

# 应变电测原理及技术

吴宗岱 陶宝祺 主编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书是由编写者以多年的教学和科研实践为基础，参阅了国内外大量文献资料编写而成。书中系统地阐述了应变电测技术中所用的电阻应变片、传感器、测试仪器、测试方法、数据处理和误差分析的基本原理及应用，并介绍了这一技术领域的最新成果。结构严谨、论理清晰、内容丰富新颖、实用性强是本书的特点。

本书可作为工厂与研究单位的测试技术人员及大专院校有关师生的参考书，也可作为大专院校有关专业的教科书。

### 应变电测原理及技术

暴崇岱 陶宝祺 主编

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 22<sup>5</sup>/<sub>8</sub> 582 千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷 印数：0,001—7,200册

统一书号：15034·2378 定价：2.80元

## 目 录

绪论	1
第一章 电阻应变片的工作原理和工作特性	4
§ 1-1 电阻应变片的工作原理和构造	4
§ 1-2 电阻应变片的分类	9
§ 1-3 电阻应变片的工作特性	16
§ 1-4 电阻应变片工作特性的标定	34
第二章 电阻应变片的敏感栅、粘结剂和基底	42
§ 2-1 电阻应变片的敏感栅	42
§ 2-2 电阻应变片的粘结剂	45
§ 2-3 电阻应变片的基底	62
§ 2-4 电阻应变片的引线	63
§ 2-5 电阻应变片的盖层	65
第三章 半导体电阻应变片、特殊用途的应变片 及片式检测元件	66
§ 3-1 半导体电阻应变片	66
§ 3-2 双层式应变片、无基底式应变片和大应变应变片	85
§ 3-3 疲劳寿命片和裂纹扩展片	90
§ 3-4 测压片和测温片	97
第四章 电阻应变片的选择、安装与防护	102
§ 4-1 电阻应变片的选择	102
§ 4-2 电阻应变片的安装	108
§ 4-3 电阻应变片测量导线的焊接与固定	115
§ 4-4 电阻应变片安装后的防护	119
第五章 电阻应变仪	123
§ 5-1 概述	123
§ 5-2 电桥	126

§ 5-3	放大器	151
§ 5-4	振荡器	157
§ 5-5	相敏检波器	162
§ 5-6	直流电桥应变仪	170
§ 5-7	巡回检测设备简介	180
第六章	应变测量记录仪器	189
§ 6-1	磁带记录器	190
§ 6-2	光线示波器	215
第七章	应变-应力换算关系	236
§ 7-1	线性应变-应力换算关系	236
§ 7-2	粘贴应变片方位偏差对测量精度的影响	259
§ 7-3	横向效应的修正	266
§ 7-4	应力片	269
§ 7-5	正交异性材料的应变-应力换算关系	275
§ 7-6	塑性变形下的应变-应力换算关系及卸载后 确定残余应力的方法	283
第八章	测量电桥的应用和传感器	292
§ 8-1	测量电桥的应用	292
§ 8-2	应变片式传感器	304
§ 8-3	载荷的测量	348
第九章	常温静态应变测量	378
§ 9-1	长导线多点应变测量	378
§ 9-2	确定布片方案的原则和测量举例	394
§ 9-3	常温静态应变测量举例	399
第十章	动态应变测量	407
§ 10-1	动应变的类型和测量特点	407
§ 10-2	干扰和防干扰措施	415
§ 10-3	动态应变测量中的数据分析方法	422
第十一章	非常温环境下的应变测量	448
§ 11-1	非常温环境下应变测量的特点	448
§ 11-2	温度补偿	449
§ 11-3	非常温环境下应变测量的技术问题	465

§ 11-4	应变测量值的修正	469
<b>第十二章</b>	<b>旋转件的应变测量</b>	<b>471</b>
§ 12-1	接触式引电器	473
§ 12-2	非接触式引电器	494
§ 12-3	旋转件应变测量中的有关技术问题	499
<b>第十三章</b>	<b>应变遥测</b>	<b>511</b>
§ 13-1	单通道应变遥测系统	511
§ 13-2	多路传输的应变遥测系统	526
§ 13-3	应变遥测技术中的几个问题	558
<b>第十四章</b>	<b>高压液下应变测量</b>	<b>563</b>
§ 14-1	高压液下应变测量的特点	563
§ 14-2	应变片及导线的防护	564
§ 14-3	密封头的构造	566
§ 14-4	应变片的压力效应	571
§ 14-5	高压液下应变测量时的补偿方法	580
§ 14-6	高压液下应变测量举例	583
§ 14-7	中温中压液下应变测量	590
<b>第十五章</b>	<b>残余应力及其它物理量的测量</b>	<b>594</b>
§ 15-1	残余应力的测量	594
§ 15-2	高应变梯度区域的应变测量方法	646
§ 15-3	线膨胀系数及弹性模量随温度变化的测量方法	651
<b>第十六章</b>	<b>实验误差及数据处理</b>	<b>655</b>
§ 16-1	误差的基本概念	655
§ 16-2	函数的误差	669
§ 16-3	回归分析	675
§ 16-4	数据处理中的某些问题	688

