

高等工程力学系列规划教材

工程实验力学

计欣华 邓宗白 鲁 阳 等编著
戴福隆 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TB12-33

2

高等工程力学系列规划教材

工 程 实 验 力 学

计欣华 邓宗白 鲁 阳 等编著
戴福隆 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书分为电测和光测两部分。电测部分包括了实验数据处理, 电测方法的原理、设备及测试技术, 适用的领域和传感器技术。光测部分包括了主要的光测方法——光弹性法、云纹法、全息干涉法、散斑法、干涉云纹法、焦散法及光测的实验设备、实验技术和应用举例。

书中对于近年来实验力学领域的新技术作了介绍。如电测技术中的传感技术、动态测试、特殊环境下的测试技术; 光测法中的激光全息技术、视频技术、光力学图像采集与处理技术。本书中介绍的许多测试方法, 都有其应用背景, 而不是局限于实验室的研究。

本书既可以作为力学专业的本科生的教材和其他相关专业如机械、土木、水利、材料专业研究生的选修或自学教材, 也可以作为从事工程设计、施工和检测工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程实验力学/计欣华等编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.1
(高等工程力学系列规划教材)

ISBN 7-111-16210-2

I. 工... II. 计... 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 (2005) 第 015240 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 季顺利 版式设计: 冉晓华 责任校对: 樊钟英

封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·9.375 印张·364 千字

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

高等工程力学系列规划教材编委会

主任委员	徐秉业			
副主任委员	郭乙木	庄 茁	亢一澜	林 松
委 员	(按姓氏笔画排序)			
	计欣华	亢一澜	邓宗白	张少实
	张义同	庄 茁	朱为玄	林 松
	季顺利	肖明葵	杨伯源	武建华
	郭乙木	徐秉业	徐铭陶	陶伟明
	蒋持平	鲁 阳		
秘 书	季顺利			

前 言

实验科学永远是科学研究的重要和必不可少的一个部分,对于力学的研究当然也是一样。工程实验力学是一门集力学理论、数学、电学、光学、物理、计算机视频技术和数字图像处理技术为一体的交叉学科。随着现代高科技的发展,为工程实验力学提供了更为丰富的实验手段,也提出了新的概念和新的课题。

本书分为电测和光测两部分。电测部分包括了实验数据处理,电测方法的原理、设备及测试技术,适用的领域和传感器技术。光测部分包括了主要的光测方法——光弹性法、云纹法、全息干涉法、散斑法、干涉云纹法、焦散法,光测原理、实验设备、实验技术和应用举例。

本书对近年来实验力学领域的新技术作了介绍,如电测技术中的传感技术、动态测试、特殊环境下的测试技术;光测法中的激光全息技术、视频技术、光力学图像采集与处理技术。尤其针对工业界的需要,现代测试已不再理解为过去那种静态的、慢速的测量,而发展成为动态、实时、在线、遥感、多信息地对高速运动的动态过程的测量。本书中介绍的许多测试方法,都有其应用背景,而不是局限于实验室的研究。

本书既可以作为力学专业的本科生的教材和其他相关专业如机械、土木、水利、材料专业研究生的选修或自学教材,也可以作为从事工程设计、施工和检测工作的工程技术人员的参考书。本书是通过各位作者多年教学和科研的积累及参考国内外相关书籍和文章而编成。本书电测部分第3章由张明编写,其他由邓宗白编写;光测部分第8章光弹性部分由鲁阳编写,贴片光弹性部分由王振林编写,其他由计欣华编写。全书由清华大学力学系戴福隆教授主审。在本书的编写过程中,天津大学秦玉文教授、杨乃庭高工和亢一澜教授对全书提出了宝贵的意见和建议,还提供了部分图片,在此表示我们衷心的感谢。

希望读者给我们提出宝贵的批评和建议。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 测量的基本概念	1
1.3 实验应力分析方法	4

第 1 篇 应变电测法

第 2 章 电阻应变计的原理及使用	7
2.1 电阻应变计的工作原理	7
2.2 电阻应变计的结构	8
2.3 电阻应变计的分类	11
2.4 电阻应变计的工作特性	16
2.5 电阻应变计工作特性的标定	22
2.6 电阻应变计的粘结剂	26
2.7 电阻应变计的常规使用技术	27
2.8 习题	30

