

# 直流电桥

桥式电路测电阻是应用比较法进行测量，具有测试灵敏、准确度高的特点，是精确测量电阻的方法之一。电桥分为直流电桥和交流电桥两大类，直流电桥又分为单臂电桥和双臂电桥，单臂电桥称为惠斯通（Wheatstone）电桥，主要用于精确测量中值电阻（几十欧姆到几千欧姆）；双臂电桥又称为开尔文电桥，适用于测低值电阻。电桥电路不仅可以用于测量电阻，搭建不同的电桥电路，还可用于测量电容、电感、温度、压力、真空度等许多物理量，桥式电路被广泛应用于电工技术、非电量测量以及自动控制等诸多领域。

## 一 实验目的

1. 通过用直流电桥测量电阻，来学习使用比较法测量物理量；
2. 理解直流电桥的原理和特点以及调节电桥平衡的方法；
3. 理解影响电桥灵敏度的相关因素，从而学会如何正确选择元件以达到实验的测量要求；
4. 练习基本电路的连接，学习基本电学仪器的使用。

## 二 预习重点

1. 了解实验目的；
2. 理解直流电桥的电路结构、测量原理，推导平衡条件，为什么用电桥电路测量电阻精确度高？
3. 理解电桥灵敏度的定义，会分析影响灵敏度的相关因素，由灵敏度定义推导公式：

$$M = \frac{\varepsilon}{S_V} \cdot \frac{R_A / R_B}{(1 + R_A / R_B)^2}$$

4. 本实验要测量哪几项内容？可否预期一下数据规律？为什么会存在这样的规律？
5. 在连接电路之前，先应该做什么？本实验连接线路应遵循怎样的顺序？线路连接中应避免什么现象？
6. 通电前应检查什么？为什么？
7. 变阻箱使用中应注意什么问题？万用电表如何使用？
8. 在本实验中，电桥平衡指的是什么？要想快速调节得到万用表示数为零，应遵循怎样的调节顺序？
9. 在数据记录中要注意什么问题？
10. 当待测电阻较小时，如何消除导线电阻对实验结果的影响

## 三 实验原理

### 1. 直流电桥的测量原理

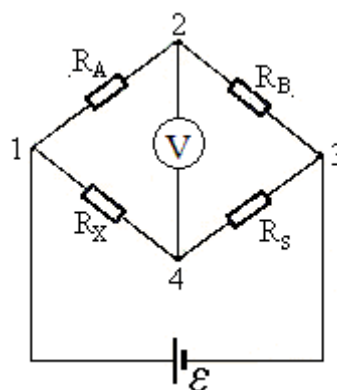
直流电桥电路如图所示。  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_S$ 、 $R_X$  为四个电阻（其阻值分别为  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_S$ 、 $R_X$ ），联成四边形，每一边称为电桥的一个桥臂；对角 1 和 3 与直流电源相连，2 和 4 之间连接一个电压表，用来检验其间的电压是否相等。显然，当 2 和 4 的电位相等时，电压表示数为零，此时称为电桥平衡。由欧姆定律可知，当电桥平衡时，有  $U_{12}=U_{14}$ ； $U_{23}=U_{43}$ ；故有：

$$I_A R_A = I_X R_X \quad (1)$$

$$I_B R_B = I_S R_S \quad (2)$$

$$I_A = I_B \quad (3)$$

$$I_X = I_S \quad (4)$$



联立得：

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_S} \quad (5)$$

上式即为直流电桥的平衡方程。若已知  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_S$ ，即可根据此方程求出待测电阻  $R_X$ 。

## 2. 直流电桥的灵敏度

在实际测量时，需要知道当电桥有微小的不平衡时，电压表会如何反应。设各电阻的阻值为  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_S$ 、 $R_X$  时电桥达到平衡，则当改变电阻  $R_S$  使它有一个微小变化量  $\delta R_S$  时，电压表的示数变化  $\delta V$ 。定义电压表-电桥的组合灵敏度（简称电桥灵敏度）为：

$$M = \frac{\delta V / S_V}{\delta R_S / R_S} \quad (6)$$

其中  $S_V$  是电压表的最小显示分度。  $M$  在数值上等于电桥桥臂有单位相对不平衡值  $\delta R_S / R_S$  时所引起的电压表相应改变量（改变几个最小分度）。显然，  $M$  值越大，能检测到的电桥不平衡值越小，因而电桥越灵敏。不难推导得出（请同学们自行推导）：

$$M = \frac{\varepsilon}{S_V} \cdot \frac{R_A / R_B}{(1 + R_A / R_B)^2} \quad (7)$$

由上式可知，电桥的灵敏度  $M$  与桥臂比  $R_A / R_B$ 、电源电压  $\varepsilon$  及电压表的最小显示分度  $S_V$  等均有关。因此，要提高电桥的灵敏度，可采取的措施有①选择合适的桥臂比例  $R_A / R_B$ ；②增大电源电压  $U$ （但须考虑各元件的允许功率）；③选择灵敏度更高的电压表等。

