

机械量电测技术

成述长 主编

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书简明扼要地概括了测试技术的主要内容——传感器及其测量电路、记录仪器和测试系统、信号分析与数据处理。

全书包括：电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、电压式传感器、热电式传感器、其它传感器、测试系统的基本特性、记录仪器、动态测试系统、测试系统的标定、重复测量数据的处理、动态信号分析和随机数据处理等十三章。

本书可作为工科院校机械类专业“测试技术”课程的试用教材，亦可供有关专业的工程技术人员参考。

1981.10 印



前 言

本书是根据工科院校机械类专业对测试技术知识的基本要求编写的。书中主要介绍机械量电测法的基础知识。全书共分三篇（十三章）：第一篇为传感器及其测量电路，第二篇为记录仪器和测试系统，第三篇为信号分析与数据处理。为了便于初学者学习，在内容的编排上尽量遵循由浅入深、循序渐进的规律。

本书可作为工科院校机械类专业“测试技术”课的试用教材，也可供机械工程专业的技术人员参考。

本书由洛阳工学院成述长主编。参加编写的有成述长（绪论、一、二、八、九、十一、十二、十三章）、李孟源（三、四、五、六章）、徐国富（七、十章）、郭永宏（十二、十三章）、郭爱芳（习题）等。全书由华中理工大学黄日怀副教授主审。参加审稿的还有黄南民、穆乐民同志。

洛阳工学院测试技术教研室其他同志对本书的编写曾提出了不少宝贵意见；许多兄弟院校、工厂、研究所的同志们对本书的编写也给予了帮助和支持。在此，谨向他们表示衷心感谢。

由于编者的实际经验和理论水平有限，加之时间仓促，书中错误和欠妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者 1989年4月

目 录

绪论.....	(1)
第一篇 传感器及其测量电路.....	(3)
第一章 电阻式传感器.....	(4)
§ 1—1 变阻器式传感器.....	(4)
§ 1—2 电阻应变片.....	(5)
一、金属应变片.....	(5)
二、半导体应变片.....	(10)
§ 1—3 电桥.....	(10)
一、电桥的工作原理.....	(11)
二、电桥的特性.....	(12)
三、交流电桥的特点.....	(16)
§ 1—4 电阻应变仪.....	(17)
一、应变仪的组成.....	(18)
二、应变仪电桥的平衡装置.....	(18)
三、交流电桥的调幅作用.....	(18)
四、相敏检波器.....	(20)
§ 1—5 应变式传感器.....	(22)
一、应变式力传感器.....	(22)
二、应变式压力传感器.....	(23)
三、应变式加速度传感器.....	(23)
四、应变式扭矩传感器.....	(23)
第二章 电容式传感器.....	(25)
§ 2—1 电容式传感器的变换原理及类型.....	(25)
一、变换原理.....	(25)
二、电容式传感器的类型.....	(25)
§ 2—2 测量电路.....	(29)
一、调幅电路.....	(29)
二、调频电路.....	(29)
三、运算放大器电路.....	(30)
§ 2—3 电容式传感器的应用.....	(30)
第三章 电感式传感器.....	(33)
§ 3—1 自感式传感器.....	(33)
一、改变气隙厚度的电感传感器.....	(33)
二、螺管式传感器.....	(34)
三、测量电路.....	(35)
四、自感式传感器的应用.....	(36)

§ 3-2 差动变压器式传感器.....	(37)
一、结构和工作原理.....	(37)
二、测量电路.....	(38)
三、应用.....	(38)
§ 3-3 电涡流传感器.....	(39)
一、基本原理.....	(39)
二、测量电路.....	(39)
三、被测物体对传感器灵敏度的影响.....	(40)
四、低频电涡流测厚仪.....	(40)
五、涡流传感器的应用.....	(41)
§ 3-4 压磁式传感器.....	(42)
第四章 压电式传感器.....	(44)
§ 4-1 压电效应.....	(44)
一、压电机理.....	(44)
二、正压电效应.....	(44)
§ 4-2 常用压电传感器.....	(45)
一、压电晶体片的组合.....	(45)
二、压电力传感器.....	(46)
§ 4-3 压电式传感器对测量电路的要求.....	(47)
一、电压放大器.....	(48)
二、电荷放大器.....	(49)
§ 4-4 压电传感器的应用.....	(49)
一、压电传感器的使用.....	(49)
二、压电传感器的安装.....	(50)
第五章 热电式传感器.....	(51)
§ 5-1 热电偶.....	(51)
一、热电偶的基本原理.....	(51)
二、热电偶的材料.....	(52)
三、热电偶冷端的温度处理.....	(53)
四、热电势的测定方法.....	(54)
五、热电偶的应用实例.....	(55)
§ 5-2 热电阻.....	(56)
一、常用热电阻.....	(56)
二、热电阻与显示仪表的连接.....	(57)
§ 5-3 热敏电阻.....	(57)
第六章 其它传感器.....	(59)
§ 6-1 霍尔式传感器.....	(59)
一、霍尔效应.....	(59)
二、霍尔元件及其基本电路.....	(59)
三、霍尔元件的应用.....	(59)
§ 6-2 光电传感器.....	(61)

