浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 用双臂电桥测低电阻

实验桌号： 17

指导教师： _____

班级： _____

姓名： _____

学号： _____ _____

实验日期： 2025 年 10 月 14 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

(1) 实验现象

在实验中我们观察到，当闭合电源开关后，通过调节标准电阻箱 R_s 的阻值，电路中的检流计指针会发生偏转。继续细心调节，可以找到一个特定的阻值，使得检流计指针恰好指向中央零刻度位置，此时指针不再偏转，表明电桥达到了平衡状态。若待测对象为金属导体，我们还发现，随着导体温度的升高，需要调节 R_s 到一个更大的值才能使电桥重新平衡，这直观地显示了金属电阻值随温度升高而增大的现象。

(2) 实验原理

本次实验的核心是利用双臂电桥精确测量低电阻。

对于毫欧级别的低电阻，常规的测量方法会因为接触电阻和导线本身电阻（数量级通常为 $0.01 \sim 1\,\Omega$）的引入而产生巨大的误差。为了克服这一难题，我们采用了四端接入法。其原理如图1所示，在测量低电阻 R_x 时，额外引入了接触电阻 r_1 和导线电阻 r_2。传统的二端接法会将这些附加电阻也一并测量。而四端接入法则将电流端与电压端分离，通过测量 R_x 两端的电压 V_x 和流过 R_x 的电流 I，得到 $R_x = V_x/I$，从而有效消除 r_1 和 r_2 对测量结果的影响。

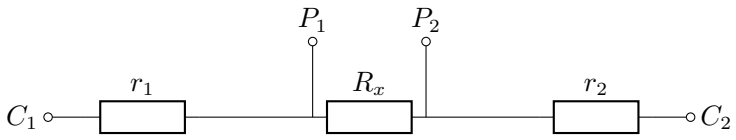


图 1: 四端接入法原理图

双臂电桥是在惠斯通电桥基础上，巧妙融合四端接入法原理演变而来的，其电路原理如图2所示。图中 R_x 为待测低电阻，R_s 为可调的标准低电阻。R_1, R_2, R_3, R_4 构成电桥的两个桥臂，通常被称为“比例臂”。r 是连接 R_x 与 R_s 的导线的电阻，其阻值也极低。

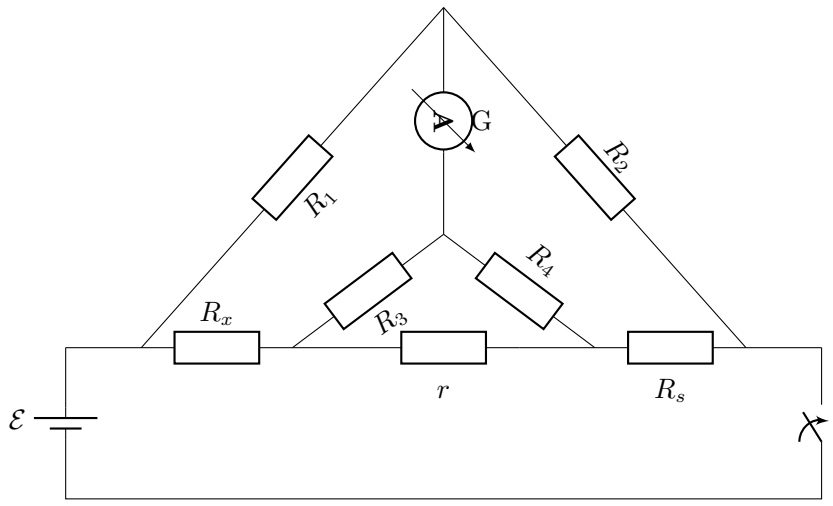


图 2: 双臂电桥电路原理图

当调节电桥使得检流计 G 中没有电流通过（$I_G = 0$）时，电桥达到平衡。此时 B 点与 D 点电势相等。设流过比例臂 R_1, R_2 的电流为 I_1，流过 R_3, R_4 的电流为 I_2，流过待测电阻 R_x 和标准电阻 R_s 的总电流为 I_3。根据基尔霍夫回路定律，可列出方程组：

$$I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3 \tag{1}$$

$$I_1 R_2 = I_3 R_s + I_2 R_4 \tag{2}$$

$$(R_3 + R_4) I_2 = (I_3 - I_2) r \tag{3}$$

联立求解上述方程组，并消去电流项，便可推导出待测电阻的计算公式：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s + \frac{R_4 \cdot r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \tag{4}$$

