

RLC 电路的特性研究

DH4503 型 RLC 电路实验仪

实 验 讲 义

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、DH4503 型 RLC 电路实验仪
- 2、双踪示波器
- 3、数字存储示波器(选用)

[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:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$U_R = IR$$

$$U_C = \frac{I}{\omega C}$$

$$\psi = -\arctan \frac{1}{\omega CR}$$

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

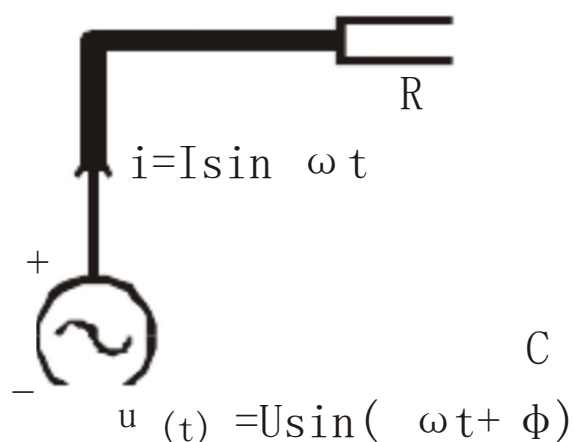


图 1 RC 串联电路

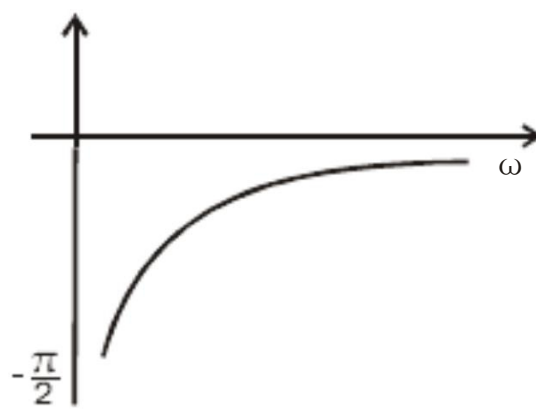


图 2 RC 串联电路的相频特性

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

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

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

它是一个复数, 其模为:

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

设 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, 则由上式可知:

$$\omega=0 \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 1$$

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

$$\omega \rightarrow \infty \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 0$$

$\omega \rightarrow \infty$ 时

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。

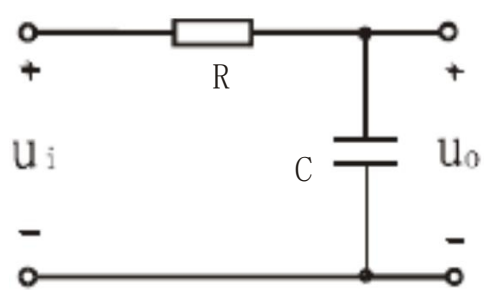


图 3 RC 低通滤波器

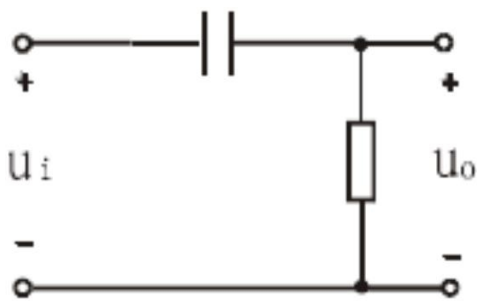


图 4 RC 高通滤波器

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:

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

同样令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ ，则：

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

$$\left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 0$$

$$\omega = \omega_0 \text{ 时, } \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = 1$$