一、光电效应.....	(61)
二、光电传感器的应用.....	(63)
§ 6—3 磁电式传感器.....	(64)
一、基本工作原理和结构.....	(64)
二、磁电式传感器.....	(65)
三、磁电式传感器的测量电路.....	(66)
§ 6—4 光栅传感器.....	(66)
一、莫尔条纹.....	(66)
二、光栅传感器的结构原理.....	(67)
三、分度值的细分.....	(67)
§ 6—5 感应同步器.....	(68)
一、结构和工作原理.....	(68)
二、感应同步器的类型.....	(69)
三、输出信号的处理.....	(70)
四、感应同步器的应用.....	(72)
§ 6—6 频率式传感器.....	(72)
一、薄壁谐振传感器.....	(72)
二、振弦式传感器.....	(73)
习题.....	(75)
第二篇 记录仪器和测试系统.....	(77)
第七章 测试系统的基本特性.....	(77)
§ 7—1 测试系统的静态特性.....	(77)
一、测试系统的质量指标.....	(77)
二、测试系统的静态特性.....	(78)
三、静态特性参数的测定与计算.....	(80)
§ 7—2 测试系统的动态特性.....	(80)
一、常系数线性系统.....	(81)
二、测试系统的传递函数.....	(82)
三、频率响应函数.....	(86)
四、测试系统的瞬态响应.....	(89)
五、测试系统动态特性参数的测定.....	(93)
六、线性系统不失真测试的条件.....	(96)
第八章 记录仪器.....	(99)
§ 8—1 笔式记录仪.....	(99)
§ 8—2 光线示波器.....	(100)
一、光线示波器的结构.....	(100)
二、振动子的类型.....	(101)
三、振动子的基本特征.....	(102)
四、振动子的阻尼.....	(106)
五、振动子的选用.....	(106)
§ 8—3 自动平衡式记录仪.....	(109)

§ 8-4 磁带记录仪	(110)
一、磁带记录仪的结构	(110)
二、磁带记录仪的工作原理	(110)
三、磁带记录仪的记录方式	(112)
四、磁带记录仪的技术特性	(114)
五、磁带记录仪的特点	(115)
六、磁带记录仪的使用	(116)
第九章 动态测试系统	(118)
§ 9-1 阻抗匹配	(118)
一、传感器和放大器的阻抗匹配	(118)
二、放大器和记录仪器的阻抗匹配	(118)
§ 9-2 动态应变测量系统	(119)
§ 9-3 振动测量系统	(120)
一、振动强度的测量系统	(120)
二、振动量频谱分析系统	(121)
第十章 测试系统的标定	(124)
§ 10-1 测试系统的静态标定	(124)
一、静态标定方法	(124)
二、应力应变的静态标定方法	(124)
三、拉(压)力的静态标定方法	(126)
四、扭矩的静态标定方法	(128)
§ 10-2 测试系统的动态标定	(130)
一、动态特性的标定	(130)
二、力传感器的动态标定	(130)
习题	(132)
第三篇 信号分析与数据处理	(134)
第十一章 重复测量数据的处理	(135)
§ 11-1 测量数据误差分析	(135)
一、误差分类	(135)
二、随机误差的分布规律	(136)
三、算术平均值和标准误差	(137)
四、间接测量误差的计算	(139)
§ 11-2 可疑数据的取舍	(140)
一、 3σ 准则	(140)
二、格拉布斯准则	(140)
§ 11-3 测量结果的表示	(142)
§ 11-4 实验数据表示法	(143)
一、图示法	(143)
二、公式法	(144)
第十二章 动态信号分析	(153)

