

南開大學

大学物理 课程实验报告

双臂电桥实验



学院 人工智能学院

专业 工科试验班（信息类）

姓名 黄子豪（组别序号 I8）

学号 2413989

2025 年 3 月 21 日

目录

1 实验原理	3
1.1 直流双臂电桥适用范围:	3
1.2 四端法:	3
1.3 推倒测量公式:	3
1.4 实验电路图:	4
1.5 双臂电桥灵敏度:	4
2 数据处理	4
2.1 铜棍电阻率的测量:	4
2.1.1 铜棍长度 (两个电压接头之间): $l = (440.0 \pm 0.3)mm$	4
2.1.2 铜棍直径的测量:	5
2.1.3 调节电桥平衡	5
2.1.4 计算电阻率:	6
2.1.5 计算不确定度:	6
2.2 铝棍电阻率的测量:	6
2.2.1 铝棍长度 (两个电压接头之间): $l = (440.0 \pm 0.3)mm$	6
2.2.2 铝棍直径的测量:	6
2.2.3 调节电桥平衡	7
2.2.4 计算电阻率:	8
2.2.5 计算不确定度:	8
2.3 铁棍电阻率的测量:	8
2.3.1 铁棍长度 (两个电压接头之间): $l = (440.0 \pm 0.3)mm$	8
2.3.2 铁棍直径的测量:	8
2.3.3 调节电桥平衡	9
2.3.4 计算电阻率:	10
2.3.5 计算不确定度:	10
3 思考题	10
4 实验思考总结	10

图表

图 1.2.1 四端法原理	3
图 1.4.2 直流双臂电桥	4

1 实验原理

1.1 直流双臂电桥适用范围：

直流双臂电桥适用于测量较小的电阻，如 QJ44 型直流双臂电桥测量范围：

$0.1\Omega - 11\Omega$

1.2 四端法：

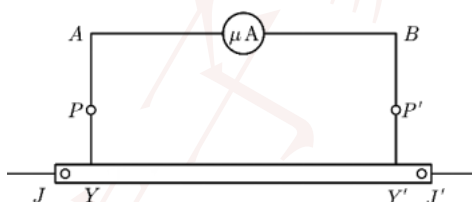


图 1.2.1: 四端法原理

可以看出，使用图 1.2.1 的电路进行测量，在电阻体上 Y, Y' 上两个点焊出两个接头再与微安表相连接，这样可以保证微安表所连接两点之间的阻值正好为 Y, Y' 之间的阻值，又 A, B, P, P' 四个点的接触电阻和 AY, BY' 的接线电阻都分给了微安表，保证了分流的精确。由于电阻被做成了四个接头，故称作“四端结构”。

1.3 推到测量公式：

测量电路如图 1.4.2（在下一部分中）所示，其中 R_0 为标准低阻， R_x 为待测低阻。四个比例臂电阻有意做成几十欧姆以上的阻值，因此他们所在桥臂中的接线电阻和接触电阻的影响便可忽略。注意右边的电阻是为了 R 防止电流过大。当电流计指零时，电桥达到平衡。由基尔霍夫定律，可以列出方程组：

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_0 R_0 + I'_1 R'_1 \\ I_1 R_2 = I_0 R_x + I'_1 R'_2 \\ (I_0 - I'_1) R_t = I'_1 (R'_1 + R'_2) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 I_0, I_1, I'_1 分别为图中标示，将式(1.1)整理得：

$$R_1 R_x = R_2 R_0 + (R_2 R'_1 - R_1 R'_2) \frac{r'}{R_r + R'_1 + R'_2} \quad (1.2)$$

当电桥的平衡是在保证 $R_2 R'_1 - R_1 R'_2 = 0$ 的情况下，则上式可以简化为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (1.3)$$

由此可知该实验双臂电桥平衡的条件为:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R'_2}{R'_1} = \frac{R_x}{R_0} \quad (1.4)$$

本次实验使用同步调节比例臂电阻 R_2, R'_2 的方法使电流计示零。

1.4 实验电路图:

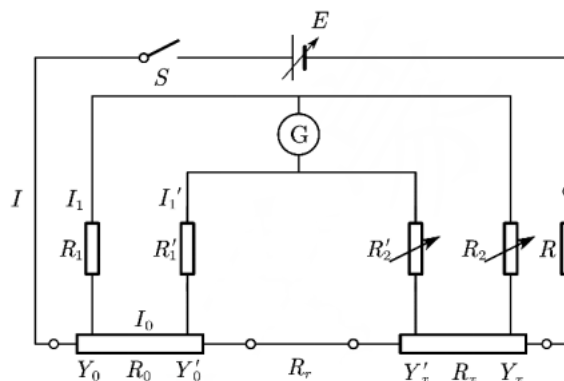


图 1.4.2: 直流双臂电桥

1.5 双臂电桥灵敏度:

双臂电桥平衡后将比例臂电阻 R_2, R'_2 同步调偏 $\Delta R_2 = \Delta R'_2$, 若电流计示数改变 ΔI , 则灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2 / R_2} \quad (1.5)$$

由

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2 / R_2} = \frac{\Delta I}{\Delta R_x / R_x} \quad (1.6)$$

可以引入相对误差:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta I}{S} \quad (1.7)$$

2 数据处理

2.1 铜棍电阻率的测量:

2.1.1 铜棍长度 (两个电压接头之间): $l = (440.0 \pm 0.3) \text{mm}$

数据处理:

$$u_l = u_{Bl} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \approx 0.2887 \text{mm} \approx 0.3 \text{mm} \quad (2.8)$$

2.1.2 铜棍直径的测量：

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.980	4.998	4.990	4.993	4.980	4.988

铜棍直径的测量：先计算不确定度。该直径分为 A，B 两类不确定度。

$$u_{Ad} = \sigma_{\bar{d}} = t_{(0.684,4)} s_{\bar{d}}$$

$$= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}}$$
(2.9)

$$= 0.861 * \sqrt{\frac{0.002^2 + 0.01^2 + 0.002^2 + 0.005^2 + 0.008^2}{4 * 5}}$$

$$= 0.861 * \sqrt{0.00001285} \approx 0.0031mm$$

$$u_{Bd} = \frac{\Delta\varepsilon}{\sqrt{3}} \approx 0.058mm$$
(2.10)

$$u_d = \sqrt{u_{Bd}^2 + u_{Ad}^2} \approx \sqrt{0.00338} \approx 0.058mm$$
(2.11)

所以，铜棍的直径： $d = (4.998 \pm 0.058) \text{ mm}$

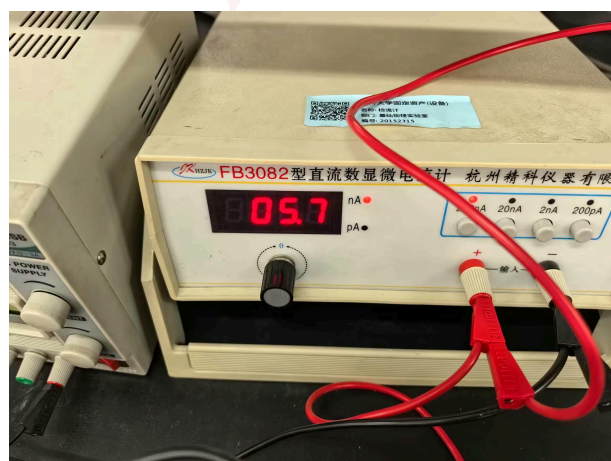
2.1.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= R'_2)$	ΔI	S
数据记录	382	0.0004	1	5.7	19.62

$$\rho_x = \left[(1 + k^2)(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + \left(\frac{0.1}{S}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.00535$$
(2.12)

$$R_x \rho_x = 0.0004 * 0.00535 = 0.00000214 = 0.0214 * 10^{-4}$$
(2.13)

根据上述计算， R_x 的电阻值为： $R_x = (4.0000 \pm 0.0214) * 10^{-4} \Omega$





2.1.4 计算电阻率：

$$\rho = \left(\frac{R_x S}{l} \right) = \frac{4.0000 * 10^{-4} * 19.62 * 10^{-6}}{4.4 * 10^{-1}} = 1.78 * 10^{-8} \Omega * m \quad (2.14)$$

