

交流电桥

交流电桥与直流电桥相似，是一种比较式仪器，也是由四个桥臂组成，在电测量技术中占有重要地位。组成交流电桥桥臂的元件不单是电阻，还可包括电容、电感以及它们的组合。由于交流电桥的桥臂特性变化繁多，比直流电桥有更多的功能，因而使用更广泛。它除了可用来正确测量交流电阻、电感、电容外，还可测量电容器的介质损耗、两线圈间的互感及耦合系数、磁性材料的导磁率及饱和特性，并且当电桥的平衡条件与频率有关时，可用于测量频率，也可测量液体的电导等等。FD-ADB 型交流电桥综合实验仪通过几个常用的交流电桥电路来测量电容、电感、电容器的介质损耗及电感的品质因数等参数，以使学生了解交流电桥的平衡原理，掌握调节交流电桥平衡的方法。交流电桥的线路虽然和直流单电桥线路具有同样的结构形式，但因为它的四个臂是阻抗，所以它的平衡条件、线路的组成以及实现平衡的调整过程都比直流电桥复杂。

【实验目的】

1. 理解交流电桥的平衡原理，学会调节交流电桥平衡的方法；
2. 用交流电桥测量电阻；
3. 用串联电容电桥电路测量电容器的电容值及损耗因数；
4. 用并联电容电桥电路测量电容器的电容值及损耗因数；
5. 用海氏电桥电路测量电感器的电感值及品质因数；
6. 用麦克斯韦电桥电路测量电感器的电感值及品质因数。

【交流电桥的原理】

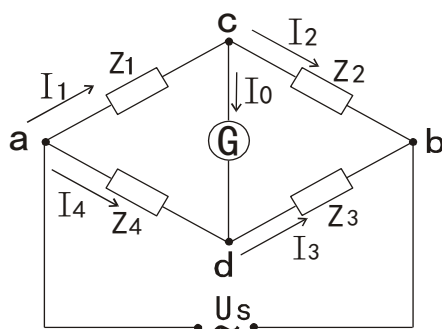


图 1 交流电桥原理

图 1 是交流电桥的原理线路。它与直流单臂电桥原理相似。在交流电桥中，四个桥臂不全是电阻元件组成，还包括电感或电容，桥臂为复阻抗。电桥的电源是交流电源；交流平衡指示仪的种类很多，适用于不同频率范围。频率为 200Hz 以下时可采用谐振式检流计；

音频范围内可采用耳机作为平衡指示器；音频或更高的频率时也可采用电子示零仪器；也有用电子示波器或交流毫伏表作为平衡指示器的。本实验采用高灵敏度的电子放大式指零仪，有足够的灵敏度。指示器指零时，电桥达到平衡。

一、交流电桥的平衡条件

我们在正弦稳态的条件下讨论交流电桥的基本原理。在交流电桥中，四个桥臂由复阻抗元件组成，在电桥的一个对角线 cd 上接入交流指零仪，另一对角线 ab 上接入交流电源。

当调节电桥参数，使交流指零仪中无电流通过时（即 $I_0=0$ ），cd 两点的电位相等，电桥达到平衡，这时有

$$\dot{U}_{ac} = \dot{U}_{ad}$$

$$\dot{U}_{cb} = \dot{U}_{db}$$

即

$$\begin{aligned} I_1 \dot{Z}_1 &= I_4 \dot{Z}_4 \\ I_2 \dot{Z}_2 &= I_3 \dot{Z}_3 \end{aligned}$$

两式相除有

$$\frac{I_1 \dot{Z}_1}{I_2 \dot{Z}_2} = \frac{I_4 \dot{Z}_4}{I_3 \dot{Z}_3}$$

当电桥平衡时， $I_0=0$ ，由此可得

$$I_1=I_2, \quad I_3=I_4$$

所以

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4 \quad (1)$$

上式就是交流电桥的平衡条件，它说明：当交流电桥达到平衡时，相对桥臂的阻抗的乘积相等。

由图 1 可知，若第一桥臂由被测阻抗 Z_x 构成，则

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \dot{Z}_4$$

当其他桥臂的参数已知时，就可决定被测阻抗 Z_x 的值。

电阻 R 的阻抗为： $\dot{Z} = R$ ；电容 C 的容抗为： $\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C}$ ；电感 L 的感抗为： $\dot{Z} = j\omega L$ 。