§ 12—1 周期信号	(159)
一、周期信号的定义	(159)
二、傅里叶级数	(158)
三、周期信号的频谱	(154)
四、奇、偶函数的傅里叶系数	(156)
五、复数形式的傅里叶级数	(158)
§ 12—2 非周期信号	(161)
一、准周期信号及瞬变信号	(161)
二、傅里叶积分	(162)
三、傅里叶变换与非周期信号的频谱	(163)
四、傅里叶变换的性质	(166)
五、单位脉冲函数及其性质	(169)
§ 12—3 随机信号	(172)
一、基本概念	(172)
二、各态历经随机过程的统计参数	(178)
第十三章 随机数据处理	(182)
§ 13—1 随机数据处理的一般步骤	(182)
一、数据准备	(182)
二、数据检验	(182)
三、数据分析	(183)
§ 13—2 随机数据的模拟式处理	(183)
一、均值和均方值	(183)
二、概率密度函数	(184)
三、自相关函数	(184)
四、互相关函数	(185)
五、功率谱密度函数	(185)
六、功率谱测量参数的选择	(186)
七、缩短功率谱分析时间的途径	(190)
八、互谱密度函数	(191)
§ 13—3 随机数据的数字式处理	(192)
一、数据的数字化	(192)
二、离散傅里叶变换 (DFT)	(193)
三、数字式分析处理中的若干问题	(195)
四、快速傅里叶变换 (FFT)	(198)
五、功率谱密度函数和互谱密度函数	(199)
习题	(203)
主要参考文献	(203)

绪 论

测试是通过试验、测量和数据处理等基本环节,从被测对象获取有用信息的手段,是人们认识事物的重要方法之一。测试技术的水平,直接影响着科学技术发展的速度和深度。历来,许多新的发明创造都是与测试技术的发展分不开的,甚至科学技术上的某些突破往往也是以某一测试方法的突破为基础的。在生产过程中,为了保证正常、高效率的生产,也要采用一定的测试手段对产品的生产过程进行检查或监视。可见,在各个科学技术部门中都离不开测试技术。

在机械制造工业中,需要测量的物理量是很多的。诸如力、力矩、压力、位移、速度、加速度、转速等都属于物理量,习惯上把这些量统称为机械量。对于机械量的测量,可采取多种不同的测量方法,如机械测量法、光测法、电测法等。这些测量方法在实际测试工作中都可能遇到。根据课程的分工,本书仅介绍电测法。

电测法是目前应用较广泛的一种测量方法,它具有如下优点:

1. 测量精度高,适用范围广;
2. 能实现远距离测量;
3. 便于实现测量、记录和数据处理的自动化。

在现代科学技术中,对测试的要求已由静态测量发展为动态测量。在动态测量中,电测法更显示出其优越性。

在测试中所采用的一整套专用设备,通常被称为测量系统。它包括从被测量的变换直至用函数图形或数字显示出结果的各个环节。测量系统按其显示结果的方式可分为模拟测量系统和数字测量系统。模拟测量系统的输出是一些随时间变化的模拟量。

该系统的组成框图如图0-1所示。它主要由传感器、中间处理环节及指示或记录装置三部分组成。传感器的作用是将被测机械量转换成电量。中间处理环节(包括信号的滤波、放大、积分或微分等)的作用是把传感器输出的信号转换成适合于观察与记录的某种电信号。指示或记录装置的作用是将中间

