

电阻式传感器的基本原理是将非电量(如力、位移、形变及加速度等)转换成电阻变化,通过测量电阻达到非电量的测量。

电阻式传感器主要分为应变式电阻传感器和电位器式电阻传感器。应变式电阻传感器测量灵敏度较高,主要应用于电阻值变化小的情况,而电位器式电阻传感器适用于被测对象参数变化较大的场合。

3.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是测力与应变的主要传感器,测力范围小到肌肉纤维($5 \times 10^{-5} \text{N}$),大到登月火箭($5 \times 10^7 \text{N}$),精确度可到 $0.01\% \sim 0.1\%$,有 10 年以上的校准稳定性。它也是应用最广泛的传感器之一,可用于应变力、压力、转矩、位移、加速度等物理量的测量。传感器的基本原理是将被测的非电量转换成电阻值的变化,再经转换电路转换成电量输出。

电阻应变式传感器主要是利用金属导体和半导体材料制成,具有结构简单,测量精度高、范围大和体积小等优点,其缺点是电阻、半导体会随温度变化,具有非线性,输出信号微弱等。

3.1.1 应变效应

当金属导体在外力作用下发生机械变形时,其电阻值将发生变化,这种现象称为金属的电阻应变效应,用应变灵敏度 K 描述:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\epsilon_R}{\epsilon} \quad (3-1)$$

式中: $\epsilon_R = \frac{\Delta R}{R}$ 表示导体电阻相对变化; $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 表示导体长度相对变化。

设有一根长度为 l 、截面积为 S 、截面半径为 r 、电阻率为 ρ 的金属丝,其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (3-2)$$

当受到外力作用后,金属导体变长、变细, S 、 ρ 、 l 均发生变化,设发生了 Δl 、 Δr 变化,对式(3-2)两边取对数,得

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - 2 \ln r - \ln \pi \quad (3-3)$$

对式(3-3)两边取微分,得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} \quad (3-4)$$

式中: $\frac{dR}{R}$ 表示电阻的相对变化; $\frac{d\rho}{\rho}$ 表示电阻率的相对变化; $\frac{dl}{l} = \epsilon$ 表示金属丝长度相对变化,称为金属轴向应变或纵向应变; $\frac{dr}{r} = \epsilon_r$ 表示金属的横向应变,称为径向应变。

由材料力学可知

$$\epsilon_r = -\mu \epsilon \quad (3-5)$$

式中: μ 为泊松比,其大小一般在 0.2~0.4。则式(3-4)可表示为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l}(1+2\mu) = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon(1+2\mu) \quad (3-6)$$

所以

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} = (1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (3-7)$$

它的物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化。 K 由两部分组成:前一部分是 $1+2\mu$,是受力后由于材料的几何形状发生变化而引起的;后一部分为 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$,是受力后由于材料的电阻率发生变化而引起的。对于确定的材料, $1+2\mu$ 项是常数,一般金属 $\mu \approx 0.2 \sim 0.4$,因此 $(1+2\mu) \approx 1.4 \sim 1.8$,并且由实验证明 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ 也是一个常数,因此灵敏度系数 K 为常数,则得

$$dR/R = K\epsilon \quad (3-8)$$

式(3-8)表明金属电阻丝的电阻相对变化与轴向应变成正比。

3.1.2 金属电阻应变片结构与材料

金属应变片一般由敏感栅、基底、盖片、引线和黏结剂等组成,如图 3-1 所示。这些部分所选用的材料将直接影晌应变片的性能。因此,应根据使用条件和要求合理地加以选择。

1. 敏感栅

由金属细丝绕成栅形。电阻应变片的电阻值为 60Ω 、 120Ω 、 200Ω 等多种规格,以 120Ω 最为常用。应变片栅长大小关系到所测应变的准确度,应变片测得的应变大小是应变片栅长和栅宽所在面积内的平均轴向应变变量。

