

【实验目的】

1. 熟悉双臂电桥测量低电阻的原理
2. 了解单臂电桥与双臂电桥的关系与区别
3. 学会 QJ-44 型双臂电桥测量低电阻的方法

【实验原理】（电学、光学画出原理图）

如图 1 所示是一个完整的低值电阻，其中 C_1 和 C_2 称为电流接头， P_1 和 P_2 称为电位接头，介于电位接头之间的电阻才是实测电阻 R_x 。

将采用四端接入法的低电阻（如待测电阻和比较臂低电阻）接入原单臂电桥，等效电路图如图 2 所示。

为了消除（或减小）附加电阻的影响，分别接入了阻值均大于 10Ω 的标准电阻 R_3 和 R_4 。

且为考虑平衡时 $\frac{R_1}{R_2}$ 和 $\frac{R_3}{R_4}$ 的差别对测量结果的影响，用阻值小于 0.001Ω 的粗导线 r 来连接电阻 R_x 和 R_5 。此外，电路中加接一放大电路，用以增加灵敏度，使不平衡电流 I_g 经过放大后再由检流计指示。

当电桥平衡时， $I_g = 0$ ，记各处电流如图，由题意有：

$$I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3$$

$$I_1 R_2 = I_3 R_5 + I_2 R_4$$

$$I_2 (R_3 + R_4) = (I_3 - I_2) \cdot r$$

$$\text{故有 } R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5 + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

保持 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ，则有：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_5$$

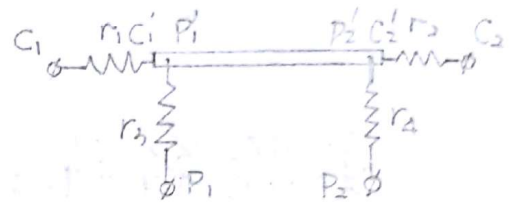


图 1

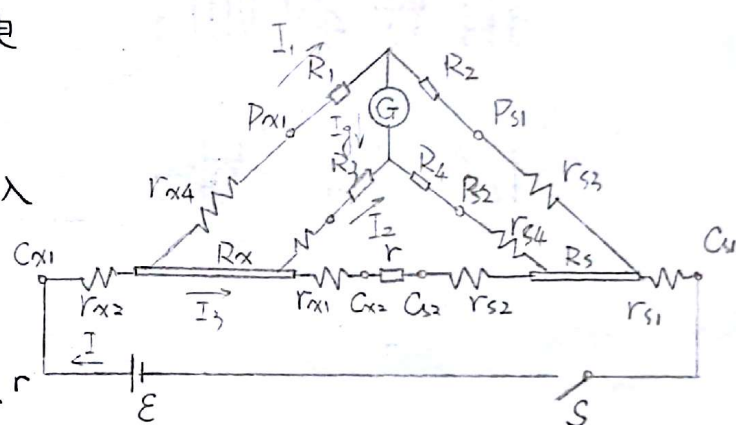


图 2

金属导体阻值会随温度变化而改变
关系为：

$$R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$$

式中 R 表示温度为 t 时的阻值，

R_0 表示 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的阻值，

α, β, γ 为材料的电阻温度系数。

温度不太高时，上式近似为

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

【实验内容】（重点说明）

1. 测量金属导体的电阻率

将待测导体接入双臂电桥（ C_1 、 P_1 、 P_2 、 C_2 对应接入），如[实验器材]中步骤，将“电阻粗调”示数加上“电阻细调”示数乘上倍率，读得阻值 R 。利用游标卡尺测出待测金属导体直径 d ，并读出电位接头间的长度 l ，计算出该导体的电阻率：

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l}$$

2. 测量金属导体的电阻温度系数

(1) 待测导体已被封装在加热炉内，并浸泡在机油中。实验可采用升温 and 降温两种方法完成。

(2) 升温法：根据实验温度需要，设定加热温度上限。其方法为：开启温控仪电源，显示屏显示为环境温度。将“测量-设定”转换开关置于“设定”挡，转动“设定调节”旋钮，将所需加热温度上限设定好，再将转换开关置于“测量”位置。

(3) 选择“1, 2, 3”挡中合适的挡位，开始加热，指示灯亮。

(4) 在加热过程中，调节双臂电桥，进行低电阻测量。每隔 5°C 左右记录一次阻值及对应的温度值。

【实验器材及注意事项】

实验器材：QJ-44型双臂电桥：

使用时打开电桥开关， B_1 开关拨至“通”档，利用“调零”旋钮将指针调零，并将“灵敏度”旋钮逆时针旋到底，此时电桥灵敏度最低。选择合适的倍率，按下 B 、 G 按钮，调节“电阻粗调”和“电阻细调”旋钮，使电桥达到平衡。顺时针旋转“灵敏度”按钮，相应提高一些灵敏度，再次调节电桥达到平衡。继续增加灵敏度，直至最高灵敏度时调得电桥平衡，此时测得的阻值才最接近真值。