第 3 章 测量电路原理与设备	32
3.1 测量电路原理	32
3.2 静态电阻应变仪	36
3.3 动态电阻应变仪	41
3.4 常用记录仪器	48
3.5 应变数字采集技术	50
3.6 习题	52

第 4 章 测量电桥的特性及应用	54
4.1 测量电桥的基本特性和温度补偿	54
4.2 电阻应变计在电桥中的接线方法	56
4.3 测量电桥的应用	59
4.4 习题	67

第 5 章 常温静态应变测量	70
5.1 静态测量的实施及稳定性	70

5.2	应变计栅长的选择	73
5.3	应变计粘贴方位误差的分析	74
5.4	测点位置及方位的确定	75
5.5	测量结果的修正	79
5.6	习题	84
第 6 章	动态应变测量	86
6.1	动态应变的类型	86
6.2	应变计的动态响应和疲劳寿命	88
6.3	动态应变测量的标定与实施	91
6.4	动态应变测量中的干扰与防干扰措施	93
6.5	动态应变的记录曲线与修正	96
6.6	动态应变的数据分析	98
第 7 章	电阻应变式传感器	102
7.1	基本原理	102
7.2	测力传感器	108
7.3	扭矩传感器	113
7.4	压力传感器	117
7.5	位移传感器	120
7.6	加速度传感器	123
第 2 篇 光 测 法		
第 8 章	光测弹性学方法	129
8.1	引言	129
8.2	光弹性方法的基本原理	130
8.3	平面光弹性	148
8.4	光弹性材料性能和模型浇铸	152
8.5	三向光弹性	154
8.6	光弹性贴片法	159
8.7	光弹性散光法	167
8.8	习题	174
第 9 章	云纹法	175
9.1	引言	175
9.2	平面云纹法	175
9.3	云纹法测量物体等高线、离面位移及其导数	183
9.4	习题	187

第 10 章 全息干涉法	188
10.1 激光全息照相	188
10.2 全息干涉位移测量	192
10.3 测量振动的全息干涉术	205
10.4 实验设备和实验技术	210
10.5 习题	217
第 11 章 激光散斑干涉法	218
11.1 激光散斑的物理性质	218
11.2 单光束散斑干涉法	219
11.3 双光束散斑干涉法	225
11.4 剪切散斑干涉术	228
11.5 电子散斑干涉术	233
附录: 傅里叶光学有关公式介绍	239
11.6 习题	243
第 12 章 云纹干涉法	245
12.1 概述	245
12.2 云纹干涉法的基本原理	245
12.3 云纹干涉法的实验技术	249
12.4 云纹干涉法在断裂测试方面的应用	254
12.5 云纹干涉法发展前景	256
12.6 习题	257
第 13 章 焦散线法	258
13.1 引言	258
13.2 基本原理	258
13.3 实验技术	266
13.4 习题	268
第 14 章 光力学中的计算机方法和图像识别技术	269
14.1 引言	269
14.2 计算机视频和图像数字化系统的构成	269
14.3 光力学条纹相位提取的方法	270
14.4 数字相关法	277
14.5 习题	283
参考文献	284

第1章 绪 论

1.1 概述

实验应力分析,是用实验方法分析受力构件的应变和应力等力学参量的一门科学,是一门与工程实际密切联系的学科。

研究力学问题有两种途径,即理论分析和实验分析,两者相辅相成。实验的结果常常为新理论的建立提供依据,新理论的提出和理论计算的结果需要实验验证;实验的设计和实施需要理论分析做指导。

实验应力分析可以检验和提高设计质量、工程结构的安全性和可靠性,可以达到减少材料消耗、降低生产成本和节约能源的要求。它还可以为发展新理论、设计新型结构以及新材料的应用提供依据。实验应力分析不仅可以推动理论分析的发展,而且能有效地解决许多理论上尚不能解决的工程实际问题。因此它和应力分析理论一样,是解决工程强度问题的一个重要手段,在航空、机械、土木等工程领域得到广泛的应用。

