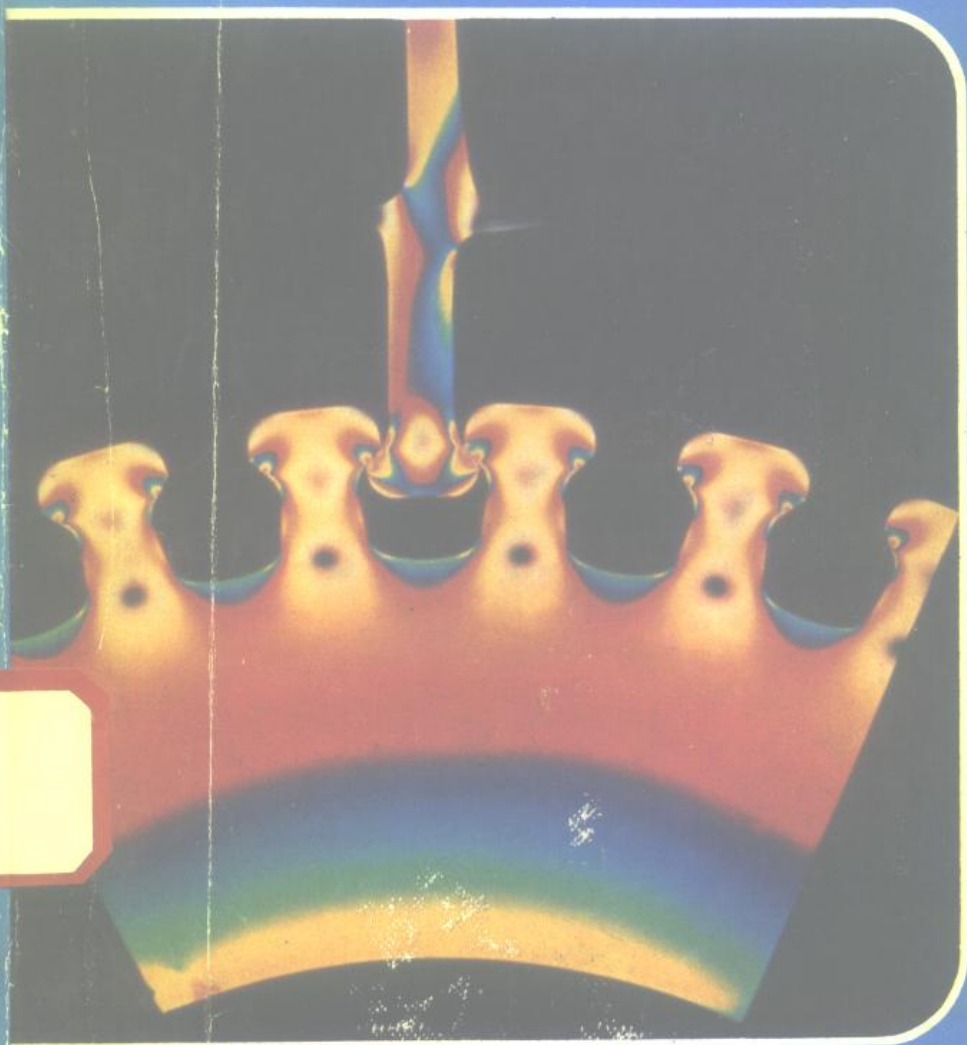


简明实验力学

王 峰 曹光宇 等 编著



科学出版社

简明实验力学

王 峰 曹光宇 等编著

科 学 出 版 社

1993

2016/13
(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书分四篇共有十七章, 前二篇全面、系统地阐述了实验应力分析中的电测法和光弹性实验的基本原理和实验技术; 在第三篇中介绍了流体双折射、散斑干涉法、云纹干涉法、云纹法等现代光测力学的新方法; 在第四篇中介绍了电测法、光弹性法和云纹法在工程应用方面的实例。本书中部分内容是作者们近几年科研工作成果和经验总结。

