

交直流电桥的原理及应用

【实验目的】

1. 学习和掌握直流电桥平衡法测量电阻的基本原理和使用方法。
2. 学习和掌握非平衡直流电桥测量电阻的基本原理和使用方法。
3. 了解交流电桥的平衡原理，掌握交流电桥测量电容和电感的方法。
4. 学习用作图法和直线拟合法处理数据。

【预备问题】

1. 电桥电路具有何种基本特征？直流电桥和交流电桥有什么区别？
2. 何为平衡电桥？何为非平衡电桥？
3. 铜电阻和热敏电阻的温度特性是否相同？为什么选用不同的电桥形式测量？
3. 为什么在交流电桥中至少需要两个可调参数？应如何调节才能使电桥趋于平衡？

【实验背景】

电桥是一种在信号测量中得到广泛应用的电路形式，可分为直流电桥和交流电桥两类。直流电桥是一种精密的电阻测量仪器，也常常用于测量引起电阻变化的其它物理量，如温度、压力、形变等。按测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥。平衡电桥是把待测电阻与标准电阻进行比较，通过调节电桥平衡，从而测得待测电阻值，非平衡电桥则是通过测量电桥输出信号（电压、电流、功率等）并进行运算处理，得到待测电阻值。

交流电桥是测量各种交流阻抗的基本仪器，它不仅用于测量电容，电感等交流元件，还可利用交流电桥平衡条件与频率的相关性来测量与电感、电容有关的其它物理量，如磁性材料的磁导率、电容的介质损耗等，用途十分广泛。

【实验原理】

电桥电路是由四个无源元件（电阻、电容或电感）接成四边形形状的电路结构，各边称为电路的桥臂，桥臂的一个对角线连接供电电源，另一对角线连接电桥的输出检测电路。直流电桥的供电电源是直流电压，而交流电桥使用交流电源供电，因此桥臂上的元件可以是电阻、电容或电感。

一、直流电桥

1. 惠斯通电桥

惠斯通电桥是最常用的电桥形式，其电路见图 1 所示。其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 构成电桥的桥臂， A 、 C 两端加直流电压 U_s ， B 、 D 之间有一检流计 PA，当电桥平衡时， B 、 D 两点为等电位，PA 中无电流流过，此时有 $U_{AB} = U_{AD}$ ， $I_1 = I_4$ ， $I_2 = I_3$ ，于是有

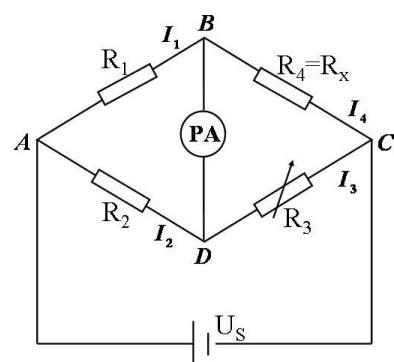


图 1 惠斯通电桥

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

如果 R_4 为待测电阻 R_X , R_3 为标准比较电阻, 则有

$$R_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 = K \cdot R_3 \quad (2)$$

其中 $K = R_1 / R_2$, 称其为比率。根据待测电阻大小, 选择 K 后, 只要调节 R_3 , 使电桥平衡, 检流计为 0, 就可以根据 (2) 式得到待测电阻 R_X 之值。

2. 非平衡电桥

平衡电桥只能测量具有相对稳定状态的电阻值, 对于变化的电阻采用非平衡电桥更加方便。非平衡电桥直接测量电桥输出的电压或电流的变化, 通过必要的运算最终得到电阻值, 不必时时调节电桥平衡。非平衡电桥在传感技术、非电量测量技术以及自动检测技术中具有广泛的应用。

非平衡电桥原理如图 2 所示: B 、 D 之间为一负载电阻 R_g , 只要测量电桥输出 U_g 或 I_g , 就可得到 R_x 值。根据电桥各臂电阻关系可将非平衡电桥分为三类:

- (1) 等臂电桥: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$;
- (2) 输出对称电桥 (卧式电桥): $R_1 = R_4 = R$, $R_2 = R_3 = R'$, 且 $R \neq R'$;
- (3) 电源对称电桥 (立式电桥): $R_1 = R_2 = R'$, $R_3 = R_4 = R$, 且 $R \neq R'$ 。

