

# 应变电测

张如一 沈观林 李朝弟

# 应变电测

与

# 传感器



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

# 应变电测与传感器

张如一 沈观林 李朝弟

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 提 要

本书就应变电测和传感器的基本原理、测试技术和各种应用等作系统、深入而简明的阐述,全书共分 8 章,包括绪论、应变计、传感器、测量电路、测试仪器、静动态应力应变测量技术、特殊条件下应力测量技术和数字信号处理技术。

本书可供高等工业学校工程力学、机械、土建等专业本科生作为教材,亦可供有关力学,机械,结构工程等方面教师、科研人员、技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

应变电测与传感器/张如一等编著. —北京:清华大学出版社,1998  
ISBN 7-302-03186-X

I. 应… II. 张… III. ①实验应力分析-电测法 ②传感器 IV. 0348.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 30814 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:清华园胶印厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 318 千字

版 次: 1999 年 1 月第 1 版 1999 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03186-X/O · 202

印 数: 0001~6000

定 价: 14.60 元

# 前 言

本书根据高等工业学校工程力学专业本科生电测应力分析课程教材大纲编写而成,拟作为工程力学专业实验力学电测应力分析课程教材,亦可作为机械、航空、土建专业本科生、研究生有关课程参考书、并可作为工程技术人员与教师工作参考。

全书分8章,第1章绪论,第2章应变计,第3章传感器,第4章、第5章为测量电路和测试仪器,第6章静、动态应力应变测量技术,第7章特殊条件下应力测量技术,第8章数字信号处理。书末附录中开列教学实验项目和习题,并列出主要参考资料。

本书在原先教材基础上增加了近十余年来国内外发展的新技术,并按教学经验系统介绍基本原理、各种实验方法、测量技术及其各种应用。

本书第1至4章由张如一、沈观林编写,第5、6、7章由沈观林编写,第8章由李朝弟编写。

由于编者水平有限,书中定有一些缺点、错误,敬请读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 实验固体力学电测技术的任务与概况 .....	1
1.2 应变电测与传感技术的特点 .....	1
1.3 应变电测与传感技术的各种应用 .....	2
<b>第 2 章 应变计</b> .....	5
2.1 电阻应变计的基本构造和工作原理 .....	5
2.2 电阻应变计的各项工作特性 .....	8
2.3 电阻应变计的类型.....	17
2.4 半导体应变计.....	20
2.5 电容应变计.....	26
<b>第 3 章 传感器</b> .....	31
3.1 传感器的一般特性.....	31
3.2 应变计式传感器的基本原理与设计.....	38
3.3 各种应变计式传感器的构造和特性.....	44
3.4 压阻式传感器.....	59
3.5 压电式传感器.....	62
3.6 电容式传感器.....	66
3.7 电感式传感器.....	69
<b>第 4 章 测量电路</b> .....	74
4.1 电桥测量电路.....	74
4.2 电容测量电路.....	80
4.3 电荷测量电路.....	84
<b>第 5 章 测试仪器</b> .....	87
5.1 应变测量仪器种类和电阻应变仪基本工作原理.....	87
5.2 电阻应变仪的工作特性及其校准.....	92
5.3 数字应变仪和应变测量采集系统.....	97
<b>第 6 章 静动态应力应变测量技术</b> .....	102
6.1 静态应力应变测量技术 .....	102
6.2 动态应力应变测量技术 .....	109
<b>第 7 章 特殊条件下应力测量技术</b> .....	121
7.1 高低温条件下应力测量技术 .....	121
7.2 高压液下应力测量技术 .....	132
7.3 运动构件应力测量技术 .....	138
7.4 残余应力测量技术 .....	147

7.5 应变电测方法在其他领域中的应用 .....	156
<b>第8章 数字信号处理技术</b> .....	167
8.1 信号的描述及分类 .....	167
8.2 数据的采集与预处理 .....	169
8.3 数字信号处理技术 .....	173
8.4 数字信号处理中的几个重要问题 .....	185
8.5 数字信号处理系统 .....	190
8.6 数字信号处理技术的应用 .....	193
<b>附录</b> .....	200
I 教学实验项目 .....	200
II 习题 .....	200
<b>主要参考文献</b> .....	207

