

《大学基础物理实验》课程实验报告

姓名：柯云超 学号：2413575

学院：计算机学院 时间：2025 年 4 月 15 日 组别：L 组 11 号

直流双臂电桥

一、实验原理

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： $0.1\text{m}\Omega$ - 11Ω

四端法：

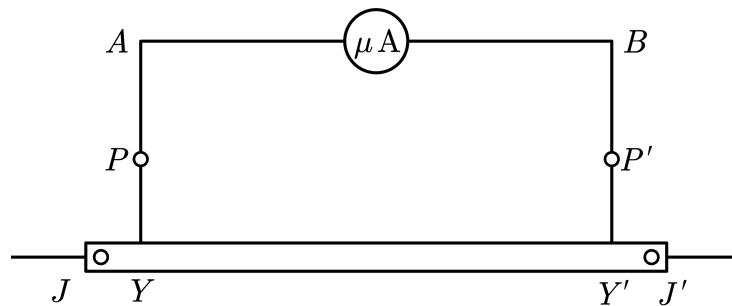


图 1：四端法原理

可以看出，使用图 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”。

实验电路与测量公式推导

测量电路如图 2(见下页) 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 R 是为了防止电流过大。当电流计指零时，电桥达到平衡。

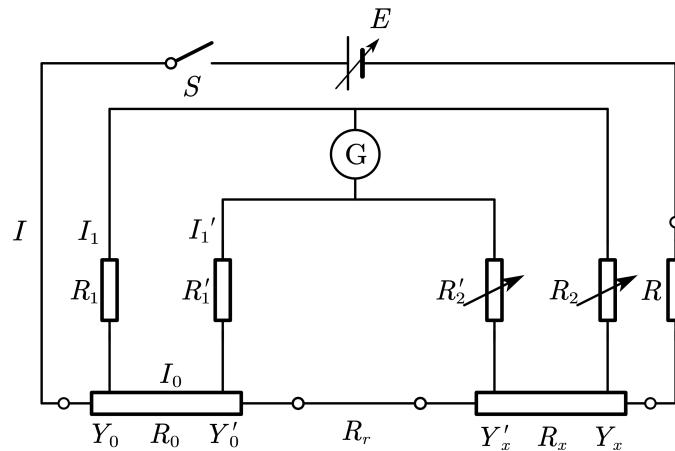


图 2: 直流双臂电路

由基尔霍夫定律，可以列出方程组：

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_0 R_0 + I'_1 R'_1 \\ I_1 R_2 = I_0 R_x + I'_1 R'_2 \\ (I_0 - I'_1) R_r = I'_1 (R'_1 + R'_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 I_1, I_0, I'_1 分别为图中所标示，将 (1) 式整理得：

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

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

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0$$

由此可知此次实验双臂电桥的测量平衡条件为：

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R'_2}{R'_1} = \frac{R_x}{R_0}$$

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。

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 S 为：

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2 / R_2}$$

由 $S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2/R_2} = \frac{\Delta I}{\Delta R_x/R_x}$ 可以引入相对误差:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta I}{S}$$

二、主要仪器用具

仪器品牌和型号

电源: DF1709SB

电流检测仪器: FB3082 型直流数显微电流计 分辨率:0.1nA 量程:200nA

标准低阻 R_0 : 阻值 0.001 Ω

固定电阻 $R_1 = R'_1$: 阻值 1000 Ω

电阻箱型号: FBZX21 型直流电阻箱

三、数据处理

铜棍电阻率的测量

(1) 铜棍长度 (两个电压接头之间): 注: 直尺单次测量 B 类不确定度: $u_{Bx} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ ($\Delta = 0.5mm$) 数据处理:

$$l = (473.5 \pm 0.29)mm$$

(2) 铜棍直径测量: 螺旋测微器零点读数: 0mm

表 1: 铜棍直径测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.965	4.965	4.965	4.970	4.970	4.967

注: A 类不确定度 $u_{Ax} = t_{(0.683,k)} S_{\bar{x}}$, $S_{\bar{x}} = \frac{S_{x_i}}{\sqrt{n}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}}$

B 类不确定度螺旋测微器分辨率 $\varepsilon_x = 0.001mm$, 多次测量的 B 类标准不确定度 $u_{Bx} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}}$ 。

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2}$$

数据处理:

$$d = (\underline{4.967} \pm \underline{0.0015})mm$$

(3) 调节电桥平衡:

表 2: 铜棍电桥测量数据

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= \Delta R'_2)$	ΔI	S
数据记录	368	3.68×10^{-4}	20	3.6	66.24

