

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称：交流电桥

指导教师：王鲲

班级：图灵 2303

姓名：张晋恺

学号：3230102400

实验日期：2024年 12 月 18 日 星期 三 上午

浙江大学物理实验教学中心

一、 实验综述

1.1 实验背景

交流电桥是由电容、电感、电阻等元件组成的桥式电路。它采用了交流电作为电源，是一种常见的比较式仪器，在电子测量中有重要的地位。常见的交流电桥有阻抗比电桥和变压器电桥两大类。本实验中的交流电桥指的是阻抗比电桥。交流电桥和直流电桥有相同的结构样式，但是由于采用了交流电源，所以它的四个桥臂是阻抗。它的平衡条件、线路组成和平衡的实现都比直流电桥复杂。

交流电桥的工作原理是基于交流电的相位和幅值的变化，通过调节桥臂上的元件，使得桥路达到平衡状态，即桥路两端的电压相等。在这种情况下，可以通过已知的阻抗值来测量未知的阻抗值。交流电桥的应用非常广泛，可以用来测量电感、电容和电阻等参数。

在本实验中，我们将使用阻抗比电桥来测量未知电感和电容的值。通过调节电桥的各个桥臂，使得电桥达到平衡状态，然后根据平衡条件计算出未知元件的阻抗值。实验过程中需要注意的是，由于交流电桥对频率敏感，因此需要选择合适的频率进行测量，以保证测量结果的准确性。

此外，交流电桥的测量精度还受到电源稳定性、元件参数的精度以及环境因素的影响。因此，在实验过程中需要尽量减少这些因素的干扰，以提高测量结果的准确性。

1.2 实验原理

我们在正弦稳态条件下讨论交流电桥的基本原理。在交流电桥中，4个桥臂由阻抗元件构成，在电桥的一条对角线中接入检流计，在另一对角线中接入交流电源。

调节桥臂参数，使得检流计中无电流通过时，即两点的电位相等，电桥达到平衡。这样时：

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

这就是交流电桥的平衡条件。它说明，交流电桥达到平衡时，相对的桥臂阻抗的乘积相等。

1.2.1 电容电桥

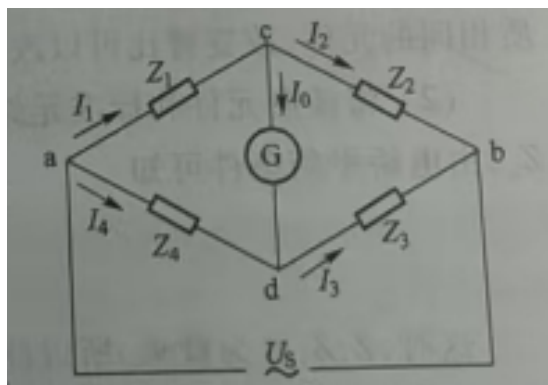


图 1: 交流电桥

电容电桥用于测量电容量和损耗角，由于电容器存在着介质损耗，其可以用两种形式的等效电路来表示，一种是与一个电阻串联，另一种是与一个电路并联。根据损耗因素的大小来选用不同的等效电路。

本次实验中，需要测量损耗因素大的和损耗因素小的电容；分别对应以下两种电桥

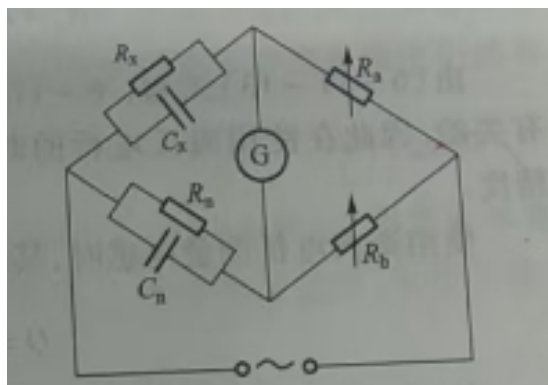


图 2: 并联电容电桥

$$\text{其待测电容为 } C_x = \frac{R_b}{R_a} C_n, \text{ 损耗因素为 } D = \frac{1}{R_n C_n \omega}$$

