

2.4 电阻应变片的测量电路

要把应变片的微小应变引起的微小电阻值的变化测量出来，还要把电阻的相对变化转换为电压或电流（一般为电压），以使用现成的仪器、仪表进行检测，就需要设计专门的测量电路，常用的测量电路是直流电桥和交流电桥。

2.4.1 直流电桥

直流电桥线路由连接成环形的四个电阻所组成，如图 2-11 所示。

1. 平衡条件

在图 2-11 所示的电路中，当 $R_L \rightarrow \infty$ 时，电桥输出电压为

$$U_o = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-24)$$

当电桥平衡时， $U_o = 0$ ，所以

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

或

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-25)$$

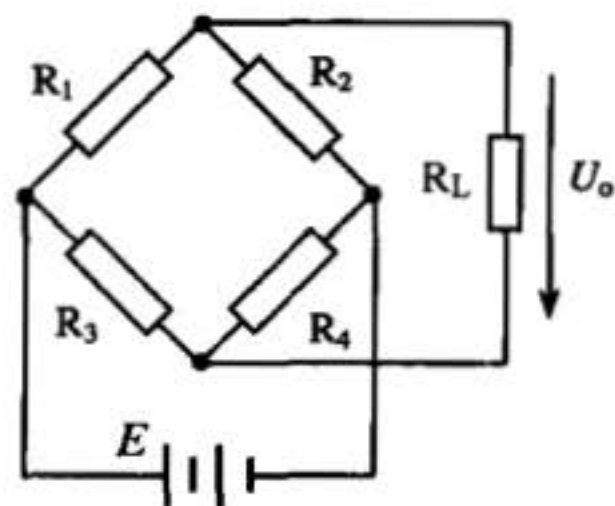


图 2-11 直流测量电桥

2. 电压灵敏度

若 R_1 由应变片替代，当电桥开路时，不平衡电桥输出的电压为

$$\begin{aligned} U_o &= E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3 + \Delta R R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \\ &= E \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = E \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \end{aligned} \quad (2-26)$$

设桥臂比 $n = \frac{R_2}{R_1}$ ，由于 $\Delta R_1 \ll R_1$ ， $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 可忽略，再把 (2-25) 式代入 (2-26) 式，可近似得出

$$U_o \approx E \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = U'_o \quad (2-27)$$

电桥的灵敏度为

$$S_v = \frac{U_o}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} \approx E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (2-28)$$

分析 (2-28) 式可知：

- ① 电桥的灵敏度 S_V 正比于供桥电压 E ;
 ② 电桥的灵敏度 S_V 是桥臂比的函数。

当供桥电压 E 确定后, 由 $\frac{\partial S_V}{\partial n} = 0$, 可求 S_V 的最大值, 得

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

求得 $n=1$ 时, S_V 为最大, 即在供桥电压 E 确定后, 当 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ 时, 电桥的灵敏度最高。此时可分别将 (2-26) 式、(2-27) 式、(2-28) 式简化为

$$U_o = \frac{1}{4} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (2-29)$$

$$U'_o \approx \frac{1}{4} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-30)$$

$$S_V = \frac{1}{4} E \quad (2-31)$$

由上面三式可知: 当供桥电压和电阻相对变化一定时, 电桥的输出电压及其灵敏度也是定值, 且与各桥臂阻值大小无关。

3. 非线性误差及其补偿方法

(1) 非线性误差

实际的非线性特性曲线与理想的线性特性曲线的偏差称为绝对非线性误差。绝对非线性误差与理想的线性特性曲线的比称为相对非线性误差, 用 r 表示, 即

$$r = \frac{U_o - U'_o}{U'_o} = \frac{U_o}{U'_o} - 1 = \frac{\left(\frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) E}{\left[1 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right] \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} - 1$$

$$= \frac{\left(\frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) E}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} - 1 \quad (2-32)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}} - 1 = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}} - 1 = \frac{-\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}}$$