本书可供高等学校机械、动力、土木、水利、航空、化工及生物力学等专业的大学生和研究生作为教材或教学参考书, 也可供有关科研和实验应力分析工程技术人员参考。

简明实验力学

王 峰 曹光宇 等编著

责任编辑 杨 蔚

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

烟台大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993年10月第一版 开本: 787×1092 1/32

1993年10月第一次印刷 印张: 7 5/8 插页: 0

印数: 1—2 000 字数: 179 000

ISBN 7-03-003896-7/O · 683

定价: 12.00 元

《简明实验力学》编委会

主 编：王 峰 曹光宇

副主编：周新刚 王晓冬 谢惠民

编 委：曹 湘 汪华亮 孙永达 亢一澜

主 审：贾有权 刁玉玮

前 言

实验力学在工程领域中是提高设计水平、检查及防止事故的一个重要手段,广泛用于机械、动力、土木、水利、航空、化工及生物力学等领域。推广应用这门科学技术具有重要的现实意义和经济意义。本书是以烟台大学教学和科研实践为基础,并吸取了清华大学、天津大学和长江科学院的作者们最新科研成果编写而成。

本书从解决工程实践问题出发,简明扼要地且较全面地阐述实验方法的基本原理,它不仅适于高校高年级学生,而且可供科研及从事实验应力分析的工程技术人员参考。

本书由王峰、曹光宇担任主编,周新刚、王晓冬、谢惠民担任副主编,并由贾有权教授(天津大学)、刁玉玮副教授(大连理工大学)主审,王峰副教授对全书作了统校。本书各章编写人员:王峰(第一篇第一、二、三章,第二篇第一、二章),曹光宇(第四篇第一章),周新刚(第二篇第五章),王晓冬(第一篇第五章),汪华亮(长江科学院)(第二篇第三、四章,第四篇第二章),曹湘(天津大学)(第三篇第三章),孙永达(天津大学)(第三篇第四章),亢一澜(天津大学)(第三篇第二章),第一篇第四章由周新刚、王峰合编,第三篇第一章由曹光宇、谢惠民合编,第四篇第三章由谢惠民(清华大学)、王峰合编。本书插图由曲维波和于德贤绘制。

本书在编写过程中,得到了贾有权教授、长江科学院龚召熊教授、清华大学戴福隆教授、烟台大学郭明昌、牟维珍副教授的支持和帮助,在此,谨表示衷心的感谢。由于作者们的水平有限,书中如有不妥之处,诚恳地欢迎读者批评指正。

1993年5月

• i •

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 电阻应变测量

第一章 电阻应变片	(4)
§ 1-1 应变片的工作原理	(4)
§ 1-2 应变片的分类与选用	(8)
§ 1-3 应变片的工作特性	(11)
§ 1-4 应变片的粘结剂选用和粘贴工艺	(14)
第二章 测量电路	(17)
§ 2-1 直流电桥的工作原理	(17)
§ 2-2 温度变化效应的补偿	(23)
§ 2-3 调零读数法的工作原理	(24)
§ 2-4 应变片在构件上的布置和接桥	(27)
第三章 应力分析	(30)
§ 3-1 二维应力应变分析	(30)
§ 3-2 应变花的计算公式	(33)
§ 3-3 测量纯弯梁的正应力实验	(36)
§ 3-4 工字钢梁横力弯曲主应力的测定	(39)
第四章 电阻应变仪	(43)
§ 4-1 电阻应变仪的分类	(43)
§ 4-2 电阻应变仪的工作原理	(45)
§ 4-3 电阻应变仪的性能	(50)

第五章 动态应变测量及记录仪器	(55)
§ 5-1 动态应变测量	(55)
§ 5-2 记录仪器	(58)
§ 5-3 光线示波器	(62)
§ 5-4 磁带记录仪	(66)

