

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：

专 业：—

班 级：—

姓 名：—

学 号：—

实验日期：10月10日 星期四上午/下午



【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

① 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,用四端接入法对电阻进行连接。如右图, $C_1'P_1'P_2'C_2'$ 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 , r_1 和 r_2 被转移到待测电阻 R_x , r_3 , r_4 并不直接与 R_x 串联,因此不会改变待测电阻阻值。

把采用四端接入法的低电阻(如待测电阻和比较臂电阻)接入原单臂电桥,变成等效电路为右图的双臂电桥。为消除或减小附加电阻的影响,分别接入阻值大于 10Ω 的 R_3 和 R_4 ,且用阻值小于 0.001Ω 的粗导线 r 来连接 R_x 和 R_s ,另外接一个放大电路来增加灵敏度。

当电桥平衡时, $I_g = 0$, $\varphi_B = \varphi_D$, 各处电流如图由基尔霍夫定律:

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

$$\text{解得, } R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s + \frac{R_4 r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

若始终保持 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, 则第二项为 0, $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s$, 同惠斯登电桥为保持 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 成立,使用双十进制电阻箱,但实际上很难完全做到,那就要使用阻值小于 0.001Ω 的粗导线 r 使第二项尽量小。

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

③ 金属导体的电阻温度系数: 电阻随温度变化的关系为 $R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$ 。

式中 R 和 R_0 分别表示温度 t 和 0°C 时的电阻, α , β , γ 为待测材料的电阻温度系数,当温度不太高时,电阻和温度的关系近似为线性关系,化为

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

为了避免在 0°C 测量 R_0 , 可从待测电阻 $R_{x1} = R_0(\alpha t_1 + 1)$, $R_{x2} = R_0(\alpha t_2 + 1)$ 两式中联立消去 R_0 , 得

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

t_1 和 t_2 由温度计测得, R_{x1} , R_{x2} 用 QJ-44 型直流双臂电桥测得。

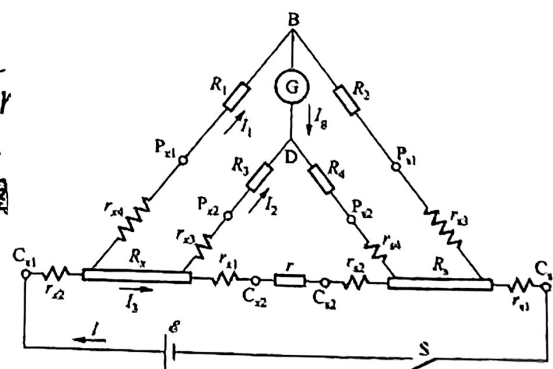
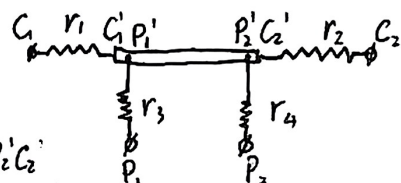


图 4-4-3



【实验内容】（重点说明）

1. 测量金属导体的电阻率

- ① 将待测金属导体（黄铜棒）接入双臂电桥，测出阻值。利用游标卡尺测出待测金属直径 d ，并读出电位接头间的长度 l ，根据公式计算电阻率。
- ② 分别求 R 、 d 、 l 的不确定度，并写出各分量不确定度表达式，计算 $\frac{U(p)}{p}$ 。
- 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

- ① 待测电阻已经被封装在加热炉内，并浸泡在机油中。可采用升温 and 降温法。
- ② 升温法：根据实验温度需要，设定加热温度上限。具体方法为：
 - (i) 开启温控仪电源，显示屏显示为环境温度
 - (ii) 将“测量-设定”转换开关置于“设定”挡，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
 - (iii) 在加热过程中，调节双臂电桥，进行低电阻测量，每隔 5°C 左右记录一次阻值及其对应的温度值
- ③ 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，在降温过程中调节双臂电桥，每隔 5°C 左右记录一次阻值及其对应温度值
- ④ 充分利用实验数据，将数据分别组合代入 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 式求出 α ，再求出平均值 $\bar{\alpha}$ 。
- ⑤ 作 $R-t$ 特性曲线，根据曲线求出 α 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、游标卡尺