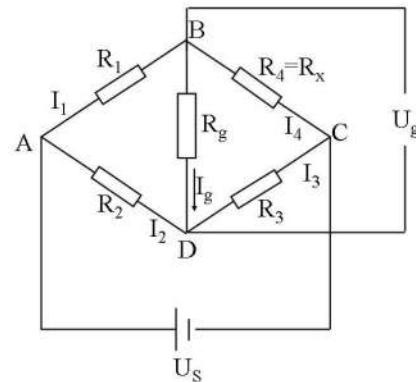


图 2 非平衡电桥

当负载电阻 $R_g \rightarrow \infty$, 即电桥输出处于开路状态时, $I_g = 0$, 仅有电压输出, 在此用 U_0 表示, 电桥的电源电压为 U_s , 通过 R_1 、 R_4 两臂及 R_2 、 R_3 两臂的电流为:

$$I_1 = I_4 = \frac{U_s}{R_1 + R_4}, \quad I_2 = I_3 = \frac{U_s}{R_2 + R_3}, \quad (3)$$

则输出电压 U_0 为

$$U_0 = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot U_s - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_s = \frac{(R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3)}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (4)$$

当满足条件

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (5)$$

时, 电桥输出 $U_0 = 0$, 即电桥处于平衡状态。(5) 式称为电桥的平衡条件。

若 R_1 、 R_2 、 R_3 固定, R_4 为待测电阻, 并且其阻值随某个非电量 x (如温度、压力等) 变化而变化, 即: $R_4 = R(x) = R_{40} + \Delta R(x)$

其中 R_{40} 为电桥处于平衡状态时, 电阻 R_4 的取值。

若 x 发生变化, R_4 随之变化, 导致电桥不再平衡, 此时因电桥不平衡而产生的电压输出为:

$$U_0 = \frac{R_2 \cdot R_{40} + R_2 \cdot \Delta R(x) - R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_{40} + \Delta R(x)) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (6)$$

由电桥平衡条件，应该有 $R_2 \cdot R_{40} = R_1 \cdot R_3$ ，上式可化为：

$$U_0 = \frac{R_2 \cdot \Delta R(x)}{(R_1 + R_{40} + \Delta R(x)) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (7)$$

为简便起见，可根据电阻变化率 $\Delta R(x)$ 大小不同，导出不同情况下的电桥电压输出表达式。先分别讨论如下：

(1) 若电阻变化较小时，即满足 $\Delta R \ll (R_1 + R_{40})$ 时，公式 (7) 分母中的 ΔR 项可略去，此时各种电桥的输出电压公式为：

$$\text{等臂电桥 } (R_1 = R_2 = R_3 = R_{40} = R) \quad U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \quad (8)$$

$$\text{卧式电桥 } (R_1 = R_{40} = R, R_2 = R_3 = R') \quad U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \quad (9)$$

$$\text{立式电桥 } (R_1 = R_2 = R', R_3 = R_{40} = R) \quad U_0 = \frac{R \cdot R'}{(R + R')^2} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot U_s \quad (10)$$

当 $\Delta R(x)$ 较小时，测量得到电压输出与 $\Delta R(x) / R$ 成线性比例关系。测得输出电压后，可通过上述公式运算得 $\Delta R(x) / R$ 或 $\Delta R(x)$ ，从而求得 $R(x) = R + \Delta R(x)$ 。

同时由 (8) ~ (10) 式可知，在 R 、 $\Delta R(x)$ 相同的情况下，等臂电桥、卧式电桥输出电压比立式电桥高，因此灵敏度也高，但立式电桥测量范围大，可以通过选择 R 、 R' 来扩大测量范围， R 、 R' 差距愈大，测量范围也愈大。

(2) 若电阻变化很大，即 $\Delta R \ll (R_1 + R_{40})$ 条件不成立时，上面的近似公式不再适用。此时利用精确公式 (7) 可得各种桥式电桥的输出电压公式：

$$\text{等臂电桥} \quad U_0(x) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R(x)}{R}} \quad (11)$$

$$\text{卧式电桥} \quad U_0(x) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R(x)}{R}} \quad (12)$$

$$\text{立式电桥} \quad U_0(x) = U_s \cdot \frac{RR'}{(R + R')^2} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R(x)}{R + R'}} \quad (13)$$

二、交流电桥

交流电桥的组成与直流电桥相似，如果把直流电桥桥臂上的元件改为电抗元件，并将直流电源和直流平衡示零器改为交流电源和交流平衡示零器（谐振式检流计、耳机、交流毫伏表、示波器等）就可组成交流电桥。