实验应力分析的方法很多,主要有电测法、光测法等。随着科学技术和工农业生产的高速发展,对应力和应变测试技术也提出了更高和更新的要求,目前测试技术正由宏观向微观发展;由静态向动态、瞬态发展;由本地测试向远程、遥控发展;由单机向网络化发展;由模拟向数字化发展;由手动向自动化发展。测试技术的水平越高对科学研究的促进越大,反之,科学研究的新成果也促进测试技术的发展。可以预期,微机械、微电子技术、纳米技术和计算机技术的发展将使测试技术产生更大的变化和提高。

1.2 测量的基本概念

1.2.1 直接测量和间接测量

测量就是用一定的工具或仪器设备来确定一个未知的物理量、机械量,以及生物医药等参量数值的过程。测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量是借助于测量工具或测量仪器把被测量与同性质的标准量进行比较,例如测量物体的质量,可以通过天平秤将砝码与被测物进行比较;有时则无法将被测量与标准量直接比较,而要作一些变换后才能进行,例如用压力表测量容器中的压力时,

必须将压力转换成压力表上指针的刻度,同时压力的标准量也被转换到压力表的刻度盘上,这样被测量与标准量都被转换成同性质的位移量(中间量),就可以比较了。以上两种测量方法都是直接测量。但是有许多被测量无法用简单的直接测量方法得到,这就要用间接测量方法。间接测量法是对与被测量有确定函数关系的其他物理量(即原始参数)进行直接测量,然后根据函数关系计算出被测量,例如测量运动物体的加速度,先将被测的加速度通过相应的传感器转变成电量(参数),并将该电量(参数)放大或转换,再送入显示器或记录仪,或送入计算机处理,从而得到被测的加速度,这就是间接测量。为了使测量结果得到确认,用来进行比较的标准量必须准确并得到公认,此外所用的方法和仪器必须经过校验。

采用间接测量方法,要根据测量原理设计一套测量系统。一个完整的测量系统主要包括以下三部分:

(1) 传感级 是系统的信息敏感部件,用来感受被测量,并将其转换成与被测量成一定函数关系(通常是线性关系)的另一种物理量(通常为电量)。

(2) 中间级 是用来将传感器输出的信号转换成便于传输、显示、记录并进行放大的装置。

(3) 终端级 是一个显示器、记录仪或某种形式的控制器,用来显示或记录被测量的大小或输出与被测量相应的控制信号,以供应用。

以上测量系统中,信息传输大都为模拟量,其缺点是容易受到干扰,影响测量精度。目前发展方向是将传感器信号转换成数字信息,其优点是抗干扰能力强,测量精度高,测量速度快。

1.2.2 测量系统的静态特性

当被测量不随时间变换,或随时间变换非常缓慢时,评价一个测量系统的品质主要以测量系统的静态特性来衡量。进行测量时,测量系统的输入和输出关系曲线称为静态特性曲线。测量系统的静态特性,即静态特性曲线的性质,主要有以下几个方面。

1. 线性度

对于静态特性为线性的测量系统,要求输出量与输入量之间呈理想线性关系,但实际上往往并非如此。如图 1-1 中曲线 a 表示实际静态特性曲线,曲线 b 为曲线 a 的拟合直线。静态特性曲线与拟合直线之间的最大偏差 $|y_i - y'_i|_{\max}$ 与全量程输出范围 $y_{\max}$ 比值的百分数,称为测量系统的线性度,即

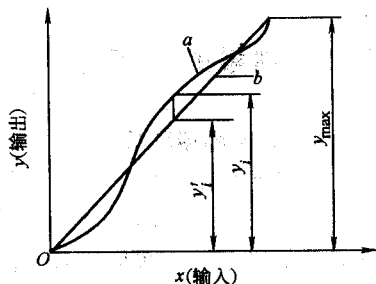


图 1-1 测量系统的线性度

$$\text{线性度} = \frac{|y_i - y_i'|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-1)$$

线性度说明静态特性曲线与拟合直线的吻合程度。

2. 灵敏度

灵敏度是指测量系统输出量的变化量 Δy 与输入量的变化量 Δx 的比值，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

它代表静态特性曲线上相应点的斜率。若静态特性曲线为直线，则灵敏度为常数，若静态特性曲线不是直线，则灵敏度为变量，它随输入量的变化而变化。

3. 滞后

滞后表示当测量系统的输入量由小增加到某一值和由大减小到某一值的两种情况下，对于同一输入量其输出量不相同。如图 1-2 所示，同一输入量时的输出量偏差 $|y_d - y_c|$ ，称为滞后偏差。最大滞后偏差 $|y_d - y_c|_{\max}$ 与全量程输出范围 $y_{\max}$ 比值的百分数，称为测量系统的滞后，即

