

# 浙 江 大 学

## 物 理 实 验 报 告

实验名称: 用双臂电桥测低电阻

指导教师: 王立刚

信 箱 号: 36

98



## 【实验目的】

1. 掌握双臂电桥测量低电阻的原理和方法
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）

为了消除(或减小)接线电阻和引线电阻对测量结果的影响,用四端接入法进行电阻连接。四端接入法“转移”了附加电阻相对于待测电阻的位置。如图1所示,  $C_1 P_1 P_2 C_2$  是一个完整的低值电阻,其中  $C_1$  和  $C_2$  称为电流接头,而  $P_1$  和  $P_2$  称为电位接头,介于电位接头之间的电阻才是实测电阻  $R_x$ ,附加电阻  $r_1, r_2$  已被“转移”到被测电阻之外,而新增的附加电阻  $r_3, r_4$  并不与  $R_x$  直接串联,因此不会改变待测电阻的阻值。

把采用四端接入法的低电阻(如待测电阻和比较臂低电阻)接入原单臂电桥,等效电路如图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  $R_3$  和  $R_4$ ,且考虑电桥平衡时  $\frac{R_1}{R_2}$  与  $\frac{R_3}{R_4}$  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  $R_3$ 。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  $I_3$  通过放大后再由检流计指示。

当电桥平衡时, B、D 两点电位相等,此时通过  $R_1$  和  $R_3$  的电流相等,记为  $I_1$ ,通过  $R_2$  和  $R_4$  的电流也相等,记为  $I_2$ ,根据基尔霍夫定律,有:

$$I_1 R_1 = I_2 R_x + I_2 R_3$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_4 + I_2 R_4$$

$$I_2 (R_3 + R_4) = (I_1 - I_2) \cdot r$$

由此可解得:

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

在电桥使用过程中始终保持  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ , 则  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$

为了确保  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  在电桥使用过程中始终成立,通常将两对比率臂  $(\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_4})$  选用双十进制电阻箱。它的基本原理是将两个相同十进制电阻的转臂连接在同一转轴上,这样在转臂的任何位置都将保持  $R_1$  和  $R_3, R_2$  和  $R_4$  分别相等。

可见,利用双臂电桥测量低电阻时,如果测量时能保证  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ , 同时选择  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_4$  都大于  $10\Omega$ , 且连接  $R_x$  和  $R_3$  的电阻  $r$  越小越好,使用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线,且  $R_x$  和  $R_3$  接“电流接头”和“电位接头”正确连接,那么就可以消除或大大减小附加电阻对测量的影响。

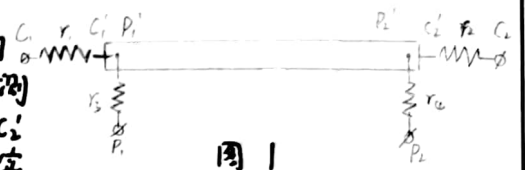
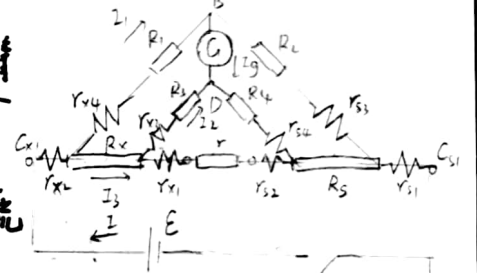


图 1



## 【实验内容】（重点说明）

### 1. 测量金属导体的电阻率

- (1) 金属导体的电阻率  $\rho = R \cdot \frac{S}{L} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4L}$ 。将待测金属导体接入双臂电桥（注意电流、电位接头次序），测出阻值。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。
- (2) 分别求出  $R, d, L$  的不确定度，并写出各分量不确定度表达式。利用间接测量计算合成不确定度的方法计算出电阻率的相对不确定度  $\frac{U(\rho)}{\rho}$ 。
- (3) 写出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： $R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$ 。当温度不太高时，电阻和温度的关系近似为线性关系，因此上式可写为  $R = R_0(1 + \alpha t)$ ，若从待测电阻  $R_{t1} = R_0(1 + \alpha t_1)$  和  $R_{t2} = R_0(1 + \alpha t_2)$  中消去  $R_0$  得  $\alpha = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1} t_2 - R_{t2} t_1}$ ，式中  $t_1, t_2$  由温度计测得， $R_{t1}, R_{t2}$  用 QJ-44 型直流双臂电桥测得。

(1) 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（在温度设定时，仪器“加热选择”开关置于“断”处）。

(2) 根据环境温度和所需升温的上限及升温速度来确定温控仪面板上“加热选择”开关的位置。该开关分为“1, 2, 3”三档，由“断”位置打向任意一档，即开始加热，指示灯亮，升温的高低及速度以“1”档最低最慢，“3”档最高最快，在加热过程中根据实际升温要求，选择合适档位，以减小加热惯性。若在加热升温时，温度高于设定值，调节“PID 调节”向“-”方向调节，反之，升温温度达不到设定值，“PID 调节”向“+”方向调节。

