

虚拟仿真实验教学

电阻应变传感器灵敏度特性研究

大学物理实验室

实验内容

- 熟悉电阻应变片传感器结构，了解不同电桥线路之间的区别；
- 根据电路图正确连接线路；
- 测量单臂电桥、半桥和全桥电路重物 W 和电压 V 数据，绘制 W - V 的关系曲线；
- 计算电桥灵敏度，并将半桥和全桥电路的灵敏度与单臂电桥进行比较。

一. 实验原理——应变电阻效应

1. 应变电阻效应

一段截面积为A、直径为D、长度为L的金属导线电阻为：

$$R = \rho L / A$$

式中， ρ 为金属导线的电阻率。

两边取对数后微分，

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

式中 dL/L 是导线长度的相对变化，可用应变变量 ε 表示； dA/A 是导线截面积的变化，对截面积为圆型的导线，有 $dA/A = 2dD/D$ ；导线单向受力时，有 $dD/D = -\nu dL/L$ ， ν 是材料的泊松比。将这些关系式代入上式，可得：

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= (1 + 2\nu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \\ &= \left[(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \right] \varepsilon = k_0 \varepsilon \end{aligned}$$

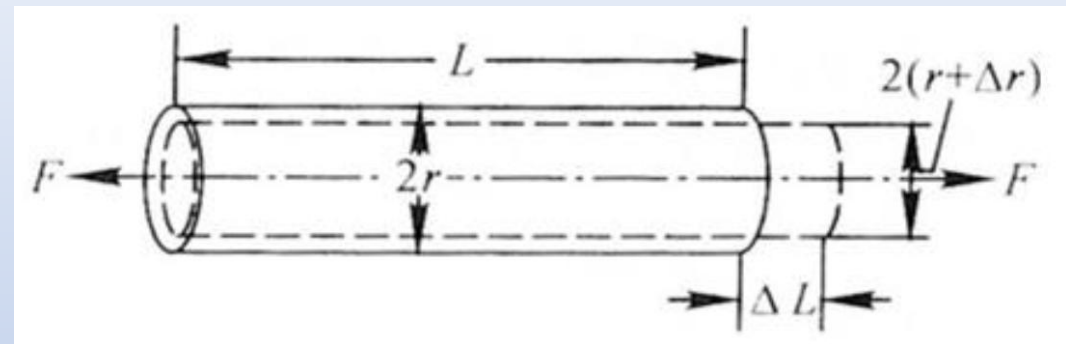


图 1 金属丝受力时几何尺寸变化示意图

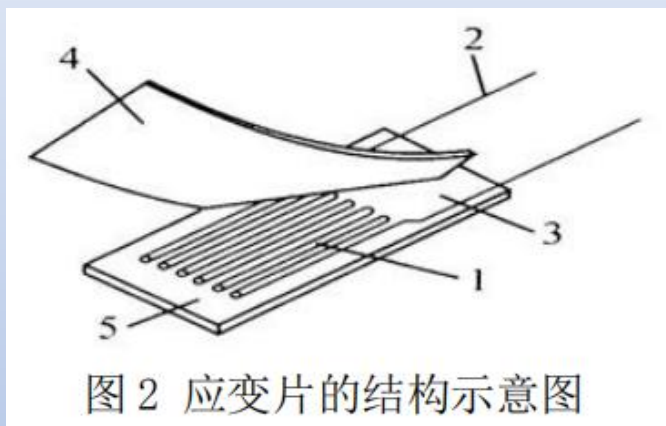
$$k_0 = (1 + 2\nu) + d\rho/\rho\varepsilon$$

k_0 为电阻应变敏感材料(元件)的灵敏系数，其意义是单位应变可产生或转换的电阻值相对变化量，由材料的性质决定。

在弹性范围内，金属材料的泊松比 ν 通常在0.25~0.4之间， $1+2\nu$ 在1.5~1.8之间，电阻率 ρ 稍有变化。一般金属材料应变敏感元件的灵敏系数值 k_0 为2左右，具体数值需通过实验测定。

