

【实验目的】

1. 掌握惠斯登电桥工作原理及特点, 学会自组电桥测量未知电阻。
2. 掌握正确使用 QJ-23 型盒式惠斯登电桥测量电阻的方法。
3. 学习如何对测量结果进行误差分析。

【实验原理】(电学、光学画出原理图)

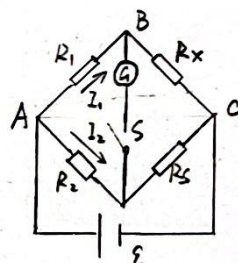
1. 惠斯登电桥工作原理 (原理图见右)

电桥由桥臂 (R_x, R_1, R_2, R_s) 桥路 (检流计 G, 开关 S), 工作电源 E 构成。

当检流计 G 的电流 $I_g = 0$ 时, 若流过电阻 R_1 和 R_x 的电流同时为 I_1 ,

流过电阻 R_2 和 R_s 的电流同为 I_2 , 则有

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{AD} \Rightarrow I_1 R_1 = I_2 R_2 \\ U_{BC} = U_{DC} \Rightarrow I_1 R_x = I_2 R_s \end{cases} \Rightarrow R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s \quad (R_2 \text{ 为电桥比率臂, } R_s \text{ 为电桥比较臂})$$



2. 交换法减小自组电桥系统误差

当电桥灵敏度较高时, 系统误差主要由 R_1, R_2, R_s 自身误差所决定。其中不确定度为

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)^2} \quad (\text{其中 } \Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_s \text{ 分别为 } R_1, R_2, R_s \text{ 的不确定度})$$

将 R_x 与 R_s 互换位置, 设 R_s 变为 R_s' 时电桥重新平衡, 则有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s' \Rightarrow R_x = \sqrt{R_s \cdot R_s'}$$

这样可消除 R_1, R_2 自身误差对测量误差的影响, 因此可得 R_x 的相对不确定度为

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_s'}{R_s'}\right)^2} \approx \frac{\Delta R_s}{R_s}$$

3. 电桥灵敏度

在电桥平衡后, 若比较臂 R_s 变动 ΔR_s , 电桥会失去平衡, 有电流 I_g 流过检流计。

当 I_g 过小时检流计不发生偏转, 此时待测电阻

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} (R_s + \Delta R_s) \quad \text{误差 } \Delta R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot \Delta R_s$$

定义电桥灵敏度 $S = \frac{\Delta I / I_x}{\Delta R_s / R_s} = \frac{\Delta I}{\Delta R_s / R_s}$ (ΔR_s 为电阻箱 R_s 的改变量, ΔI 为待测电阻的相对改变量;

引起检流计 G 中的偏转格数)。显然, 电桥灵敏度 S 越大, 对电桥平衡判断就越容易。

一般均取 R_x 的相对不确定度为:

$$E = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_s'}{R_s'}\right)^2} = \sqrt{\left(0.001 + \frac{0.002M}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{S}\right)^2}$$

【实验内容】（重点说明）

1. 自组电桥测未知电阻

① 利用检流计、电阻箱、待测电阻及电源等组装电桥，其中 R_1 、 R_2 选用四旋钮电阻箱， R_s 选用六旋钮电阻箱。

② 选取适当的比率臂，使测量结果的有效数字最大化。

③ 按下检流计“电计”按钮，测量待测电阻 R_x ，并测出该状态下电桥的灵敏度，并用交换法进行系统误差分析，估算出测量误差 ΔR_x ，写出测量结果表达式。

2. 用QJ-23型盒式惠斯登电桥测量未知电阻

① 打开盒式惠斯登电桥开关并调零。把已接上4.5V直流稳压电源，“G”和“外接”短接，然后将待测电阻接入 R_x 接线端。

② 根据待测电阻盘上8个待测电阻的数值，选取适当的比率臂，确保测量结果有四位有效数字。

③ 先按B键，后按G键以接通电路，调节 R_s 的4个旋钮，使电桥达到平衡，此时 R_s 的4个旋钮所示数值乘以比率盘读数即为待测电阻阻值。

【实验器材及注意事项】

实验器材：① QJ-23型盒式惠斯登电桥。
(原理如图)

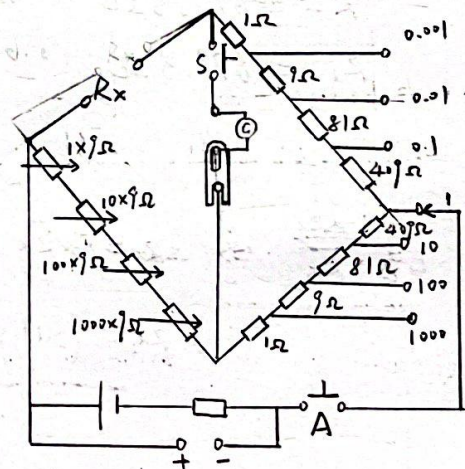
② 电阻箱

注意事项：① 断开电路时，应先放开G键，再放开B键，防止在测量电感元件阻值时损坏检流计。

② 检流计上的“电计”与“短路”按钮都具有锁定功能，测量时要确保“短路”按钮未被锁，否则检流计不会有偏转。

③ 使用盒式惠斯登电桥，在电桥未平衡时，G键只能瞬时间按下，待指针一偏转应立即放开G键。

④ 实验结束，关闭检流计和盒式惠斯登电桥。



【数据处理与结果】

1. 自组电桥测未知电阻 ($R_1 = R_2 = 1000\Omega$) [$4 \times 10^{-8} A$ /格挡]

