不同(一个为正,一个为负)的特性,将二者串联绕制成敏感栅,如图 2-13 所示。若两段敏感栅 R_1 和 R_2 由于温度变化而产生的电阻变化为 ΔR_{1t} 和 ΔR_{2t},大小相等且符号相反,就可以实现温度补偿。ΔR_1 与 ΔR_2 的关系可由下式决定:

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{|\Delta R_{2t}|/R_2}{|\Delta R_{1t}|/R_1} \tag{2-15}$$

其中,$\Delta R_{1t}=-\Delta R_{2t}$。

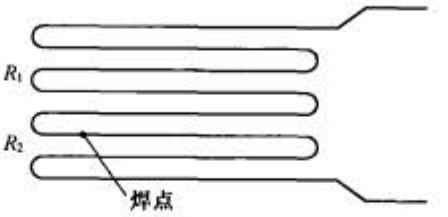


图 2-13 电阻温度系数符号不同的双金属敏感栅自补偿应变计

这种补偿效果较前者好,在工作温度范围内通常可达到±0.14με/℃。

2.1.4 应变片式电阻传感器的测量电路

应变片将试件应变 ε 转换成电阻相对变化 $\Delta R/R$,为了能用电测仪器进行测量,还必须将 $\Delta R/R$ 进一步转换成电压或电流信号,这种转换通常采用各种电桥线路。根据电源的不同,可将电桥分为直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥的特性方程及平衡条件

图 2-14 为由桥臂 R_1、R_2、R_3、R_4 组成的直流电桥。

直流电桥的特性方程是指电桥对角端负载电流 I_t 与各桥臂参数和电源电压的关系式。利用等效电源定理,a、b 两端的开路电压和内阻分别为

$$e=U\frac{R_4R_1-R_2R_3}{(R_3+R_4)(R_1+R_2)} \tag{2-16}$$

$$R=\frac{R_1R_2(R_3+R_4)+R_4R_3(R_1+R_2)}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{2-17}$$

平衡时有 $R_1R_4-R_2R_3=0$,上式称为直流电桥平衡条件,它说明欲使电桥达到平衡,其相邻两臂的比值应相等,即

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4} \tag{2-18}$$

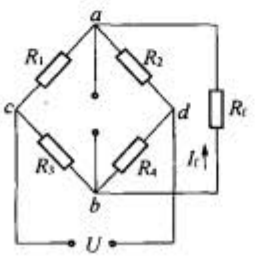


图 2-14 直流电桥

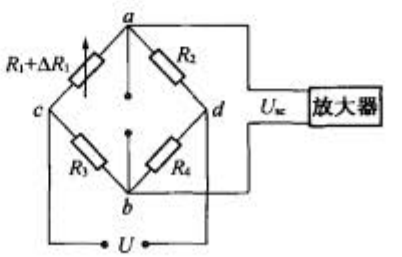


图 2-15 R_1 为工作臂时的直流电桥

2. 直流电桥的电压灵敏度

电阻应变计工作时，其电阻变化很微小。例如，1 片 $k=2$，初始电阻 120 Ω 的应变计，受到 1 000 微应变时，其电阻变化仅 0.24 Ω。引起的不平衡电压极小，不能用它来直接推动指示仪表，故需加以放大。这时感兴趣的是电桥输出电压。一般放大器的输入阻抗较电桥的内阻要高得多，可认为电桥输出端处于开路状态。如图 2-15 所示，设 R_1 为电桥工作臂，受应变时，其电阻变化为 ΔR_1，R_2、R_3、R_4 均为固定桥臂。在起始时，电桥处于平衡状态，此时 $U_{sc}=0$。当有 ΔR_1 时，电桥输出电压为

$$U_{sc}=U\frac{\dfrac{R_4}{R_3}\cdot\dfrac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1+\dfrac{\Delta R_1}{R_1}+\dfrac{R_2}{R_1}\right)\left(1+\dfrac{R_4}{R_3}\right)} \tag{2-19}$$