## 3. 电桥的测量不确定度

当电桥的不平衡情况不能被检测到时，测量结果将有相应的不确定度存在。

例如：用最小显示分度为  $0.1\text{mV}$  的电压表检测电桥是否平衡，对应于一定的  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_X$ ，调节  $R_S = 5000\Omega$  时电桥达到平衡；而调节  $R_S = 5010\Omega$  时，电压表示数为  $1.0\text{mV}$ 。因此，当  $R_S$  改变  $1\Omega$  时电压表示数为  $0.1\text{mV}$ ，即恰好能分辨出电桥处于不平衡状态。由此可以认为测量结果  $R_S$  的测量不确定度为  $1\Omega$ 。（为什么可以这么估算测量不确定度？）

## 四 实验仪器及使用方法

### 1. 实验仪器

直流稳压电源一个，旋转式电阻箱 3 个，  
数字式万用电表一个，待测电阻 1 个，  
单刀双置开关 1 个，导线若干（如图）。



### 2. 使用方法

#### (1) 直流稳压电源：

将“POWER”键按下，打开仪器，预热一段时间；将红色（+）和黑色（-）接口接入电路，注意：电源输出不能短路；调节“C.C”旋钮，使“C.V”旋钮的红色指示灯变亮；向右调节“C.V”旋钮，不断增大输出电压，选择需要的电压值；实验完毕后，“C.V”旋钮左旋到底，使电压值为“0.0”，按“POWER”键，关闭仪器。

#### (2) 旋转式电阻箱：

使用旋转式电阻箱需注意以下问题：

- a. 使用时的工作电流绝不应超过最大允许值（本实验电阻箱的额定功率为 0.25W）；
- b. 使用前，应先旋转一下各个转盘，使盘内弹簧触点的接触性能稳定可靠；
- c. 电阻箱的各档阻值不要放在零值，以免接通电路后短路受损；
- d. 本实验使用的 ZX21A 型电阻箱的有效数字一般只能取四位。

### 3. 数字式电压表：

按测试功能，将两表笔插入相应插孔，旋转功能盘至相应挡位，即可用表笔进行相应测量（可在 2v 档粗调，平衡后换至 200mv 档精确测量），实验结束，将万用表功能选择盘置于 off 档。

### 4. 待测电阻：

本实验采用固定电阻，其阻值可由万用电表电阻档大致测出。

## 五 实验内容：

1、按直流电桥的电路图接线（注意连线顺序，避免导线交叉）。

2、检验  $R_A/R_B$  取不同值对于电桥灵敏度的影响。

- 电源电压取 3 伏，在电桥比率臂  $R_A/R_B$  取不同值的情况下，调节  $R_S$ ，使电桥达到平衡，记录  $R_S$  值；

- 增大  $R_S$  使电压表示数变化  $1.0\text{mV}$ ，计算电桥灵敏度  $M$ 。

3、检验在  $R_A=R_B$  前提下， $R_A$  及  $R_B$  的绝对数值不同，对于电桥灵敏度是否产生影响。

4、检验电源电压变化对于电桥灵敏度的影响。

5、非平衡电桥

在直流电桥已调至平衡的状态下，改变桥臂  $R_S$  的电阻值，观测电阻  $R_S$  的改变量与桥臂间检测电压之间的关系。【注意：增大或减小相同的电阻值，其所对应的电压变化量是不同的！为什么？】

## 六、数据处理

1、初步处理各组数据，计算  $R_X$ 、 $M$  数值，选取灵敏度最高的一组数据（对应哪一组？）评

定  $R_X$  的不确定度，写出计算过程，正确表达  $R_X \pm u(R_X)$ ；

2、正确做出电桥灵敏度随电桥比率臂  $R_A/R_B$  变化的关系曲线；

3、正确做出电桥灵敏度随  $R_A$ 、 $R_B$  绝对数值变化间的关系曲线；

4、正确做出电桥灵敏度随电源电压数值变化的曲线；

5、正确做出桥臂间检测电压与电阻  $R_S$  的改变量之间的关系曲线。

## 参考文献

1. 沈元华，陆申龙，基础物理实验，高等教育出版社，2003，189-193。
2. 贾玉润等，大学物理实验，上海复旦大学出版社，1987。
3. 陆申龙、孙大征，物理实验，第 12 卷第三期，1992.6: 140-142。

## 附录 1 旋转式电阻箱 $R_x$ 介绍

实验中  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_S$  均为旋转式电阻箱。电阻箱是一种数值可调的精密电阻组件。它由若干个数值准确的固定电阻元件（常用高稳定锰铜合金丝绕制）组合而成，并借助转盘位置的变换来获得 0.1~99999.9 的各电阻值。