C_1, P_1, P_2, C_2 为待测电阻的四端接入端口， B_1 为检流计电源开关。使用时 B_1 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转到底。选择合适倍率，按下 B, G 按钮，粗调细调，使电桥达到平衡。顺时针转灵敏度旋钮，相应提高一些灵敏度，再调平衡，再提高灵敏度，直至灵敏度最高时调得电桥平衡。将粗调示数加上细调示数乘倍率，即得到电阻阻值。

注意事项：① 实验开始前，确保各处导线、信号输入线可靠连接

② 转动“PID 调节”及“设定调节”旋钮时，应轻微用力，避免损坏电器

③ 加热或降温过程中，不要将加热炉升起，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，设定的加热上限不能超过 100°C 。



【数据处理与结果】

1. 金属导体电阻率测量结果:

次数	1	2	3	4	5	6
R/Ω	5.510×10^{-4}	5.530×10^{-4}	5.355×10^{-4}	5.555×10^{-4}	5.551×10^{-4}	5.549×10^{-4}
l/cm	25.02	25.00	25.01	25.02	24.98	25.00
d/mm	4.12	4.30	4.08	4.00	4.12	4.10

$$\bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d_i = 4.12 \text{ mm}$$

$$U_A(d) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} = 0.0403 \text{ mm}$$

$$U_B(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.0116 \text{ mm}$$

$$\therefore U(d) = \sqrt{U_A^2(d) + U_B^2(d)} = 0.0419 \text{ mm}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 l_i = 25.005 \text{ cm}$$

$$U_A(l) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2} = 0.00619 \text{ cm}$$

$$U_B(l) = \frac{0.15 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.00866 \text{ cm}$$

$$\therefore U(l) = \sqrt{U_A^2(l) + U_B^2(l)} = 0.0106 \text{ cm}$$

$$\bar{R} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_i = 5.508 \times 10^{-4} \Omega$$

$$U_A(R) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} = 3.134 \times 10^{-6} \Omega$$

$$U_B(R) = \frac{0.01 \Omega \times 0.2\%}{\sqrt{3}} = 11.547 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\therefore U(R) = \sqrt{U_A^2(R) + U_B^2(R)} = 1.196 \times 10^{-5} \Omega$$

由 $\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\pi R d^2}{4l}$ 计算得:

次数	1	2	3	4	5	6	$\bar{\rho} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \rho_i$
$\rho/(10^{-8} \Omega \cdot \text{m})$	2.932	3.210	2.801	2.790	2.963	2.930	2.941

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial R} = \frac{1}{R}, \quad \frac{\partial \ln \rho}{\partial d} = \frac{2}{d}, \quad \frac{\partial \ln \rho}{\partial l} = -\frac{1}{l} \therefore \frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2} = 0.028$$

$$U(\rho) = 0.088 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\therefore \text{最终结果为 } \rho = (2.941 \pm 0.088) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

2. 金属导体电阻温度系数测量结果:

$t/^\circ\text{C}$	30.1	35.3	41.0	46.0	50.0	55.1	60.2	65.1	70.1	75.1	80.0
$R/10^{-3} \Omega$	4.751	4.842	4.951	5.010	5.121	5.216	5.309	5.450	5.502	5.597	5.686

$$\textcircled{1} \alpha_i = \frac{R_x(i+5) - R_x(i)}{R_x(i) t(i+5) - R_x(i+5) t(i)}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

i	1	2	3	4	5
$\alpha/10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	444	448	504	501	454

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 470 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