# 第1章 绪 论

## 1.1 实验固体力学电测技术的任务与概况

解决各种工程中的力学问题,通常有理论计算分析和实验分析两种方法,各种实验分析方法和技术经长期发展形成称为实验力学的独立学科,它采用各种实验方法和技术,确定结构受力情况下应力应变状态,研究流动现象和规律及流体与固体之间相互作用。实验力学又分实验固体力学和实验流体力学两个分支。实验固体力学过去称为实验应力分析,它的任务是采用实验方法测定结构的各种力学参数,如应力、应变、位移、力、荷载和加速度等,用以解决固体力学中的工程结构和机械强度问题,以及其它有关力学问题。实验固体力学包括十多种方法,主要有应变电测方法,光弹性方法,脆性涂层法,云纹法,激光全息干涉法,激光散斑干涉法,全息光弹性法,声弹性方法等。本书主要介绍实验固体力学中的应变电测方法——电阻应变测量,电学敏感元件,应变计式及电学传感器,各种测试仪器,静、动态应力应变测量技术,特殊条件下应力应变测量技术及数字信号处理技术。

实验固体力学电测技术发展历史悠久,早在 1856 年,W. Thomson 在铺设海底电缆时,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应变。

到 1936 至 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 公司专利生产,取他们名字首字母命名为 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。至今各种电阻应变计、半导体应变计品种规格已达二万多种,各种传感器也品种繁多,应用范围广泛。与此同时亦出现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、数字显示发展到自动数据采集——显示、打印、磁盘记录、数据传送及处理的完整测量系统。总之,这种应变电测及传感技术(简称电测技术)广泛应用于各种工程结构、机械设备及其模型的应力应变、受力和变形等测量分析,除基本的静态、动态测试外,还可在高温、低温、高压液下、高速旋转、强磁场、核辐射等特殊条件下进行测量,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,应变电测与传感技术的主要特点和优点。其他电学敏感元件稍有差别(如尺寸较大,不适应某些特殊环境等)。

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

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

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

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

(5) 频率响应快,可测量静态到  $50$  万  $\text{Hz}$  的动态应变。

(6) 测量中输出为电信号,采用电子仪器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、打印和计算机处理。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  $\text{MPa}$ ) 液下,高速旋转(几万转/分)、强磁场和(或)核辐射等特殊环境中进行结构应力、应变的测量。

(8) 用电阻应变计配合专门弹性元件可制成各种传感器,用以测量力、荷载、压强、扭矩、位移和加速度等物理量。这些应变式传感器的测量精度可达  $0.01\%$  至  $0.5\%$ ,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。

后来发展的其它应变传感元件,如电容应变计等,可用于高温结构应变等长期测量,用以制作的各种类型传感器用于测量和控制。

其主要缺点和限制有:

(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场(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  $0.2 \sim 1\text{mm}$ ),否则测量误差较大。

### 1.3 应变电测与传感技术的各种应用

由于这种技术具有很多优点,在半个多世纪的发展历程中,已广泛应用于各工程领域结构的实验应力分析,并可制成各式传感器应用于各工程领域及其他部门。下面简要列举一些应用情况。

1. 在航空航天工程中用于结构应力应变测量和加载量测试和控制。例如美国波音公司波音 767 等飞机静力结构试验,采用  $2000$  多个电阻应变计和  $1000$  多个应变花,用应变测量仪器多达  $4000$  多通道,测量飞机结构大量部位的应变。在我国新型号飞机上,用电测传感技术测量飞行中的载荷——弯矩、扭矩、剪力。我国某导弹采用碳-碳复合材料作端头,用高温应变计测量了快速飞行引起的热应力。

2. 在电力、动力工程中用于电厂设备的强度试验。例如秦山核电厂安全壳结构整体试验,采用电阻应变等测量方法测量混凝土和钢筋中的应力、预应力钢束力以及安全壳的变形,温度等,总计  $240$  多个测点,历时  $11$  昼夜测量,证明安全壳结构完整性良好。又如上海闵行电厂、某机组再热蒸汽管道蝶式加强焊制三通,受高温 ( $550^\circ\text{C}$ ) 内压 ( $2.3\text{MPa}$ ) 及管道热膨



胀引起综合应力。为了解热态工况下实际应力分布,进行现场测试,采用国产 SP-550 高温焊接式应变计及热电偶,在焊制三通上布置 14 个测点。测试结果反映实际应力分布规律,对管道设计有重要参考价值。

