

北京邮电大学  
物理实验报告

实验名称 电阻应变传感器灵敏度特性研究

实验目的：

1. 掌握电阻应变片直流电桥的构造、原理及特性
2. 掌握利用非平衡电桥的原理测量压力的方法
3. 用图解法处理实验数据，比较各电桥的灵敏度

实验原理与操作步骤[基本物理思想、实验设计原理、物理公式及其意义、电路图（光路图）等；主要操作步骤]

实验原理：

1. 物理基础

如果沿导线轴线方向施加拉力或压力使之产生变形，其电阻也会随之变化，这种现象称为应变电阻效应，如图1所示，电阻应变式传感器正是基于此效应而产生的。

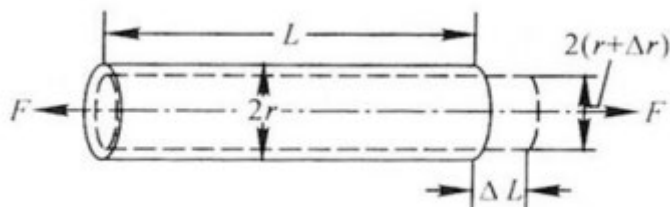


图1 金属丝受力时几何尺寸变化示意图

一段金属导线，设导线长度为 $L$ ，其截面积为 $A$ （直径为 $D$ ），导线电阻为：

$$R = \rho L / A \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为金属导线的电阻率。将式(1)两边取对数后微分可得：

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

式中 $dL/L$ 是导线长度的相对变化，可用应变 $\varepsilon$ 表示， $dA/A$ 是导线截面积的变化，对截面积为圆型的导线，有 $dA/A = 2 dD/D$ 。又根据材料力学可知，在导线单向受力时，有 $dD/D = -\nu dL/L$ ， $\nu$ 是材料的泊松比。将这些关系式代入式(2)，可得：

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} = \left[ (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \right] \varepsilon = k_0 \varepsilon \quad (3)$$

此处 $k_0$ 称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，是由材料本身的性质决定的。

$$k_0 = (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \quad (4)$$

一般的金属材料，在弹性范围内，其泊松比通常在0.25 ~ 0.4之间，因此 $1 + 2\nu$ 在1.5 ~ 1.8之间，而其电阻率也稍有变化，一般金属材料制作的应变敏感元件的灵敏系数 $k_0$ 为2左右，但其具体大小需要经过实验来测定。

2. 金属材料电阻应变片的结构

电阻应变片是常用的电阻应变敏感元件，其结构如右图2所示，由1-敏感栅、2-引线、3-粘接剂、4-盖层和5-基底等组成。其中敏感栅是用厚度为0.003 ~ 0.010mm的金属箔制成栅状或用金属丝制成。

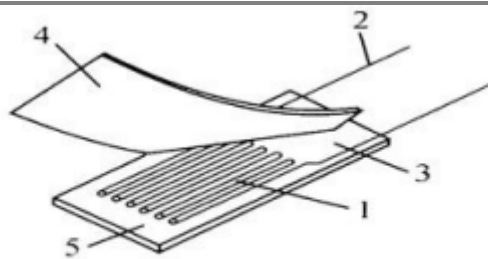
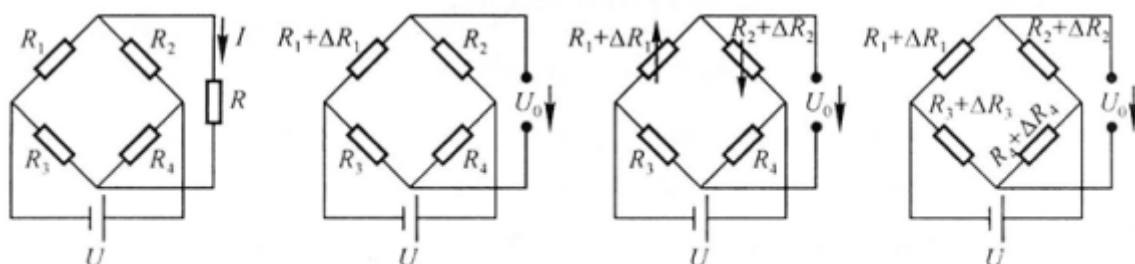