处理环节输出的电信号显示出来或记录下来,这样就便于进一步分析处理。模拟测量系统的

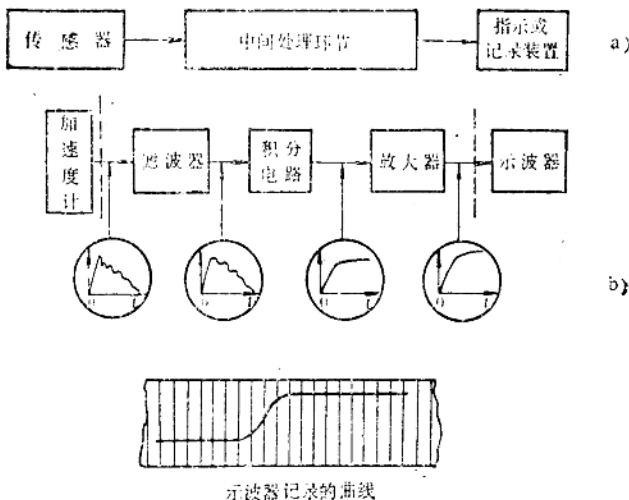


图 0-1 模拟测量系统的组成和实例

a) 模拟测量系统组成框图; b) 模拟测量系统

处理环节输出的电信号显示出来或记录下来,这样就便于进一步分析处理。模拟测量系统的

优点是价格低、直观性强、操作灵活简便；其缺点是精确度偏低。数字测量系统是将所测得的模拟量先通过模—数转换器转换成数字量，然后再进行显示、记录或作进一步处理。数字测量系统的优点是能够排除人为的读数误差，因此测量结果更为精确；可以直接与计算机相连，便于实现数据的自动化处理。

第一篇 传感器及其测量电路

能将被测机械量转换成电量的装置称为传感器（或变换器）。例如电阻应变式测力传感器，它可把力（机械量）的变化转换为电阻的变化，是一种常用的测力传感器。

在实际测量中采用的传感器类型很多，其分类方法也各不相同。

传感器按其被测量与电量的转换原理可分为两类：

（1）能量转换型 它是直接将 被测对象（机械量）的输入转换成电能，属于这种类型的传感器有压电式、感应式、热电式及光电式传感器等。例如热电偶温度计，它的原理是利用材料的热电效应把温度转换成电势输出。

（2）能量控制型 它是将被测量转换成电参量，从而控制由电源到输出端的电能输出，属于这种类型的传感器有电阻式、电容式及电感式传感器等。例如电位器式传感器，它的电阻值随被测位移的变化而变化，如果把它接入测量电路，则它的电阻将随被测量的变化而产生变化，从而导致测量电路的输出量发生变化。

对于测量机械量如力、位移、速度、加速度以及温度等的传感器，通常希望其电量输出波形 $y(t)$ 能按一定比例、不失真地同步复现输入机械量波形 $x(t)$ 。也就是说，输出和输入之间希望存在简单的比例关系

$$y(t) = S x(t),$$

式中， S ——比例常数。

实际上，这种理想情况很难实现。传感器工作时，由于各种原因，其输出信号不能按一定比例复现输入信号，由此产生的误差称为线性度误差。这种误差的大小与传感器本身的性能有关，为了减少测量误差，要求传感器具有下述良好性能。

1. 传感器的输出信号与输入信号之间成比例关系，即线性度好。这样才能避免或减小线性度误差。

2. 传感器的输出信号大，即当输入信号变化一定数值时，输出信号变化较大。通常把输出信号的变化量与输入信号变化量之比称为灵敏度。也就是说，要求传感器具有高的灵敏度。

3. 传感器反应敏捷。当被测量是一迅速变化的动态信号时，就必须考虑其输出能否跟得上输入信号的变化，它会产生多大的动态误差。因此，要求传感器能够迅速地、精确地跟踪输入信号，并具有相应的输出。例如一传感器，当给其输入频率为500Hz以下的正弦信号时，它可以不失真地输出一相应的正弦信号。而另一传感器，只有当输入频率低于100Hz的正弦信号时，才能做到输出不失真。相比之下，我们可以说前者比后者反应敏捷，也可说前者比后者动态特性好或工作频率高。