3. 在土木工程及水利工程中应用于建筑结构应力测量、楼房耐震试验,桩基残余应力测量,大型水坝施工和蓄水过程监测应力等。例如,用电阻应变花测量北京火车站中央大厅屋盖结构的应力分布。又如日本真名川水坝,坝高 127.5m,坝长 357m,建造水坝时埋设应变计 43 个,应变计式应力计 39 个,钢筋计和温度计等共 600 多个测量元件。在施工过程中测量各处温度,施工完成后测量坝体应力,开始蓄水时观测各处应力、温度等。又如,广东国际大厦 63 层主楼,进行模型 1:70(有机玻璃)静力下应变和位移测量。模型上布置 200 个电阻应变计,用数字应变检测系统记录各测点在各荷载作用下的应变并计算出应力。

4. 在冶金、化工、材料工程中应用于结构和材料性能测试。例如,大型钢锭模在铸锭过程中测量钢锭模外表面的热应力,采用国产 700℃ 高温应变计和通用数字测量系统,在现场钢锭浇铸过程中测量热应力,测试结果表明钢锭模底部和中部有些测点热应力较大与生产中出现开裂破坏情况一致。又如,用专门电阻应变计(残余应力计)测量化工反应容器搪玻璃层中残余应力。对北京石油化工厂大型球罐( $\phi 15\text{m}$ )进行水压试验,试验压力为 2.86MPa,采用电阻应变计近 200 个,用数字应变巡回检测仪测量应变应力。再例如,用专门制成的应变计式高温夹式引伸计(可用于 400℃,属位移传感器),在循环加载过程中测量某合金钢试件裂纹张开位移,经数据处理得裂纹长度  $a$ ~荷载循环次数  $N$  关系曲线以及裂纹扩展速率与  $\Delta J$  之间关系曲线,这是将应变计式位移传感器应用于材料高温疲劳和断裂性能研究的成功例子。

5. 在桥梁和道路工程中,应用于桥梁静载强度试验和道路工程结构应力测量,其中采用电阻应变计和应变计式各种传感器。例如,日本某大型吊桥在通车前用 60 吨自卸车载重 840t 作荷载,进行静载试验。用电阻应变计测量钢桁架桥各杆件上 340 个测点的应力应变,采用多台静态应变仪,并测量桁架多点挠度。再有,日本中央高速公路惠那山隧道(全长 8500m)采用电阻应变计测量钢拱中应力,用应变式荷重传感器测量拱支反力,用应变式钢筋计和土压计测量钢筋和混凝土中应力,用应变式位移计测地层位移,共 180 个测点。随工程进展进行测量元件埋设和测量,最后完成了 180 天的测量。

6. 在交通工程中应用于工程结构应力测试,例如日本大型矿石运输船头部迎浪负荷试验。在船的头部和船体中央部分,使用电阻应变计测应力,使用加速度传感器测船体运动加速度,用水压计测量暴风雨时冲击船体的波浪冲击压力,用动态应变仪和磁带记录仪记录。再例如,北京 630 型矿山用客车,在底盘车架大梁、横梁上布置电阻应变计进行静载时、顶起前后轮时应力测量,以及在不平道路上行驶和越过障碍时动态应力测量。另外还进行过自行车车轮轮圈和轮辐应力测量、轮椅车各部件应力测量、油罐汽车冲撞试验等。

7. 在机械工程中应用于结构和机械部件应力测量。例如,北京 J23-80 型压力机床,对其床身、曲轴进行静态应力测量,采用电阻应变计测点有数十个。再如北京 30 万吨乙烯工程中火炬塔架高 121.5m 重 235t,采用 A 型桅杆扳倒法竖立,在塔架两个起吊点附近各桁架杆件和底部支点各杆件布置电阻应变计,在吊装过程中用静态应变仪测量各点应变应力,保证吊装中塔架的安全。另外,对带大小接管的压力容器模型进行油压下应力测量,在容器内外大小接管区布置 BX-1、BX-3 箔式应变计约 160 个(74 个测点),用多台静态电阻应变