$$\omega \rightarrow \infty \text{ 时}$$

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

RL 串联电路如图 5 所示

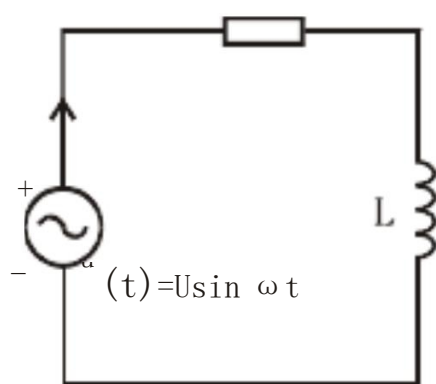


图 5 RL 串联电路

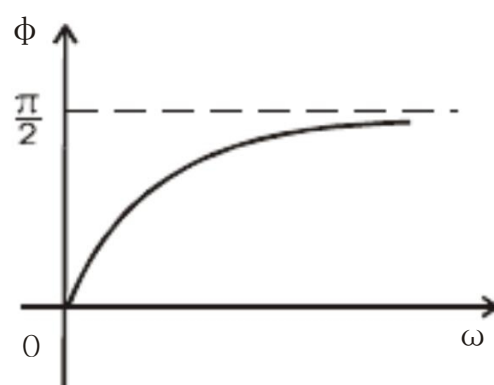


图 6 RL 串联电路的相频特性

可见电路中 I 、 U 、 U_R 、 U_L 有以下关系:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$U_R = IR, U_L = I \omega L$$

