

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: 谭艾林老师

班级: -

姓名: -

学号: -

实验日期: 2025 年 11 月 24 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，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

非平衡直流电桥实验旨在帮助我们掌握非平衡电桥的工作原理，并利用它来测量金属（铜）的电阻温度系数。与平衡电桥不同的是，非平衡电桥不仅能测量相对稳定的物理量，更能将传感器（如热敏电阻）因环境变化（温度、压力等）引起的电阻微小变化转化为电压信号输出，是自动控制和非电量电测技术的基础。

实验现象：

在实验中，将铜电阻（Cu50）置于加热装置中。随着温度 t 的升高，铜电阻阻值 R_t 增大。

1. 在非平衡电压法中，电桥初始处于平衡状态 ($U=0$)，随温度升高，电桥失去平衡，数字电压表显示的非平衡电压 U 逐渐增大。

2. 在平衡电桥法中，随温度升高，检流计偏转，需调节比较臂电阻使电桥重新达到平衡，此时测量出的电阻值 R_t 随温度线性增加。

实验原理：

1. 非平衡电桥工作原理

非平衡电桥原理如下图所示，由 R_1, R_2, R_3, R_x 组成桥臂，电源电压为 E ：

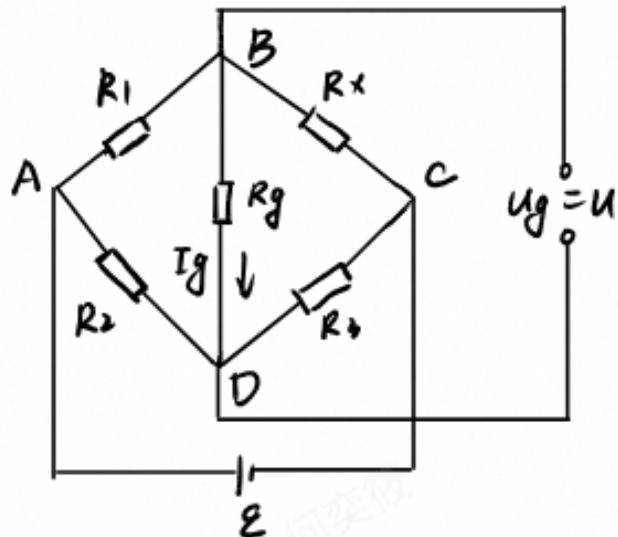


图 1：非平衡电桥原理图

当负载电阻 $R_g \rightarrow \infty$ （输出端开路）时，输出电压 U 为 B、D 两点电位差，又根据分压原理，B 点和 D 点对负极（C 点）的电压分别为：

$$U_{BC} = \frac{R_x}{R_1 + R_x} E, \quad U_{DC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E$$

则输出电压 U 为：

$$U = U_{BC} - U_{DC} = \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) E = \frac{R_2 R_x - R_1 R_3}{(R_1 + R_x)(R_2 + R_3)} E \quad (1)$$

当满足 $R_1 R_3 = R_2 R_x$ 时， $U = 0$ ，电桥处于平衡状态。固定 R_1, R_2, R_3 ，调节电阻 R_x 为 $R_x + \Delta R_x$ ，电桥失去平衡，输出的非平衡电压 U 为：

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

根据 U 的变化，我们就能得知电桥中电阻的变化情况。

2. 金属电阻温度系数 α 的测量

变温金属电阻阻值随温度线性变化，即 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。其中 R_0 为变温电阻 0°C 时的阻值， α 为电阻温度系数。

实验中，当 B、D 处于开路状态时，设定桥臂电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ ，此时待测电阻 $R_x = R_t = R_0 + \Delta R_x$ ，其中 $\Delta R_x = R_0 \alpha t$ 。

