

淮南师范学院实验报告

学院：电子工程学院 专业：物理学 班级:24 物理 1 班

学号:2414050120 姓名 缪雨轩 日期：2025.11.5

一、实验名称：直流双臂电桥测低电阻

二、实验目的：

- 了解直流双臂电桥（开尔文电桥）的结构和测量低电阻（ $< 1\Omega$ ）的原理。
- 掌握 QJ47 型直流双臂电桥的使用方法。
- 学会用双臂电桥测量低电阻，并利用电阻定律计算金属导体的电阻率。了解掌握感应法测磁场的原理和方法。

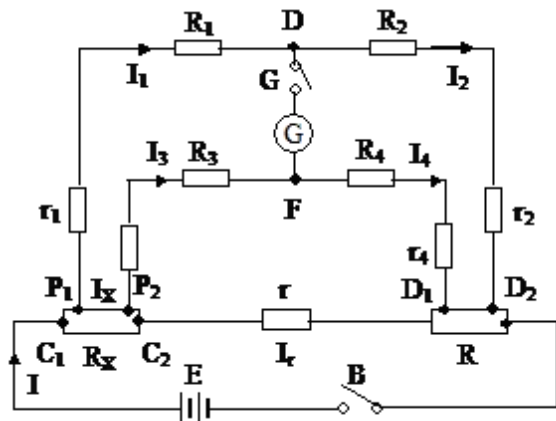
三、实验原理：

（一）单臂电桥的局限性

在测量低电阻（如 $R_x < 1\Omega$ ）时，如果使用单臂电桥，测量结果 R_m 实际上是待测电阻 R_x 、连接导线电阻 r_w 和接线柱接触电阻 r_c 的串联和，即 $R_m = R_x + r_w + r_c$ 。由于 r_w 和 r_c （量级在 $10^{-2} \sim 10^{-3}\Omega$ ）与 R_x 相比不可忽略，会给测量带来极大的误差。

（二）双臂电桥（开尔文电桥）原理

为消除导线和接触电阻的影响，测量低电阻必须采用直流双臂电桥（开尔文电桥）。它采用四端接法，其原理如图所示：



R_x 和 R 分别有两个电流端 C_1, C_2 和 C_1', C_2' ，两个电势端 P_1, P_2 和 P_1', P_2' 。

调节 R_a, R_b, R_a', R_b' ，当检流计 G 示数为零（ $I_g = 0$ ）时，电桥平衡，D、G 两点电势相等

（ $V_D = V_G$ ）。

根据电路可得：

$$V_{AD} = I_1 R_a$$

$$V_{DB} = I_1 R_b$$

$$V_{AG} = I_2 R_x + I_3 R_a'$$

$$V_{GB} = I_2 R + I_3 R_b'$$

在平衡时 $V_D = V_G$ ，则 $V_{AD} = V_{AG}$ 且 $V_{DB} = V_{GB}$ 。

$$I_1 R_a = I_2 R_x + I_3 R_a' \quad \#(1)\#$$

$$I_1 R_b = I_2 R + I_3 R_b' \quad \#(2)\#$$

流过 r 的电流为 $I_2 - I_3$ ，则 $V_{FG} = (I_2 - I_3)r$ 。

流过 $R_a' + R_b'$ 的电流为 I_3 ，则 $V_{FG} = I_3(R_a' + R_b')$ 。

$$\text{可得：} I_3 = \frac{I_2 r}{R_a' + R_b' + r} \quad \#(3)\#$$

(1) / (2) 得：

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{I_2 R_x + I_3 R_a'}{I_2 R + I_3 R_b'} = \frac{R_x + (I_3/I_2) R_a'}{R + (I_3/I_2) R_b'}$$

代入 (3) 得：

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_x + \frac{r R_a'}{R_a' + R_b' + r}}{R + \frac{r R_b'}{R_a' + R_b' + r}}$$

$$\text{整理得：} R_x = \frac{R_a}{R_b} R + \frac{r R_a' R_b}{R_a' + R_b' + r} \left(\frac{R_a R_b'}{R_b R_a'} - 1 \right)$$

在设计电桥时，使主副比率臂的比值严格相等，即 $\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_a'}{R_b'}$ 。

此时，上式中含 r 的项等于零，平衡条件简化为：

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

在 QJ47 型电桥中，比率 $M = R_b$ ， $S = R_a$ ，比较臂为 R 。平衡公式为：

$$R_x = \frac{S}{M} \cdot R$$

电桥内部设计保证了 $\frac{R_a'}{R_b'}$ 始终等于 $\frac{S}{M}$ 。

（三）双臂电桥（开尔文电桥）原理

根据电阻定律，均匀导体的电阻 R_x 与其长度 L 、横截面积 A 和电阻率 ρ 的关系为：

$$R_x = \rho \frac{L}{A}$$

若导体横截面为圆形，直径为 D ，则 $A = \frac{\pi D^2}{4}$ 。

代入可得电阻率：

$$\rho = R_x \frac{A}{L} = R_x \frac{\pi D^2}{4L}$$

四、主要仪器设备: QJ47 型直流单双臂电桥 (0.05 级)、待测金属导体(长导线)、螺旋测微器 (千分尺)、米尺、导线及电位探针。

五、实验步骤：

（一）熟悉电桥：观察 QJ47 电桥面板，熟悉双臂电桥接线柱 C_1, P_1, P_2, C_2 、比率臂 S 盘、M 盘（100, 1000 档）和比较臂 R（ $R_1 \sim R_5$ ）调节盘的功能。

