

# 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

<b>1 实验原理 .....</b>	<b>3</b>
1.1 直流双臂电桥适用范围: .....	3
1.2 四端法: .....	3
1.3 推到测量公式: .....	3
1.4 实验电路图: .....	4
1.5 双臂电桥灵敏度: .....	4
<b>2 数据处理 .....</b>	<b>4</b>
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
<b>3 思考题 .....</b>	<b>10</b>
<b>4 实验思考总结 .....</b>	<b>10</b>

## 图表

<b>图 1.2.1 四端法原理 .....</b>	<b>3</b>
<b>图 1.4.2 直流双臂电桥 .....</b>	<b>4</b>

# 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  $I_0, I_1, I'_1$  分别为图中所标示，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:

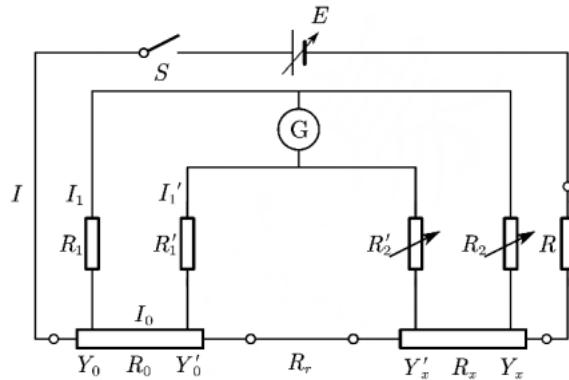


图 1.4.2: 直流双臂电桥

#### 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 $\Delta I$ , 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):**  $l = (440.0 \pm 0.3)mm$

数据处理:

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

### 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	<b>4.988</b>

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。

$$\begin{aligned}
 u_{Ad} &= \sigma_{\bar{d}} = t_{(0.684,4)} s_{\bar{d}} \\
 &= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\
 &= 0.861 * \sqrt{\frac{0.002^2 + 0.01^2 + 0.002^2 + 0.005^2 + 0.008^2}{4 * 5}} \\
 &= 0.861 * \sqrt{0.00001285} \approx 0.0031mm
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

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

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

所以，铜棍的直径： $d = (4.998 \pm 0.058) mm$

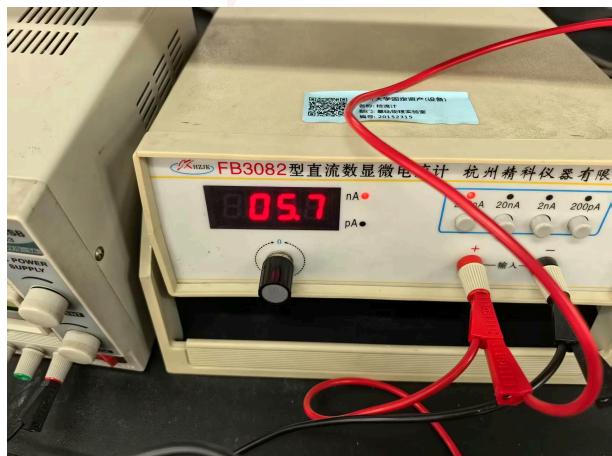
### 2.1.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	$R_x$	$\Delta R_2 (= R'_2)$	$\Delta I$	S
数据记录	382	0.0004	1	5.7	<b>19.62</b>

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

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

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	<b>4.949</b>

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。

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

$$= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad (2.17)$$

$$= 0.861 * \sqrt{\frac{0.001^2 + 0.01^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2}{4 * 5}}$$

$$= 0.861 * 5 * 10^{-4} \approx 0.0004 \text{ mm}$$

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

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

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

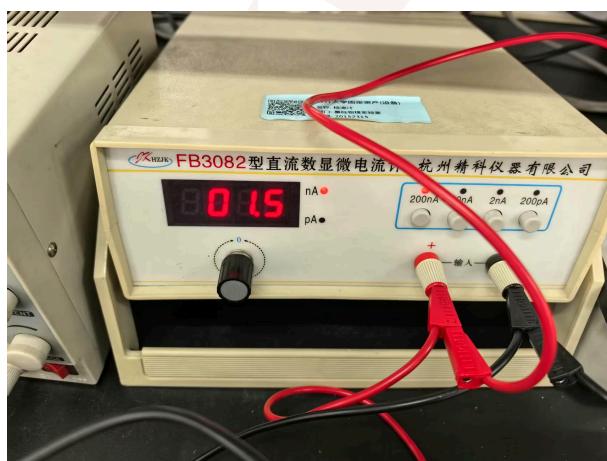
### 2.2.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	$R_x$	$\Delta R_2 (= R'_2)$	$\Delta I$	S
数据记录	920	0.0009	1	1.5	<b>19.23</b>

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

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

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	<b>4.995</b>

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。

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

$$\begin{aligned} &= t_{(0.684,4)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \\ &= 0.863 * \sqrt{\frac{0.01^2 + 0.005^2 + 0.004^2 + 0.005^2 + 0.005^2}{4 * 5}} \\ &= 0.863 * \sqrt{0.00001} \approx 0.000273mm \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$u_{Bd} = \frac{\Delta \varepsilon}{\sqrt{3}} \approx 0.058mm \quad (2.26)$$

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

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

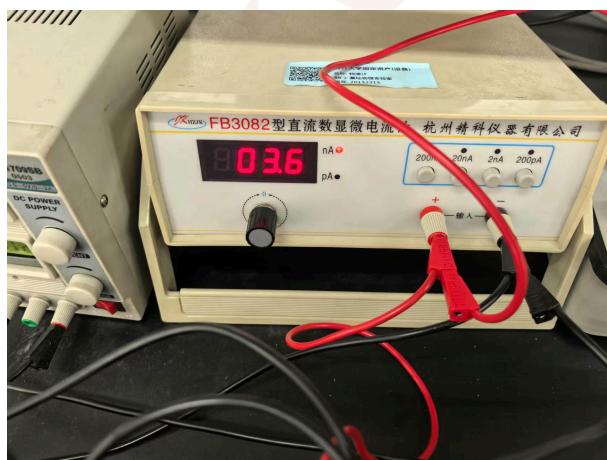
### 2.3.3 调节电桥平衡

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	$R_x$	$\Delta R_2 (= R'_2)$	$\Delta I$	S
数据记录	15860	0.01586	100	3.6	<b>19.60</b>

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

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

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。