R_x 的总相对不确定度为 $\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2}$

其中 $\rho_1 = \rho'_1 = \rho_2 = \rho'_2 = 0.1\%$, $\rho_0 = 0.05\%$, $k = 0.1$, $u_{Rx} = \rho_x R_x$

数据处理: 将已知数值代入公式:

$$\begin{aligned}\rho_x &= \sqrt{(1+0.1)^2 * (0.001^2 + 0.001^2) + 0.1^2 * (0.0001^2 + 0.001^2) + 0.0005^2 + (0.1/66.24)^2} \\ &\approx 0.002 \\ &= 0.2\%\end{aligned}$$

则电阻值 $R_x = (\underline{3.68} \pm \underline{0.007}) \times 10^{-4}\Omega$

(4) 电阻率

注: $\rho_{Rx} = R_x S / L = \pi R_x d^2 / 4L$, 求全微分得

$$u_\rho = \rho [(u_R/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_l/L)^2]^{1/2}$$

数据处理:

$$\rho_{Rx} = \pi \times 3.68 \times 10^{-4} \times (4.967 \times 10^{-3})^2 / (4 \times 473.5 \times 10^{-3}) = 1.505 \times 10^{-8}$$

$$u_\rho = 1.505 \times 10^{-8} \times [(0.002)^2 + (0.003/4.967)^2 + (0.29/473.5)^2]^{1/2} = 0.003 \times 10^{-8}$$

$$\text{电阻率} = (\underline{1.505} \pm \underline{0.003}) \times 10^{-8}\Omega \cdot m$$

铝棍电阻率的测量

(1) 铝棍长度 (两个电压接头之间): 注: 直尺单次测量 B 类不确定度: $u_{Bx} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ ($\Delta = 0.5mm$) 数据处理:

$$l = (\underline{475.5} \pm \underline{0.29})mm$$

(2) 铝棍直径测量: 螺旋测微器零点读数: 0mm

表 3: 铝棍直径测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.935	4.935	4.940	4.935	4.935	4.936

注: A 类不确定度 $u_{Ax} = t_{(0.683,k)} S_{\bar{x}}$, $S_{\bar{x}} = \frac{S_{x_i}}{\sqrt{n}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}}$

B 类不确定度螺旋测微器分辨率 $\varepsilon_x = 0.001\text{mm}$, 多次测量的 *B* 类标准不确定度 $u_{Bx} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}}$ 。

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2}$$

数据处理:

$$d = (\underline{4.936} \pm \underline{0.0013})\text{mm}$$

(3) 调节电桥平衡:

表 4: 铝棍电桥测量数据

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= \Delta R'_2)$	ΔI	S
数据记录	895	8.95×10^{-4}	25	3.0	161.1

R_x 的总相对不确定度为 $\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2}$

其中 $\rho_1 = \rho'_1 = \rho_2 = \rho'_2 = 0.1\%$, $\rho_0 = 0.05\%$, $k = 0.1$, $u_{Rx} = \rho_x R_x$

数据处理: 将已知数值代入公式:

$$\begin{aligned}\rho_x &= \sqrt{(1+0.1)^2 * (0.001^2 + 0.001^2) + 0.1^2 * (0.001^2 + 0.001^2) + 0.0005^2 + (0.1/161.1)^2} \\ &\approx 0.0018 \\ &= 0.18\%\end{aligned}$$

则电阻值 $R_x = (\underline{8.95} \pm \underline{0.016}) \times 10^{-4}\Omega$

(4) 电阻率

注: $\rho_{Rx} = R_x S / L = \pi R_x d^2 / 4L$, 求全微分得

$$u_\rho = \rho \left[(u_R/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_l/L)^2 \right]^{1/2}$$

数据处理:

$$\rho_{Rx} = \pi \times 8.95 \times 10^{-4} \times (4.936 \times 10^{-3})^2 / (4 \times 475.5 \times 10^{-3}) = 3.662 \times 10^{-8}$$

$$u_\rho = 3.662 \times 10^{-8} \times \left[(0.0018^2 + (0.0026/4.936)^2 + (0.29/475.5)^2 \right]^{1/2} = 0.006 \times 10^{-8}$$

$$\text{电阻率} = (\underline{3.662} \pm \underline{0.006}) \times 10^{-8}\Omega \cdot m$$

铁棍电阻率的测量

(1) 铁棍长度 (两个电压接头之间): 注: 直尺单次测量 B 类不确定度: $u_{Bx} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ ($\Delta = 0.5mm$) 数据处理:

$$l = (475.0 \pm 0.29)mm$$

(2) 铁棍直径测量: 螺旋测微器零点读数: 0mm

表 5: 铁棍直径测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 (mm)	4.975	4.975	4.985	4.975	4.975	4.977

