

## 电测法基础

**电阻应变测量方法**是将应变转换成电信号进行测量的方法，简称**电测法**。电测法的基本原理是：将电阻应变片（简称**应变片**）粘贴在被测构件的表面，当构件发生变形时，应变片随着构件一起变形，应变片的电阻值将发生相应的变化，通过电阻应变测量仪器（简称**电阻应变仪**），可测量出应变片中电阻值的变化，并换算成应变值，或输出与应变成正比的模拟电信号（电压或电流），用记录仪记录下来，也可用计算机按预定的要求进行数据处理，得到所需要的应变或应力值。其工作过程如下所示：

应变——电阻变化——电压（或电流）变化——放大——记录——数据处理

电测法具有灵敏度高的特点，应变片重量轻、体积小且可在高（低）温、高压等特殊环境下使用，测量过程中的输出量为电信号，便于实现自动化和数字化，并能进行远距离测量及无线遥测。

### 第一节 电阻应变片

#### 一、电阻应变片的构造和类型

电阻应变片的构造很简单，把一根很细的具有高电阻率的金属丝在制片机上按图 A-1 所示的那样排绕后，用胶水粘结在两片薄纸之间，再焊上较粗的引出线，成为早期常用的丝绕式应变片。应变片一般由敏感栅（即金属丝）、粘结剂、基底、引出线和覆盖层五部分组成。若将应变片粘贴在被测构件的表面，当金属丝随构件一起变形时，其电阻值也随之变化。

常用的应变片有：丝绕式应变片（图 A-1）、短接线式应变片和箔式应变片（图 A-2）等。它们均属于单轴式应变片，即一个基底上只有一个敏感栅，用于测量沿栅轴方向的应变。如图 A-3 所示，在同一基底上按一定角度布置了几个敏感栅，可测量同一点沿几个敏感栅栅轴方向的应变，因而称为**多轴应变片**，俗称**应变花**。应变花主要用于测量平面应力状态下一点的主应变和主方向。

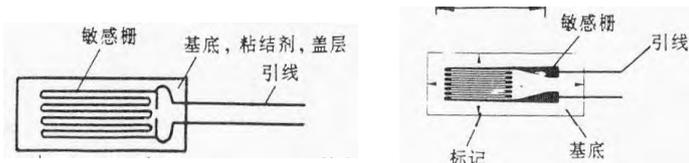


图 A-1 应变片的构造

图 A-2 箔式应变片

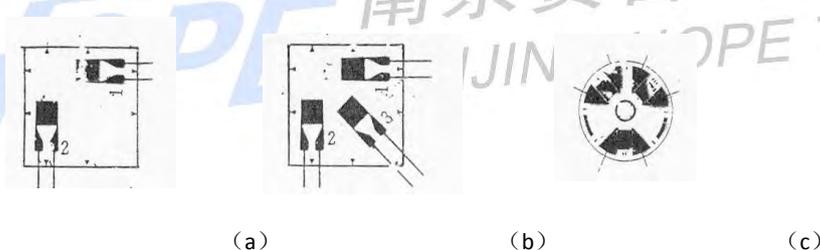


图 A-3 应变花

(a) 90°应变花；(b) 45°应变花；(c) 120°应变花

#### 二、电阻应变片的灵敏系数

在用应变片进行应变测量时，需要对应变片中的金属丝加上一定的电压。为了防止电流过大，产生发热

和熔断等现象，要求金属丝有一定的长度，以获得较大的初始电阻值。但在测量构件的应变时，又要求尽可能缩短应变片的长度，以测得“一点”的真实应变。因此，应变片中的金属丝一般做成如图 A-1 所示的栅状，称为**敏感栅**。粘贴在构件上的应变片，其金属丝的电阻值随着构件的变形而发生变化的现象，称为**电阻应变现象**。在一定的变形范围内，金属丝的电阻变化率与应变成线性关系。当将应变片安装在处于单向应力状态的试件表面，并使敏感栅的栅轴方向与应力方向一致时，应变片电阻值的变化率  $\Delta R/R$  与敏感栅栅轴方向的应变  $\varepsilon$  成正比，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$$

式中： $R$  为应变片的原始电阻值； $\Delta R$  为应变片电阻值的改变量； $K$  称为**应变片的灵敏系数**。

应变片的灵敏系数一般由制造厂家通过实验测定，这一步骤称为**应变片的标定**。在实际应用时，可根据需要选用不同灵敏系数的应变片。

### 三、电阻应变片的粘贴和防护

常温应变片通常采用粘结剂粘贴在构件的表面。粘贴应变片是测量准备工作中最重要的一环。在测量中，构件表面的变形通过粘结层传递给应变片。显然，只有粘结层均匀、牢固、不产生蠕滑，才能保证应变片如实地再现构件表面的变形。应变片的粘贴由手工操作，一般按如下步骤进行：

