

### 实验 3-7 交流电桥

#### 前言

交流电桥是一种比较式仪器，在电测技术中占有重要地位。交流电桥不仅具有直流电桥的结构简单、精密和通用特点，而且比直流电桥应用更广泛，不仅可以测量电阻，还可以测量电容、电感、互感、介质损耗和频率等。

#### 【实验目的】

1. 了解交流电桥的结构和平衡条件。
2. 懂得交流电桥测量 C、L、R 等的原理，学会推导测量公式，并学会使用万能电桥。
3. 掌握电桥的最佳测量方法。
4. 能按电桥实际的平衡指示灵敏度的相应测量精度，记录和处理结果量。

#### 【仪器用具】

功率信号发生器，MF-20 晶体管万用表或晶体管毫伏表、交直流电阻箱、标准电容箱和电感器、待测电容电感、万能电桥。

#### 【实验原理】

交流电桥的组合有很多种，比如常见的电容电桥，电感电桥，还有西林电桥，麦克斯韦(Maxwell)电桥，海氏(Hay)电桥，欧文(Owen)电桥，文氏(Wien)电桥，功率电桥等等。交流电桥的结构如图 3-7-1 所示，它和直流电桥在形式上完全相同，两者的不同点有：

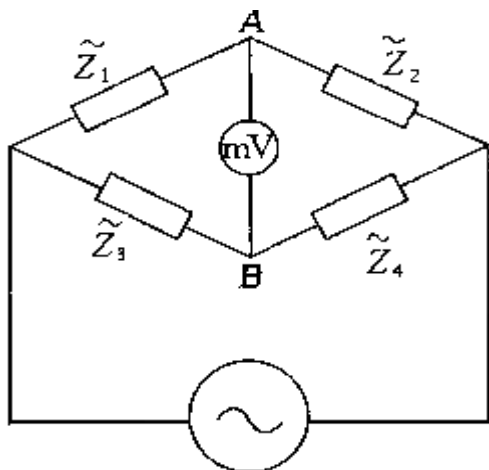


图3-7-1

- (1) 交流电桥的桥臂是阻抗，而直流电桥的是电阻。
- (2) 交流电桥的电源是正弦交流电源，而直流电桥的是直流电源。
- (3) 交流电桥的平衡指示器能够指示微小交流电压，而直流电桥能指示微小的直流电压。