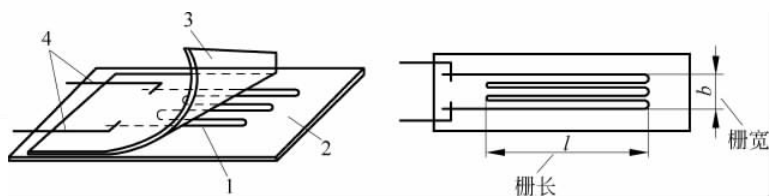


图 3-1 电阻应变片结构示意图

1—敏感栅；2—基底和盖片；3—引线；4—黏结剂

对敏感栅的材料的要求：

- (1) 应变灵敏系数大,并在所测应变范围内保持为常数；
- (2) 电阻率高而稳定,以便于制造小栅长的应变片；
- (3) 电阻温度系数要小；
- (4) 抗氧化能力高,耐腐蚀性能强；
- (5) 在工作温度范围内能保持足够的抗拉强度；
- (6) 加工性能良好,易于拉制成丝或轧压成箔材；
- (7) 易于焊接,对引线材料的热势小。

对应变片要求必须根据实际使用情况,合理选择。

2. 基底和盖片

基底用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置,盖片既保持敏感栅和引线的形状和相对位置,还可保护敏感栅。基底的全长称为基底长,其宽度称为基底宽。

3. 引线

是从应变片的敏感栅中引出的细金属线。对引线材料的性能要求：电阻率低、电阻温度系数小、抗氧化性能好、易于焊接。大多数敏感栅材料都可制作引线。

4. 黏结剂

用于将敏感栅固定于基底上,并将盖片与基底粘贴在一起。使用金属应变片时,也需用黏结剂将应变片基底粘贴在构件表面某个方向和位置上。以便将构件受力后的表面应变传递给应变计的基底和敏感栅。

常用的黏结剂分为有机和无机两大类。有机黏结剂用于低温、常温和中温。常用的有聚丙烯酸酯、酚醛树脂、有机硅树脂、聚酰亚胺等。无机黏结剂用于高温,常用的有磷酸盐、硅酸、硼酸盐等。

3.1.3 半导体压阻效应

半导体材料在某一方向受到作用力时,它的电阻率会发生明显变化,这种现象称为压阻效应。半导体电阻应变片是一种利用半导体材料压阻效应的电阻型传感器。实验证明,在半导体材料中,有

$$1 + 2\mu \ll \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (3-9)$$

则

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (3-10)$$

所以

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon = \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-11)$$

由材料力学可知

$$\frac{d\rho}{\rho} = \lambda\sigma = \lambda E\epsilon = K\epsilon \quad (3-12)$$

式中： σ 为作用于材料的轴向应力； λ 为半导体材料受力方向的压阻系数； E 为半导体材料的弹性模量（杨氏模量）。可得半导体应变片的灵敏度系数为

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} = \lambda E \quad (3-13)$$

它比金属应变片的要大 50~70 倍，有时无需放大可直接测量；但是半导体元件对温度变化敏感，这在很大程度上限制了半导体应变片的应用。

3.1.4 应变片种类

从制作材料的角度，电阻应变片分为金属式电阻应变片和半导体式电阻应变片。

常见的金属式电阻应变片有丝式、箔式和薄膜式三种，丝式应变片是用金属丝粘贴于衬底上，两端引出导线；铂式应变片是用光刻、腐蚀等工艺方法制成的薄箔栅，相比丝式应变片具有更大的表面积、更好的散热，故可以通更大的电流，而且加工方便。薄膜式应变片是用真空镀膜、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。膜的厚度从零点几到几百纳米不等，它可以采用耐高温的金属材料制成，这样就可以实现耐高温环境测量的电阻应变片。

半导体电阻应变片一般分为体型半导体应变片、薄膜型半导体应变片、扩散型半导体应变片和外延型半导体应变片。

体型半导体应变片是将单晶硅锭切片、研磨、腐蚀压焊引线，最后粘贴在锌酚醛树脂或聚酰亚胺的衬底上制成的。

薄膜型半导体应变片是利用真空沉积技术将半导体材料沉积在带有绝缘层的试件上或蓝宝石上制成的。它通过改变真空沉积时衬底的温度来控制沉积层电阻率的高低，从而控制电阻温度系数和灵敏度系数，因而能制造出适于不同试件材料的温度自补偿薄膜应变片。薄膜型半导体应变片吸收了金属应变片和半导体应变片的优点，并避免了它的缺点，是一种较理想的应变片。