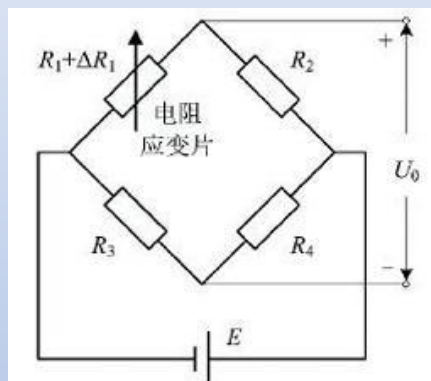
一. 实验原理——电桥电路

2. 电阻应变片

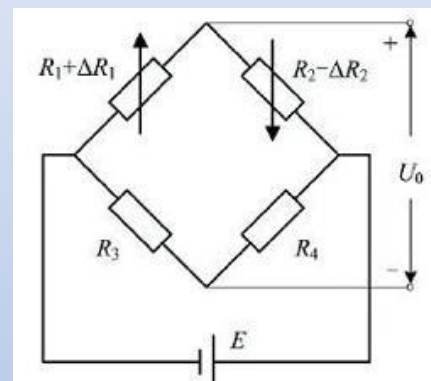


1-敏感栅;2-引线;3-粘接剂;4-盖层;5-基底

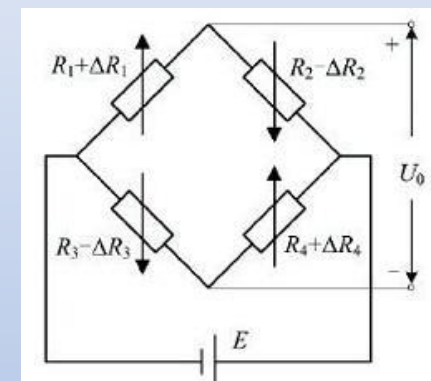
3. 电阻应变传感器的转换电路



(1) 单臂电桥



(2) 半桥电路（双臂电桥）



(3) 全桥电路（四臂电桥）

电桥平衡条件

电桥相对两臂电阻的乘积相等或相邻两臂的电阻比值相等

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ 或 } R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

一. 实验原理——电桥电路

(1) 单臂电桥

初始状态下，电桥处于平衡状态， $U_0=0$ 。在电桥电路中，只有电阻 R_1 的电阻发生变化，电阻的变化量为 ΔR_1 ，其它电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 不发生变化，此电桥为单臂电桥。当有电阻 R_1 有 ΔR_1 的改变时，电桥输出电压 U_0 为：

$$U_0 = \frac{U(R_4/R_3)(\Delta R_1/R_1)}{[1 + (R_2/R_1) + (\Delta R_1/R_1)](1 + R_4/R_3)}$$

设电桥比率 $n=R_2/R_1$ ，电桥平衡时有 $R_1/R_2=R_3/R_4$ ，略去分母中的小量 $\Delta R_1/R_1$

$$U_0 = \frac{nU}{(1+n)^2} \cdot \Delta R_1/R_1$$

电桥电压灵敏度定义为： $U_0 = k_\mu (\Delta R_1 / R_1)$

单臂电桥的电压灵敏度则可表示为： $k_\mu = nU/(1+n)^2$

当 $n=1$ 时，即 $R_1=R_2$ ， $R_3=R_4$ 时， k_μ 最大， $k_\mu = U/4$

(2) 半桥电桥或双臂电桥

双臂电桥的输出电压为：

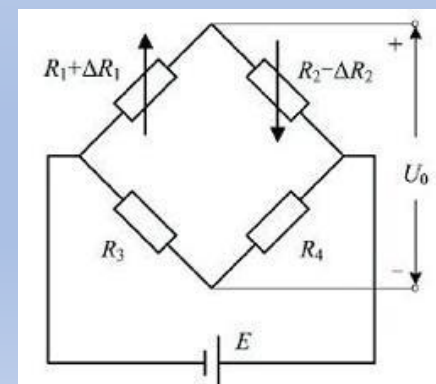
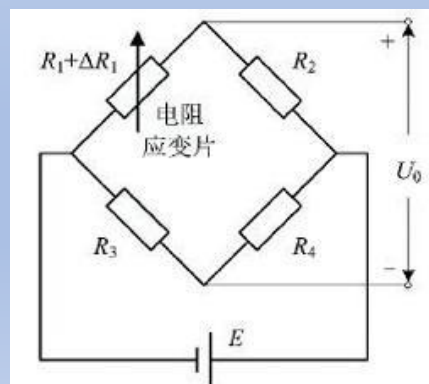
$$U_0 = U \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]$$