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

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：

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

$$\phi = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

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

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。

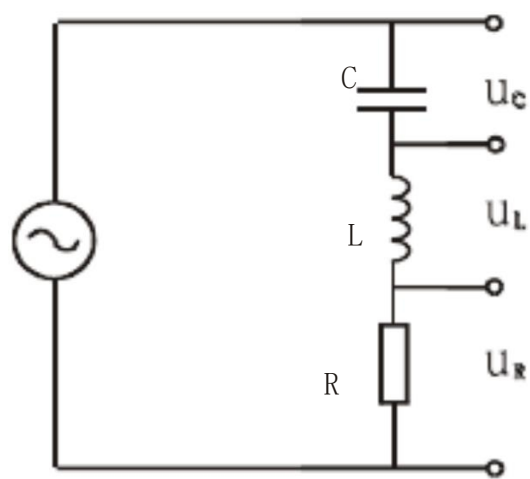


图 7 RLC 串联电路

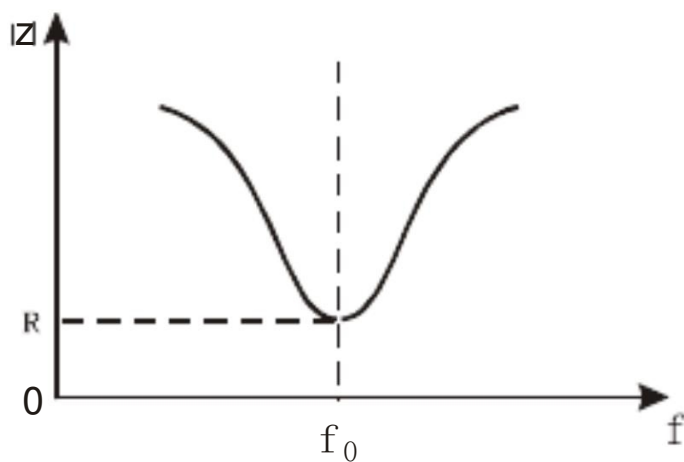


图 8 (a) RLC 串联电路的阻抗特性

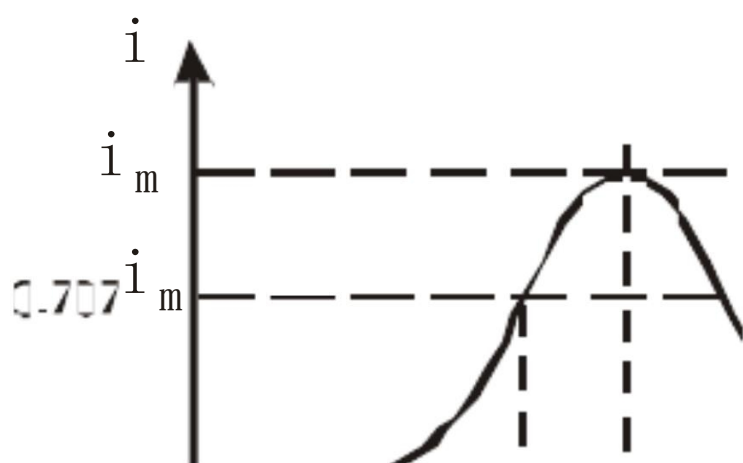


图 8(b) RLC 串联电路的幅频特性

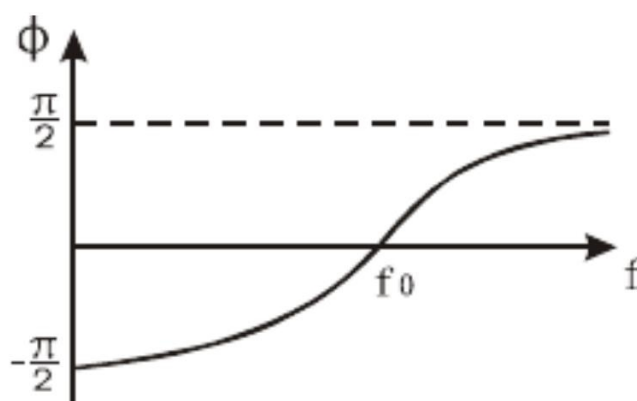


图 8 (c) RLC 串联电路的相频特性

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 。

当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时,从公式(11)、(12) 及 (13) 可知

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

这时的 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

电感上的电压 $U_L = i_m |Z_L| = \frac{\omega L}{R} \cdot U$

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

U_C 或 U_L 与 U 的比值称为品质因数 Q 。

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{R}{\omega L} = R \omega C$$
$$\Delta f = \frac{f}{Q}, Q = \frac{f}{\Delta f}$$

可以证明

2、RLC 并联电路

在图 9 所示的电路中有

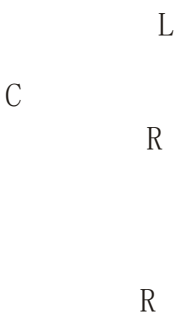


图 9 RLC 并联电路

可以求得并联谐振角频率

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{LC} \frac{R}{L}$$

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、相频特性

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

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

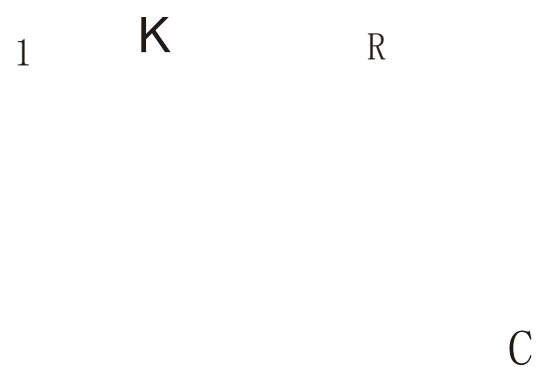


图 11 RC 串联电路的暂态特性

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” ， 电容通过放电,其充电方程为：

$$\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{RC} U_c = \frac{E}{RC}$$

放电方程为 $\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{RC} U_c = 0$

可求得充电过程时

$$U_c = E(1 - e^{-t/RC})$$

放电过程时

$$U_c = E \cdot e^{-t/RC}$$

放电过程时

$$U_c = E \cdot e^{-t/RC}$$

$$U_R = -E e^{-t/RC}$$

由上述公式可知 U_c 、 U_R 和 i 均按指数规律变化。令 $\tau = RC$, 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 $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ 。