通常的测量中 ϵ 甚小, 故常用 10^{-6} 作单位, 称为微应变, 以 “ μ ” 表示。例如 $\epsilon = 0.001$, 就可以表示为 $\epsilon = 1000\mu$, 称为 1000 微应变。对于金属应变片, 由于其灵敏系数 K 比较小, 电阻变化就较小, 根据上式可知, 其非线性误差也较小。但对于半导体应变片, 由于其灵敏系数 K 比较高, 电阻变化就较大, 代入上式计算, 其非线性误差较大。例如 $K=2$ 和 $K=150$ 时, 若 $\epsilon=1000\mu$, 则 $\Delta R_1/R_1$ 分别是 0.001 和 0.150, 非线性误差分别是 0.05% 和 7%。所以对半导体应变片的测量电路必须做一些处理, 才能减小非线性误差。

(2) 减小或消除非线性误差的方法

第一种方法是提高桥臂比。

从(2-32)式可知,提高桥臂比 n , 可使非线性误差减小; 但由(2-28)式又可知, n 增大, 电桥电压灵敏度 S_V 将降低, 为了不降低 S_V , 必须适当提高供桥电压 E 。

第二种方法是采用差动电桥。

① 半桥差动。如果桥臂电阻 R_1 和邻边桥臂电阻 R_2 都由应变片替代, 且使一个应变片受拉, 另一个受压, 这种接法称为半桥差动工作电路, 如图 2-12 所示。当电桥开路时, 不平衡电桥输出的电压为

$$U_o = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-33)$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2, R_1 = R_2, R_3 = R_4$, 则

$$U_o = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-34)$$

由(2-34)式可知: U_o 与 $\Delta R_1/R_1$ 为线性关系, 即差动电桥无非线性误差; 且电压灵敏度 $S_V = E/2$, 比使用单只应变片提高了一倍。另外, 因为接入电路的两只应变片感受的温度变化是完全相同的, 所以, 此电路还可以起到温度补偿的作用(参见 2.3.2 温度补偿中的电桥补偿法)。

② 全桥差动。如果四个桥臂电阻都由应变片替代, 且使两个应变片受拉, 另两个受压, 并将应变符号相同的应变片接到相对的桥臂上, 这种接法称为全桥差动工作电路, 如图 2-13 所示。

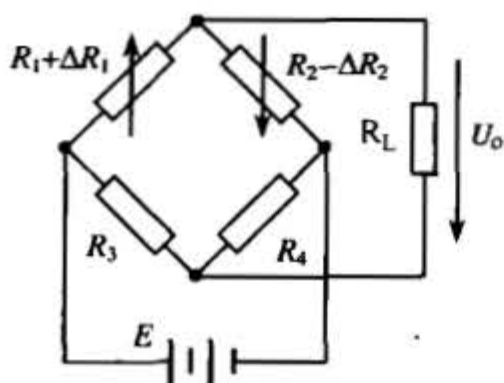


图 2-12 半桥差动电路

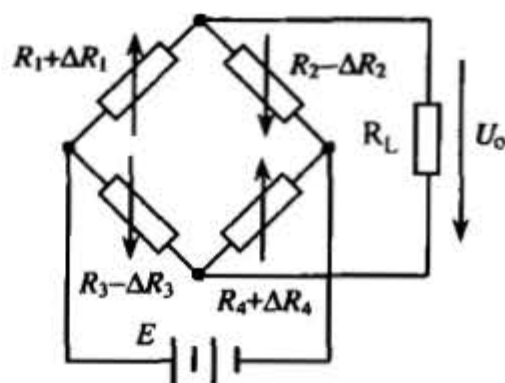


图 2-13 全桥差动电路

若满足 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$, 当电桥开路时, 不平衡电桥输出的电压为

$$U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-35)$$

可见, 全桥差动电路也没有非线性误差。电压灵敏度 $S_V = E$, 是使用单只应变片的 4 倍, 比半桥差动提高了一倍。同样, 应变片由于温度变化而引起的阻值变化也可以被补偿(参见 2.3.2 温度补偿中的电桥补偿法)。

直流电桥优点很多, 高稳定直流电源容易获得, 输出是直流量, 精度较高; 其连接导线要求低, 不会引起分布参数; 在实现预调平衡时电路简单, 仅需对纯电阻加以调整即可。

但直流电桥也存在一些缺点, 如容易引入工频干扰, 而且因为应变电桥输出电压都很小, 后续电路要采用直流放大器, 容易产生零点漂移, 线路也较复杂。所以作动态测量时难以采用直流电桥。