注: A 类不确定度 $u_{Ax} = t_{(0.683,k)}S_{\bar{x}}$, $S_{\bar{x}} = \frac{S_{x_i}}{\sqrt{n}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}}$

B 类不确定度螺旋测微器分辨率 $\varepsilon_x = 0.001mm$, 多次测量的 B 类标准不确定度 $u_{Bx} = \frac{\varepsilon_x}{\sqrt{3}}$ 。

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2}$$

数据处理:

$$d = (4.977 \pm 0.0017)mm$$

(3) 调节电桥平衡:

表 6: 铁棍电桥测量数据

电桥状态	$R_2 (= R'_2)$	R_x	$\Delta R_2 (= \Delta R'_2)$	ΔI	S
数据记录	15110	151.1×10^{-4}	200	2.6	196.43

R_x 的总相对不确定度为 $\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_2^2 + \rho_1^2) + k^2(\rho_2'^2 + \rho_1'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2}$

其中 $\rho_1 = \rho'_1 = \rho_2 = \rho'_2 = 0.1\%$, $\rho_0 = 0.05\%$, $k = 0.1$, $u_{Rx} = \rho_x R_x$

数据处理: 将已知数值代入公式:

$$\begin{aligned} \rho_x &= \sqrt{(1+0.1)^2 * (0.001^2 + 0.001^2) + 0.1^2 * (0.001^2 + 0.001^2) + 0.0005^2 + (0.1/196.43)^2} \\ &\approx 0.0017 \\ &= 0.17\% \end{aligned}$$

则电阻值 $R_x = (151.10 \pm 0.26) \times 10^{-4}\Omega$

(4) 电阻率

注: $\rho_{Rx} = R_x S / L = \pi R_x d^2 / 4L$, 求全微分得

$$u_{\rho} = \rho \left[(u_R/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_l/L)^2 \right]^{1/2}$$

数据处理：

$$\rho_{Rx} = \pi \times 151.0 \times 10^{-4} \times (4.977 \times 10^{-3})^2 / (4 \times 475.0 \times 10^{-3}) = 6.189 \times 10^{-7}$$

$$u_\rho = 6.189 \times 10^{-7} \times [(0.0017)^2 + (0.0034/4.977)^2 + (0.29/475.0)^2]^{1/2} = 0.011 \times 10^{-7}$$

$$\text{电阻率} = (\underline{6.189} \pm \underline{0.011}) \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

四、注意事项

1. 连好电路复查无误， R_2 以及 R'_2 ($\approx R_2$) 的阻值设置好，预先使桥接近平衡，才允许试接电源进行实验。其中对于铜棍， R_2, R'_2 预置在 500Ω ，对于铝棍， R_2, R'_2 预置在 1000Ω ，对于铁棍， R_2, R'_2 预置在 15000Ω 。接入电路中的棍的长度要大于 40cm ，以减少误差。
2. 电路连接时注意长线短线的选择。
3. 开启电源前，电流旋钮调到最大位置，电压旋钮调到最小位置。
4. 接通电源后，观察直流稳压电源输出电压变化，如果电压降低（电路出现短路情况），立刻切断电源，查找原因。
5. 注意调节电桥平衡时，应逐渐增大电源电压，先在 1V 时调节平衡，然后逐渐增加到 $2\text{V}, 3\text{V}$ 。
6. 调节平衡时，在看电流偏转大小时才短暂接通一下电路，不可在接通电路情况下，调节 R_2, R'_2 。接通电源时间应尽量短，以免电阻发热。
7. 直流数字微电流表使用之前调零校准。
8. 实验结束后，电阻箱阻值不要归零。

五、实验分析讨论及思考题。（思考题 2）

若均匀板状低阻上电流线的分布如图所示，那么在测低阻材料的电阻率时，应该测哪两条线之间的电阻？如选择不当，测出的电阻率偏大还是偏小？

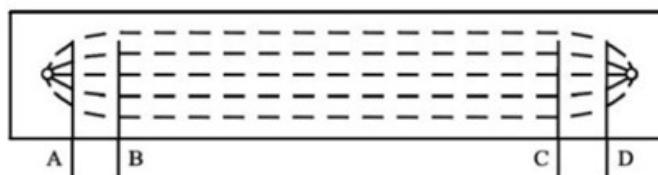


图 3: 思考题 2

应测量 B、C 之间的电阻。若选择不当，由于在 A 和 B、C 和 D 之间的电流经过的电阻横截面比电阻的整个横截面面积更小，因此这一段由原本的横截面积和所测得的电阻而计算得出的电阻率会比原本的电阻率偏大。