

## 第二章

# 常用传感器工作原理与应用

### 第一节 电阻式传感器

#### 一、电位器式电阻传感器

##### (一) 工作原理

电位器式电阻传感器的工作原理可用图 2-1 来说明。图中  $U_i$  是电位器工作电压， $R$  是电位器电阻， $R_L$  是负载电阻（例如测量表头的内阻）， $U_o$  是负载两端的电压， $x$  是电位器滑臂的相对位移量，在均匀绕制的电位器中也就是分压比（即  $x = R_x/R$ ）。电位器式电阻传感器实际上是个精密的滑动绕线电阻，位移（即被测量行程）的变化通过机械机构，使电位器的滑臂产生相应的位移  $x$ ，从而改变测量电路的电阻值而引起输出电压  $U_o$  的改变。

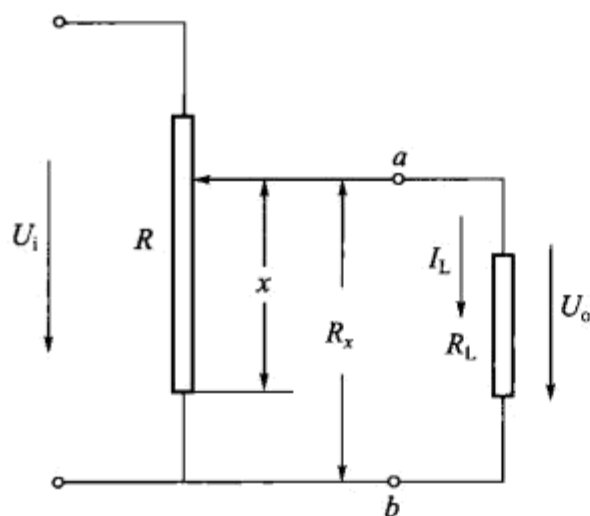


图 2-1 电位器电路

根据戴维宁定理，可以算得电位器输出电压  $U_o$  为

$$U_o = \frac{U_i R_x R_L}{R_L R + R_x (R - R_x)}$$

因此，输出电压与输入电压之比为

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_x R_L}{R_L R + R_x (R - R_x)} = \frac{R_x R_L / R R_L}{1 + \frac{R_x R (1 - R_x / R)}{R_L R}}$$

已知  $x = R_x/R$ ，又设  $m = R/R_L$ ，则

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{x}{1 + mx(1-x)} \quad (2-1)$$

可见，只有当  $m=0$ ，即  $R_L \rightarrow \infty$  时， $U_o$  与  $x$  才满足线性关系。故非线性关系完全是负载电阻  $R_L$  的接入而引起的。

##### (二) 非线性误差及改善的方法

电位器式电阻传感器的非线性是由负载电阻的接入而引起的。设未接负载  $R_L$  时，输出电压为  $U'_o$ ，则  $U'_o = U_i x$ 。则非线性误差  $\epsilon_1$  为

$$\epsilon_1 = \frac{U'_o - U_o}{U'_o} \times 100\% = \left[ 1 - \frac{1}{1 + mx(1-x)} \right] \times 100\% \quad (2-2)$$

由式(2-2)可以推算：当  $m$  一定时，在电位器的两端附近，即  $x$  接近于 0 或  $x$  接近于 1 时，非线性误差较小；在电位器的中间，非线性误差则最大。当相对位移量  $x$  一定时， $m$  愈大，则非线性误差也愈大。若要使线性误差在整个行程中保持在  $1\% \sim 2\%$  以内，负载电阻  $R_L$  必须大于电位器电阻  $10 \sim 20$  倍。但有时负载满足不了这个条件，一般可以采用一些补偿方法来改善线性度。方法之一是采用适当形状的非线性电位器。

### (三) 电位器式电阻传感器的分类和特点

电位器式电阻传感器由骨架、绕在骨架上的电阻丝及在电阻丝上移动的滑动触点（如电刷）组成。滑动触点可以沿着直线运动，也可以沿着圆周运动，前者称为线位移式电位器式电阻传感器，后者称为角位移式电位器式电阻传感器。

绕线式电位器应用广泛，性能稳定，但分辨力低，耐磨性差。因此现在发展了一些其他形式的电位器，如金属膜电位器、导电塑料电位器、光电电位器等。

电位器式电阻传感器结构简单，价格便宜，输出功率大，一般情况下可直接连接指示仪表，简化了测量电路。但由于分辨力有限，所以精度不高。另外动态性能差，不适宜测量快速变化量。通常可用于测量压力、位移、加速度等。

## 二、应变式电阻传感器

### (一) 应变效应和灵敏度系数

导体或半导体材料在外界作用下（如压力等）产生机械变形，其阻值将发生变化，这种现象称为“应变效应”。如依据这种效应制成的应变片粘贴于被测材料上，则被测材料受外界作用所产生的应变就会传送到应变片上，从而使应变片的电阻值发生变化，通过测量应变片阻值的变化就可得知被测机械量的大小。