将上述条件代入公式 (1) 得输出电压与温度的关系：

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

由此可反解出电阻温度系数 α 的计算公式：

$$\alpha = \frac{4U}{t(E - 2U)} \quad (3)$$

本次实验中 $E \approx 1.3\text{ V}$ 。因此通过测量不同温度 t 下的非平衡电压 U ，我们即可求得 α 。

实验方法：

平衡电桥法（绘 $R_t - t$ 曲线）：

1. 将开关置于“平衡 5V”档，此时电路转换为惠斯登电桥
2. 设定 $R_1 = R_2$ ，调节 R_3 （即测量臂 R_c ）使检流计示数为 0。
3. 此时 $R_x = R_3$ 。逐点测量不同温度下的阻值，绘制 $R_t - t$ 曲线，验证线性关系并由斜率求 α 。

非平衡电压法（测 α ）：

1. 将 FQJ 电桥功能开关置于“非平衡电压”档。
2. 按照 $R_1 = R_2 = R_3 = 50\Omega$ 设置桥臂，接入 0°C 时阻值为 50Ω 的 Cu50 铜电阻。
3. 预调平衡：若当前非 0°C ，需通过微调 R_3 或利用电桥调零功能，模拟 $t = 0$ 时 $U = 0$ 的初始状态（或在数据处理时扣除初始电压）。
4. 开启加热器，每隔 5°C 记录温度 t 和电压 U ，计算 α 并取平均值。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

1. 原理掌握：深刻理解非平衡电桥如何将电阻的微小增量 ΔR 转化为电压信号 U ，以及公式推导过程。
2. 参数测量：掌握利用公式 $\alpha = \frac{4U}{t(E - 2U)}$ 计算温度系数的方法。
3. 仪器操作：熟练使用 FQJ 教学电桥的“平衡”与“非平衡”模式切换，以及 PID 温控仪的设定与读数。

3. 实验难点 (2 分)

(简述本实验的实现难点, 不超过 100 字。)

1. 热平衡的控制: 加热过程中铜电阻内部与温控传感器之间存在温度梯度的滞后(热惯性), 需控制升温速率, 待温度示数稳定后再读取电压或调节电阻, 否则会导致 U 与 t 不对应, 产生较大系统误差。

2. 接触电阻影响: 实验连线(特别是 R_x 端)必须紧固, 连接导线的不稳定或接触不良会引起电压读数跳动或引入接触电阻, 严重影响非平衡电桥微弱电压信号的测量精度。

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。)

一. 用非平衡电桥测铜电阻温度系数

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 $t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
U/mV	40.0	46.7	52.1	58.4	64.0	69.7	75.1	80.8
$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$								

二. 用平衡电桥描绘铜电阻温度特性曲线

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 $t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
R_t/Ω	56.99	58.06	59.15	60.23	61.31	62.37	63.46	64.56

潘帆

图 2: original data

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。)

实验一: 测量铜电阻 Cu50 温度系数

表 1: 测量铜电阻 Cu50 温度系数原始数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 $t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
U/mV	40.0	46.2	52.1	58.4	64.0	69.7	75.1	80.8
$\alpha/\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	0.004372	0.004372	0.004357	0.004387	0.004369	0.004368	0.004354	0.004368

其中，每个 α 均由公式 $\alpha = \frac{4U}{t(E-2U)}$ 计算得到，本实验中 E 的值为 1.3V。

因此，我们所测得的 α 的平均值为：

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{8} = 0.004368 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

查找资料我们可以得到，Cu50 的温度系数的标准值为 $0.004280 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

故相对误差 E_r 为：

$$E_r = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_{theory}|}{\alpha_{theory}} \times 100\% = \frac{|0.004368 - 0.004280|}{0.004280} \times 100\% \approx 2.06\%$$

实验二：用平衡电桥描绘铜电阻（Cu50）温度特性曲线

表 2: 平衡电桥原始数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
温度 $t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
R_t/Ω	56.99	58.06	59.15	60.23	61.31	62.37	63.46	64.56

