

实验 7 惠斯通电桥测电阻

1843 年惠斯登在英国皇家学会发表论文《An Account of Several New Processes for Determining the Constants of a Voltaic Circuit》，当中阐述了一个能用于测量导体电阻的平衡关系式. 论文中使用了大量简单实用的公式来从欧姆定律计算电流与电阻，因这篇论文被英国皇家学会授予奖章. 尽管今天数字万用表提供了最简单的测量电阻的方法. 在惠斯登电桥仍然可以用来测量在毫欧 ($\text{m}\Omega$) 范围非常低电阻. 如今借助现代运算放大器，人们使用惠斯通电桥电路将各种传感器和传感器连接到这些放大器电路，可以测量电阻、电容、电感、频率、压力、温度等许多物理量.

【实验目的】

1. 了解惠斯通电桥的结构和测量原理.
2. 掌握自主搭建惠斯通电桥测量电阻的方法.
3. 学会使用箱式单臂电桥测中值电阻.
4. 了解单臂电桥测量中提高灵敏度的方法，学习不确定度计算方法.

【实验仪器】

直流稳压电源、万用表、可变电阻、待测电阻、导线若干

【实验原理】

1. 惠斯通电桥线路原理

(1) 电桥原理

惠斯通电桥又称为单臂电桥，是一种直流平衡电桥，其电路如图 5.7.1 所示。其中比例臂电阻 R_1 和 R_2 ，与未知电阻 R_x 、可调电阻 R_s 构成了四个桥“臂”（ABCD），检流计 G 连通 CD 两端构成“桥”。通常 R_1 、 R_2 称为比例臂，把 R_x 、 R_s 所在的桥臂分别称为测量臂和比较臂。当 AC 端加上直流电源时，检流计用来检测其间有无电流。B、D 两点的对角线形成一条“桥路”，作用是将桥路两个端点的电位直接进行比较。当 B、D 两点电位相等时，桥路中无电流通过，检流计 G 值为零，此时称电桥达到平衡。

调节 R_1 和 R_2 和 R_s ，可使得 BD 两点电位相等，检流计 G 指针指零，即电桥达到平衡。此时， $U_{AB}=U_{AD}$ ， $U_{BC}=U_{BD}$ ，即 $I_1 R_1 = I_2 R_2$ ， $I_x R_x = I_o R_s$ 。因检流计 G 中无电流，所以 $I_1 = I_x$ ， $I_2 = I_o$ 。将上述两式相除，则：

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_s} \quad (5.7.1)$$

由上式可得：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s \quad (5.7.2)$$

通常 R_1/R_2 为比率或倍率， R_x 为电桥未知臂。显然，惠斯通电桥测电阻的原理是基于电压比较法。式子(2)就是惠斯通电桥的平衡条件。

调节电桥平衡的技巧，一般是根据待测电阻 R_x 大小，选好比例臂（ R_1/R_2 ）再调节比较臂 R_s 。在调节电桥平衡的过程中，应遵循“先粗测、后精测、先粗调、后细调”的原则。即测量前，用万用表先粗略测 R_x 值，根据 R_x 大小，选择合适的比率系数，把 R_x 调到预先估计数值上，再细调 R_s 使得电桥平衡。此外，为避免电流过大，通常 BD 两端还会加入滑线变阻器 R_b ，当电桥未平衡时， R_b 调到最大，平衡后调到最小，以提高检流计灵敏度，减少电桥测量误差。惠斯通电桥从

根本上消除了采用伏安法测电阻时因电表内阻接入带来的系统误差，因此准确度明显提高.

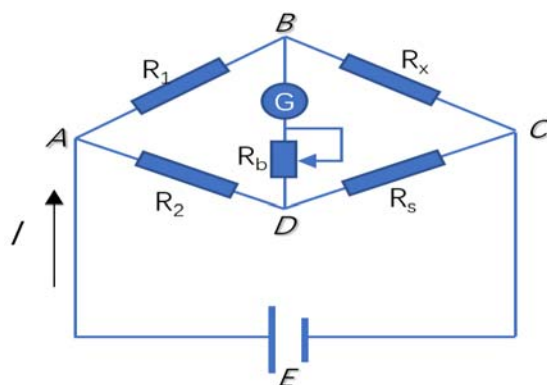


图 5.7.1 惠斯通电桥电路图

(2) 提高电桥的测量精度

当电桥达到平衡时，所测阻值 R_X 的准确度仅由 R_1 、 R_2 、 R_S 的准确度决定. 为减少误差传递，提高测量精度，实际测量中常采用交换测量法. 通过交换互易，消除接线本身误差对测量结果的影响.