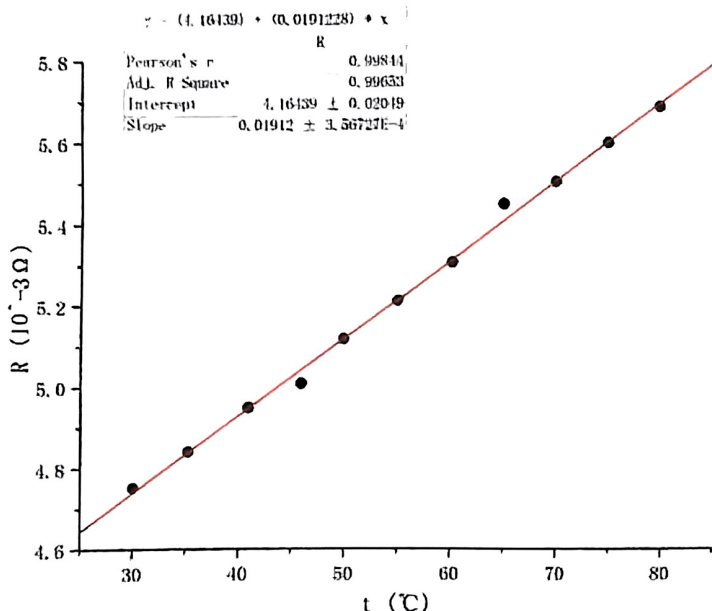
② 使用 Origin 软件作图拟合: (拟合结果见附图)

$$R = 4.16439 + 0.0191228 t \quad (10^{-3} \Omega) = 4.16439 (1 + 0.00459 t) (10^{-3} \Omega)$$

$$\therefore \alpha = 459 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_r = \frac{|\alpha - \bar{\alpha}|}{\alpha} \times 100\% = 2.34\%$$





数据结果 不得涂改

	5	6
$\times 10^{-4}$	5.551×10^{-4}	5.549×10^{-4}
$\bar{l}$	24.98	25.00
$\bar{R}$	4.12	4.10

$$\overline{d^2} = 0.0403 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 u(d) &= \sqrt{u_A(d)^2 + u_B(d)^2} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0.0116 \text{ mm} \\
 \bar{l} &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 l_i = 25.005 \text{ cm} \quad u_A(l) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^6 (l_i - \bar{l})^2} = 0.00619 \text{ cm} \\
 u_B(l) &= \frac{0.15 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.00866 \text{ cm} \\
 u(l) &= \sqrt{u_A(l)^2 + u_B(l)^2} = 0.0106 \text{ cm} \\
 \bar{R} &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_i = 5.508 \times 10^{-4} \Omega \quad u_A(R) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^6 (R_i - \bar{R})^2} = 3.134 \times 10^{-6} \Omega \\
 u_B(R) &= \frac{0.01 \Omega \times 0.2\%}{\sqrt{3}} = 11.547 \times 10^{-6} \Omega \\
 u(R) &= \sqrt{u_A(R)^2 + u_B(R)^2} = 1.196 \times 10^{-5} \Omega
 \end{aligned}$$

由 $\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\pi R d^2}{4l}$ 计算得:

次数	1	2	3	4	5	6	$\bar{\rho} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \rho_i$
$\rho / (10^{-8} \Omega \cdot \text{m})$	2.932	3.210	2.801	2.790	2.963	2.930	2.941

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial R} = \frac{1}{R}, \quad \frac{\partial \ln \rho}{\partial d} = \frac{2}{d}, \quad \frac{\partial \ln \rho}{\partial l} = -\frac{1}{l} \quad \therefore \frac{u(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2} = 0.037$$

$$u(\rho) = 0.088 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$\therefore$ 最终结果为 $\rho = (2.941 \pm 0.088) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

2. 金属导体电阻温度系数测量结果:

$t / ^\circ\text{C}$	30.1	35.3	41.0	46.0	50.0	55.1	60.2	65.1	70.1	75.1	80.0
$R / 10^{-3} \Omega$	4.751	4.842	4.951	5.010	5.121	5.216	5.309	5.450	5.502	5.597	5.686

$$\textcircled{1} \quad d_i = \frac{R_x(i+5) - R_x(i)}{R_x(i)t(i+5) - R_x(i+5)t(i)}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

i	1	2	3	4	5
$\alpha / 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	444	448	504	501	454

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i = 470 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$\textcircled{2}$ 使用 Origin 软件作图拟合: (拟合结果见附图)

$$R = 4.16439 + 0.0191228t \quad (10^{-3} \Omega) = 4.16439(1 + 0.00459t)(10^{-3} \Omega)$$

$$\therefore \alpha = 459 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_r = \frac{|\alpha - \bar{\alpha}|}{\bar{\alpha}} \times 100\% = 2.34\%$$



【误差分析】

1. 测量金属电阻率的误差：由公式 $\rho = \frac{\pi R d^2}{4l}$ 知，误差来源 R, d, l
 - ① R 的测量相对精确，误差较小
 - ② d 的测量发现，导体的粗细并不均匀，在不同部位测量均不同，可能是造成误差的因素之一
 - ③ l 是由标尺直接读出，精度不高，可能是误差的主要因素
 - ④ 和文献值相比，实验测得的数值较大，应该是温度导致，测量时气温较高。
2. 测量金属导体的电阻温度系数误差：

- ① 测量过程中温度一直在上升，需要不断调节阻值，调平台温度又会立即改变，读数不准确
- ② 温度控制设备的精度不高
- ③ 使用最小二乘法回归分析的结果更接近理论值，理由是用公式计算的数据不够多，理论上可取 $C_i^2 = 55$ 个样本点，再取均值的会更好，现在只计算了 5 个样本点，故偏差较大。

【实验心得及思考题】

思考题

1. 双臂电桥与惠斯登电桥有哪些异同？

相同：都利用电桥平衡的原理测量电阻

不同：i) 双臂电桥两个桥臂都接待测电阻，惠斯登电桥只有一个桥臂

ii) 惠斯登电桥适合测阻值不太小的电阻，否则导线电阻的误差会较大，双臂电桥则能尽量消除这一误差，适合测小电阻
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？

① 采用四端接入法， R_x, R_s 和 $C_{x1}, C_{x2}, C_{s1}, C_{s2}$ 之间的附加电阻不影响电桥平衡，不算在待测电阻内

② R_x 表达式第二项中，保持 $\frac{R_s}{R_x}$ 尽量小于 $\frac{R_s}{R_x}$ ，同时 $r < 0.001 \Omega$ ，这样第二项就极小，几乎不影响测量结果
3. 如果四端电阻的电流端和电位端接反了，对测量结果有何影响？

接反了就无法消除附加电阻的影响了，测量误差变大！

实验心得：

在学习了惠斯登电桥后，又一电桥实验加深了我对电桥及消除误差方法的理解，实验数据的处理也更复杂，强化了我的数据处理能力，受益良多！



【数据记录及草表】

	1	2	3	4	5	6
R/Ω	0.05510×0.01	0.05530×0.01	0.05355×0.01	0.05555×0.01	0.05551×0.01	0.05549×0.01
l/cm	25.02	25.00	25.01	25.02	24.98	25.00
d/mm	4.12	4.30	4.08	4.00	4.12	4.10

$t/^\circ\text{C}$	R/Ω
30.0	0.04751×0.1
35.3	0.04842×0.1
41.0	0.04981×0.1
46.0	0.05010×0.1
50.0	0.05121×0.1
55.1	0.05216×0.1
60.2	0.05309×0.1
65.1	0.05450×0.1
70.1	0.05580×0.1
75.1	0.05597×0.1
80.0	0.05686×0.1

教师签字:

(Signature)

