

浙江大学

物理实验报告

实验名称: 这是一个实验名称

实验桌号: 67656

指导教师: 指导教师姓名

班级: 计科 24XX

姓名: Fffffx

学号: 324010XXXX

实验日期: 2025 年 1 月 1 日 星期三 上午

# 一、预习报告 (10 分)

## 1. 实验综述 (5 分)

测量低电阻时，导线电阻和接触电阻（量级约为  $0.01 - 1\Omega$ ）会带来不可忽略的误差。为了消除或减小附加电阻对测量的影响，本实验采用四端接入法连接待测电阻。如下图所示， $C_1, C_2$  为电流接头， $P_1, P_2$  为电位接头，位于电位接头之间的部分才是真实待测的电阻  $R_x$ 。

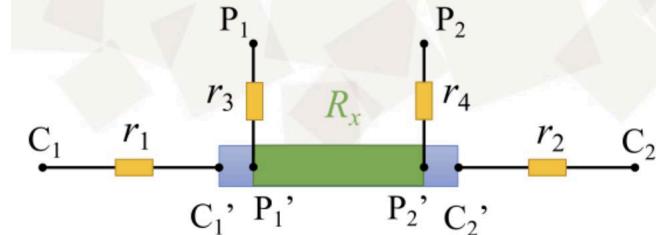


Figure 1: 四端接入法示意图

将采用四端接入法的低电阻接入惠斯登电桥，演变为双臂电桥，其等效电路如下图所示。

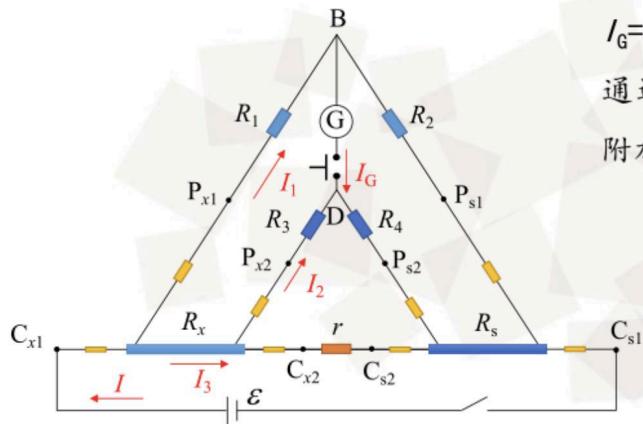


Figure 2: 四端接入法示意图

当电桥平衡时，检流计  $G$  中电流  $I_g = 0$ ，根据基尔霍夫定律可得：

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

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

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

解得：

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

在实际电桥中，通过使  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ，可以使上式第二项为零，或通过使连接电阻  $r$  足够小 ( $r < 0.001\Omega$ )，使第二项修正项远小于  $R_x$  而可被忽略。此时，电桥的平衡条件简化为：

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

本实验使用 QJ44 型直流双臂电桥，通过调节  $R_s$  和倍率  $\frac{R_1}{R_2}$  使电桥平衡，即可读出待测电阻  $R_x$ 。

此外，金属导体的电阻与温度有近似线性关系：

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

其中  $\alpha$  为电阻温度系数。

实验方法：

1. 测量电阻率：将待测导体接入双臂电桥，测量其在室温下的电阻  $R$ 。使用游标卡尺测量导体直径  $d$ ，并读出电位接头间的长度  $l$ 。根据  $\rho = R * \left(\frac{S}{L}\right) = R * \left(\pi \frac{d^2}{4l}\right)$  计算电阻率。
2. 测量电阻温度系数：将待测导体置于加热炉中，采用升温法，每隔  $5^{\circ}\text{C}$  左右记录一次电阻  $R_x$  及对应的温度  $t$ 。

## 2. 实验重点（3 分）

- 熟悉双臂电桥测量低电阻的原理。
- 了解单臂电桥与双臂电桥的关系与区别。
- 学会 QJ-44 型双臂电桥测量低电阻的方法。

## 3. 实验难点（2 分）

- 双臂电桥的工作原理，相比单臂电桥较难理解，需要看懂电路图再做实验。
- 测量电阻的温度系数时，测量值可能会因为加热和冷却不完全而产生误差，实际实验中要等待温度稳定后再进行测量。