二、交流电桥平衡的分析

下面我们对电桥的平衡条件作进一步的分析。

在正弦交流情况下，桥臂阻抗可以写成复数的形式

$$\dot{Z} = R + jX = Ze^{j\phi}$$

若将电桥的平衡条件（1）式用复数的指数形式表示，则可得

$$Z_1 e^{j\phi_1} \cdot Z_3 e^{j\phi_3} = Z_2 e^{j\phi_2} \cdot Z_4 e^{j\phi_4}$$

即

$$Z_1 \cdot Z_3 e^{j(\phi_1+\phi_3)} = Z_2 \cdot Z_4 e^{j(\phi_2+\phi_4)}$$

根据复数相等的条件，等式两端的幅模和幅角必须分别相等，故有

$$\begin{cases} Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4 \\ \phi_1 + \phi_3 = \phi_2 + \phi_4 \end{cases} \quad (2)$$

上面就是平衡条件的另一种表现形式，可见交流电桥的平衡必须满足两个条件：一是相对桥臂上阻抗幅模的乘积相等；二是相对桥臂上阻抗幅角之和相等。

由式（2）可以得出如下两点重要结论：

1、交流电桥必须按照一定的方式配置桥臂阻抗

如果用任意不同性质的四个阻抗组成一个电桥，不一定能够调节到平衡，因此必须把电桥各元件的性质按电桥的两个平衡条件作适当配合。

在很多交流电桥中，为了使电桥结构简单和调节方便，通常将交流电桥中的两个桥臂设计为纯电阻。

由式（2）的平衡条件可知，如果相邻两臂接入纯电阻，则另外相邻两臂也必须接入相同性质的阻抗。例如若被测对象 Z_x 在第一桥臂中，两相邻臂 Z_2 和 Z_3 （图 1）为纯电阻的话，即 $\phi_2 = \phi_3 = 0$ ，那么由（2）式可得： $\phi_4 = \phi_x$ ，若被测对象 Z_x 是电容，则它相邻桥臂 Z_4 也必须是电容；若 Z_x 是电感，则 Z_4 也必须是电感。

如果相对桥臂接入纯电阻，则另外相对两桥臂必须为异性阻抗。例如相对桥臂 Z_2 和 Z_4 为纯电阻的话，即 $\phi_2 = \phi_4 = 0$ ，那么由式（2）可知道： $\phi_3 = \phi_x$ ；若被测对象 Z_x 为电容，则它的相对桥臂 Z_3 必须是电感，而如果 Z_x 是电感，则 Z_3 必须是电容。

2、交流电桥平衡必须反复调节两个桥臂的参数

在交流电桥中，为了满足上述两个条件，必须调节两个桥臂的参数，才能使电桥完全达到平衡，而且往往需要对这两个参数进行反复地调节，所以交流电桥的平衡调节要比直流电桥的调节困难一些。

三、交流电桥的常见形式

交流电桥的四个桥臂，要按一定的原则配以不同性质的阻抗，才有可能达到平衡。从理论上讲，满足平衡条件的桥臂类型，可以有多种。但实际上常用的类型并不多，这是因为：

（1）桥臂尽量不采用标准电感，由于制造工艺上的原因，标准电容的准确度要高于标准电感，并且标准电容不易受外磁场的影响。所以常用的交流电桥，不论是测电感和测电容，除了被测臂之外，其它三个臂都采用电容和电阻。

（2）尽量使平衡条件与电源频率无关，这样才能发挥电桥的优点，使被测量只决定于桥臂参数，而不受电源的电压或频率的影响。有些形式的桥路的平衡条件与频率有关，这样，电源的频率不同将直接影响测量的准确性。

