起的热应力, 在实验基地对试件端头在模拟瞬态高温加热下进行测量。采用自制高温电阻应变计, 粘贴在导弹端头上若干部位, 经加热固化后接成桥路经动态应变仪、A/D 转换器、微机、打印机、绘图仪, 在快速加热端头瞬态高温下测量记录应变计读数得出随温度变化的热应力。

#### 4) 模拟返回舱结构在起吊和运输过程中的应力测试

模拟返回舱是航天员的训练设备, 它在结构上参考真实金属返回舱, 采用不同材料和工艺, 主要由玻璃钢壳体、硬木榫条和隔框、金属端框等部件组成, 要求舱体结构能承受静载和起吊、运输过程中的动载。为保证返回舱在实际使用条件下安全、可靠, 采用应变电测方法作了玻璃钢材料力学性能试验和返回舱在起吊和运输过程中的应力测量。返回舱起吊试验见图 1-1, 舱结构应变测点共 20 多个, 起吊试验采用数字应变测量系统。公路运输试验采用动态应变仪、磁带记录仪测量动应变, 用信号处理仪计算应力幅值, 运输过程试验时将仪器装入舱内, 测试人员也在舱内工作, 舱内四周有软衬垫, 公路道路不平引起颠簸不影响人员和仪器正常工作。运输时的照片