1. 交流电桥的平衡条件

\dot{Z}_1 、 \dot{Z}_2 、 \dot{Z}_3 、 \dot{Z}_4 分别为四个桥臂的复阻抗， G 为交流平衡示零器，如图 3 所示。调节各臂阻抗使电桥达到平衡，即 BD 两点在任意一瞬间电位都相等，由欧姆定律可导出：

$$\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} = \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_4} \quad (14)$$

这就是交流电桥的平衡条件，将式中阻抗用

$$\dot{Z}_j = Z_j e^{i\varphi_j}$$

形式表示，“ Z_j ”和“ φ_j ”分别为复阻抗 \dot{Z}_j 的“模”和“幅角”，则

(14) 式可以表示成：

$$\frac{Z_1}{Z_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = \frac{Z_3}{Z_4} e^{j(\varphi_3 - \varphi_4)} \quad (15)$$

这相当于下列两条件同时成立：

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (16)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4 \quad (17)$$

由此可见，要使交流电桥平衡，除了阻抗大小满足比例关系式 (16) 外，还必须满足相角条件 (17) 式，这是交流电桥与直流电桥在平衡调节中的主要差别。由此也可以想象，交流电桥的平衡调节要复杂得多。

交流电桥各臂阻抗应有合理的配置，才能平衡。由交流电的知识可知：对于纯电容，电压滞后于电流， $\varphi = -\pi/2$ ；对于纯电感，电压超前于电流， $\varphi = \pi/2$ ；对于纯电阻，电压与电流同相位， $\varphi = 0$ 。故可利用电容、电感和电阻 φ 的正负，再根据交流电桥在平衡时必须满足的相位关系 (17) 式来配置四个桥臂的元件。例如当电桥的相邻臂为纯电阻时，则另两臂必须同为电容性或同为电感性或同为纯电阻阻抗，才可能平衡。同理，当电桥的对边臂均为纯电阻时，则另一对边臂的一臂若为电容性阻抗时，另一臂必须为电感性阻抗，这样电桥才能平衡。这是在设计电桥时，必须考虑到的。

2. 实际电容的测量

实际电容器中填充的电介质不是理想的介质，在电路中要损耗一部分能量，故将之看作是一个理想的纯电容 C 和一个损耗电阻 r_C 的串联，复阻抗为 $\dot{Z} = 1/i(\omega C) + r_C$ 。由于损耗存在，复阻抗的幅角 φ 就不再是 $-\pi/2$ ，而是 $\varphi = -\pi/2 + \delta$ ，如图 4 所示， δ 称为电容器的损耗角，它随损耗电阻 r_C 的增大而变大，同时意味电

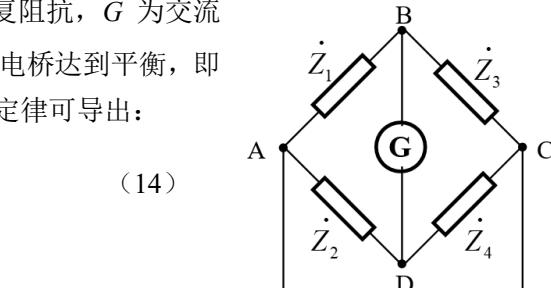


图 3 交流电桥

$$\frac{U_r}{U} = \frac{r_C + j\omega C}{r_C} = 1 + j\omega C r_C \quad (18)$$

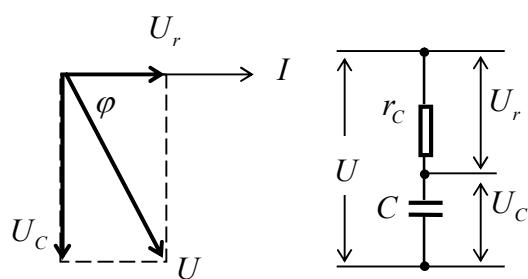


图 4 电容器串联等效电路

容器离纯电容的特性也越远。因此， δ 是衡量电容器质量优劣的重要参数。为了方便，用损耗角的正切来表示，称为损耗（或损耗因子）：

$$\operatorname{tg}\delta = r_C C \omega \quad (18)$$

维恩电桥（如图 5）是一种常用的测量电容的电桥形式，该电桥适合损耗小的电容。 R_a 和 R_b 为纯电阻， C_n 为标准电容器。为了与损耗电阻相平衡，又串联了电阻 R_n ，各臂阻抗为：