仪测量,油压为 4.8MPa 时的应力,结果与用三维有限元法计算应力结果吻合,误差在 5% 左右。

8. 在医学、生物力学、体育运动领域中应用于科学研究。例如人体骨盆应力分布实验,为预防骨折,研究骨盆易折薄弱部位应力状况,采用电阻应变计和静态应变仪,在模拟轴向荷载下测量各测点应力,发现骨盆骶骨耳状面三角区中央主应力最大,但骨盆总体强度刚度较高。另外体育运动中,研究体操运动过程如运动员在鞍马上做动作时鞍马受到运动员动力的作用,应用应变电测技术可进行实时测量,在鞍马两个鞍环根部安装 4 个三维应变式测力传感器,每个传感器分别测量鞍环  $x, y, z$  方向分力  $F_x, F_y, F_z$ ,鞍马运动员在鞍马上作各种运动动作时,三维测力传感器受力和测试仪器测出信号,经处理得出各种动力作用曲线和合力迹线,由此,对体育训练作科学指导。再有用应变式超大型地板反力传感器和计算机进行病人步态分析,患中风病后病人行动障碍以其异常步态来评价,动态评价用超大型地板(长 10.8m 宽 1.2m)反力传感器。它由 8 块地板组成,每一板内部安装应变式测力传感器,可检测出地板反力和作用力点的轨迹。由传感器和测试仪器、计算机等系统可迅速得到步行状态图和评价,比较病人手术前后和训练前后的步态差别和效果。

9. 各种传感器与数字电路结合可制作成各种电子秤、汽车衡、地轨衡、计价秤、人体秤、吊车秤等衡器,用于各种商业、运输、医疗等领域。

## 第2章 应变计

### 2.1 电阻应变计的基本构造和工作原理

#### 2.1.1 电阻应变计的基本构造

电阻应变计的基本构造如图 2-1(a)所示,是由敏感栅、基底、粘结剂、盖层、引线组成。早期的应变计敏感栅由金属细丝绕成栅形,敏感栅材料常用的有康铜(铜镍合金)、镍铬合金等,各种类型电阻应变计的敏感栅材料列在表 2-1 中。基底和盖层除用纸外,常用的是有机树脂胶膜,即将敏感栅上下面涂以胶膜、有机树脂(粘结剂)。用于各种电阻应变计的粘结剂有环氧树脂、酚醛树脂、聚乙烯醇缩醛等,列在表 2-2 中。引线一般用镀锡或镀银细铜丝。后来发展的箔式电阻应变计,基本构造如图 2-1(b)所示,敏感栅用金属箔,厚度在 0.003~0.006mm 间,栅形由光刻制成,图形可很复杂且精细,栅的尺寸可很小,栅长最小至 0.2mm。它可制成多种应变花和图形。敏感栅做成栅形主要是为在保证要求的电阻值条件下,尽量减小尺寸以测量较小面积内的应变。

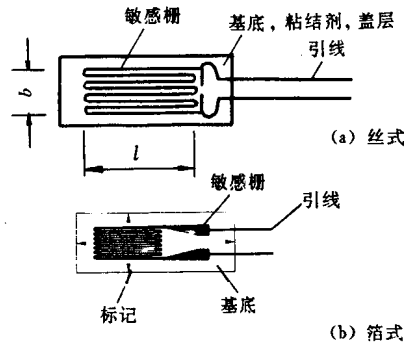


图 2-1 电阻应变计基本构造示意图

表 2-1 常温、中高温电阻应变计用敏感栅材料性能

合金类型	牌号	成分/%	灵敏系数 $K_0$	电阻率 $\rho /$ $\Omega \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	电阻温度系数/ $10^{-6} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$	备\注
铜镍合金	康铜	Cu ~55 Ni ~45	1.9~2.1	0.40~0.54	$\pm 20$	常温用,~250°C
镍铬合金	镍铬	Ni 80 Cr 20	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130	高温用,450°C
	6J22 (卡玛)	Ni 74 Cr 20 Al 3 Fe 3	2.1~2.4	1.24~1.42	$\pm 20$	$\leq 400^\circ \text{C}$ 用
	6J23	Ni 75 Cr 20 Al 3 Cu 2	2.4~2.6	~1.15	-3~+12	~400°C 用

续表

合金类型	牌号	成分/%	灵敏系数 $K_0$	电阻率 $\rho$ / $\Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	电阻温度系数/ $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	备注
铁铬铝 合金		Fe 67 Cr 25 Al 5.4 V 2.6	2.6~2.8	1.3~1.5	$\pm 30 \sim 40$	550°C ~900°C 用
镍钼合金	HM-8	Ni 75 Al 3 Mo 22	2.2	~1.5	7.3	$\leq 450^\circ\text{C}$ 用
镍铬铁 合金	恒弹性 合金	Ni 36 其余 Fe Cr 8	3.2	1.0	175	230°C动态用
铂合金	铂	Pt 100	4.6	0.1	3900	~1000°C用
	铂铱合金	Pt 80~90 Ir 10~20	4.0	0.35	590	$\leq 700^\circ\text{C}$ 用
	铂钨合金	Pt 90.5~91.5 W 8.5~9.5	3.0~3.2	0.75	140~190	$\leq 800^\circ\text{C}$ 用
	铂钨铼 镍合金	Pt 84, Ni 2 W 8.5, Re 4	3.2	0.78	145	$\leq 900^\circ\text{C}$ 用
金合金	金钯合金	Pt 7 Au ~50 Pd ~33 Cr ~7	1.4~1.8	110	-38~+7	$\leq 800^\circ\text{C}$ 用