扩散型半导体应变片是将 P 型杂质扩散到一个高电阻 N 型硅基底上，形成一层极薄的 P 型导电层，然后用超声波或热压焊法焊接引线而制成。它的优点是稳定性好，机械滞后和蠕变小，电阻温度系数也比一般体型半导体应变片小一个数量级。缺点是由于存在 P-N 结，当温度升高时，绝缘电阻大为下降。新型固态压阻式传感器中的敏感元件硅梁和硅杯等就是用扩散法制成的。

外延型半导体应变片是在多晶硅或蓝宝石的衬底上外延一层单晶硅而制成的。它的优

点是取消了 P-N 结隔离,使工作温度大为提高(可达 300℃ 以上)。

3.1.5 弹性敏感元件及基本特性

应变片组成传感器一般有两种方式,一种是直接将应变片粘贴在被测量的受力物件上,另一种是将应变片粘贴在弹性元件上,由弹性元件将被测物理量转换为应变。应变式传感器一般采用后一种方式。

物体在外力作用下而改变原来尺寸或形状的现象称为变形,而当外力去掉后物体又能完全恢复其原来的尺寸和形状,这种变形称为弹性变形。具有弹性变形特性的物体称为弹性元件。

弹性元件在应变片测量技术中占有极其重要的地位。它首先把力、力矩或压力变换成相应的应变或位移,然后传递给粘贴在弹性元件上的应变片,通过应变片将力、力矩或压力转换成相应的电阻值。

弹性元件受外力作用下变形大小的量度采用刚度来表示,其定义是弹性元件单位变形下所需要的力,用 C 表示,其数学表达式为

$$C = \lim_{\Delta x} \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx} \quad (3-14)$$

式中: F 为作用在弹性元件上的外力,单位为牛顿(N); x 为弹性元件所产生的变形,单位为毫米(mm)。

通常用刚度的倒数来表示弹性元件的特性,称为弹性元件的灵敏度,一般用 S 表示,其表达式为

$$S = \frac{1}{C} = \frac{dx}{dF} \quad (3-15)$$

可以看出,灵敏度是单位力作用下弹性元件产生变形的大小,灵敏度大,表明弹性元件软,变形大。如果弹性特性是线性的,则灵敏度为一常数,若弹性特性是非线性的,则灵敏度为一变量,即表示此弹性元件在弹性变形范围内,各处由单位力产生的变形大小是不同的。

常用的弹性元件结构如图 3-2 所示。

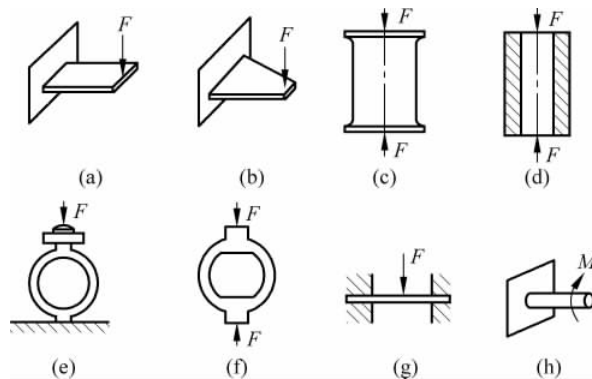


图 3-2 常用弹性元件结构

- (a) 等截面悬臂梁; (b) 等强度悬臂梁; (c) 实心圆柱形; (d) 空心圆柱形;
(e) 等截面圆环形; (f) 变截面圆环形; (g) 等截面薄板; (h) 扭转轴

