

预习 操作记录		实验报告 总评成绩	

《大学物理实验》课程实验报告

学院：

专业：

年级：

实验人姓名(学号)：

参加人姓名：

日期： 年 月 日

室温：

相对湿度：

实验 RLC 电路的稳态特性

[实验前思考题]

1. 实验过程中信号发生器输出端电压幅度为什么要保持不变？若实验结束后才发现总电压发生了变化，在不重做实验的情况下应如何处理？
2. 如何判断 RLC 电路处于谐振状态。

[实验目的]

- 1. 学习数字存储示波器的使用方法；
- 2. 观测 RC、RL、RLC 串联电路的幅频特性和相频特性；
- 3. 学习用双踪示波器测量相位差。

[仪器用具]

编号	仪器用具名称	数量	主要参数(型号，范围，精度)
1	数字存储示波器		
2	函数信号发生器		
3	双通道交流毫伏表		
4	电阻箱		
5	九孔板（接线板）		
6	电子元器件		

[原理概述]

在 RC、RL 和 RLC 串联电路中，若加在电路两端的正弦交流信号保持不变，则当电路中的电流和电压变化达到稳定状态时，电流（或某元件两端的电压）与频率之间的关系特性称为幅频特性；电压、电流之间的位相差与频率之间的关系特性称为相频特性。下面分三种串联电路来分析。

1. RC 串联电路

RC 串联电路如图 1 所示, 由于电容 C 的容抗为 $1/(j\omega C)$ ，可得：

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = \dot{I} \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right)$$

(1)

其中 \dot{U} 为信号源输出的总电压， \dot{U}_R 为电阻两端的电压， \dot{U}_C 为电容两端的电压， C 为电容， $\omega = 2\pi f$ 为角频率。由式（1）可得电路总阻抗 $|Z|$ 、电流有效值 I 、电阻两端电压的有效值 U_R 、电容两端电压的有效值 U_C 及电路电流与总电压之间的位相差 $\Delta\phi$ 分别为：

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

(2)

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

(3)

$$U_R = IR = U\omega RC / \sqrt{1 + (R\omega C)^2}$$

(4)

$$U_C = I/(\omega C) = U/\sqrt{1+(\omega RC)^2} \quad (5)$$

$$\Delta\phi = \phi_{U_R} - \phi_U = \tan^{-1}(1/\omega RC) \quad (6)$$

若总电压有效值 U 保持不变, 根据式 (4 和 5) 可画出 $U_R \sim f$ 和 $U_C \sim f$ 幅频特性曲线, 如图 2 所示。 U_R 和 U_C 都是频率 f (或 ω) 的函数, 都随 f 单调变化。当频率很低时, $1/(\omega C) \gg R$, 总电压主要落在电容上; 当频率很高时, $1/(\omega C) \ll R$, 总电压主要落在电阻上。可以利用 RC 串联电路的这种特性设计各种滤波电路。

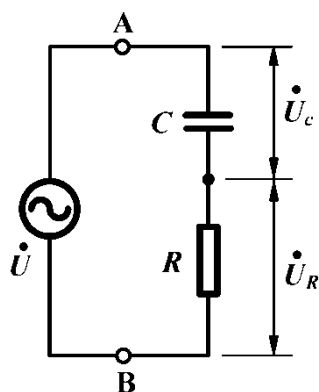


图 1 RC 串联电路

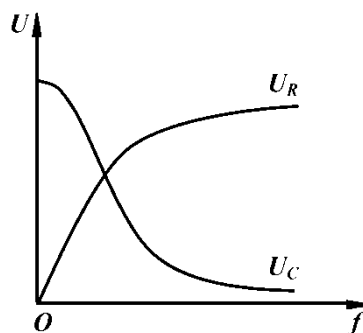


图 2 RC 串联电路的幅频特性

根据式 (6) 可画出 RC 串联电路的 $\Delta\phi \sim f$ 相频特性曲线, 如图 3 所示。当 f 很低时, $\Delta\phi$ 趋于 $\pi/2$; 当 f 很高时, $\Delta\phi$ 趋于 0, 电流与电压趋于同相。可利用 RC 电路的这种特性, 设计各种移相电路。