注意事项：1. 实验开始前，应检查保证各导线可靠连接

2. 转动“PID调节”及“设定调节”旋钮时，应轻微用力，以免损坏电位器

3. 在加热或降温过程中，不要将加热炉体抬起，避免机油溅出

4. 出于低值电阻耐高温局限及保护仪器的目的，设定升温的上限值不能超过 100°C 。

【数据处理与结果】

1. 测量金属导体的电阻率

测量次数	R/Ω	d/mm	l/cm
1	5.956×10^{-4}	4.10	26.87

R 的不确定度 $U(R) = (0.01 \times 0.1) \times 0.2\% \Omega = 2.0 \times 10^{-6} \Omega$

d 的不确定度 $U(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ mm}$

l 的不确定度 $U(l) = \frac{0.5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm} = 0.029 \text{ cm}$

由 $\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l}$ 知, 电阻率 ρ 的相对不确定度

$$\frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2} = 0.4\%$$

而 $\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4l} = 2.926 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,

因此 $U(\rho) = \rho \cdot \frac{U(\rho)}{\rho} = 0.012 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

\therefore 电阻率的测量结果为 $\rho = (2.926 \pm 0.012) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

2. 测量金属导体的电阻温度系数

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	次数
$t/^\circ\text{C}$	16.0	21.8	26.6	31.4	36.2	41.1	46.0	50.8	55.7	60.5	$t/^\circ\text{C}$
$R_x/10^{-3}\Omega$	4.655	4.750	4.840	4.930	5.020	5.110	5.200	5.290	5.380	5.470	$R_x/10^{-3}\Omega$

(处理方式1)

计算 $\alpha_i = \frac{R_{x(i+5)} - R_{x(i)}}{R_{x(i)} t_{(i+5)} - R_{x(i+5)} t_{(i)}}$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 得:

i	1	2	3	4	5
$\alpha_i/^\circ\text{C}^{-1}$	45×10^{-5}	428×10^{-5}	428×10^{-5}	426×10^{-5}	426×10^{-5}

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 425 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(处理方式2)

作 $R-t$ 曲线求 α .