(3) 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其对应的温度值。

(4) 降温法：先将待测电阻加热至一定温度，然后关闭加热开关，开启风扇（实验利用风冷降温），在降温过程中，调节双臂电桥，每隔  $5^\circ\text{C}$  左右记录一次阻值及其对应的温度值。

(5) 充分利用实验数据，将数据代入求得  $\alpha$ ，再求出其平均值  $\bar{\alpha}$ 。

(6) 作  $R-t$  特性曲线，根据曲线求出  $\alpha$  值，与  $\bar{\alpha}$  值作比较，求相对误差。

## 【实验器材及注意事项】

### 实验器材：

QJ-44 型双臂电桥

FQJ-2 型非平衡直流电桥加热实验装置。

### 注意事项：

1. 实验开始前，待测低值电阻与双臂电桥、加热炉与温控仪之间的信号输入线应可靠连接。
2. 转动“PID 调节”及“设定调节”旋钮时，应轻触用力，以免损坏电位器。
3. 加热或降温过程中，不要将加热炉体升起，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

由实验测得  $R = 0.005930 \Omega$   $L = 26.85 \text{ cm}$   $d = 4.06 \text{ mm}$

由于测量电阻时选取的量程倍率为  $\times 0.01$ ,  $U(R) = \text{量程} \times 0.2\% = 2.2 \times 10^{-6} \Omega$

由单刃测量误差计算公式:  $U(d) = 0.02 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.012 \text{ mm}$ ,  $U(L) = 0.5 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.288 \text{ mm}$

$$R = \bar{R} \pm U(R) = (5.93 \pm 2.2) \times 10^{-6} \Omega \quad d = \bar{d} \pm U(d) = (4.06 \pm 0.02) \text{ mm}$$

$$L = \bar{L} \pm U(L) = (26.85 \pm 0.03) \text{ cm}$$

又由  $\bar{\rho} = \frac{\bar{R} \cdot S}{L} = \frac{\bar{R} \cdot \pi \bar{d}^2}{4L} = 2.86 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

$$\ln \bar{\rho} = \ln \frac{\pi}{4} + \ln \bar{R} + 2 \ln \bar{d} - \ln L, \quad \frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial R} = \frac{1}{\bar{R}}, \quad \frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial d} = \frac{2}{\bar{d}}, \quad \frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial L} = -\frac{1}{\bar{L}}$$

$$\frac{U(\rho)}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial R}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial d}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial L}\right)^2} \Rightarrow U(\rho) = \bar{\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{U(R)}{\bar{R}}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{U(L)}{\bar{L}}\right)^2} = 1.97 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$$

记  $U(\rho) = 2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$  (2)  $\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho) = (2.86 \pm 0.02) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

### 2. 测量金属导体的电阻温度系数

表 1

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
升温/ $^{\circ}\text{C}$	41.8	46.8	51.8	56.8	61.8	66.8	71.8	76.8	81.8	86.8
降温/ $^{\circ}\text{C}$	41.8	46.8	51.8	56.8	61.8	66.8	71.8	76.8	81.8	86.8
电阻/ $\Omega$	0.005070	0.005150	0.005240	0.005330	0.005420	0.005517	0.005612	0.005710	0.005796	0.005880
电阻/ $\Omega$	0.005055	0.005177	0.005272	0.005365	0.005465	0.005555	0.005647	0.005735	0.005824	0.005890

将实验数据分为两组 1-5 为一组, 6-10 为一组, 进行逐差法计算, 即 6-1, 7-2, 8-3, 9-4, 10-5.

代入公式  $\alpha = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1} t_2 - R_{t1} t_1}$  得  $\alpha_{41} = 0.00406^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{42} = 0.00435^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{43} = 0.00447^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{44} = 0.00458^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{45} = 0.00472^{\circ}\text{C}^{-1}$

$\alpha_{41} = 0.00467^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{42} = 0.00475^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{43} = 0.00494^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{44} = 0.00448^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\alpha_{45} = 0.00476^{\circ}\text{C}^{-1}$

则  $\bar{\alpha}_4 = \frac{\sum \alpha_{4i}}{5} = 0.00408^{\circ}\text{C}^{-1}$   $\bar{\alpha}_5 = \frac{\sum \alpha_{5i}}{5} = 0.00432^{\circ}\text{C}^{-1}$

则由代入数据法得  $\bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{\alpha}_4 + \bar{\alpha}_5}{2} = 0.00420^{\circ}\text{C}^{-1}$  (或  $4.2 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

由作用法得  $k = 2 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$  或  $R_0 = 0.0043 \Omega$  则  $\alpha_1 = \frac{k}{R_0} = 4.65 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$