使用 matplotlib 对数据进行线性拟合，得到拟合直线为：

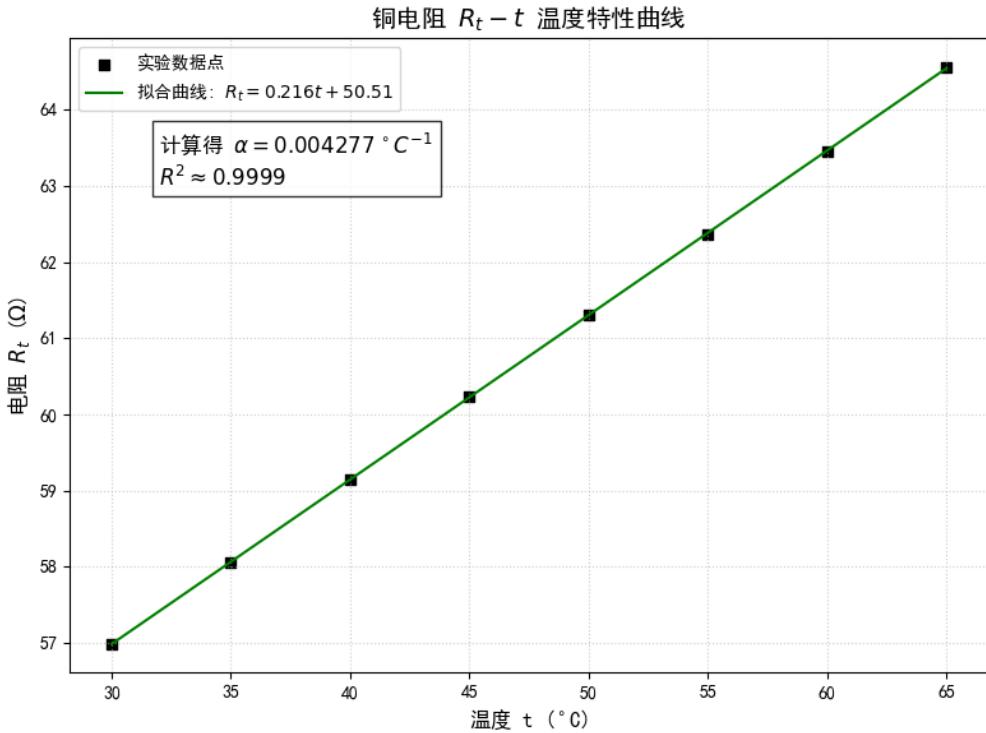


图 3: output

线性拟合结果:

- 拟合方程: $R_t = 0.2160 * t + 50.5051$
 - 截距 $R_0 = 50.5051\Omega$
 - 斜率 $k = 0.2160 \Omega/\text{°C}$
- 因此我们测得的温度系数为: $\alpha = \frac{k}{R_0} = 0.004277^\circ\text{C}$, 相对误差 E_r 为:

$$E_r = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_{theory}|}{\alpha_{theory}} \times 100\% = \frac{|0.004277 - 0.004280|}{0.004280} \times 100\% \approx 0.07\%$$

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。)

相对误差在实验数据处理部分已经计算完毕, 本部分直接分析实验误差来源。

在本实验中, 我们可以发现, 非平衡电桥法的相对误差显著大于平衡电桥法, 这主要源于以下几个方面的误差:

系统误差 (主要影响非平衡电桥法)

1. 电源电压 E 的准确性: 非平衡电桥法中, α 的计算高度依赖于电源电压 E 的准确值。而实际测量过程中, 电源电压的大小会随负载或时间产生微小漂移, 这会直接对 α 的计算结果产生较大影响。
2. 预调平衡的偏差: 非平衡法要求在 $t = 0^\circ\text{C}$ 时电桥平衡 ($U=0$)。而在实际操作中, 我们是在室温下通过调零旋钮来抵消初始电压。这种“电气调零”与真实的“ 0°C 电阻平衡”存在差异, 若调零不准, 会给后续所有电压读数引入一个固定的系统偏差。