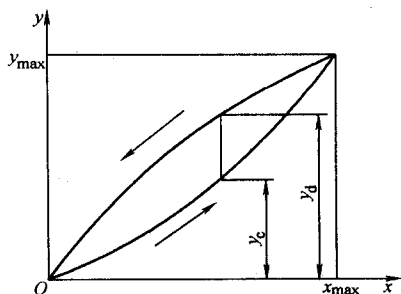


图 1-2 测量系统的滞后

$$\text{滞后} = \frac{|y_d - y_c|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\%$$

4. 灵敏限与分辨率

当输入量由零逐渐加大时，存在着某个最小值，在该值以下，系统不能检测到输出，但这个最小值一般不易确定，为此规定一个最小输出值，而与它相应的输入值即为系统能够检测到输出的最小输入值，称为灵敏限。

如果输入量从任意非零值缓慢地变化，将会发现在输入量变化值没有超过某一数值之前，系统不能检测到输出量变化，因此存在一个最小输入变化量。为了便于确定，规定了一个最小输出变化量，而与它相应的输入变化量即为系统能够检测到输出量变化的最小输入变化量，称为分辨率。一般指针式仪表的分辨率规定为最小刻度分格值的一半，数字式仪表的分辨率是最后一位的一个“字”。

5. 重复性

当进行多次重复测量时，输入量由小到大或由大到小重复变化，而对应于同一输入量其输出量亦不相同，这种偏差称为重复性误差。常用全量程中的最大重复性误差与满量程的百分数来表示测量系统的重复性指标。

6. 零漂与温漂

对于测量系统输入量不随时间变化的静态测量，当环境温度不变时，输出量

随时间变化,称为零漂。由外界环境温度的变化引起的输出量变化,称为温漂。

当被测量随时间快速变化或具有瞬态现象时,测量系统输出量也随时间变化,这类测量过程称为动态测量。测量系统的品质以系统的动态特性来评价,如振幅响应、频率响应等。

1.3 实验应力分析方法

实验应力分析方法很多,主要有:应变电测法、光测法、脆性涂层法和应变机械测量法等。其中最广泛应用的是应变电测法和光测法,下面简单介绍一下这两种方法。

1.3.1 应变电测法

应变电测法的含义有两种意义,广义的和狭义的。广义的应变电测法主要包括:电阻应变计测试法、电容应变计测试法和电感应应变计测试法等多种方法。其中以电阻应变计测试方法应用的较为普遍。因此,常常将应变电测法特指为电阻应变计测试法,这是狭义的应变电测法。

电阻应变计测试技术起源于19世纪。1856年,W·汤姆逊(W·Thomson)对金属丝进行了拉伸试验,发现金属丝的应变与电阻的变化有一定的函数关系;惠斯登电桥可用来精确地测量这些电阻的变化。1938年,E·西门斯(E·Simmons)和A·鲁奇(A·Ruge)制出了第一批实用的纸基丝绕式电阻应变计。1953年,P·杰克逊(P·Jackson)利用光刻技术,首次制成了箔式应变计,随着微光刻技术的进展,这种应变计的栅长可短到0.178mm。1954年,C·S·史密斯(C·S·Smith)发现半导体材料的压阻效应。1957年,W·P·梅森(W·P·Mason)等研制出半导体应变计。现在已研制出数万种用于不同环境和条件的各种类型的电阻应变计。

电阻应变计习惯称为电阻应变片,简称应变计或应变片。出现于第二次世界大战结束的前后,已经有60多年的历史。电阻应变计的应用范围十分广泛,适用的结构包括航空、航天器、原子能反应堆、桥梁、道路、大坝以及各种机械设备、建筑物等;适用的材料包括钢铁、铝、木材、塑料、玻璃、土石、复合材料等各种金属及非金属材料。并且,它不仅适用于室内实验、模型实验,还可以在现场对实际结构或部件进行测量,这些特点是任何一种传感元件或传感器所不能比拟的。另外,它在对结构和设备的安全监测方面也有广泛的应用前景。