由于交流电桥桥臂上的电压是正弦电压，故它的平衡原理是：

$$\tilde{U}_{AB} = 0$$

平衡条件是：

$$\tilde{Z}_1 \tilde{Z}_4 = \tilde{Z}_2 \tilde{Z}_3 \quad (3-7-1)$$

即电桥两两相对桥臂的复阻抗乘积相等。

由于  $\tilde{Z} = Z e^{j\varphi}$ ，故上式应为

$$Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}$$

欲使此等式两边的复数相等，必须使其模和辐角分别相等，即

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (3-7-2)$$

$$\varphi_1 \varphi_4 = \varphi_2 \varphi_3 \quad (3-7-3)$$

这就是交流电桥的平衡条件。即只有当交流电桥两两相对的桥臂的阻抗之模的乘积相等，且其辐角的和也相等时，该电桥才平衡。

### 一. 简便电桥测电感（或电容）

#### 1. 测量原理

图 3-7-2 是测量电感的一种简便电桥。

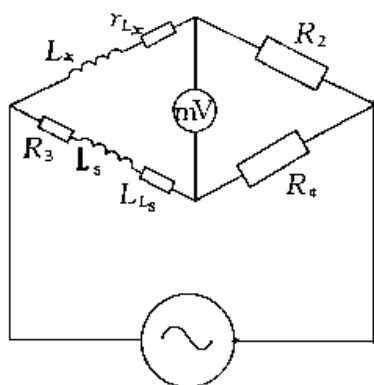


图 3-7-2

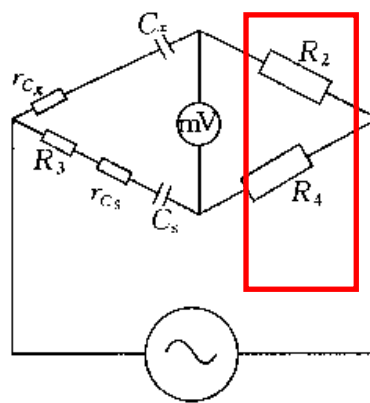


图 3-7-3

其中： $L_x$  是待测电感器， $r_{L_x}$  是它的串联等效损耗电阻。 $L_s$ 、 $r_{L_s}$  是标准电感器的电感量及等效损耗电阻。 $R_3$  是直流电阻箱， $R_2$  和  $R_4$  交流电阻箱。

该电桥的平衡条件由 (3-7-1) 式具体化为

$$(r_{L_x} + j\omega L_x)R_4 = R_2(R_3 + r_{L_s} + j\omega L_s) \quad (3-7-4)$$

展开上式，令其实部和虚部相等，可得简便电桥测电感的电桥平衡条件：

$$\begin{cases} L_x = \frac{R_2}{R_4} L_s & (3-7-5) \\ r_{L_x} = \frac{R_2}{R_4} (R_3 + r_{L_s}) & (3-7-6) \end{cases}$$

采用同样的方法，可推出图 3-7-3 简便电桥测电容的电桥平衡具体公式：

$$(r_{C_x} - j\frac{1}{\omega C_x})R_4 = R_2(R_3 + r_{C_s} - j\frac{1}{\omega C_s}) \quad (3-7-7)$$

由此方程得出简便电桥测电容的平衡条件：

$$\begin{cases} C_x = \frac{R_4}{R_2} C_s & (3-7-9) \end{cases}$$

$$r_{C_x} = \frac{R_2}{R_4}(R_3 + r_{C_s}) \quad (3-7-10)$$

式中： $r_{C_s}$  为标准电容自身的串联等效损耗电阻，由于损耗电阻的存在，使得当交流电流通过电容时，电容两端的电压和流过的电流相位差不是  $\frac{\pi}{2}$ ，而是  $\frac{\pi}{2} - \delta$ ，其中  $\delta$  是待测电容的损耗角。损耗角的正切  $\tan \delta = \omega C_x R_x$  成为损耗，电容的损耗越大，其质量越差。因为损耗电阻值较小，在本实验中忽略不计。

(3-7-9) 和 (3-7-10) 两式既是图 3-7-3 电桥的平衡条件，又是间接测量（计算） $C_x$ 、 $r_{C_x}$  的公式。由此得出测量  $C_x$ 、 $r_{C_x}$  的原理为：调节  $R_2$ 、 $R_4$ 、 $C_s$ 、 $R_3$  的值，使  $U_{AB}$  的值逐渐减小，直至为最小值（理论上  $U_{AB}=0$ ，但实际上由于各种干扰的存在让  $U_{AB}$  小于有个值即可，比如  $\leq 1.5mV$ ）。