则作用法得到的相对误差  $E_1 = \frac{|\alpha_1 - \bar{\alpha}_0|}{\bar{\alpha}_0} \times 100\% = 8.2\%$

则作用法相对于代入数据计算的方法的相对误差为  $E_2 = \frac{|\alpha_1 - \bar{\alpha}_0|}{\bar{\alpha}_0} \times 100\%$  同理得  $\alpha_2 = \frac{k}{R_0} = 4.65 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$

则作用法相对于代入数据计算的方法的相对误差为  $E_3 = \frac{|\alpha_2 - \bar{\alpha}_0|}{\bar{\alpha}_0} \times 100\% = 7.4\%$

因为测量的金属导体为铜, 其理论的温度系数为  $4.3 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$

则代入数据法得到的  $\bar{\alpha}$  相对理论值的相对误差为  $E_4 = \frac{|\bar{\alpha}_0 - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 0.7\%$

由作用法得到的  $\bar{\alpha}_0$  相对理论值的相对误差为  $E_5 = \frac{|\bar{\alpha}_0 - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 7.4\%$

最好用作用法  
温度计算, 再平均



## 【误差分析】

## 1. 测定金属的电阻率

本次实验所得的测量结果为  $\rho = (2.86 \pm 0.02) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , 在测量时仍存在较大误差。

(1) 对金属的测量, 由于时间的限制原因, 只对其电阻长度、直径、电阻进行一次测量, 将引入测量误差。

(2) 材料发生了化学变化, 或其不纯, 时间太久有杂质, 则会导致其电阻率发生变化。

(3) 测量时因为人为的读数引入误差。

## 2. 测量金属导体的温度系数

通过对所得的 10 组数据的处理, 将数据代入数据法, 测得  $\alpha = 4.30 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 而用图像法测得的  $\alpha$  为  $4.65 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 可见两者仍存在较大差异, 且相对于理论值的相对误差为 0.7% 和 7.4%。误差原因:

(1) 测量时产生的偶然误差。

(2) 测量仪器而系统误差, 如金属的实际温度可能与显示的温度有差异。

(3) 由所作图可知, 电脑作图的过程中斜率和截距保留的位数有限, 这里计算时会引入较大的误差。

所以用数据逐差法得到的结果比作图法得到的要更准确。

(4) 在升温与降温过程中, 热惯性仍存在, 本实验未能很好的消除, 所以在数据测量中会引入误差。

(5) 由作图可得, 逐差法直线的拟合程度较升温误差, 可见升温法测得的数据准确度更高。

## 【实验心得及思考题】

## 实验心得:

通过本次实验, 我学会了双臂电桥的原理以及如何使用双臂电桥测低电阻的方法, 双臂电桥对于以前的我来说较为陌生, 但其巧妙地消除和减小了附加电阻的影响, 这种思考方法和设计思路在我们以后设计的其它电路图中也会彰显其重要性。同时, 由于温度的设置, 金属的升温会一直持续, 由于时间的限制, 我们可能无法使其温度稳定后再测量, 所以我们可以先在要测量温度下电阻的时候, 提前  $0.5^\circ\text{C}$  左右进行准备, 同时可以先将调节电阻盘使指针到零刻度附近, 当其归零时再迅速读出温度, 这样会使测量出来的数据更精确。以后我们也会测量动态的量, 这样测量的方法和思路是非常有用的。

## 思考题:

- 不同之处: ① 结构不同, 惠斯登电桥的桥臂只有一个待测电阻, 双臂电桥待测电阻实际上是连接在两个桥臂上的。② 实际应用不同, 惠斯登电桥主要用来测量中值电阻 (一般为大于  $1\Omega$  小于  $1\text{M}\Omega$  的电阻), 双臂电桥主要用来测量低值电阻 (小于  $1\Omega$  的电阻)。  
相同之处: ① 作用相同: 都是用来精确测量电阻的仪器。② 结构上都拥有桥臂, 即电阻, 都是利用电阻的变化来测量物理量的变化。
- 因为双臂电桥在结构上将引线电阻和端钮接触电阻从被测支路转移到比例臂支路, 且比例电阻始终大于  $10\Omega$ , 这样, 引线和接触电阻的影响便可以被完全消除, 减小测量误差。
- 若接反, 电阻将会增大, 误差会很大, 特别是测试毫欧以下电阻时增大特别明显, 因为电流电压端子一端接反, 将不能消除实验时的接触电阻, 而接触电阻可达到几十毫欧或更大, 将超过这种被测小电阻本身阻值, 最后导致测试结果错误或者误差变得更大。