在实际应用中，我们通过使用“双联臂”或精密匹配的电阻，使比例臂始终满足条件 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$。这样一来，式 (4) 中的第二项便等于零，大大简化了计算，并消除了连接导线电阻 r 对测量结果的影响。最终的计算公式为：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s \tag{5}$$

此外，金属电阻的阻值 R_t 与温度 t 的关系在室温附近可近似表示为线性关系：

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \tag{6}$$

其中 R_0 为 0°C 时的电阻值，α 为该金属的电阻温度系数。利用双臂电桥在不同温度下测出电阻值，便可求得 α。

(3) 实验方法

本实验采用零示法和比较法相结合的思想。实验中，我们通过调节已知标准电阻 R_s，使电桥达到平衡状态（即检流计示数为零）。在平衡条件下，待测电阻 R_x 的值与标准电阻 R_s 及比例臂 R_1/R_2 之间存在一个简单的比例关系。这种零示测量方法避免了对电流和电压的直接精确测量，而是通过判断“有无电流”来实现高精度测量，同时双臂电桥的设计巧妙地排除了接触电阻和连接导线电阻带来的系统误差。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

本实验的学习重点在于理解双臂电桥如何通过引入第二对比例臂来消除连接导线电阻的影响，并掌握四端接入法在低电阻测量中的核心作用。同时，熟悉电桥平衡条件的调节方法以及利用零示法进行高精度比较测量的思想也是关键。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

本实验的实现难点在于精确找到电桥的平衡点。由于检流计灵敏度高，调节阻值时需要非常细致，尤其是在接近平衡时。此外，如何正确接线，特别是保证四端接入法的电流端和电压端连接无误，以及如何选择合适的测量倍率以获得最佳灵敏度和准确度，是操作上的主要挑战。

二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

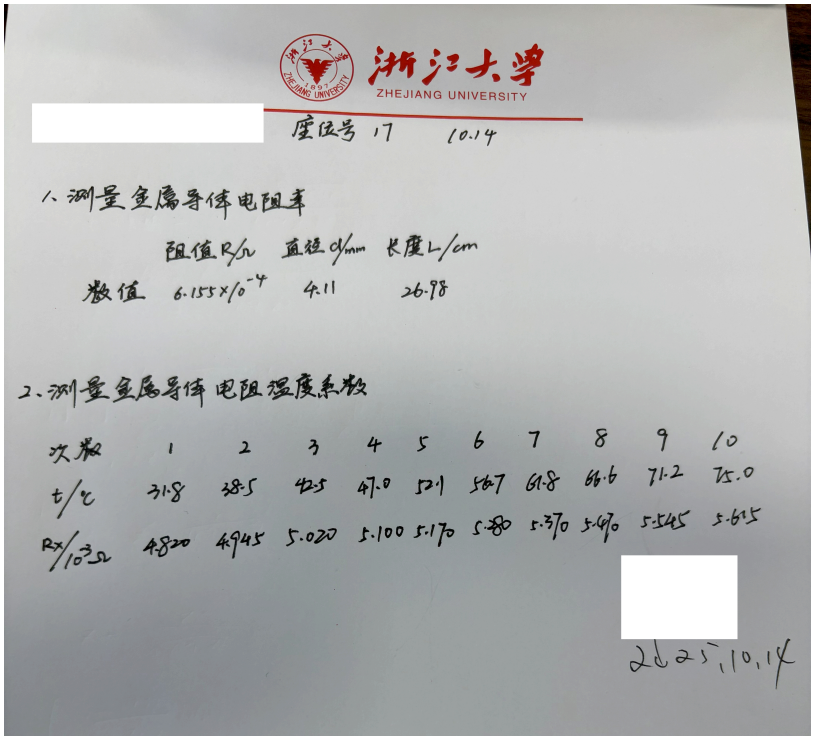


图 3: 原始数据记录

原始数据如图3所示。

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

(1) 测量金属导体电阻率

表 1: 物理参数测量值

	阻值 R/Ω	直径 d/mm	长度 L/cm
数值	6.155×10^{-4}	4.11	26.98

R 的不确定度 $u(R) = \frac{0.01\times0.1\times0.2\%}{\sqrt{3}}\,\Omega = 1.2 \times 10^{-6}\,\Omega$

d 的不确定度 $u(d) = \frac{0.02\,\mathrm{mm}}{\sqrt{3}} = 0.01\,\mathrm{mm}$

L 的不确定度 $u(L) = \frac{0.5\,\mathrm{mm}}{\sqrt{3}} = 0.3\,\mathrm{mm} = 0.03\,\mathrm{cm}$