## 绪 论

机器零构件的设计，首先应根据载荷和使用条件进行理论计算，但理论计算的结果往往需要通过实验应力分析进行验证；此外，许多构件的形状和受力状态比较复杂，理论分析有时很困难，甚至得不到正确的结果，只有借助实验应力分析的方法才能解决。

目前已有十余种实验应力分析方法，如应变片电测法、光弹性法、脆性涂层法、云纹法、激光全息摄影法、声发射法、红外线法、单束激光散斑干涉法等，其中应变片电测法是使用最广泛的一种。

用电阻应变片测量应变的大致过程如下：将作为检测元件的电阻应变片粘贴或安装在被测试的构件表面上，然后接入测量线路（电桥或电位计式线路），随着构件受力变形，应变片的敏感栅也获得相应的变形，从而使其电阻发生变化。此电阻变化与构件表面的应变成比例，测量线路产生的输出信号经放大线路放大后，由指示仪表或记录仪器指示或记录。这是一种将机械量转换为电量的方法，其转换过程如图 1 所示。测量线路的输出信号经放大后也可以直接输入电子计算机进行数据处理。

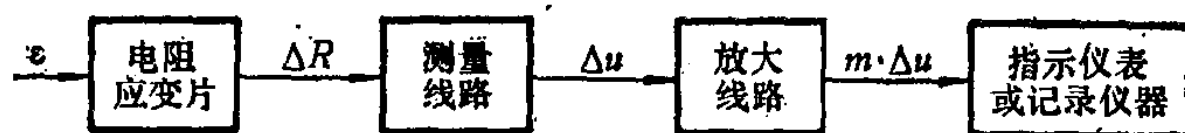


图 1 用电阻应变片测量应变的过程

应变片电测技术所以得到广泛应用，是因为它具有下列优点：

1) 电阻应变片的尺寸小、重量轻。它粘贴在构件表面上对构件的工作状态和应力分布影响很小，能够较好地测出应变；也可以利用几个应变片组成应变花测量并计算出复杂应力状态下某

1110461

点处主应力的方向和大小。

2) 测量范围广。一般能测量几十到数千微应变,用高精度、高稳定性的测量系统和半导体应变片可以测出  $10^{-2}$  量级的微应变,用大应变的应变片可以测量的应变达 20%。不但能测量静载荷下的应变,也可以测量频率范围为 0~500 千赫的动态应变。

3) 用途广泛。可以直接测量应变和其他一些物理量,还可以制成测量各种物理量的传感器;可用于设计方案的比较、计量,也可用于生产过程的控制;可在试验室里使用,也可在各种现场条件下使用。

4) 与其他应变测量方法相比,测量精度较高。应变式传感器的精度可达 0.1% 以上。

5) 可以在各种比较复杂或恶劣的环境中进行测量:如从  $-270^{\circ}\text{C}$  (液氮温度) 的低温到  $+1000^{\circ}\text{C}$  的高温;从宇宙空间的真空状态到几千个大气压;长时间地浸没于水下;大的离心力和强烈振动;以及强磁场、放射性和化学腐蚀等。

6) 测量得到的为电信号,可以直接输入电子计算机进行数据处理,实现测试过程或控制过程的自动化。

但是,这种测试技术也有一些局限性,它较适于测量构件的表面应变,除了埋入式应变片之外,通常不能用于测量构件的内部应变。尽管应变片的栅长可以做得很小(目前最小为 0.2 毫米),但对应力梯度很大的测量仍不够精确。

当构件上的最大应力方位难以确定时,可先用脆性涂层法确定出最大应力的方位,然后用电阻应变片测量并计算出最大应力的数值,这样可以节约人力和费用。

1856 年汤姆逊 (W. Thomson) 发现了金属丝在机械应变作用下发生电阻变化的现象。1938 年左右西蒙斯 (E. Simmons) 与鲁奇 (A. Ruge) 创制出纸基丝绕式电阻应变片后,电阻应变片才开始用于应变测量,随后陆续出现了箔式应变片、半导体应变片、薄膜型应变片等。现在已有用于不同环境和条件的各种类型

