

南開大學

2024 年 3 月 6 日实验直流单臂测电阻报告

姓名：姬晨卓

学号：2312219

专业：理科实验班（数学与大数据）

2024 年 3 月 9 日

目录

1	引言	2
2	实验原理	3
2.1	倍率 C 的选取与测量精度	3
2.2	电桥灵敏度与测量精度	3
2.3	换臂法 (C = 1)	3
2.4	测量不确定度分析	4
3	实验设备与材料	5
4	实验步骤	5
5	实验结果与数据分析	6
5.1	实验获取数据	6
5.2	灵敏度的测量	6
5.3	实验数据处理	6
5.4	探究电压与电桥灵敏度关系	6
5.5	换臂法测量未知电阻 R_{x2} 的阻值和电桥灵敏度	7
6	思考题	8
7	致谢	8

1 引言

用伏安法测电阻，受所用电表内阻的影响，在测量中往往引入方法误差：用欧姆表测量电阻虽较方便，但测量精度不高。在精确测量电阻时，常使用电桥进行测量。其测量方法同电位差计一样同属于比较测量法。电桥不仅可以测量电阻，还可以测量许多与电阻有关的电学量和非电学量（把这类非电学量通过一定的手段转换为电学量进行测量），而且在自动控制技术中也得到了广泛的应用，本实验所讨论的是直流单臂电桥（又称惠斯登电桥），主要是用来测量中等阻值（ $10 \sim 10^5$ ）电阻的：测量低阻（ $10 \sim 10^{-5}$ ）用直流双臂电桥（又称凯尔文电桥）；测量高阻（ $10^6 \sim 10^{12}$ ）则用专门的高阻电桥或冲击法等测量方法。对于本次实验，我们应达成以下目的：

1. 学习使用比较法（直流单臂电桥法）测定中电阻；
2. 了解电桥灵敏度；
3. 理解并掌握提高电桥测量精度；
4. 掌握电桥不确定度分析的方法；

2 实验原理

直流单臂电桥的原理性电路如图 1 所示。它是由四个电阻 R_a R_b R_x R_0 联成一个四边形回路，这四个电阻称做电桥的四个“臂”。在这个四边形回路的一条对角线的顶点间接入直流工作电源，另一条对角线的顶点间接入电流计，这个支路一般称做“桥”。适当地调节 R_0 值，可使 C、D 两点电位相同，电流计中无电流流过，这时称电桥达到了平衡。在电桥平衡时有：

$$R_a I_a = R_b I_b$$

$$R_x I_x = R_0 I_0$$

且

$$I_a = I_x, I_b = I_0$$

将 R_a, R_b 的比值记作 C

2.1 倍率 C 的选取与测量精度

- 电桥由平衡到平衡过程中，需要调节比较臂 R_0 的阻值。显然 R_0 调节位数越多，对电桥的平衡调节越精细，由此给测量的误差越小。为此要选取恰当的比率 C，使 R_0 调节有效位数尽量多。
- 本实验中是一个四组电阻，调节范围为 $1 - 9999\Omega$ ，最小调节为 1Ω ，待测电阻 R_x 为 1200Ω 左右。由此可知只有选取 $C = 1$ 时， R_0 的四个旋钮才都能用上，使电桥的平衡精细到四位有效数字。

2.2 电桥灵敏度与测量精度

- 实验中电桥平衡是通过检流计示数变化进行判断的对此我们引入电桥灵敏度概念，定义为：

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_0 / R}$$

其中 R_0 是电桥平衡时比较臂的阻值； ΔR_0 是在电桥平衡后 R_0 的微小改变量； ΔI 是电桥偏离平衡而引起的检流计示数的变化值。

- 本实验中检流计单位是 nA， ΔR_0 可选 1Ω 或者 2Ω ，S 保留到 2 到 3 位有效位数。
- 根据基尔霍夫定律可以得到电桥灵敏度为：

$$S = \frac{E}{K[(R_a + R_b + R_0 + R_x)] + (2 + \frac{R_b}{R_0} + \frac{R_x}{R_a})R_g}$$

2.3 换臂法 ($C = 1$)

