

交流电路的特性研究

(FB11 型 RLC 相量实验仪)

实 验 讲 义

杭州精科仪器有限公司

实验一、RLC 电路特性的研究

电容、电感元件在交流电路中的阻抗是随着电源频率的改变而变化的。将正弦交流电压加到电阻、电容和电感组成的电路中时，各元件上的电压及相位会随着变化，这称作电路的稳态特性；将一个阶跃电压加到 RLC 元件组成的电路中时，电路的状态会由一个平衡态转变到另一个平衡态，各元件上的电压会出现有规律的变化，这称为电路的暂态特性。

【实验目的】

1. 观测 RC 和 RL 串联电路的幅频特性和相频特性
2. 了解 RLC 串联、并联电路的相频特性和幅频特性
3. 观察和研究 RLC 电路的串联谐振和并联谐振现象
4. 观察 RC 和 RL 电路的暂态过程，理解时间常数 τ 的意义
5. 观察 RLC 串联电路的暂态过程及其阻尼振荡规律
6. 了解和熟悉半波整流和桥式整流电路以及 RC 低通滤波电路的特性

【实验仪器】

1. FB11 型 RLC 相量实验仪
2. 双踪示波器（用户自备）
3. 电阻箱、电容箱、电感箱等（用户自备）

【实验原理】

一. RC 串联电路的稳态特性

1. RC 串联电路的频率特性

在图 1 所示电路中，电阻 R 、电容 C 的电压有以下关系式：

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}, \quad U_R = I \cdot R, \quad U_C = \frac{I}{\omega \cdot C}, \quad \phi = -\arctan \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}$$

其中 ω 为交流电源的角频率， U 为交流电源的电压有效值， ϕ 为电流和电源电压的相位差，它与角频率 ω 的关系见图 2：

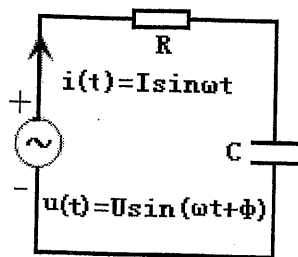


图 1 RC 串联电路

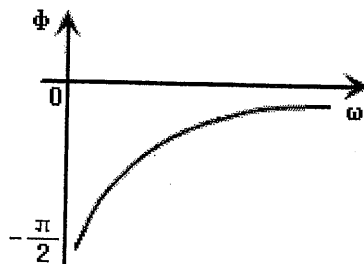


图 2 RC 串联电路的相频特性

可见当 ω 增加时， I 和 U_R 增加，而 U_C 减小。当 ω 很小时 $\phi \rightarrow -\frac{\pi}{2}$ ， ω 很大时 $\phi \rightarrow 0$ 。

2. RC 低通滤波电路：如图 3 所示，其中 U_i 为输入电压， U_o 为输出电压，则有：

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$

它是一个复数，其模为： $\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}$

设 $\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C}$ ，则由上式可知：

$\omega = 0$ 时， $\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 1$ ， $\omega = \omega_0$ 时， $\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ ， $\omega \rightarrow \infty$ 时， $\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 0$

可见 $\left| \frac{U_o}{U_i} \right|$ 随 ω 的变化而变化，并且当 $\omega < \omega_0$ 时， $\left| \frac{U_o}{U_i} \right|$ 变化较小， $\omega > \omega_0$ 时， $\left| \frac{U_o}{U_i} \right|$

明显下降。这就是低通滤波器的工作原理，它使较低频率的信号容易通过，而阻止较高频率的信号通过。

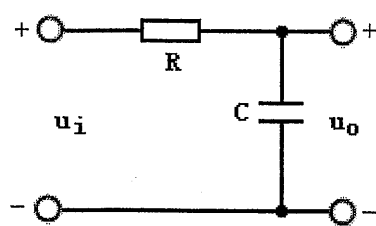


图3 RC低通滤波器

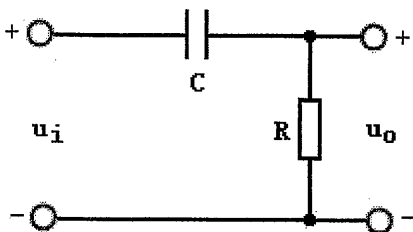


图4 RC高通滤波器

3. RC 高通滤波电路：

RC 高通滤波电路的原理图见图 4，根据图 4 分析可知有：

$$\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \right)^2}}$$

同样令 $\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C}$ ，则：

$$\omega = 0 \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707, \quad \omega = \omega_0 \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 0, \quad \omega \rightarrow \infty \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 1$$

可见该电路的特性与低通滤波电路相反，它对低频信号的衰减较大，而高频信号容易通过，衰减很小，通常称作高通滤波电路。

二. RL 串联电路的稳态特性:

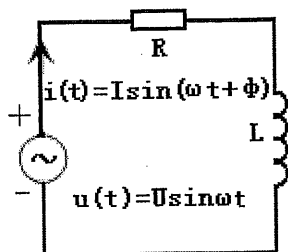


图5 RL 串联电路

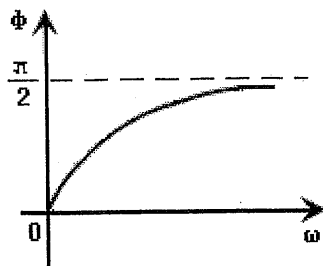


图6 RL 串联电路的相频特性

RL 串联电路如图 5 所示

可见电路中 I 、 U 、 U_R 、 U_L 有以下关系:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}, \quad U_R = I \cdot R, \quad U_L = I \cdot \omega \cdot L, \quad \phi = \arctan \frac{\omega \cdot L}{R}$$

可见 RL 电路的幅频特性与 RC 电路相反，增加时， I 、 U_R 减小 U_L 则增大。它的相频特性见图 6。由图 6 可知， ω 很小时 $\phi \rightarrow 0$ ， ω 很大时 $\phi \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 。

三. RLC 电路的稳态特性:

在电路中如果同时存在电感和电容元件，那么在一定条件下会产生某种特殊状态，能量会在电容和电感元件中产生交换，我们称之为谐振现象。

1. RLC 串联电路:

在如图 7 所示电路中，电路的总阻抗 $|Z|$ ，电压 U 、 U_R 、和 i 之间有以下关系:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}, \quad \phi = \arctan \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}$$

$$i = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}}$$

其中 ω 为角频率，可见以上参数均与 ω 有关，它们与频率的关系称为频响特性，见图 8。

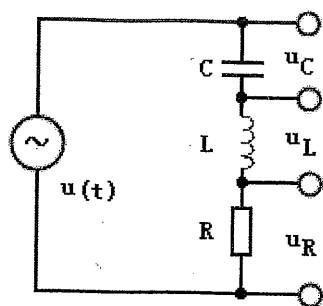


图7 RLC串联电路

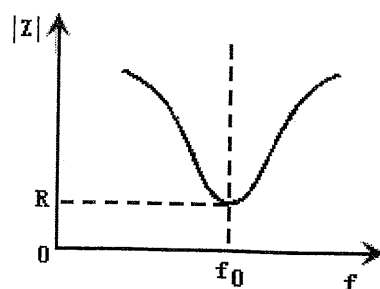


图8 (a) RLC串联电路的阻抗特性

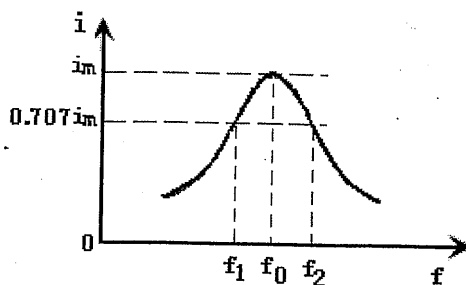


图8 (b) RLC串联电路的幅频特性

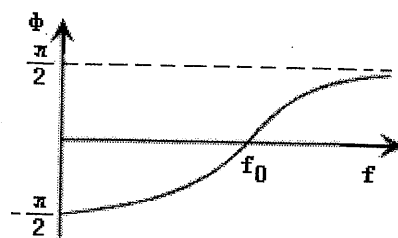


图8 (c) RLC串联电路的相频特性

由图8可知，在频率 f_0 处阻抗 Z 值最小，且整个电路呈纯电阻性，而电流 i 达到最大值，我们称 f_0 为RLC串联电路的谐振频率(ω_0 为谐振角频率)。从图8还可知，在 $f_1 \sim f_0 \sim f_2$ 的频率范围内 i 值较大，我们称为通频带。

下面我们推导出 f_0 (ω_0)和另一个重要的参数---品质因数 Q 。

$$|Z| = R, \quad \phi = 0, \quad i_m = \frac{U}{R}$$

$$\text{当 } \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \text{ 时, 可知}$$

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\text{这时的电感上的电压: } U_L = i_m \cdot |Z_L| = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} \cdot U$$

$$\text{电容上的电压: } U_C = i_m \cdot |Z_C| = \frac{1}{R \cdot \omega_0 \cdot C} \cdot U$$

U_C 或 U_L 与 U 的比值称为品质因数 Q 。可以证明：

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{R \cdot \omega_0 \cdot C}, \quad \Delta f = \frac{f_0}{Q}, \quad Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

2. RLC 并联电路：在图 9 所示的电路中有：

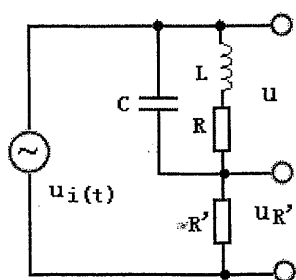


图9 RLC 并联电路

$$|Z| = \sqrt{\frac{R^2 + (\omega \cdot L)^2}{(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C)^2 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L - \omega \cdot C \cdot (R^2 + (\omega \cdot L)^2)}{R}\right)$$

可以求得并联谐振角频率：

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}$$

可见并联谐振频率与串联谐振频率不相等(当 Q 值很大时才近似相等)。

图 10 给出了 RLC 并联电路的阻抗、相位差和电压随频率的变化关系。

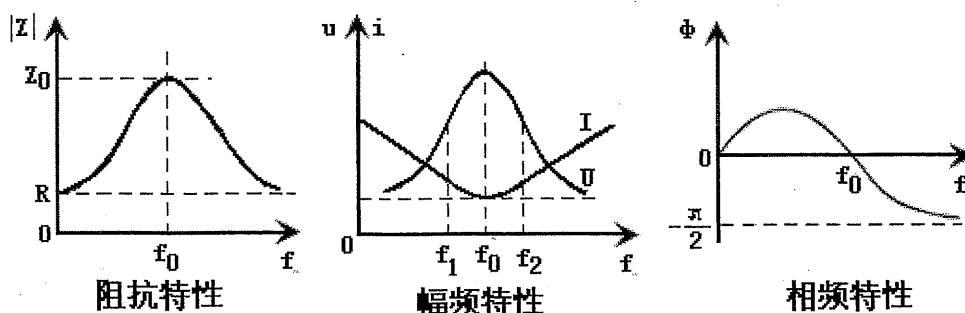


图10 RLC 并联电路的阻抗特性、幅频特性和相频特性

与 RLC 串联电路类似，品质因数 $Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{R \cdot \omega_0 \cdot C}$ 。

由以上分析可知 RLC 串联、并联电路对交流信号具有选频特性，在谐振频率点附近，有较大的信号输出，其它频率的信号被衰减。这在通信领域，高频电路中得到了非常广泛的应用。

四. RC 串联电路的暂态特性：

电压值从一个值跳变到另一个值称为阶跃电压：

在图11所示电路中当开关 K 合向“1”时，设 C 中初始电荷为 0，则电源 E 通过电阻 R 对 C 充电，充电完成后，把 K 打向“2”，电容通过电阻 R 放电，

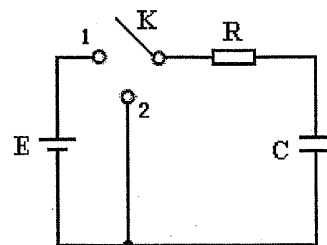


图11 RC 串联电路的暂态特性

其充电方程为: $\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot U_c = \frac{E}{R \cdot C}$

放电方程为: $\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot U_c = 0$

可求得充电过程时: $U_c = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}})$

$U_R = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$

放电过程时: $U_c = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$

$U_R = -E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$

由上述公式可知 U_c 、 U_R 和 i 均按指数规律变化。令 $\tau = R \cdot C$ ， τ 称为 RC 电路的时间常数。 τ 值越大，则 U_c 变化越慢，即电容的充电或放电越慢。图 12 给出了不同 τ 值的 U_c 变化情况，其中 $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ 。

五. RL 串联电路的暂态过程:

在图 13 所示的 RL 串联电路中，当 K 打向“1”时，电感中的电流不能突变，L 打向

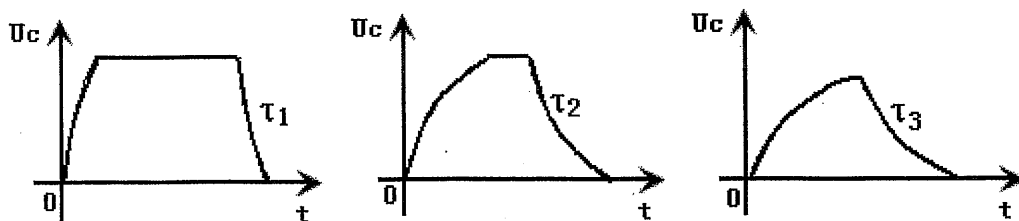


图12 不同 τ 值时，电容电压 U_c 变化的示意图

“2”时，电流也不能突变为 0，这两个过程中的电流均有相应的变化过程。类似 RC 串联电路，电路的电流、电压方程为

电流增长过程: $\begin{cases} U_L = E \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \\ U_R = E \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}) \end{cases}$