的电阻应变片，应用范围仍在日益扩大。除用于测量材料的线膨胀系数及弹性模量随温度变化等物理量外，近年来还利用箔式应变片的制造技术生产出可以测量温度、压力、疲劳寿命、裂纹扩展情况的片式检测元件（即测温片、测压片、疲劳寿命片、裂纹扩展片等）。

电阻应变片已大量用于制造各种用途的传感器，目前用扩散法制造的各种小型高精度并用数字显示的半导体传感器系统已广泛用于航空、航天等工业、科学技术部门中。

应变测量仪器现在除了一般的静态、动态、静动态应变仪和记录仪器外，出现了数字式应变仪和大容量高速数据采集系统。为了适应高速旋转、振动及飞行状态等试验条件下的测试，发展了应变遥测技术。由于计算技术的飞速发展，电子计算机可以和应变测量系统直接或间接相连，对应变测量数据进行计算、分析、处理，或对测量系统进行控制，大大加快了测试速度并提高了精度，使应变片电测技术发展到一个新的阶段。

我国自 1955 年北京航空学院研制了丝绕式电阻应变片以来，许多单位已研制和生产了各种类型的电阻应变片、传感器、应变测试和记录设备以及数据采集系统，在科学研究和工业生产中已广泛应用这些元件和设备，应变片电测技术在我国有了很快的发展，但是和世界先进水平相比还有一定的差距，还不能满足实现四个现代化的要求。因此，有必要对这一技术领域进行深入学习和研究，对应变片电测技术进行大量推广和提高工作。我们相信经过大家的努力，我国的应变片电测技术一定能够得到更快的发展。



# 第一章 电阻应变片的工作原理和工作特性

## § 1-1 电阻应变片的工作原理和构造

为了说明电阻应变片的工作原理，先介绍一下金属导线的应变-电阻效应。

### 一、金属导线的应变-电阻效应

由物理学知道，金属导线的电阻值  $R$  与其长度  $L$  成正比，与其截面积  $A$  成反比，用公式表示为

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

式中的系数  $\rho$  是导线的电阻率。

如果金属导线沿其轴线方向受力而产生变形，则其电阻值也随之发生变化，这一物理现象被称为金属导线的应变-电阻效应。为了说明产生这一效应的原因，可将式 (1-1) 取对数进行微分得

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

式中的  $dL/L$  为金属导线长度的相对变化，用应变  $\varepsilon$  来表示：

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (1-3)$$

$dA/A$  为导线截面积的相对变化，对于圆形截面的导线，若其直径为  $D$ ，则

$$dA = d\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi}{2} D dD$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{\pi}{2} D dD \bigg/ \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{2dD}{D}$$

导线直径的相对变化  $dD/D = -\mu dL/L$  ( $\mu$  为导线材料的

泊桑比), 代入上式可得

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (1-4)$$

将式 (1-3) 和 (1-4) 分别代入式 (1-2)

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 看出, 金属导线受力变形后, 由于其几何尺寸和电阻率发生变化, 从而使其电阻发生变化。可以设想, 如果将一根直径较细的金属丝粘贴在工程构件的表面上, 利用金属丝的应变-电阻效应把构件表面的应变直接变换为电阻的相对变化量, 这样就可以用电测的方法进行应变测量。电阻应变片就是利用这一原理而制成的传感元件。

## 二、电阻应变片的构造

不同用途的电阻应变片, 其构造不完全相同, 但一般的应变片都具有敏感栅、引线、粘结剂、基底和盖层等主要部分, 其结构简图如图 1-1 所示。

**敏感栅** 是应变片中把应变直接变换成电阻变化量的敏感部分, 是用金属或半导体材料制成的单丝或栅状体。

敏感栅的形状与尺寸直接影响到应变片的性能。对于图 1-2

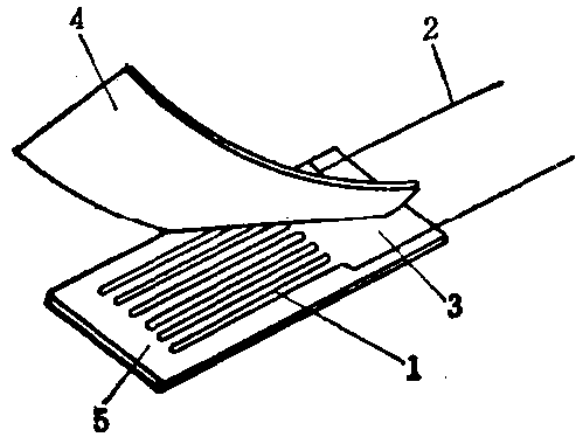


图1-1 应变片的构造

1—敏感栅; 2—引线; 3—粘结剂(未示出); 4—盖层; 5—基底。

所示的敏感栅, 其纵向中心线称为纵向轴线, 也是应变片的轴线。敏感栅的尺寸用栅长  $L$  和栅宽  $B$  来表示。栅长是指敏感栅在其纵轴方向的长度, 对于带有圆弧端的敏感栅, 该长度为两端圆弧内侧之间的距离, 对于带有直线形横栅的敏感栅, 则为两端横栅内侧之间的距离。在与纵轴垂直的方向上, 敏感栅外侧之间的距离