环境与操作误差（同时影响两种方法）

1. **温度测量误差：**实验中温度传感器与铜电阻之间存在热接触不良或热滞后现象，导致实际铜电阻温度与读数存在偏差，进而影响 α 的计算。同时，实验中我们可以观察到加热的速度较快，我是采用距离设定温度还有一定差距时即停止加热，使用余热使铜电阻温度达到设定值。但是铜电阻的温度仍然存在波动，且加热装置内部温度可能不均，也会对测量结果产生影响。

2. **接触电阻与连接线不稳定：**导线与 FDJ 型非平衡直流电桥连接端口的接触电阻会引入额外的电压下降，这种接触不良会导致读数波动，增加实验的随机误差。

3. **电压表读数误差** 数字电压表的读数存在一定的分辨率限制，存在 $\pm 0.1mV$ 的跳动，在测量微小电压时，读数的不确定性会对结果产生较大影响。

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。）

本实验利用 FQJ 型直流电桥，分别采用非平衡电压法和平衡电桥法测量了铜电阻（Cu50）的温度系数。实验发现，非平衡法中，输出电压 U 随温度升高显著增大，计算得 $\alpha \approx 0.004368^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，误差约 2.06%；平衡法通过绘制 $R_t - t$ 曲线，得 $\alpha \approx 0.004277^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，误差仅 0.07%。两种方法均验证了铜电阻阻值随温度线性增加的特性。

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。）

思考题一：简述非平衡电桥与平衡电桥之间的区别。

非平衡电桥与平衡电桥虽然电路结构相似（均为惠斯登电桥结构），但在工作原理、测量方法和应用场景上有显著区别：

(1) 测量原理不同（零示法 vs 偏转法）：

- 平衡电桥采用“零示法”。测量时必须调节比较臂电阻 (R_3)，使检流计示数为零 ($I_g = 0$)，此时 B、D 两点电势相等。计算公式为 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$ 。
- 非平衡电桥采用“偏转法”。测量时桥臂电阻 (R_1, R_2, R_3) 固定不变，电桥不处于平衡状态。它通过测量 B、D 间的输出电压 U 来反推待测电阻 R_x 的变化。

(2) 操作方式与测量速度不同：

- 平衡电桥在每次测量时都需要手动或自动调节电阻使电桥平衡，操作较繁琐，且无法实时跟随快速变化的信号。
- 非平衡电桥一旦预调平衡后，无需再调节电阻，可直接读取输出电压。其响应速度快，能够连续测量和记录。

(3) 应用场景不同：

- 平衡电桥适用于测量静态、固定且对精度要求较高的电阻值。
- 非平衡电桥适用于测量连续变化的物理量（如随时间变化的温度、压力等），常用于自动控制和非电量电测系统中。

思考题二：非平衡电桥在工程中有些哪些应用？举例说明。

非平衡电桥在工程中主要作为传感器信号的转换电路，将非电物理量引起的电阻的变化转化为电压或电流信号，从而实现对非电量的测量和控制。具体的应用包括：

(1) 温度测量与控制（热敏电阻/热电阻）：

- **原理：**利用金属热电阻（如本实验中的 Cu50）或半导体热敏电阻的阻值随温度变化的特性。
- **举例：**在工业生产中监测电机内部线圈的温度；或如家用空调、热水器的温度控制器，通过非平衡电桥读取热敏电阻的变化来控制加热或制冷。

(2) 应力与称重测量（电阻应变片）：

- **原理：**某些材料（如康铜丝）在受力发生形变时，其电阻率和几何尺寸会发生变化，导致电阻改变（应变效应）。
- **举例：**电子秤（称重传感器）、桥梁建筑的结构健康监测、飞机机翼的受力分析。将应变片接入非平衡电桥，将其微小的形变转化为电压信号输出。

(3) 压力测量：

- **原理：**压力传感器利用压阻效应，当气体或液体压力作用于传感器膜片时，引起电阻变化，通过非平衡电桥测量电压的变化情况，从而得知压力大小。
- **举例：**广泛用于气压计、油压监测等。

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