3.2 测量电桥

应变片将应变的变化转换成电阻相对变化 $\Delta R/R$, 要把电阻的变化转换成电压或电流的变化, 才能用电测仪表进行测量。一般应变片阻值变化很小, 若 $k_0=2$, 应变片电阻 $R=120\Omega$, $\epsilon_l=1000\mu\epsilon$ 时电阻变化仅 0.24Ω 。要检测微小电阻必须经过放大电路放大输出。通常采用直流电桥或交流电桥实现。

3.2.1 直流电桥

1. 直流电桥平衡条件

如图 3-3(a) 所示, E 为电桥电源, G 为检流计(灵敏), R_1 为测量臂, R_2 为平衡臂, R_3, R_4 为比例臂, 其等效电路如图 3-3(b) 所示。由戴维南定理可得, 等效电阻和等效电压源分别为

$$R_i = R_1 // R_2 + R_3 // R_4 \quad (3-16)$$

$$E' = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3-17)$$

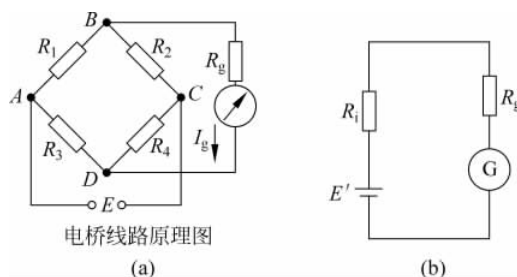


图 3-3 直流电桥

所以检流计中流过的电流为

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{E'}{R_i + R_g} = \frac{E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)}{R_g + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} \\ &= \frac{E(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_g(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)} \end{aligned} \quad (3-18)$$

当 $I_g=0$ 时, 电桥平衡, 平衡条件为

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (3-19)$$

当 $R'_1 = R_1 + \Delta R_1$ 时, $I_g \neq 0$, 可以调节 R_2 使电桥再次平衡, 即满足

$$(R_1 + \Delta R_1) R_4 = (R_2 + \Delta R_2) R_3 \quad (3-20)$$

从而可得

$$\Delta R_1 = \frac{R_3}{R_4} \Delta R_2 \quad (3-21)$$

对于平衡条件 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 当 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ 时, 称第一类对称电桥, 当 $R_1 = R_3, R_2 = R_4$ 时, 称第二类对称电桥。

2. 非平衡电桥

1) 单臂电桥

单臂电桥只有桥臂 R_1 为电阻应变片, 当受应变时, 其电阻变化为 ΔR_1 , 而 R_2, R_3, R_4 均为固定电桥。初始时, 调节使之平衡, 满足平衡条件即 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 此时输出电压 u_o 为零。当 $R_1' = R_1 + \Delta R_1$ 时, 有

$$\begin{aligned} u_o &= u_i \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= u_i \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + R_4) - R_3(R_1 + R_2 + \Delta R_1)}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1)(R_3 + R_4)} \\ &= u_i \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1)(R_3 + R_4)} \\ &= u_i \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{R_4}{R_3}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \end{aligned} \quad (3-22)$$

令

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = n \quad (3-23)$$

则

$$u_o = u_i \frac{n \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)(1 + n)} = u_i \frac{n}{(1 + n)^2} \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{1}{1 + n} \frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (3-24)$$

因为 $\frac{1}{1 + n} \frac{\Delta R_1}{R_1} \ll 1$, 可进行级数展开, 得

$$u_o = u_i \frac{n}{(1 + n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \left[1 - \frac{1}{1 + n} \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{1}{(1 + n)^2} \frac{\Delta R_1^2}{R_1^2} - \dots \right] \quad (3-25)$$

(1) 灵敏度。电桥的电压灵敏度定义为

$$\begin{aligned} K &= \frac{u_o}{\epsilon_R} = \frac{u_o}{\Delta R_1 / R_1} = u_i \frac{n}{(1 + n)^2} \left[1 - \frac{1}{1 + n} \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{1}{(1 + n)^2} \frac{\Delta R_1^2}{R_1^2} - \dots \right] \\ &\approx u_i \frac{n}{(1 + n)^2} \end{aligned} \quad (3-26)$$