见附页。

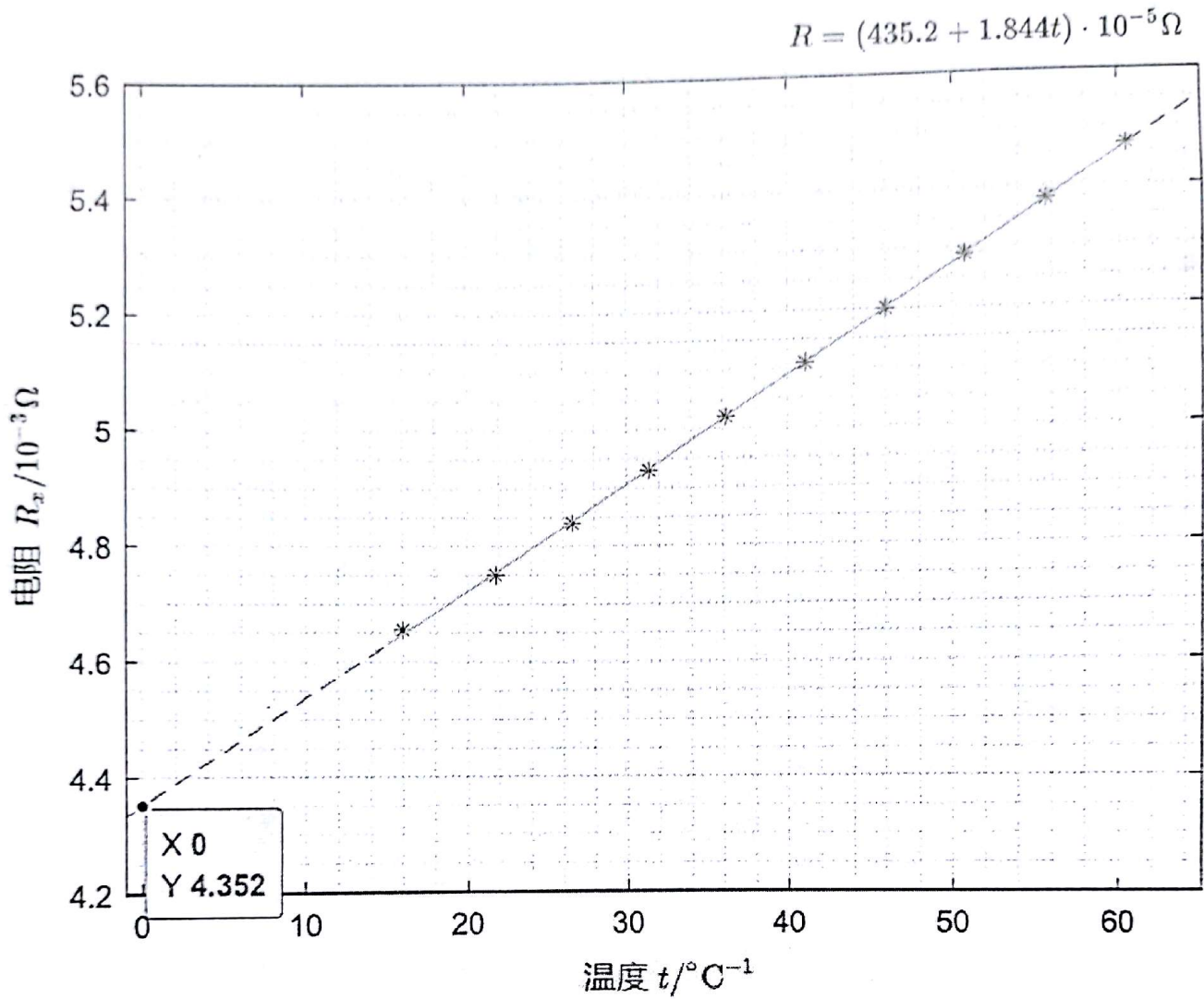


图 1

如图 1, 用 MATLAB 拟合得到关系

$$R = (435.2 + 1.844t) \cdot 10^{-5} \Omega \quad (1)$$

即

$$R = 4.352 \cdot (1 + 424 \times 10^{-5}t) \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2)$$

而 $R = R_0(1 + \alpha t)$, 因此温度系数

$$\alpha_1 = 424 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3)$$

与处理方式 1 比较, 相对误差

$$E = \frac{|\alpha_1 - \bar{\alpha}_1|}{\bar{\alpha}_1} \times 100\% = 0.23\% \quad (4)$$

【误差分析】

1. 测量金属导体电阻率

- ① 注意到电阻接头在一定范围内可以左右晃动, 这会影响长度 l 的测定带来误差;
- ② 注意到导体棒存在明显弯曲, 且施力使其形变时观察到检流计发生明显偏转, 据此猜测 1) 弯曲对 l 和 d 的测量会产生影响 2) 弯曲可能影响其导电性质, 从而带来误差。

2. 测量导体温度系数

- ① 数据中第 1 次测量 ($t = 16.0^\circ\text{C}$, $R_x = 4.655 \times 10^{-3} \Omega$) 与其他数据趋势偏差较大, 若舍去该数据再作处理, 结果见附表。
- ② 先设定电阻再等电表示数为 0 时可能由于反应时间引起 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的读数误差。

【实验心得及思考题】

思考题 1. 相同点: ① 均利用平衡条件间接测量电阻;

② 均由各桥臂上电阻改变调节电桥平衡。

不同点: ① 双臂电桥有 2 个桥臂接入了待测电阻, 而惠斯登电桥 (单臂电桥) 只有一个桥臂接入了待测电阻;

② 惠斯登电桥中导线和低值电阻对电桥影响较大, 因此惠斯登电桥不适合测量低值电阻, 主要用于测量 $1\Omega \sim 1M\Omega$ 的中值电阻; $R < 1\Omega$ 的低值电阻可用双臂电桥测量。

思考题 2. 根据 [实验原理], 我们知
$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

欲消除附加电阻影响, 即使 $\frac{R_1}{R_2}$ 和 $\frac{R_3}{R_4}$ 有较小差别时上式右边第二部分尽可能小, 并使附加电阻尽可能不影响电桥平衡。我们有:

① $r < 0.001\Omega$, 因此 $\frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r}$ 极小, 影响极小 ($R_1 \sim R_4 > 10\Omega$)

② R_x, R_s 和 $C_{x1}, C_{x2}, C_{s1}, C_{s2}$ 间附加电阻不影响电桥平衡
从而减小 (消除) 了附加电阻的影响。

思考题 3. 如 [实验原理] 与思考题 2 所示, 若接反, 则不能同 ② 中所述消除附加电阻对附加电桥平衡的影响, 且阻值会对测量产生更大影响。

实验心得 本次实验过程中由于注意到实验难以调出数据更换了实验台, 取得了正确的结果, 但浪费了一些时间。总体上, 我理解了双臂电桥的测量原理, 并与非平衡电桥作了对比。