导体的电阻  $R$  可用下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

如果对整条电阻丝长度作用均匀应力，则由于电阻率  $\rho$ 、导体长度  $l$ 、导体截面积  $S$  的变化，可以通过对上式的全微分求得

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS$$

相对变化量为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (2-3)$$

一般情况下，电阻丝是圆截面， $S = \pi r^2$ ，则  $\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r}$ ，令  $\frac{dl}{l} = \epsilon$ ， $\epsilon$  为电阻丝轴向相对伸长，即轴向应变，而  $\frac{dr}{r}$  为电阻丝径向相对伸长，即径向应变。在弹性范围内，金属丝沿长度方向伸长或缩短时，轴向应变和径向应变的关系是

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} = -\mu \epsilon$$

式中  $\mu$ ——金属材料的泊松系数，负号表示方向相反，所以  $\frac{dS}{S} = -2\mu\epsilon$ 。

式(2-3)经整理后得

$$\frac{dR}{R} = \left[ (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho\epsilon} \right] \epsilon \quad (2-4)$$

定义金属丝的灵敏度系数为

$$k = \frac{dR/R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho\epsilon} \quad (2-5)$$

它的物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化。对确定的材料， $k$  是一个常数，因此

$$\frac{dR}{R} = k\epsilon \quad (2-6)$$

上式表示金属丝的电阻相对变化与轴向应变成正比。

对半导体材料而言，当在半导体的某一晶向施加一定的应力  $\sigma$  时，会产生电阻率的变化，而其几何尺寸很小，这种现象称为压阻效应。其关系式为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_1\sigma$$

式中  $\pi_1$ ——半导体材料受力方向的压阻系数。

根据胡克定律有  $\sigma = \epsilon E$ ， $E$  为某一晶轴方向的杨氏模量。于是

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_1 E \epsilon$$

将上述各式代入式(2-5)，可得半导体的应变灵敏系数为

$$k = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \approx \pi_1 E \quad (2-7)$$

对半导体材料来说，其  $\pi_1 E$  值为  $60 \sim 70$ ， $1 + 2\mu$  与之相比较可以忽略，所以半导体的应变灵敏系数远远大于金属材料的应变灵敏度。

## (二) 电阻应变片的种类

常用的应变片有两大类：一类是金属电阻应变片；另一类是半导体应变片。

金属电阻的应变片有丝式应变片和箔式应变片等。箔式应变片的优点是表面积和截面积之比大，散热条件好，故允许通过较大的电流，并可做成任意形状，便于大量生产。由于这一系列优点，所以使用范围日益广泛，有逐渐取代丝式应变片的趋势。

半导体应变片最突出的优点是体积小而灵敏度高，其灵敏系数比金属应变片要大几十倍，频率响应范围很宽。但缺点是由于半导体材料的原因，温度系数较大。

## 三、测量电路

电阻应变片最常用的测量电路是电桥电路，大多数测量电路采用不平衡电桥，把电阻的相对变化  $\Delta R/R$  转换为电压或电流的变化，如图 2-2 所示。工作臂  $R_1$  为一电阻应变片，当受应变时，其电阻变化为  $\Delta R_1$ ，而  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  均为固定桥臂。

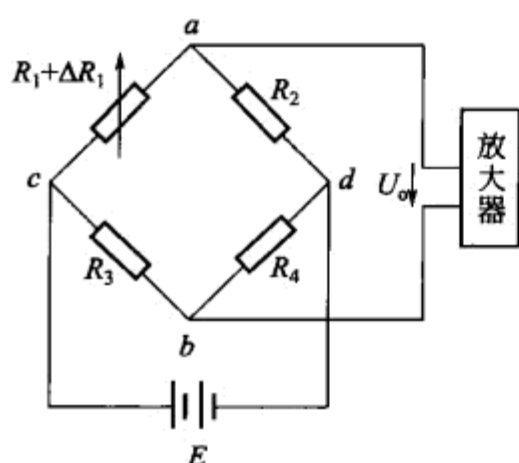


图 2-2 单臂工作的直流电桥

### (一) 电压灵敏度

初始时， $\Delta R_1 = 0$ ，电桥处于平衡状态， $U_o = 0$ ，此时  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ ，称为电桥平衡条件。

当有应变时， $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$ ，此时

$$\begin{aligned} U_o &= E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= \frac{R_4/R_3 \times \Delta R_1/R_1}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)} E \end{aligned} \quad (2-8)$$

设桥臂比  $n = R_2/R_1$ ，并考虑到起始平衡条件  $R_2/R_1 =$

$R_4/R_3$ ，以及略去分母中  $\Delta R_1/R_1$  项，得

$$U_o = E \frac{n}{(1+n)^2} \times \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-9)$$

所以电桥的电压灵敏度  $k_u$  为

$$k_u = \frac{U_o}{\Delta R_1/R_1} = E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (2-10)$$