【数据记录及草表】

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
升温 $t/^\circ\text{C}$	23.0	29.0	34.0	41.8	46.8	51.8	56.8	61.8	66.8	71.8	76.8	81.8	86.8
电阻 $R_x/\Omega$	0.004700	0.004815	0.004920	0.005070	0.005150	0.005240	0.005330	0.005446	0.005517	0.005612	0.005710	0.005790	0.005880
降温 $t/^\circ\text{C}$	41.8	46.8	51.8	56.8	61.8	66.8	71.8	76.8	81.8	86.8			
电阻 $R_x/\Omega$	0.005055	0.005177	0.005272	0.005365	0.005465	0.005535	0.005647	0.005715	0.005824	0.005870			

$R_{\text{eq}} = 0.000593 \Omega$        $l = 26.85 \text{ cm}$        $d = 4.06 \text{ mm}$

教师签字:

*Qin*



电阻R /  $\Omega$

# 升温法测量金属的电阻温度系数曲线

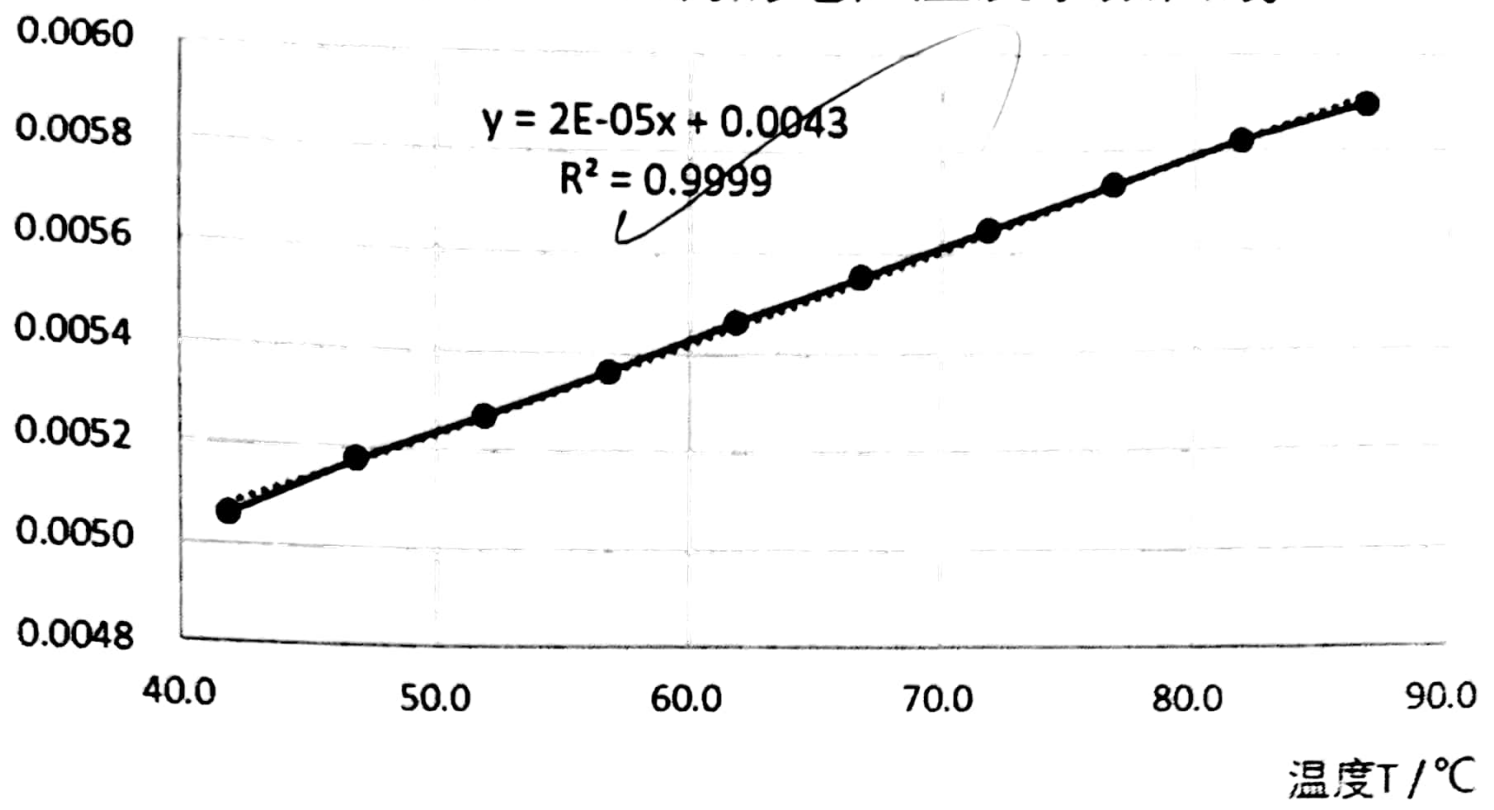


图 4

电阻R /  $\Omega$

# 降温法测量金属的电阻温度系数曲线

