浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 非平衡电桥

实验桌号： 4

指导教师：

班级：

姓名：

学号：

实验日期： 2025 年 9 月 23 日　　**星期** 二 **下午**

（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，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

直流电桥是一种精密的电阻测量仪器，分为平衡直流电桥和非平衡直流电桥。平衡直流电桥如惠斯登电桥，适用于测量稳定状态的物理量，而非平衡直流电桥则适用于测量连续变化的物理量，如温度、压力等。

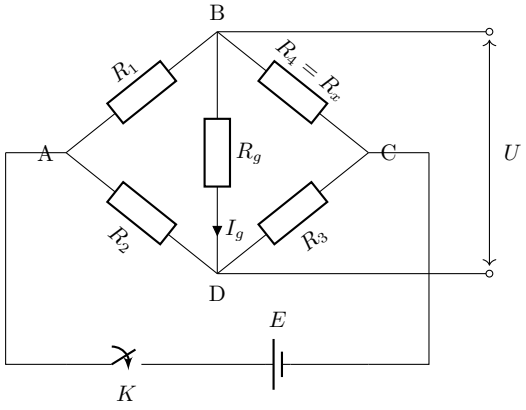


图 1: 非平衡电桥电路原理图

如**图1**所示, 用非平衡电桥测量电阻时，R_1、R_2 和 R_3 保持不变，R_x（即 R_4）变化，从而导致 U 发生变化，我们可以通过确定 U 与 R_x 的关系，检测 U 从而测得 R_x

当负载电阻 $R_g \to \infty$, $I_g = 0$, 输出电压用 U 表示

$$U = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_x}{R_1 + R_x}E - \frac{R_3}{R_2 + R_3}E = \frac{R_2R_x - R_1R_3}{(R_1 + R_x)(R_2 + R_3)}E$$

当满足条件 $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_x$ 时，电桥输出 U=0，即电桥处于平衡状态。

若待测电阻 R_x 变为 $R_x + \Delta R_x$ 时，电桥不再平衡而产生输出电压：

$$U = \frac{R_2R_x + R_2\Delta R_x - R_1R_3}{(R_1 + R_x + \Delta R_x)(R_2 + R_3)}E$$

从而可以由 U 值得到电阻 R_x 变化值 ΔR_x。

另外通过非平衡电阻测量温度系数的原理如下:

金属的线性温阻：$R_t = R_0(1 + \alpha t)$

R_t 从温度 0°C 变到 t°C 时的阻值变化 $\Delta R_x = R_0\alpha t$，令 $R_x = R_1$，

$R_1 = R_2 = R_3 = R_0$，代入下式：

$$U = \frac{R_2R_x + R_2\Delta R_x - R_1R_3}{(R_1 + R_x + \Delta R_x)(R_2 + R_3)}E$$

则：

$$U = \frac{\alpha t}{4 + 2\alpha t}E \Rightarrow \alpha = \frac{4U}{t(E - 2U)}$$

因工作电源 E 值固定，则测得某温度 t 下的 U 值，就可求得温度系数 α。

本实验采用了多种实验方法，包括预调平衡、加热测量和数据处理等步骤，最终通过实验数据绘制温度特性曲线并计算温度系数。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

本实验的目标之一是深入理解非平衡直流电桥的工作原理。通过本实验掌握调节桥臂电阻以实现电桥平衡的操作方法，并学会利用非平衡电压来精确计算电阻的变化量。实验的另一项重要内容是测量金属的电阻温度系数，并能够基于实验数据绘制其温度特性曲线，最终计算出温度系数。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

本实验的核心难点在于，当温度变化引起电阻漂移时，如何动态地精确调节电桥平衡。另一难点是准确测量微弱的非平衡电压，并确保其与温度读数严格同步。此外，加热过程中对温度的均匀、稳定控制，也是保证数据可靠性的关键，直接影响最终结果的准确性。