电流消失过程: $\begin{cases} U_L = -E \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \\ U_R = E \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \end{cases}$

其中电路的时间常数： $\tau = \frac{L}{R}$

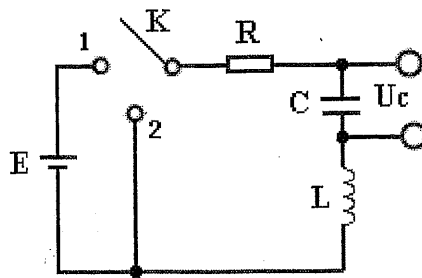
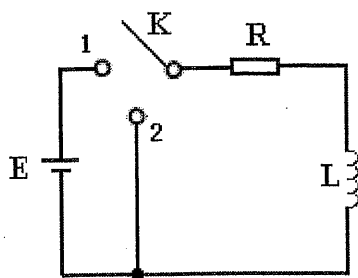


图13 RL串联电路的暂态特性 图14 RLC 串联电路的暂态特性

六. RLC 串联电路的暂态过程:

在图 14 所示的电路中, 先将 K 打向“1”, 待稳定后再将 K 打向“2”, 这称为 RLC 串联电路的放电过程, 这的电路方程为:

$$LC \cdot \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \cdot \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0, \text{ 初始条件为 } t=0, U_c = E, \frac{dU_c}{dt} = 0,$$

这样方程的解一般按 R 值的大小可分为三种情况:

$$1. R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 时, 为欠阻尼 } U_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{C}{4L} \cdot R^2}} \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{其中 } \tau = \frac{2L}{R}, \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{C}{4L} \cdot R^2}$$

$$2. R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 时, 过阻尼 } U_c = \frac{1}{\sqrt{\frac{C}{4L} \cdot R^2 - 1}} \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \text{sh}(\omega t + \phi)$$

$$\text{其中 } \tau = \frac{2L}{R}, \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{C}{4L} \cdot R^2 - 1}$$

$$3. R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 时为临界阻尼, } U_c = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

图 15 为这三种情况下的 U_c 变化曲线, 其中 1 为欠阻尼, 2 为过阻尼, 3 为临界阻尼。

如果当 $R \ll 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 则曲线 1 的振幅衰减很慢, 能量的损耗较小。能够在 L 与 C

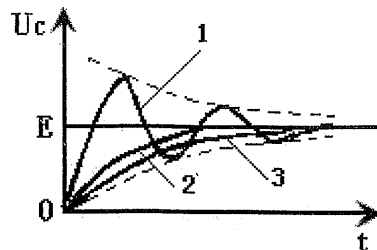
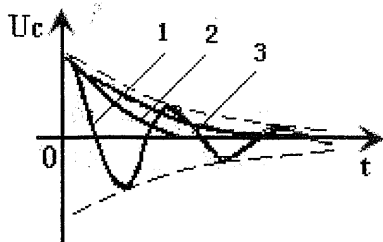


图15 放电时的 U_C 曲线示意图 图16 充电时的 U_C 曲线示意图

之间不断交换，可近似为 LC 电路的自由振荡，这时 $\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \omega_0$ ， ω_0 为 $R = 0$

时 LC 回路的固有频率。

对于充电过程，与放电过程相类似，只是初始条件和最后平衡的位置不同。

图 16 给出了充电时不同阻尼的 U_C 变化曲线图。

【实验内容】

对 RC、RL、RLC 电路的稳态特性的观测采用正弦波。对 RLC 电路的暂态特性观测可采用直流电源和方波信号，用方波作为测试信号可用普通示波器方便地进行观测；以直流信号作实验时，需要用数字存储式示波器才能得到较好的观测。

FB11 型 RLC 相量实验仪的使用及性能参见附录，示波器的使用参照厂家的说明书或实验老师的指导。注意：仪器采用开放式设计，使用时要正确接线，不要使功率信号源短路，以防损坏。

一. RC 串联电路的稳态特性：

1. RC 串联电路的幅频特性：

选择正弦波信号，保持其输出幅度不变，分别用示波器测量不同频率时的 U_R 、 U_C ，可取 $C = 0.1\mu\text{F}$ ， $R = 1\text{k}\Omega$ ，也可根据实际情况自选， R 、 C 参数。

用双通道示波器观测时可用一个通道监测信号源电压，另一个通道分别测 U_R 、 U_C ，但需注意两通道的接地点应位于线路的同一点，否则会引起部分电路短路。

2. RC 串联电路的相频特性：

将信号源电压 U 和 U_R 分别接至示波器的两个通道，可取 $C = 0.1\mu\text{F}$ ， $R = 1\text{k}\Omega$ （也可自选）。从低到高调节信号源频率，观察示波器上两个波形的相位变化情况，先可用李萨如图形法观测，并记录不同频率时的相位差。

二. RL 串联电路的稳态特性：

测量 RL 串联电路的幅频特性和相频特性与 RC 串连电路时方法类似，可选 $L = 10\text{mH}$ ， $R = 1\text{k}\Omega$ ，也可自行确定。

三. RLC 串联电路的稳态特性：

自选合适的 L 值、 C 值和 R 值，用示波器的两个通道测信号源电压 U 和电阻电压 U_R ，必须注意两通道的公共线是相通的，接入电路中应在同一点上，否则会造成短路。

300Hz 650 mV 3374 4024
500Hz 1062 3312 4874

1. 幅频特性:

保持信号源电压 U 不变 (可取 $U_{pp} = 2 \sim 4V$), 根据所选的 L 、 C 值, 估算谐振频率, 以选择合适的正弦波频率范围。从低到高调节频率, 当 U_R 的电压为最大时的频率即为谐振频率, 记录下不同频率时的 U_R 大小。

2. 相频特性:

用示波器的双通道观测 U 的相位差, U_R 的相位与电路中电流的相位相同, 观测在不同频率下的相位变化, 记录下某一频率时对应的相位差数值。

四 RLC 并联电路的稳态特性:

按图9进行连线, 注意此时 R 为电感的内阻, 随不同的电感取值而不同, 它的值可在相应的电感值下用直流电阻表测量, 选取 $L = 10mH$ 、 $C = 0.1\mu F$ 、 $R' = 10k\Omega$ 。也可自行设计选定。注意 R' 的取值不能过小, 否则会由于电路中的总电流变化大而影响 U_R' 的大小。