2.1.5 计算不确定度：

$$\begin{aligned} u_\rho &= \rho \sqrt{\left(\frac{u_R}{R} \right)^2 + \left(2 \frac{u_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{u_L}{L} \right)^2} \\ &= 1.78 * 10^{-8} * \sqrt{\left(\frac{0.0022}{382} \right)^2 + \left(2 \frac{0.058}{4.998} \right)^2 + \left(\frac{0.3}{440.0} \right)^2} \\ &= 4.13 * 10^{-10} \end{aligned} \quad (2.15)$$

根据上述计算，铜棍的电阻率为： $\rho = (1.78 \pm 0.04) * 10^{-8} \Omega * m$

2.2 铝棍电阻率的测量：

2.2.1 铝棍长度（两个电压接头之间）： $l = (440.0 \pm 0.3) mm$

数据处理：

$$u_l = u_{Bl} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \approx 0.2887 mm \approx 0.3 mm \quad (2.16)$$

2.2.2 铝棍直径的测量：

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.950	4.948	4.948	4.950	4.948	4.949

铝棍直径的测量：先计算不确定度。该直径分为 A，B 两类不确定度。

$$\begin{aligned}
 u_{Ad} &= \sigma_{\bar{d}} = t_{(0.684,4)} s_{\bar{d}} \\
 &= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\
 &= 0.861 * \sqrt{\frac{0.001^2 + 0.01^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2}{4 * 5}} \\
 &= 0.861 * 5 * 10^{-4} \approx 0.0004 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$u_{Bd} = \frac{\Delta \varepsilon}{\sqrt{3}} \approx 0.058 \text{ mm} \tag{2.18}$$

$$u_d = \sqrt{u_{Bd}^2 + u_{Ad}^2} \approx \sqrt{0.00338} \approx 0.058 \text{ mm} \tag{2.19}$$

所以，铝棍的直径： $d = (4.949 \pm 0.058) \text{ mm}$

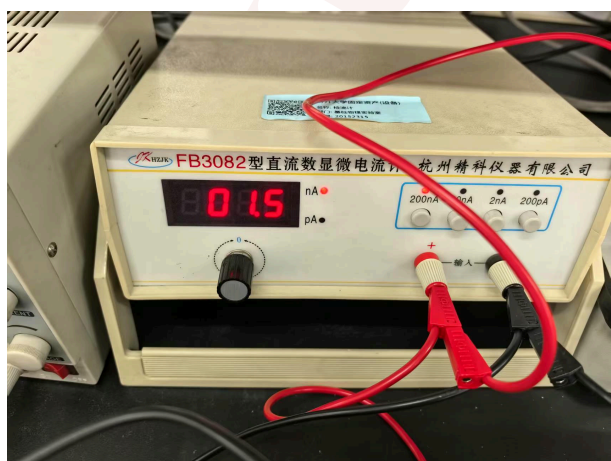
2.2.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= R'_2)$	ΔI	S
数据记录	920	0.0009	1	1.5	19.23

$$\rho_x = \left[(1 + k^2)(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + \left(\frac{0.1}{S}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.0058 \tag{2.20}$$

$$R_x \rho_x = 0.0004 * 0.0058 = 0.0000024 = 0.0214 * 10^{-4} \tag{2.21}$$

根据上述计算， R_x 的电阻值为： $R_x = (9.0000 \pm 0.0214) * 10^{-4} \Omega$





2.2.4 计算电阻率:

$$\rho = \left(\frac{R_x S}{l} \right) = \frac{9.0000 * 10^{-4} * 19.23 * 10^{-6}}{4.4 * 10^{-1}} = 3.933 * 10^{-8} \Omega * m \quad (2.22)$$

2.2.5 计算不确定度:

$$\begin{aligned} u_\rho &= \rho \sqrt{\left(\frac{u_R}{R} \right)^2 + \left(2 \frac{u_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{u_L}{L} \right)^2} \\ &= 3.933 * 10^{-8} * \sqrt{\left(\frac{0.0014}{920} \right)^2 + \left(2 \frac{0.058}{4.949} \right)^2 + \left(\frac{0.3}{440.0} \right)^2} \\ &= 9.22 * 10^{-10} \end{aligned} \quad (2.23)$$

根据上述计算, 铝棍的电阻率为: $\rho = (3.93 \pm 0.09) * 10^{-8} \Omega * m$

2.3 铁棍电阻率的测量:

2.3.1 铁棍长度 (两个电压接头之间): $l = (440.0 \pm 0.3) mm$

数据处理:

$$u_l = u_{Bl} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \approx 0.2887 mm \approx 0.3 mm \quad (2.24)$$