称为栅宽。栅长与栅宽代表应变片的标称尺寸。

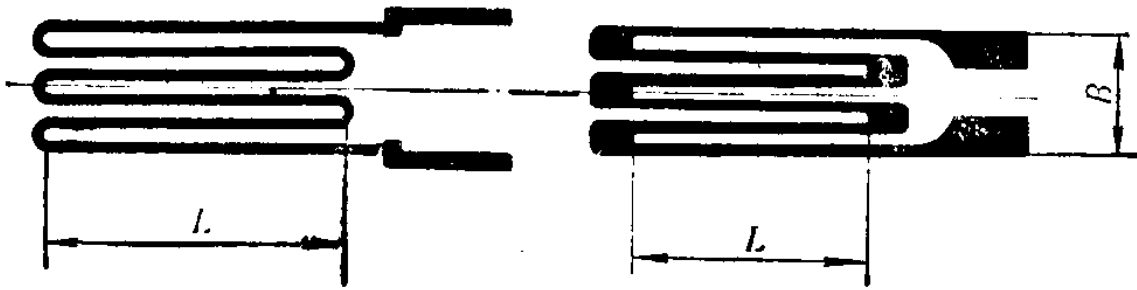


图1-2 敏感栅的尺寸

**引线** 用以从敏感栅引出电信号的丝状或带状的导线。

**基底** 用以保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置的部分。基底的尺寸通常代表应变片的外形尺寸。

**粘结剂** 是具有一定电绝缘性能的粘结材料，用它将敏感栅固定在基底上，或者将应变片的基底固定在被测试件的表面上。

**盖层** 用来保护敏感栅而覆盖在上面的绝缘层，有的应变片没有盖层。

### 三、金属导线的灵敏系数

采用金属导线作为应变片敏感栅的材料时，被测构件的应变传递到敏感栅之后，金属导线的电阻发生变化，导线电阻的相对变化量与其所承受的应变直接有关，将式(1-5)改写一下就可以得出它们之间的关系为

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (1-6)$$

即

$$K_s = \frac{dR}{R} / \varepsilon = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon \quad (1-7)$$

$K_s$  称为金属导线的灵敏系数，它表示金属导线对所承受的应变量的灵敏程度。可以看出，这一系数不仅与导线材料的泊桑比有关，并且与导线变形后电阻率的相对变化有关。

金属材料的变形在弹性区时，泊桑比  $\mu = 0.2 \sim 0.4$ ，在塑性区时  $\mu \approx 0.5$ 。假如导线变形后其电阻率不发生变化，则各种金属

导线的灵敏系数  $K_s = 1.4 \sim 1.8$  (弹性区) 或  $K_s \approx 2.0$  (塑性区)。但是, 从表 1-1 所列的数据可以看到, 根据实测所得的几种丝材的灵敏系数一般均超过 2.0, 这说明金属导线变形后其电阻率发生了变化。

表1-1 几种金属丝的实测灵敏系数

材 料	主 要 成 分	灵 敏 系 数			
		硬 态		软 态	
		小应变	大应变	小应变	大应变
康铜	(50~60)Cu, (50~40)Ni	2.2	2.1	2.2	2.2
镍铬	80Ni, 20Cr	2.4	1.9	—	—
镍	Ni	负值	2.7	负值	2.3
碳钢	99.5Fe, 0.5C	3.9	2.4	3.7	2.1
镍铬铁		2.6	2.3	2.5	1.8
铂铱	90Pt, 10Ir	4.8	2.1	3.9	1.9
铂铑	90Pt, 10Rh	5.5	2.4	5.1	2.0

我们希望金属导线电阻的相对变化与应变变量之间呈线性关系, 即各种导线的灵敏系数最好是常数。式 (1-7) 等号右侧第一项仅仅与材料的泊桑比有关, 在弹性变形范围内它是个常数, 若第二项也是常数, 上述要求就能满足。实验表明, 大多数金属导线在弹性范围内电阻的相对变化与应变变量之间的关系是线性的, 例如图 1-3 所示的康铜和镍铬的  $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$  曲线就是这样。随着应变量的继续增加, 多数导线的灵敏系数会逐渐变化, 只有康铜的灵敏系数能够一直到塑性区基本保持不变。由于康铜的这一