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = R_x + \frac{1}{i\omega C_x} \\ \dot{Z}_2 = R_n + \frac{1}{i\omega C_n} \\ \dot{Z}_3 = R_a \\ \dot{Z}_4 = R_b \end{cases} \quad (19)$$

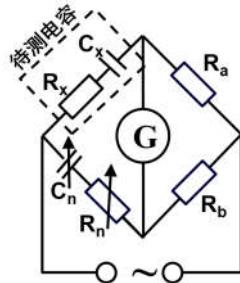


图 5 测量电容的电桥电路

由电桥的平衡条件可得：

$$\begin{cases} C_x = \frac{R_b}{R_a} C_n \\ R_x = \frac{R_a}{R_b} R_n \end{cases} \quad (20)$$

$$\operatorname{tg} \delta = R_x C_x \omega = R_n C_n \omega \quad (21)$$

实验中，可反复调节 C_0 、 R_0 的数值，直到电桥平衡，记下 C_n 、 R_n ，便可由 (20)、(21) 式计算出待测电容值和损耗因子。

3. 实际电感的测量

实际电感器，除了具有电感外，还具有一定的电阻。可以把实际的电感器等效为一个纯电感 L 和一个损耗电阻 r_L 的串联组合。如图 6 所示，于是其复阻抗可以表示为：

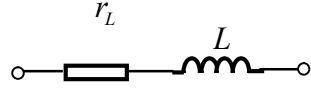


图 6 电感器等效电路

$$\dot{Z}_L = r_L + i\omega L \quad (22)$$

r_L 越小，线圈越接近纯电感。为了衡量电感线圈质量的优劣，用品质因数 Q 来定量描述：

$$Q = \frac{L\omega}{r_L} \quad (23)$$

本实验采用一种测量电感最常用的麦克斯韦电桥进行测量，如图 7 所示，此电桥只适合测量低 Q 值的电感。图中 R_a 、 R_b 、 R_n 为纯电阻， C_n 为标准电容，各臂的阻抗为：

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = R_x + i\omega L_x \\ \dot{Z}_2 = R_b \\ \dot{Z}_3 = R_a \\ \dot{Z}_4 = \frac{R_n}{1 + i\omega C_n R_n} \end{cases} \quad (24)$$

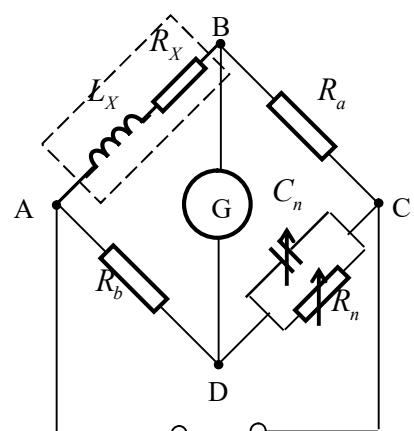


图 7 测量电感的电桥电路

电桥平衡时则有：

$$\begin{cases} L_X = R_a R_b C_n \\ R_X = \frac{R_a R_b}{R_n} \end{cases} \quad (25)$$

被测电感的品质因数 Q 值为：

$$Q = \frac{\omega L_X}{R_X} = \omega C_n R_n \quad (26)$$

其中， R_n 、 C_n 为独立变量，反复调节可以使电桥达到平衡，以获得测量结果。

4. 交流电桥的平衡调节

由于交流电桥的平衡必须同时满足幅、相平衡两个条件，因此，即使在最简单的桥路中也至少要有两个桥臂参数是可调的，并需反复调节，才能逐次接近平衡。不是任选两个参量反复调节就能使电桥达到平衡的，而且所选参数不同，电桥达到平衡的速度也不一样。前一个问题反映电桥是否收敛，后一个问题反映的是电桥收敛性的好坏。需要注意的是：

- (1) 事先应设法知道待测元件的大约数值，根据平衡公式选定电桥各臂的起始值，使电桥初始状态不至于太远离平衡。
- (2) 先固定其中一个参数，调节另一个，使示零器的电流达到最小值，然后再来调节另一个参量而使指示器的电流达到新的最小值。这样反复调节这两个参量，逐次逼近平衡。

