

# 双臂电桥测量低电阻

## 实验要求:

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。
- (2) 本学期预习考核方式为在线测验（选择题和判断题），不再要求写预习报告。
- (3) 在线测验只能完成一次，如多次作答，后面提交的作答无效，请大家预习实验讲义后，再作答。

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。
- (4) 在听完老师讲解后才能动手操作。在动手操作前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (5) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。

### 3. 预习测和出门测时间（实验当天）

#### (1) 预习测（10 分钟）

下午： 2: 00 - 2: 30

晚上： 7: 00 - 7: 30

#### (2) 出门测（5 分钟）

下午： 4: 00 - 6: 30

晚上： 9: 00 - 11: 30

### 4. 实验报告要求:

- (1) 双臂电桥实验要求写正式实验报告。
- (2) 写成小论文格式。

参考期刊论文的结构（例如：题目，作者，摘要，引言，仪器和方法，数据和讨论，结论，参考文献等），处理数据，完成实验报告。

- (3) 实验中，如果有软件制作的图和表，需要截图打印，报告其他部分手写/打印均可。

# 双臂电桥测量低电阻

## 一、实验原理

电阻按照阻值大小可分为高电阻( $100\text{K}\Omega$  以上)、中电阻( $1\Omega\sim 100\text{K}\Omega$ )和低电阻( $1\Omega$  以下)三种。低电阻测量有其特殊性：一般来说导线本身以及接点处接触状况引起的电路中附加电阻大约 $>0.1\Omega$ ，在测量低电阻时就不能将其忽略掉。双臂电桥(又称开尔文电桥)考虑低电阻测量特点，消除了附加电阻的影响，可用于 $10^{-5}\sim 10^2\Omega$ 电阻的准确测量。本实验要求理解和掌握测量低电阻的特殊性和采用四端接法的必要性，熟悉双臂电桥的原理、特点和接线方法，了解金属电阻率测量方法的要点，在掌握双臂电桥工作原理的基础上，用双臂电桥测金属材料的电阻率。

导线电阻和接触电阻是怎样对低电阻测量结果产生影响的？以伏安法测电阻为例，我们分析问题出在哪里。图 1 所示，用安培表和毫伏表按欧姆定律测量电阻  $R_x$ ，考虑到连接电流表、毫伏表与待测电阻的导线电阻及各接点处的接触电阻后，等效电路图如图 2 所示，其中， $R_{i1}$ 、 $R_{i2}$ 、 $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$ 、 $R_{ix1}$  和  $R_{ix2}$  分别为各支路等效的附加电阻。由于电压表内阻较大，当待测电阻  $R_x$  较小时，毫伏表上的分流忽略不计，电流表流过的电流近似等于流过待测电阻的电流。由于等效附加电阻  $R_{x1}$  和  $R_{x2}$  远小于毫伏表内阻  $R_g$ ，因此它们对于毫伏表的测量影响也可忽略不计。此时毫伏表测量的电压为  $(R_x+R_{ix1}+R_{ix2})$  上的压降。如果  $R_x$  低至  $1\Omega$ ，就不能忽略接触电阻  $R_{ix1}$  和  $R_{ix2}$  对测量的影响了。按照欧姆定律  $R=V/I$  得到的电阻是  $R_x$  与附加电阻  $R_{ix1}$  和  $R_{ix2}$  电阻总和  $R_x+R_{ix1}+R_{ix2}$ 。