电阻箱的不确定度限值等于示值乘以等级再加上零值电阻，实验中所使用的电阻不确定度限值  $a$  需经计算才能得到。由于电阻箱各档的等级是不同的，因此在计算时应分别计算。



本实验中采用的 ZX21A 型电阻箱各档误差等级及零值电阻见上图，对于以下一组数据，电阻箱的不确定度限值  $a$ ，以及待测电阻  $R_x$  的不确定度可做如下运算：

$R_A=R_B=43\Omega$					
$\varepsilon/V$	$R_S/\Omega$	$R_S'/\Omega$	$\delta R_S/\Omega$	$R_x/\Omega$	$M/\text{分度}$
9.00	2137.7	2144.2	6.5	2137.7	$3.3 \times 10^2$

电阻  $R_A$  对应的不确定限值： $a = (40 \times 0.1\% + 3 \times 0.5\% + 0 \times 2\% + 0.02) \Omega = 0.075 \Omega$

$$u_{B1}(R_A) = u_{B1}(R_B) = 0$$

$$u_{B2}(R_A) = \frac{40 \times 0.1\% + 3 \times 0.5\% + 0.02}{\sqrt{3}} = 0.043 \Omega$$

$$u(R_A) = 0.043 \Omega$$

$$u_{B1}(R_S) = \frac{1}{10} \delta R_S = 0.65 \Omega$$

$$u_{B2}(R_S) = \frac{2130 \times 0.1\% + 7 \times 0.5\% + 0.7 \times 2\% + 0.02}{\sqrt{3}} = 1.3 \Omega$$

$$u(R_S) = \sqrt{u_{B1}(R_S)^2 + u_{B2}(R_S)^2} = \sqrt{0.65^2 + 1.3^2} = 1.5 \Omega$$

$$u(R_x) = R_x \sqrt{\left(\frac{u(R_A)}{R_A}\right)^2 + \left(\frac{u(R_B)}{R_B}\right)^2 + \left(\frac{u(R_S)}{R_S}\right)^2}$$

$$= 2137.7 \times \sqrt{\left(\frac{0.043}{43}\right)^2 + \left(\frac{0.043}{43}\right)^2 + \left(\frac{1.5}{2137.7}\right)^2}$$

$$= 3.37 \approx 3 \Omega$$

$$R_x \pm u(R_x) = (2137 \pm 3) \Omega$$

## 附录 2 实验数据记录（参考表格）

1. 保持电源电压不变，研究不同桥臂比对灵敏度的影响。

表 1 桥臂比不同时的电桥灵敏度

条件： $\varepsilon = 3.00$  V， $\delta V = 1.0$  mV

序号	$R_A / \Omega$	$R_B / \Omega$	$R_A / R_B$	$R_S / \Omega$	$R'_S / \Omega$	$\delta R_S / \Omega$	$R_X / \Omega$	$M$
1	2000		1:1					
2	2000		1:2					
3	2000		1:5					
4	2000		1:10					
5	2000		2:1					
6	2000		5:1					
7	2000		10:1					

表 1 结论：

2. 保持电源电压不变，保持桥臂比 1:1，研究桥臂电阻的取值对实验结果的影响。

表 2 桥臂电阻不同时的电桥灵敏度

条件： $\varepsilon = 3.00$  V， $\delta V = 1.0$  mV

序号	$R_A = R_B / \Omega$	$R_S / \Omega$	$R'_S / \Omega$	$\delta R_S / \Omega$	$R_X / \Omega$	$M$
1	50000					
2	10000					
3	2500					
4	500					
5	100					
6	20					
7	10					

表 2 结论

3 保持桥臂比 1:1，研究电源电压对灵敏度的影响。

**表 3 电源电压不同时的电桥灵敏度**

条件：  $R_A = R_B = \underline{5000} \Omega$ ，  $\delta V = \underline{1.0} \text{ mV}$

序号	$\varepsilon / \text{V}$	$R_S / \Omega$	$R'_S / \Omega$	$\delta R_S / \Omega$	$R_X / \Omega$	$M$
1	1.00					
2	2.00					
3	3.00					
4	4.00					
5	5.00					
6	6.00					
7	7.00					
8	8.00					

表 3 结论：

4 非平衡电桥的特性

**表 4 直流电桥  $R_S$  桥臂的改变量与检测电压之间的关系**

条件：  $\varepsilon = \underline{3.00} \text{ V}$ ， 桥臂比  $R_A = R_B = \underline{5000} \Omega$

序号	$R_S + \delta R_S / \Omega$	$\delta R_S / \Omega$	$\delta V / \text{mV}$
1		0.0	0.0
2		5.0	
3		10.0	
4		15.0	
5		20.0	
6		25.0	
7		30.0	
8		35.0	

表 4 结论：