【实验仪器】

1. FB306A 型交直流电路电桥综合实验仪

实验仪中包含了交直流电桥电路实验所需的部件，包括：三个独立的电阻箱 (R_a 、 R_b 及 R_n)，标准电容 C_n ，标准电感 L_n ，被测电容 C_x ，被测电感 L_x ，可调直流及交流电源，直流及电压表，频率计，交流指零仪（内附超量程保护）。仪器的正中是菱形接线区。

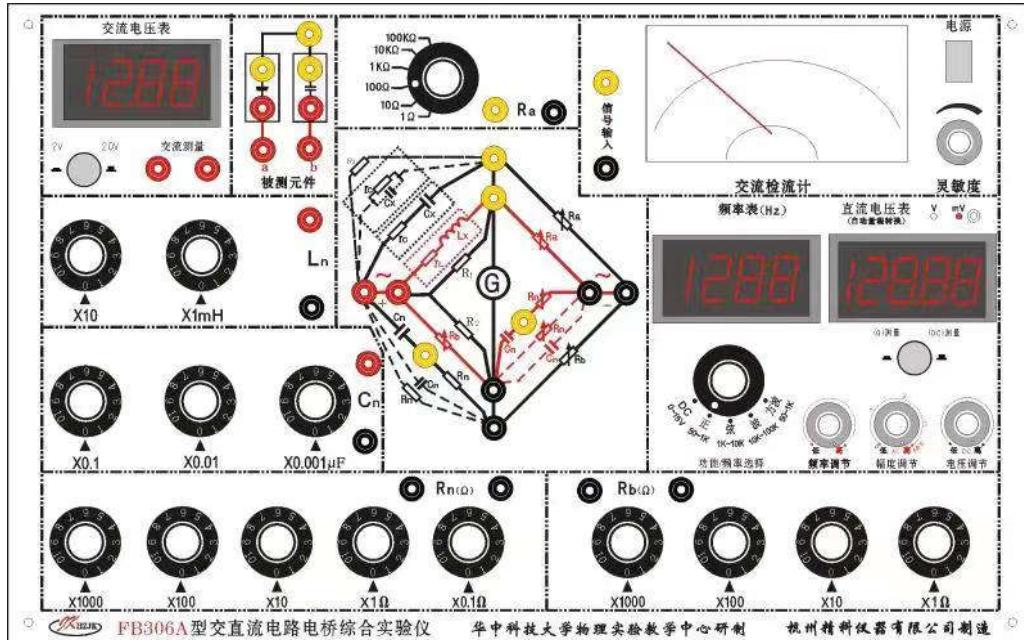


图 8 FB306A 交直流电路电桥综合实验仪面板图

内置交流电阻箱：

R_a ：由 1Ω 、 10Ω 、 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 六个电阻组成，精度 0.2% 。

R_b : 由 $10 \times (1000 + 100 + 10 + 1)\Omega$ 四位电阻箱组成, 精度 0.2%。

R_n : 由 $10 \times (1000 + 100 + 10 + 1 + 0.1)\Omega$ 五位电阻箱组成, 精度 0.2%。

内置标准电容 C_n : 由 $10 \times (0.1 + 0.01 + 0.001)\mu\text{F}$ 三档十进制电容箱组成, 精度 1%。

内置标准电感 L_n : 由 $10 \times (10 + 1)\text{mH}$ 二档十进制电感箱组成, 精度 1%。

2. FQJ/2 型实验加热控温装置

该装置由 FQJ/2 型实验加热控温装置及 FB203 型恒流智能控温实验仪两部分组成。用十芯护套线相连。其结构及连接见下图(在仪器前面配有一块 Cu50 铜电阻和负温度系数热敏电阻传感器接口)。温度控制上限为 110°C, 温度控制精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。



图 9 加热装置及温度控制仪

按“启动”框, 开始提供加热电源, “OUT”灯亮, 屏显的“PV1”为加热炉温度, 当该温度达到控制温度“sv(°C)”时, 自动切断加热电源, 停止加热, “OUT”灯灭, 当低于控制温度, 又提供加热电源, 使温度保持在控制温度, 控制精度 0.1°C。

在启动状态下按“启动”框, 可手动停止加热温度。

温控仪面板上“加热电流”电位器可调节加热功率, 电流越大加热功率越大, 升温越快, 但温度过冲也越严重。

打开温控仪面板中的“风冷控制”可使炉体底部的风扇转动, 使炉体加快降温。加热过程中该开关必须处于关闭状态。

3. 待测电阻

在加热炉内安装了两种型号的温度传感器, 这两种温度传感器均以电阻变化反映温度变化, 作为实验中的待测电阻使用。

(1) Cu50 型铜电阻

这是一种线性电阻, 具有正的温度系数, 其阻值随温度的变化关系为:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (27)$$