电阻应变测试方法是用电阻应变计测定构件的表面应变,再根据应变—应力关系确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。这种方法是,将电阻应变计粘贴在被测构件上,当构件变形时,电阻应变计的电阻值将发生相应的变化,利用电阻应变仪(简称应变仪)将此电阻值的变化测定出来,再换算成应变值或者输出与此应变成正比的电压(或电流)信号,由记录仪记录下来,就可得到所

测定的应变或应力。

电阻应变测试方法的优点是：

- 1) 测量灵敏度和精度高。其最小应变读数可为 1 微应变 ($\mu\epsilon$, 1 微应变 = 10^{-6}mm/mm), 在常温静态应变测量时, 精度一般可达到 1% ~ 2%。
- 2) 测量范围广。可测 1 微应变到 2 万微应变。
- 3) 频率响应好。可以测量从静态到数十万赫兹的动态应变。
- 4) 应变计尺寸小, 最小的应变计栅长可短到 0.178mm, 因此重量轻、安装方便, 不会影响构件的应力状态, 而且可进行应力梯度较大的应变测量。
- 5) 由于在测量过程中输出的是电信号, 因此易于实现数字化、自动化及无线电遥测。
- 6) 可在高温、低温、高速旋转及强磁场等环境下进行测量。
- 7) 可制成各种传感器, 测量力、位移、加速度等物理量。
- 8) 适用于工程现场的应用。

该方法的缺点是：

- 1) 通常只能测量构件表面的应变, 而不能测构件内部的应变。
- 2) 一个电阻应变计只能测定构件表面一个点沿某一个方向的应变, 故不能进行全域性的测量。
- 3) 只能测得电阻应变计栅长范围内的平均应变值, 因此对应变梯度大的应力场测量误差较大。
- 4) 易受外界环境 (如温度) 的影响。

1.3.2 光测法

光测力学是应用光学方法, 以实验为手段去研究结构物中的应力、应变和位移等力学量的一门学科。现代光测力学是结合了力学、光学、数学、电子和计算机技术的一门交叉学科, 除了在机械、水利、土木等传统行业中有广泛的应用外, 它也在国防、航空航天工业中是一不可或缺的测试手段, 在新兴的电子、纳米材料、生物力学、运动力学等方面也正在发挥越来越重要的作用。它的发展与现代高科技的发展息息相关, 它是实验力学学科中的一个重要的分支。

光测法的特点是：

- 1) 全场测量。这是电测方法做不到的, 全场测量的方法使测试者能全面观测、分析位移、应力和应变, 用这种方法能了解到结构物内应力 (或位移) 分布的全貌, 能清晰地反映出应力集中现象, 立即得到应力集中系数, 能容易地找出最大应力值及其所在位置, 能方便地获得结构物的边界应力值。直观性强, 一目了然。可以逐点求出应力或位移, 也可以求出任意位置的应力或位移。对于研究结构物的强度问题, 对于方案设计的比较和改进, 应用光测法是很有利的。

- 2) 高灵敏度。光干涉的方法可以达到波长量级, 通过差分法等方法还可以

提高到波长的千分之一。

3) 直观。大部分光测法以干涉条纹的形式显示, 非常直观, 这对于解决应力集中、缺陷检测是很重要的。

4) 可以进行无损检测。因为大部分光测方法都是非破坏性的, 很多光测图像是通过照相、摄像等方式获得资料信息的, 不需在结构物上直接安装传感器或其他测试装置, 所以它是非接触式测量, 也是非破坏性的测量。

5) 可以进行三维应力分析, 这是光测法特有的优点, 其他方法只能进行表面的测试, 即使将传感元件置于被测物的内部, 也只能进行逐点的测量。而三维光弹性法可以进行三维应力分析。

本书中对主要的光测方法——光弹性法、云纹法、全息干涉法、散斑法、云纹干涉法、焦散法进行的介绍, 注重于概念和在工程上的应用。书中对于光力学图像的计算机采集与处理也作了介绍。