当比率 $C = 1$ 时，可以采用换臂的方法消除比率对测量结果的影响。

交换前：

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_0$$

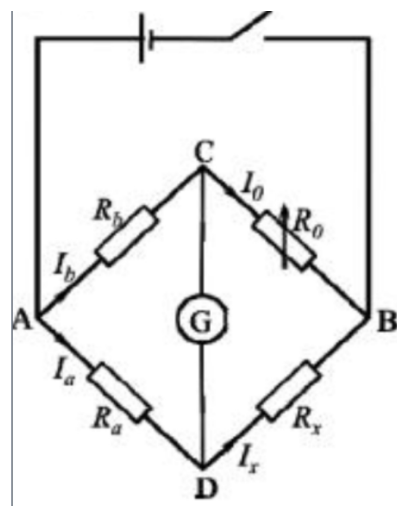


图 1: 电路图

交换后：

$$R'_x = \frac{R_a}{R_b} R'_0$$

则：

$$R_x = \sqrt{R_0^2 R_0'^2} \approx \frac{R_0 + R'_0}{2}$$

2.4 测量不确定度分析

测量完毕，计算 R_x 的不确定度时，要考虑桥臂误差 ρ_c 和 ρ_0 外，还应考虑到对电桥平衡的误差判断。则 R_x 的总相对不确定度为：

$$\rho_x = \sqrt{\rho_0^2 + \rho_c^2 + \left(\frac{\delta}{S}\right)^2} \quad (\delta = 0.1nA)$$

相应的，换臂后 R_x 的总相对不确定度为：

$$\rho_x = \sqrt{\rho_0^2 + \left(\frac{\delta}{S}\right)^2}$$

最后可以得到：

$$R_{x\text{实}} = R_x \pm \Delta R_x \quad (\Delta R_x = \rho_x R_x)$$

3 实验设备与材料

1. FB3081 型直流数显微电流计
2. 比例臂电阻四个 ($10\Omega, 100\Omega, 100\Omega, 1000\Omega$)
3. 电阻箱
4. 待测电阻两个
5. 直流电源一个

4 实验步骤

- 换臂法测 R_x 阻值

测量未知电阻 R_{x1} 的阻值和电桥灵敏度，并采用换臂测量法。

$$R_a = R_b = 100\Omega \quad R_{x1} \approx 1200\Omega$$

- 探究电压与电桥灵敏度关系

测量电桥灵敏度与电源电压的关系，并作图。

$$R_a = R_b = 100\Omega \quad R_{x1} \approx 1200 \quad E = 0.5 \sim 3.5V$$

- 测量 R_x 阻值

测量未知电阻 R_{x2} 的阻值和电桥灵敏度。

$$R_{x2} \approx 50\Omega$$

5 实验结果与数据分析

5.1 实验获取数据

表 1: 实验数据表

物理量 待测电阻	R_0	$C = \frac{R_a}{R_b}$	$R_{x测}$	$\rho_c = \sqrt{\rho_a^2 + \rho_b^2}$	δ	ρ_0
$R_x \approx 1200\Omega$ (换臂前)	1200 Ω	1.00	1200 Ω	0.0707%	0.1nA	0.3%
$R_x \approx 1200\Omega$ (换臂后)	1200 Ω	1.00	1200 Ω	—	0.1nA	0.3%

5.2 灵敏度的测量

实验中要测得电流计的灵敏度从而得到误差值，灵敏度记为 S

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_0/R}$$

表 2: 实验数据表

数据 电桥状态	R_0	ΔR_0	ΔI_0	S
换臂前	1200 Ω	1 Ω	5.7nA	6.84×10^{-6}
换臂后	1200 Ω	1 Ω	5.9nA	7.08×10^{-6}

5.3 实验数据处理

利用换臂前数据计算：

$$\Delta R_x = \rho_x R_x = 1200 \times 0.31\% = 3.73\Omega$$

即 $R_{x1} = (1200 \pm 3.73)\Omega$

利用换臂后数据计算：

$$\Delta R_x = \rho_x R_x = 1200 \times 0.30\% = 3.62\Omega$$

即 $R_{x2} = (1200 \pm 3.62)\Omega$

5.4 探究电压与电桥灵敏度关系

选取 $R_a = 100\Omega$ $R_b = 100$ $R_x = R_{x1} = 1200\Omega$ 改变电源电压 E，测量不同电压下电桥的灵敏度并作 S — E 关系图。

电压 E(V)	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
$\Delta R_0(\Omega)$	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta I(nA)$	15.8	12.6	7.9	5.9	4.6	2.3	1.3
$S(10^{-6})$	18.9	15.1	9.48	7.08	5.52	2.80	1.56