注意: 相位差指的是两个电压相位的差值, 故计算相位差时需确定一个基准相位。在图 1 的电路中, 由于 \dot{U} 是信号发生器输出的信号, 其相位 ϕ_U 不随外电路参数的变化而变化, 故可作为相位的基准。而电阻 R 为线性元件, 不会导致相位的变化, 其两端电压的相位 ϕ_{U_R} 与流过 RC 串联电路的电流 I 的相位相同。故 RC 电路导致的相移 $\Delta\phi$ 按式 (6) 来定义。 $\Delta\phi$ 为正值表示流过 RC 串联电路的电流的相位超前于总电压的相位。

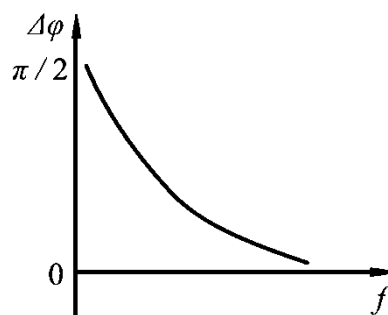


图 3 RC 串联电路的相频特性曲线

2. RL 串联电路

RL 串联电路如图 4 所示。由于电感 L 的感抗为 $j\omega L$, 可得:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = \dot{I}(R + j\omega L) \quad (7)$$

由式 (7) 可得电路总阻抗 $|Z|$ 、电流有效值 I 、电阻两端电压的有效值 U_R 、电感两端电压的有效值 U_L 及电路电流与总电压之间的位相差 $\Delta\phi$ 分别为:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (8)$$

$$I = U / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (9)$$

$$U_R = IR = UR / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (10)$$

$$U_L = I\omega L = U\omega L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (11)$$

$$\Delta\phi = \phi_{U_R} - \phi_U = \tan^{-1}(\omega L/R) \quad (12)$$

若总电压有效值 U 保持不变, 根据式 (10 和 11) 可画出 $U_R \sim f$ 和 $U_L \sim f$ 幅频特性曲线, 如图 5 所示。 U_R 和 U_L 都是频率 f (即 ω) 的函数, 都随 f 单调变化。当 f 很低时, $R \gg \omega L$, 总电压主要落在电阻上; 当频率很高时, $R \ll \omega L$, 总电压主要落在电感上。可利用 RL 电路的这种特性设计各种滤波电路。

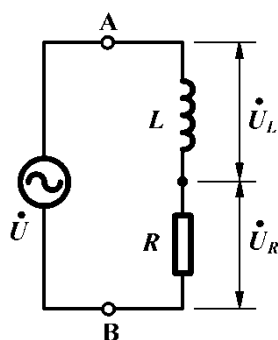


图 4 RL 串联电路

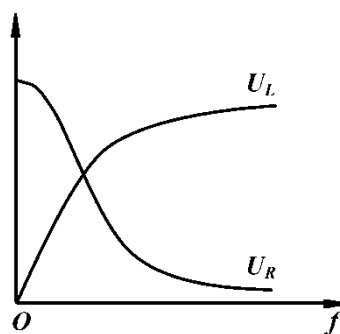


图 5 RL 串联电路幅频特性

根据式 (12) 可画出 RL 串联电路的 $\Delta\phi \sim f$ 相频特性曲线, 如图 6 所示。当 f 很低时, $\Delta\phi$ 趋于 0, 流过 RL 串联电路的电流与总电压趋于同相; 当 f 很高时, $\Delta\phi$ 趋于 $\pi/2$ 。 $\Delta\phi$ 为负说明流过 RC 串联电路的电流的相位落后于总电压的相位。可利用 RC 电路的这种特性, 设计各种移相电路。

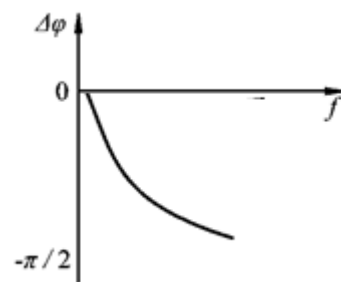


图 6 RL 串联电路相频特性曲线

3. RLC 串联电路的相频特性

本实验只测量 RLC 串联电路的相频特性。电路如图 7 所示, 流过电路的电流 i 的相位 ϕ_{U_R} 与总电压 \dot{U} 的相位 ϕ_U 之差为:

$$\Delta\phi = \phi_{U_R} - \phi_U = \tan^{-1}[(\omega L - 1/\omega C)/R] \quad (13)$$