- (1) 检查、分选应变片。
- (2) 处理构件的测点表面。
- (3) 粘贴应变片。
- (4) 加热烘干、固化。
- (5) 检查应变片的电阻值，测量绝缘电阻。
- (6) 引出导线。

实际测量中，应变片可能处于多种环境中，有时需要对粘贴好的应变片采取相应的防护措施，以保证其安全可靠。一般在应变片粘贴完成后，根据需要可用石蜡、纯凡士林、环氧树脂等对应变片的表面进行涂覆保护。

## 第二节 电阻应变片的测量电路

在使用应变片测量应变时，必须用适当的办法测量其电阻值的微小变化。为此，一般是把应变片接入某种电路，让其电阻值的变化对电路进行某种控制，使电路输出一个能模拟该电阻值变化的信号，然后，只要对这个电信号进行相应的处理就行了。常规电测法使用的电阻应变仪的输入回路叫做**应变电桥**，它是以应变片作为其部分或全部桥臂的四臂电桥。它能把应变片电阻值的微小变化转化成输出电压的变化。在此，仅以直流电压电桥为例加以说明。

### 一、电桥的输出电压

电阻应变仪中的电桥线路如图 A-4 所示，它是以应变片或电阻元件作为电桥桥臂。可取  $R_1$  为应变片、 $R_2$  和  $R_3$  为应变片或  $R_1 \sim R_4$  均为应变片等几种形式。 $A$ 、 $C$  和  $B$ 、 $D$  分别为电桥的输入端和输出端。

根据电工学原理，可导出当输入端加有电压  $U_1$  时，电桥的输出电压为

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_1$$

当  $U_0 = 0$  时，电桥处于平衡状态。因此，电桥的平衡条件为  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。当处于平衡的电桥中各桥臂的电阻值分别有  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_3$  和  $\Delta R_4$  的变化时，可近似地求得电桥的输出电压为

$$U_o \approx \frac{U_1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

由此可见，应变电桥有一个重要的性质：**应变电桥的输出电压与相邻两桥臂的电阻变化率之差、相对两桥臂电阻变化率之和成正比**。对于平衡电桥，如果相邻两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相同，或相对两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相反，则电桥将不会改变其平衡状态，即保持  $U_o = 0$ 。

如果电桥的四个桥臂均接入相同的应变片，则有

$$U_o = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

式中， $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$  分别为接入电桥四个桥臂的应变片的应变值。

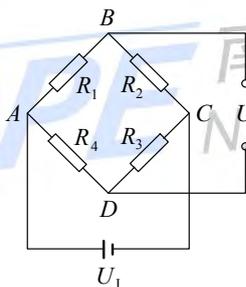


图 A-4 电桥原理

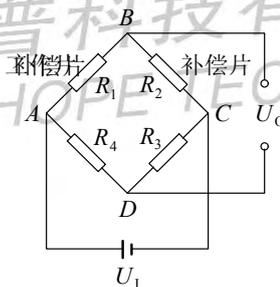


图 A-5 半桥单臂温度补偿接法

## 二、温度效应的补偿

贴有应变片的构件总是处在某一温度场中。若敏感栅材料的线膨胀系数与构件材料的线膨胀系数不相等，则当温度发生变化时，由于敏感栅与构件的伸长（或缩短）量不相等，在敏感栅上就会受到附加的拉伸（或压缩），从而会引起敏感栅电阻值的变化，这种现象称为**温度效应**。敏感栅电阻值随温度的变化率可近似地看作与温度成正比。温度的变化对电桥的输出电压影响很大，严重时，每升温  $1^{\circ}\text{C}$ ，电阻应变片中可产生几十微应变。显然，这是非被测（虚假）的应变，必须设法排除。排除温度效应的措施，称为**温度补偿**。根据电桥的性质，温度补偿并不困难。只要用一个应变片作为**温度补偿片**，将它粘贴在一块与被测构件材料相同但不受力的试件上。将此试件和被测构件放在一起，使它们处于同一温度场中。粘贴在被测构件上的应变片称为**工作片**。在连接电桥时，使工作片与温度补偿片处于相邻的桥臂，如图 A-5 所示。因为工作片和温度补偿片的温度始终相同，所以它们因温度变化所引起的电阻值的变化也相同，又因为它们处于电桥相邻的两臂，所以并不产生电桥的输出电压，从而使得温度效应的影响被消除。