图 2 应变片的结构示意图

### 3. 电阻应变式传感器的转换电路

应变片将应变 $\varepsilon$ 转换成电阻相对变化量 $\Delta R/R$ ，为了测量 $\Delta R/R$ ，通常采用各种电桥线路。根据接入电桥桥臂的工作应变片的位置和数量，可以将电桥电路分为如图3所示的几种情况：



(a) 电桥电路

(b) 单臂电桥

(c) 半桥电路

(d) 全桥电路

图 3 电桥电路

我们知道电桥平衡的条件为：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，即

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

#### (1) 单臂电桥

在四臂电桥中，如果只有 $R_1$ 为工作应变片，由于应变而产生相应的电阻变化为 $\Delta R_1$ ，而 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 为固定电阻，则称此电桥为单臂电桥，如图3-b所示。 $U_0$ 为电桥输出电压。初始状态下，电桥处于平衡状态， $U_0 = 0$ 。当有 $\Delta R_1$ 时，电桥输出电压 $U_0$ 为：

$$U_0 = \frac{U(R_4/R_3)(\Delta R_1/R_1)}{[1 + (R_2/R_1) + (\Delta R_1/R_1)](1 + R_4/R_3)} \quad (6)$$

电桥电压灵敏度定义为：

$$k_\mu = U_0(\Delta R_1/R_1) \quad (7)$$

在式(6)中设桥臂比 $n = R_2/R_1$ ，由于电桥初始平衡时有 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ，略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$ ，可得：

$$U_0 = \frac{nU}{(1+n)^2} \cdot \Delta R_1/R_1 \quad (8)$$

于是可以得到单臂为工作应变片时的电桥电压灵敏度为：

$$k_\mu = nU/(1+n)^2 \quad (9)$$

#### (2) 半桥电桥

考虑单臂电桥中 $U$ 值的选择受到应变片功耗的限制，为此可通过选择 $n$ 值获得最高的灵敏度 $k_\mu$ ，由 $k_\mu/dn = 0$ 可得，当 $n=1$ 时，即： $R_1 = R_2$ ， $R_4 = R_3$ 时， $k_\mu$ 为最大，并且此时

$$U_0 = U \Delta R_1/4R_1 \quad (10)$$

因此， $k_\mu = U/4$  (11)

考虑到(8)式中求出时忽略了分母中的 $\Delta R_1/R_1$ 项，是近似值，实际值存在有非线性误差，为了

减小和克服非线性误差，常用的方法是采用差动电桥，如图 3-c所示，在试件上安装两个工作应变片，一片受拉力，另一片受压力，然后接入电桥的相邻两臂，电桥此时的输出电压 $U_0$ 为：

$$U_0 = U \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (12)$$

设平衡电桥初始时 $R_1 = R_4 = R_2 = R_3$ ， $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ，则 $U_0 = U \Delta R_1 / 2R_1$ 。

因此， $k_\mu = U / 2$  (13)

此时输出电压不存在非线性误差，而且电桥灵敏度比单臂电桥时提高了一倍，还具有温度补偿作用。

(3) 全桥电桥

为了进一步提高电桥的灵敏度和进行温度补偿，在桥臂中经常安置多个应变片，电桥可采用四臂电桥(或称为全桥)，如图3-d所示。

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

$$k_\mu = U \quad (14)$$

此时可见灵敏度最高，且输出与 $\Delta R_1 / R_1$ 成线性关系。

实际测试中由于电阻应变片工作时，其电阻变化通常是很小的，电桥相应的输出电压也很小，要推动检测或记录仪器工作，还必须将电桥输出电压放大处理，本实验中用到的放大器为差分放大器，实际用电路图如图4所示

