

## 【实验目的】

- ①掌握双臂电桥测量低电阻的原理和使用方法。
- ②了解单臂电桥与双臂电桥的关系和区别。

## 【实验原理】（电学、光学画出原理图）

如图1所示是一个完整的低值电阻，其中 $C_1'$ 和 $C_2'$ 称为电流接头， $P_1$ 和 $P_2'$ 称为电位接头，介于电位接头之间的电阻才是被测电阻 $R_x$ 。

将采用四端接入法的低电阻（如标准电阻和比较臂低电阻）接入原单臂电桥，

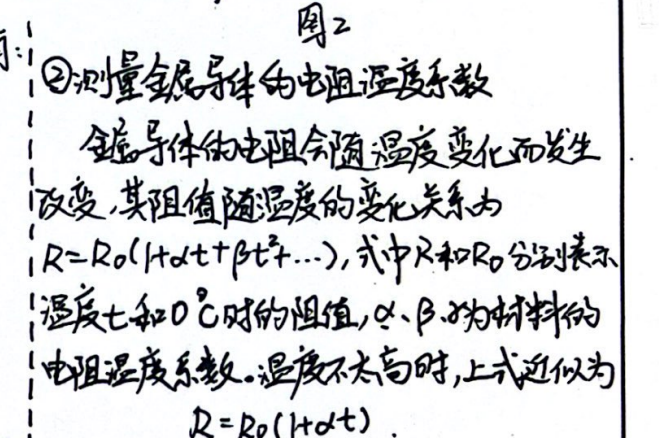
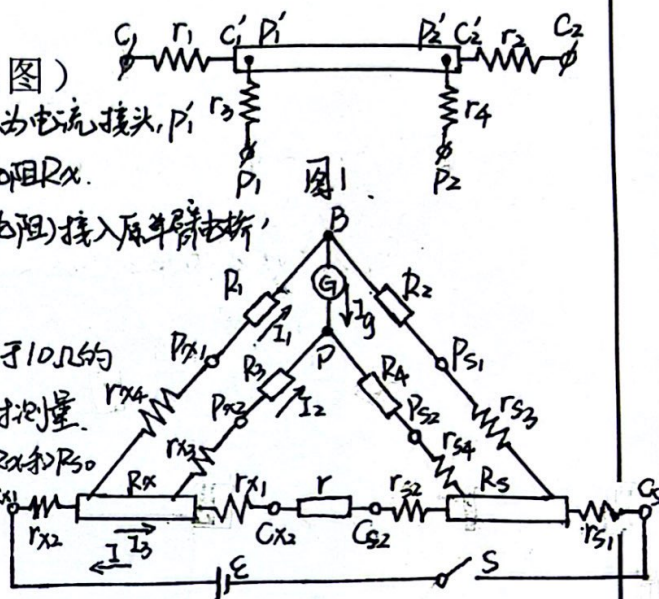
等效电路图如图2所示。

为了消除（或减小）附加电阻的影响，分别接入阻值均大于 $10\Omega$ 的  
标准电阻 $R_2$ 和 $R_4$ ，且为了考虑平衡时 $\frac{R_1}{R_2}$ 和 $\frac{R_3}{R_4}$ 的差别对测量

结果的影响，用阻值小于 $0.001\Omega$ 的粗导线 $r$ 来连接电阻 $R_x$ 和 $R_5$ 。

此外，电路中加接一放大电路，用以增加灵敏度使

不平衡电流 $I_g$ 经过放大后再由检流计指示。



$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3 \\ I_1 R_2 = I_3 R_5 + I_2 R_4 \\ I_2 (R_3 + R_4) = (I_3 - I_2) r \end{cases}$$

$$\text{故有 } R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5 + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

$$\text{保持 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \text{ 则有 } R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5$$

### ①测量金属导体的电阻率

$$\text{金属导体的电阻率 } \rho = R \cdot \frac{S}{L} = \frac{\pi d^2}{4L} R$$

$$\text{电阻率 } \rho \text{ 的相对不确定度 } \frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left( \frac{U(R)}{R} \right)^2 + \left( \frac{2U(d)}{d} \right)^2 + \left( \frac{U(L)}{L} \right)^2}$$

$$\text{电阻率的结果表达式 } \rho = \bar{\rho} \pm U(\rho).$$

### ②测量金属导体的电阻温度系数

金属导体的电阻会随温度变化而发生  
改变，其阻值随温度的变化关系为

$R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \dots)$ ，式中 $R$ 和 $R_0$ 分别表示