必须注意，工作片和温度补偿片的电阻值、灵敏系数以及电阻温度系数应相同，分别粘贴在构件上和不受力的试件上，以保证它们因温度变化所引起的应变片电阻值的变化相同。

## 三、应变片的布置和在电桥中的接法

应变片感受的是构件表面某点的拉应变或压应变。在有些情况下，该应变可能与多种内力（比如轴力和弯矩）有关。有时，只需测量出与某种内力所对应的应变，而要把与其它内力所对应的应变从总应变中排除掉。显然，应变片本身不会分辨各种应变成分，但是只要合理地选择粘贴应变片的位置和方向，并把应变片合理地接入电桥，就能利用电桥的性质，从比较复杂的组合应变中测量出指定的应变。

应变片在电桥中的接法常有以下三种形式：

(1) **半桥单臂接法** 如图 A-5 所示，将个工作片和一个温度补偿片分别接入两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电阻。如果工作片的应变为  $\varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4} \varepsilon$$

(2) **半桥双臂接法** 如图 A-6 所示，将两个工作片接入电桥的两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电

阻，两个工作片同时互为温度补偿片。如果工作片的应变分别为  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

若  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{2}\varepsilon$$

即为半桥单臂接法的两倍。

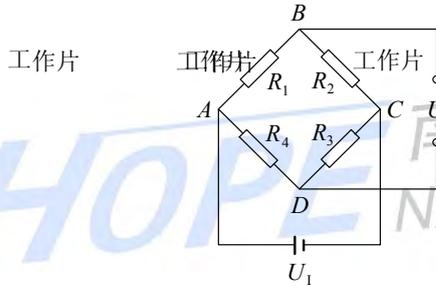


图 A-6 半桥双臂接法

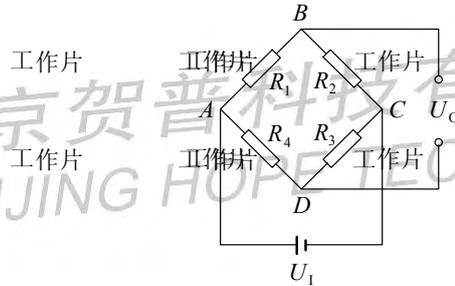


图 A-7 全桥接法

(3) **全桥接法** 如图 A-7 所示，电桥的四个桥臂全部接入工作片，如果工作片的应变分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_4$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

若  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = KU_1\varepsilon$$

即为半桥单臂接法的四倍。

必须注意，接入同一电桥各桥臂的应变片（工作片或温度补偿片）的电阻值、灵敏系数和电阻温度系数均应相同。

应变片在构件上的布置可根据具体情况灵活采取各种不同的方法。应变片在构件上的布置和在电桥中的接法可参见有关资料。

### 第三节 静态电阻应变仪

**静态电阻应变仪**是专供测量不随时间变化或变化极缓慢的电阻应变仪器，其功能是将应变电桥的输出电压放大，在显示部分以刻度或数字形式显示应变的数值，或者向记录仪输入模拟应变变化的电信号。

#### 一、HPJY-16C 静态电阻应变仪的工作原理

静态电阻应变仪的种类很多，在此以 HPJY-16C 型静态电阻应变仪为例，介绍其工作原理。

HPJY-16C 型静态电阻应变仪的工作原理框图如图 A-8 所示，可进行半桥或全桥测量。在测量应变时，把粘贴在构件上的应变片接入电桥，将电桥予调平衡，当构件受力发生变形时，应变片随之产生电阻值的变化，从而破坏了电桥的平衡，产生输出电压，由显示表显示出应变的数值。该静态电阻应变仪可同时测量十个点的应变，如果要测量更多点的应变，需另外配备平衡箱。它还可以通过接口与计算机连接，由计算机对测量数据进行处理。

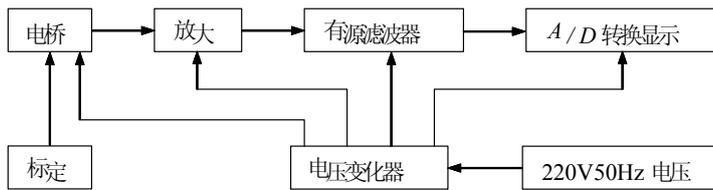


图 A-8 HPJY-16C 型静态电阻应变仪原理图

## 二、HPJY-16C 型静态电阻应变仪的使用方法

(1) 将电阻应变仪后面板上的电源开关置于关闭状态，后面板上的标定开关拨向下，测量点选择开关置于“ $R_0$ ”档。

(2) 如图 A-9 所示，将电阻应变仪前面板上的  $D_1$ 、 $D$  和  $D_2$  三个接线柱用连接片连接，并旋紧各接线柱，把  $120\Omega \times 2$  标准电阻的三根引线中同色的两根分别接到  $A$  和  $C$  接线柱，并旋紧，另一根接到  $B$  接线柱，并旋紧。