表 3: S-E 数据表

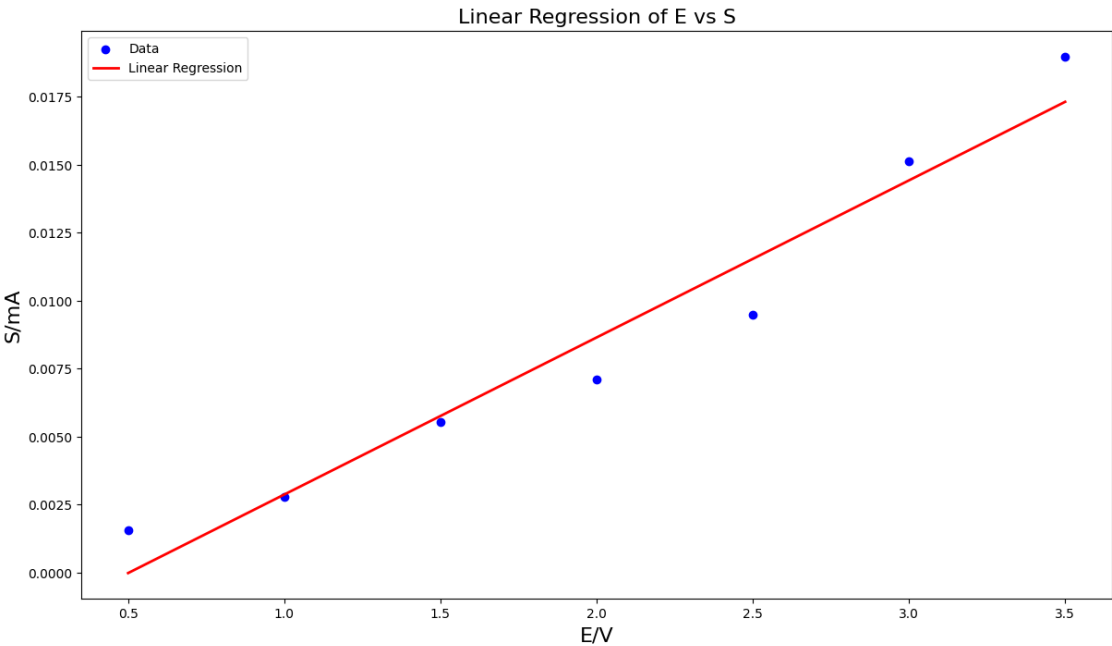


图 2: S-E 关系图

该图中线性回归方程的回归系数 $r \approx 0.97$, 说明 E 和 S 具有线性相关性

5.5 换臂法测量未知电阻 R_{x2} 的阻值和电桥灵敏度

选取 $R_a = 10\Omega$ $R_b = 1000\Omega$, 比例臂的倍率 $C = 0.01$ 。

	R_0	C	$R_{x\text{测}}$	ρ_c	δ	ρ_0	ΔR_0	ΔI	S_2
$R_x \approx 51\Omega$	5083 Ω	0.01	50.83 Ω	0.1025%	0.1nA	0.68%	1 Ω	2.1nA	1.06×10^{-6}

表 4: 未知电阻测得数据

计算不确定度:

$$\Delta R_{x2} = \rho_{x2} R_{x2} = 50.83 \times 0.47\% = 0.24\Omega$$

即可得 $R_{x2} = (50.83 \pm 0.24)\Omega$

6 思考题

1. 在用电桥测量电阻时恰当选取倍率 C 的目的何在？

解 1. 电桥由非平衡到平衡过程中，需要调节比较臂 R_0 的阻值。显然 R_0 调节位数越多，对电桥的平衡调节越精细，由此给测量的误差越小。为此要选取恰当的比率 C ，使 R_0 调节有效位数尽量多。

2. 电源电压不太稳定是否影响测量的准确度？电源电压太低为什么影响测量准确度？

解 2. 会导致检流计示数不稳定，从而导致电阻调节有偏差。电压太低导致电流过小，当小到小于检流计最小检测限度，导致电路是否平衡无法判断，导致电阻调节出现偏差。

7 致谢

感谢指导教师和实验室工作人员的帮助和支持，感谢实验组成员同学的想法分享。