此外，还要求传感器内部产生的噪音小，不受外界干扰及被测对象状态的影响，使用寿命长，维修容易和校准方便等。

当然，衡量一个传感器能否满足使用要求，还应根据测量目的、被测对象、精度要求和信号处理等条件作全面考虑。

第一章 电阻式传感器

§ 1-1 变阻器式传感器

变阻器式传感器也叫电位器式传感器，它是在一个电阻元件上装上一个电刷（活动触头）构成的，其结构如图1-1所示。

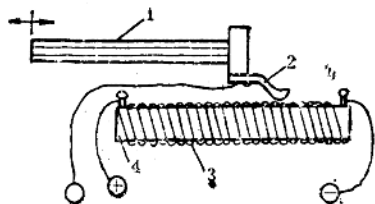


图 1-1 变阻器式传感器

1—杆；2—电刷；3—电阻丝；4—骨架

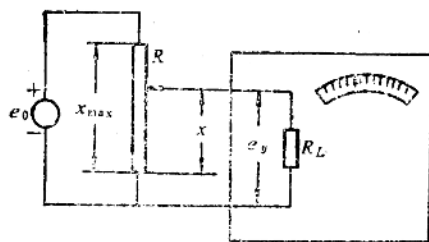


图 1-2 电阻分压电路

图1-2所示是这种传感器的测量电路图，图中负载电阻 R_L 相当于测量仪表的电阻值。其输出电压

$$e = \frac{R_x R_L}{R_L R + R_x R - R_x^2} e_0, \quad (1-1)$$

式中， R ——变阻器的总电阻；

R_x ——随电刷位移 x 而变化的电阻值。

对于电阻值是线性变化的变阻器，当电刷相对行程为 $x/x_{\max}$ 时，有

$$\frac{R_x}{R} = \frac{x}{x_{\max}} \quad (1-2)$$

令

$$X = \frac{x}{x_{\max}},$$

$$m = \frac{R}{R_L},$$

则式(1-1)可写成

$$e = \frac{X}{1 + mX(1-X)} e_0. \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知，当变阻器的输入电压 e_0 不变时，输出电压 e ，随电刷相对行程 X 的变化而变化，只是不与 X 成线性关系。只有当 $m \rightarrow 0$ ，即 $R_L \rightarrow \infty$ 时，输出电压 e ，才与 X 保持线性关系，即与电刷的位移成正比。此时的输出电压

$$e' = X e_0. \quad (1-4)$$

可见，当变阻器接有负载时，产生的相对误差

$$\gamma = \frac{e'_1 - e'_2}{e'_1} \times 100\% = \left[1 - \frac{1}{1+mX(1-X)} \right] \times 100\% \quad (1-5)$$

由式(1-5)可知,读数仪表的阻值(负载电阻)越大,则误差越小。若要误差在变阻器整个行程内保持在1~2%以内,则必须使 $R_L > (10 \sim 20) R$ 。

变阻器式传感器的分辨力(是指能检测到的输入信号的最小变化量),受到电阻元件构造的影响。因为绕线电阻元件的电阻变化是不均匀的,因此,当电刷从一圈电阻丝移动到下一圈电阻丝时,电阻值呈微小的阶跃变化,这种特性限制了传感器的分辨力。例如在长25mm的骨架上绕500圈电阻丝,则只能分辨大于0.05mm的位移量。

变阻器式传感器的优点是结构简单、性能稳定、输出信号大等;其缺点是分辨力受到电阻丝直径的限制。所以常用于对精度要求不很高、动作不是很频繁的较大线位移或角位移的测量。

§ 1-2 电阻应变片

电阻应变片简称应变片。它是机械量电测法中常用的一种传感元件,可用来测量构件的受力情况和机械变形等。

应变片的敏感元件可以用高阻值的金属材料制成,也可用半导体材料制成,一般将前者称为金属应变片,后者称为半导体应变片。

一、金属应变片

金属应变片的典型结构如图1-3所示。它由丝栅、基底、覆盖层和引出线组成。丝栅又称为敏感栅。敏感栅是丝式的称为丝式应变片;敏感栅是箔式的称为箔式应变片。根据基底材料,金属应变片又可分为纸基和胶基两类。

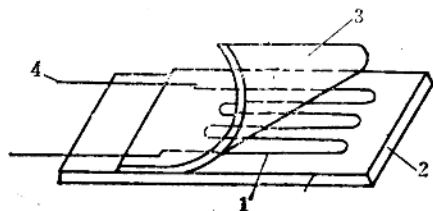


图1-3 电阻丝应变片的结构

- 1—丝栅; 2—基底;
3—覆盖层; 4—引出线

(一) 电阻应变效应

电阻丝在外力作用下发生机械变形时,其电阻值也将发生变化,这种现象称为电阻应变效应。金属应变片就是利用这种效应的一种转换元件,即借弹性元件(或被测试件)的变形,引起粘贴在其表面上的应变片的电阻值发生变化,将被测量转换为电阻变化。

电阻丝的电阻值可按式计算:

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (1-6)$$

式中, L ——电阻丝长度;

A ——电阻丝截面积;