（3）电桥在平衡中需要反复调节，才能使幅角关系和幅模关系同时得到满足。通常将电桥趋于平衡的快慢程度称为交流电桥的收敛性。收敛性愈好，电桥趋向平衡愈快；收敛性差，则电桥不易平衡或者说平衡过程时间要很长，需要测量的时间也很长。电桥的收敛性取决于桥臂阻抗的性质以及调节参数的选择。所以收敛性差的电桥，由于平衡比较困难也不常用。

下面将介绍几种常用的交流电桥。

(一)、电容电桥

电容电桥主要用来测量电容器的电容量及损耗角，为了弄清电容电桥的工作情况，首先对被测电容的等效电路进行分析，然后介绍电容电桥的典型线路。

1、被测电容的等效电路

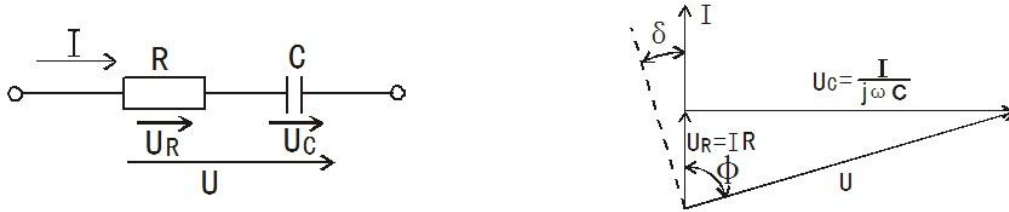


图 2 (a) 有损耗电容器的串联等效电路图

(b) 矢量图

实际电容器并非理想元件，它存在着介质损耗，所以通过电容器 C 的电流和它两端的电压的相位差并不是 90° ，而且比 90° 要小一个 δ 角就称为介质损耗角。具有损耗的电容可以用两种形式的等效电路表示，一种是理想电容和一个电阻相串联的等效电路，如图 2 (a) 所示；一种是理想电容与一个电阻相并联的等效电路，如图 3 (a) 所示。在等效电路中，理想电容表示实际电容器的等效电容，而串联（或并联）等效电阻则表示实际电容器的发热损耗。

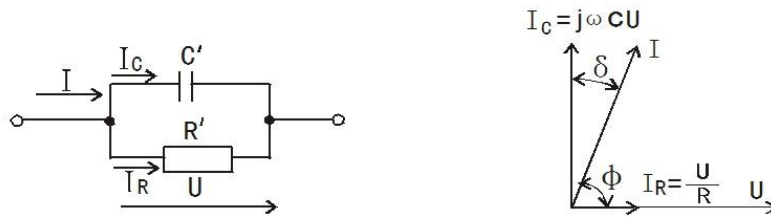


图 3 (a) 有损耗电容器的并联等效电路

(b) 矢量图

图 2 (b) 及图 3 (b) 分别画出了相应电压、电流的相量图。必须注意，串联等效电路中的 C 和 R 与并联等效电路中的 C' 、 R' 是不相等的。在一般情况下，当电容器介质损耗不大时，应当有 $C \approx C'$ ， $R \leq R'$ 。所以，如果用 R 或 R' 来表示实际电容器的损耗时，还必须说明它对于哪一种等效电路而言。因此为了表示方便起见，通常用电容器的损耗角 δ 的正切 $\tan \delta$ 来表示它的介质损耗特性，并用符号 D 表示，通常称它为损耗因数，在等效串联电路中

$$D = \tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I R}{\frac{I}{\omega C}} = \omega C R$$

在等效的并联电路中

$$D = \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R'}{\omega C' U} = \frac{1}{\omega C' R'}$$

应当指出，在图 2 (b) 和图 3 (b) 中， $\delta = 90^\circ - \varphi$ 对两种等效电路都是适合的，所以不管用哪种等效电路，求出的损耗因数是一致的。