由于近代工业发展的要求, 在很多高新技术领域, 如宇航技术和原子能工业中所需用的结构物, 几何形状复杂, 载荷情况和工作环境(高温、高压、低温、低压、地下、液中、强磁场、强辐射、动态等)越来越多样, 致使理论分析更加困难, 用实验的办法就显得更加重要, 有时甚至是惟一的手段了。加之, 科学不断地进步, 新材料、新工艺的出现, 使研究的大量课题已超出了原有的领域, 进入了新的范畴, 很多问题都要考虑到非线性、非匀质材料、复合材料、各向异性、粘弹性和动态等方面的特性。对于这些新课题, 要建立基本理论以反映其内在的本质规律, 就更需要大量实验资料的积累和分析才能完成。如由于 MEMS 技术受到越来越广泛的关注, 微细观领域测量技术也给光测技术提出了新问题。总之, 光测力学面临着机遇与挑战。

根据光测力学发展的现状, 下列几方面的工作应加以重视和研究。

1) 扩大在工程问题中的应用, 更好地为工农业生产和新学科服务, 如水利、土建、机械、造船、航空到核电、宇航、材料等新兴的工业。

2) 进一步发挥光测法在科学研究领域的作用, 研究塑性、粘弹性、蠕变、各向异性、动态特性、微细观以及高温、高压、热辐射下的材料性能及塑性力学、断裂力学、生物力学和复合材料力学中的本构关系问题。

3) 应用最新科技成就提高现有光测法的精度和灵敏度, 使之更方便、迅速有效地进行现场实测, 如最新的激光、视频和计算机技术等。

4) 发挥交叉学科的优势, 如数学中的数值计算与处理、小波变换、傅里叶变换、分形, 相关运算; 光学中的光外差技术, 光学 CT 技术, 视频技术和计算机中的采集、控制和数字图像处理都已经在光测法中得到了应用。研究光测力学法和数值分析相结合的混合解法, 利用光测法的特点和用计算机进行数值分析的特点, 发挥各自的优势, 能更有效地解决问题。

第 1 篇 应变电测法

第 2 章 电阻应变计的原理及使用

2.1 电阻应变计的工作原理

电阻应变计是一种用途广泛的高精度力学量传感元件,其基本任务就是把构件表面的变形量转变为电信号,输入相关的仪器仪表进行分析。在自然界中,除超导体外的所有物体都有电阻,不同的物体电阻也不同。物体电阻的大小与物体的材料性能和几何形状有关,电阻应变计正是利用了导体电阻的这一特点。

电阻应变计的最主要组成部分是敏感栅。敏感栅可以看成为一根电阻丝,其材料性能和几何形状的改变会引起栅丝的阻值变化。

设一根金属电阻丝,其材料的电阻率为 ρ , 原始长度为 L 。不失一般性,假设其横截面是直径为 D 的圆形,面积为 A , 初始时该电阻丝的电阻值为 R

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

在外力作用下,电阻丝会产生变形。假设电阻丝沿轴向伸长,其横向尺寸相应缩小,导致横截面面积发生变化。电阻丝的横截面原面积为 $A = \frac{\pi D^2}{4}$, 其相对变化为

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (2-2)$$

其中, μ 为金属丝材料的泊松比; dL/L 为金属导线长度的相对变化,可用应变表示,即

$$\epsilon = \frac{dL}{L} \quad (2-3)$$

在电阻丝伸长的过程中,所产生的电阻值的相对变化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon \quad (2-4)$$