表 2-2 常用的应变计粘结剂

名称	牌号	主要成分	最低固化条件	工作温度/ $^\circ\text{C}$	用途
快干胶 氰基丙烯 酸酯粘结 剂	502	$\alpha$ 氰基丙烯酸 乙酯等	室温下指压 1min	-30~+60	粘贴常温应变计
	CC-33A (日)	氰基丙烯酸酯 等	室温下指压 1min	-196~+100	粘贴常温应变计
	CN (日)			-30~+100	粘贴常温应变计
酚醛- 缩醛树脂	1720	聚乙烯醇缩甲 乙醛, 酚醛树 脂等	70°C, 1h; 120°C, 1h; 160~180°C, 1~2h (压力 0.1MPa)	-100~+100	常温应变计粘贴和制 造
	204	聚乙烯醇缩甲 乙醛有机硅树 脂等	180°C, 2h(压力 0.1~ 0.2MPa)	-196~+200	低、中温应变计制造 和粘贴
酚醛-环 氧 粘结剂	J-06-2	酚醛、环氧、石 棉粉等	150°C, 3h(压力 0.2~ 0.3MPa); 250°C, 1h	-196~+250	低、中温应变计制造 和粘贴

续表

名称	牌号	主要成分	最低固化条件	工作温度/°C	用途
环氧树脂 粘结剂	914	环氧树脂等双 组分	室温指压固定	-60~+80	常温应变计粘贴
	EA-2(日)	环氧树脂等	室温 24h	-196~+80	低温应变计粘贴
	EP-34(日)	环氧树脂等双 组分	室温固化	-55~+200	中温应变计粘贴
环氧- 酚醛粘 结剂	M-Bond 610(美)	环氧、酚醛	160°C, 2h(压力 0.2~ 0.3MPa); 205~ 230°C, 后固化 2h	(长期) -269~+230 (短期) -269~+370	高精度传感器用应变 计粘贴
有机硅 树脂型	4107、B19、 F18-2	有机硅树脂、 某些氧化物等	180°C, 1h; 300°C, 3h; 400~430°C, 3h~4h	+400	高温应变计制造和粘 贴
磷酸盐 粘结剂	LN-3, GJ-14	磷酸二氢铝、 SiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等	180°C, 0.5h; 400°C, 1h	+550	高温应变计制造和粘 贴
	P12-2	磷酸二氢铝、 CrO <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 等	200°C, 1h; 400°C, 1h	+700	高温应变计制造和粘 贴
	P12-9	磷酸二氢铝、 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 等	200°C, 1h; 400°C, 1h	+800	高温应变计制造和粘 贴
	U-529(英)	磷酸二氢铝等	350°C, 1h	-200~+700	高温应变计制造和粘 贴
	M-Bond GA-100 (美)	陶瓷等	175°C, 15min; 315°C, 1h	(长期) -269~705 (短期) -269~+815	高温应变计制造和粘 贴
金属氧化 物		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 或 MgO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混合物	喷涂法固定	静态 +800 动态 +1000	高温临时基底应变计 安装

## 2.1.2 电阻应变计的工作原理

将电阻应变计安装(如粘贴)在被测构件表面上,构件受力而变形时,电阻应变计的敏感栅随之产生相同应变,其电阻值发生变化,用仪器测量此电阻变化即可测量出构件表面沿敏感栅轴线方向的应变。因此电阻应变计的主要性能与敏感栅有关,取敏感栅材料金属细丝,研究其把应变转换成电阻变化的关系。

金属细丝的电阻  $R$  与丝的长度  $L$  成正比,而与其截面积  $A$  成反比,按物理学有下列公式:

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

式中,  $\rho$  是金属的电阻率,当细丝因受拉力而伸长时,其电阻发生变化,此变化可由对上式的微分求得:

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

细丝伸长由泊松效应( $\mu$ 为泊松比)引起截面变化:  $\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$ , 代入上式有