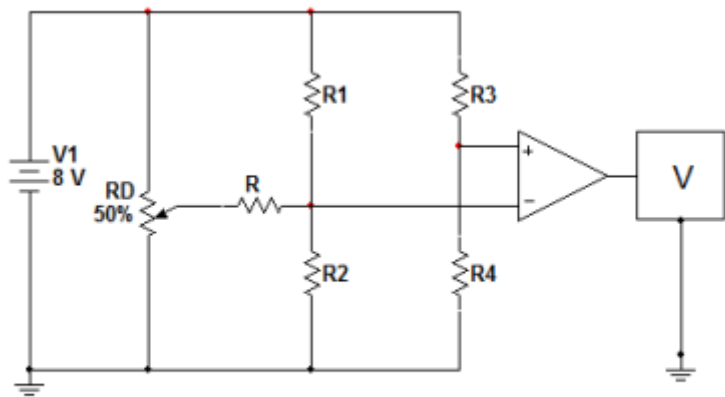


图 4 实验用电桥电路

操作步骤：

1. 按照实验要求连线，差动放大器调零
2. 按照单臂电桥电路连线
3. 将电桥调零，并选择合适的增益。
4. 不断增加砝码，并记录增加砝码时的电压。减少砝码，记录减少砝码时的电压。两次求得平均值，并计算灵敏度
5. 按照半桥电桥电路连线，重复步骤4
6. 按照全桥电桥电路连线，重复步骤4

实验仪器名称：

SET-N 型传感器实验仪、砝码、砝码盘

实验数据处理与分析[实验数据计算、不确定公式推导与计算、结果表示、误差分析、结果讨论]

一、单臂电桥测电桥的灵敏度

数据表格 1:

砝码质量 M (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
加砝码时电压绝对值 (mV)	0.0	16.7	33.3	50.0	66.7	83.4	100.1	116.8	133.5	150.3	167.0
减砝码时电压绝对值 (mV)	0.0	16.7	33.3	50.0	66.7	83.4	100.1	116.8	133.5	150.3	167.0
平均值 (mV)	0.0	16.7	33.3	50.0	66.7	83.4	100.1	116.8	133.5	150.3	167.0

实验过程截图贴至此处（差分放大器校准一张图；仪器连线图一张；其中一张必须含“实验进行时间”以及右上角的用户名。）





## 二、半桥电桥测电桥的灵敏度（选作）

数据表格 2：

砝码质量 M (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
加砝码时电压 绝对值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>33.3</u>	<u>66.6</u>	<u>99.9</u>	<u>133.2</u>	<u>166.5</u>	<u>199.8</u>	<u>233</u>	<u>266</u>	<u>300</u>	<u>333</u>
减砝码时电压 绝对值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>33.3</u>	<u>66.6</u>	<u>99.9</u>	<u>133.2</u>	<u>166.5</u>	<u>199.8</u>	<u>233</u>	<u>266</u>	<u>300</u>	<u>333</u>
平均值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>33.3</u>	<u>66.6</u>	<u>99.9</u>	<u>133.2</u>	<u>166.5</u>	<u>199.8</u>	<u>233</u>	<u>266</u>	<u>300</u>	<u>333</u>

