

浙江大学

物理实验报告

实验名称： 双臂电桥测低电阻

实验桌号： 02

指导教师： 刘公羽

班级： 机器人工程 2402

姓名： 毛挺

学号： 3240104043

实验日期： 2025 年 10 月 15 日 星期三 上午

浙江大学物理实验教学中心

一、预习报告

1.1 实验综述

(自述实验现象、实验原理和实验方法, 不超过 500 字, 5 分)

双臂电桥测量原理:

右图是一个完整的低值电阻, 其中 C'_1 和 C'_2 均为电流接头, P_1 、 P_2 为电位接头, 电位接头间的电阻才是实测电阻 R_x 。

将采用四端接入法的低电阻 (如带测小电阻和比较臂低电阻) 接入原单臂电桥, 等效电阻图如右下图 2 所示。

为了消除 (或减小) 附加电阻 (如接线电阻和导线电阻) 的影响, 分别接入了阻值均大于 10Ω 的标准电阻 R_3 、 R_4 , 且为考虑平衡时 $\frac{R_1}{R_2}$ 和 $\frac{R_3}{R_4}$ 的差别对测量结果的影响, 用阻值小于 0.001Ω 的粗导线 r 来连接电阻 R_x 和 R_s 。此外, 电路中加接一放大器用以增加灵敏度, 使不平衡电流 I_g 经过放大再由检流计指示。

电桥平衡时, $I_g=0$, 可得以下公式:

$$I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3$$

$$I_1 R_2 = I_3 R_4 + I_2 R_3$$

$$I_2 (R_3 + R_4) = (I_3 - I_2) r$$

进而推导得出:

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

当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 时, 有:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4$$

测量金属导体电阻温度系数时, 存在以下关系:

$$R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$$

式中, 式中, R 是 $t^\circ C$ 时的阻值, R_0 是 $0^\circ C$ 时的阻值, α 、 β 、 γ 是该材料的电阻温度系数。温度不太高时, 上式可近似为:

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

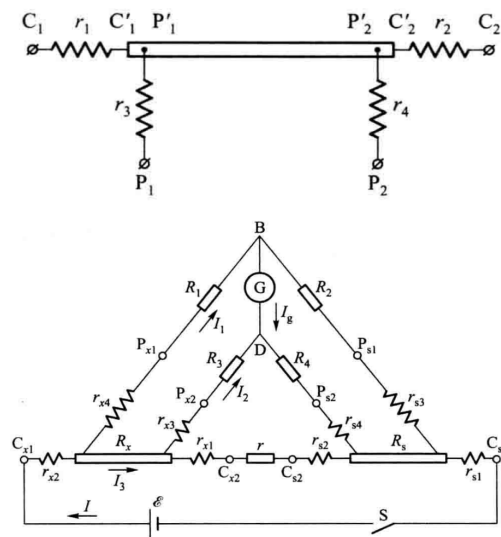


图 1: 双臂电桥电路图

为避免 R_0 的测量，可设 $R_{x1} = R(t_1)$ 、 $R_{x2} = R(t_2)$ ，则：

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

测量金属导体的电阻率：

1. 将待测导体接入电位接头 (P_1 、 P_2) 和电流接头 (C'_1 、 C'_2)，按步骤将“电阻粗调”示数加上“电阻细调”示数乘上倍率，读得阻值 R 。再用游标卡尺测出待测金属导体的直径 d ，读取电位接头间的长度 l 。由以上数据，可算出导体的电阻率 $\rho = R \cdot \frac{S}{l} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l}$ ；
2. 分别计算出 R ， d ， l 的不确定度，计算相对不确定度 $\frac{U(\rho)}{\rho}$ ；
3. 得出电阻率的结果表达式 $\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho)$ 。

测量金属导体的电阻温度系数：

1. 将待测电阻封装在加热炉内并浸泡在机油中，采用升温法完成后续测量；
2. **升温法：**将温控仪电源开启，显示屏显示当前温度。将“转换开关”设置于“设定”档，按动调节按钮，根据实验需要设定加热温度上限，再将转换开关置于“运行”档位。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，然后开启风扇降温，在降温过程中，约每 5°C 记录一次电阻值对应的阻值及温度值。
4. 整理实验数据，将数据分别代入 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 中，计算出平均温度系数 $\bar{\alpha}$ ；
5. 绘制 $R - t$ 特性曲线，根据曲线求温度系数 α ，并计算相对误差。

1.2 实验重点

(简述本实验的学习重点，不超过 100 字，3 分)

