

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:

指导教师: 宋斌

班级:

姓名:

学号:

实验日期: 2025 年 9 月 30 日 星期二上午

(此处填实验选课系统内日期)

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做, 补做日期:

情况说明:

一、预习报告 (10 分)

(注: 将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来)

1. 实验综述 (5 分)

(自述实验现象、实验原理和实验方法, 不超过 300 字, 5 分)

【实验原理】

与两端接入法相比, 四端接入法“转移”了附加电阻的影响。 r_1, r_2 被“转移”到被测电阻之外, 而 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。

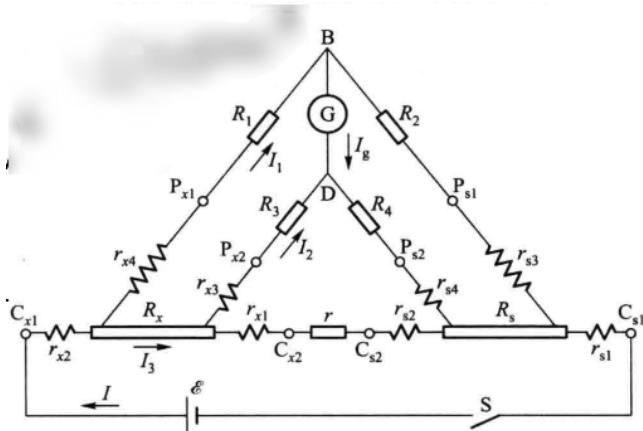


图 4-4-3

双臂电桥采用了四端接入法, 其等效电路如图 4-4-3 所示。

根据基尔霍夫方程:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (4-4-1)$$

只要始终保持 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 成立, 则第二项为零, (4-4-1)转换为:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_s \quad (4-4-2)$$

双臂电桥从以下几个角度减小了误差:

(1) R_s 与 R_x 之间用阻值很小的粗导线相连, 从 (4-4-1) 式可看出即使 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ 之间有差别, 其影响也很小。

(2) 由于前述双臂电桥的特性, 附加电阻 $r_{x1}, r_{x2}, r_{s1}, r_{s2}$ 都只对总的工作电流 I 产生影响, 而对测量结果没有影响。

(3) 由于与 $r_{x3}, r_{x4}, r_{s3}, r_{s4}$ 相串联的桥臂电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 阻值都为 10Ω 以上, 与之相比, 这部分附加电阻对测量结果的影响也可忽略不计。

2. 实验重点 (3 分)

(简述本实验的学习重点, 不超过 100 字, 3 分)

1、掌握双臂电桥采用四端法消除导线与接触电阻影响的原理, 理解其通过特定桥臂设计

(保持 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$) 和粗导线连接来精确测量低电阻的方法。

2、学会 QJ-44 型电桥的正确操作步骤。

3. 实验难点 (2 分)

(简述本实验的实现难点, 不超过 100 字, 2 分)

1、实际操作中难以绝对保证桥臂比例 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$, 微小的偏差会引入误差。

2、调温装置的温度不稳定, 较难调节, 在达到设定温度后仍然会上升 $1-2^{\circ}\text{C}$, 需提前关闭加热旋钮。

3、电桥平衡调节过程需兼顾粗调、细调与灵敏度调节, 步骤细致, 需要耐心以避免误判。

二、原始数据 (20 分)

(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, 完整保留姓名, 学号, 教师签字和日期。)

三、结果与分析 (60 分)

1. 数据处理与结果 (30 分)

(列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。)

(1) 测量金属导体的电导率

表 1 测量金属导体的电导率

| | 阻值 R_x / Ω | 金属导体直径 d / mm | 电位接头间长度 l / cm |
|-----|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 测量值 | 5.650×10^{-4} | 4.06 | 25.10 |

比率: 0.01

计算不确定度:

$$U(R) = \frac{\text{量程} \times 0.2\%}{\sqrt{3}} = \frac{0.11 \times 0.1 \times 0.2\%}{\sqrt{3}} = 1.3 \times 10^{-6} \Omega = 0.013 \times 10^{-4} \Omega$$

$$U(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.01 \text{ mm}$$

$$U(l) = \frac{0.5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.3 \text{ mm} = 0.03 \text{ cm}$$