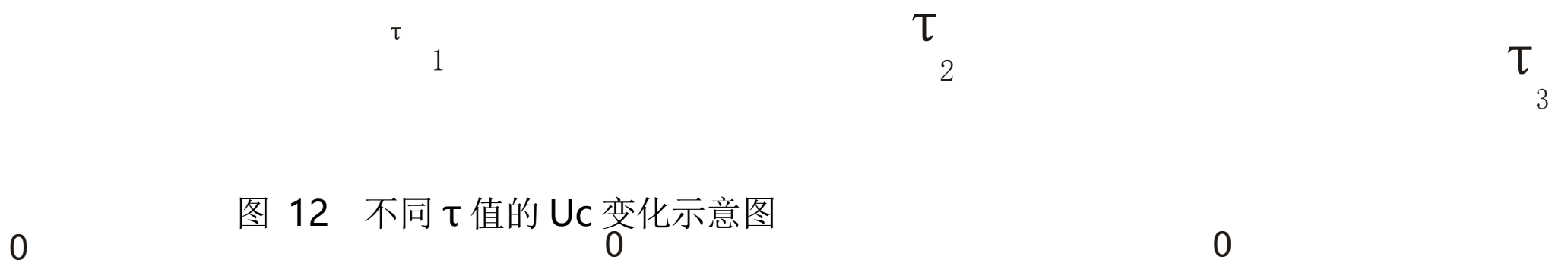


图 12 不同 τ 值的 U_c 变化示意图

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 “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

$$U_L = E \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

电流消失过程

$$U_L = E (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

$$U_L = -E \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

其中电路的时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$

1 K R

1 K R

C

L

图 13 RL 串联电路的暂态过程

图 14 RLC 串联电路的暂态过程

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

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} = 0$$

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、 $R < \frac{L}{C}$ 时, 为欠阻尼

$$U_C = \left(1 - \frac{C}{4L} R^2\right) \cdot E \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

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

2、 $R > \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 过阻尼

$$U_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{4L} R^2 - 1 \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \text{sh}(\omega t + \phi)$$

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

3、 $R = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 临界阻尼 $U_c = (1 + \frac{t}{\tau}) \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ 。

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。

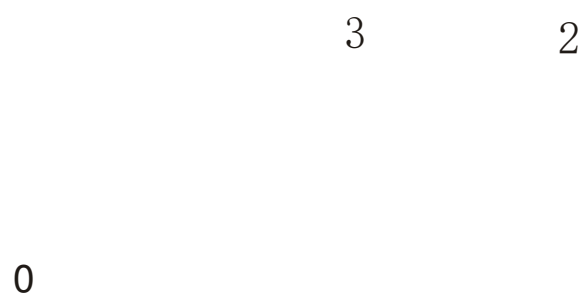


图 15 放电时的 U_c 曲线示意图

图 16 充电时的 U_c 曲线示意图

如果当 $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$ 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 之间不断交换, 可近似为 LC 电路的自由振荡, 这时 $\omega \approx \omega^0$, 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。

七*. 整流滤波电路

常见的整流电路有半波整流、全波整流和桥式整流电路等。这里介绍半波整流电路和桥式整流电路。

1、半波整流电路

如图 1 7 所示为半波整流电路, 交流电压 U 经二极管 D 后, 由于二极管的单向导电性, 只有信号的正半周 D 能够导通, 在 R 上形成压降; 负半周 D 截止。电容 C 并联于 R 两端, 起滤波作用. 在 D 导通期间, 电容充电; D 截止期间, 电容 C 放电。用示波器可以观察 C 接入和不接入电路时的差别, 以及不同 C 值和 R 值时的波形差别, 不同电源频率时的差别。

2. 桥式整流电路

如图 1 8 所示电路为桥整流电路。在交流信号的正半周, D_2 、 D_3 导通, D_1 、 D_4 截

止；负半周 D_1 、 D_4 导通， D_2 、 D_3 截止，所以在电阻 R 上的压降始终为上“+”下“-”，与半波整流相比，信号的另半周也有效的利用了起来，减小了输出的脉动电压。电容 C 同样起到滤波的作用。用示波器比较桥式整流与半波整流的波形区别。