R_0 为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的阻值, 为 50Ω , α 为温度系数, 其理论值 $\alpha = 0.004280/\text{°C}$ 。

(2) 热敏电阻

本实验采用 2.7KΩMF51 型半导体热敏电阻。该电阻是由一些过渡金属氧化物在一定的烧结条件下形成的半导体金属氧化物作为基本材料制成，具有 P 型半导体的特性，对于一般半导体材料，电阻率随温度变化主要依赖于载流子浓度，而迁移率随温度的变化相对来说可以忽略。但上述过渡金属氧化物则有所不同，在室温范围内基本上已全部电离，即载流子浓度基本上与温度无关，此时主要考虑迁移率与温度的关系。随着温度升高，迁移率增加，电阻率下降，故这类金属氧化物半导体是一种具有负温度系数的热敏电阻元件，其电阻-温度特性见表 1。根据理论分析，其电阻-温度特性的数学表达式通常可表示为

$$R_t = R_{25} \exp[B_n(1/T - 1/298)] \quad (28)$$

式中， R_{25} ， R_t 分别为 25 °C 和 t °C 时热敏电阻的电阻值； $T = 273 + t$ ； B_n 为材料常数，制作时不同的处理方法其值不同。热敏电阻 R_t 与 t 为指数关系，是一种典型的非线性电阻。

表 1 2.7KΩMF51 型热敏电阻的电阻-温度特性（供参考）

温度 (°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65
电阻 (Ω)	2700	2225	1870	1573	1341	1160	1000	868	748

【实验步骤与要求】

内容 1：平衡电桥法测量室温下的铜热电阻值。

1. 配置电桥电源

实验仪中内置有供电电源并已连接到电桥的电源端，只需将电源设置为直流 3V。

将“频率/功能选择”旋钮置于“DC 0-15V”挡，直流电压表下的按钮处于弹起状态（此时电压表测量的是电桥供电端的电压，调节“电压调节”旋钮，直到直流电压表的示数在 (3.000 ± 0.005) V 范围内。调节完成后，记录电源电压值。