设电桥初始平衡时，满足：

$R_1=R_2=R_3=R_4$ ， $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ，则 $U_0 = U \cdot \Delta R_1 / 2R_1$

$$k_\mu = U/2$$

双臂电桥灵敏度比单臂电桥提高了一倍



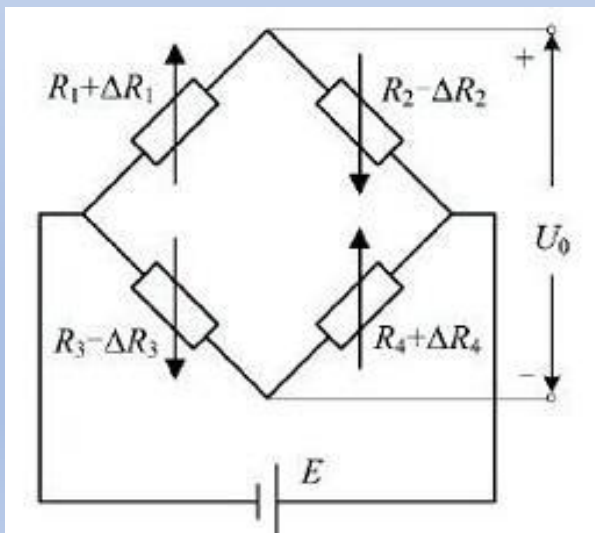
一. 实验原理——电桥电路

(3)全桥电桥或四臂电桥

设平衡电桥初始时 $R_1=R_2=R_3=R_4$ ，忽略高阶微小量，则 $U_0 = U\Delta R_1/R_1$ 。

$$k_{\mu} = U$$

四臂电桥灵敏度最高，且输出电压 U_0 与 $\Delta R_1/R_1$ 成线性关系。



4.实验用电桥电路

本实验中用到的放大器为差分放大器，实际电路图如图4所示：

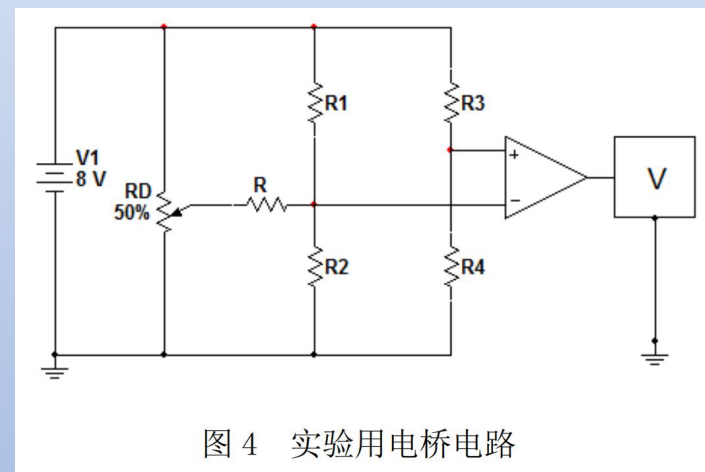


图 4 实验用电桥电路

二、实验仪器介绍——SET-N型传感器实验仪



实际仪器



仿真仪器

二、实验仪器介绍——仿真仪器操作界面



- ❑ 1 为电源的开关按钮。按下则表示电源开关打开，弹起则表示电源按钮关闭。
- ❑ 2 为电桥调零旋钮。鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，桥路电阻 R 增大；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，桥路电阻 R 减小。
- ❑ 3 为增益旋钮。鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，差动放大器增益变大，放大系数增大；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，差动放大器增益减小，放大系数减小。
- ❑ 4 为电路调零旋钮。鼠标左击旋钮，旋钮顺时针旋转，差动放大器零点电平升高；鼠标右击旋钮，旋钮逆时针旋转，差动放大器零点电平减小。
- ❑ 7、5、6 表示不同测量量程和精度。
7、5、6 的最大测量数值分别为200mV、2V、20V。
量程200mV，测量范围-199.9mV~200.0mV，精度0.1mV；
量程2V，测量范围-1.999V~2.000V，精度0.001V；
量程20V，测量范围-19.99V~20.00V，精度0.01V。