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{R} \cdot \bar{S}}{\bar{l}} = \frac{\pi \bar{R} \cdot \bar{d}^2}{4 \bar{l}} = 2.91 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$$

$$\ln \bar{\rho} = \ln \frac{\pi}{4} + \ln \bar{R} + 2 \ln \bar{d} - \ln \bar{l}$$

$$\frac{U(\rho)}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{\bar{R}}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{\bar{l}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.013 \times 10^{-4} \Omega}{5.650 \times 10^{-4} \Omega}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.01 \text{ mm}}{4.06 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{0.03 \text{ cm}}{25.10 \text{ cm}}\right)^2} = 0.0056 \text{ (保留两位有效数字)}$$

$$U(\rho) = 0.0056 \times 1.17 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} = 0.02 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$$

所以

$$\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho) \Omega = (2.91 \pm 0.02) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$$

(2) 测量金属导体的电阻温度系数

查表得铜的温度系数为 $4.33 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

表 2 测量金属导体的电阻温度系数

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度 $t / \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 23.8 | 28.8 | 33.8 | 38.4 | 44.1 |
| 电阻 $R_x / (10^{-3} \Omega)$ | 4.760 | 4.860 | 4.955 | 5.035 | 5.125 |

| 次数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|---|---|----|
| | | | | | |

| | | | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度 $t/^\circ\text{C}$ | 48.6 | 53.2 | 58.6 | 63.3 | 68.1 |
| 电阻 $R_x/(10^{-3} \Omega)$ | 5.205 | 5.290 | 5.390 | 5.479 | 5.565 |

比率: 0.1

法 1: 公式法求平均值

由 $\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1}t_2 - R_{x2}t_1}$, 分别带入(1, 6)(2, 7)(3, 8)(4, 9)(5, 10)组数据得

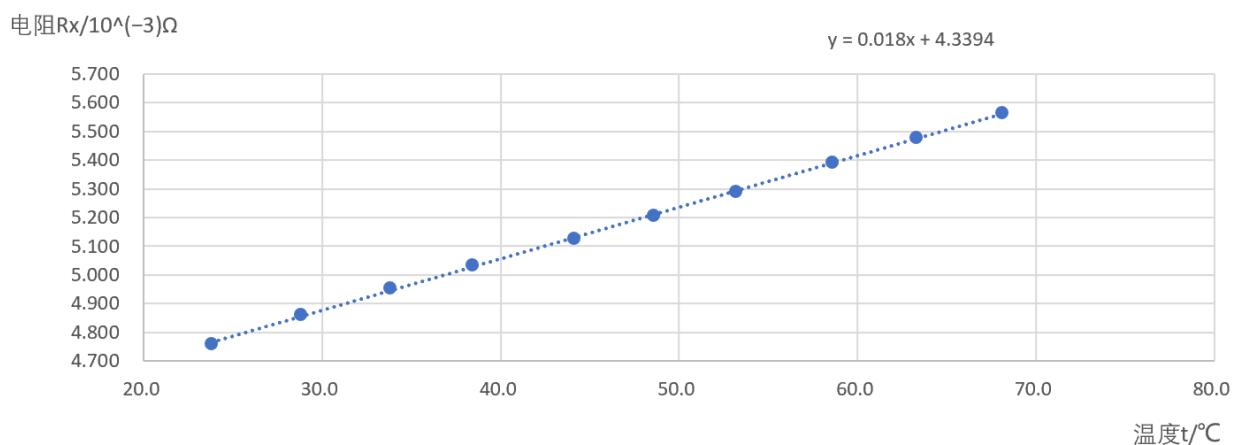
表三 电阻温度系数

| | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| 电阻温度系数 $\alpha/(10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ | 4.14 | 4.05 | 4.02 | 4.10 | 4.25 |
|---|------|------|------|------|------|

$$\bar{\alpha} = 4.11 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

相对误差为 $E_1 = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 5\%$

法 2: 作图法



通过 excel 拟合图像

斜率 $k = 1.8 \times 10^{-2} \Omega \cdot ^\circ\text{C}$

截距 $b = 4.34\Omega$

由 $R = R_0 \times (1 + \alpha t)$, $\bar{\alpha} = \frac{k}{b} = 4.15 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