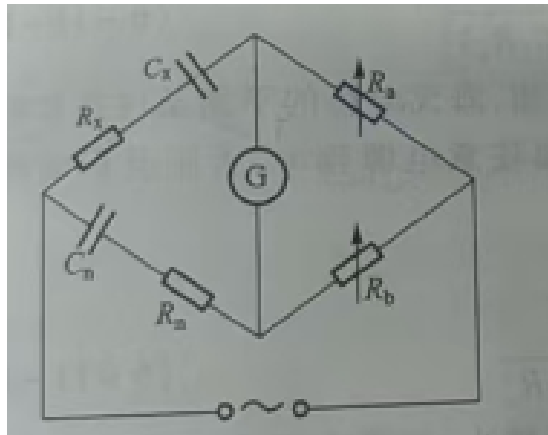


图 3: 串联电容电桥

其待测电容为 $C_x = \frac{R_b}{R_a} C_n$, 损耗因素为 $D = R_n C_n \omega$

1.2.2 电感电桥

电感电桥的测量原理与电容电桥的较为相似, 使用品质因素来选择合适的测量电路。

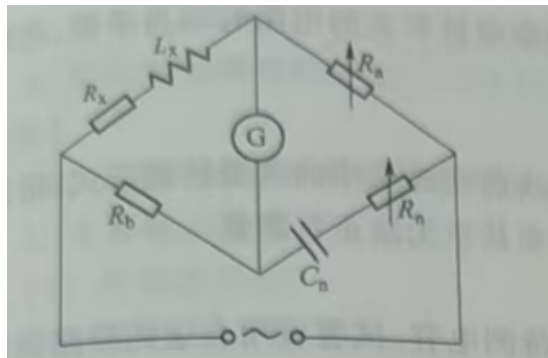


图 4: 海氏电桥

海氏电桥的待测电感为 $L_x = R_a R_b \frac{C_n}{1 + (\omega R_n C_n)^2}$, 品质因素为 $Q = \frac{1}{R_n C_n \omega}$
用于测量品质因素高的电感;

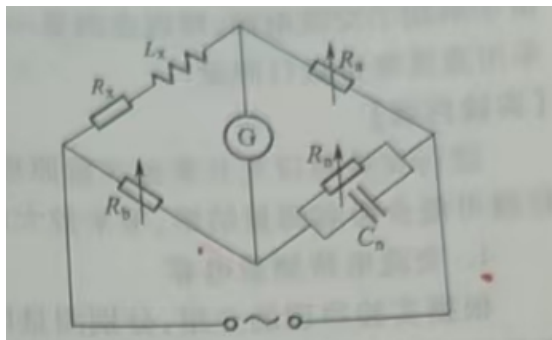


图 5: 麦克斯韦电桥

麦克斯韦电桥的待测电感为 $L_x = R_b R_a C_n$, 品质因素为 $Q = R_n C_n \omega$
用于测量品质因素低的电感;

二、 实验内容

2.1 交流电桥测量电容

- 对于低损耗电容器，其等效电路模型为电容和电阻的串联。
- 对于高损耗电容器，其等效电路模型为电容和电阻的并联。

根据不同的损耗情况，连接好电路并调节平衡后，得到的数据，并利用公式计算出电容的值，计算相对误差，结果如下表所示

电容类型	实际值 (μF)	损耗因素 D	C_n (μF)	R_a (Ω)	R_b (Ω)	R_n (Ω)
高损耗	9.5670	0.10833	1	1000	9759	1581.2
低损耗	0.9952	0.00569	1	10000	9999	1.2