2.3.2 铁棍直径的测量:

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.985	4.990	4.999	5.000	5.000	4.995

铁棍直径的测量: 先计算不确定度。该直径分为 A, B 两类不确定度。

$$\begin{aligned}
 u_{Ad} &= \sigma_{\bar{d}} = t_{(0.684,4)} s_{\bar{d}} \\
 &= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\
 &= 0.863 * \sqrt{\frac{0.01^2 + 0.005^2 + 0.004^2 + 0.005^2 + 0.005^2}{4 * 5}}
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.863 * \sqrt{0.00001} \approx 0.000273mm \\
 u_{Bd} &= \frac{\Delta \varepsilon}{\sqrt{3}} \approx 0.058mm
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$u_d = \sqrt{u_{Bd}^2 + u_{Ad}^2} \approx \sqrt{0.00338} \approx 0.058mm \tag{2.27}$$

所以，铁棍的直径： $d = (4.995 \pm 0.058) \text{ mm}$

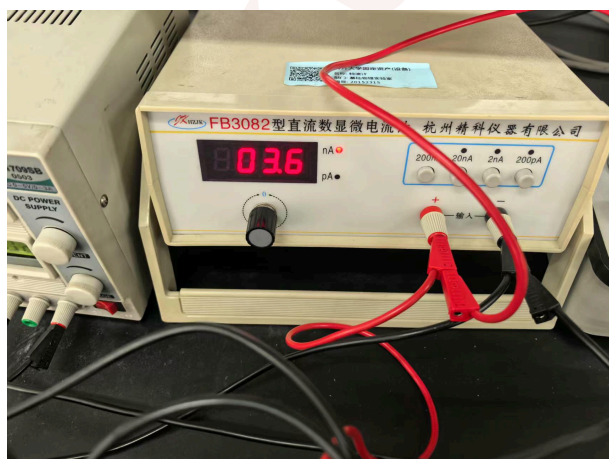
2.3.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= R'_2)$	ΔI	S
数据记录	15860	0.01586	100	3.6	19.60

$$\rho_x = \left[(1 + k^2)(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + \left(\frac{0.1}{S}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.00531 \tag{2.28}$$

$$R_x \rho_x = 0.01586 * 0.00531 = 0.0000842166 = 0.8421 * 10^{-4} \tag{2.29}$$

根据上述计算， R_x 的电阻值为： $R_x = (158.6000 \pm 0.8421) * 10^{-4} \Omega$





2.3.4 计算电阻率:

$$\rho = \left(\frac{R_x S}{l} \right) = \frac{158.6000 * 10^{-4} * 19.60 * 10^{-6}}{4.4 * 10^{-1}} = 7.065 * 10^{-7} \Omega * m \quad (2.30)$$

2.3.5 计算不确定度:

$$\begin{aligned} u_\rho &= \rho \sqrt{\left(\frac{u_R}{R} \right)^2 + \left(2 \frac{u_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{u_L}{L} \right)^2} \\ &= 7.065 * 10^{-7} * \sqrt{\left(\frac{0.00057}{15860} \right)^2 + \left(2 \frac{0.058}{4.995} \right)^2 + \left(\frac{0.3}{440.0} \right)^2} \\ &= 1.64 * 10^{-8} \end{aligned} \quad (2.31)$$

根据上述计算, 铁棍的电阻率为: $\rho = (7.065 \pm 0.164) * 10^{-7} \Omega * m$

3 思考题

应该测量 B、C 两条线之间的电阻。若选择测量 A、B 或 C、D 之间电阻, 测出的电阻率偏大; 选择测量 A、D 之间电阻, 测量情况复杂, 也会导致测量结果偏离真实值。

4 实验思考总结

实验操作过程充满了挑战与收获, 由于这个电路图较为复杂, 在连接电路时, 对各个接线柱的连接顺序和方式需要格外谨慎, 稍有不慎, 就可能导致电路连接错误, 影响实验结果。例如, 在连接标准电阻和被测电阻时, 要确保各接线柱正确连接, 否则就会前功尽弃。调节电桥平衡的过程也并非一帆风顺, 需要不断地微调电阻箱的阻值。这个过程考验耐心和对实验现象的敏锐观察。