

实验七 电阻应变片传感器灵敏度的测量

在众多的传感器中，有一大类是通过电阻参数的变化来实现电测非电量目的的，它们统称为电阻式传感器。由于各种电阻材料受被测量(如位移、应变、压力、温度、加速度等)作用转换成电阻参数变化的机理各不相同，因而电阻式传感器的种类多且应用范围广。其中常用的就是利用某些金属或半导体材料制成的电阻应变片传感器，它是一种力敏传感器。

【实验目的】

1. 了解电阻应变片传感器的转换原理；
2. 掌握电阻应变片直流电桥的工作原理和特性；
3. 利用电阻应变片直流电桥测量传感器的电压输出灵敏度。

【实验原理】

1. 应变片的转换原理

电阻应变片传感器由粘贴了电阻应变敏感元件的弹性元件和变换测量电路组成。被测力学量作用在一定形状的弹性元件上(如悬臂梁等)使之产生变形。这时，粘贴在其上的电阻应变敏感元件将力学量引起的形变转化为自身电阻值的变化，再由变换测量电路将电阻的变化转化为电压变化后输出。

工程中使用最多的电阻应变敏感元件是金属箔或半导体电阻应变片。

考查一段圆截面的导体(金属丝)，图1，设其长为 L ，截面积为 A (直径为 D)，原始电阻为 R

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

式中， ρ 为金属丝的电阻率。

当金属丝受到轴向力 F 而被拉伸(或压缩)产生形变，其电阻值会随之变化。通过对(1)式两边取对数后再取全微分得：

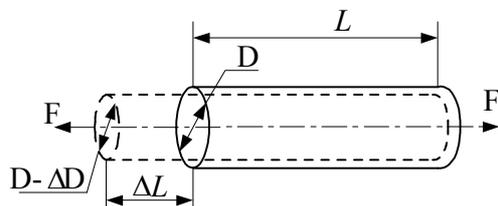


图1 金属丝拉伸后的电阻变化

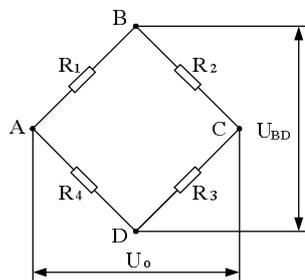


图2 直流电桥原理

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2)$$

式中 $\frac{dL}{L} = \varepsilon$ 为材料轴向线应变, 且 $\frac{dA}{A} = 2\frac{dD}{D}$. 根据材料力学, 在金属丝单向受力状态下, 有

$$\frac{dD}{D} = -\mu \frac{dL}{L} \quad (3)$$

式中 μ 为导体材料的泊松比. 因此, 有

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (4)$$

实验发现, 金属材料电阻率的相对变化与其体积的相对变化间的关系为

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \cdot \frac{dV}{V} \quad (5)$$

式中, c 为常数 (由一定的材料和加工方式决定), $\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} = (1 - 2\mu)\varepsilon$. 将式 (5) 代入 (4), 且当 $\Delta R \ll R$ 时, 可得

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\mu) + c(1 - 2\mu)]\varepsilon = K\varepsilon \quad (6)$$

式中, $K = (1 + 2\mu) + c(1 - 2\mu)$ 为金属丝材料的应变灵敏系数.

上式表明, 金属材料电阻的相对变化与其线应变成正比. 这就是金属材料的应变电阻效应.

2. 电桥的工作原理和特性

(1) 电桥的工作原理

图 2 是一个直流电桥. A、C 端接直流电源, 称供桥端, U_0 称供桥电压; B、D 端接测量仪器, 称输出端

$$U_{BD} = U_{BC} + U_{CD} = U_0 \left[\left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right] \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 当电桥输出电压为零时电桥处于平衡状态. 为保证测量的准确性, 在实测之前应使电桥平衡 (称为预调平衡).

(2) 电桥的加减特性

电桥的四个桥臂都由应变片组成, 则工作时各桥臂的电阻状态都将发生变化(电阻拉伸时, 阻值增加; 电阻压缩时, 阻值减小), 电桥也将有电压输出. 当供桥电压一定且 $\Delta R_i \ll R_i$ 时,

$$dU = \frac{\partial U}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial U}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial U}{\partial R_3} dR_3 + \frac{\partial U}{\partial R_4} dR_4 \quad (8)$$

其中 $U = U_{BD}$.