2.4.2 交流电桥

由于直流放大器容易产生零点漂移, 因此目前常采用交流放大器。相应地, 用于测量应

变变化而引起的电阻变化的电桥电路就采用交流电桥。交流电桥的电路结构形式与直流电桥相同，但在电路具体实现上与直流电桥有两个不同点：一是其激励电源是高频交流电压源或电流源（电源频率一般是被测信号频率的 10 倍以上）；二是交流电桥的桥臂可以是纯电阻，但也可以是包含有电容、电感的交流阻抗。

1. 交流电桥的平衡条件

图 2-14 所示的交流电桥的输出电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_o &= \dot{U}_{AC} \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \\ &= \dot{U}_{AC} \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \end{aligned} \quad (2-36)$$

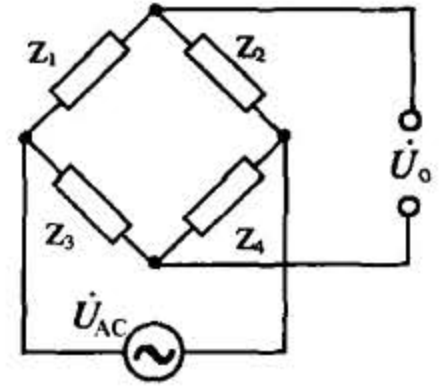


图 2-14 交流电桥

所以桥路平衡条件为

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3, \text{ 或 } \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2-37)$$

设各桥臂阻抗为

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + jx_1 = z_1 \exp(j\varphi_1) \\ Z_2 &= r_2 + jx_2 = z_2 \exp(j\varphi_2) \\ Z_3 &= r_3 + jx_3 = z_3 \exp(j\varphi_3) \\ Z_4 &= r_4 + jx_4 = z_4 \exp(j\varphi_4) \end{aligned} \quad (2-38)$$

式中： $r_1 \sim r_4$ 和 $x_1 \sim x_4$ 分别为各桥臂的电阻和电抗；

$z_1 \sim z_4$ 和 $\varphi_1 \sim \varphi_4$ 分别为各复阻抗的模值和幅角。

由此可得交流电桥平衡条件的另一种形式：

$$\begin{cases} z_1 z_4 = z_2 z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \quad (2-39)$$

其物理含义是交流电桥要达到平衡，需使该电桥的四个桥臂中对边阻抗的模乘积相等，对边阻抗角之和相等。所以交流电桥的平衡较之直流电桥要复杂一些。

交流电桥的平衡条件也可以写成下面的形式：

$$\begin{cases} r_1 r_4 - r_2 r_3 = x_1 x_4 - x_2 x_3 \\ r_1 x_4 + r_4 x_1 = r_2 x_3 + r_3 x_2 \end{cases} \quad (2-40)$$

2. 交流电桥的不平衡输出

① 单臂交流电桥时，其输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{1}{4} \dot{U}_{AC} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (2-41)$$

② 半桥差动电路时，其输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{1}{2} \dot{U}_{AC} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (2-42)$$

③ 全桥差动电路时，其输出电压为

$$\dot{U}_o = \dot{U}_{AC} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (2-43)$$

3. 交流电桥的调平

由于引线产生的分布电容的容抗(引线电感忽略)、供电电源的频率及被测应变片的性能差异,交流电桥的初始平衡条件和输出特性都受到严重影响,因此必须对电桥预调平衡。

当电桥用交流电供电时,导线间存在分布电容,这相当于在应变片上并联了一个电容,如图 2-15 (a) 所示。所以在调节平衡时,除了考虑阻抗模的平衡条件,还要考虑阻抗角的平衡条件。图 2-15 (b) 所示为纯电阻交流电桥的调平电路。电容 C 为差动可变电容器。调节 C 时,左右两部分电容一增一减,使并联到两相邻桥臂的电容值发生改变,以达到相位平衡条件。但同时,复数阻抗的模也会发生改变,这就需要调节 R 来满足模的平衡条件。相位与模交叉影响,需反复调节才能达到最终的平衡。