1. RLC 并联电路的幅频特性:

保持信号源的 U 值幅度不变 (可取 $U_{pp} = 2 \sim 5V$), 测量 U 和 U_R' 的变化情况。注意示波器的公共端接线, 不应造成电路短路

2. RLC 并联电路的相频特性:

用示波器的两个通道, 测 U 与 U_R' 的相位变化情况。自行确定电路参数。

五. RC 串联电路的暂态特性:

如果选择信号源为直流电压, 观察单次充电过程要用存储式示波器。我们选择方波作为信号源进行实验, 以便用普通示波器进行观测。由于采用了功率信号输出, 故应防止短路。

1. 选择合适的 R 和 C 值, 根据时间常数 τ , 选择合适的方波频率, 一般要求方波的周期 $T > 10\tau$, 这样能较完整地反映暂态过程, 并且选用合适的示波器扫描速度, 以完整地显示暂态过程。

2. 改变 R 值或 C 值, 观测 U_R 或 U_C 的变化规律, 记录下不同 RC 值时的波形情况, 并分别测量时间常数 τ

3. 改变方波频率, 观察波形的变化情况, 分析相同的 τ 值在不同频率时的波形变化情况。

六. RL 电路的暂态过程:

选取合适的 L 与 R 值, 注意 R 的取值不能过小, 因为 L 存在内阻。如果波形有失真、自激现象, 则应重新调整 L 值与 R 值进行实验, 方法与 RC 串联电路的暂态特性实验类似。

七. RLC 串联电路的暂态特性:

1. 先选择合适的 L 、 C 值, 根据选定参数, 调节 R 值大小。观察三种阻尼振荡的波形。如果欠阻尼时振荡的周期数较少, 则应重新调整 L 、 C 值。

2. 用示波器测量欠阻尼时的振荡周期 T 和时间常数 τ 。 τ 值反映了振荡幅度的衰减速度, 从最大幅度衰减到 0.368 倍的最大幅度处的时间即为 τ 值。

【数据处理】

1. 根据测量结果作 RC 串联电路的幅频特性和相频特性图。
2. 根据测量结果作 RL 串联电路的幅频特性和相频特性图。
3. 分析 RC 低通滤波电路和 RC 高通滤波电路的频率特性。
4. 根据测量结果作 RLC 串联电路、RLC 并联电路的幅频特性和相频特性。并计算电路的 Q 值。
5. 根据不同的 R 值、C 值和 L，分别作出 RC 电路和 RL 电路的暂态响应曲线有何区别。
6. 根据不同的 R 值作出 RLC 串联电路的暂态响应曲线，分析 R 值大小对充放电的影响。
7. 根据示波器的波形作出半波整流和桥式整流的输出电压波形，并讨论滤波电容数值大小的影响。

实验二、用比较法和相量图研究 RLC 电路

【实验目的】

1. 学习交流比较法，初步了解相量方圆图；
2. 测量未知电容和电感；
3. 为交流电桥实验作基础。

【实验仪器】

1. FB11 型相量实验仪；
2. 十进电阻箱、电容箱、电感箱及待测样品（用户自备）

【实验原理】

相位空间中用矢量表示简谐量，这种矢量我们把它叫做相量。其表达方式是在物理量符号字母上方加小圆点（例如电压相量 \dot{U} ）。相应的不加小圆点的物理量符号则称为该相量的模（物理量的数值）。这里我们用相量的方、圆图来研究 RLC 电路。从而把较复杂的 RLC 电路的数学模型化解为初等几何问题。交流比较法与直流比较法相似，它是以一定的方式（例如串联），使某一待测元件的参数与标准元件参数一致，再根据其他相应测得参数（例如电压 U ）的比例，求出待测样品参数（如 R 值）。

1. 测量电容：

如图 1 (a) 所示，将待测电容 C_X 与已知电阻 R_0 串联，信号源 E 为正弦波，频率 f_0 调到 1kHz。测出电源电压 U_0 ， R_0 两端的电压 U_R ，电容 C_X 两端的电压 U_C ，回路电流 I_0 ，将测量数据逐一记录到表格中。根据实验数据，作相量图图 1 (b) 和阻抗图图 1 (c)，再根据图 1 (b)、图 1 (c) 中的几何关系，计算出待测电容的数值。

(1) 作图步骤:

先作圆图; 如图 1 (b), 信号源 \dot{U}_0 是全图的基准相量。将测量值 \dot{U}_0 乘以适当比例 K 作为长度, 作水平(相角等于零)有向线段 AB , 以 AB 为直径作半圆, AB 即代表相量

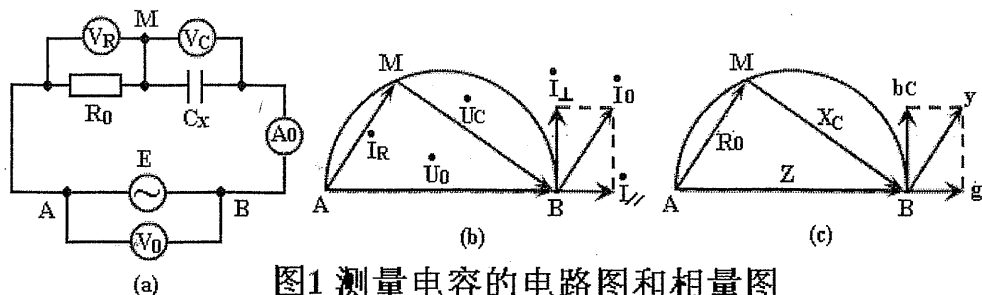


图1 测量电容的电路图和相量图

\dot{U}_0 。

① 以 A 点为圆心, 以电阻上的电压 \dot{U}_R (乘以 K) 为半径作弧, 以 B 点为圆心, 以电容上的电压 \dot{U}_C (乘以 K) 为半径作弧, 两弧线交于 M 点, M 点近似在半圆上 (由于待测电容器的漏电阻极大, 故 \dot{U}_C 与 \dot{U}_R 弧线近似正交; 半圆上的圆周角恒为直角)。

② 连接 AM, MB , 则 AM 表示电压相量 \dot{U}_R , MB 表示电压相量 \dot{U}_C ;