由上式可知，电桥灵敏度与电源电压  $E$  成正比，要提高电桥的电压灵敏度，必须提高电源电压；另外应适当选择桥臂比  $n$ 。当电桥电压  $E$  一定时，由  $\frac{dk_u}{dn} = 0$  时， $k_u$  为最大，可得

$$\frac{1-n^2}{(1+n)^4} = 0$$

所以  $n=1$  时， $k_u$  为最大，这就是说，在电桥电压一定时，当  $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4$  时，电桥的电压灵敏度最高。此时

$$U_o = \frac{1}{4} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} \times \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)} \quad (2-11)$$

$$U_o = \frac{1}{4} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-12)$$

$$k_u = \frac{1}{4} E \quad (2-13)$$

## (二) 非线性误差及其补偿

式(2-9) 表示电桥输出电压与电阻相对变化是成正比的，这只是当  $\frac{\Delta R_1}{R_1} \ll 1$  时，忽略了式(2-8) 分母中的  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  项得来的，所以这是理想情况。实际值应按式(2-8) 计算，尤其是在  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  较大的情况下，更应如此。在式(2-8) 中  $U_o$  与  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  的关系是非线性的。

为了减少消除电桥的非线性误差，可以采取下列措施。

### 1. 提高桥臂比

提高桥臂比  $n$ ，非线性误差将减小，但电桥电压灵敏度也将降低，为了保持灵敏度不降低，必须相应地提高桥压。

### 2. 采用差动电桥

如图 2-3 所示，在电桥的相邻两桥臂同时接入两只工作应变片，使一片受拉，另一片受压。该电桥的输出电压  $U_o$  为

$$U_o = E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

如考虑到  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ， $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4$ ，则得

$$U_o = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-14)$$

由上式可知， $U_o$  与  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  为线性关系，说明差动电桥没有非线性误差，而且其电压灵敏度  $k_u = \frac{1}{2} E$ ，即比单工作片提高一倍。

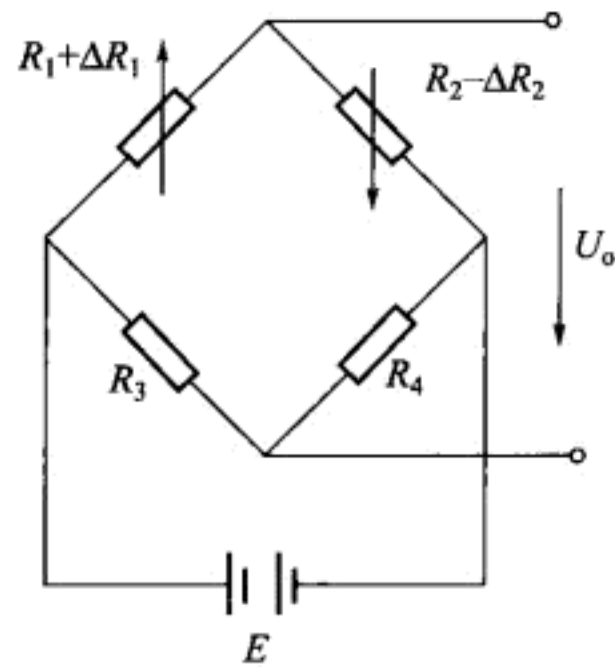


图 2-3 差动电桥

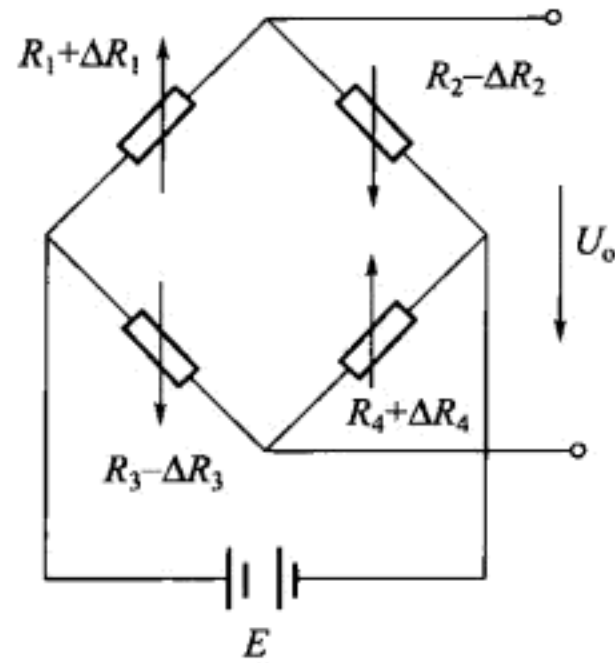


图 2-4 四臂差动电桥

如果按图 2-4 接成四片工作片的差动电桥，又满足  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  的等臂电桥条件，则其  $U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1}$ ，是单臂电桥的四倍。