## 二、原始数据 (20 分)

姓名：5 324010615 李宇晗

11.16

1. 测量金属导体的电阻率

$R/\Omega$	$d/mm$	$l/cm$
$4.379 \times 10^{-4}$	4.36	20.03

2. 测量金属导体的电阻温度系数

次数	1	2	3	4	5
$t/^\circ C$	20.3	27.2	30.0	35.3	40.0
$R/(10^{-3}\Omega)$	4.606	4.730	4.781	4.880	4.964

次数	6	7	8	9	10
$t/^\circ C$	45.2	50.0	55.0	59.7	65.0
$R/(10^{-3}\Omega)$	5.059	5.141	5.237	5.320	5.420

郑雨航

## 三、结果与分析 (60 分)

### 1. 数据处理与结果 (30 分)

#### 1.1 测量金属导体的电阻率

测量次数	阻值 $\frac{R}{\Omega}$	直径 $\frac{d}{mm}$	长度 $\frac{l}{cm}$
1	$4.39 \times 10^{-4}$	4.36	20.03

不确定度计算：

- 阻值  $R$  的不确定度： $U(R) = (0.1 \times 0.01) \times 0.2\% \Omega = 2.0 \times 10^{-6} \Omega$

- 直径  $d$  的不确定度:  $U(d) = 0.02 \frac{\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ mm}$
- 长度  $l$  的不确定度:  $U(l) = 0.5 \frac{\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm} = 0.029 \text{ cm}$

根据  $\rho = R * \frac{\pi d^2}{4l}$ , 电阻率的相对不确定度为:

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

$$\frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{2.0 \times 10^{-6}}{4.39 \times 10^{-4}}\right)^2 + \left(2 * \frac{0.012}{4.36}\right)^2 + \left(\frac{0.029}{20.03}\right)^2} = 0.55\%$$

电阻率计算:

$$\rho = (4.39 \times 10^{-4} \Omega) * \frac{\pi * (4.36 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4 * 20.03 \times 10^{-2} \text{ m}} = 3.271 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

电阻率的绝对不确定度:

$$U(\rho) = \rho * 0.55\% = 3.271 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} * 0.0055 = 0.018 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

测量结果:

$$\rho = (3.271 + -0.018) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

## 1.2 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
$\frac{t}{^\circ\text{C}}$	20.3	27.2	30.0	35.3	40.0	45.2	50.0	55.0	59.7	65.0
$\frac{R_x}{10^{-3} \Omega}$	4.606	4.730	4.781	4.880	4.964	5.059	5.141	5.237	5.320	5.420