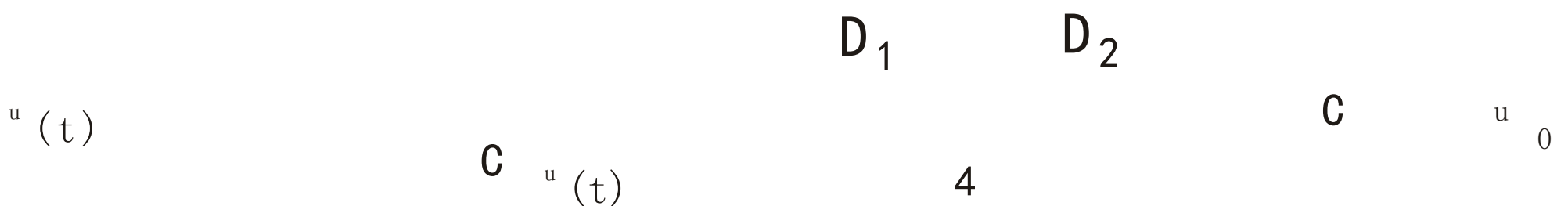


图 1 7 半波整流电路

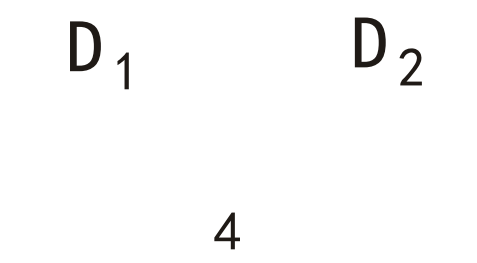


图 1 8 桥式整流电路

[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。

DH4503 型 RLC 电路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，不要短路功率信号源，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 $C=0.1\mu F$ ， $R=1K\Omega$ ，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 $C=0.1\mu F$ ， $R=1K\Omega$ （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。

1、幅频特性

保持信号源电压 U 不变 (可取 $U_{pp}=5\text{V}$), 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, 记录下某一频率时的相位差值。

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 $L=10\text{mH}$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$ 、 $R'=10\text{K}\Omega$ 。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、LC 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} 为 $2\sim 5\text{V}$), 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,

以使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。

八、整流滤波电路的特性观测

1、半波整流

按图 17 原理接线，选择正弦波信号作电源.先不接入滤波电容，观察 U 与 U_o 的波形。

再接入不同容量的 C 值.观察 U_o 波形的变化情况。

2、桥式整流

按图 18 原理接线，先不接入滤波电容，观察 U_o 波形，再接入不同容量的 C 值。观察 U_o 波形的变化情况，并与半波整流比较有何区别。

[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 值，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。

附录 DH4503 型 RLC 电路实验仪技术说明

DH4503 型 RLC 电路实验仪采用开放式设计，由学生自己连线来完成 RC、RL、RLC 电路的稳态和暂态特性的研究,从而掌握一阶电路、二阶电路的正弦波和阶跃波的响应过程,并理解积分电路、微分电路和整流

电路的工作原理。

一、仪器组成

仪器由功率信号发生器、频率计、电阻箱、电感箱、电容箱和整流滤波电路等组成，见附图。

附图 DH4503 型 RLC 电路实验仪面板图

二、仪器主要技术参数

1、供电:单相 220V，50Hz

2、工作温度范围 5~35℃，相对湿度 25~85%

3、信号源：

正弦波分 50Hz~1KHz，1K~10KHz，10KHz~100KHz 三个波段

方波为 50Hz~1KHz，信号幅度均 0~6Vpp 可调

直流 2~8V 可调

4、频率计工作范围:0~99.999KHz，5 位数显,分辨率 1Hz

5、十进式电阻箱： $(10K\Omega + 1K\Omega + 100\Omega + 10\Omega) \times 10$ ，精度 0.5%

6、十进式电感箱： $(10mH + 1mH) \times 10$ ，精度 2%

7、十进式电容箱： $(0.1\mu F + 0.01\mu F + 0.001\mu F) \times 10$ ，精度 1%

8、仪器外形尺寸:400mm×250mm×120mm

三、注意事项

- 1、仪器使用前应预热 10~15 分钟，并避免周围有强磁场源或磁性物质。
- 2、仪器采用开放式设计,使用时要正确接线，不要短路功率信号源，以防损坏。使用完毕后应关闭电源。
- 3、仪器的使用和存放应注意清洁干净避免腐蚀和阳光暴晒。
- 4、本仪器的保修期为一年.