① 从式(3-26)可以看出, 当供桥电压 u_i 增加时, 可以提高灵敏度 K , 但考虑系统的温升, 一般限制供桥电压为 10V 左右或以下。

② 另外从式(3-26)可以看出, 桥臂比 n 的大小是影响灵敏度的一个因素, 将灵敏度 K 对 n 求偏导并令其等于零, 得

$$\frac{dK}{dn} = u_i \frac{1 - n}{(1 + n)^3} = 0 \quad (3-27)$$

可得 $n=1$, 经计算

$$\frac{d^2 K}{dn^2} < 0 \quad (3-28)$$

表明当 $n=1$ 时, 灵敏度 K 有极大值, 令 $R_1=R_2, R_3=R_4$, 得 $K_{\max}=\frac{1}{4}u_i$ 。

(2) 非线性误差。电桥的实际输出 u_o 为式 (3-24) 的计算结果, 而其理想输出 u'_o 为式 (3-25) 近似得到的结果, 即

$$u'_o = u_i \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-29)$$

所以其非线性误差为

$$\begin{aligned} \delta &= \left| \frac{u_o - u'_o}{u'_o} \right| \times 100\% = \left| \frac{u_i \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{1}{1+n} \frac{\Delta R_1}{R_1}} - u_i \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{u_i \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1}} \right| \\ &= \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \times 100\% \end{aligned} \quad (3-30)$$

当 $n=1, \frac{\Delta R_1}{R_1} \ll 1$ 时, 有

$$\delta = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-31)$$

例题 1: 某金属应变片 $K_R=2, \epsilon_l \leq 5000\mu\epsilon$, 求 δ 。

解: $\epsilon_R = \frac{\Delta R_1}{R_1} = K_R \epsilon = 2 \times 5000 \times 10^{-6} = 0.01$ 。

所以, $\delta = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{2} \times 0.01 = 0.5\%$ 。

例题 2: 半导体应变片 $K_R=100, \epsilon_l \leq 1000\mu\epsilon$, 求 δ 。

解: $\epsilon_R = \frac{\Delta R_1}{R_1} = K_R \epsilon = 100 \times 1000 \times 10^{-6} = 0.1$ 。

所以, $\delta = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{2} \times 0.1 = 5\%$ 。

由两个例题可以看出, 当电阻相对变化较小时, 其误差还可以接受, 但当电阻相对变化较大时, 其误差就不能忽略了。

为了减小或消除电桥的非线性误差, 可以采取如下几种措施:

① 提高桥臂比。

对于提高桥臂比的方法, 由单臂的非线性误差公式可得, 提高桥臂比 n , 非线性误差将减小, 但由灵敏度公式 $K = u_i \frac{n}{(1+n)^2} \approx u_i \frac{1}{n}$ 可知, 电桥电压灵敏度也降低了 n 倍, 所以为

了保持灵敏度不降低,必须相应地提高供电电桥电压。但供桥电压的大小是受限制的。

② 采用差动电桥。

③ 恒流源电桥法。

②、③这两种方法接下来将详细介绍。

2) 差动电桥电路

(1) 半桥差动电路。电桥的相邻两臂同时接入两个应变片,工作时它们的受力方向相反,即一片受拉力,另一片受压力,如图 3-4 所示。

设 R_1 增加 ΔR_1 ; R_2 减少 ΔR_2 ; 当电桥平衡时,有

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

令 $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = n = 1$, 则 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ 。

测量时, $R_1' = R_1 + \Delta R_1$, $R_2' = R_2 - \Delta R_2$, 设 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$, 则电桥输出电压为

$$\begin{aligned} u_o &= u_i \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= u_i \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R_0} u_i \end{aligned} \quad (3-32)$$

由式(3-32)可见,半桥差动电路没有非线性误差,其电压输出 u_o 与电阻相对变化成正比。其灵敏度为

$$K = \frac{u_o}{\Delta R/R_0} = \frac{1}{2} u_i \quad (3-33)$$

由此可见,其灵敏度比单臂电桥提高一倍。

(2) 全桥差动电路,电桥的四个桥臂都接入工作应变片,如图 3-5 所示工作时,两个应变片受压力,另外两个受拉力。平衡时,令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$, 工作时,令 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$, 则

$$u_o = u_i \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3 - \Delta R_3}{R_3 - \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) = \frac{\Delta R}{R_0} u_i \quad (3-34)$$