1. 掌握双臂电桥测低电阻的原理和使用方法；
2. 了解单臂电桥与双臂电桥的联系与区别；
3. 掌握 Q-44 型电桥测量低电阻的操作方法。

1.3 实验难点

(简述本实验的实现难点，不超过 100 字，2 分)

1. 实验中电阻温度变化快，读取数据应在同一时刻，否则会造成较大误差；
2. 在调节电桥平衡时，应先旋转“灵敏度”按钮使得灵敏度降到最低，调节电桥至平衡，然后逐渐升高灵敏度，直到最高灵敏度时调得电桥平衡，此时测得的阻值才接近真实值。

二、原始数据

(将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方, 20 分)

毛挺 3240104043 双臂电桥测低电阻 桌号: 2

倍率 $\times 0.01$

粗调 0.06Ω

细调 0.00269Ω

直径 3.98 mm

长度 28.50 cm

电阻率 $2.74 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

次数	1	2	3	4	5	6
温度 $t/^{\circ}\text{C}$	23.4	28.9	34.6	39.5	44.7	50.0
电阻 R_x/Ω	0.004725	0.004843	0.004940	0.005040	0.005140	0.005240
次数	7	8	9	10		
温度 $t/^{\circ}\text{C}$	55.3	61.0	66.2	71.7		
电阻 R_x/Ω	0.005340	0.005440	0.005540	0.005640		

刘永强
12.15

图 2: 实验数据

三、结果与分析

3.1 数据处理与结果

(列出数据表格、选择数据处理方法、给定测量或计算结果, 30 分)

测量金属导体的电阻率

表 1: 金属导体的电阻、长度和直径

R	L	d
$6.269 \times 10^{-4} \Omega$	28.50mm	3.98mm

由上表数据可以计算:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{R \cdot d^2}{4L} = 2.74 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \\ U(R) &= \frac{0.099 \times 0.01 \times 0.2\%}{\sqrt{3}} \Omega = 1.14 \times 10^{-6} \Omega \\ U(d) &= \frac{0.02mm}{\sqrt{3}} = 0.0115mm \\ U(L) &= \frac{0.5mm}{\sqrt{3}} = 0.2887mm \\ \frac{U(\rho)}{\rho} &= \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(L)}{L}\right)^2} = 0.155 \\ U(\rho) &= 0.42 \times 10^{-8} \Omega \cdot m\end{aligned}$$

由此可得:

$$\rho = (2.74 \pm 0.42) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

测量金属导体的电阻温度系数

表 2: 金属导体的电阻随温度变化情况

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度 $t/^\circ C$	23.4	28.9	34.6	39.5	44.7	50.0	55.3	61.0	66.2	71.1
R_x/Ω	0.004755	0.004843	0.004940	0.005040	0.005140	0.005240	0.005340	0.005440	0.005540	0.005640

1. **逐差法:** 根据公式 $\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1}t_2 - R_{x2}t_1}$ 和 $\alpha_i = \frac{R_{x(i+5)} - R_{xi}}{R_{xi}t_{i+5} - R_{x(i+5)}t_i}$ 计算, 可得下表数据:

表 3: 金属导体的电阻随温度变化情况

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
$421.4 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$	$437.8 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$	$442.0 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$	$435.4 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$	$441.2 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$

最终可得:

$$\bar{\alpha} = 435.6 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$$

相对误差 $E = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 0.60\%$, 此相对误差较小, 处理较精确。

2. **作图法:** 使用计算机软件对 $R_x - t$ 图进行线性拟合, 得到拟合直线: $y = 0.213x + 50.040$

使用计算机软件对 R_t-t 图进行线性拟合,得到拟合直线: $y = 1.867 \times 10^{-5}x + 4.305 \times 10^{-3}$ 。

由公式 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 知, $k = R_0\alpha$, $b = R_0$, 得:

$$\alpha = \frac{k}{b} = 433.6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

相对误差 $E = \frac{|\alpha - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 0.15\%$, 此相对误差更小, 处理更为精确。