由 $\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4L}$ 知, 电阻率 ρ 的相对不确定度

$$\frac{u(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{2u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2} = 0.5\%$$

而 $\rho = R \cdot \frac{\pi d^2}{4L} = 3.027 \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$

因此 $u(\rho) = \rho \cdot \frac{u(\rho)}{\rho} = 0.016 \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$

则电阻率的测量结果为 $\rho = (3.027 \pm 0.016) \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$

(2) 测量金属导体电阻温度系数

表 2: 温度与电阻关系

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t/°\mathrm{C}$	31.8	38.5	42.5	47.0	52.1	56.7	61.8	66.6	71.2	75.0
$R_x/10^{-3}\Omega$	4.820	4.945	5.020	5.100	5.170	5.280	5.370	5.470	5.545	5.615

如表2即为为待测电阻 $R_x/(10^{-3}\Omega)$ 与温度 $t/°C$ 所对应的测量值

方法一：用逐差法求平均值

计算 $\alpha_i = \frac{R_{x(i+5)} - R_{x(i)}}{R_{x(i)}t_{(i+5)} - R_{x(i+5)}t_{(i)}}$，　$i = 1, 2, 3, 4, 5$ 得:

表 3: α_i 计算值

i	1	2	3	4	5
$\alpha_i/°\mathrm{C}^{-1}$	4.36×10^{-3}	4.30×10^{-3}	4.42×10^{-3}	4.34×10^{-3}	4.67×10^{-3}

$\bar{\alpha} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} \alpha_i = 4.42 \times 10^{-3}\,°\mathrm{C}^{-1}$.

则相对误差 $E = \frac{|\alpha - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 2\%$

方法二：作图法

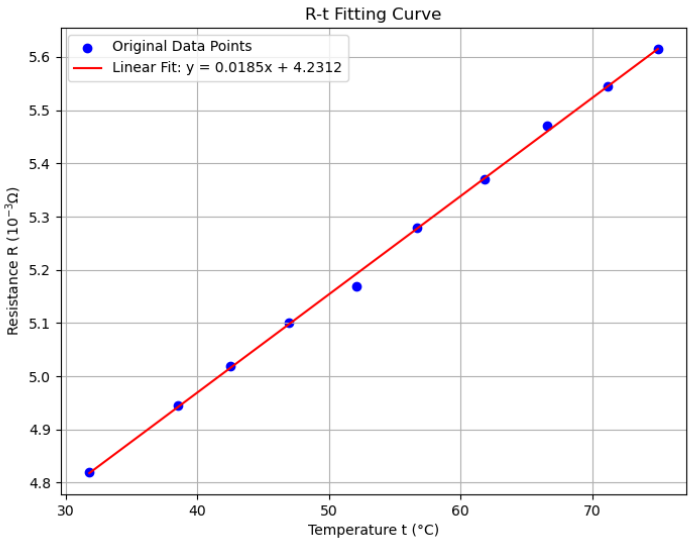


图 4: $R - t$ 图

用计算机辅助作图如图4所示

由 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 得 $\alpha = k/b = 4.361 \times 10^{-3}\,°\mathrm{C}^{-1}$

查得铜的 $\alpha_0 = 4.330 \times 10^{-3}\,°\mathrm{C}^{-1}$

则相对误差 $E = \frac{|\alpha - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\% = 0.7\%$

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

(1)　电阻率测量误差分析

最终电阻率的测量结果为 $\rho = (3.027 \pm 0.016) \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$，合成相对不确定度为 0.5%。该结果的准确性受到以下几个方面因素的影响：

(1) **仪器本身带来的系统误差**：实验中使用的 QJ44 型双臂电桥、螺旋测微器和刻度尺都存在各自的精度限制，这是系统误差的主要来源。

(2) **电桥比例臂的不完全匹配**：双臂电桥消除连接导线电阻影响的前提是比例臂严格满足 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$。实际上仪器内部的电阻元件很难做到完全一致，这会引入一个微小的、难以消除的系统误差。