$\angle AMB = \pi/2$ (RC 串联电路中电压 \dot{U}_R 和 \dot{U}_C 正交)。从图 1 (b) 圆图中可得,

电压相量关系: $\dot{U}_0 = \dot{U}_R + \dot{U}_C$ (RC 串联电路总电压等于各部分电压的矢量和); 根据相

同原理得到阻抗圆图 1 (c), 它给出了阻抗关系式: $Z^2 = R_0^2 + X_c^2$ 。

③ 接着作方图: 在图 1 (b) 中, 从 B 点出发, 沿着与 AM 平行的方向 (电阻上的电流与电压同相位), 以回路电流 I_0 为长度, 作电流相量 \dot{I}_0 ;

④ 从 B 点出发, 沿着水平方向和垂直方向分别作 \dot{I}_0 的水平分量 $\dot{I}_{//}$, \dot{I}_{\perp} 。其中 $\dot{I}_{//}$ 分量方向平行于 \dot{U}_0 , 是有功电流; \dot{I}_{\perp} 分量超前 \dot{U}_0 方向 90° , 是容性无功电流。从该电流方图得出电流相量关系: $\dot{I}_0 = \dot{I}_{//} + \dot{I}_{\perp}$ 。与电流方图相似, 从图 1 (c) 方图中, 得到导纳关系: $y^2 = g^2 + bc^2$ 。

(2) 计算待测电容的步骤:

从图 1 (b)、图 1 (c) 可知: $X_c / R_0 = U_C / U_R$ (1)

$$\therefore X_c = \frac{1}{\omega C_x} = \frac{1}{(2\pi f C_x)}, \quad (2)$$

$$\therefore C_x = \frac{U_R}{(2\pi f R_0 U_C)} \quad (3)$$

2. 测量电感:

将待测线圈与已知电阻 R_0 串联如图 2 (a), 读取信号源频率 f_0 , 电压 U_0 , 线圈两端的

电压 U_L , R_0 两端的电压 U_R , 以及回路电流 I_0 , 将数据记录到表格中。根据实验数据, 按适当比例作相量图 2 (b)、图 2 (c), 再按图中的几何关系计算待测电感。

(1) 作图步骤如下:

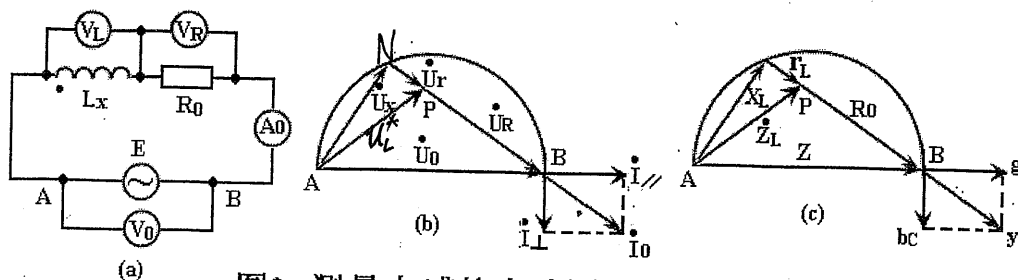


图2 测量电感的电路图和相量图

① 先作圆图; 如图 2 (b) 所示, 信号源 \dot{U}_0 仍然是全图的基准相量。以 \dot{U}_0 乘以适当比例 K 作为长度, 作水平有向线段 AB 。

② 以 AB 为直径作半圆;

③ 以 A 点为圆心, 以电感线圈上的电压 \dot{U}_L^* (乘以 K) 为半径作弧, 以 B 点为圆心, 以电阻上的电压 \dot{U}_R (乘以 K) 为半径作弧, 两弧线交于 P 点, P 点一般不在半圆上, P 点一般落在半圆内 (由于电感线圈的直流电阻 r_L 和铁心折算电阻 R_L^* 不可忽略);

④ 连接 AP , PB ; 延长 BP 与半圆交于 N 点, 连接 AN 。那么直角边 AN 代表“纯电感 L_x ”上的电压相量 \dot{U}_L ; NP 代表线圈“纯电阻 r_L ”上的电压相量 \dot{U}_r , NP 与 BP 共同组成另一直角边。在实际线圈中, 电感 L_x 和导线电阻 r_L 是沿着导线均匀分布的, 相量图把他们集中起来表达, 以便直观地给出关系式: $\angle ANB = \pi/2$ (RL 串联电路中 L 和 R 上的电压相量正交),

⑤ $\dot{U}_L^* = \dot{U}_L + \dot{U}_r$, $\dot{U}_0 = \dot{U}_L + \dot{U}_r + \dot{U}_R$ (RL 串联电路总电压等于各部分电压的矢量和); 阻抗圆图图 2 (c), 与电压圆相似, 阻抗关系式如下: $Z^2 = X_L^2 + (r_L + R_0)^2$, 其中 $X_L^2 + r_L^2 = Z_L^{*2}$ 。

⑥ 再做方图: 在图 2 (b) 中, 从 B 点出发, 沿着 NB 的方向 (依据电阻上的电流与电压同相位), 以回路电流 I_0 为长度, 作电流相量 \dot{I}_0 ;

⑦ 从 B 点出发, 沿着水平方向和垂直方向分别作 \dot{I}_0 的水平分量 \dot{I}_\parallel , \dot{I}_\perp 。其中: \dot{I}_\parallel 分量方向平行于 \dot{U}_0 , 是有功电流; \dot{I}_\perp 分量滞后 \dot{U}_0 方向 90° , 是感性无功电流。这样, 电流方图就完成了。从该电流方图得出电流相量关系: $\dot{I}_0 = \dot{I}_\parallel + \dot{I}_\perp$ 。与电流方图相似, 从图 1 (c) 方图中, 得到导纳关系式: $y^2 = g^2 + b_L^2$ 。

(2) 计算待测电感及其纯阻的步骤如下:

根据图 2 (b)、图 2 (c): $U_L^2 + U_r^2 = U_L^{*2}$ (4)

$$U_L^2 + (U_r + U_R)^2 = U_0^2 \quad (5)$$

$$U_r = (U_0^2 - U_L^{*2} - U_R^2) / (2U_R) \quad (6)$$

由式 (4)、(6) 求出 U_L ；

从图 2 (b)、图 2 (c) 可知： $X_L : r_L : R_0 = U_L : U_r : U_R$ (7)

$$X_L = \omega L_X = 2\pi f L_X \quad (8)$$

【实验步骤】

1. 先测量 RC 串联电路，按实验内容将各元器件连接到实验仪面板上（实验平台）；
2. 把信号源输出电压调节旋钮逆时针旋到底，使输出电压接近零；
3. 闭合电源开关，观察电路有否出现异常现象，若一切正常，则预热十分钟，可开始实验测量。
4. 将输出信号调节到正弦波，频率调到 $f_0 = 1\text{kHz}$ （由面板上数字频率计读取）；
5. 将输出信号电压调节到 $U_{P-P} = 3\text{V}$ ；
6. 将数字电压表先后连接对待测电容和电阻箱 R_0 两端，测量并记录电压 U_C 和 U_R ，调节串联的电阻箱 R_0 ，使 $U_C \approx U_R$ （此时为最佳测量条件）。
7. 多次测量并将测量结果逐一记录到表格 1 中。
8. RL 串联电路测量步骤相似，不赘述。