① 交换测量法

自组电桥测定 R_X 之后，保持比例臂 R_1 、 R_2 不变，将比较臂 R_S 与测量臂 R_X 的位置对换，再调节 R_S 阻值使得电桥平衡（检流计 G 趋于零）. 设此时 R_S 变为 $R_{S'}$,

$$R_X = \frac{R_2}{R_1} R_{S'} \quad (5.7.3)$$

由 2 和 3 式，可得：

$$R_X = \sqrt{R_S R_{S'}} \quad (5.7.4)$$

上式显示： R_X 与比例臂 R_1 、 R_2 无关，仅仅决定于比例臂 R_S 的准确度. 若比较臂选用准确度较高的标准电阻箱，则可大大减少系统误差.

2. 电桥灵敏度 S

在调节电桥平衡时，当比较臂阻值在 R_S 到 $R_S + \Delta R_S$ 范围内变动时，常可发现检流计似乎都指零，因此无法确定 R_S 的准确值。为反映电桥的灵敏程度，引入电桥灵敏度的概念。将电桥平衡状态下比较臂有一微小的相对改变量 $\Delta R_S / R_S$ 时，所引起检流计电流变化 ΔI 与 $\Delta R_S / R_S$ 的比值，定义为电桥灵敏度，用 S 表示：

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_S / R_S} \quad (5.7.5)$$

其中： S 单位为“格”。 S 越大，在 R_S 基础上增减 ΔR_S 能引起检流计 G 指针偏转的格数就越多，电桥就越灵敏，对电桥平衡的判断就越容易，测量结果相对也更准确。电桥灵敏度不仅与示零器本身的灵敏度有关，还和电源的电压、各桥臂电阻以及串联的限流电阻等线路结构（即电桥线路灵敏度）有关。

【实验内容】

1. 自主搭建电桥测未知电阻、计算其不确定度 U_{R_X} 。

- (1) 自组电桥测试不同阻值的未知电阻 R_X ，用交换法消除电桥不等臂误差。
- (2) 利用不确定度公式及电阻箱准确度等级估算 R_X 不确定度 U_{R_X} 。
- (3) 测量不同电压下电阻的阻值，分析所得结果，得出有意义的结论。

【实验步骤与数据记录】（操作细节、数据记录表格）

1. 自组装单臂电桥测电阻

- (1) 用万用表从工具箱中选取阻值 300-400 Ω 左右的电阻作为待测电阻 R_X ，记录万用表测量阻值 R_X 作为粗略阻值；

(2) 按照电路原理图，在面包板上搭建电桥电路，选择电阻比例臂 $R_1/R_2 \sim 2$ ，根据 R_X 设置 R_S 初始值，使其小于 R_X 粗略值。（请思考：假设粗略值 $R_X = 333.3\Omega$ ， R_S 初始设置值应该是多少？）