(3) **测量操作引入的随机误差**：

- 在测量导体长度 L 时，我们发现接线端子并非一个固定的点，可以在一定范围内滑动，这给长度的精确测量带来了不确定性。
- 读取检流计、刻度尺和螺旋测微器读数时，存在不可避免的估读误差。

(2) 电阻温度系数测量误差分析

从 $R-t$ 拟合图可以看出，数据点的线性关系非常好，这说明在实验温度范围内，电阻和温度的线性关系模型是基本适用的。通过作图法得到的相对误差为 0.7%，结果较为理想。误差主要来源于：

(1) **温度测量与平衡问题**：

- 温控仪显示的温度是加热介质的温度，与金属导体内部的实际温度可能存在微小的滞后或差异，尤其是在温度快速变化时，这种差异更为明显。
- 每次调节温度后，需要等待一段时间让导体热量分布均匀，达到稳定状态。如果等待时间不足，测得的电阻值对应的就不是该显示温度下的稳定电阻值。
- 读取温度和调节电桥平衡很难做到完全同步。在我们读取一个稳定的温度值后，再去调节电桥的这段时间里，温度可能已经发生了微小的变化，这会引入随机误差。

(2) **理论模型的近似性**：电阻与温度的线性关系 $R_t = R_0(1+\alpha t)$ 本身就是一个近似公式，在温度范围较大时，其非线性效应会逐渐显现，这属于理论模型引入的系统误差。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

通过这次实验，我基本掌握了使用双臂电桥测量低电阻的方法。实验过程让我深刻理解了四端接入法对于消除接触电阻和导线电阻的重要性，也体会到了零示法在精密测量中的巧妙之处。测量温度系数的环节让我认识到，控制和同步测量条件是保证数据质量的关键。虽然调节电桥平衡需要耐心，但最终得到与理论值相当吻合的结果，还是很有成就感的。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1. 双臂电桥与惠斯登电桥有哪些异同？

相同点：两者都基于电桥平衡原理进行测量，属于零示法仪器。当检流计示数为零时，通过已知的比例臂和标准电阻值来计算待测电阻。电路结构上都包含了四个核心的桥臂。

不同点：

(1) **测量对象不同：**惠斯登电桥（单臂电桥）适用于测量中值电阻。当待测电阻过小时，导线和接触电阻（附加电阻）会带来巨大误差。双臂电桥正是为了解决这个问题而设计的，专门用于精确测量低电阻。

(2) **消除附加电阻的方式不同：**双臂电桥通过采用四端法连接待测电阻，并增加了一对辅助的比例臂（R_3, R_4），从电路结构上消除了电流端引线、接触电阻以及电位端之间连接导线带来的误差。而惠斯登电桥无法消除这些附加电阻的影响。

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？

双臂电桥之所以能有效消除附加电阻的影响，主要依靠“四端接法”这一核心设计。它将每个低电阻（待测电阻 R_x 和标准电阻 R_s）的接线端分为“电流端”和“电位端”。

- **电流端**的作用是为 R_x 提供测量所需的工作电流。连接电流端的导线电阻和接触电阻，虽然存在，但只是串联在整个供电回路中，不影响 R_x 两端真实的电势差。
- **电位端**则直接从 R_x 的两个端点引出，用于测量其两端的电压。由于检流计所在支路在电桥平衡时电流为零，因此连接电位端的导线中几乎没有电流流过，也就不会在这些导线上产生额外的电压降。

通过这种方式，所有不可避免的导线电阻和接触电阻都被巧妙地隔离在了电势测量回路之外，从而保证了测量结果仅仅反映了待测电阻本身的阻值，大大提高了低电阻测量的精度。

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？

(1) **引入巨大误差：**接反之后，电桥的比例臂和检流计被接到了电流端上。这意味着，所有原本被四端法排除在外的附加电阻（如导线电阻、接线柱的接触电阻等）现在都被直接串入了测量桥臂中。因为待测电阻本身阻值极低，这些附加电阻的数值可能比它大得多，导致最终测量结果与真实值相差甚远，误差急剧增大。

(2) **破坏了平衡条件：**电流分布变得不均匀，电桥的平衡条件被完全破坏，很难甚至不可能调节到平衡点。

(3) **可能损坏仪器：**电位端通常用较细的引线连接，不是为通过大电流设计的。将主电源接到电位端可能会因电流过大而烧毁内部连线。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制