

基础物理实验

# 直流电桥



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



## 欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

# 直流电桥

电桥测电阻是应用比较法进行精确测量电阻的方法之一，具有测试灵敏、准确度高的特点。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，在各种传感器及测量仪器中还经常会用到非平衡电桥电路，因此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。

## 实验目的

1. 通过用直流电桥测量电阻，学习应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，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。

## 实验原理

### 1. 直流电桥的原理

直流电桥电路如图 1 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  $R_X$ 。

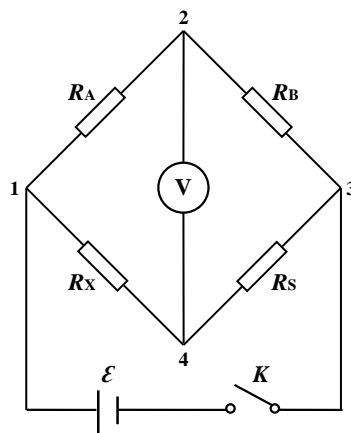


图 1 直流电桥电路

### 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。可以推导得出：

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

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  $\varepsilon$ （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，测量结果将有一相应的不确定度。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  $1\Omega$ 。即

$$u_{B1}(R_S) = S_V \cdot \frac{\delta R_S}{\delta V} \quad (8)$$

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，由于电阻箱各档的等级是不同的（如表 1 所示），因此在计算时应分别计算，例如 ZX21A 型电阻箱，若其示值为  $360.5\Omega$ ，零值电阻为  $0.02\Omega$ ，则其不确定度限值  $a=(300 \times 0.1\% + 60 \times 0.1\% + 0 \times 0.5\% + 0.5 \times 2\% + 0.02)\Omega = 0.39\Omega$ 。

表 1

档位/ $\Omega$	10000	1000	100	10	1	0.1
等级/%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	2

### 实验前应回答的问题

1. 画出图 1 电路图，写出直流电桥的平衡方程。
2. 什么是电桥平衡，如何判断？
3. 根据电桥的灵敏度公式分析桥臂比例、电源电压等因素对电桥灵敏度的影响。

### 实验仪器及使用方法

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

#### 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：

- 使用时的工作电流不应超过最大允许值（本实验电阻箱的额定功率为 0.25W）；
- 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；
- 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；

## 3. 数字式万用电表：

将两表笔插入相应插孔，旋转功能盘至相应档位，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。

## 实验内容

### 一. 必做内容

- 按直流电桥的电路图接线（注意连线顺序，避免导线交叉）。
- 检验  $R_A/R_B$  取不同值对于电桥灵敏度的影响：  
在电桥桥臂比  $R_A/R_B$  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 1.0mV，计算电桥灵敏度  $M$ 。
- 检验电源电压变化对于电桥灵敏度的影响。
- 选取灵敏度最高的一组数据评定  $R_X$  的不确定度，写出计算过程，得出  $R_X \pm u(R_X)$ ；
- 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。

### 二. 选做内容

- 正确作出电桥灵敏度随电桥桥臂比  $R_A/R_B$  变化的关系曲线；
- 正确作出电桥灵敏度随电源电压数值变化的曲线；
- 正确作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

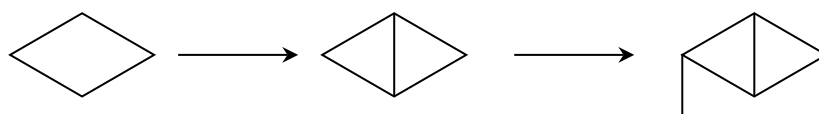
- 沈元华，陆申龙，基础物理实验，高等教育出版社，2003，189-193。
- 贾玉润等，大学物理实验，上海复旦大学出版社，1987。
- 陆申龙、孙大征，物理实验，第 12 卷第三期，1992.6: 140-142。

# 直流电桥操作指南

## 注意事项：

### 接线：

1. 按照电路图合理摆放实验器材；
2. 接线前注意电源应关闭，开关断开，电阻箱的示值不能为零；
3. 按回路接线次序为：



### 电阻箱：

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；  
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；  
使用时的工作电流不应超过最大允许值（额定功率值）；

### 万用电表

将两表笔插入“V”和“COM”插孔；  
将功能选择盘旋至直流电压的相应档位；  
实验结束，将万用表功能选择盘置于 OFF 档。

### 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。

## 直流电桥数据记录参考表格

1. 检验  $R_A/R_B$  的值对电桥灵敏度的影响。

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

$R_A/\Omega$	$R_A/R_B$	$R_B/\Omega$	$R_S/\Omega$	$R_S'/\Omega$	$\delta R_S/\Omega$	$R_X/\Omega$	$M/\text{分度}$
2000	10 : 1						
2000	5 : 1						
2000	2 : 1						
2000	1 : 1						
2000	1 : 2						
2000	1 : 5						
2000	1 : 10						

2. 检验电源电压对电桥灵敏度的影响。

条件:  $R_A = R_B = \underline{2000}$   $\Omega$ ,  $\delta V = \underline{1.0}$  mV

$\varepsilon/\text{V}$	$R_S/\Omega$	$R_S'/\Omega$	$\delta R_S/\Omega$	$R_X/\Omega$	$M/\text{分度}$
$\approx 1.00$					
$\approx 3.00$					
$\approx 5.00$					
$\approx 7.00$					
$\approx 9.00$					

3. 检验桥臂  $R_S$  的改变量与桥臂间检测电压之间的关系。

条件:  $\varepsilon = \underline{3.00}$  V,  $R_A = R_B = \underline{2000}$   $\Omega$ ,

$\delta R_S/\Omega$	$R_S/\Omega$	$\delta V/\text{mV}$
0.0		0.0
5.0		
10.0		
15.0		
20.0		
25.0		
30.0		
35.0		