2、测量损耗小的电容电桥（串联电阻式）

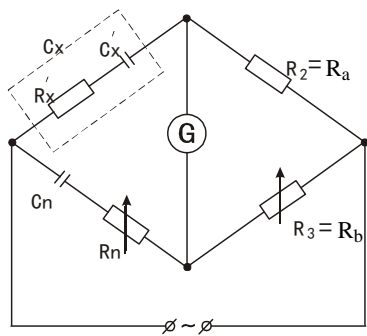


图 4 串联电阻式电容电桥

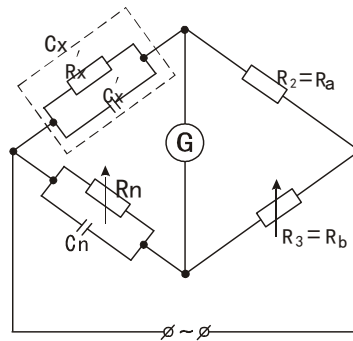


图 5 并联电阻式电容电桥

图 4 为适合用来测量损耗小的被测电容的电容电桥，被测电容 C_x 接到电桥的第一臂，等效为电容 C_x' 和串联电阻 R_x' ，其中 R_x' 表示它的损耗；与被测电容相比较的标准电容 C_n 接入相邻的第四臂，同时与 C_n 串联一个可变电阻 R_n ，桥的另外两臂为纯电阻 R_b 及 R_a ，当电桥调到平衡时，有

$$(R_x' + \frac{1}{j\omega C_x'})R_b = (R_n + \frac{1}{j\omega C_n})R_a$$

令上式实数部分和虚数部分分别相等

$$\begin{cases} R_x'R_b = R_aR_n \\ \frac{R_b}{C_x'} = \frac{R_a}{C_n} \end{cases}$$

最后得到

$$\begin{cases} R_x' = \frac{R_aR_n}{R_b} & (3) \\ C_x' = \frac{R_bC_n}{R_a} & (4) \end{cases}$$

由此可知，要使电桥达到平衡，必须同时满足上面两个条件，因此至少调节两个参数。如果改变 R_n 和 C_n ，便可以单独调节互不影响地使电容电桥达到平衡。通常标准电容都是做成固定的，因此 C_n 不能连续可变，这时我们可以调节 R_b/R_a 比值使式 (4) 得到满足，但调节 R_b/R_a 的比值时又影响到式 (3) 的平衡。因此要使电桥同时满足两个平衡条件，必须对 R_n 和 R_b/R_a 等参数反复调节才能实现，因此使用交流电桥时，必须通过实际操作取得经验，才能迅速获得电桥的平衡。电桥达到平衡后， C_x' 和 R_x' 值可以分别按式 (3) 和式 (4) 计算，其被测电容的损耗因数 D 为

$$D = \text{tg} \delta = \omega C_x' R_x' = \omega C_n R_n \quad (5)$$

3、测量损耗大的电容电桥（并联电阻式）

假如被测电容的损耗大, 则用上述电桥测量时, 与标准电容相串联的电阻 R_n 必须很大, 这将会降低电桥的灵敏度。因此当被测电容的损耗大时, 宜采用图 5 所示的另一种电容电桥的线路来进行测量, 它的特点是标准电容 C_n 与电阻 R_x 是彼此并联的, 则根据电桥的平衡条件可以写成

$$R_a \left(\frac{1}{\frac{1}{R_n} + j\omega C_n} \right) = R_b \left(\frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x'} \right)$$

整理后可得

$$\begin{cases} C_x' = C_n \frac{R_b}{R_a} & (6) \\ R_x' = R_n \frac{R_a}{R_b} & (7) \end{cases}$$

而损耗因数为

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_x' R_x'} = \frac{1}{\omega C_n R_n} \quad (8)$$

交流电桥测量电容根据需要还有一些其他形式, 可参见有关的书籍。

(二)、电感电桥

电感电桥是用来测量电感的, 电感电桥有多种线路, 通常采用标准电容作为与被测电感相比较的标准元件, 从前面的分析可知, 这时标准电容一定要安置在与被测电感相对的桥臂中。根据实际的需要, 也可采用标准电感作为标准元件, 这时标准电感一定要安置在与被测电感相邻的桥臂中, 这里不再作为重点介绍。