此式中,前一项是由金属丝变形后电阻率发生变化所引起的;后一项是由金属丝

变形后几何尺寸发生变化所引起的。在常温下,许多金属材料在一定的应变范围内,电阻丝的相对电阻变化与丝的轴向长度的相对变化成正比,即

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon \quad (2-5)$$

式中, K_s 为单根金属丝的灵敏系数,它等于

$$K_s = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \quad (2-6)$$

式(2-5)表示金属丝的电阻变化率与它的轴向应变成线性关系。根据这一规律,采用在变形过程中能够较好地产生电阻变化的材料,制造将应变信号转换为电信号的电阻应变计。

2.2 电阻应变计的结构

电阻应变计主要由敏感栅、基底、覆盖层及引出线所组成,敏感栅用粘合剂粘在基底和覆盖层之间。一种丝绕式应变计的典型结构如图 2-1 所示。

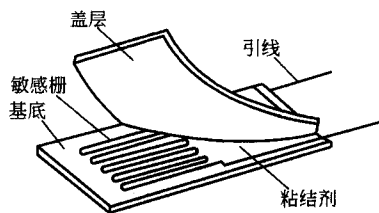


图 2-1 电阻应变计的结构

2.2.1 敏感栅

敏感栅是用合金丝或合金箔制成的栅。它能将被测构件表面的应变转换为电阻相对变化。由于它非常灵敏,故称为敏感栅。敏感栅由纵栅与横栅两部分组成。纵栅的中心线称为应变计的轴线。敏感栅的尺寸用栅长 L (横栅为圆弧形时,是指两端圆弧内侧之间的距离;横栅为直线形时,则指两端横栅内侧之间的距离)和栅宽 B (指在与纵轴垂直的方向上敏感栅外侧之间的距离)表示,参见图 2-2。栅长尺寸一般为 0.2~100mm。

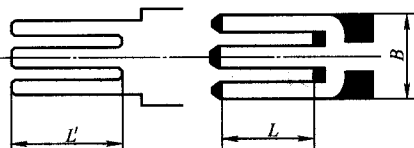


图 2-2 敏感栅的尺寸

敏感栅是电阻应变计的核心组成部分,它的特性对于电阻应变计的性能有决定性的影响。为了改善电阻应变计的性能,人们探索了多种材料的应变—电阻特性,从而发展了敏感栅材料,包括金属、半导体和金属氧化物等。目前常用的金属敏感栅材料主要有铜镍合金、镍铬合金、镍钼合金、铁基合金、铂基合金、钽基合金等。以金属材料为敏感栅的电阻应变计的灵敏系数大都在 2.0~4.0 间。硅、锗等半导体材料由于具有压阻效应,所以也被人们用作敏感栅的材料,以半导体材料为敏感栅的电阻应变计的灵敏系数大都在 150 左右,远高于以金属材料为敏感栅的电阻应变计。

通常对制造应变计敏感栅的材料的要求主要是:

1) 灵敏系数 K_s 高, 而且在较大的应变范围内保持为常数。康铜丝在弹性状态和塑性状态下, K_s 值基本上是常数。

2) 敏感栅材料的弹性极限要高于被测构件材料的弹性极限, 以免在测试中因敏感栅先出现塑性变形而影响测试精度。

3) 电阻率 ρ 高, 分散度小, 随时间变化小。

4) 电阻温度系数小, 在宽的温度范围内保持不变; 分散度小, 对温度循环有完全的重复性; 有足够的稳定性, 以减小由温度变化而引起的测量误差。

5) 延伸率高, 耐腐蚀性好, 疲劳强度高。

6) 焊接性能好, 易熔焊和电焊; 对引线的热电势小。

7) 加工性能好, 以便制成细丝或箔片。

应变计常用金属材料的物理性能见表 2-1。表中的电阻温度系数为 20°C 以下、温度升高 1°C 时材料的电阻变化率。

表 2-1 应变计常用金属材料的物理性能

材料名称	牌号或名称	成分		灵敏系数 K_s	电阻率 $\rho/(\Omega\text{mm}^2/\text{m})$	电阻温度系数 $\times 10^{-6}^\circ\text{C}$
		元素	%			
铜镍合金	康 铜	Cu	55	1.9 ~ 2.1	0.45 ~ 0.52	± 20
		Ni	45			
铁镍铬合金		Fe	55.5	3.6	0.84	300
		Ni	36			
		Cr	8			
		Mo	0.5			
镍铬合金		Ni	80	2.1 ~ 2.3	1.0 ~ 1.1	110 ~ 130
		Cr	20			
	6J22 (卡玛)	Ni	74	2.4 ~ 2.6	1.24 ~ 1.42	± 20
		Cr	20			
		Al	3			
		Fe	3			
镍铬合金	6J23	Ni	75	2.4 ~ 2.6	1.24 ~ 1.42	± 20
		Cr	20			
		Al	3			
		Cu	2			
铁铬铝合金		Fe	70	2.8	1.3 ~ 1.5	30 ~ 40
		Cr	25			
		Al	5			
贵金属合金	铂	Pt	100	4 ~ 6	0.09 ~ 0.11	3900
	铂 铱	Pt	80	6.0	0.32	850
		Ir	20			
	铂 钨	Pt	92	3.5	0.68	227
		W	8			