表 1: 交流电桥测量电容结果

使用公式

$$C_x = \frac{R_b}{R_a} C_n$$

1. 低损耗: $C_1 = 0.9999 \mu F$, 相对误差为

$$\varepsilon_1 = \frac{0.9999 - 0.9952}{0.9952} \times 100\% = 0.4\%$$

2. 高损耗: $C_2 = 9.759 \mu F$, 相对误差为

$$\varepsilon_2 = \frac{9.759 - 9.5670}{9.5670} \times 100\% = 2.0\%$$

2.2 交流电桥测量电感

- 对于低 Q 值，使用麦克斯韦电桥测量。
- 对于高 Q 值，使用海氏电桥测量。

数据如下表所示

电感类型	实际值 (mH)	品质因素 Q	C_n (μF)	R_a (Ω)	R_b (Ω)	R_n (Ω)
高 Q 值	4.9738	7.1591	0.001	1000	4998	22311.1
低 Q 值	9.9753	1.1268	1.000	1.000	9829	179.3

表 2: 交流电桥测量电感结果

对于高 Q 值，使用公式

$$L_x = R_a R_b \frac{C_n}{1 + (\omega R_n C_n)^2}$$

带入数据，计算得

$$L_1 = 5.0681mH$$

相对误差为

$$\varepsilon_1 = \frac{5.0681 - 4.9738}{4.9738} \times 100\% = 1.9\%$$

对于低 Q 值，使用公式

$$L_x = \frac{R_b}{R_a} C_n$$

带入数据，计算得

$$L_2 = 9.829mH$$

相对误差为

$$\varepsilon_2 = \frac{9.829 - 9.9753}{9.9753} \times 100\% = 1.5\%$$

2.3 误差分析

在实验过程中，可能存在以下几种误差来源：

1. 仪器误差：测量仪器本身的精度限制会引入误差。例如，电感测量仪器的分辨率和准确度会影响测量结果。
2. 环境因素：实验环境的温度、湿度等因素可能会影响电感和电容的实际值，从而引入误差。
3. 人为误差：在实验操作过程中，读数、记录数据等环节可能会出现人为误差。例如，读数时的视差、记录数据时的笔误等。
4. 电路连接误差：实验中电路连接不良或接触电阻过大可能会引入误差，影响测量结果的准确性。
5. 理论模型的近似：在计算过程中使用的理论公式可能是基于一定的近似条件，这些近似条件在实际实验中可能不完全满足，从而引入误差。

总的来说，本次实验的误差都在可接受范围内，可以认为实验结果是准确的。

三、 实验拓展

3.1 交流电桥的基本特性

交流电桥是一种用于测量电感、电容和电阻等参数的比较式仪器，其基本特性包括：

- **结构与原理**：交流电桥由电容、电感、电阻等元件组成，采用交流电作为电源。其工作原理基于交流电的相位和幅值变化，通过调节桥臂上的元件，使桥路达到平衡状态，即桥路两端的电压相等。
- **平衡条件**：当电桥达到平衡时，相对的桥臂阻抗的乘积相等，满足条件 $Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$ 。
- **应用**：广泛用于测量电感、电容和电阻等参数。适用于不同的测量需求，如测量高损耗或低损耗的电容，或高 Q 值或低 Q 值的电感。
- **测量精度**：交流电桥的测量精度受到电源稳定性、元件参数精度以及环境因素的影响。需要选择合适的频率进行测量，以保证测量结果的准确性。