三、实验仪器调节——差动放大器调零



差动放大器调零

- ❑ 点击主电源按钮，打开SET-N型传感器实验仪的电源；
- ❑ 点击电路调零旋钮，对差动放大器调零。

四、实验数据测量——计算单臂电桥的灵敏度



(1) 单臂电桥连线

单臂电桥只连接一个工作应变片，其余三个电阻为定值电阻

(2) 单臂电桥调零

① 在差动放大器调零的基础上，打开实验仪器主电源，点击桥路调零旋钮对单臂电桥调零。

② 点击增益旋钮，确定实验中差动放大器的增益

注意：在实验过程中，请勿改变差动放大倍数和桥路调零电阻阻值

(3) 测量并记录砝码质量 W 和放砝码时电压表读数 V

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到实验仪的砝码盘上，测量增加和减少砝码时电压表的读数，本实验中共需要10个砝码。

(4) 计算单臂电桥的灵敏度

① 测量单臂电桥 V - W 曲线。分别测量增加砝码(上升曲线)和减小砝码(下降曲线)的 V - W 曲线。

② 利用最小二乘法求出上升和下降曲线的灵敏度 $S(\text{mV/g})$ ，对灵敏度取平均值，获得单臂电桥灵敏度。

四、实验数据测量——计算半桥电路的灵敏度



(1) 半桥电路连线

试验中半桥电路中的工作应变片，一片受拉力，另一片受压力，然后接入电桥的相邻两臂。

(2) 半桥电路调零

该操作与单臂电桥的调零操作方法相同。

(3) 测量并记录砝码质量 W 和放砝码时电压表读数 V

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到实验仪的砝码盘上，测量增加和减少砝码时电压表的读数，本实验中共需要10个砝码。

(4) 计算半桥电路的灵敏度

计算过程与单臂电桥的计算方法相同。

四、实验数据测量——计算全桥电路的灵敏度



(1) 全桥电路连线

全桥电路四个电阻都是应变片，实验中对臂应变片的受力方向必须相同(同时受到拉力或者压力作用)

(2) 测量并记录砝码盘上的砝码质量 W 与对应的电压表读数 V

电桥调零后，用鼠标将砝码依次拖动到实验仪的砝码盘上，测量增加和减少砝码时电压表的读数，本实验中共需要10个砝码。

(3) 计算全桥电路的灵敏度

全桥电路灵敏度的计算方法与单臂电桥灵敏度计算方法相同。

比较和讨论单臂电桥、半桥电路和全桥电路灵敏度之间的关系。

五、调节和测量注意事项——电路调零



点击电路调零旋钮，对
差动放大器调零

五、调节和测量注意事项——单臂电桥

- ① 单臂电桥只连接一个工作应变片，其余三个电阻为定值电阻
- ② 点击**桥路调零旋钮**对单臂电桥调零。
- ③ 点击**增益旋钮**，确定实验中差动放大器的增益