（二）指零仪调零： 将指零仪开关 K 打向"内接", 接通电源开关，调节指零仪的"调零"旋钮，使指针准确指向零刻度。

（三）测量直径 D ： 使用螺旋测微器在待测导线的不同位置测量 3-5 次直径 D ，取平均值。

（四）连接电路： 按四端接法将待测导线接入电桥。

- （1）将导线两端分别接入 C_1 和 C_2 （电流）接线柱。
- （2）将两个电位探针分别连接到 P_1 和 P_2 （电势）接线柱。

（五）选择比率 S/M ：

- （1）估算待测电阻 R_x 的大致范围。
- （2）根据 $R_x \approx \frac{S}{M} \cdot R$ ，选择合适的 S 和 M 值，使 $\$R\$$ 的读数尽可能大（即 $R \approx R_x \cdot \frac{M}{S}$ ，尽量

使 R 能用到高位档）。

- （3）根据实验数据，选择 $S = 0.01$ ， $M = 1000$ 。

（六）测量 R_x ：

- （1）将 P_1 探针固定在导线上某点，将 P_2 探针放置在距离 P_1 约 $L_1 = 310\ mm$ 处。
- （2）用米尺精确测量 P_1, P_2 间的距离 L_1 。
- （3）按下"粗调"按钮，调节 $R_1 \sim R_5$ （从高位 R_1 开始），使指零仪指针接近零位。
- （4）保持"粗调"按下，再按下"细调"按钮，精调 $R_1 \sim R_5$ ，使指零仪指针准确归零。
- （5）读取并记录 L_1 和 R_1 的示值。

（七）重复测量： 保持 P_1 不动，依次移动 P_2 探针至 $L_2 = 340\ mm, L_3 = 370\ mm, L_4 =$

$400\ mm, L_5 = 430\ mm$ 处，重复步骤 6（2） 至 6（5），记录对应的 L_i 和 R_i 值。

（八）数据处理：

- （1）计算每次测量的 $R_{xi} = \frac{S}{M} \cdot R_i$ 。
- （2）根据 $\rho_i = R_{xi} \frac{\pi D^2}{4L_i}$ 计算每次测量的电阻率。
- （3）计算 5 次电阻率的平均值 $\bar{\rho}$ 。
- （4）计算 R_x 的允许误差极限。

六、原始数据记录：

导线直径 D 测量： $D = 4.00\ mm = 0.00400\ m$

$$\text{横截面积} A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.00400\ m)^2}{4} = 1.2566 \times 10^{-5}\ m^2$$

L(mm)	310	340	370	400	430
S/M	0.01/1000	0.01/1000	0.01/1000	0.01/1000	0.01/1000
R（Ω）	180.20	198.20	216.00	234.00	252.00
Rx（Ω）	1.8020	1.9820	2.1600	2.3400	2.5200
D(mm)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

七、数据处理：

序号 i	长度 L _i (mm)	长度 L _i (m)	比较臂读数 R _i (Ω)	待测电阻 (Ω)	电阻率 (Ω · m)
1	310	0. 310	180. 20	0. 0018020	7.310×10^{-8}
2	340	0. 340	198. 20	0. 0019820	7.324×10^{-8}
3	370	0. 370	216. 00	0. 0021600	7.336×10^{-8}
4	400	0. 400	234. 00	0. 0023400	7.351×10^{-8}
5	430	0. 430	252. 00	0. 0025200	7.366×10^{-8}

R_{x5} 误差: $E_{lim,5} = \pm 0.002 \times (0.001 + 0.002520) \approx \pm 0.000007\Omega$

所有 R_x 测量值的允许误差极限约为 $\pm 0.000006 \sim \pm 0.000007\Omega$ 。

八、实验结果与讨论:

本实验采用 QJ47 型直流双臂电桥，通过四端接法测量了金属导线在不同长度下的电阻值，克服了单臂电桥测量低电阻时引入的接触电阻和导线电阻误差。

通过测量 5 组不同长度 L 及其对应的电阻 R_x ，并测量了导线直径 $D = 4.00\text{ mm}$ ，根据电阻定律 $\rho = R_x \frac{\pi D^2}{4L}$ 计算了材料的电阻率。

经计算，该金属导体的平均电阻率为 $\bar{\rho} = 7.337 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$ 。

（一）平均电阻率 $\bar{\rho}$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \rho_i$$
$$\bar{\rho} = \frac{(7.310 + 7.324 + 7.336 + 7.351 + 7.366) \times 10^{-8}}{5}$$
$$\bar{\rho} = \frac{36.687 \times 10^{-8}}{5} = 7.3374 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$$

取 4 位有效数字， $\bar{\rho} \approx 7.337 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$

（二）误差计算

根据 QJ47 型电桥说明书（表 3），使用 $S = 0.01, R_b(M) = 1000$ 时，测量 R_x 在 $10^{-3}\Omega$ 量程，准确度等级指数 $C = 0.2\%$ 。

允许误差极限公式为 $E_{lim} = \pm C\%(R_N + X)$ ，其中 R_N 为量程值 $10^{-3}\Omega$ ， X 为测量值 R_x 。

以 $R_{x3} = 0.0021600\Omega$ 为例：

$$E_{lim,3} = \pm 0.2\% \times (10^{-3} + 0.0021600)\Omega$$
$$E_{lim,3} = \pm 0.002 \times (0.00316)\Omega = \pm 0.00000632\Omega \approx \pm 0.000006\Omega$$
$$R_{x1} \text{ 误差: } E_{lim,1} = \pm 0.002 \times (0.001 + 0.001802) \approx \pm 0.000006\Omega$$