一般实际的电感线圈都不是纯电感, 除了感抗 $X_L = \omega L$ 外, 还有有效电阻 R , 两者之比称为电感线圈的品质因数 Q 。即

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

下面介绍两种电感电桥电路, 它们分别适宜于测量高 Q 值和低 Q 值的电感元件。

1、测量高 Q 值电感的电感电桥

测量高 Q 值的电感电桥的原理线路如图 6 所示, 该电桥线路又称为海氏电桥。

电桥平衡时, 根据平衡条件可得

$$(R_x + j\omega L_x) \left(R_n + \frac{1}{j\omega C_n} \right) = R_a R_b$$

简化和整理后可得

$$\begin{cases} L_x = \frac{R_b R_a C_n}{1 + (\omega C_n R_n)^2} & (9) \\ R_x = \frac{R_b R_a R_n (\omega C_n)^2}{1 + (\omega C_n R_n)^2} \end{cases}$$

由式 (9) 可知, 海氏电桥的平衡条件是与频率有关的。因此在应用成品电桥时, 若改用外接电源供电, 必须注意要使电源的频率与该电桥说明书上规定的电源频率相符, 而且电

源波形必须是正弦波，否则，谐波频率就会影响测量的精度。

用海氏电桥测量时，其 Q 值为

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega C_n R_n} \quad (10)$$

由式 (10) 可知，被测电感 Q 值越小，则要求标准电容 C_n 的值越大，但一般标准电容的容量都不能做得太大，此外，若被测电感的 Q 值过小，则海氏电桥的标准电容的桥臂中所串的 R_n 也必须很大，但当电桥中某个桥臂阻抗数值过大时，将会影响电桥的灵敏度，可见海氏电桥线路是宜于测 Q 值较大的电感参数的，而在测量 $Q < 10$ 的电感元件的参数时则需用另一种电桥线路，下面介绍这种适用于测量低 Q 值电感的电桥线路。

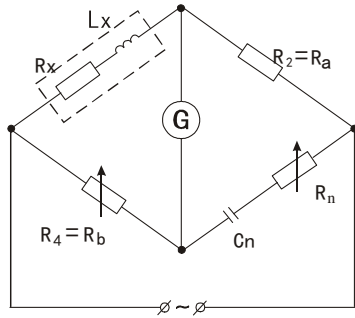


图 6 测量高 Q 值电感的电桥原理

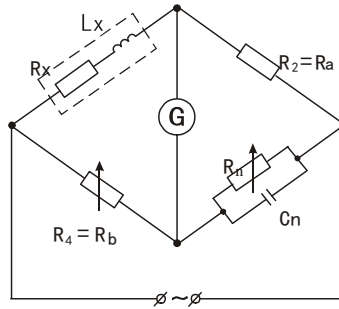


图 7 测量低 Q 值电感的电桥原理

2、测量低 Q 值电感的电感电桥

测量低 Q 值电感的电桥原理线路如图 7 所示。该电桥线路又称为麦克斯韦电桥。

这种电桥与上面介绍的测量高 Q 值电感的电桥线路所不同的是：标准电容的桥臂中的 C_n 和可变电阻 R_n 是并联的。

在电桥平衡时，有

$$(R_x + j\omega L_x) \left(\frac{1}{\frac{1}{R_n} + j\omega C_n} \right) = R_a R_b$$

简化和整理后为：

$$\begin{cases} L_x = R_a R_b C_n \\ R_x = \frac{R_a}{R_n} R_b \end{cases} \quad (11)$$

被测对象的品质因数 Q 为

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_n C_n \quad (12)$$

麦克斯韦电桥的平衡条件式 (11) 表明，它的平衡是与频率无关的，即在电源为任何频率或非正弦的情况下，电桥都能平衡，所以该电桥的应用范围较广。但是实际上，由于电桥内各元件间的相互影响，所以交流电桥的测量频率对测量精度仍有一定的影响。