【数据记录】

表 1 测量电容数据 $f_0 = 1008 \text{ Hz}$, $R_0 = 1000 \Omega$

测量次数	$U_R(\text{V})$	$U_C(\text{V})$	$U_0(\text{V})$	$I_0(\text{mA})$	$C_X(\mu\text{F})$
1	1.80	1.24	1.55	0.254	
2					
3					
4					
5					
6					
平均值					
标准偏差					

表 2 测量电感容数据 $f_0 = \text{ } \text{Hz}$, $R_0 = \text{ } \Omega$

测量次数	U_L^*	$U_R(\text{V})$	$U_0(\text{V})$	$I_0(\text{mA})$	$L_X(\text{mH})$	$r_L(\Omega)$
1						
2						
3						
4						

5						
6						
平均值						
标准偏差						

【数据处理】

1. 计算未知电容:

数学模型: $C_X = \frac{U_R}{(2\pi f R_0 U_C)} = \dots = \dots \mu F$

传播律: $u_{C_r}(C_X) = \left[u_r^2(U_R) + u_r^2(\omega) + u_r^2(R_0) + u_r^2(U_C) \right] = \dots = \dots \%$

标准偏差: $u_C(C_X) = C_X + u_{C_r}(C_X) = \dots = \dots \mu F$

扩展不确定度: $U = 2 \times u_C(C_X) = \dots = \dots \mu F$

测量结果: $C_X = (C_X \pm U) = (\dots \pm \dots) = \dots \pm \dots \mu F$

2. 计算未知电感及其纯电阻方法同上:

【思考题】

1. 如果待测电容的漏电阻 r_C 不是 ∞ , 那么作相量图时会有什么困难?

* 实验三、交流电桥的原理和应用

交流电桥是一种比较式仪器, 在电子测量技术中占有重要地位。它主要用于测量交流等效电阻及其时间常数; 电容及其介质损耗; 自感及其线圈品质因数和互感等电气参数的精密测量, 也可用于非电量变换为相应电量参数的精密测量。

常用的交流电桥分为阻抗比电桥和变压器电桥两大类。习惯上一般称阻抗比电桥为交流电桥。本实验中交流电桥指的是阻抗比电桥。交流电桥的线路虽然和直流单臂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, 四个桥臂一般是由阻抗元件如电阻、电感、电容组成; 电桥的电源通常是正弦交流电源; 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指零仪器; 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。本实验

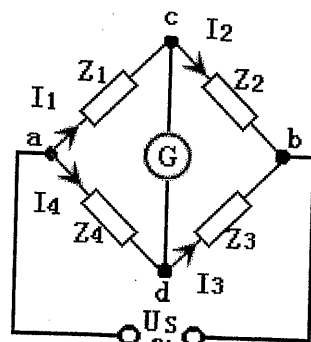


图1 交流电桥的原理图

常采用频率1000Hz,100Hz 交流电源供电。

一. 交流电桥的平衡条件:

如图 1 所示,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:

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

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,若第四桥臂 \dot{Z}_4 由被测阻抗 \dot{Z}_x 构成,则

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2} \cdot \dot{Z}_1 \quad (2)$$

当其他桥臂的参数已知时,就可决定被测阻抗 \dot{Z}_x 的值。

二. 交流电桥平衡的分析:

在正弦交流情况下,桥臂阻抗可以写成复数的形式:

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

若将电桥的平衡条件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:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4, \phi_1 + \phi_3 = \phi_2 + \phi_4 \quad (3)$$

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(3)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,有可能无法调节到平衡,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。一般在实验测量时,常常采用标准电抗元件来平衡被测量元件,所以实验中常采用以下形式的电路:

(1) 将被测量元件 \dot{Z}_x 与标准元件 \dot{Z}_n 相邻放置,如图 1 中 $\dot{Z}_4 = \dot{Z}_x$, $\dot{Z}_3 = \dot{Z}_n$, 这时由

公式 3 可知:

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} \cdot \dot{Z}_n \quad (4)$$

式中的比值 $\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2}$ 称为“臂比”，故名“臂比电桥”，一般情况下 $\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2}$ 为实数，因此 \dot{Z}_x, \dot{Z}_n 必须是具有相同性质的电抗元件，改变臂比可以改变量程。

(2) 将被测量元件与标准元件相对放置，如图 1 中 $\dot{Z}_4 = \dot{Z}_x, \dot{Z}_2 = \dot{Z}_n$ ，这时由公式 3

可知:

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_n} = \dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 \cdot \dot{Y}_n \quad (5)$$

式中的乘积 $\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3$ 称“臂乘”，故名“臂乘电桥”，其特点是 \dot{Z}_x, \dot{Z}_n 元件阻抗的性质必须相反，因此这种形式的电桥常常应用在用标准电容测量电感。在实际测量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 (3) 的平衡条件可知，如果相邻两臂接入纯电阻（臂比电桥），则另外相邻两臂也必须接入相同性质的阻抗。若被测对象 \dot{Z}_x 是电容，则它相邻桥臂 \dot{Z}_4 也必须是电容；若 \dot{Z}_x 是电感，则 \dot{Z}_4 也必须是电感。

如果相对桥臂接入纯电阻（臂乘电桥），则另外相对两桥臂必须为异性阻抗。若被测对象 \dot{Z}_x 为电容，则它的相对桥臂 \dot{Z}_3 必须是电感，而如果 \dot{Z}_x 是电感，则 \dot{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，必须调节两个以上桥臂的参数，才能使电桥完全达到平衡，而且往往需要在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。本实验由于采用了开放式设计的仪器，所以也能以标准电感作为桥臂，以便于使用者更全面地掌握交流电桥的原理和特点以选择使用。

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，如后面将提到的“海氏电桥”，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。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：