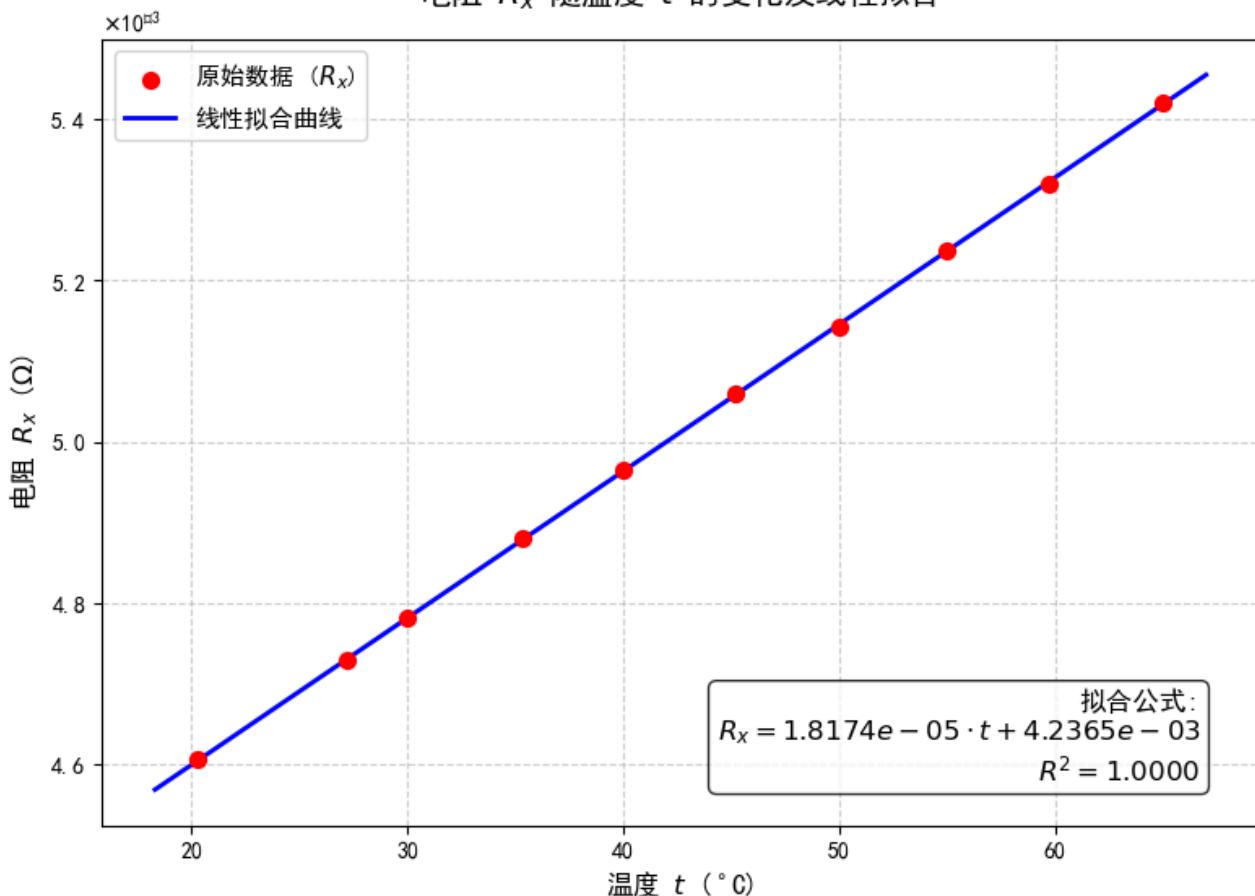
处理方法一: 计算  $\alpha_i = \frac{R_{\{x(i+5)\}} - R_{\{\xi\}}}{R_{\{\xi\}} t_{\{i+5\}} - R_{\{x(i+5)\}} t_i}, i = 1, 2, 3, 4, 5$

i	1	2	3	4	5
$\alpha_i / {}^\circ\text{C}^{-1}$	$429 \times 10^{-5}$	$425 \times 10^{-5}$	$431 \times 10^{-5}$	$425 \times 10^{-5}$	$431 \times 10^{-5}$

平均值:  $\bar{\alpha}_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 428.2 \times 10^{-5} {}^\circ\text{C}^{-1}$

处理方法二: 拟合  $R_x - t$  关系曲线。

### 电阻 $R_x$ 随温度 $t$ 的变化及线性拟合



拟合直线方程为:  $R_x = 1.8174 \times 10^{-5}t + 4.2365 \times 10^{-3}$  根据  $R_x = R_0(1 + \alpha t) = R_0 + R_0\alpha t$ , 可得:  $R_0 = 4.2365 \times 10^{-3}\Omega$   $R_0\alpha = 1.8174 \times 10^{-5}\frac{\Omega}{^\circ C}$

$$\alpha_2 = \frac{1.8174 \times 10^{-5}}{4.2365 \times 10^{-3}} = 4.2899 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1} \approx 428.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$$

(按原报告数据)

两种方法相对误差:  $E = \frac{|\alpha_2 - (\alpha)_1|}{|(\alpha)_1|} = \frac{|428.8 - 428.2|}{428.2} \times 100\% = 0.14\%$  两种处理方式得到的电阻温度系数相差不大, 拟合直线决定系数  $R^2$  接近 1, 说明实验数据有效性高。

## 2. 误差分析 (20 分)

### 1. 测量金属导体的电阻率:

- 在测量电阻时, 由于电阻接头 (电位端) 可以在一定范围内晃动, 可能会导致长度  $l$  的测量产生误差。
- 实验时观察到电阻可能有一定程度上的弯曲, 这可能会导致电阻长度  $l$  和直径  $d$  的测量有所误差。