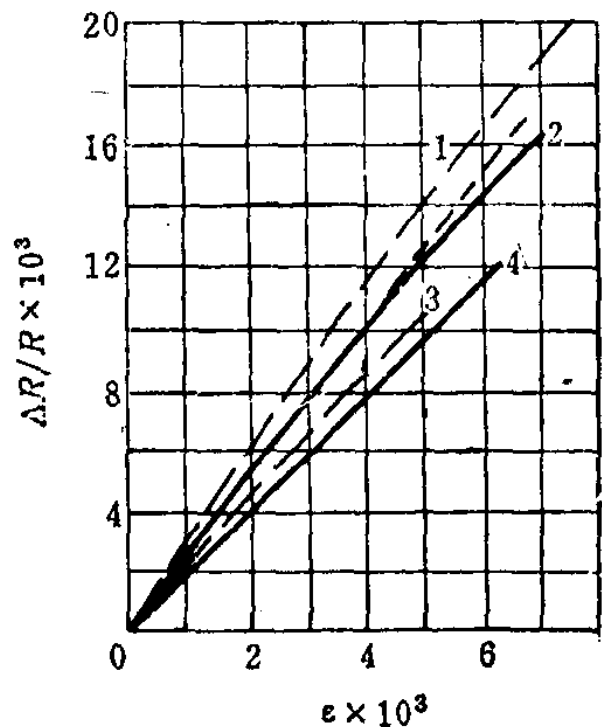


图1-3 康铜和镍铬的  $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$  曲线  
1—硬态镍铬; 2—软态镍铬; 3—硬态康铜; 4—软态康铜。

特点，通常都用它制造测量大应变的应变片。

#### 四、变形的传递

电阻应变片被粘贴在构件表面上，构件表面的变形通过基底和粘结剂传递给敏感栅，由于基底和粘结剂的弹性模量与敏感栅材料的弹性模量之间有差别等原因，构件表面的应变不能全部均匀地传递到敏感栅。有人曾对应变片粘贴于构件表面的模型做过试验，当构件表面的应变沿应变片轴线方向均匀分布时，应变片中基底和敏感栅的应变分布如图 1-4 所示。基底端部的应变  $\varepsilon_d$  和敏感栅端部的应变  $\varepsilon_s$  小于构件表面的应变  $\varepsilon_j$ （图中  $\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_j} < 1$ ， $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_j} < 1$ ），靠近敏感栅圆弧端的外侧，则由于应力集中而使应变  $\varepsilon_d$  局部增大（ $\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_j} > 1$ ），故在基底和敏感栅的端部分别产生了应变传递的过渡区  $a$  和  $b$ 。基底和粘结剂的弹性模量与敏感栅或构件材料的弹性模量相差愈甚，所产生的过渡区愈大。此外，过渡区  $a$  的大小还与基底及粘结剂的厚度  $\delta$  有关， $b$  的大小则与栅丝的直径  $D$ （或栅条的厚度）及其端部的结构有关，试验得出  $a \approx 2\delta$ ， $b \approx 10D$ 。