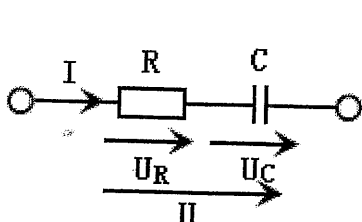


图2(a) 有损耗电容器的串联等效电路

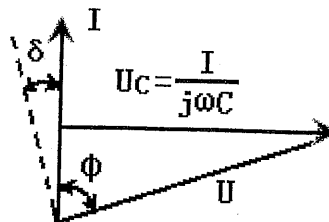


图2(b) 矢量图

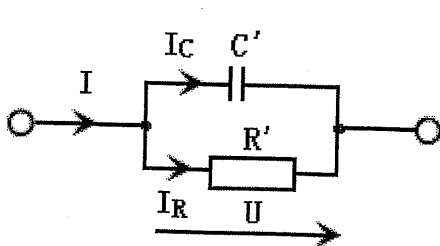


图3(a) 有损耗电容器的并联等效电路

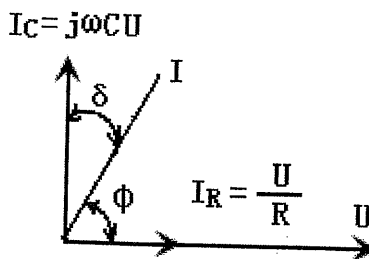


图3(b) 矢量图

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 2a 所示；另一种是理想电容与一个电阻相并联的等效电路，如图 3a 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 2b 及图 3b 分别画出了相应电压、电流的相量图。必须注意，等效串联电路中的 C 、 R 与等效并联电路中的 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

$\text{tg} \delta$ 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

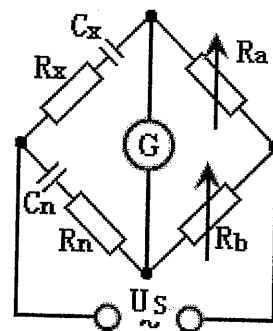


图4 串联式电容电桥

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R}{\frac{I}{\omega \cdot C}} = \omega \cdot C \cdot R \quad \text{在等效的并联电路中:}$$

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R'}{\omega \cdot C' \cdot U} = \frac{1}{\omega \cdot C' \cdot R'} \quad \text{应当指出, 在图 2b 和图 3b 中,}$$

$\delta = 90^\circ - \varphi$ 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, 它的损耗以等效串联电阻 R_x 表示, 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:

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_n \quad (6)$$

$$C_x = \frac{R_b}{R_a} \cdot C_n \quad (7)$$

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。但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 (7) 得到满足, 但调节 R_b/R_a 的比值时又影响到式 (6) 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, 才能迅速使电桥平衡。电桥达到平衡后, C_x 和 R_x 值可以分别按式 (6) 和式 (7) 计算, 其被测电容的损耗因数 D 为:

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

3. 测量损耗大的电容电桥 (并联电容电桥):

假如被测电容的损耗大, 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_n 是彼此并联的, 则根据电桥的平衡条件可以写成:

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

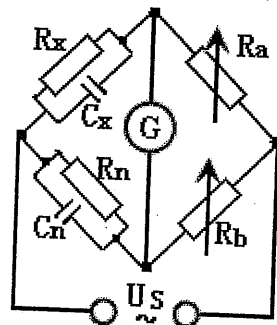


图5 并联式电容电桥

整理后可得：

$$C_x = \frac{R_b}{R_a} \cdot C_n \quad (9)$$

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_n \quad (10)$$

而损耗因数为：

$$D = \tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_n \cdot R_n} \quad (11)$$

交流电桥测量电容根据需要还有一些其他形式，可参看有关的书籍。

(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，除了电抗 $X_L = \omega \cdot L$ 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：

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} \quad (12)$$

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(海氏电桥)： 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

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

简化和整理后可得：

$$L_x = R_b \cdot R_a \cdot \frac{C_n}{1 + (\omega \cdot C_n \cdot R_n)^2} \quad (13)$$

$$R_x = R_a \cdot R_b \cdot \frac{R_n \cdot (\omega \cdot C_n)^2}{1 + (\omega \cdot C_n \cdot R_n)^2} \quad (14)$$

由式 (13、14) 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：

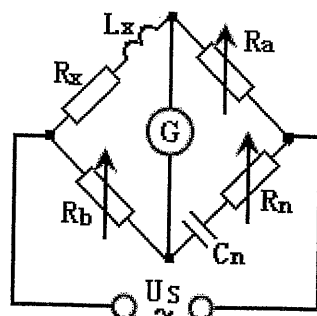


图6 测量高 Q 值电感的电桥

$$Q = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega \cdot C_n \cdot R_n} \quad (15)$$

由式(15)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适于测 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。

2. 测量低 Q 值电感的电感电桥(麦克斯韦电桥):

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:

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

相应的测量结果为:

$$L_x = R_a \cdot R_b \cdot C_n$$

(16)

$$R_x = R_a \cdot R_b \cdot \frac{1}{R_n} = R_a \cdot R_b \cdot Y_n \quad (17)$$

被测对象的品质因数 Q 为:

$$Q = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x} = \omega \cdot R_n \cdot C_n \quad (18)$$

麦克斯韦电桥的平衡条件式(16、17)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:

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

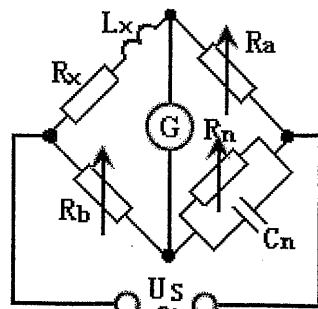


图7 测量低 Q 值电感的电桥

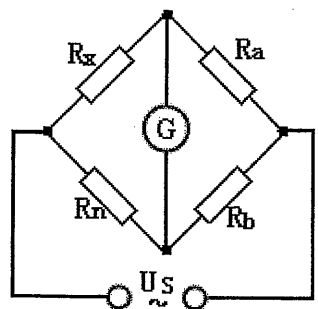


图8 用交流电桥测量电阻

用交流电源和交流指零仪作为测量信号。

当电桥平衡时，G 无电流流过，cd 两点为等电位，则： $R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_n$

由于采用交流电源和交流电阻作为桥臂，所以测量一些残余电抗较大的电阻时不易平衡，这时可改用直流电桥进行测量。

操作说明：

1、因为在被测电容 C_x 中，一般 R_x 的量值比较小，因此在测量前， R_n 的值可以放到零或很小的值，设定一定大小的灵敏度，使指零仪有一定的偏转幅度。

2、调节 R_b 使指零仪偏转最小，再适当调节指零仪的灵敏度，接着调节 R_n 使指零仪偏转再次出现最小，如此反复调节 R_b 加大指零仪的灵敏度，再调节 R_n 再加大灵敏度，如此反复调节，直到指零仪指零或偏转值最小为止。

3、有效数字的设定：为了使 C_x 有四位的有效数字， R_b 需要显示四位以上的有效数字，以下表格中的对应数据是参考设置：

$C_x (\mu F)$	$C_n (\mu F)$	$R_n (\Omega)$
10 ~ 100	1	100
	0.1	10
	0.01	1
1 ~ 10	1	1000
	0.1	100
	0.01	10
0.1 ~ 1	1	10000
	0.1	1000
	0.01	100
0.01 ~ 0.1	1	100000
	0.1	10000
	0.01	1000