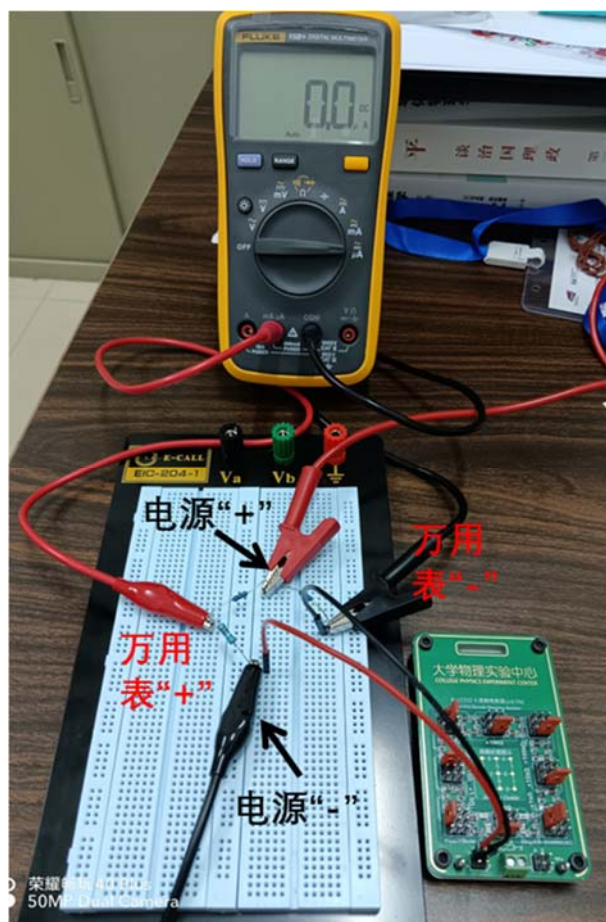


图 5.7.2 惠斯通电桥电路参考连接

(3) 采用万用表作为检流计，预设电源电压 1V，打开电源，通过电流的方向判断 R_S 阻值是偏大还是偏小（请思考：假设连接如图 5.7.2，此时万用表电流为正，则 R_S 是偏大还是偏小？），根据判断，由高位逐步调节电阻 R_S 使万用表电流绝对值减小；当观察到电流出现反向，则调节过大，需要调小该位电阻 1 个单位，并进行小一位的电阻调节（为什么？）。重复上述过程，直到万

用表的绝对值达到最小值，此时电桥达到平衡，记录平衡时电阻 R_s 和平衡电流 I_s

R_s 的调节采用跳帽方式，具体规则参考下图：

总的阻值由所有档位阻值相加，每一档位阻值由跳帽决定，跳帽规则见中心示意图

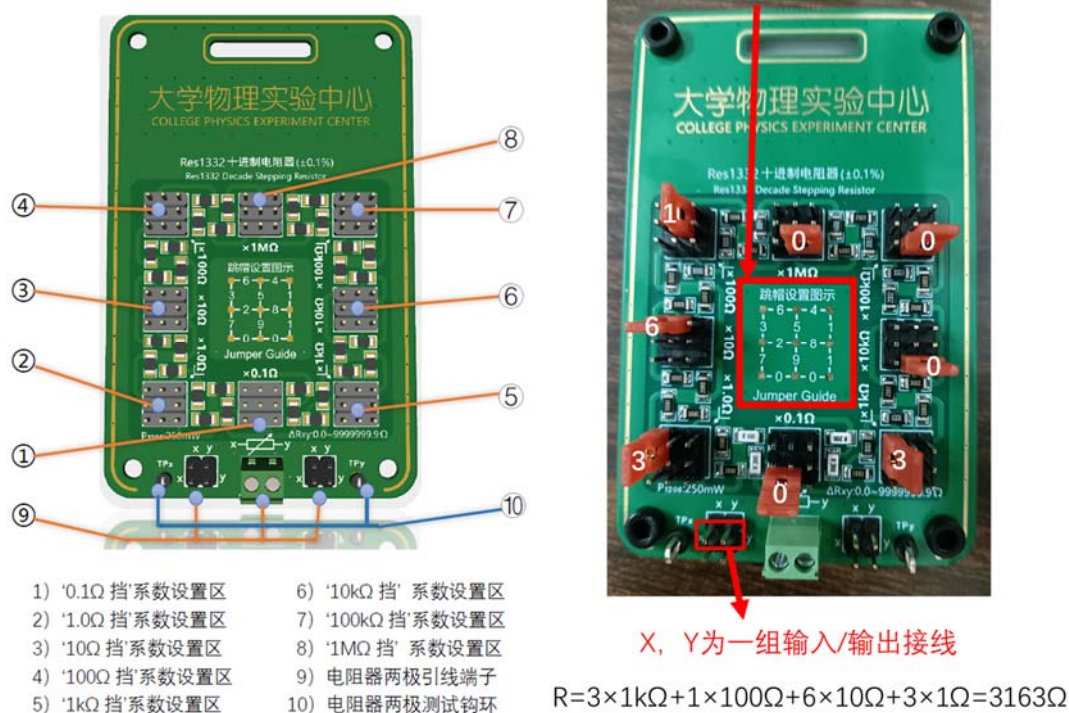


图 5.7.3 可变电阻读取方式

(4) 在电桥平衡的情况下，将 R_x 增加 1Ω ，记录此时变化的电流数值 ΔI ，计算电桥灵敏度 S 。

(4) 断开电路，将 R_x 和 R_s 位置对调，测出 R_s 以及对应的平衡电流 I_s 和 ΔI ，利用公式 (5.7.4) 计算交换法测得的电阻值 R_x ，利用公式 (5.7.5) 计算电桥灵敏度。