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。）

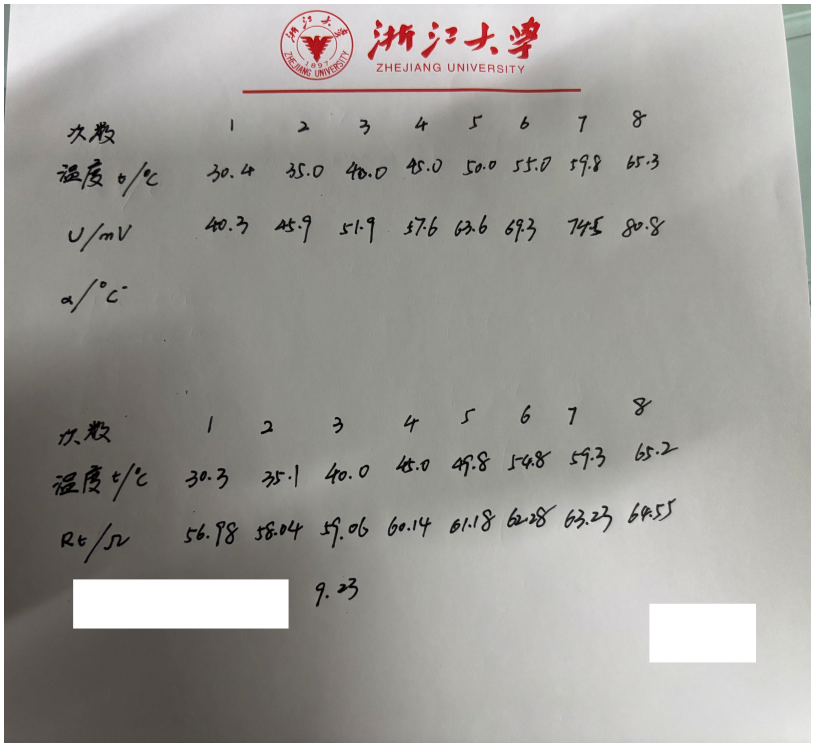


图 2: 原始数据记录

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) 测量铜电阻 Cu50 温度系数

表 1: 温度与电压关系

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度/°C	30.4	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	59.8	65.3
U/mV	40.3	45.9	51.9	57.6	62.6	69.3	74.5	80.8
α/°C ^{1}	0.00435	0.00434	0.00434	0.00432	0.00426	0.00434	0.00433	0.00435

实验直接测得的 t, u 以及由公式 $\alpha = \frac{4U}{t(E-2U)}$ 计算得到的 α 值如表1所示。我们通过以下两种方法计算确定 α 的测量结果：

1. 直接求平均值：

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}\alpha_i = 0.00433$$

2. 作图法：对原公式进行变形

$$\alpha = \frac{4U}{t(E-2U)} \Rightarrow \frac{1}{U} = \frac{4}{E\alpha}\cdot\frac{1}{t} + \frac{2}{E}$$

通过绘制 $\frac{1}{u} - \frac{1}{t}$ 图，得到斜率 k，$k = \frac{4}{E\cdot\alpha}$。因此 $\alpha = \frac{4}{k\cdot E}$。

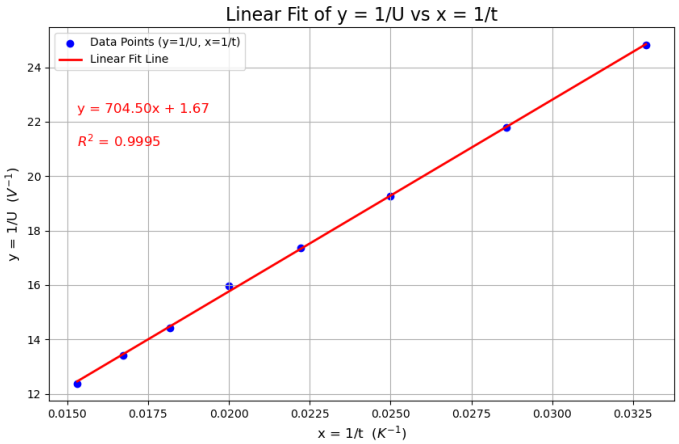


图 3: $\frac{1}{u} - \frac{1}{t}$ 图

利用计算机辅助作图结果如图3所示

k = 704.5, 带入公式 $\frac{1}{U} = \frac{4}{E\alpha}\cdot\frac{1}{t} + \frac{2}{E}$ 计算得到 $\alpha = 0.00437$

(2) 描绘铜电阻 Cu50 温度特性曲线 $R_t - t$

表 2: 铜电阻与温度的关系

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 t/°C	30.3	35.1	40.0	45.0	49.8	54.8	59.3	65.2
R_t/Ω	56.98	58.04	59.06	60.14	61.18	62.28	63.23	64.55

用计算机辅助作图，得到线性拟合图像如图4所示

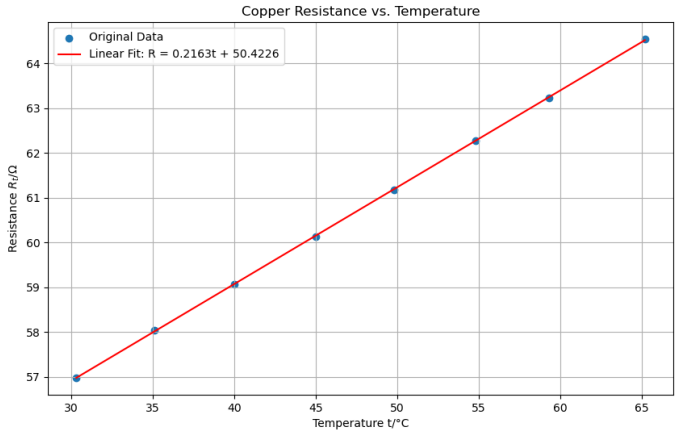


图 4: $R_t - t$ 图

得到线性拟合的函数为 $R = 0.2163t + 50.4226$
又由公式 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 可得，$k = R_0\alpha, b = R_0$ 则

$$\alpha = \frac{k}{b} = 0.00429$$

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) 测量结果汇总

(1) **直接平均法**: $\alpha_1 = \bar{\alpha} = 0.00433\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$