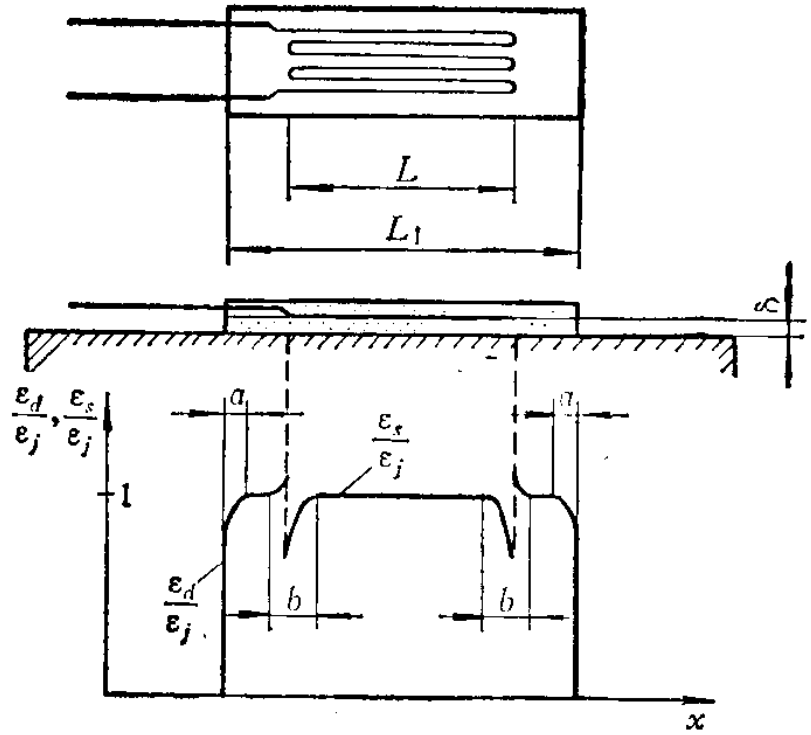


图1-4 变形的传递

应变  $\varepsilon_d$  和敏感栅端部的应变  $\varepsilon_s$  小于构件表面的应变  $\varepsilon_j$ （图中  $\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_j} < 1$ ， $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_j} < 1$ ），靠近敏感栅圆弧端的外侧，则由于应力集中而使应变  $\varepsilon_d$  局部增大（ $\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_j} > 1$ ），故在基底和敏感栅的端部分别产生了应变传递的过渡区  $a$  和  $b$ 。基底和粘结剂的弹性模量与敏感栅或构件材料的弹性模量相差愈甚，所产生的过渡区愈大。此外，过渡区  $a$  的大小还与基底及粘结剂的厚度  $\delta$  有关， $b$  的大小则与栅丝的直径  $D$ （或栅条的厚度）及其端部的结构有关，试验得出  $a \approx 2\delta$ ， $b \approx 10D$ 。

为了消除基底端部过渡区的影响，要求应变片基底的长度  $L_1$  至少要比栅长  $L$  大出  $2a$ 。敏感栅端部过渡区的影响无法避免，它使应变片的实际灵敏系数  $K$  一般均低于敏感栅的灵敏系数  $K_s$ 。当  $L_1 > L + 2a$  时， $K$  与  $K_s$  之间的关系可用下式表示

$$\frac{K}{K_s} = 1 / \left[ 1 + \frac{4\delta}{Zb} \cdot \frac{A}{L} (1 + \mu_a) \frac{E_s}{E_a} \right] \quad (1-8)$$

式中  $b$  ——过渡区的长度；  
 $Z$  ——过渡区的有效宽度 ( $Z \approx 7.5D$ )；  
 $\delta$  ——基底和粘结剂层的厚度；  
 $L$  ——栅长；  
 $A$  ——栅条的截面积；  
 $\mu_a$  ——基底和粘结剂的泊桑比；  
 $E_a$  ——基底和粘结剂的弹性模量；  
 $E_s$  ——敏感栅材料的弹性模量。

应变片的栅长愈短，过渡区  $b$  的影响就愈加显著。例如一般胶膜基的应变片，当厚度  $\delta$  约为 0.25 毫米，栅长  $L$  约为 13 毫米时， $K/K_s$  大约等于 0.985，两者相差不多。当栅长减少到 1.6 毫米时， $K/K_s$  则下降到 0.87，差别就很明显了。

## § 1-2 电阻应变片的分类

电阻应变片的分类方法很多，最常用的是按制造应变片时所用的材料、工作温度范围以及用途的不同来进行分类。

### 一、按应变片敏感栅的材料分类

由于敏感栅所用材料的不同，可以把应变片分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类，在金属电阻应变片中又分为金属丝式应变片、金属箔式应变片和金属薄膜应变片；在半导体应变片中则分为体型的、扩散型的和薄膜型的。半导体应变片和各种特殊用途的应变片将在第三章中叙述，本节只介绍各种金属电阻应变片的特点。

**金属丝式应变片** 是用直径为 0.015~0.05 毫米的金属丝作为敏感栅材料的应变片，一般简称为丝式应变片。目前这种应变片用得最多的有两种：丝绕式和短接式（图 1-5）。它们的区别

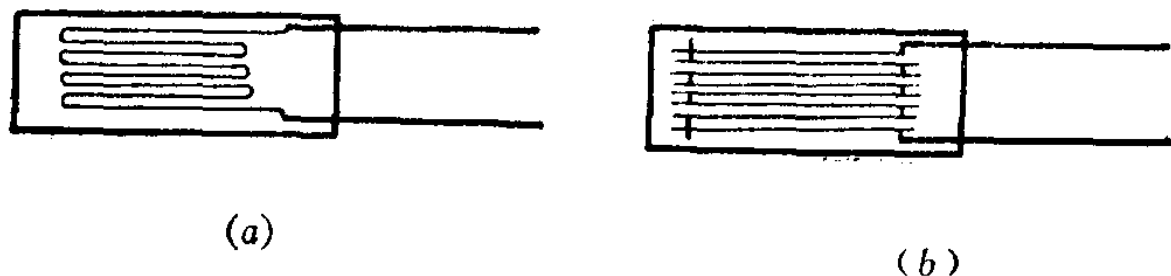


图1-5 丝绕式 (a) 和短接式 (b) 应变片

主要是敏感栅的形状和制造方法不同，前者是用一根金属丝在制栅机上绕制而成，敏感栅的端部呈圆弧形；后者则是用数根金属丝平行排列成纵栅，再用较粗的金属丝或箔带与纵栅的两端交错焊接形成横栅，所以它的端部是平直的。