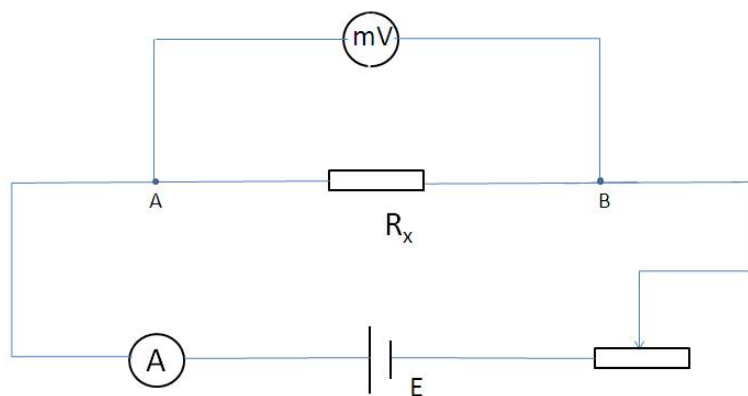


图 1 伏安法测量电阻电路原理图

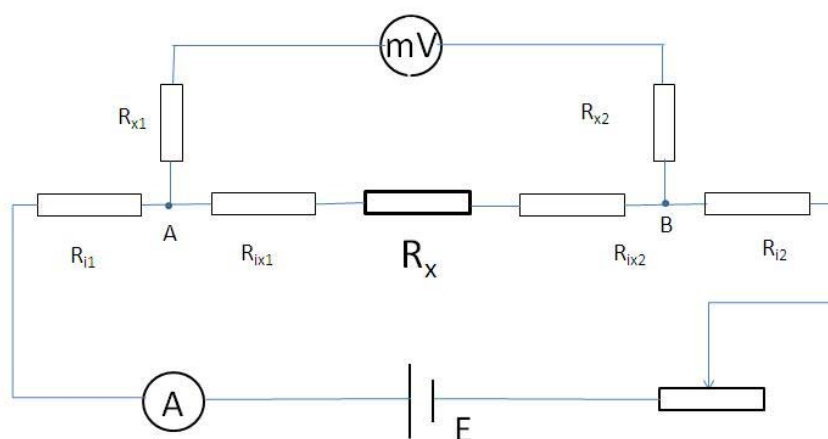


图 2 伏安法测量电阻等效电路图

显然，如果  $R_{ix1}$  和  $R_{ix2}$  不存在，即等效电路如图 5 所示，那么此时毫伏表上测得电压就仅为  $R_x$  的压降，由  $R_x = V/I$  即可准确测量出  $R_x$ 。因此，为了消除接触电阻对于测量结果的影响，需要改变图 3 中电阻两端接法，将低电阻  $R_x$  以四端接法接入测量电路，如图 4 所示，获得图 5 所示的等效电路。电流由电流头 A 端流入从 D 端流出，待测低电阻为电压头 B、C 间的电阻，B、C 间压降即为待测电阻两端的压降。许多低电阻的标准电阻都做成四端钮方式，接于电流测量回路中的电流头两端(A、D)，与接于电压测量回路中的电压接头两端(B、C)是各自分开的。

将低电阻的四端接法应用于电桥法测电阻，就发展成双臂电桥，电路如图 6 所示，其等效电路如图 7 所示。标准电阻  $R_n$  电流头接触电阻为  $R_{in1}$ 、 $R_{in2}$ ，待测电阻  $R_x$  的电流头接触电阻为  $R_{ix1}$ 、 $R_{ix2}$ ，都在双臂电桥测量回路的电流回路内。标准电阻电压头接触电阻为  $R_{n1}$ 、 $R_{n2}$ ，待测电阻  $R_x$  电压头接触电阻为  $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$ ，连接到双臂电桥电压测量回路中，因为它们与较大电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R$  相串联，故其影响可忽略。