(7) 改变电压 6 V 重复测量电阻的阻值，分析电压变化对电桥灵敏度的影响。

(6) 选取一组数据计算不确定度 U_{R_x} 。

3. 数据记录与处理（该部分一般为课后处理）

- (1) 计算电阻值 R_x 和电桥灵敏度.
- (2) 选取一组数据计算测量不确定度，正确表示结果.

在自组电桥实验中，电阻箱的仪器误差用下式估算公式如下：

$$\Delta R_s \approx R_s \times a\% = R_s \times 0.1\%$$

数据记录参考表格如下：

表 5.7.1 自组电桥数据记录表（预习报告参考）

R_x 粗略值 (Ω)				
电压	1V		6V	
	交换前	交换后	交换前	交换后
比率 R_1/R_2				
电桥平衡时 R_s (Ω)				
平衡电流 I_s (μA)				
改变 1Ω 的 ΔI (μA)				
灵敏度 S				
电阻阻值 $R_x(\Omega)$				

【思考题】(预习问题、思考题等)

1. 如果取桥臂电阻相等，调节 R_s 从 0 到最大，电流计始终显示正值（或者负值），这说明了什么问题？应该如何调节才能是电桥平衡？

【物理史话】(<800 字)

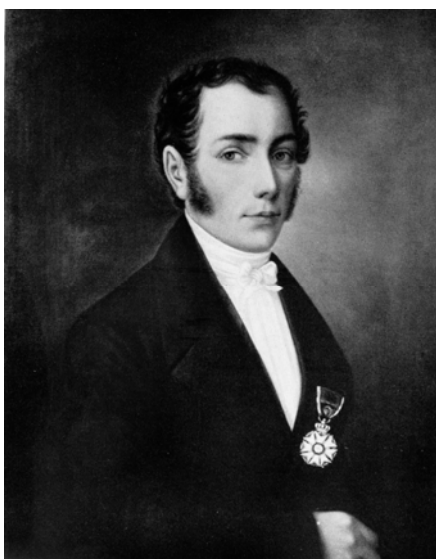


图 20.5: 查尔斯·惠斯通
Sir Charles Wheatstone
(1802-1875)

惠斯通 1802 年出生于英国格洛斯特，他的父亲是一名乐器销售商，后搬到伦敦担任教笛子老师。小时候的惠斯通害羞且敏感，平时喜欢躲在阁楼里，沉浸在自己的思考中。14 岁那年，惠斯通在与他同名的叔叔之下做学徒，惠斯通其实对手工或商业不怎么感兴趣，反而喜欢阅读书籍。他父亲也十分支持他的兴趣。15 岁时，惠斯通翻译了法文诗并谱

了两首歌曲，并将其中一首给了他的叔叔，乐谱中一些里拉琴的部分更成了 Bartolozzi 一个雕刻上的题词。

1847 年 2 月 12 日，惠斯登与埃玛·韦斯特在马里玻恩举行婚礼。惠斯登的家庭生活可以说是宁静平和的。虽然惠斯通在公开场合沉默寡言，但私底下的他一聊到他喜欢的研究，立刻变得思绪清晰，十分健谈。亨利·泰勒爵士曾一次观察到惠斯登在牛津的晚宴中与帕默斯顿爵士畅谈电报的功能。

晚年惠斯登惠斯登在 1868 年完成自动电报机的发明后便被封爵。在这之前他曾获骑士级的荣誉勋章，更有分别来自国内外不同单位的 34 个荣誉证明了他的学术声望。自 1836 年起他便成为英国皇家学会的一员，并分别在 1859 年、1873 年当选瑞典皇家科学院与法国科学院的外国会员。1873 年，法国促进国家

工业协会授予他安培奖章. 1875 年, 他成为英国土木工程师学会的荣誉会员. 他是牛津大学的民法学博士和剑桥的法学博士.