$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = 1 \Rightarrow R_S = R_X$$

$$R_S = 219.9\Omega \quad R_{S'} = 220.0\Omega \text{ (交换后)}$$

$$\therefore \bar{R}_X = \sqrt{R_S \cdot R_{S'}} = 219.9\Omega$$

$$\Delta R_S = 0.2319 = \pm 0.3\Omega \text{ (不确定度非0进1)}$$

$$\therefore R_S = (219.9 \pm 0.3)\Omega$$

$$\Delta R_{S'} = 0.232 = \pm 0.3\Omega$$

$$R_{S'} = (220.0 \pm 0.3)\Omega$$

2. 电桥灵敏度 ($4 \times 10^{-8} A$ /格)

$$\Delta R_S = 0.2\Omega \quad \Delta d = 25.0 \text{ 格 (检流计偏转)}$$

$$S = \frac{\Delta d}{\Delta R_S / R_S} = 3 \times 10^4 \text{ (}\Delta R_S \text{仅一位有效数字)}$$

3. 相对不确定度 ($m=b$) 及盒式电桥测电阻的离散度

$$E = \frac{\Delta R_X}{\bar{R}_X} = \sqrt{\left(0.001 + \frac{0.002m}{R_S}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{3}\right)^2} = 0.1\%$$

$$\text{不确定度 } \Delta R_X = E \cdot \bar{R}_X = 0.3\Omega$$

$$\therefore R_X = (219.9 \pm 0.3)\Omega$$

4. 用 QJ-23 型盒式惠斯登电桥测量未知电阻 [$R_1 = R_2 = 1:10 \Rightarrow 10^{-1}$ 倍率]

待测电阻	1	2	3	4	5	6	7	8
电阻阻值/ Ω	679.3	675.3	682.3	680.3	676.1	679.6	687.6	678.7

$$\bar{R}_X = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i}{8} = 679.9\Omega$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_X)^2} = 3.822\Omega = 3.8\Omega \text{ (不能比真实值有更高的有效数字)}$$

$$\text{离散度} = \frac{S}{\bar{R}_X} = 0.56\%$$

【误差分析】

1. 因书中所述人眼视觉界限, 在调零检流计与计算偏移格数时存在读数误差。
2. 检流计难以精确调零, 在“电计”按钮按下前后, 检流计会产生较小的偏移, 引入误差。
3. 在自组电桥测量未知电阻实验中, $\Delta R_{\min} = 0.1 \Omega$ 。若选用 $4 \times 10^{-6} A$ /格, 则测量精度过低, R 需较大变化才可使检流计发生转动。若选用 $4 \times 10^{-8} A$ /格挡, 则精度较高, 但受 ΔR_{\min} 限制, R 微小变化使检流计偏转较大幅度, 因而不易归 0 使电桥平衡。
4. 在用 QJ-23 型盒式惠斯通电桥测量未知电阻时, 因为内置检流计的精度影响, 在 $\times 10^{-1}$ 倍率时, 调节 $\pm 0.1 \Omega$ 阻值难以精确使检流计无偏, 故易引入误差。
5. 读数操作, 器件老化也会引起阻值变化 (如使 $R_1 \approx R_2$), 造成实验误差。

【实验心得及思考题】

思考题 1:

在伏安法中 $R = \frac{U}{I}$, 根据电压、电流值来确定电阻阻值, 但电源内部存在不可忽略的内阻, 会对电压变化产生一定影响; 但惠斯通电桥的电源内阻对检测回路与参考回路等效抵消了影响, 因而准确度较伏安法更高。

电桥法测电阻的误差往往来源于 R_1 、 R_2 的自身误差, 因而可用交换法排除, 所以精确度较高。

思考题 2:

① 使电桥比率臂保持恰当大小, 使 R_x 待测电阻取最多位的有效数字。

② 在 $R_{x\min}$ 调节合适偏转范围内, 选用更高精度的检流计量程, 其灵敏度更高, 故数据测量更为准确。

③ 在实验条件允许情况下, 尽可能使用电阻箱更多的旋盘或选用分度值更小的电阻箱, 提升测量精度。

思考题 3:

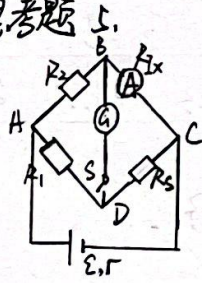
① 总不偏转: 可能为电路连接错误, 导致检流计断路, 可能为仪器产生故障。

② 总向同一方向偏转: 可能为电阻连接错误, 或电桥比率臂调节错误, 或被测量电阻不在电桥的测量范围内, 或电桥所选灵敏度与实验所需不匹配。

思考题 4:

在电阻箱在一定倍率下调节时不会超出量程的前提下, 尽可能多的使用旋盘个数, 从而提升测量的有效位数, 因而电桥比率臂的选取要符合这一要求。

思考题 5:



电路设计见左图, 此图可用于电表内阻的测量。

$$\frac{E}{r + R_2 + R_x} = I_{\max}$$

\therefore 选取适当的 r 与 R_2 , 使 $I_{\max} > I$ 于量程内测量。

若去掉检流计, 电路同样可以测量电表内阻, 若关闭开关 S 前后 I_A 的值没有发生明显变化, 则可等效为 B 、 D 已等势, 即电桥处于平衡状态, 可用 $R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$ 得到 R_x 的相映阻值。

实验心得:

不确定度、有效位数的保留还没有彻底领悟, 感觉有一些准则可守, 但实际计算又往往复杂于这些准则, 还想请老师指出与斧正。