

实验七 惠斯通电桥

电桥电路在电学中是一种最基本的电路。利用电桥平衡原理制成的电测仪器,不仅可以测电阻,也可以测电容、电感,并可通过这些物理量的测量来间接测量非电学量,例如温度、压力等,因此电桥电路在自动化仪表和自动控制中有着广泛的应用。

电桥分为直流电桥与交流电桥。直流电桥是用来测量电阻和与电阻有关的物理量的仪器;交流电桥主要用来测量电容、电感等物理量。

直流电桥又分为直流单电桥与直流双电桥。直流单电桥是由惠斯通发明的,所以也称为“惠斯通电桥”。惠斯通电桥适合测量的电阻范围为 $10 \sim 10^6 \Omega$ 。直流双电桥(开尔文电桥)适合测量的电阻范围为 $10^{-5} \sim 10 \Omega$ 。

[实验目的]

- 1) 掌握惠斯通电桥测量电阻的原理和方法;
- 2) 掌握惠斯通电桥的灵敏度及影响它的因素;
- 3) 学习电阻箱和电桥的不确定度计算。

[实验仪器]

直流稳压电源、待测电阻、指针式检流计、电阻箱、箱式惠斯通电桥

[实验原理]

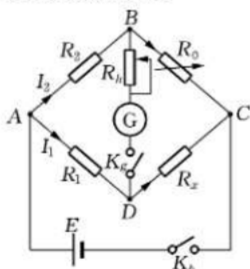


图 7-1 惠斯通电桥

1. 电路

电桥电路如图 7-1 所示,接通电源,调节电阻 R_1 、 R_2 和 R_0 的阻值,使 B 、 D 两点电位相等,通过检流计 G 的电流为零,这时电桥达到平衡。 A 、 D 两点的电位差等于 A 、 B 两点的电位差,即 $I_1 R_x = I_2 R_0$;同理, $I_1 R_x = I_2 R_2$, 于是有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (7-1)$$

这就是电桥的平衡方程。式中, R_1 、 R_2 、 R_0 是阻值已知的电阻,则待测电阻 R_x 可求。 $\frac{R_1}{R_2}$ 也称比率。

电桥是用比较法测电阻的仪器,电桥平衡公式(7-1)表明,电桥法测电阻的特点是将未知电阻与已知电阻比较,由检流计示零保证平衡条件成立,因而对电源稳定度的要求不高。只要检流计足够灵敏,用标准电阻作桥臂,被测电阻 R_x 就可达

到同其他桥臂同样的精度。这两个特点使电桥成为准确测量电阻的仪器。

2. 自组电桥

用三个电阻箱和一个待测电阻组成电桥的四个桥臂,一般先选定 $\frac{R_1}{R_2}$ 的数值,再调节 R_0 使电桥达到平衡,由式(7-1)即可求得 R_x 。

平衡电桥测量电阻的误差有两个来源:

(1) 桥臂电阻带来的误差

平衡公式(7-1)是理想化了的,实际电桥结构中会有接触电阻、接线电阻、接触电势等存在,但主要还是 R_1 、 R_2 、 R_0 本身的误差对 R_x 的影响。 R_x 的测量误差可以用下列相对不确定度公式估计:

$$\frac{U_{R_x}}{R_x} = \left[\left(\frac{U_{R_1}}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{U_{R_2}}{R_2} \right)^2 + \left(\frac{U_{R_0}}{R_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7-2)$$

式中 U_{R_1} 、 U_{R_2} 、 U_{R_0} 分别为 R_1 、 R_2 和 R_0 的测量不确定度,它既包含仪器误差,又包含测量误差。

在保持 $\frac{R_1}{R_2}$ 比值不变的条件下,将 R_0 和 R_x 交换位置,调节 R_0 为 R'_0 ,使电桥重新平衡,则

$$R_x = \sqrt{R_0 \cdot R'_0} \quad (7-3)$$

上式表明使用交换法可消除由 R_1 、 R_2 引入的误差。

(2) 电桥的灵敏度带来的误差

电桥平衡是通过检流计指针有无偏转来判断的。当通过检流计的电流小于 10^{-7} A时,指针偏转小于0.1格,此时电桥中 U_{BD} 虽然不等于零,但眼睛已经无法察觉出来,这表示电桥不够灵敏。

电桥的灵敏度 S 定义为

$$S = \frac{\Delta d}{\frac{\Delta R_x}{R_x}} \quad (7-4)$$

它表示电桥平衡后, R_x 的相对改变量 $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ 所引起的检流计偏转格数 Δd 的大小。

相同的 $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ 所引起的 Δd 越大,电桥的灵敏度越高。可以证明,改变任何一个桥臂的电阻得到的电桥灵敏度是相同的。具体测量时,可以测量桥臂电阻的改变

$\frac{\Delta R_0}{R_0}$ 来代替 $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ 。

通常将指针偏转 0.2 格作为眼睛能察觉的界限,所以由灵敏度的限制而引入的测量误差可取做

$$\Delta R_x = R_x \frac{0.2}{S} \quad (7-5)$$

电桥灵敏度的大小由电源电压、检流计内阻和桥臂电阻决定。电源电压高,检流计灵敏度高,则电桥灵敏度高。检流计内阻大,桥臂电阻大,则电桥灵敏度低。但电桥灵敏度太高,调节平衡花费的时间越长,稳定性、重复性差,不便操作。

[内容及要求]