(三)、电阻电桥

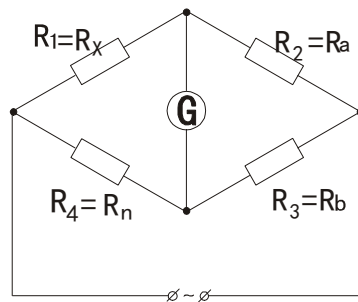


图 8 交流电桥测量电阻

测量电阻时采用惠斯登电桥，见图 8。可见桥路形式与直流单臂电桥相同，只是这里用交流电源和交流指零仪作为测量信号。

当检流计 G 平衡时，G 无电流流过，cd 两点为等电位，则：

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4$$

下式成立： $I_1 R_1 = I_4 R_4$

$$I_2 R_2 = I_3 R_3$$

于是有

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

所以

$$R_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot R_2$$

$$\text{即 } R_x = \frac{R_n}{R_b} R_a$$

【实验仪器】

FD-ADB-A 型交流电路综合实验仪，主要由交流电源、交流电压表、电阻箱、实验板及直插电阻、电容、电感等器件组成。

【实验内容】

实验前应充分掌握实验原理，接线前应明确桥路的形式，错误的桥路可能会有较大的测量误差，甚至无法测量。

由于采用模块化的设计，所以实验的连线较多。注意接线的正确性，这样可以缩短实验时间；文明使用仪器，正确使用专用连接线，不要拽拉引线部位，这样可以提高仪器的使用寿命。

按照各种交流电桥电路在实验九孔板上连接各元件，主机提供交流电源与交流电压表， R_a 使用固定阻值的电阻（仪器提供三个固定阻值的电阻，其阻值分别约为 $10\Omega, 100\Omega, 1000\Omega$ ，本实验采用 100Ω ）， R_b 和 R_n 使用电阻箱，标准电容 C_n 使用 104 电容（容值约为 100nF ），仪器还提供了三个不同的电容和三个不同的电感作为待测元件。（各元件的阻值、感值、容值均已经在插件的外壳上给出参考值，如需要更精确的测量结果，可用欧姆表、电容表和电

感表自行测量)。

在确认电路连接无误后,打开主机电源使其输出交流信号。先用两个电阻箱配合主机上交流电压表的“2V”档位进行粗调,然后再使用“200mV”以及“20mV”进行细调,直至交流电压表的电压示值为最小,记录各个元件参数,按公式进行计算,并可与参考值进行比较。

1、交流电桥测量电阻

用交流电桥测量不同类型和阻值的电阻,并与其他直流电桥的测量结果相比较。

2、交流电桥测量电容

根据前面实验原理的介绍,分别测量两个 C_x 电容,其中的一个为低损耗的电容,另一个为有一定损耗的电容。试用合适的桥路测量电容的电容量及其损耗电阻,并计算损耗。

3、交流电桥测量电感

根据前面实验原理的介绍分别测量两个 L_x 电感,其中的一个为低 Q 值的空心电感,另一个为有较高 Q 值的铁心电感。试用合适的桥路测量电感的电感量及其损耗电阻,并计算电感的 Q 值。

4、其他桥路实验

交流电桥还有其他多种形式,有兴趣的同学可以自己进行实验,仪器的配置可以支持完成这些实验。

附加说明:在电桥的平衡过程中,有时检流计示数不能完全回到零位,这对于交流电桥是完全可能的,一般来说有以下原因:

(1)、测量电阻时,被测电阻的分布电容或电感太大。

(2)、测量电容和电感时,损耗平衡 (R_n) 的调节细度受到限制,尤其是低 Q 值的电感或高损耗的电容测量时更为明显。另外,电感线圈极易感应外界的干扰,也会影响电桥的平衡,这时可以试着变换电感的位置来减小这种影响。

(3)、用不合适的桥路形式测量,也可能使指针不能完全回到零位。

(4)、由于桥臂元件并非理想的电抗元件,所以选择的测量量程不当,以及被测元件的电抗值太小或太大,也会造成电桥难以平衡。

(5)、在保证精度的情况下,灵敏度不要调的太高,灵敏度太高也会引入一定的干扰。

【思考题】

- 1、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?
- 2、为什么在交流电桥中至少需要选择两个可调参数?怎样调节才能使电桥趋于平衡?
- 3、交流电桥对使用的电源有何要求?交流电源对测量结果有无影响?