设 $n=R_2/R_1$，考虑到起始平衡条件，并略去分母中的 $\dfrac{\Delta R_1}{R_1}$ 项，得

$$U_{sc}=U\frac{n}{(1+n)^2}\cdot\frac{\Delta R_1}{R_1} \tag{2-20}$$

$$K_u=\frac{\dfrac{U_{sc}}{\Delta R_1}}{\dfrac{R_1}{R_1}}=U\frac{n}{(1+n)^2} \tag{2-21}$$

K_u 称为电桥的电压灵敏度。K_u 愈大，说明应变计电阻相对变化相同的情况下，电桥输出电压愈大，电桥愈灵敏。由上式知，欲提高 K_u，必须提高电源电压，但它受应变计允许功耗的限制。另外就是选择适当的桥臂比 n。

当 $n=1$ 时，K_u 为最大。这就是说，在电桥电压一定，当 $R_1=R_2$，$R_3=R_4$ 时，电桥的电压灵敏度最高。通常这种情况称为电桥的第一种对称形式。而 $R_1=R_3$，$R_2=R_4$ 则称为电桥的第二种对称形式。第一种对称形式有较高的灵敏度，第二种对称形式线性较好。等臂电桥是其中的一个特例，由 $U_{sc}=\dfrac{1}{4}U\dfrac{\Delta R}{R_1}$ 可知，当电源电压及电阻相对变化一定时，电桥的输出电压及其电压灵敏度将与各桥臂阻值的大小无关。当 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 时，为全等臂电桥。全等臂电桥是 $n=1$ 时的一种特例，是应变式传感器中常采用的形式。

全等臂直流电桥单臂、双臂、全桥工作时的情况讨论如下：

(1) 单臂电桥

图 2-16 中，$R_1=R_2=R_3=R_4=R$，$\Delta R=\Delta R_1$，单臂工作时，只有一臂工作，即 $R+\Delta R_1$，可得

$$U_{sc}\approx\frac{U}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{2-22}$$

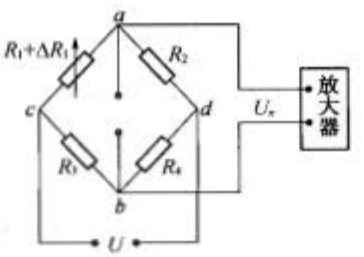
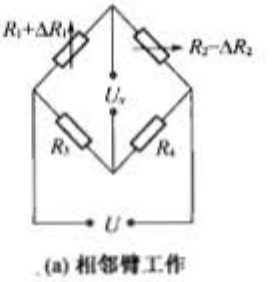
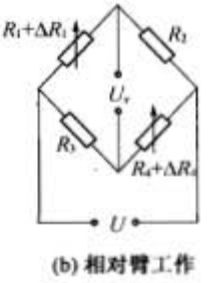


图 2-16　单臂工作电桥



(a) 相邻臂工作



(b) 相对臂工作

图 2-17　双臂工作电桥

(2) 双臂电桥

当相邻臂工作时，如图 2-17 所示，一臂为 $R_1+\Delta R_1$，另一臂为 $R_2+\Delta R_2$，由于 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$，而 $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R$，所以

$$U_{sc}=\frac{U}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{2-23}$$

同理相对臂工作时，一臂为 $R_1+\Delta R_1$，另一臂为 $R_4+\Delta R_4$ 时，也可导出

$$U_{sc}\approx\frac{U}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{2-24}$$

(3) 全桥

全桥工作时，电路如图 2-18 所示，可推出

$$U_{sc}=U\frac{\Delta R}{R} \tag{2-25}$$

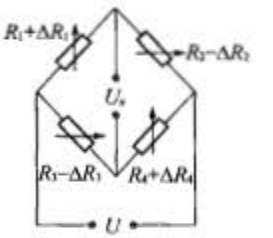


图 2-18 全桥电路

比较三种结构，全桥灵敏度最高，双臂工作的差动电桥灵敏度次之，单臂电桥灵敏度最低。

3. 交流电桥的平衡条件和电压输出

当采用交流供桥载波放大时，应变电桥也需交流电源供电。应变电桥各臂一般是由应变计或无感精密电阻组成，是纯电阻电桥。但在交流电源供电时，需要考虑分布电容的影响，这相当于应变计并联一个电容，如图 2-19(a)所示。此时桥臂已不是纯电阻性的，这就需要分析各桥臂均为复阻抗时一般形式的交流电桥。交流电桥的一般形式如图 2-19(b)所示，其中 Z_1、Z_2、Z_3、Z_4 为复阻抗。其电源电压、输出电压均应用复数表示。