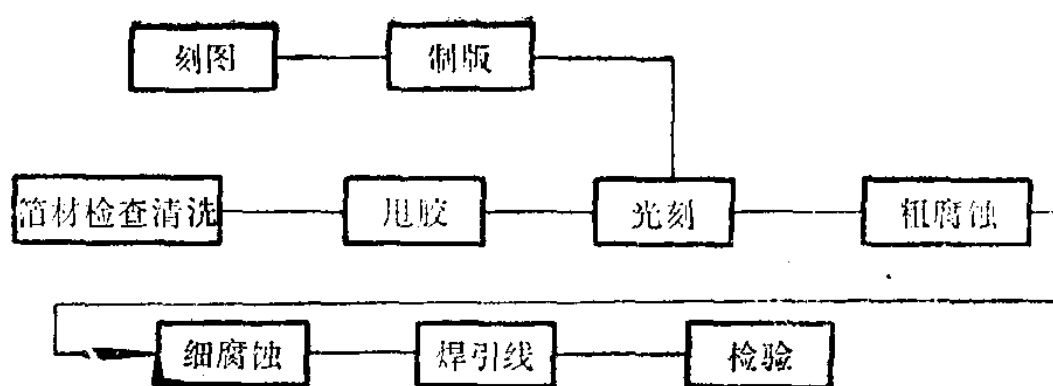
丝绕式应变片由于敏感栅的横向部分（端部）呈圆弧形，当被测构件表面存在着两个方向的应变时，应变片不仅感受到沿其轴线方向的应变，也同时感受到与轴线方向垂直的应变，这就是电阻应变片的横向效应。丝绕式应变片的横向效应较大，如测量精度要求较高，应当考虑到它的影响并进行修正。绕制敏感栅时，由于圆弧部分的形状不易保证，不仅增加制片工艺上的困难，也造成应变片性能的分散。

短接式应变片的敏感栅，其横向部分是平直而较粗的金属丝或箔带，这部分的电阻值很小，故其横向效应很小；加之在制造时敏感栅的形状比较容易保证，所以使用短接式应变片能够得到较高的测量精度。这种应变片的缺点是敏感栅中的焊点较多，承受动应变时容易在焊点处损坏，致使应变片的疲劳寿命较低，不宜用于长时间的动应力测量。

**金属箔式应变片** 这种应变片是用厚度为  $0.002\sim 0.005$  毫米的金属箔作为敏感栅的材料，简称为箔式应变片。

箔式应变片的制造方法与丝式的完全不同，最初是沿用制作印刷线路的方法，成品率和质量都比较低，现在普遍采用制造半导体器件的工艺，不仅大大提高了产品质量和成品率，并且使制造栅长在 1 毫米以下的小标距应变片成为可能。

制造箔式应变片的大致工艺过程如下：



箔式应变片由于制造工艺上的方便条件，可以依照测量对象的要求制成任意图形的敏感栅，易于制造小标距应变片、各种形式的应变花以及用于传感器的特殊形状的应变片，图 1-6 示出几种比较典型的应变片。