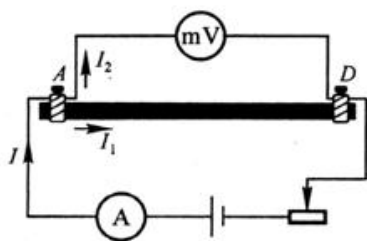


图 3 两端接法电路图

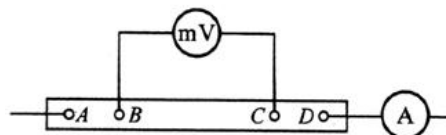


图 4 四端接法电路图

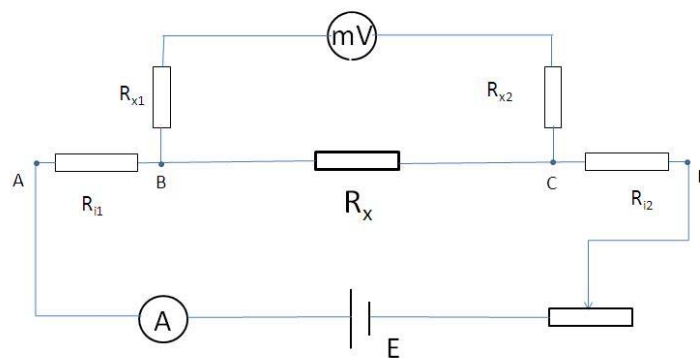


图 5 四端接法等效电路图

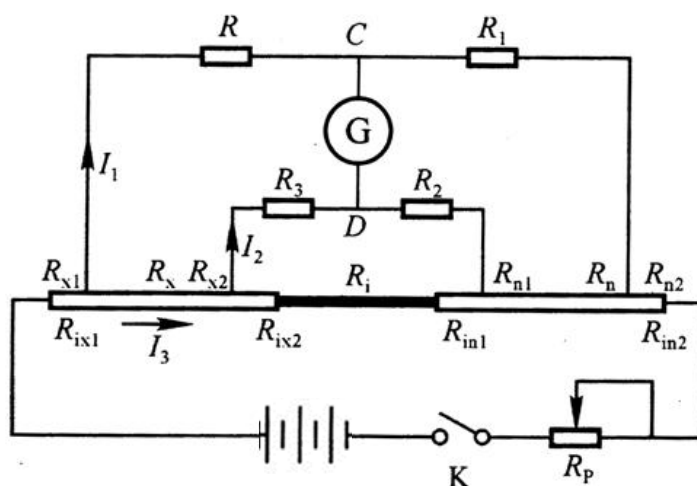


图 6 双臂电桥电路图

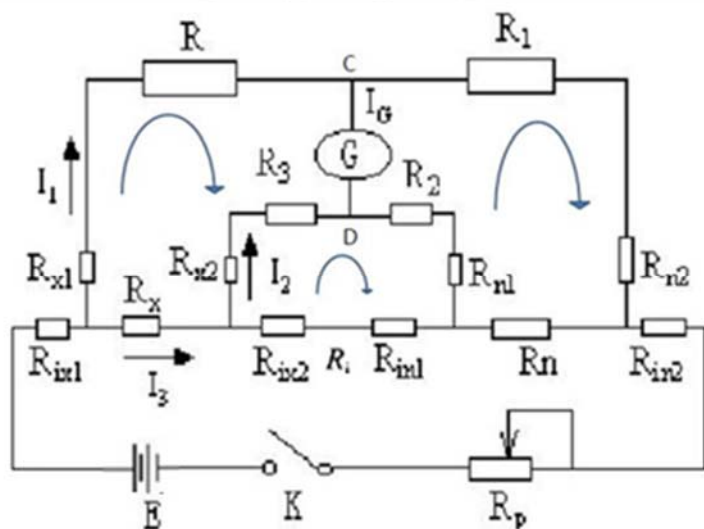


图 7 双臂电桥等效电路图

对图 6 和图 7 进行分析。当电桥平衡时，通过检流计  $G$  的电流  $I_G=0$ ，C、D 两点电位相等，根据基尔霍夫定律，可得方程组(1)

$$\begin{cases} I_1 R = I_3 R_x + I_2 R_3 \\ I_1 R_1 = I_3 R_n + I_2 R_2 \\ (I_3 - I_2) R_i = I_2 (R_2 + R_3) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $R_i$  为待测电阻  $R_x$  和标准电阻  $R_n$  的接触电阻  $R_{ix2}$ 、 $R_{in1}$  及其间连续电阻之和。解方程组得:

$$R_x = \frac{R}{R_1} \cdot R_n + \frac{R \cdot R_i}{R_3 + R_2 + R_i} \left( \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_3}{R} \right) \quad (2)$$