温度 $t$ 和 $0^\circ\text{C}$ 时的阻值， $\alpha$ 、 $\beta$ 为材料的  
电阻温度系数。温度不太高时，上式近似为

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

为了避免在 $0^\circ\text{C}$ 测量 $R_0$ ，可测量两个待测电阻

$R_{x1}$ 和 $R_{x2}$ ，消去 $R_0$ 后得电阻温度系数：

$$\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1} t_2 - R_{x2} t_1}$$





## 【实验内容】（重点说明）

### ①测量金属导体的电阻率

将待测导体接入双臂电桥（ $C_1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $C_2$  对应接入），如实验器材中步骤，将电阻粗调“示数加上”电阻细调“示数乘上倍率”，读得阻值  $R$ 。利用游标卡尺测出待测金属导体直径  $d$ ，并读出电位接头间的长度  $l$ ，计算出该导体的电阻率：

$$\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l}$$

### ②测量金属导体的电阻温度系数

(1) 待测导体已密封装在加热炉内，并浸泡在机油中。实验可采用升温 and 降温两种方法完成。

(2) 升温法：根据实验温度需要，设定加热温度上限。其方法为：开启温控仪电源，显示屏显示为环境温度。将“测量-设定”转换开关置于“设定”档，转动“设定调节”旋钮，将所需加热温度上限设定好，再将转换开关置于“测量”位置。

(3) 选择“1、2、3”档中合适的档位，开始加热，指示灯亮。

在加热过程中，调节双臂电桥，进行低电阻测量。每隔  $5^\circ\text{C}$  左右记录一次阻值及对应的温度值。

## 【实验器材及注意事项】

### ①实验器材：QJ-44型双臂电桥。

使用时打开电桥开关，以开关拨至“通”档，利用“调零”旋钮将指针调零，并将“灵敏度”旋钮逆时针旋到底，此时电桥灵敏度最低。选择合适的倍率，按下  $B_1$  按钮，调节“电阻粗调”和“电阻细调”旋钮，使电桥达到平衡。顺时针旋转“灵敏度”按钮，相应提高一些灵敏度，再次调节电桥达到平衡。继续增加灵敏度，直至最高灵敏度时电桥平衡，此时测得的阻值最接近真值。

### ②注意事项

(1) 实验开始前，应检查保证导线可靠连接。

(2) 转动“PID调节”及“设定调节”旋钮时，应轻微用力，以免损坏电位器。

(3) 在加热或降温过程中，不要将加热炉体抬起，避免机油溅出。

(4) 出于低值电阻耐高温局限及保护仪器的目的，设定加温的上限值不能超过  $100^\circ\text{C}$ 。





## 【数据处理与结果】

## ① 测量金属导体的电阻率

$$R = 5.740 \times 10^{-4} \Omega \quad d = 4.10 \text{ mm} \quad l = 25.00 \text{ cm}$$

$$U(R) = (0.1 \times 0.1) \times 0.2\% \Omega = 2.2 \times 10^{-5} \Omega$$

$$U(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ mm}$$

$$U(l) = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm}$$

$$\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l} = 3.031 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\text{电阻率 } \rho \text{ 的相对不确定度 } \frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2} = 3.9\%$$

$$\therefore U(\rho) = \rho \cdot \frac{U(\rho)}{\rho} = 1.18 \times 10^{-9} (\Omega \cdot \text{m})$$

$$\therefore \text{电阻率的测量结果为 } \rho = (3.031 \pm 0.118) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

## ② 测量金属导体的电阻温度系数

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t/^\circ\text{C}$	27.2	31.5	36.0	43.6	47.9	54.6	57.7	62.2	65.9	69.6
$R_{x/10^{-3}\Omega}$	4.770	4.870	4.950	5.105	5.170	5.290	5.350	5.430	5.500	5.570

处理方式(1):

$$\text{计算 } \alpha_i = \frac{R_x(i+5) - R_x(i)}{R_x(i)t_{i+5} - R_x(i+5)t_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

$i$	1	2	3	4	5
$\alpha_i/^\circ\text{C}^{-1}$	$4.25 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-5}$	$4.20 \times 10^{-5}$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 4.24 \times 10^{-5} ^\circ\text{C}^{-1}$$

处理方式(2): 作  $R-t$  曲线求  $\alpha$ 

由线性拟合可得关系:

$$R = (429.4 + 1.831t) \times 10^{-3} \Omega$$

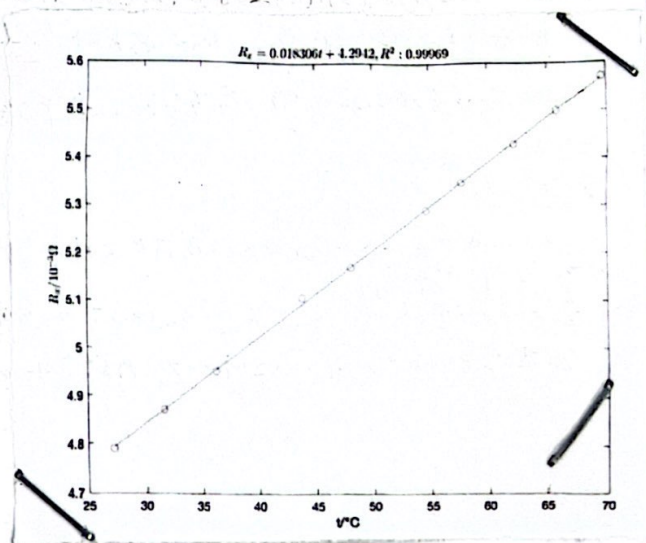
$$\text{即 } R = 429.4 \cdot (1 + 4.26 \times 10^{-5} t) \times 10^{-3} \Omega$$

$$\text{而 } R = R_0(1 + \alpha t), \text{ 则温度系数}$$

$$\alpha = 4.26 \times 10^{-5} ^\circ\text{C}^{-1}$$

与处理方式(1)相比, 相对误差

$$\varepsilon = \frac{|\alpha - \bar{\alpha}|}{\bar{\alpha}} \times 100\% = 0.47\%$$





## 【误差分析】

## ①测量金属导体的电阻率

- (1) 注意到电阻接头在一定范围内可以左右晃动, 这会影响长度 $l$ 的测定带来误差。  
 (2) 注意到导体棒存在明显弯曲, 且施力使其形变时观察到检流计发生明显偏转。  
 据此推测: 1) 弯曲对 $l$ 和 $S$ 的测量会产生影响; 2) 弯曲可能影响其更多性质, 从而带来误差。

## ②测量导体温度系数

- (1) 先设定电阻箱总表示数为0时可能由于反应时间引起 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的读数误差。  
 (2) 注意到电桥检流计选择灵敏度较高时, 在调整后使用时也会出现断路状态下检流计指针不指0的情况, 这应该也会对实验结果造成轻微误差。

## 【实验心得及思考题】

## ①实验心得

本次实验作为电桥系列的最后一个实验, 我深入了解了直流双臂电桥测量低值电阻的原理和使用方法, 整体的实验过程也是相当顺利的, 感谢老师三周以来的悉心指导!

## ②思考题

## 1) 双臂电桥与惠斯登电桥有哪些异同?

- 异: (i) 双臂电桥有两个桥臂接入待测电阻, 而惠斯登电桥(单臂电桥)只有一个桥臂接入了待测电阻。  
 (ii) 惠斯登电桥中导线和待测电阻对电桥影响较大, 因此惠斯登电桥不适合测量低值电阻, 主要用于测量 $1\Omega \sim 1\text{M}\Omega$ 的中值电阻;  $R < 1\Omega$ 的低值电阻可用双臂电桥测量。

## 2) 同: (i) 两者均利用平衡条件间接测量电阻

(ii) 均由各桥臂上电阻改变调节电桥平衡。

## (2) 为什么双臂电桥测量低电阻时能够消除(或减小)附加电阻对测量结果的影响?

根据实验原理, 我们知道  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 R_4 + r} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$

欲消除附加电阻影响, 即要使 $R_s$ 和 $R_4$ 有微小差别时上式右边第二部分尽可能小, 并使附加电阻尽可能不影响电桥平衡。我们有:

1)  $r < 0.001\Omega$ , 因此  $\frac{R_4 \cdot r}{R_3 R_4 + r}$  极小, 影响均很小 ( $R_1 \sim R_4 > 10\Omega$ )。

2)  $R_x, R_s$  和  $C_{x1}, C_{x2}, C_{s1}, C_{s2}$  间附加电阻不影响电桥平衡。

从而减小(消除)了附加电阻的影响。

## (3) 如果四端电阻的电流端和电压端接反了, 对测量结果有什么影响?

如接反, 则不能如(2)中所述消除附加电阻对电桥平衡的影响, 且阻值会对测量产生更大影响。



【数据记录及草表】

① 测量金属导体的电阻率

$$R = 5.740 \Omega$$

$$U(R) = (0.1 \times 0.11) \times 0.2\% \Omega = 2.2 \times 10^{-5} \Omega$$

$$d = 4.10 \text{ mm}$$

$$U(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ mm}$$

$$\rho = R \cdot \frac{\pi d^4}{4l} = 3.031 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$l = 25.00 \text{ cm}$$

$$U(l) = \frac{0.5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm}$$

② 测量金属导体的电阻温度系数

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t/^\circ\text{C}$	27.2	31.5	36.0	43.6	47.9	54.6	57.7	62.2	65.9	69.6
$R_t/10^{-3}\Omega$	4.790	4.870	4.950	5.105	5.170	5.290	5.350	5.430	5.500	5.570

教师签字: 邓欣雨