相对误差为 $E_2 = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 4\%$

2. 误差分析 (20 分)

(运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果, 写出完整的结果表达式, 并分析误差原因。)

(1) 金属导体电阻测量的误差分析

$$\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho)\Omega = (2.91 \pm 0.02) \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$$

误差分析:

根据不确定度传递公式

$$\frac{U(\rho)}{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{\bar{R}}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{\bar{l}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.013 \times 10^{-4}\Omega}{5.650 \times 10^{-4}\Omega}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.01mm}{4.06mm}\right)^2 + \left(\frac{0.03cm}{25.10cm}\right)^2}$$

$$\left(\frac{U(R)}{\bar{R}}\right)^2 \approx 5.29 \times 10^{-8}$$

$$\left(\frac{2U(d)}{\bar{d}}\right)^2 \approx 2.40 \times 10^{-5}$$

$$\left(\frac{U(l)}{\bar{l}}\right)^2 \approx 1.44 \times 10^{-6}$$

则 $\left(\frac{2U(d)}{\bar{d}}\right)^2 >> \left(\frac{U(l)}{\bar{l}}\right)^2 >> \left(\frac{U(R)}{\bar{R}}\right)^2$

d 的测量是主要误差源:

放大效应: 在电阻率的计算公式中，直径 d 是以平方的形式出现的。这意味着直径测量的相对不确定度在合成时会被乘以 2，极大地放大了直径测量的误差影响，使其成为主导因素。

物理原因: 实验中使用的金属导体可能并非完美的圆柱体。截面可能不完全是圆形，或者在不同位置上直径存在微小差异。尽管通常会进行多点测量取平均，但这种不均匀性本身就引入了随机误差。

仪器与读数: 使用螺旋测微器或游标卡尺测量 d 时，存在仪器本身的系统误差（如零点误差、尺身刻度误差）以及实验者估读产生的随机误差。

l 的测量是次要误差源:

定位误差: 在双臂电桥法中，两个电压探头（电位接头）与导体接触的位置难以精确标记和重复。探头接触点的微小偏移会导致测量长度 l 的误差。

读数误差: 使用米尺或钢板尺测量长度 l 时，存在估读误差和视差误差。

R 的测量误差最小:

仪器优势：实验采用了双臂电桥，这是一种专门设计用于精确测量低电阻的仪器。它能够有效地消除导线电阻和接触电阻的影响，从而保证了电阻 R 的测量值具有很高的准确性和可靠性。因此，R 的测量对总不确定度的贡献极小。

此外，材料本身的因素也可能导致测量偏差。铜导体表面可能存在轻微氧化膜或污物，这会影响电极的实际接触，使局部电流分布不均。尽管实验采用了四端接法来消除导线和接触电阻的影响，但表面氧化仍可能导致测量电阻略低于理论值，这是典型的系统误差。

(2) 电阻温度系数测量的误差分析

查表得铜的温度系数为 $4.33 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

公式法：

$$\bar{\alpha} = 4.11 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

相对误差为 $E_1 = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 5\%$

误差分析：

虽然公式法最后求得的平均电阻相对误差为 5%，但是方差较大。可能的原因：

1. 在本实验中，测量金属导体的电阻温度系数时，公式法计算依赖两点数据，如果这两点的温度或电阻测量存在微小偏差，计算出的温度系数就会直接受到影响，导致误差较大。
2. 手动调节电阻值时温度处于连续变化过程，难以实现测量电压与温度的一一对应关系，因此在电压与电阻值的测定中存在一定的测量误差。
3. 加热过程中，加热炉内部可能存在温度分布不均匀现象，导致铜电阻的实际温度与温度计所示温度之间存在差异，从而影响测量精度。