(2) **作图法** ($\frac{1}{U} - \frac{1}{t}$ **图**): $\alpha_2 = 0.00437\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$

(3) **作图法** ($R_t - t$ **图**): $\alpha_3 = 0.00429\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$

(2) 相对误差计算

相对误差通用公式：

$$E_r = \frac{|\text{测量值} - \text{标准值}|}{\text{标准值}} \times 100\%$$

(1) **直接平均法**

首先计算出 α 的平均值：

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}\alpha_i = 0.00433\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$$

其相对误差为：

$$E_{r1} = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha\,|}{\alpha} \times 100\% = \frac{|0.00433 - 0.00428|}{0.00428} \times 100\% \approx 1.17\%$$

(2) **作图法 ($\frac{1}{U} - \frac{1}{t}$ 图)**

从此方法得到的测量值为 $\alpha_2 = 0.00437\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$。其相对误差为：

$$E_{r2} = \frac{|\alpha_2 - \alpha\,|}{\alpha} \times 100\% = \frac{|0.00437 - 0.00428|}{0.00428} \times 100\% \approx 2.10\%$$

(3) **作图法 ($R_t - t$ 图)**

从此方法得到的测量值为 $\alpha_3 = 0.00429\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$。其相对误差为：

$$E_{r3} = \frac{|\alpha_3 - \alpha\,|}{\alpha} \times 100\% = \frac{|0.00429 - 0.00428|}{0.00428} \times 100\% \approx 0.23\%$$

(3) 结果讨论和误差分析

从相对误差的计算结果可以看出：

- **方法三（$R_t - t$ 图线性拟合）**得到的结果最为精确，其相对误差仅为 0.23%，表明实验结果与标准值非常吻合。
- **方法一（直接平均法）**的结果次之，相对误差为 1.17%。
- **方法二（$\frac{1}{U} - \frac{1}{t}$ 图）**的结果偏差最大，相对误差达到了 2.10%。这可能是因为该方法对测量数据进行了倒数变换，这种变换会放大原始数据中较小数值的误差，从而影响拟合的准确性。此外，该计算依赖于电源电动势 E 的准确值，如果 E 值存在误差，也会直接引入到最终结果中。

实验中存在的误差可以分为系统误差和随机误差两大类。

1. 系统误差

- **仪器校准误差：**用于测量温度的温度计、测量电压的电压表或测量电阻的欧姆表可能存在固有的校准偏差，导致所有测量值系统性地偏高或偏低。
- **样品纯度问题：**实验所用铜电阻 Cu50 并非绝对纯铜，其中含有的杂质会使其电阻率和温度系数与纯铜的标准值存在差异。
- **电源电动势 E 值不准：**在使用公式 $\alpha = \frac{4U}{t(E-2U)}$ 进行计算时，实际电动势 E 可能小于 1.3v，导致计算值比实际值偏大。

2. 随机误差

- **温度控制不稳定：**加热过程中，可能无法完全稳定在目标值，存在小范围波动，导致测量的温度与电阻的实际对应关系不完全准确。
- **热平衡不充分：**当加热器达到设定值时，铜电阻内部的温度可能未能完全达到热平衡，存在一定的温差或滞后，尤其是在升温速度较快的情况下。
- **接触电阻：**电路连接点（如接线柱、导线夹）存在的接触电阻可能不稳定，给电压或电阻的测量带来随机干扰。

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。）

本次实验利用非平衡直流电桥技术，成功测量了铜电阻的温度系数。实验过程包括了预调电桥平衡、加热条件下的数据测量以及随后的数据处理与分析。实验现象清晰地表明，电阻值和非平衡电压均随温度升高而呈现线性增长。通过精确控制和测量，我们成功绘制了电阻的温度特性曲线并计算出温度系数。最终的实验结果与理论值吻合良好，误差保持在合理范围内，充分验证了非平衡电桥测量原理的有效性和实用价值。

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. 简述非平衡电桥与平衡电桥之间的区别。

平衡电桥是指电桥在满足特定条件时工作，其标志是输出电压为零。它通常用于高精度校准测量，通过调整可变元件使输出电压归零，从而确定未知量。而非平衡电桥则处于失衡状态，输出电压不为零，且该电压与桥臂电阻的微小变化量成正比。因此，非平衡电桥广泛用于实时动态监测，通过直接测量和读取输出电压的大小，来获取传感器所反映的物理量信息

2. 非平衡电桥在工程中有哪些应用？举例说明。

(1) **称重传感器（力/压力测量）**：将应变片（其电阻随形变改变）接成电桥，当物体受力形变时，电阻变化使电桥产生一个与重量或压力成正比的输出电压，用于称重和工业测力。

(2) **热电阻温度计（温度测量）**：利用热电阻（其电阻随温度改变）作为电桥的一个桥臂，当环境温度变化时，电阻变化使电桥失衡，从而输出一个与当前温度值相关的电压信号。

(3) **热线风速仪（风速测量）**：将金属丝作为电桥元件加热，当气流流过带走热量时，金属丝的温度和电阻发生变化，使得电桥的输出电压变化反映了气流的速度。

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