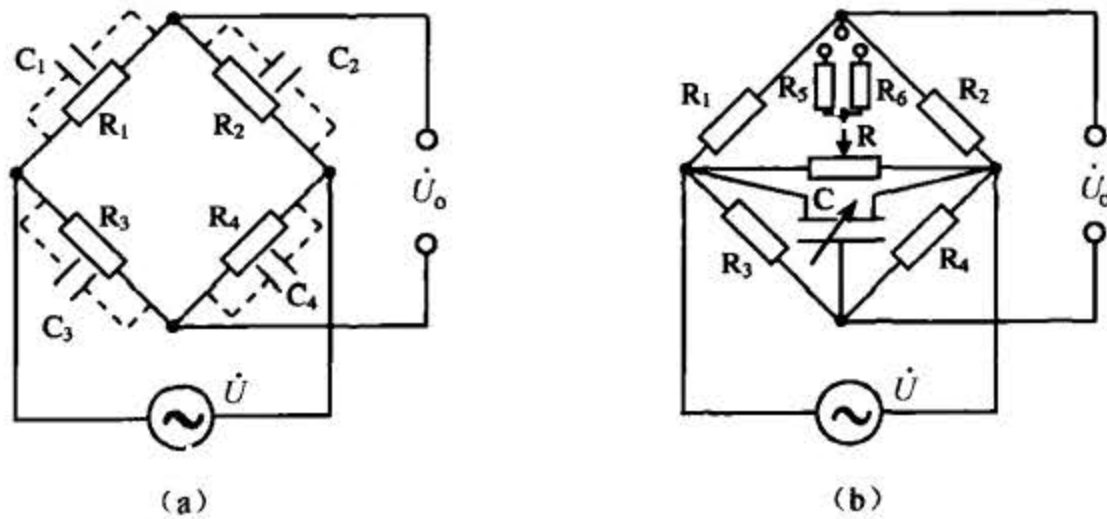


图 2-15 交流电桥平衡调节

2.4.3 恒流源电桥

要减小半导体应变电桥的非线性误差,除了提高桥臂比、采用差动电桥等措施外,还要求通过各桥臂的电流要稳定。故半导体应变电桥的电源一般采用恒流源。

1. 电桥输出电压与电阻变化量的关系

在如图 2-16 所示的电路中,供桥电流为 I , 通过各臂的电流为 I_1 的 I_2 , 若测量电路输入阻抗较高, 则

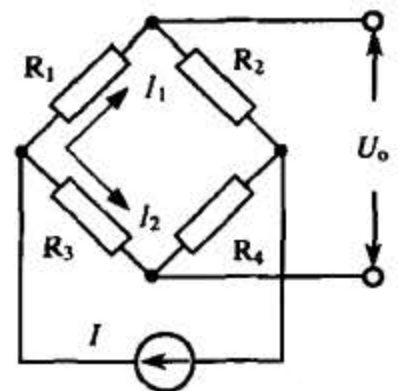


图 2-16 恒流源电桥

$$\begin{cases} I_1(R_1 + R_2) = I_2(R_3 + R_4) \\ I = I_1 + I_2 \end{cases}$$

解此方程组得

$$I_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

$$I_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

输出电压为

$$U_o = I_1 R_1 - I_2 R_3 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

若电桥初始平衡, 且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。当第一桥臂电阻 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_1$ 时, 电桥输出电压为

$$U_o = \frac{R \Delta R}{4R + \Delta R} I = \frac{1}{4} I \Delta R \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{4R}} \quad (2-44)$$

若依然忽略 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$, 则此时

$$U_o \approx \frac{1}{4} I \Delta R = U'_o \quad (2-45)$$

电桥的输出电压与电阻的变化量成正比, 即与被测量成正比。输出电压与恒流源供给的电流大小、精度有关, 而且电桥的输出电压与温度无关, 不受温度影响。该电路的缺点是需要配备一个恒流源, 使用不方便。

2. 非线性误差

使用恒流源的非线性误差为

$$r_I = \frac{U_o}{U'_o} - 1 = \frac{-\Delta R}{4R + \Delta R} = \frac{-\frac{\Delta R}{4R}}{1 + \frac{\Delta R}{4R}} \approx -\frac{\Delta R}{4R} \quad (2-46)$$

而由 (2-32) 式可知, 若采用恒压源, 取 $R_1 = R_2$ 时, 非线性误差为

$$r_E = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} - 1 = \frac{-\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}} \approx -\frac{\Delta R}{2R}$$

可见, 采用恒流源供电时的非线性误差比采用恒压源供电时的非线性误差减少近 1/2。