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{dL}{L}$$

据高压下金属丝性能研究发现:  $\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$

式中,  $V$  为金属细丝的初始体积  $V = AL$ ,  $m$  为比例系数, 在一定应变范围内, 对特定材料和加工方法,  $m$  是常数, 由细丝轴向应变  $\epsilon = \frac{dL}{L}$ ,  $\frac{dV}{V} = (1 - 2\mu) \frac{dL}{L}$ , 得:

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)]\epsilon = K_0\epsilon$$

$$K_0 = [1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)] \quad (2-3)$$

在一定应变范围内  $\mu, m$  是常数, 因此  $K_0$  也是常数, 即电阻相对变化与应变成比例,  $K_0$  称为金属丝的灵敏系数。对于康铜,  $m \approx 1, K_0 \approx 2.0$ ,  $\frac{\Delta R}{R} = K_0\epsilon$ , 它表示应变-电阻效应, 电阻应变计就是利用这一效应制成的。制成的电阻应变计的灵敏系数  $K$  与金属丝的灵敏系数  $K_0$  有关, 但有差别, 因为应变计敏感栅是丝或箔的一定尺寸栅形, 另外包括粘结剂, 基底尺寸和性能及制造工艺的影响, 所以一般  $K \neq K_0$ , 当基底尺寸远大于敏感栅尺寸时, 应变计的灵敏系数  $K$  与丝(箔)材灵敏系数  $K_0$  之间关系可用下式表示:

$$K = K_0 \left[ 1 + \frac{4h}{ab} \frac{A}{L} (1 + \mu_b) \frac{E_s}{E_b} \right]$$

式中  $h$ ——基底和粘结剂层总厚度,  $b$ ——基底和粘结剂传递应变到敏感栅的过渡区有效宽度,  $a$ ——过渡区的长度,  $A$ ——敏感栅的丝栅截面积,  $L$ ——敏感栅栅长,  $\mu_b$ ——基底和粘结剂层的泊松比,  $E_b$ ——基底粘结剂层弹性模量,  $E_s$ ——敏感栅材料弹性模量。过渡区长度  $a$  和宽  $b$  可由试验得到, 它们随敏感栅弹性模量和厚度以及粘结剂厚度增加而增大, 随基底和粘结剂弹性模量泊松比增加而减小。

## 2.2 电阻应变计的各项工作特性

电阻应变计主要用于测量结构或机械部件应变和作为传感器中的敏感元件, 这两大用途对电阻应变计的工作特性要求有所不同, 电阻应变计的工作特性有很多项, 对于常温、中高温、低温不同工作温度使用的电阻应变计又有不同工作特性项目。下面先列出常温电阻应变计的工作特性项目(参考 GB/T 13992-92 电阻应变计国家标准)。

- (1) 灵敏系数( $K$ )
- (2) 电阻值( $R$ )
- (3) 横向效应系数( $H$ )
- (4) 零点漂移( $P$ )和蠕变( $\theta$ )
- (5) 机械滞后( $Z_j$ )
- (6) 应变极限( $\epsilon_{lim}$ )

- (7) 疲劳寿命( $N$ )
- (8) 热输出( $\epsilon_T$ )
- (9) 绝缘电阻( $R_m$ )
- (10) 灵敏系数随温度变化( $K_T$ )

其中最重要的工作特性为灵敏系数、横向效应系数和热输出。下面详细说明其含义及测定方法。

### 2.2.1 应变计的灵敏系数( $K$ )

这是指安装在被测试件上的应变计,在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化( $\Delta R/R$ )与由此单向应力引起的试件表面轴向应变  $\epsilon_x$  之比,即

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x} \quad (2-4)$$

$K$  为应变计灵敏系数,其大小主要取决于敏感栅材料,另外与敏感栅形状、尺寸和基底材料、工艺有关,一般对一定形状尺寸的应变计,每批的灵敏系数不全相等。

由于应变计安装后,通常不能取下再用,因此只能采用抽样方法,在专门的灵敏系数检定装置上实验测定每批电阻应变计的灵敏系数,将抽样检定得到的  $K$  的平均值及其标准误差,作为表征该批应变计的灵敏系数特性。