如果能够满足条件:  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R}$ , 那么, 式 (2) 中第二项为零, 附加电阻  $R_i$  的影响可以忽略不计。由此可得:

$$R_x = \frac{R}{R_1} \cdot R_n \quad (3)$$

通过设定  $R_1$ 、 $R_2$ , 并通过联动转换开关同时调节  $R_3$ 、 $R$ , 可以使得条件  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R}$  成立。实际上即使用了联动转换开关, 也很难完全做到  $R_2/R_1 = R_3/R$ 。为了减小 (2) 式中第二项的影响, 应使用尽量粗的导线, 并尽可能降低接触电阻, 以减小附加电阻  $R_i$  的阻值 ( $R_i < 0.001 \Omega$ ), 使 (2) 式第二项尽量小到与第一项比较可以忽略, 以使 (3) 式成立。

## 二、实验仪器

实验仪器: QJ36 型双臂电桥 (0.02 级); JWY 型直流稳压电源 (5A15V); 直流复射式检流计 (AC15/4 或/6 型); 低电阻四端测试架; 待测铜、铝棒各一根; 电流表 (5A); 千分尺等。

电路元件: 限流电阻; 双刀双掷换向开关; 标准电阻 ( $0.001 \Omega$ , 0.01 级); 超低电阻 (小于  $0.001 \Omega$ ) 连接线; 导线等。

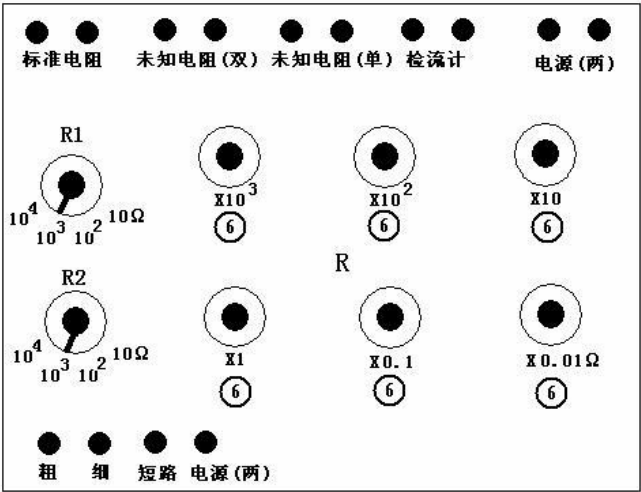
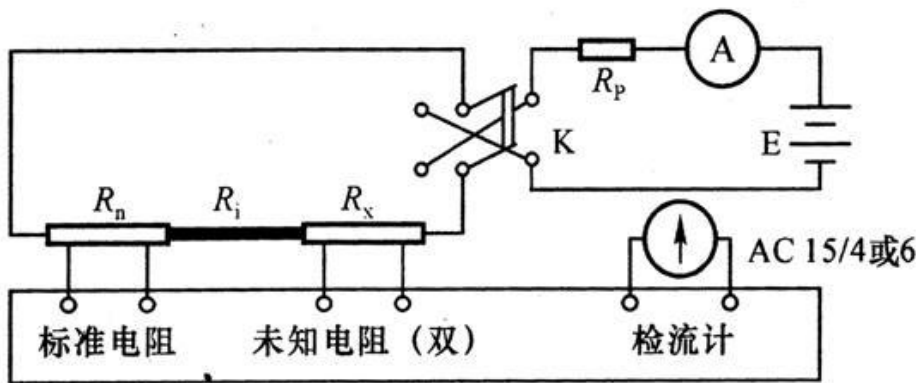