### 2. 测量金属导体的电阻温度系数:

- 主要误差来源是在加热过程中, 达到设定温度后, 由于热惯性, 电阻实际温度与温度计读数可能不同步, 温度仍在一定范围内波动。
- 调节电桥平衡需要一定反应时间, 这段时间会导致读取的阻值和温度不完全对应。

### 3. 实验探讨（10 分）

本次实验主要学习了双臂电桥的工作原理和使用方法，其中最重要的是理解了如何通过四端接入法来巧妙地减小甚至消除导线电阻和接触电阻对低电阻测量带来的巨大影响。通过实际操作，我们使用双臂电桥比较精确地测量了金属导体的电阻率，并进一步探究了其电阻随温度变化的规律，求得了电阻温度系数。

## 四、思考题（10 分）

### 1. 双臂电桥和惠斯登电桥有哪些异同？

相同点：

- 核心原理一致，均基于电桥平衡条件（检流计电流为零）。
- 结构上都包含四个主要桥臂、一个电源和一个用于检测平衡的指零仪器。

不同点：

- 测量对象：惠斯登电桥（单臂电桥）主要用于测量中高值电阻 ( $1\Omega \sim 10^6\Omega$ )；双臂电桥专门用于测量低电阻 ( $< 1\Omega$ )。
- 误差消除：惠斯登电桥无法消除引线电阻和接触电阻的影响；双臂电桥通过四端接入法和增加一个辅助臂 ( $R_3, R_4$ )，能有效消除这些附加电阻对测量结果的影响。
- 接线方式：惠斯登电桥被测电阻采用两端接入；双臂电桥被测电阻采用四端接入（电流端和电位端分离）。

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

双臂电桥主要通过两个设计来消除附加电阻：

- 电位端与电流端分离（四端接入法）：将被测低电阻  $R_x$  分为两个电流端 ( $C_1, C_2$ ) 和两个电位端 ( $P_1, P_2$ )。测量用的主电流  $I_3$  通过电流端流入和流出，附加电阻主要集中在这里。而电位端  $P_1, P_2$  接入的是检流计和高内阻的  $R_1, R_3$  支路，当电桥平衡时，流过电位引线的电流  $I_g$  几乎为零，因此电位引线上的附加电阻压降可忽略不计。这样就保证了  $R_1, R_x$  支路测量的电压即为  $R_x$  两端的真实电压。
- 辅助桥臂补偿：增加的辅助臂  $R_3, R_4$  和连接导线  $r$  构成了第二个电桥。通过保证  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  的比例关系，使得连接导线  $r$  上的压降对电桥平衡没有影响（即  $P_{\{x2\}}$  和  $P_{\{s2\}}$  两点电势差为零），从而彻底排除了电流端附加电阻  $r$  对测量结果的影响。

### 3. 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？

若将四端电阻的电流端 ( $C_1, C_2$ ) 和电位端 ( $P_1, P_2$ ) 接反，即把  $C_1, C_2$  接入电桥的  $P_{\{x1\}}, P_{\{x2\}}$ （或  $P_{\{s1\}}, P_{\{s2\}}$ ）端，而把  $P_1, P_2$  接入电源回路。

- 测量结果显著偏大：接反后，电位端  $P_1, P_2$  之间的电阻  $R_x$  才是我们想测的，但我们却把带有很大引线电阻和接触电阻  $r_1, r_2$  的电流端  $C_1, C_2$  接入了测量电路。此时电桥测量的电阻将是  $R_x$  加上  $P_1, C_1$  之间和  $P_2, C_2$  之间的两段导体电阻及接触电阻，即  $R_{\{\text{测}\}} = R_{\{C1-C2\}} = R_x + r_{\{C1-P1\}} + r_{\{C2-P2\}}$ 。这个测量值将远大于真实的  $R_x$ 。
- 可能损坏仪器：原本只流过微小检流计电流的电位端引线（通常较细），现在被接入了主电源回路，会通过较大的工作电流，可能导致引线过热甚至烧毁。

### • 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。