ρ ——电阻率,它仅取决于导体材料的性质和导体所处的条件(温度、压力等)。

由式(1-6)可知,当电阻丝发生变形时,其几何尺寸、电阻率也将变化,从而引起电阻值 R 的变化。

对式(1-6)取对数并微分得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho},$$

将它变换成有限小增量的情况，则有

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-7)$$

$$\text{令} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1-8)$$

式中， ε 代表电阻丝的轴向相对伸长，称为应变，它是一个无量纲的量。因为它的数值通常很小，所以常用 10^{-6} 作为“单位”，称为微应变，记为 $\mu\varepsilon$ ，例如 $\varepsilon = 0.001$ 可写为 1000×10^{-6} ，即1000微应变。也可写成 $1000\mu\varepsilon$ 。 ΔA 是因电阻丝受轴向力作用引起的横截面变化量。设电阻丝原来直径为 d ，受轴向力后直径为 d' ，则它们之间的关系为

$$d' = d(1 - \mu\varepsilon), \quad (1-9)$$

式中， μ ——电阻丝材料的泊桑系数。

电阻丝截面积的变化

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{\pi}{4} (d'^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} [d^2 (1 - \mu\varepsilon)^2 - d^2] \\ &\approx \frac{\pi}{4} d^2 (-2\mu\varepsilon), \end{aligned}$$

$$\text{故} \quad \frac{\Delta A}{A} \approx -2\mu\varepsilon \quad (1-10)$$

将式(1-8)、(1-10)代入式(1-7)得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (1-11)$$

$$\text{或} \quad \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon} \quad (1-12)$$

式(1-12)的物理意义为单位应变引起电阻丝的电阻变化率，我们称它为电阻丝的灵敏度，用 S_0 表示，即

$$S_0 = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (1-13)$$

根据实验得知， S_0 随材料不同而异，对大多数电阻丝来说， S_0 是个常数。式(1-13)可以写成

$$\varepsilon = \frac{1}{S_0} \cdot \frac{\Delta R}{R}, \quad (1-14)$$

即当 S_0 为定值时，应变与电阻变化率成线性关系。

由式(1-12)可知，电阻丝的灵敏度 S_0 的大小受两个因素的影响：第一个因素是电阻丝受力后的几何尺寸变化，即 $1 + 2\mu$ 项；第二个因素是电阻丝受力后材料的电阻率的变化，即最后一项。实验表明，后一因素的影响是确实存在的。但是，由于电阻率随金属材料变形而变化的规律目前还不够清楚，所以还无法按式(1-12)从理论上求出 S_0 值，它只能通过实验来确定。

需要特别指出的是：单根电阻丝的灵敏度与用相同材料的电阻丝做成敏感栅的应变片的灵敏度是不同的，这是因为影响应变片灵敏度的因素更为复杂，从而造成了应变片的灵敏度比电阻丝的灵敏度低。金属应变片的灵敏度

$$S = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}, \quad (1-15)$$

它可通过对应变片的实际测定来求得。常用的金属应变片的灵敏度为2左右。

(二) 金属应变片的类型

按敏感栅的结构形式，金属应变片可分为：

1. 丝绕式应变片 其结构如图1-4a所示，它的丝栅由康铜等高阻值的金属丝制成。这种应变片的制造设备和技术都较简单，价格低廉，多用纸作基底，粘贴方便，在一般测试中