## 2. 注意问题

需要指出的是，在交流电桥平衡调节过程中要注意以下几个问题：（1）对供桥电源的选择问题：从上面的平衡调节可以看出，这些平衡条件是只针对一个频率  $\omega$  的情况下推出的。当供桥电源有多个频率成分时，就得不到平衡条件，因此交流电桥对供桥电源要求具有良好的电压波形和频率稳定性。（2）调节参量的选择问题：由于交流电桥的平衡必须同时满足两个条件，因此在桥臂调节参量中至少要有两个是可以调节的，其余参量在电桥调节过程中固定不变（称为固定参量）。实验中如何选择调节参量是关系到电桥能否收敛和收敛快慢的问题。显然两个调节参量不能只出现在一个平衡方程式中，否则另一个平衡方程式永远满足不了；如果调节参量同时出现在两个平衡方程式中，由于调节时对两个平衡条件都有影响，又须反复调节多次才能使两个平衡调节同时做到满足。因此若两个调节参量分别出现在两个平衡方程式中，从理论上讲两次调节电桥就可达到平衡。因此本实验中就选择  $R_3$ 、 $C_s$  作为调节参量。（3）各桥臂参量的初值设置问题：欲使电桥快速平衡，开始应设法估计待测量的数值，并根据平衡条件和测量精度要求，选定固定参量的数值和调节参量的初值，使电桥一开始就接近平衡点。（4）调节顺序的问题：对于两个调节参量，就涉及先调哪一个的问题。由于各桥臂参量对电桥平衡起的作用不同，调节时要分主次，先调节对平衡起主导作用的参量。（5）影响测量误差的参数问题：如各元件之间的互感影响，无感电阻的残余电抗，临近交流电路对电桥的感应作用；泄露电阻以及元件之间、元件与地之间的分布电容等，因此要尽量减小这些干扰因素。

## 3. 电桥的平衡指示灵敏度 S

由实验可知：当电桥调节到某种程度的平衡后，若调整某一桥臂的  $\pm \Delta Z$  值，使  $U_{AB}$  的相应变变量  $\pm \Delta U_{AB}$  能被平衡指示器  $m\tilde{V}$  显示出  $\pm \Delta n$ ，且此  $\pm \Delta n$  刚好能被观测者察觉出，

我们定义出 S 为： $S = \frac{1}{\frac{\Delta Z}{Z}}$

由定义可知：提高 S 值就能提高直接测量量 Z 的精度，因而也就能提高间接测量量的精度。下面给出能增大 S 的四种途径：

- （1）提高  $m\tilde{V}$  的灵敏度，或者说减小  $m\tilde{V}$  的量程；

- (2) 增大电桥的供电电压；
- (3) 四个桥臂的复阻抗彼此相等时，S 出现极大值；
- (4) 尽可能减小 A、B 两点之间的干扰电压值。

## 二、麦克斯韦电桥测电感

下图 3-7-4 所示为麦克斯韦电桥。用以电容为标准测未知电感及其品质因数，或以电感为标准测未知电容的量值。其中  $L_x$  是待测电感器， $r_{L_x}$  是它的串联等效损耗电阻， $C_s$  为标准电容箱，其自身的损耗电阻  $r_{C_s}$  忽略不计。

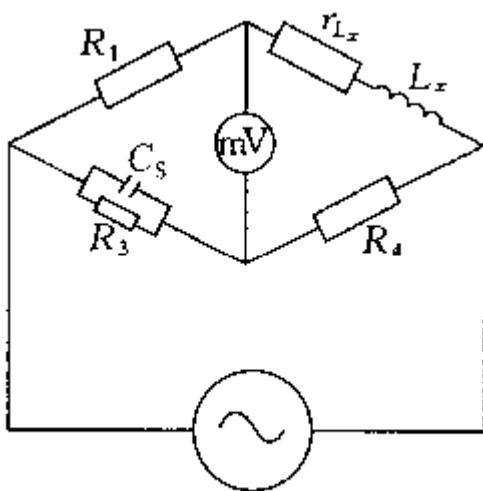


图 3-7-4

该电桥的平衡条件为：

$$R_1 R_4 = (r_{L_x} + j\omega L_x) \left( \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_s} \right)$$

从而解得：

$$\begin{cases} L_x = R_1 R_4 C_s & (3-7-11) \\ r_{L_x} = \frac{R_1 R_4}{R_3} & (3-7-12) \end{cases}$$