2. 连接电路

将铜热电阻、可调电阻 R_a 、 R_b 、 R_n 用导线连接到实验仪中部的菱形接线区，形成如图 10 所示的电桥电路。

3. 测量铜热电阻

调节旋钮使 $R_a=1k\Omega$ ， $R_b=5000\Omega$ 。

打开加热实验装置电源开关，注意加热旋钮要处于“断”档。记录温度值。

按下直流电压表下的按钮，使其处于按下状态（此时电压表测量的是电桥中间两点的电压差），调节 R_n 直到电压表示数为零，即电桥处于平衡状态。

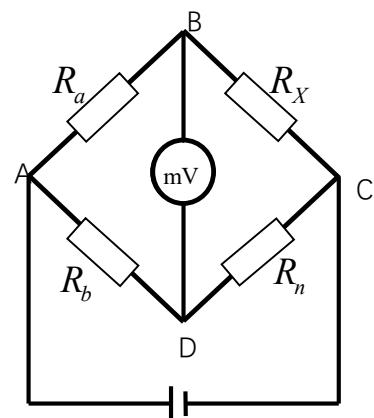


图 10 平衡电桥法电路

内容 2：卧式电桥测量铜电阻随温度变化关系。

1. 电源电压设置与内容 1 相同，修改桥臂电阻的连接方式如图 11 所示。

调节旋钮使 $R_a=1k\Omega$ ， $R_b=1000\Omega$ 。

2. 预调电桥平衡，在室温下调节 R_n 使得电压表示数为尽可能接近零，记录温度、 R_n 及

电压表示数，后续升温过程中 R_n 保持不变。

3. 打开加热开关开始升温，每隔 3℃ 记录一次温度和电压值，共测量 10 组数据。

加热过程中升温速度过快，会使得加热炉内温度不均匀，带来测量误差，应缓慢升温。可将加热电流调整到“0.5A”左右。

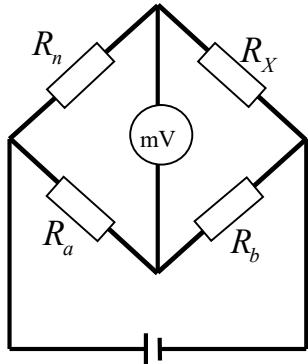


图 11 卧式电桥法电路

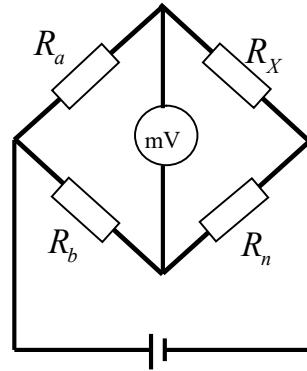


图 12 立式电桥法电路

内容 3：立式电桥测量热敏电阻随温度变化关系（选做）。

1. 电源电压设置与内容 1 相同，修改桥臂电阻的连接方式如图 12 所示。

调节旋钮使 $R_a=100 \Omega$ ， $R_b=100 \Omega$ 。

2. 预调电桥平衡，在室温下调节 R_n 使得电压表示数尽可能接近零，记录温度和 R_n ，后续升温过程中 R_n 保持不变。

3. 打开加热开关开始升温，每隔 3℃ 记录一次温度和电压值，共测量 10 组数据。

热敏电阻的体积很小，其电阻随温度变化的响应速度远大于铜热电阻，因此加热升温速度快对测量误差影响较小，可以稍大的加热电流。

内容 4：交流电桥测量电容。

1. 配置电桥电源为 2V，1kHz

将“频率/功能选择”旋钮置于“正弦波 50-1k”挡，调节“频率调节”旋钮，使得频率表示数在 (1000 ± 5) Hz。用 2 根导线将交流电压表的测量端连接到电桥的电源端，测量电桥的电源电压，调节“幅度调节”旋钮，使得交流电压表示数在 (2.00 ± 0.02) V 范围内。

调节完成后，交流电压表的连接线可拆除，后续交流电源参数一直保持不变。

2. 连接电路

将待测电容 C_x ，可调电阻 R_a 、 R_b 、 R_n ，可调电容 C_n 及交流检流计用导线连接到实验仪中部的菱形接线区，形成如图 5 所示的电桥电路。

将 R_a 调节为 100Ω ， R_b 调节为 120Ω 。

3. 调节电桥平衡

将交流检流计的“灵敏度”旋钮逆时针转动，调节至较低位置。

根据待测电容 C_x 的标称值 $(1 \mu F \pm 20\%)$ ，以及 R_a 、 R_b 的设置值，估算出 C_n 的取值。将 C_n 调节到估算值附近， R_n 可先调整为 0Ω 。交替调节 C_n 、 R_n ，使得交流检流计示数最小。然后逐渐增大交流检流计灵敏度，重复调节，直至灵敏度最大时，检流计示数趋近于零，电桥平衡。记录电桥平衡时的 R_a 、 R_b 、 C_n 、 R_n 取值。

内容 5：交流电桥测量电感。

1. 电桥电源设置与内容 4 相同。将待测电感 L_x ，可调电阻 R_a 、 R_b 、 R_n ，可调电容 C_n 及交流检流计用导线连接到实验仪中部的菱形接线区，形成如图 7 所示的电桥电路。

将 R_a 、 R_b 均调节为 100Ω 。

2. 调节电桥平衡

根据待测电感 L_x 的标称值 ($L_x=5mH \pm 20\%$, R_X 小于 10Ω)，以及 R_a 、 R_b 的设置值，估算出 C_n 、 R_n 的取值。将 C_n 、 R_n 调节到估算值附近。

采用和内容 4 相似的方法，交替调节 C_n 、 R_n ，直至灵敏度最大时，检流计示数趋近于零，电桥平衡。记录电桥平衡时的 R_a 、 R_b 、 C_n 、 R_n 取值。

【数据处理】

1. 根据平衡电桥测量的数据计算出 Cu50 型铜电阻在室温下的电阻值，与理论值比较，求出百分误差。

2. 根据内容 2 数据，计算出 Cu50 型铜电阻不同温度下电阻，做 $R(t) \sim t$ 曲线，用最小二乘法求出温度为 0°C 时的电阻值 R_0 和电阻温度系数 α ，并与理论值比较，求出百分误差。

3. (选做) 根据内容 3 数据，计算出热敏电阻在不同温度下电阻，做 $R(T) \sim T$ 曲线和 $\ln R(T) \sim 1/T$ 曲线，并用最小二乘法拟合曲线，求出材料常数 B_n ，得出经验方程。