#### 1. 灵敏系数检定装置

将应变计安装在单向应力状态的试件上,单向应力状态的试件有拉伸试件和弯曲梁两种,由于拉伸试件容易偏心造成应力分布不均匀,又需加很大荷载才能实现约  $1000\mu\text{m}/\text{m}$  的应变,而弯曲梁不需加很大荷载又可在较大面积区域内形成均匀应变分布,可安装相当数量的应变计检定灵敏系数,因此常用弯曲梁作为灵敏系数检定装置,其中又有三种具体型式:(1) 等应力悬臂梁,(2) 纯弯曲梁,(3) 刚架梁,其示意图如图 2-2 所示。采用三点挠度计测量等应力悬臂梁和纯弯曲梁受弯后的挠度  $f$ ,由挠度按下式计算梁表面应变  $\epsilon$ 。

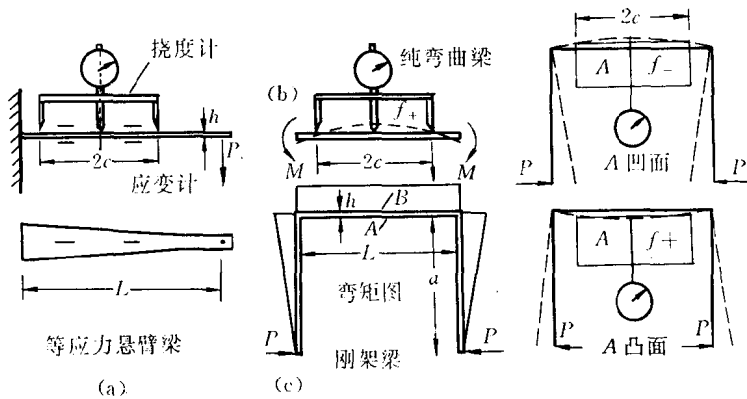


图 2-2 等应力悬臂梁、纯弯曲梁和刚架梁示意图

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{f_+} &= h \left/ \left( \frac{c^2}{f_+} + f_+ - h - \frac{1}{3}\mu h \right) \right. \\ \epsilon_{f_-} &= h \left/ \left( \frac{c^2}{f_-} - f_- + h + \frac{1}{3}\mu h \right) \right. \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

式中,  $\epsilon_{f_+}$ ——当梁上表面受拉时,梁表面机械应变;  
 $\epsilon_{f_-}$ ——当梁上表面受压时,梁表面机械应变;  
 $c$ ——挠度计中点至支点间的距离,即  $2c$ —挠度计跨度;  
 $f_+$ ——当梁上表面受拉时,挠度计中点挠度;  
 $f_-$ ——当梁下表面受压时,挠度计中点挠度;  
 $h$ ——检定梁的厚度;  
 $\mu$ ——检定梁材料泊松比。

计算梁表面应变的近似公式为

$$\epsilon = hf/c^2 \quad (2-6)$$

式中  $\epsilon$  和  $f$  分别为梁表面应变和挠度计中点挠度。

对于刚架梁装置,根据挠度计测得梁中点挠度,计算梁表面应变的公式为:

当梁的  $A$  面受压、 $B$  面受拉时:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{jA_-} &= \left( 1 + \frac{h}{6a} \right) h / \left( \frac{c^2}{f_-} + f_- + h + \frac{1}{3} \mu h \right) \\ \epsilon_{jB_+} &= \left( 1 - \frac{h}{6a} \right) h / \left( \frac{c^2}{f_-} + f_- - h - \frac{1}{3} \mu h \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

当梁  $A$  面受拉、 $B$  面受压时:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{jA_+} &= \left( 1 + \frac{h}{6a} \right) h / \left( \frac{c^2}{f_+} + f_+ - h - \frac{1}{3} \mu h \right) \\ \epsilon_{jB_-} &= \left( 1 - \frac{h}{6a} \right) h / \left( \frac{c^2}{f_+} + f_+ + h + \frac{1}{3} \mu h \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

式中  $\epsilon_{jA_+}$  和  $\epsilon_{jA_-}$ ——梁的  $A$  面受拉和受压时,  $A$  面表面应变,

$\epsilon_{jB_+}$  和  $\epsilon_{jB_-}$ ——梁的  $B$  面受拉和受压时,  $B$  面表面应变。

各检定装置中以刚架梁检定精度最高,后面将指出  $A$  级精度的应变计应用刚架梁装置检定灵敏系数。

## 2. 检定方法及灵敏系数计算

将抽样检定的应变计分为数量相近的两部分,分别安装在梁工作段的受拉和受压表面,要求应变计轴线与梁表面应力方向平行。使梁预加载三次,每次使梁表面产生  $\sim \pm 1100 \mu\text{m/m}$  的应变,然后正式检定加载于梁  $0 \sim \pm 1000 \mu\text{m/m}$  三次,同时测量梁中点挠度和各应变计的指示应变。每个应变计的灵敏系数  $K_i$  为:

$$K_i = \left( \left| \frac{\Delta R_+}{R} \right| + \left| \frac{\Delta R_-}{R} \right| \right) / (|\epsilon_+| + |\epsilon_-|) \quad (2-9)$$