在解的过程中要求  $Q^2 = \left( \frac{\omega L_s}{r_{L_x}} \right)^2 \gg 1$

### 【实验内容】

#### 一. 简便电桥测电容 $C_x$

1. 按照图 3-7-3 接好电路图，并设置好各个参量的初始值。
2. 将指零仪放在某一个合适的量程。
3. 设置信号源  $f=1000\text{Hz}$ ，输出电压为  $3.0\text{V}_{\text{RMS}}$ ，并保持恒定。
4. “逐位扫值”地调节  $C_s$  值，使指零仪指示值  $U_{AB}$  逐渐达到极小值；
5. 逐步增大  $R_3$  的值(注意电阻箱接线柱的选取)，使  $U_{AB}$  出现极小值；

6. 反复调节  $C_s$  和  $R_3$ , 使  $U_{AB} < 1.5\text{mV}$ , 此时可以认为电桥处于平衡状态。

## 二. 麦克斯韦电桥测电感 $L_x$

实验步骤仿照简便电桥测电容的方法。

### 【数据处理】

#### 1. 简便电桥测电容 $C_x$

测电容 $C_x$ 及 $r_{C_x}$ $f=1000\text{Hz}$ , $V_{\text{RMS}}=3.0\text{V}$ , $U_{AB} < 1.5\text{mV}$						
$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )	$C_s$ ( $\mu\text{F}$ )	$C_x = R_4 \cdot C_s / R_2$ ( $\mu\text{F}$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$r_{C_x} = R_2(R_3 + r_{C_s})/R_4$ ( $\Omega$ )	$U_{AB}(\text{mV})$
100	100					
100	200					
100	300					

#### 2. 麦克斯韦电桥测电感 $L_x$

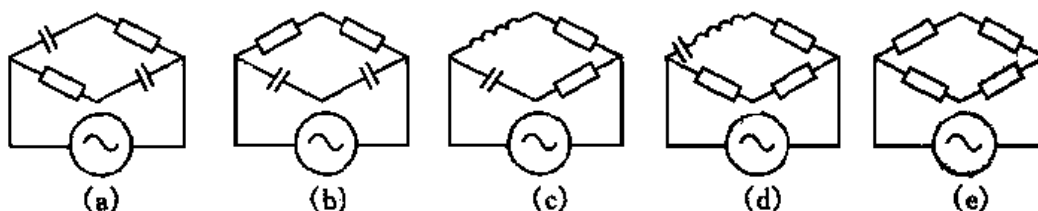
测电感 $L_x$ 及 $r_{L_x}$ $f=1000\text{Hz}$ , $V_{\text{RMS}}=3.0\text{V}$ , $U_{AB} < 1.5\text{mV}$						
$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )	$C_s$ ( $\mu\text{F}$ )	$L_x = R_1 \cdot R_4 \cdot C_s$ (mH)	$R_3$ ( $\Omega$ )	$r_{L_x} = R_1 R_4 / R_3$ ( $\Omega$ )	$U_{AB}(\text{mV})$
400	500					
1000	200					
500	100					

### 【预习思考】

- 交流电桥在平衡原理、所用仪器及测量方法等方面与直流电桥有何异同？
- 在图 3-7-4 测电感中,  $R_3$ 、 $R_4$  应如何选取？过大或过小后果如何？

### 【习题】

- 当电桥平衡时, 若把电源在电路中的位置与平衡指零仪的位置互换, 电桥是否仍旧平衡？计算式是否仍能成立？
- 在图 3-7-5 的几种交流电桥中, 请推导出哪些能调至平衡？(考虑损耗电阻的存在)



3. 在图 3-7-3 中, 若要使  $C_x$  的测量精度提高, 则应\_\_\_\_\_ (提高、降低) 此桥路的平衡指示灵敏度。为此, (1) 应\_\_\_\_\_ (增大、减小) 平衡指零仪的量程; (2) 应适当\_\_\_\_\_ (提高、减小) 供源电压的大小; (3) 应设法安排四桥臂阻抗\_\_\_\_\_ (接近相等、相隔较远) 的最佳平衡桥臂条件。

4. 你能给出下列交流电桥的一个应用---消侧音电路的基本原理吗？