图 8 QJ36 型双臂电桥面板布置图



图 9 四端测试架

### 三、实验内容



QJ36 双臂电桥

图 10 双臂电桥接线原理图



1. 用双臂电桥测量铜棒的电阻率：先用(3)式测量  $R_x$ , 再求  $\rho$ 。(必做)

(1) 将铜棒安装在四端测试架上,按图 10 接线。调节待测铜棒长度为 30cm。将桥臂电阻  $R_1$ 、 $R_2$  均设置为  $1000\Omega$ 。

(2) 调节  $R$  使检流计指示为 0, 读出此时  $R$  的电阻值。利用双刀开关换向, 反向再调平, 并记录  $R$  值。

(3) 如步骤 2, 正反向测量 3 组数据。一组数据测量结束后, 注意改变待测低电阻和标准电阻的电压头、电流头接线处的接触状态。

(4) 多次测量铜棒直径  $D$ : 在未知电阻  $R_x$  测量区域, 在不同的位置和方位测 6 次, 求均值。

(5) 计算  $\bar{R}_x$  和  $\rho$ , 分析计算测量值  $\rho$  的不确定度。

2. 用双臂电桥测量 30cm 铝棒的电阻率  $\rho$ 。将铜棒换成铝棒, 重复 1 中步骤(1)至(4)。计算铝棒的电阻率  $\rho$ , 不计算测量值  $\rho$  的不确定度。(必做)

3. 用双臂电桥测量 40cm 铜棒的电阻率  $\rho$ 。重复 1 中步骤(1)至(4)。计算铜棒的电阻率  $\rho$ 。(选做)

4. 测量双臂电桥灵敏度。(选做)

当电桥平衡时检流计无偏转,  $R_x = \frac{R}{R_1} R_n$ 。此时,  $R_x$  有极微小改变  $\Delta R_x$ , 即

可导致检流计的微小偏转  $\Delta n$ 。定义电桥灵敏度  $S$  为:  $S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x / R_x}$ ,  $\Delta n$  越大,

说明电桥灵敏度越高, 带来的测量误差就越小。

实际上待测电阻  $R_x$  若不能改变, 可通过改变双臂电桥电阻箱阻值  $R$  来测电桥灵敏度。如前测量铜棒电阻, 先调电桥至平衡得  $R$ , 改变  $R$  为  $R+\Delta R$ , 使检流计偏转一格, 求出电桥灵敏度; 再将  $R$  改变为  $R-\Delta R$ , 使检流计反方向偏转一格, 再求电桥灵敏度。因为人工所调平衡可能存在误差, 而正反测量以减小这种误差。



## 四. 注意事项

1. 按线路图电流回路接线。主电路工作电流 1.5~2A，电流过大限流电阻发烫。
2. 标准电阻和未知电阻的电压头连接到双臂电桥时注意接线顺序。
3. 检流计在低灵敏度档（X0.1）和高灵敏度档（X1）分别进行调零、测量，不工作时拨回“短路”档进行保护。
4. 电桥调平时操作顺序：检流计，先低灵敏度档后高灵敏度档；电桥：先粗调后细调。
5. 实验过程中避免震动操作台。
6. 实验中线路开关总是断开，只有测量数据时才闭合。

## 五、思考题

1. 如果将标准电阻和待测电阻电流头和电压头互换，等效电路有何变化，有什么不好？（必做）
2. 在测量时，如果被测低电阻的电压头接线电阻较大（例如被测电阻远离电桥，所用引线过细过长等），对测量准确度有无影响？（必做）
3. 根据测量误差分析情况，实验中电阻率测量精度影响最大的是什么？（选做）
4. 电阻测量中四端接法用于什么情况？如何提高电阻测量精度？（选做）

## 六. 报告格式

实验报告按照小论文格式撰写

1. 简介：低电阻测量简介、四端接法思想、双臂电桥测量原理；
2. 实验仪器简介；
3. 测量数据获取；
4. 根据测量结果计算不同待测样本的电阻率及其测量的不确定度，对测量过程及结果进行分析讨论（思考题提供参考）；
5. 结论。