第二篇 光弹性应力分析

第一章 光弹性基本原理	(71)
§ 1-1 一般光学知识	(71)
§ 1-2 应力—光学定律	(76)
§ 1-3 等色线 等倾线	(78)
§ 1-4 应力模型在圆偏振光场中的效应	(81)
§ 1-5 半级与 $1/4$ 级等色线条纹	(83)
第二章 平面光弹性实验	(85)
§ 2-1 等差线条纹级数的确定	(85)
§ 2-2 材料条纹值的测定	(87)
§ 2-3 边界应力的确定	(89)
§ 2-4 应力集中系数的确定	(91)
§ 2-5 用剪应力差法求结构内部应力	(92)
第三章 三维光弹性实验技术	(95)
§ 3-1 应力冻结法和次主应力	(95)
§ 3-2 用剪力差法求解三维应力问题	(100)
§ 3-3 两次正射一次斜射法	(103)
§ 3-4 平行切片法	(109)
第四章 光弹性材料和模型制造	(113)
§ 4-1 光弹性材料的基本要求	(113)
§ 4-2 环氧树脂光弹模型制造技术	(114)

§ 4-3	三维光弹性模型的芯模材料	(121)
§ 4-4	低弹模光弹性材料的制造	(124)
第五章	模型相似分析	(128)
§ 5-1	相似定理	(128)
§ 5-2	相似判断的分析方法	(132)

第三篇 光力学的几种新方法

第一章	云纹法	(141)
§ 1-1	确定云纹与应变之间关系的几何法	(141)
§ 1-2	确定云纹与应变之间关系的位移导数法	(149)
§ 1-3	栅板的制造及云纹测量装置	(155)
§ 1-4	影象云纹法	(159)
第二章	云纹干涉法	(162)
§ 2-1	云纹干涉法基本原理	(162)
§ 2-2	云纹干涉法实验技术	(166)
§ 2-3	载波法	(173)
§ 2-4	云纹干涉法的应用	(174)
第三章	激光散斑法	(177)
§ 3-1	激光散斑现象及计量概况	(177)
§ 3-2	散斑干涉计量的基本原理	(178)
§ 3-3	散斑位移量测范围的估计	(183)
第四章	流体双折射	(185)
§ 4-1	双折射流体的光—力学特性	(185)
§ 4-2	流体双折射测试原理	(187)
§ 4-3	流体双折射实验方法	(189)
§ 4-4	典型流场测试结果	(193)

第四篇 工程应用

第一章 高压容器水下内壁应变测量	(199)
§ 1-1 高压水下应变测量工程实例	(199)
§ 1-2 主应力计算及数据处理	(203)
第二章 离心模拟实验技术	(207)
§ 2-1 前言	(207)
§ 2-2 离心机的结构型式	(208)
§ 2-3 光弹性模型的自重应力试验	(210)
§ 2-4 光弹性模型的水工结构应力试验	(213)
§ 2-5 光弹性模型在离心机上的组合加载	(216)
§ 2-6 在离心机上作静力结构模型试验	(218)
第三章 云纹法在发电厂高温主蒸汽管道长期蠕变 检测中的应用	(220)
§ 3-1 引言	(220)
§ 3-2 金属的蠕变	(220)
§ 3-3 主蒸汽管道蠕变的测点测量方法	(223)
§ 3-4 云纹法测量主蒸汽管道蠕变的实验 方法	(226)
§ 3-5 失配云纹法测量曲面变形的基本原理	(228)
§ 3-6 失配云纹法测量主蒸汽管道蠕变的实验 结果与讨论	(232)
参考文献	(234)

绪 论

材料力学、结构力学和弹塑性力学在解决工程实际问题起着重要的作用。掌握了这些理论便能对某些典型形状的构件,如杆、刚架、板、壳进行强度、刚度和稳定性计算,以保证构件受载荷作用时在安全工作条件下费用最低。