式中  $\left| \frac{\Delta R_+}{R} \right|$  和  $\left| \frac{\Delta R_-}{R} \right|$  分别为同一应变计受拉和受压时,加载和卸载时,电阻相对变化差值之三次平均值的绝对值。 $|\epsilon_+|$  和  $|\epsilon_-|$  分别为同一应变计受拉和受压时,梁表面的机械应变,如采用电阻应变仪 ( $K_{\text{仪}} = 2.00$ ) 测量应变计的指示应变  $\epsilon_{\text{仪}}$ , 则有:

$$\left| \frac{\Delta R_{\pm}}{R} \right| = 2.00 \times |\epsilon_{\text{仪}\pm}|$$

若应变计只受拉或只受压,单个应变计的  $K_i$  为

$$K_i = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon = (2.00 \times \epsilon_{\text{仪}}) / \epsilon \quad (2-10)$$



设被检定应变计的平均灵敏系数为  $\bar{K}$ , 则

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n K_i / n \quad (2-11)$$

式中:  $n$ ——被检定应变计的个数(即样本大小)。

应变计灵敏系数的分散用  $t\sigma$  表示,  $t$  是  $t$  分布的置信系数(置信度 95%),  $t$  与  $n$  有关, 其数值见表 2-3。  $\sigma$  为灵敏系数相对标准偏差, 有

$$\sigma = \frac{s}{\bar{K}} \times 100\%, \quad s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / (n - 1)} \quad (2-12)$$

$s$  为标准偏差。一般应变计灵敏系数分散为 1%~3%。

应变计包装盒上都标明该批应变计:  $K$  及其分散, 例如  $2.18 \pm 1\%$ 。

表 2-3  $t$  分布的置信系数  $t$  数值表

$n$	$t$	$n$	$t$	$n$	$t$	$n$	$t$
6	2.57	13	2.18	20	2.09	27	2.06
7	2.45	14	2.16	21	2.09	28	2.05
8	2.36	15	2.14	22	2.08	29	2.05
9	2.31	16	2.13	23	2.07	30	2.04
10	2.26	17	2.12	24	2.07	35	2.03
11	2.23	18	2.11	25	2.06	40	2.02
12	2.20	19	2.10	26	2.06	60	2.00

### 2.2.2 横向效应系数( $H$ )

这是指应变计横向灵敏系数  $K_B$  与纵向灵敏系数  $K_L$  之比值, 即  $H = \frac{K_B}{K_L} \times 100\%$ , 用百分数表示。横向效应系数  $H$  与应变计材料、敏感栅形状尺寸及工艺有关,  $H$  值一般由专门检定装置抽样检定。检定横向效应系数的装置原理上有两种, 一种是用单向应变标定梁装置, 见图 2-3 所示; 另一种是检定灵敏系数的装置, 为单向应力标定梁。

用单向应变标定梁装置时, 在梁表面上造成只有纵向应变  $\epsilon_L$ , 而横向应变  $\epsilon_B = 0$ , 将两枚应变计分别粘贴在单向应变方向和无应变方向, 则由图 2-4 所示, 可列出两应变计的电阻相对变化  $\frac{\Delta R_L}{R}$  和  $\frac{\Delta R_B}{R}$  如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta R_L}{R} &= K_L \epsilon_L + K_B \epsilon_B = K_L \epsilon_L = K_{\text{仪}} \epsilon_{\text{仪}L} \\ \frac{\Delta R_B}{R} &= K_B \epsilon_L + K_L \epsilon_B = K_B \epsilon_L = K_{\text{仪}} \epsilon_{\text{仪}B} \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

则有 
$$H = \frac{K_B}{K_L} = \frac{\epsilon_{\text{仪}B}}{\epsilon_{\text{仪}L}} \times 100\% \quad (2-14)$$

式中  $\epsilon_{\text{仪}B}$ ——横向粘贴的应变计指示应变;

$\epsilon_{\text{仪}L}$ ——纵向粘贴的应变计指示应变;