对于全等臂电桥, $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, 各桥臂应变片灵敏系数相同, 上式可简化为

$$dU = \frac{U_0}{4} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \quad (9)$$

当 $\Delta R_i \ll R$ 时, 此时可用电压输出增量式表示

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{U_0 K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

式(10)为电桥转换原理的一般形式, 现讨论如下:

(a) 当只有一个桥臂接应变片时(称为单臂电桥), 桥臂 R_1 为工作臂, 且工作时电阻由 R 变为 $R+\Delta R$, 其余各臂为固定电阻 R ($\Delta R_2=\Delta R_3=\Delta R_4=0$), 则式(10)变为

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U_0}{4} K \varepsilon \quad (11)$$

(b) 若两个相邻臂接应变片时(称为双臂电桥, 即半桥), (见图3)即桥臂 R_1 、 R_2 为工作臂, 且工作时电阻有增量 ΔR_1 、 ΔR_2 , 而 R_3 和 R_4 臂为固定电阻 R ($\Delta R_3=\Delta R_4=0$). 当两桥臂电阻同时拉伸或同时压缩时, 则有 $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R$, 由式(10)可得 $\Delta U=0$. 当一桥臂电阻拉伸一桥臂压缩时, 则有 $\Delta R_1=\Delta R$, $\Delta R_2=-\Delta R$, 由式(10)可得

$$\Delta U = 2 \left[\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right] = 2 \left[\frac{U_0}{4} K \varepsilon \right] \quad (12)$$

(c) 当四个桥臂全接应变片时(称为全桥), (见图4), $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, 都是工作臂, $\Delta R_1=\Delta R_3=\Delta R$, $\Delta R_2=\Delta R_4=-\Delta R$, 则式(10)变为

$$\Delta U = 4 \left[\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right] = 4 \left[\frac{U_0}{4} K \varepsilon \right] \quad (13)$$

此时电桥的输出比单臂工作时提高了四倍，比双臂工作时提高了二倍。

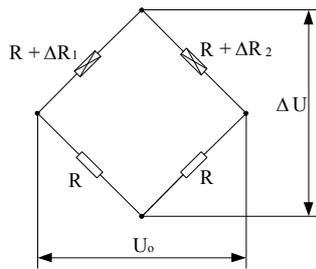


图3 两个相邻臂工作的电桥

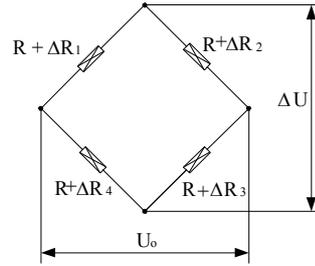


图4 全臂工作的电桥

(3) 电桥的灵敏度

电桥的灵敏度 S_u 是单位电阻变化率所对应的输出电压的大小

$$S_u = \Delta U / \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) / \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (14)$$

令
$$n = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) / \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (15)$$

则
$$S_u = n \frac{U_0}{4} \quad (16)$$

式中， n 为电桥的工作臂系数。

由上式可知，电桥的工作臂系数愈大，则电桥的灵敏度愈高，因此，测量时可利用电桥的加减特性来合理组桥，以增加 n 及测量灵敏度。

【实验仪器】

直流稳压电源 $\pm 4V$ ，金属箔式电阻应变片（两片 \updownarrow 、两片 $\nwarrow \nearrow$ ）、直流平衡电位器 W_D ，平行式单臂悬臂梁、测微头、差动放大器直流电源开关、差动放大器和数字电压表。

【实验内容】

1. 金属箔电阻应变片传感器单臂电桥灵敏度测量

- (1) 熟悉各部件配置、功能、使用方法、操作注意事项和附录等；
- (2) 开启仪器及放大器电源，放大器输出调零（输入端对地短路，输出端接电压表，增益旋钮顺时针方向轻旋到底，旋转调零旋钮使输出为零。）；
- (3) 调零后电位器位置不要变化，并关闭仪器电源；
- (4) 按图 5 将实验部件用实验线连接成测试单臂电桥。桥路中 R_2, R_3, R_4 为电桥中