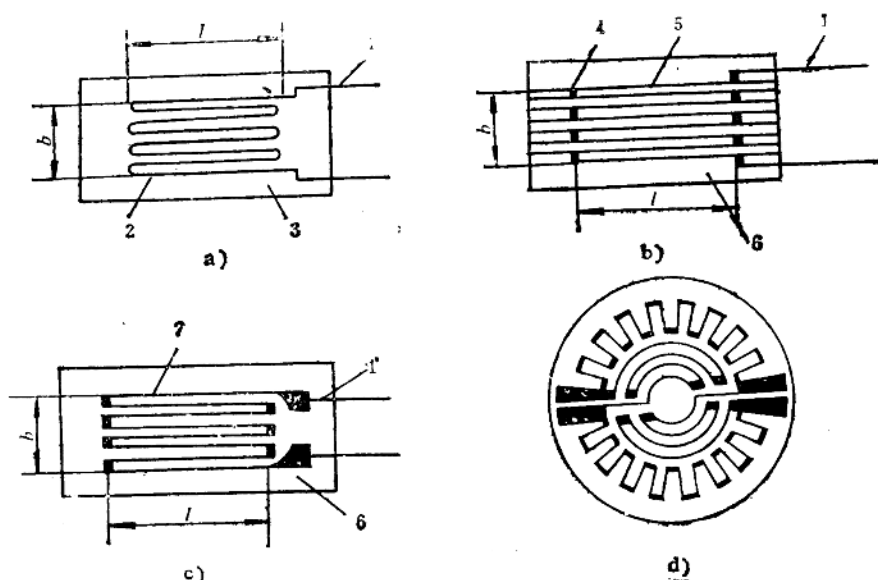


图 1-4 电阻应变片

a) 丝绕式； b) 短接丝式； c) 箔式； d) 箔式应变花

1—引出线； 2、5、7—敏感栅； 3—纸基底； 4—横接线； 6—胶膜基底

被广泛应用。但当敏感栅产生变形时，端部弧形段会产生相反的应变（这种影响称为横向效应），这将给测量带来一定的误差。

2. 短接丝式应变片 其结构如图1-4b所示。它的敏感栅也是用康铜等高阻值的金属丝制成，但敏感栅各线段间的横接线是采用截面积较大的铜导线，其电阻很小，也就是横向效应小，因而测量误差小。但是由于敏感栅上焊点较多，因而疲劳性能差，不适用于长期的动应力测量。

3. 箔式应变片 其结构如图1-4c所示，它的敏感栅是由很薄的康铜、镍铬合金等箔片通过光刻腐蚀而制成，采用胶膜基底。它具有横向部分特别宽，故横向效应小；敏感栅比较容易制成不同的形状，以适应不同的测量要求；箔栅表面积比较大，散热条件好，可以允许较大的电流流过；以及受交变载荷时疲劳寿命长，长时间测量时蠕变小等优点，因而是目前最好的应变片。

4. 应变花 图1-4d所示是一种用于膜式压力传感器上的箔式应变片，也称应变花。其优点是丝栅的形状与传感器膜片上的应力分布相适应。

(三) 金属应变片的主要技术参数

1. 几何参数 应变片敏感栅的尺寸 $b \times l$ (见图1-4) 反映了应变片的有效工作面积。 b 称栅宽, 系指与应变片纵轴(主轴线)垂直方向上应变片敏感栅外侧之间的距离, 它一般在10mm以下。 l 称基长(或标距), 表示应变片的敏感栅在纵轴方向的长度。对于圆角丝式应变片, 系指两端圆弧之间的距离; 对于有横栅的箔式应变片和短接丝式应变片, 系指两端横栅之间的距离。应变片的基长通常为2~30mm。目前最小基长为0.2mm(箔式片), 长的达100mm或更长。

2. 电阻值 目前应变片的电阻值(名义阻值)已趋于标准化, 有60、120、350、600、1000 Ω 等, 其中以120 Ω 的最为常用。实际上每一应变片的阻值相对于名义阻值多少有些偏差, 因此使用前要进行测量分选。

3. 允许电流 当应变片接入测量电路后, 在敏感栅中要流过一定的电流, 此电流使得应变片温度上升, 从而影响测量精度。因此, 需要规定允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流。通常在静态测量时, 为保证测量精度, 允许电流一般规定为25mA, 动态测量时允许电流可以大一些。

4. 灵敏度 应变片灵敏度的测定是在一个加载后能产生已知应变的专用装置上进行的, 由于每只应变片只能使用一次, 所以在每批生产中只能对同一规格型号的应变片采用抽样的方法进行测定, 并在应变片包装上标明这批产品由抽样测得的灵敏度 S 的平均值, 同时指出其正、负偏差, 即单个应变片的 S 值与平均值间的最大差值。

(四) 应变片的横向效应和温度误差

1. 应变片的横向效应 为使应变片达到一定的电阻值, 制作敏感栅的金属电阻丝必须有足够的长度。但是, 为了在测量试件上接近于一点的应变值, 又要求应变片尽量短些, 因而将金属电阻丝绕成栅状。这样, 即使试件只受到单向拉伸, 但由于其表面仍为平面应变状态(轴向伸长和横向缩短), 因而应变片敏感栅的横向部分将会感受横向应变, 使其总的电阻变化减小。如图1-5所示, 当试件受拉力 F 作用时, 敏感栅沿受力方向 X 伸长, 而沿垂直于力 F 的 Y 方向缩短。贴在试件上的应变片, 其敏感栅的纵向部分(方向与力 F 一致, 长度为 $4l$) 将同时伸长, 产生正应变 ϵ_x , 相应的电阻增量为正; 而其横向部分(方向与力 F 垂直, 长度为 $3a$) 将缩短, 产生负应变 $\epsilon_y = -\mu \epsilon_x$ (μ 为试件材料的泊桑系数), 相应的电阻增量为负。

