

# 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 一 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  $E$ ：

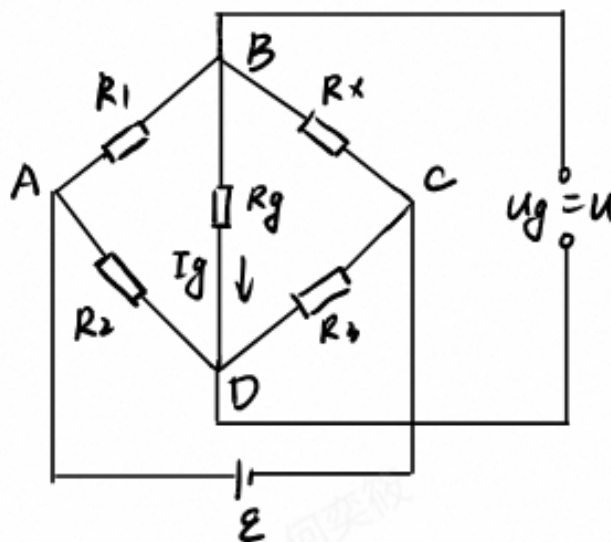


图 1: 非平衡电桥原理图

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 $\alpha$ 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  $0^\circ\text{C}$  时的阻值,  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$ 。

### 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  $\alpha$ 。

#### 非平衡电压法 (测 $\alpha$ ):

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  $0^\circ\text{C}$  时阻值为  $50\Omega$  的 Cu50 铜电阻。
3. 预调平衡: 若当前非  $0^\circ\text{C}$ , 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  $5^\circ\text{C}$  记录温度  $t$  和电压  $U$ , 计算  $\alpha$  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  $\Delta R$  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
$U/\text{mV}$	40.0	46.2	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
$R_t/\Omega$	56.99	58.06	59.15	60.23	61.31	62.37	63.46	64.56

谭琳

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
$U/\text{mV}$	40.0	46.2	52.1	58.4	64.0	69.7	75.1	80.8
$\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.004372	0.004372	0.004357	0.004387	0.004369	0.004368	0.004354	0.004368

其中，每个  $\alpha$  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  $\alpha$  的平均值为：

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

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

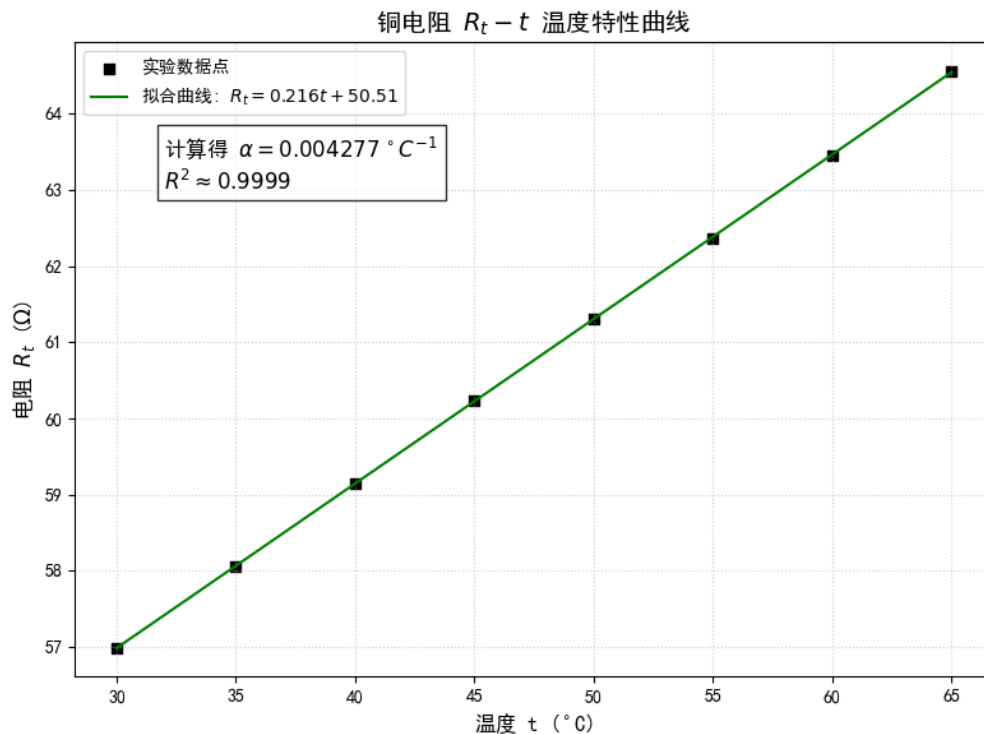


图 3: output

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  $k = 0.2160 \Omega/^\circ\text{C}$

因此我们测得的温度系数为:  $\alpha = \frac{k}{R_0} = 0.004277^\circ\text{C}^{-1}$ , 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,  $\alpha$  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  $\alpha$  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“ $0^\circ\text{C}$  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  $\alpha$  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**