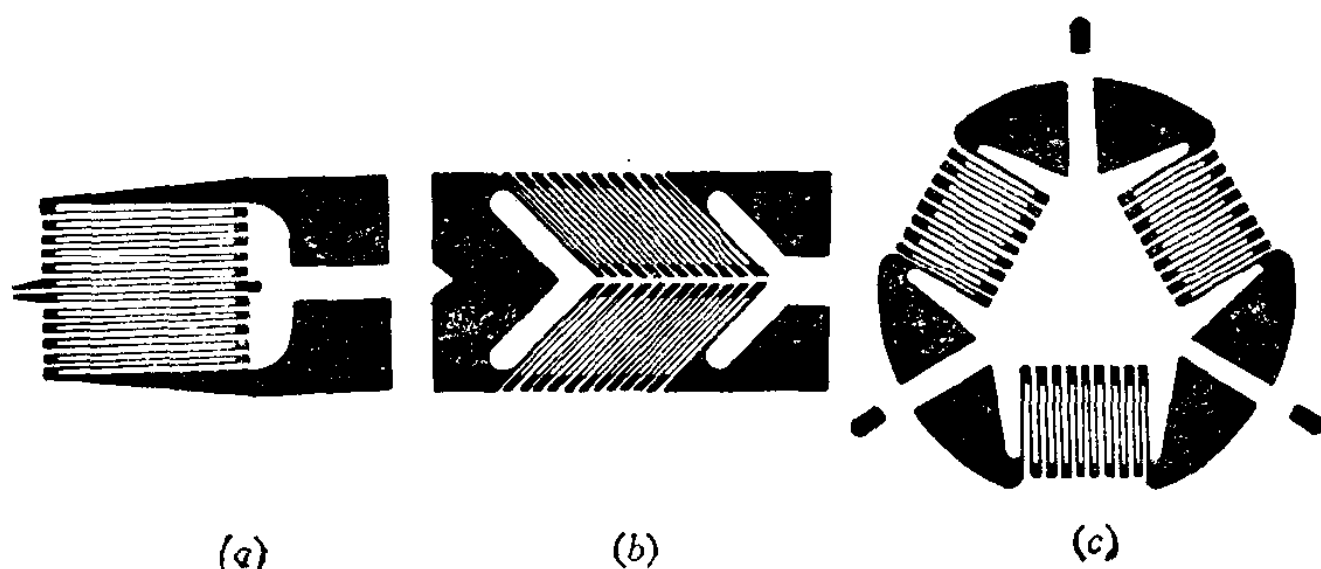


图1-6 箔式应变片

(a) 单轴的；(b) 测扭矩的；(c) 多轴的（应变花）。

箔式应变片敏感栅的横向部分可以做成比较宽的栅条，所以它的横向效应比丝绕式应变片要小。箔栅的厚度很小，能较好地反映构件表面的变形，也易于粘贴在弯曲的表面上。箔式应变片的蠕变小，疲劳寿命长，在截面积相同的情况下，栅条比栅丝的散热条件好得多，允许通过较大的工作电流，可提高测量灵敏度。制造箔式应变片不需要复杂的机械设备，便于实现工艺过程自动化，这对于提高劳动生产率和减轻工人的视力疲劳是很有利的条件。由于箔式应变片具有以上多方面的优点，已经在许多场合取



代了丝式应变片，得到广泛的应用。

前面谈到，在敏感栅端部存在着应变传递过渡区的影响，距端部愈远，影响就愈小。从减少端部影响考虑，也要求箔式应变片的横向部分做成比较宽的栅条，使敏感栅的端部加长。然而，加宽后的横栅与纵栅的宽度相差甚大，宽度的急剧变化会使端部的应力集中现象更加严重。为了解决这个矛盾，近来出现一种端部为框形结构的敏感栅（图 1-7），其横栅为矩形的框，框边的宽度与纵栅相同。这种结构既可减少端部影响，又不致加剧应力集中，因而可以适当提高应变片的灵敏系数，并大大减少灵敏系数的分散和蠕变，对于栅长在 1 毫米以下的应变片，其效果尤为显著。

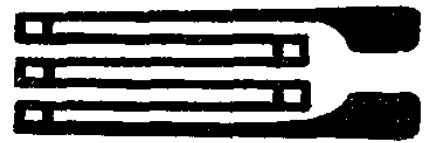


图1-7 框形端部的敏感栅

**金属薄膜应变片** 这种应变片是用真空蒸镀、沉积或溅射的方法，将金属材料在绝缘基底上制成一定形状的薄膜而形成敏感栅。膜的厚度从几埃（ $\text{\AA}$ ）至几千埃不等，当膜的厚度很小时，薄膜实际上是由无数彼此不相连的微小膜片所组成，称为不连续膜；随着膜厚的增加，膜片之间逐渐连接而形成整体，称为连续膜。

不连续膜的电传导是基于膜片之间的电子隧道效应，具有较高的电阻率，类似于半导体的特性，其应变灵敏系数比丝式或箔式应变片高一个或两个数量级。连续膜的电传导特性则与整体金属相同，其应变灵敏系数与一般的箔式应变片相近。

制造箔式应变片的敏感栅需要经过腐蚀工序，无法采用那些耐腐蚀的高温金属材料，而金属薄膜应变片却不受此限制，可以制成高温应变片。例如，采用铂或铬等材料沉积在蓝宝石薄片或覆有陶瓷绝缘层的钼条上，膜层上再覆上一层一氧化硅的保护膜。基底为钼条的薄膜应变片最高工作温度为  $600^{\circ}\text{C}$ ，用蓝宝石薄片为基底的工作温度可达  $800^{\circ}\text{C}$  以上。

制造金属薄膜应变片，目前还不能很好地控制膜层性能的一