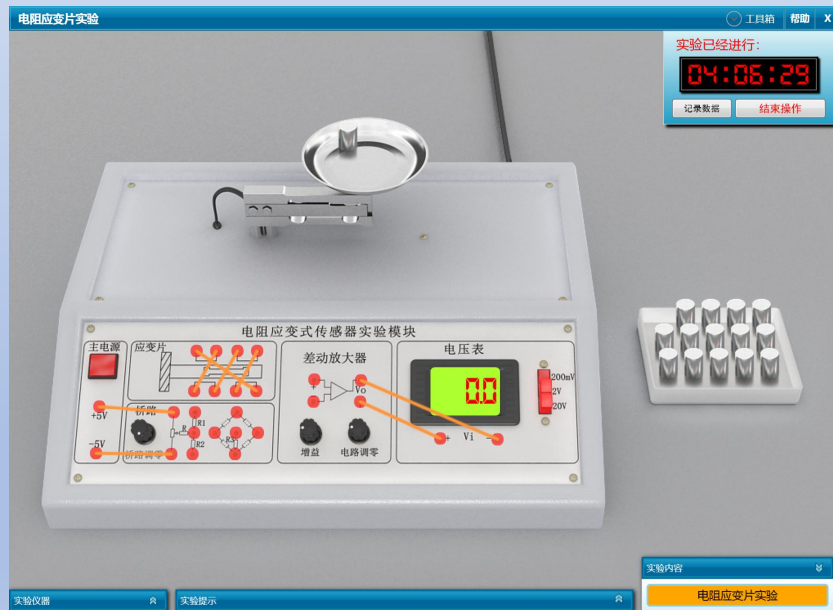


五、调节和测量注意事项——半桥电路



五、调节和测量注意事项——全桥电路

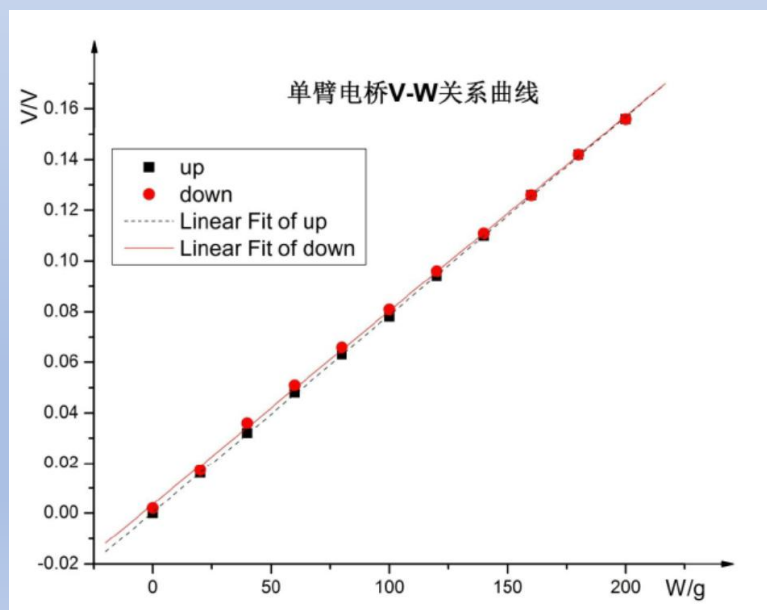
全桥电路四个电阻都是应变片，对臂应变片的受力方向必须相同



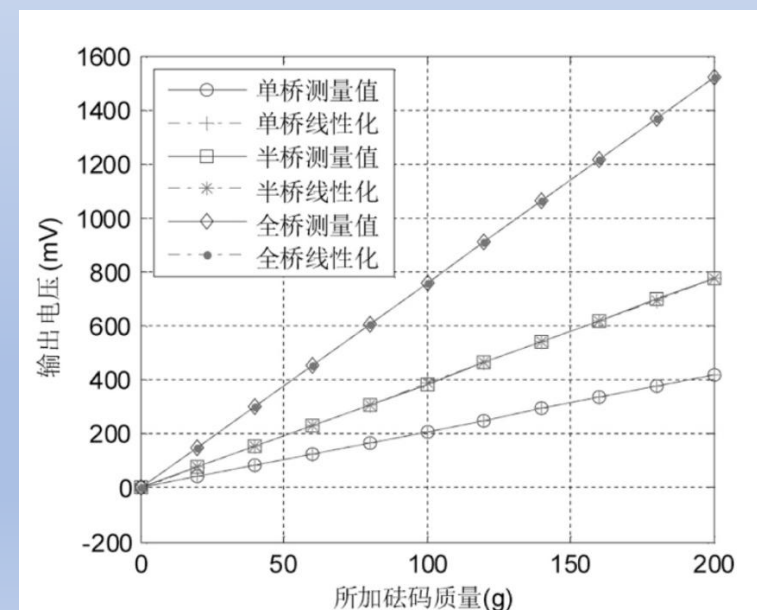
五、调节和测量注意事项——数据分析

表 1 金属应变片电阻传感器电桥电路测量数据

| 砝码质量 m/g | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
|---------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 单桥输出 U_0/mV | 1.7 | 43.3 | 84.9 | 126.6 | 168 | 209.9 | 251.3 | 292.9 | 334.5 | 376.4 | 417.4 |
| 半桥输出 U_0/mV | -0.7 | 76.4 | 153.9 | 231.4 | 308.9 | 386.2 | 463.6 | 541.8 | 619.1 | 697.1 | 774.2 |
| 全桥输出 U_0/mV | 0.3 | 151.2 | 302.6 | 454.9 | 606.9 | 758.8 | 911.1 | 1 062.8 | 1 214.6 | 1 366.6 | 1 518.0 |



- 绘制W-V曲线，利用最小二乘法求出上升和下降曲线的灵敏度 $S(mV/g)$ ，对灵敏度取平均值；
- 比较单臂、半桥和全桥电路灵敏度 S 三者之间的关系。



接下来进行虚拟仿真实验操作演示

登录网址：aryun.ustcori.com

学生登录账号：CAC+学号，密码为学号

补修的同学用虚拟账号进行登录