实验过程截图贴至此处（仪器连线图一张）





### 三、全桥电桥测电桥的灵敏度

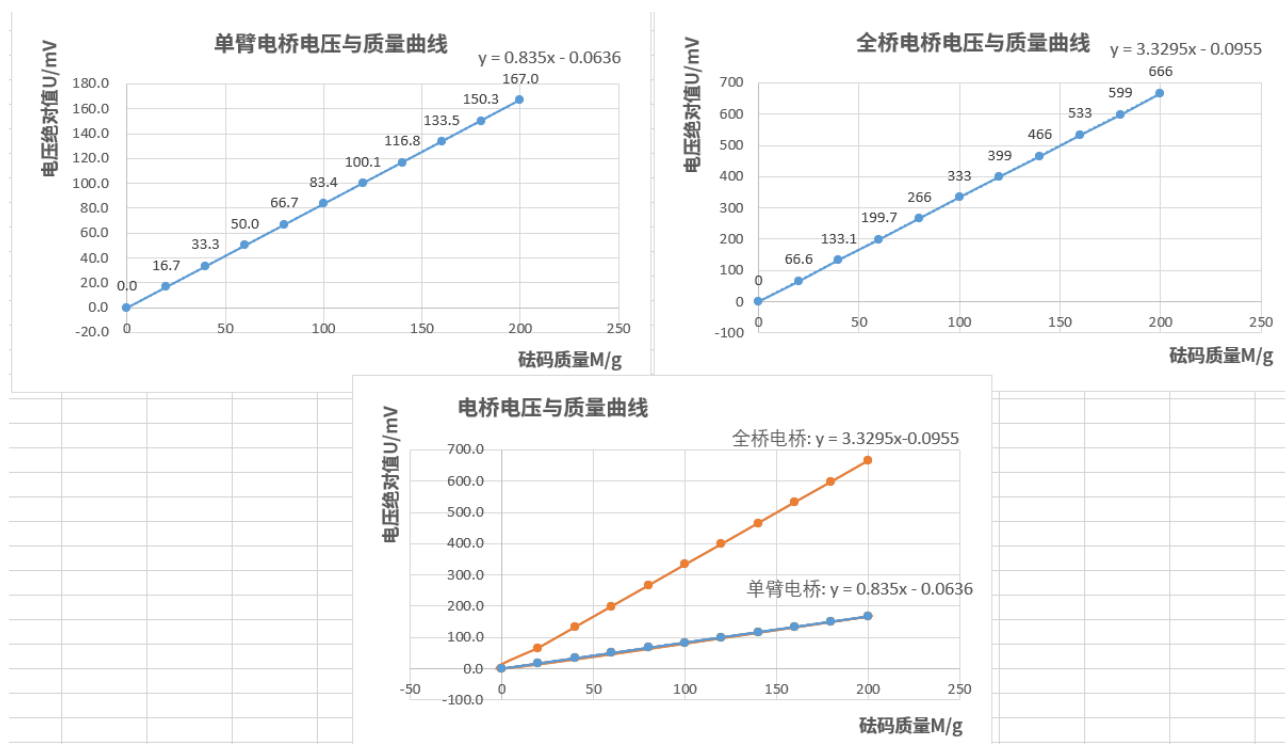
数据表格 3:

砝码质量 M (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
加砝码时电压 绝对值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>66.6</u>	<u>133.1</u>	<u>199.7</u>	<u>266</u>	<u>333</u>	<u>399</u>	<u>466</u>	<u>533</u>	<u>599</u>	<u>666</u>
减砝码时电压 绝对值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>66.6</u>	<u>133.1</u>	<u>199.7</u>	<u>266</u>	<u>333</u>	<u>399</u>	<u>466</u>	<u>533</u>	<u>599</u>	<u>666</u>
平均值 (mV)	<u>0.0</u>	<u>66.6</u>	<u>133.1</u>	<u>199.7</u>	<u>266</u>	<u>333</u>	<u>399</u>	<u>466</u>	<u>533</u>	<u>599</u>	<u>666</u>

实验过程截图贴至此处（仪器连线图一张）



四、在同一坐标系下，绘制单臂电桥和全桥电桥电压与质量的关系曲线，利用图解法（要求有图解过程）处理数据，求单臂电桥和全桥电桥的灵敏度  $S$ 。通过分析比较，得出实验结论。



计算得到  $k_2 = 3.3295 < 4 \times 0.835 = 4k_1$ ，与理论值不相同。说明实际上单臂电桥测量电路存在温度漂移和非线性误差，导致其灵敏度要低于  $0.25U$ ，原因是应变电阻的变化量相比于固定电阻的阻值不可以被忽略，因而得出的是近似值，存在非线性误差，