(3) 通入接地良好的 220V 50Hz 交流电源，打开电源开关，前面板上的数码管应有数字显示，预热 30 分钟后，调节前面板上的“ $R$ ”电位器（顺时针旋转显示为“+”，反之则为“-”），使显示表显示为“00000”。

(4) 将电阻应变仪后面板上的标定开关拨向上，进行电阻应变仪的灵敏系数标定。当所用电阻应变片的灵敏系数  $K = 2.00$  时，调节灵敏度电位器，使显示表显示为“10000”，当所用电阻应变片的灵敏系数  $K \neq 2.00$  时，必须按表 A-1 进行灵敏系数标定。灵敏系数标定好后即把标定开关拨向下位置。

表 A-1 HPJY-16C 型静态电阻应变仪灵敏系数标定表（所用桥臂电阻为  $120\Omega$ ）

应变片 $K$ 值	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.15	2.20
应变仪标定值	1111	1081	1052	1025	1000	9756	9524	9302	9091
应变片 $K$ 值	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65
应变仪标定值	8889	8696	8511	8333	8163	8000	7843	7692	7547

(5) 多点测量时，在前面板用 1~10 通道开关选择通道，相应地接通后面板上所选通道的测量桥接线端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$ ，调节所选择的每个通道的电位器，分别使显示表显示为“00000”。

(6) 应变片在电桥中的连接方法可根据需要采取半桥或全桥。注意在全桥接法时，电阻应变仪面板上的  $D_1$ 、 $D$  和  $D_2$  三个接线柱的连接片必须拆下，如图 A-10 所示。



图 A-9 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪面板

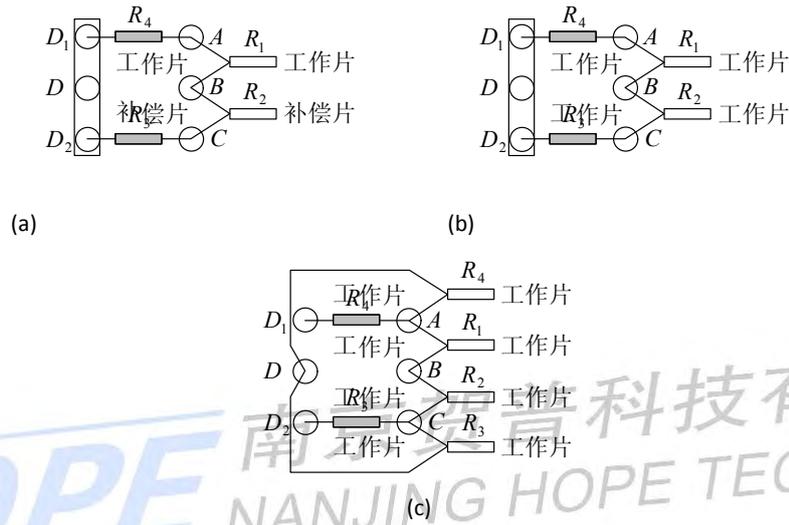


图 A-10 应变片接法

(a) 半桥单臂接法 (b) 半桥双臂接法 (c) 全桥接法 (拆去连接片)

### 三、电阻应变仪的读数修正

有时电阻应变仪的灵敏系数无法调整到与电阻应变片的灵敏系数一致，这时，可对电阻应变仪的读数进行如下修正，得到实际应变  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{仪}}}{K} \varepsilon_{\text{仪}}$$

式中： $K_{\text{仪}}$  为电阻应变仪的灵敏系数； $\varepsilon_{\text{仪}}$  为电阻应变仪的读数； $K$  为电阻应变片的灵敏系数。

### 参 考 文 献

- 1 单辉祖编著. 材料力学(I). 北京: 高等教育出版社, 1999
- 2 杨伯源主编. 材料力学(I). 北京: 机械工业出版社, 2001
- 3 贾有权主编. 材料力学实验. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1984
- 4 王杏根等主编. 工程力学实验. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- 5 张如一等编. 应变电测与传感器. 北京: 清华大学出版社, 1999