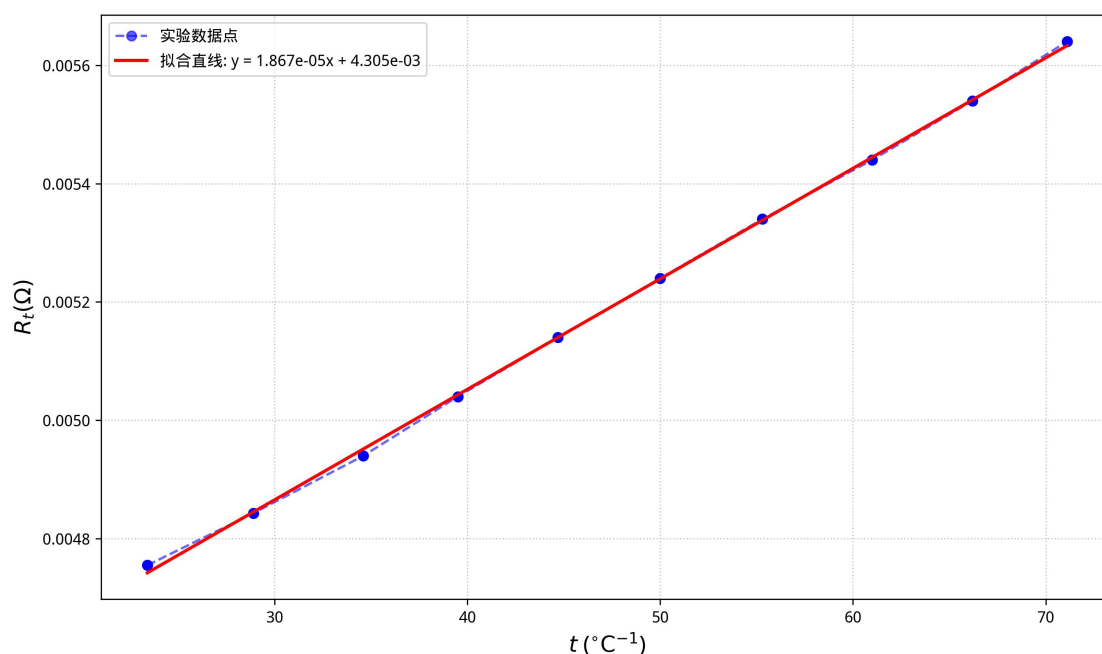


图 3: 金属导体电阻随温度变化特性曲线

3.2 误差分析

(运用测量误差、相对误差、不确定度等分析实验结果, 20 分)

- 测量电阻率的误差:** 主要由 d 、 R 、 L 读数造成的偶然误差, 此外, 导体形状等因素也会给测量电阻率带来误差。对于前者, 可多次测量减小误差;
- 测量金属导体电阻温度系数误差:**
 - R_x 读数造成的偶然误差;
 - 温度值测量不够精确造成的误差;
 - 由于温度在读取数值时会变化, 会影响温度的测量值, 应当调节电桥平衡后立即读取温度的测量值以减小误差。

3.3 实验探讨

(对实验内容、现象和过程的小结, 不超过 100 字, 10 分)

本实验学习了使用双臂电桥测量低电阻的方法，并据此进行了金属导体电阻率以及电阻温度系数的测定。在后一部分实验中，采用了两种不同方法对数据进行处理，初步学习了使用 Python 辅助绘图以及进行曲线拟合，为后续实验打下了良好基础。

四、思考题

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，10 分）

双臂电桥与单臂电桥有哪些相同与不同之处？

相同点：两者都是利用电桥平衡条件间接测量电阻；工作时电桥上都有电流通过。

不同点：双臂电桥有两个臂接有相同或相关的电阻，而单臂电桥仅有一个臂接入待测电阻；双臂电桥适用于测量低电阻，单臂电桥适用于测量中等电阻。

为什么单臂电桥实验中，接触电阻和低值电阻对电桥影响较大，而双臂电桥能用于测量低电阻？

答：单臂电桥中，接触电阻和低值电阻会直接影响电桥的平衡和测量结果，导致误差较大，因此它多用于中等电阻的测量；而双臂电桥通过特殊的结构设计，能减小或消除接触电阻等附加电阻的影响，所以可用于测量低电阻。

为什么用双臂电桥测量低电阻时能消除附加电阻对测量结果的影响？

答：由公式 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4 + \frac{R_3 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$ 可知，为了消除附加电阻的影响，需要使 $\left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$ 尽可能小，当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 时， $\frac{R_3 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$ 项为零，此时附加电阻对测量结果的影响也较小，从而减小甚至消除了附加电阻的影响。

如果四端电阻的电流端和电位端接反了，对测量结果有什么影响？

答：若接反，则不能减小或清除附加电阻对电桥平衡的影响，会给测量结果带来较大的误差。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”的本课程的对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” - “选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” - “选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价必须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制