随着科学技术的发展,对复杂载荷作用下的复杂结构进行应力、应变分析,出现了两种不同的方法,一种是建立数学模型进行近似数值计算,如有限单元法,一般需要借助电子计算机求得解答。另外一种方法是建立物理模型或利用实体进行实验。实验力学即是用各种不同的实验方法和手段测定受力构件中应力和变形的一门学科,它的主要任务如下:

- 1、在设计过程中,可测定模型中的应力和变形,根据测定结果选择构件最合理的尺寸和结构形式。

- 2、在现有设备上或工程结构上测量真实应力状态,找出最大应力的位置及数据,评定设备或结构的安全可靠性。

- 3、对破坏或失效构件分析,提出改进措施。

- 4、测定构件在工作过程中所受载荷大小和方向,或测定影响载荷情况的各种运动参数(位移、加速度)。

- 5、验证理论分析的正确性,并为理论分析提供条件。

近年来,由于电学、光学、激光技术和新材料的进展,再加上产品和工程结构高质量的需要,使实验力学得到迅速的发展,它已经成为解决工程强度和刚度问题的一门独立学科,该学科包括如下成熟的方法:光弹性法、电阻应变计测量技术、激光全息法、散斑干涉法、云纹法、云纹干涉法、焦散线法、动光弹法、光塑性法等,工程上使用最广的是光弹性法和电阻应

变计测量技术。

随着科学技术飞速发展,出现大量的新问题,如在非线性、非匀质、复合材料等分析研究中,需要大量的实验资料;在尖端技术部门,如航空工业、原子能工业等部门,在设计和改造中,碰到零部件和结构物(飞机起落架,导弹及高压化工压力容器等),其几何形状越来越复杂,载荷和工作条件(高空、水下、高温、高压、强辐射等)也越来越多变,使得计算机无能为力,必须依靠实验分析解决问题。

目前实验力学已经广泛地应用到国民经济各部门中,如机械、化工、水利、土建、航空等,并且在力学中其它领域如岩石力学、断裂力学、生物力学、动应力、热应力等方面也起到重大的作用。

近年来高等工科院校有关专业相继开设实验力学(或称实验应力分析)这门课程,为适应这一需要我们编写了这本书。又因书中增设了工程应用实例及作者多年来科研成果和总结,也介绍了国内、外实验力学新技术,也适用于科研及工程技术人员阅读。

第一篇 电阻应变测量

电阻应变测量(电测法)是实验应力分析中使用最广泛和适应性最强的方法之一。该法是利用电阻应变计(简称应变片或电阻片)作为敏感元件,用应变仪作为测量仪器,通过测量可以得出受力构件上的应力、应变的一种实验方法。

测量力学参数时,要把非电量参数转换成电量参数,完成二者转换的敏感元件称为传感器。非电量参数指应力、应变、力、力矩、加速度等;电量参数指电阻、电压、电流强度、电容、电感等。本篇中要测定的非电量参数是应变,传感器是应变片。测量时,将电阻片牢固地贴在构件上,构件变形连同应变片一起变形,应变片的变形产生了电阻的变化,通过测量电桥使这微小的电阻变化转换成电压或电流的变化,经过信号放大,将其变换成构件的应变值而显示出来,完成上述转换工作的仪器叫应变仪。

电测法之所以能在工程上广泛应用,这是因为它具有如下特点:

1. 测量精度高、范围广。测量范围一般可以从1微应变($1\mu\varepsilon=10^{-6}$)到几千微应变。对高灵敏度测量系统可测取 10^{-2} 量级的微应变。

2. 应变片尺寸小,重量轻,粘贴方便,对试件的工作状态和应力分布影响很小。

3. 频率响应快,机械滞后小。利用该法不仅可测构件在静载作用下的应变,而且可以测动载下和冲击载荷下的应变。

4. 可在恶劣的环境下测量。如在高温、低温、深水结构、强磁场及核辐射等条件下测量。

5. 可对运动状态下的结构实测。如可对高速旋转的飞轮

和轴、行驶中的汽车、拖拉机等进行实测。

6. 自动化程度高,可实现遥控测量。将电阻应变仪和微机相结合,可以实现图形显示,磁带记录,多点测量,自动打印等功能,而且可以采用无线或有线遥控测量。

但是,电测法也有一定的局限性:

1. 一枚应变片只能测量一个“点”,而且测出的应变只能代表栅长范围内的平均应变。

2. 应变片一般只能测构件表面的应力、应变,对结构内部的三维应力测量很难进行。

3. 尽管应变片尺寸小,但对应力集中的测量,仍不够精确。

本篇重点介绍常温静载条件下电测法测量技术。

第一章 电阻应变片

§ 1-1 应变片的工作原理

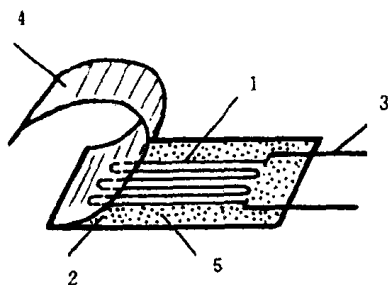
一、应变片的构造

应变片是一种电阻式传感器,是应变测量中的主要元件。应变片的种类繁多,最常应用的是丝绕式电阻片和金属箔电阻片。丝绕式电阻片一般采用 $0.012\sim 0.05\text{mm}$ 直径的镍铬或铜镍(康铜)合金丝绕成栅状,其结构如图 1-1 所示,电阻片由五部分构成:敏感栅、引出线、基底、覆盖层和粘结剂。基底直接与试件接触,并用粘结剂相互粘牢。其作用是保证电阻片与试件共同变形,以便准确地把试件变形传递给敏感栅,而且保证试件与敏感栅之间有足够大的绝缘度。常用纸基或胶膜(缩甲醛、酚醛树脂和环氧树脂)薄片制成。覆盖层的作用是保护

敏感栅的几何形状,防止外界有害介质腐蚀,一般选用与基底相同的材料。

二、电阻丝的应变效应

金属导体的电阻随其变形(伸长或缩短)而发生改变的一种物理现象叫金属导线的应变效应。截取一段敏感栅,分析应变与



1.敏感元件 2.基底 3.引线 4.覆盖层 5.粘结剂

图 1-1 应变片的构造

电阻变化率之间的关系,已知导线电阻表达式为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-1)$$

其中, R 是导线的电阻(Ω), ρ 是导线的电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), l 是导线的长度(m), s 是导线的横截面积(mm^2)。

考虑导线电阻率 ρ 为常量时,导体伸长后引起电阻的变化为

$$dR = \rho \frac{dl}{s} - \rho \frac{l ds}{s^2} \quad (1-2)$$

将(1-2)式除以(1-1)式

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} \quad (1-3)$$

圆截面导线变形后直径 D 变为

$$D' = D - \mu \epsilon D = D(1 - \mu \epsilon)$$

其中, μ 是泊桑比, $\epsilon = dl/l$ 是应变。截面面积变化为

$$ds = \frac{\pi}{4} (D'^2 - D^2) \approx \frac{\pi D^2}{4} (-2\mu \epsilon) \quad (1-4)$$

将(1-4)式代入(1-3)式得到

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon$$

令 K_s 为电阻丝灵敏系数, 上式变为

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon \quad (1-5)$$

可见电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 与应变变量成正比, 比例常数 K_s 为

$$K_s = \frac{dR}{R}/\epsilon = 1 + 2\mu \quad (1-6)$$

实测值 K_s 与(1-6)式不符, 其原因是 ρ 在应变过程中也是变量。考虑 ρ 为变量时, 则有

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} \quad (1-7)$$

即是

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon \\ K_s &= (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}/\epsilon \end{aligned} \quad (1-8)$$

其中, $\frac{d\rho}{\rho}/\epsilon$ 称为单位应变系数变化率, (1-8)式表明, 电阻丝的灵敏系数受到两个因素的影响:

1. 电阻丝材料本身的机械性能, 即式中 $(1 + 2\mu)$ 项。
2. 电阻丝受力后材料的单位应变系数变化率, 为 $\frac{d\rho}{\rho}/\epsilon$ 。

三、应变片的灵敏系数 K_f

根据测量仪器要求, 电阻丝必须具有定量的初始电阻(一般 120Ω); 单线长度 $30 \sim 80\text{mm}$, 因此, 必须把它制成栅状, 以测量反映构件“点”的应力、应变。

当电阻片安装在处于单向应力状态的试件表面, 电阻片轴线与应力方向平行时, 电阻片电阻值的相对变化与沿其轴

向的应变之比值,即是 $K_p = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon$ 称为电阻片的灵敏系数。

电阻片灵敏系数 K_p 小于单根电阻丝灵敏系数 K_s , 其原因有如下几个方面:

1. 将电阻片用粘结剂牢固地粘贴在试件上,试件与基底是面接触,当试件在外力作用下发生变形时,变形通过剪力形式传到基底上,基底的变形又以剪力的方式传给电阻丝栅。根据实验和分析表明,基底两端部的剪应力较大且方向相反,而中

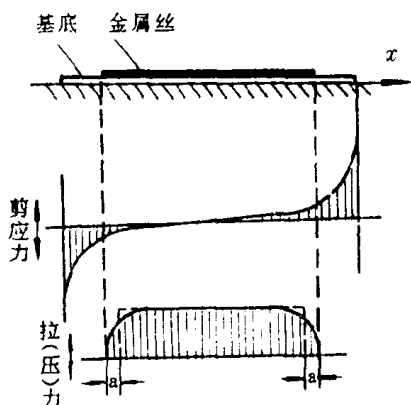


图 1-2 应变片的工作状态

部为零,电阻丝栅受到的轴向力则等于沿轴向剪应力之和,其分布如图 1-2 所示。

由上图可知,在电阻丝栅的两端部轴力为零,然后以指数曲线形式上升至某一定值,可见电阻片应变不是均匀分布。显然这时参加变形的丝栅长度比原来缩短了 $2a$,所以丝栅的电阻变化 ΔR 减小了,随之 $\frac{\Delta R}{R}$ 也变小,即降低了电阻片的灵敏度。

2. 电阻片是多栅型,栅丝之间由横向丝连接,假如主应力方向的应变是 ϵ ,则垂直于主应力方向应变是 $-\mu\epsilon$,两者引起的电阻变化值符号相反,所以视应变比实际应变小,因此 K_p 必然小于 K_s 。

§ 1-2 应变片分类与选用

一、应变片分类

根据不同的用途和特点,电阻片的类型很多,现只介绍几种常用应变片形式。

1. 丝绕式圆角栅应变片

该种应变片敏感栅用绕丝机绕成,基底多用纸,价格便宜。其缺点是端部有半圆形弧段,造成横向效应,测量精度不高,耐湿、耐高温性能也不好。

2. 箔式应变片

该种应变片是用厚度 $0.001\sim 0.01\text{mm}$ 的金属箔作为敏感栅,箔片材料为康铜、镍铬合金等,利用光刻技术制成。参见图 1-3。它的几何形状和尺寸非常精密,其横向部分可以做成宽栅条,横向效应很小;散热性能好,允许较大电流通过;疲劳寿命长。其缺点是工艺较复杂,制造难度大。



图 1-3 箔式应变片

3. 应变花

为了测量平面应力场中某测点的主应力大小和方向,常常需要测量该点上两个或三个方向上的应变,这就需要在—个基底上粘贴 $2\sim 4$ 个电阻丝栅,它们方向事先已安置妥当,称为应变花。常用的应变花有两片直角、三片直角、三片等角、四片直角、四片等角(T- Δ)等型式。参见图 1-4。