作图法：

$$\bar{\alpha} = \frac{k}{b} = 4.14 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

相对误差为 $E_2 = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 4\%$

误差分析：

作图法将所有测量数据点绘制成为图，并进行线性拟合，这种方法有几个优势：

1. 平滑随机误差：作图法利用全部数据点，通过拟合平均了测量中的随机误差，使偶然偏差对最终结果的影响减小。
2. 减少偶然误差影响：公式法只使用两点数据，如果这两点存在异常或测量误差，会直接影响计算结果；作图法则综合多点数据，更稳健。
3. 反映整体趋势：作图法可以直观观察数据随温度变化的整体趋势，避免了因单点偏差造成的误差放大。

因此，在本实验中，作图法得到的温度系数结果相对误差比公式法小，更接近标准值，说明作图法能够有效降低实验测量中的随机误差，提高结果的可靠性。

3. 实验探讨（10 分）

(对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。)

通过双臂电桥测量低电阻和电阻温度系数，验证了四端接法消除附加电阻的原理。实验中掌握了电桥平衡调节、粗细调及数据处理方法，测量结果与标准值接近，误差在可接受范围内。

四、思考题 (10 分)

(解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。)

1. 双臂电桥与惠斯登电桥的异同

相同点：

两者都是基于电桥平衡原理进行电阻测量的电路。

都需要调节桥臂电阻，使电桥达到平衡状态，从而计算未知电阻值。

都可以通过电位计或检流计判断平衡点，实现精密测量。

不同点：

结构不同：惠斯登电桥为传统的四臂桥，用于一般电阻测量；双臂电桥采用双臂结构，并结合四端接法，专用于低电阻测量。

测量对象不同：惠斯登电桥适合中高阻值的精密测量；双臂电桥专门用于测量极低电阻，能够减小导线和接触电阻的影响。

误差控制方式不同：双臂电桥通过四端接法和粗导线连接，使附加电阻“转移”到非测量回路中，从而减小系统误差；惠斯登电桥通常无法完全消除低电阻测量中的导线电阻影响。

2. 双臂电桥测量低电阻时能够消除或减小附加电阻影响的原因

根据基尔霍夫方程：

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

双臂电桥从以下几个角度减小了误差：

(1) R_s 与 R_x 之间用阻值很小的粗导线相连，即 r 很小，即使 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ 之间有差别，其影响也很小。

(2) 由于双臂电桥的特性，附加电阻 $r_{x1}, r_{x2}, r_{s1}, r_{s2}$ 都只对总的工作电流 I 产生影响，而对测量结果没有影响。

(3) 由于与 $r_{x3}, r_{x4}, r_{s3}, r_{s4}$ 相串联的桥臂电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 阻值都为 10Ω 以上，与之相比，这部分附加电阻对测量结果的影响也可忽略不计。

3. 如果四端电阻的电流端和电位端接反，对测量结果的影响

如果电流端和电位端接反，意味着：

原来应该通过大电流的通路（电流端）现在连接到了高阻抗的测量回路（电位端）。

原来应该用于测量电压的通路（电位端）现在被用于引入大电流（电流端）。

1. 电流回路电阻过大：当电流端被接成电位端时，整个电流回路的等效电阻会大，使通过被测电阻的电流大大减小，甚至无法产生足够的电压降供测量。电桥可能无法达到平衡，或者即使平衡，由于电流很小，测量结果也会非常不稳定，甚至完全错误。
2. 测量原理失效：双臂电桥通过四端接入法消除引线电阻影响的原理基础被完全破坏。引线电阻不再是被“转移”或“忽略”的，而是直接影响主电流大小和电压分配，使得测量结果无法反映真实的 R_x 值。
3. 可能损坏仪器：如果大电流通过原来设计用于小电流的电位引线，可能会导致引线过热甚至烧毁，损坏仪器。

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”本课程内对应实验项目的“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