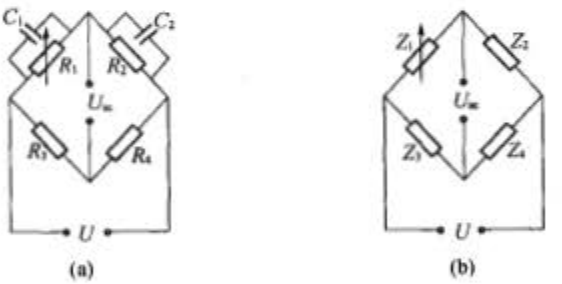


图 2-19 复阻抗时一般形式的交流电桥

输出电压的特性方程为

$$\dot{U}_{sc}=\dot{U}\frac{Z_1Z_4-Z_2Z_3}{(Z_1+Z_2)(Z_3+Z_4)}=\dot{U}\frac{\frac{Z_4}{Z_3}\cdot\frac{\Delta Z_1}{Z_1}}{(1+\frac{Z_2}{Z_1}+\frac{\Delta Z_1}{Z_1})(1+\frac{Z_4}{Z_3})} \tag{2-26}$$

所以平衡条件为 $Z_1Z_4-Z_2Z_3=0$ 或 $\frac{Z_1}{Z_2}=\frac{Z_3}{Z_4}$。

若设电桥臂阻抗为

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + jX_1 = z_1 e^{j\varphi_1} \\ Z_2 &= r_2 + jX_2 = z_2 e^{j\varphi_2} \\ Z_3 &= r_3 + jX_3 = z_3 e^{j\varphi_3} \\ Z_4 &= r_4 + jX_4 = z_4 e^{j\varphi_4} \end{aligned} \tag{2-27}$$

则交流平衡条件可以写为

$$\begin{cases} \dfrac{z_1}{z_2} = \dfrac{z_3}{z_4} \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \tag{2-28}$$

交流电桥的平衡条件与直流电桥的不同，需要满足两个方程式，即不仅各桥臂复阻抗的模必须满足一定的比例关系，而且相对桥臂的幅角和必须相等。

考虑到电桥的起始平衡条件并略去分母中含 ΔZ_1 项，得

$$\begin{cases} \dot{U}_{sc} = \dfrac{1}{4}\dot{U}\dfrac{\Delta Z_1}{Z_1} \\ Z_1 = \dfrac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \\ \Delta Z_1 = \dfrac{\Delta R_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)^2} \end{cases} \tag{2-29}$$

2.1.5　应变式传感器的应用

电阻应变丝、片，除直接用来测定试件的应变和应力外，还广泛用作传感元研制成各种应变式传感器，用来测定其他物理量，如力、压力、扭矩、加速度等。

1. 应变式测力与称重传感器

应变式测力传感器由弹性体、应变计和外壳组成。弹性体是测力传感器的基础，应变计是传感器的核心。根据弹性体结构形式的不同可分为：柱式、轮辐式、梁式、环式等。

(1) 柱式传感器

柱式传感器是称重(或测力)传感器应用较普遍的一种形式。它分为圆筒形和柱形两种。图 2-20 画出了传感器的结构示意图，其结构是在圆筒或圆柱上按一定方式贴上应变计。圆筒或圆柱在外力 F 作用下产生的应变为

$$\varepsilon = \frac{T}{E} = \frac{F}{AE} \tag{2-30}$$

一般将应变计对称地贴在应力均匀的圆柱表面的中间部分，如图 2-21(a)所示，并连接成图 2-21(b)所示的桥路：T_1 和 T_3，T_2 和 T_4 分别串联，放在相对臂内。当一方受拉时，则另一方受压。由此引起的电阻应变计阻值的变化大小相等、符号相反，从而减小弯矩的影响。横向粘贴的应变计作为温度补偿片。