1. 用箱式电桥测量未知电阻及相应的电桥灵敏度

箱式电桥的电路与图 7-1 相同,只是把整个装置放在箱内,引出一些必要的接线柱,使测量方便。QJ23 型直流电桥面板外形如图 7-2 所示,内部接线如图 7-3 所示。该箱式电桥的比率臂 $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ 由一个旋钮调节,它采用十进制固定值,分为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、1、10、 10^2 、 10^3 七档。测量臂的标准可变电阻为一个四旋钮电阻箱,最小改变量为 $1\ \Omega$,内附检流计;如果需要,也可另接更加灵敏的检流计,以提高电桥的灵敏度。

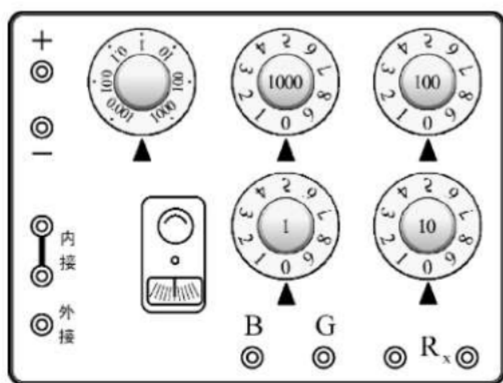


图 7-2 直流箱式电桥外观图

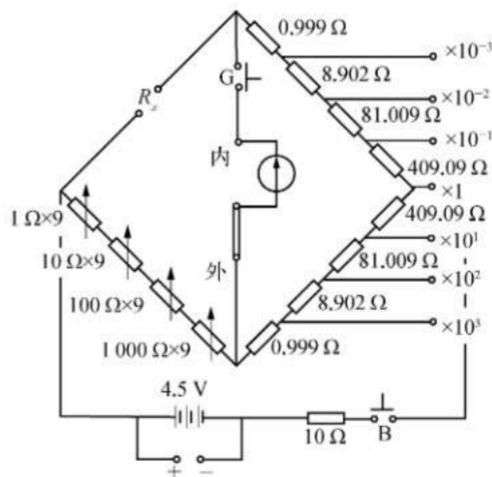


图 7-3 直流箱式电桥内部接线

1) 用 QJ23 型直流电桥测量未知电阻: 测量实验室给出的待测电阻, 每个电阻测量一次, 因为测量臂 R_0 的电阻有四个旋钮, 测量结果应当有 4 位有效数字, 所以要正确选取比率臂数值。

2) 测定 QJ23 型直流电桥的灵敏度: 测量未知电阻 R_x 时, 当电桥平衡后, 使 R_0 改变一个小量 ΔR_0 , 破坏电桥平衡, 检流计应偏转 Δd 格, 例如 $2 \sim 5$ 格, 根据公式(7-4) 计算电桥的灵敏度, 并估算灵敏度对 R_x 引起的测量误差是多少。

2. 用自组电桥测量未知电阻及相应的电桥灵敏度

用三个电阻箱和一个待测电阻如图 7-1 所示组成自组电桥, 分别测量未知电阻阻值 R_x , 估算其合成不确定度 U_{R_x} , 并测量计算相应的电桥灵敏度。

1) 电路接好后, 取电源 $E = 4\text{ V}$ 。将检流计电源打开, 调零后置于粗调档位。

2) 取 $\frac{R_1}{R_2}$ 为 0.1 和 10 两个倍率, 闭合开关, 调整测量臂电阻箱 R_0 使检流计指示为零; 再将检流计置于细调档位, 调整电阻箱使检流计指示为零即可读出电阻箱 R_0 的阻值。(注意: 调整电阻箱最小位时, 检流计指针应有反应。)

3) 用交换法测电阻。取 $\frac{R_1}{R_2} = 1.0$, 测量未知电阻及相应的电桥灵敏度, 2 格 $\leq \Delta d \leq 5$ 格。

[注意事项]

1) 检流计使用前, 首先打开开关, 调节“零点旋钮”, 使指针指零。

2) 为防止过大的电流通过检流计, 测量前保护电阻 R_b 应调至最大(按下检流计上的“粗调”按钮)。随着电桥逐步逼近平衡, 减小保护电阻直至零(弹起“粗调”按钮, 按下“细调”按钮), 保持电路的灵敏度。

3) 为了保护检流计, 应注意开关顺序。接通电路时, 应先合 K_b , 后合 K_g ; 断开电路时, 应先断开 K_g , 后断开 K_b ; 这一点在测量有感电阻时应特别注意。

4) 实验中若检流计指针不偏转(检流计开关已打开), 其原因是检流计支路或电源支路不通(断线、漏接等)。若检流计指针总向一边偏转, 其原因是四个桥臂中某一桥臂支路不通(断线、漏接, 电阻箱旋钮没有旋到位)或短路。发现故障后, 应先断开电源; 排除故障后, 再合上电源开关进行测量。

[思考题]

1) 下列因素是否会加大测量误差?

- ① 电源电压大幅度下降;
- ② 电源电压稍有波动;
- ③ 检流计灵敏度不够;
- ④ 检流计零点没有调准;
- ⑤ 比率臂上导线电阻不可忽略。

- 2) 为什么精测电阻用电桥而不用伏安法或欧姆表?
- 3) 试证明: 用交换法测量 R_x 时, $R_x = \sqrt{R_0 \times R'_0}$ 。
- 4) 在电桥实验操作中, 应注意哪些问题? 总结使电桥较快达到平衡的方法。