- **类型：**常见的交流电桥有阻抗比电桥和变压器电桥两大类。本实验中使用的是阻抗比电桥。

3.2 设计一个利用电桥方法测量微小位移的方法

3.2.1 实验原理

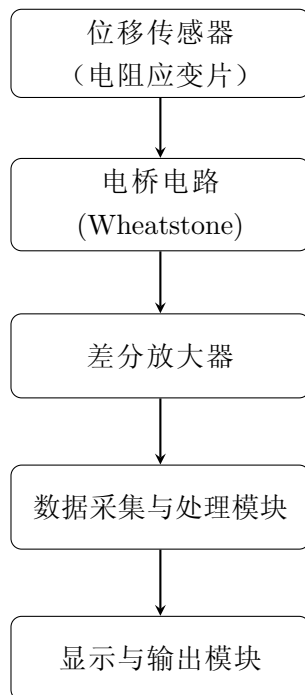
电桥电路利用电阻变化来实现物理量的测量。当电桥四个电阻不对称时，会在电桥的输出端产生电压差。对于微小位移的测量，可以通过将位移传感器（如电阻应变片）嵌入电桥中来实现。位移传感器的电阻会随位移变化而变化，从而导致电桥输出电压的变化，进一步通过精密的放大和数据采集系统进行处理，最终得到位移信息。

惠斯登电桥的基本原理如下：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

其中， R_1, R_2, R_3, R_4 为电桥中的四个电阻。如果电桥未平衡（即电阻发生变化），则输出端的电压不为零。这种不平衡可以通过电桥的输出端（通常是电压差）检测出来。

3.2.2 系统框图



3.2.3 关键组件介绍

- **位移传感器（电阻应变片）**：是利用电阻变化来感知物体应变的传感器。其工作原理是：应变片受力或位移时，材料的电阻发生微小变化。位移量可以通过电阻的变化量来推算。位移应变片与电桥电路相结合，能将微小的位移转换为电阻变化，然后通过电桥电路将这些变化转化为电压信号。
- **惠斯登电桥**：典型的惠斯登电桥由四个电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 组成。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

如果电阻 R_4 发生变化（例如位移传感器的电阻发生变化），则电桥的输出电压不为零。电桥的输出电压 ΔV_{out} 可以表示为：

$$\Delta V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

- **差分放大器**：电桥的输出电压通常很小，因此需要使用差分放大器来放大这一微弱信号。差分放大器能够有效地放大电桥输出端的电压差，同时抑制共模噪声。
- **数据采集与处理模块**：将差分放大器输出的模拟信号转换为数字信号，以便进行进一步的处理。常用的转换器有模拟到数字转换器（ADC）。数字信号经过微控制器或计算机处理后，可以计算出微小位移值，并进行显示或存储。
- **显示与输出模块**：通过显示设备（如 LCD 显示屏）将计算出的位移信息实时显示。数据也可以通过计算机或网络进行传输，用于进一步分析或记录。

3.2.4 实验步骤

1. **系统搭建**：将电阻应变片固定在一个能够产生微小位移的结构上，如弹簧系统或振动系统。将传感器连接到惠斯登电桥的电阻位置，使位移变化能够引起电桥中电阻的变化。
2. **电桥平衡调节**：在没有位移作用下，调整电桥电路，使其处于平衡状态，即输出电压为零。此时，电桥中的所有电阻应满足平衡条件。
3. **位移引入**：引入已知的微小位移，例如通过微调装置，逐步改变位移并观察电桥的输出电压变化。

4. 信号放大与处理：电桥输出端的微小电压变化通过差分放大器进行放大，然后通过数据采集系统（如 ADC）进行数字化处理。
5. 位移计算与显示：根据电桥输出电压与位移之间的关系（通过实验校准得到），计算出实际的位移值。通过显示模块实时显示计算出的位移。
6. 误差分析与校准：由于电阻器的非线性、环境温度变化等因素可能影响测量结果，因此需要进行实验校准，确保输出电压与实际位移之间具有精确的线性关系。

3.2.5 系统精度与灵敏度

- **灵敏度：**电桥的灵敏度决定了其对微小位移的响应能力。选择高精度的电阻器和精密的差分放大器能够提高灵敏度。
- **误差控制：**为避免电阻材料的温度变化或外部噪声的干扰，可以采取以下措施：
 - 使用温度补偿电阻器。
 - 通过增加信号放大器的增益来提高测量精度。
 - 使用高精度的模拟到数字转换器（ADC），确保数字信号的精度。