固定电阻， W_D 为直流平衡调节电位器， R_1 为工作臂应变片（受力符号 \uparrow ），直流激励电源为 $\pm 4V$ 。将测微头装于悬臂梁前端的永久磁钢上，并调节使应变梁处于基本水平状态；

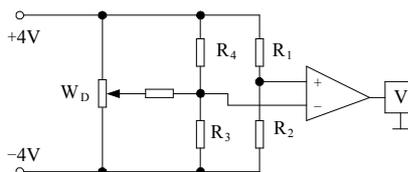


图 5

- (5) 确认接线无误后开启仪器及放大器电源，同时预热数分钟。调整电桥 W_D 电位器，使测试系统输出为零；

- (6) 旋动测微头，带动悬臂梁分别作向上和向下的运动，以水平状态下输出电压为零，向上和向下移动各 5 mm，测微头每移动 0.5 mm 记录一个放大器输出电压值，并列表：

位移 x (mm)										
电压 (V)										

- (7) 利用最小二乘法计算单臂电桥电压输出灵敏度 S ， $S = \Delta V / \Delta x$ ，并做出 $V \sim x$ 关系曲线。
- (8) 改变应变桥，接成半桥、全桥，照 (4)、(5)、(6) 和 (7) 的方法分别测量；
- (9) 比较三种应变桥的灵敏度，并做出定性的结论。

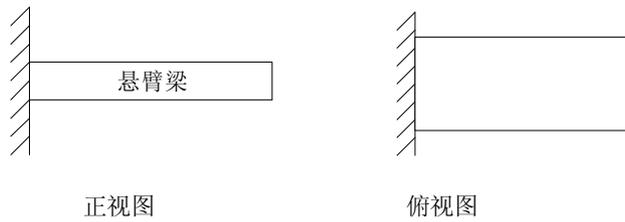
【注意事项】

1. 实验前应检查实验接插线是否完好，连接电路时应尽量使用较短的接插线，以避免引入干扰。
2. 接插线插入插孔时轻轻地做一小角度的转动，以保证接触良好，拔出时也轻轻地转动一下拔出，切记用力拉扯接插线尾部，以免造成内部导线断裂。
3. 稳压电源不能对地短路。
4. 应变片接入电桥时注意其受力方向。要接成差动形式。
5. 直流激励电压不能过大，以免造成应变片自然损坏。

【思考题】

拟在等截面的单臂悬臂梁上粘贴四个完全相同的电阻应变片组成的全桥电路，试问：

- (1) 四个应变片怎样粘贴在悬臂梁上？
- (2) 画出相应的电桥电路？



2. 右图为一应变片直流电桥,其中 $U_0 = 4V$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\ \Omega$, 试求:

(1) R_1 为金属应变片, 其余为固定电阻, 当 R_1 增量为 $\Delta R_1 = 1.2\ \Omega$ 时, 电桥输出电压 $U = ?$

(2) R_1 、 R_2 为应变片, 且批号相同, 感受应变的极性和大小都相同, R_3 、 R_4 为固定电阻, 问能否进行应变测量?

(3) 在题 (2) 中, 如 R_2 和 R_1 感受应变的极性相反, 且 $|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = 1.2\ \Omega$. 问输出电压?

(4) 由题 (1) ~ 题 (3) 能否得出什么结论或推论?

【附录】

应变梁位置和结构 (如右图) 应变梁位于仪器工作台部分的左边, 是一副平行式悬臂梁. 平行梁上梁的上表面和下梁的下表面对应地贴有八片应变片, 受力工作片分别用符号 \updownarrow 和 \blacktriangledown 表示. 其中六片为金属箔式应变片 (BHF-350). 横向所贴的两片为温度补偿片, 用符号 \leftrightarrow 和 \blacktriangleleft 表示. 片上标有 “BY” 字样的为半导体式应变片, 灵敏系数为 130.