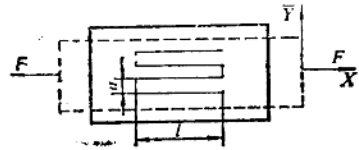


图1-5 试件受拉时敏感栅的变形

由于两者电阻增量的符号相反, 综合的结果削弱了敏感栅正应变的电阻增量, 从而降低了应变片的灵敏度。应变片由于感受横向应变而降低灵敏度的现象, 称为应变片的横向效应。

圆角丝式应变片的横向效应主要是由敏感栅的圆弧部分感受横向变形引起的, 敏感栅的纵向部分几乎不受横向变形的影响。箔式应变片引起横向效应的因素较复杂, 除了敏感栅的横向部分受横向变形影响外, 敏感栅的纵向部分因其宽度与厚度之比较大, 也受到横向变形的影响。但是, 箔式应变片的横向部分截面积大, 电阻小, 故横向效应影响亦小。

2. 温度误差 在采用电阻应变片测量应变时, 希望它的阻值只与应变有关, 而不受其它因素的影响, 但实际上并非如此。例如, 环境温度的变化, 就会引起应变片电阻值发生变化。因温度变化导致电阻变化的原因有:

(1) 在温度变化时, 敏感栅的电阻丝阻值发生变化。其相对电阻增量

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_a = \alpha \Delta t, \quad (1-16)$$

式中, α ——应变片敏感栅的电阻温度系数, 它表示温度变化 1°C 时电阻值的相对变化量;
 Δt ——环境温度的变化量。

(2) 在温度变化时, 由于试件和电阻丝线膨胀系数不同会引起附加变形, 故电阻值也会改变。其相对电阻增量

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\beta = S(\beta_1 - \beta_2) \Delta t, \quad (1-17)$$

式中, S ——应变片的灵敏度;

β_1 ——试件材料的线膨胀系数;

β_2 ——电阻丝材料的线膨胀系数。

因此, 由温度变化所引起的总的相对电阻增量

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_a + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\beta = [\alpha + S(\beta_1 - \beta_2)] \Delta t, \quad (1-18)$$

或

$$\Delta R_t = R[\alpha + S(\beta_1 - \beta_2)] \Delta t. \quad (1-19)$$

例如某个试件在受力后, 应变 $\varepsilon = 2000\mu\text{e}$, 应变片的灵敏度 $S = 2$, 初始阻值 $R = 120\Omega$, 在没有温度影响时电阻增量

$$\Delta R = S\varepsilon R = 2 \times 2000 \times 10^{-6} \times 120 = 0.48\Omega.$$

如果电阻丝的电阻温度系数 $\alpha = -50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 线膨胀系数 $\beta_2 = 14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 试件的线膨胀系数 $\beta_1 = 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 当温度升高 2°C 时, 电阻增量

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= R[\alpha + S(\beta_1 - \beta_2)] \Delta t \\ &= 120[-50 + 2(12 - 14)] \times 10^{-6} \times 2 \\ &\approx -0.013\Omega; \end{aligned}$$

由此可知, 当温度升高 2°C 时, 电阻变化所引起的相对误差

$$\gamma = \frac{0.013}{0.48} \times 100\% = 2.7\%.$$

此外, 温度变化对粘贴应变片的胶层性能也有影响, 如温度升高会使胶层变软, 导致传递变形不好, 即相当于使应变片灵敏度下降。

总之, 温度变化对应变片电阻值的影响很大, 有时甚至超过被测机械应变所引起的电阻变化。若不采取措施, 势必使测得的数据因无法反映真实的应变而失去测量的意义。

测量时, 采取一定的措施以减小或消除温度变化的影响, 叫做温度补偿。常用的温度补偿方法有两种: 一种是桥路补偿法, 它主要是通过贴片和接桥方法来消除温度的影响, 另一种是应变片的自补偿, 它是从电阻应变片的敏感栅材料及制造工艺上采取措施, 使应变片在一定的温度范围内满足

$$\alpha + S(\beta_1 - \beta_2) = 0,$$

或

$$\alpha = -S(\beta_1 - \beta_2).$$

例如, 某种康铜丝在冷硬状态时, 电阻温度系数为负值, 若进行真空退火处理, 则随着退火