4. 计算待测电容 C_x 及损耗电阻 r_c 值，并计算损耗因子 $\tan \delta$ 。

5. 计算待测电感 L_x 及损耗电阻 r_L ，并计算电感的品质因数 Q 。

6. 分析测量过程中哪些因素对测量结果的影响大，尝试提出改进方法。

【注意事项】

1. 加热炉升温温度不可超过 100°C 。升温后不可触碰加热炉内部，防止高温烫伤。

2. 加热装置在加热时，应注意关闭“风冷控制”开关。

4. 实验完毕后，应切断仪器工作电源。

【思考题】

1. 在平衡电桥和非平衡电桥实验中，电源电压的准确度对测量结果的影响相同吗？为什么？

2. 使用交流电桥平衡法测量电容、电感时，通常需要先粗测待测元件的值，以便合理配置各桥臂的初始值。尝试利用本实验的设备设计实验方案，粗测待测电容、电感。

3. 交流电桥的桥臂是否可以任意选择不同性质的阻抗元件组成？应如何选择？

【参考文献】

[1] 任忠明等.大学物理实验(第二册).北京:科学出版社, 2008.

[2] 杨述斌.普通物理实验(二.电磁学部分).北京:高等教育出版社.2000.

[3] 杨俊才.大学物理实验教程.长沙: 国防科技大学出版社.2000.

[4] 吕斯骅.基础物理实验.北京: 北京大学出版社.2002.

附录 A：相量与复阻抗

如图 A1，在一个线性交流负载（包含电阻、电感、电容等元件）两端加上交流电压：

$$\tilde{U} = U \sin(\omega t + \theta_u) \quad (\text{A1})$$

相应的电流响应将是同频率的正弦量：

$$\tilde{I} = I \sin(\omega t + \theta_i) \quad (\text{A2})$$

交流电压、电流是由振幅(或有效值)、频率和初相三要素决定的。在线性电路中，若激励是正弦量，则电路中各支路的电压和电流的稳态响应将是同频率的正弦量。此时若要确定这些电压和电流，只要确定它们的振幅(或有效值)和初相两个量就行了。因此，交流电压、电流可以用复数进行表示，即：复数的模对应它们的有效值(或最大值)，幅角对应初相，这个复数称为相量，以符号 \dot{U} 、 \dot{I} 表示。相量可以记为：

$$\dot{U} = U \angle \theta_u, \quad \dot{I} = I \angle \theta_i \quad (\text{A3})$$

也可以写成复数形式：

$$\dot{U} = U e^{i\theta_u}, \quad \dot{I} = I e^{i\theta_i} \quad (\text{A4})$$

θ_u 、 θ_i 为相应的初相。

定义复阻抗

$$\dot{Z} = \dot{U} / \dot{I} \quad (\text{A5})$$

其模称为阻抗，其幅角称为阻抗角。阻抗与复阻抗的单位均为欧姆。

容易证明，当交流负载元件为阻值为 R 的纯电阻元件时， $\dot{U} = R \dot{I}$ ，因此对于电阻元件：

$$\dot{Z}_R = R \quad (\text{A6})$$

当负载元件为纯电容时，令输入电压 $\tilde{U} = U \sin(\omega t + \theta_u)$ ，相应电流为

$$\tilde{I} = C \frac{d\tilde{U}}{dt} = \omega C U \sin(\omega t + \theta_u + 90^\circ)$$

因此，电容的复阻抗为

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{i\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{-i\pi/2} \quad (\text{A7})$$

其模为 $1/(\omega C)$ ，幅角 $\varphi_R = -\pi/2$ 同样，纯电感元件的复阻抗为：

$$\dot{Z}_L = i\omega L \quad (\text{A8})$$

它的模为 ωL ，幅角 $\varphi_L = \pi/2$ 。

有了复阻抗的定义后， \dot{U} 和 \dot{I} 之间的关系就与直流电阻电路中的电压和电流一样了，同样也可以证明，各节点的 \dot{U} 和 \dot{I} 也符合基尔霍夫定律，因此直流电阻电路中的一些公式（例如电桥平衡方程）可以很方便的直接类比过来。

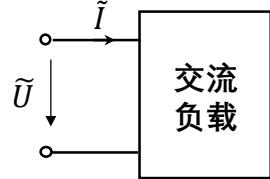


图 A1 交流负载两端的电压与响应电流