其余类型的电桥可以参照下面的接线示意图与设定值进行，此处不再作类似的重复。

【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，选择错误的桥路可能会产生较大的测量误差，甚至无法进行测量。

1. 用交流电桥测量电容：

根据前面实验原理的介绍，分别测量两个 C_x 电容，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。

交流电桥采用的是交流指零仪，所以电桥平衡时指针位于 0 位。实验时，指零仪的灵敏度应先调到较低位置，待基本平衡时再调高灵敏度，重新调节桥路，直至最终平衡。

2. 用交流电桥测量电感:

根据前面实验原理的介绍分别测量两个 L_X 电感, 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。

3. 用交流电桥测量电阻:

用交流电桥测量不同类型的电阻, 并与其他直流电桥的测量结果相比较。

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, 有时指零仪的指针不能完全回到零位, 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, 损耗平衡电阻 (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, 电感线圈极易受外界的干扰, 也会影响电桥的平衡, 这时可以试着变换电感的位置和方向来减小这种影响。

(3) 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。

(4) 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。

(5) 与直流电桥不同, 由于作为电桥比例臂的电阻箱实际上也存在分布电容的影响, 因此在实验过程中, 有时会出现如 $1 \times 1000 \Omega \neq 10 \times 100 \Omega$ 的现象, 这种情况也是正常的。

【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?

FB11 型 RLC 相量实验仪的使用说明

【概述】

FB11型RLC相量实验仪是杭州精科仪器有限公司研制的教学实验仪器。是一种开放式综合交流电路实验仪，它具有接线简单，操作简便等优点。图1是它的面板实物照片。本实验仪中包含了综合交流电路实验所需的连接平台，并提供程控式信号源（正弦波和方波）、交流指零仪、数字电压表、电流表，非常适合于串联电路、并联电路、桥式电路等交流电路的实验连接。只要用户自备电阻箱、电容箱和电感箱及被测电容 C_X 、被测电感 L_X 等，即可开设一系列的交流电路实验。

【仪器构成】

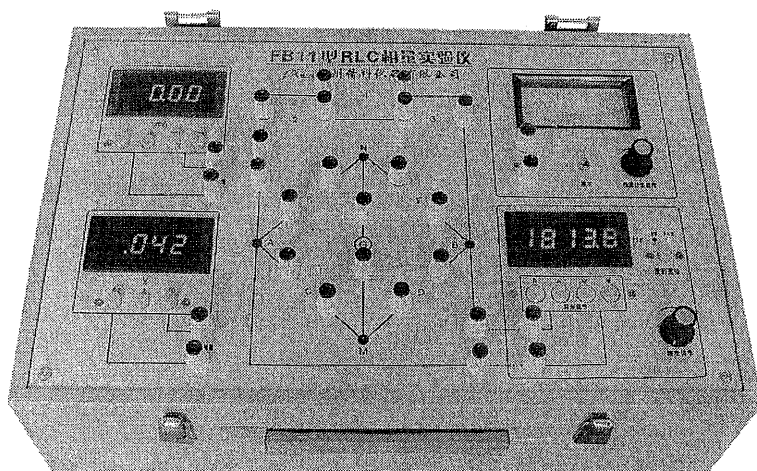


图1 FB11型RLC相量试验仪实物照片

如图1所示，仪器由功率信号发生器、数字频率计、交流指零仪、数字电压表、数字电流表各种电路元器件、专用连接导线等组成。（电阻箱、电感箱、电容箱由用户自备）

【主要技术性能】

1. 环境适应性：

(1) 工作温度：10~35℃；(2) 相对湿度：25~85%。

2. 抗电强度：仪器能耐受50Hz正弦波500V电压1min耐压试验。

3. 程控式功率信号源：电压输出升降可进行快、慢速调节；

(1) 正弦波输出：(10~80k)Hz连续可调。失真度小于1%，（说明：本仪器自带的数字式电压表仅适用于中、低频信号电压的测量，对于高频信号电压读数将失准，应采用示波器测量）

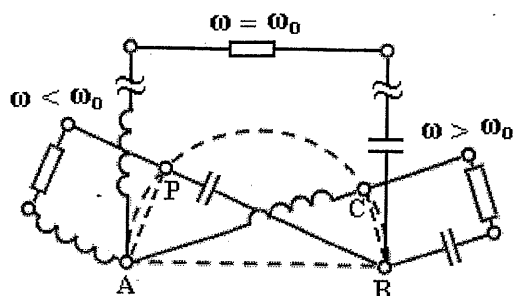
(2) 方波输出：(10~80k)Hz连续可调；输出电压幅度：(0~8)V_{P-P}；

4. 内置交流指零仪：灵敏度 5×10^{-8} A/div，带过量程保护；

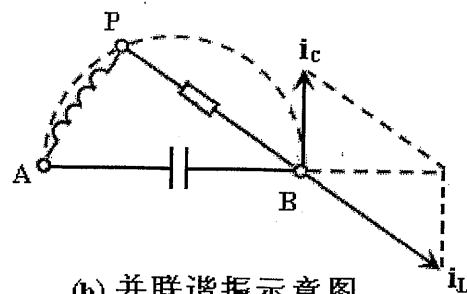
5. 供电电源：220V±10%，功耗：50VA

6. Q9 专用连接导线 2 根, 其它专用连接导线 18 根。
7. 三位半数字式电压表, 0.2, 2, 20V 三档量程切换, 精度 0.5% ;
8. 三位半数字式电流表, 2, 20, 200, 2000mA 四档量程切换, 精度 0.5% 。
9. 信号源专用连接片 2 片。

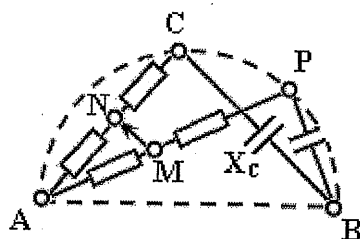
附录: 参考线路:



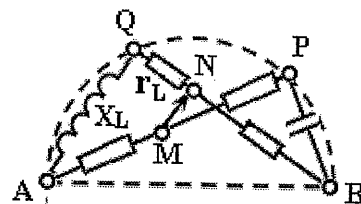
(a) 串联谐振示意图



(b) 并联谐振示意图



(c) 电容桥示意图



(d) 电感桥示意图

杭州精科仪器有限公司

地址：富阳市迎宾北路 206-9 号

开户行：农行富阳支行营业中心

电话：0571-63323636 邮编：311400

账 号：060101040004866

传真：0571-63323795

税 号：330283749477329

邮箱：hzfyjkyq@126.com

网 址：www.hzjkyq.cn