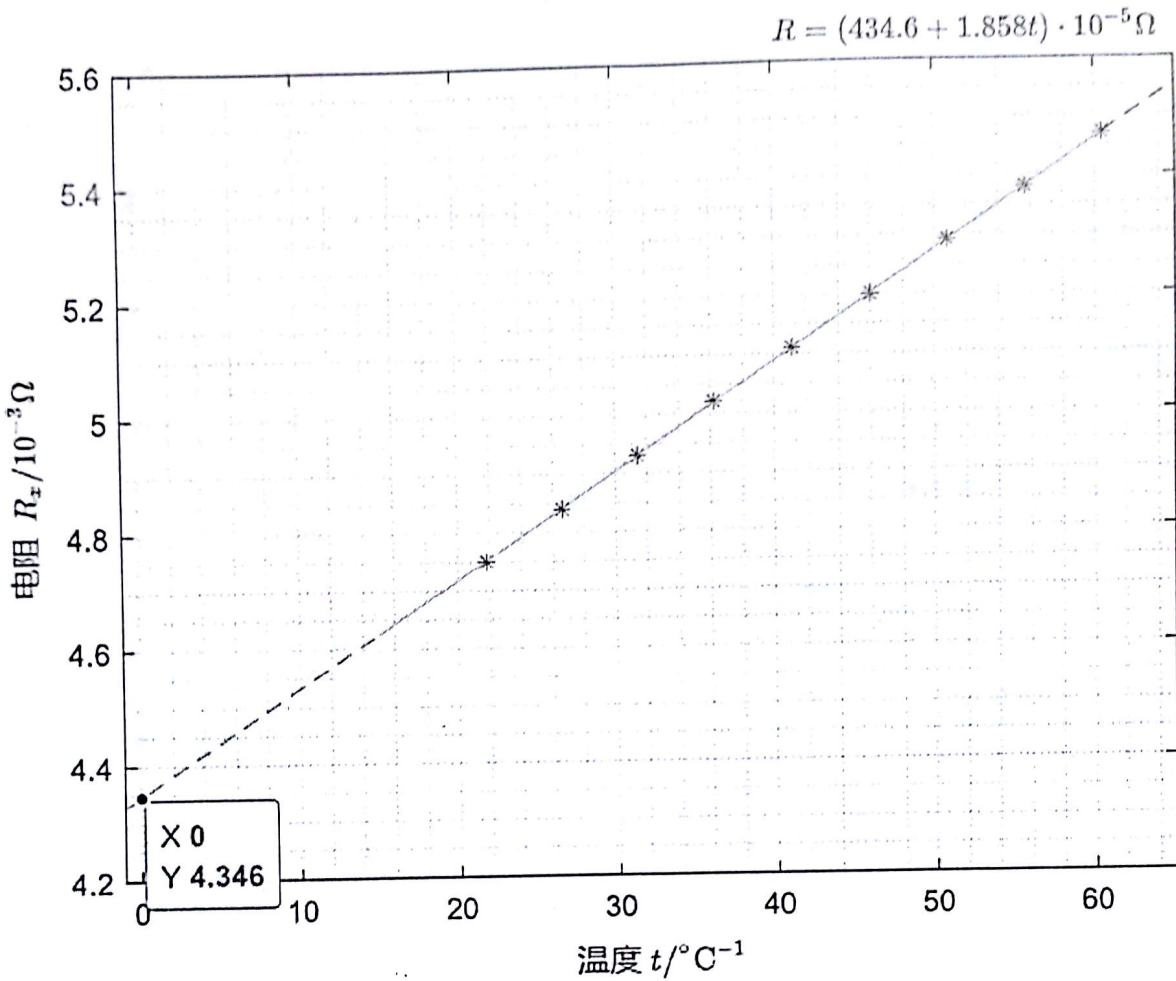


图 2

注意到第 1 次测量 $t = 16.0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $R = 4.655 \times 10^{-3} \Omega$ 与其他数据趋势偏差较大。若舍去该数据, 处理方式 1 的结果为:

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=2}^5 \alpha_i = 427 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (5)$$

如图 2, 用 MATLAB 拟合得到关系

$$R = (434.6 + 1.858t) \cdot 10^{-5} \Omega = 4.346 \cdot (1 + 427 \times 10^{-5}t) \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6)$$

而 $R = R_0(1 + \alpha t)$, 因此温度系数

$$\alpha_2 = 427 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (7)$$

与处理方式 1 比较, 相对误差

$$E = \frac{|\alpha_2 - \bar{\alpha}_2|}{\bar{\alpha}_2} \times 100\% = 0\% \quad (8)$$

从图中也可以明显看出, 舍弃第 1 次测量结果后拟合效果更好。