由式(3-34)可见,全桥差动电路同样没有非线性误差,其灵敏度为

$$K = \frac{u_o}{\Delta R/R_0} = u_i \quad (3-35)$$

其灵敏度为单臂电桥 4 倍。

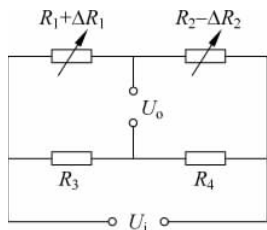


图 3-4 半桥差动电路

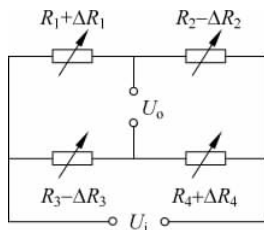


图 3-5 全桥差动电路

3) 高内阻恒流源电桥

恒流源电桥的接法是使电桥工作臂支路中的电流不随 ΔR_1 的变化而变化,或者尽量变

化小些,从而减小非线性误差,如图 3-6 所示。电桥输出电压为

$$\begin{aligned} u_o &= I \left(\frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} R_1 - \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} R_3 \right) \\ &= \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I \end{aligned} \quad (3-36)$$

初始时满足 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时,电桥平衡,测量时 $R'_1 = R_1 + \Delta R_1$,令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$,则电桥输出电压为

$$u_o = \frac{R(R + \Delta R) - R^2}{4R + \Delta R} I = I \frac{R \Delta R}{4R + \Delta R} = \frac{1}{4} IR \frac{\Delta R/R}{1 + \frac{1}{4} \Delta R/R} \quad (3-37)$$

对式(3-37)进行级数展开,得

$$u_o = \frac{1}{4} IR \frac{\Delta R}{R} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} + \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \right)^2 - \dots \right] \quad (3-38)$$

则恒流源电桥的灵敏度为

$$K = \frac{u_o}{\Delta R/R_0} = \frac{1}{4} IR \frac{\Delta R}{R} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} + \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \right)^2 - \dots \right] \approx \frac{1}{4} IR \quad (3-39)$$

非线性误差为

$$\begin{aligned} \delta &= \left| \frac{u_o - u'_o}{u'_o} \right| \times 100\% = \left| \frac{\frac{1}{4} IR \frac{\Delta R/R}{1 + \frac{1}{4} \Delta R/R} - \frac{1}{4} IR \frac{\Delta R}{R}}{\frac{1}{4} IR \frac{\Delta R}{R}} \right| = \left| \frac{-\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}} \right| \\ &= \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} + \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \right)^2 - \dots \right] \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \end{aligned} \quad (3-40)$$

由式(3-40)可见非线性误差比恒压源单臂桥减少一半。

3. 有源电桥

有源电桥的测量电路如图 3-7 所示,工作应变片安装在运放电路的反馈端,根据运放电路知识可知

$$V_+ = \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_i \quad (3-41)$$

由于 $V_+ = V_-$,可得电桥的输出为

$$u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) V_+ - \frac{R_1}{R_2} u_i = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_i - \frac{R_1}{R_2} u_i = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4) R_2} u_i \quad (3-42)$$

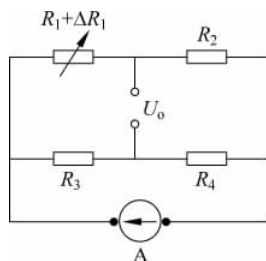


图 3-6 恒流源电桥

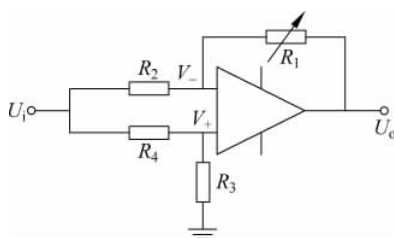


图 3-7 有源电桥电路