根据式 (13) 可画出 RLC 串联电路的 $\Delta\phi \sim f$ 相频特性曲线如图 8 所示。

(1) 当 $\omega L = 1/\omega C$ 时, $\Delta\phi = 0$, 电流与总电压同相, 整个电路呈纯电阻性, 处于谐振状态。定义 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ (或 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$), 该频率称为谐振圆频率 (或谐振频率)。

(2) 当 $\omega L > 1/\omega C$ (高频) 时, $\Delta\phi < 0$, 电流相位落后于总电压, 电路呈电感性, $\Delta\phi$ 随 ω 的增大而增大。 ω 趋于无穷大时, $\Delta\phi$ 趋近于 $(-\pi/2)$ 。

(3) 当 $\omega L < 1/\omega C$ (低频) 时, $\Delta\phi > 0$, 电流相位超前于总电压, 电路呈电容性, $\Delta\phi$ 随 ω 的减小而减小, ω 趋于 0 时, $\Delta\phi$ 趋近于 $(\pi/2)$ 。

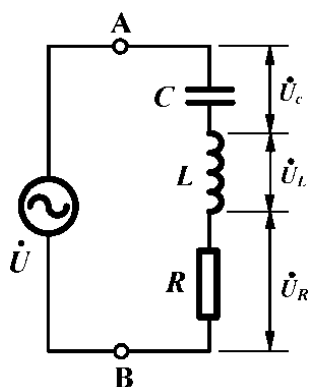
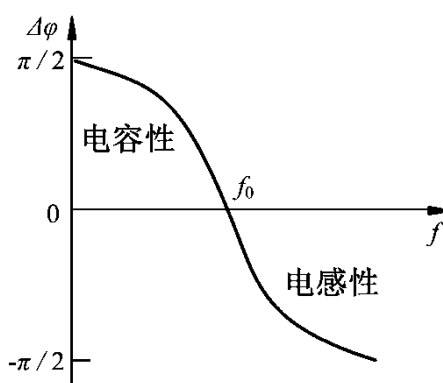


图 7 RLC 串联电路图



8 RLC 串联电路的相频特性曲线

4. 用双踪示波器测相位差

把两个同频率的交流信号 $U = U_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ 和 $U_R = U_2 \sin(\omega t + \phi_2)$ 分别接示波器的 CH_1 和 CH_2 端口, 屏幕上会出现如图 9 所示的图形。以 U 为基准, 则 U 和 U_R 两信号间的相位差为

$$\Delta\phi = \phi_{U_R} - \phi_U = \frac{\Delta L}{L} \times 360^\circ, \quad -180^\circ < \Delta\phi < 180^\circ \quad (14)$$

其中, L 为信号的一个周期所对应的水平距离, ΔL 为两个信号之间的水平距离。由于屏幕上的光点总是从左到右扫描, 所以若 U_R 波形位于 U 的左侧, 则 ΔL 取正值, $\Delta\phi > 0$, U_R 的相位超前于 U 。若 U_R 在 U 的右侧, 则 ΔL 取负值, $\Delta\phi < 0$, U_R 的相位落后于 U 。

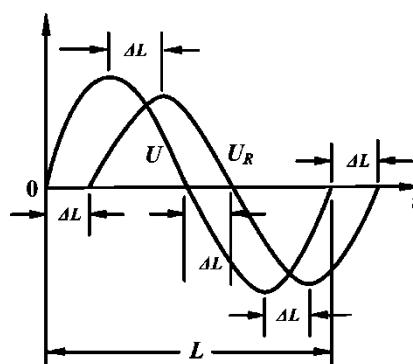


图 9 双踪示波法测相位差

[实验内容及步骤]

1. RC 串联电路稳态特性

(1) 观测 RC 串联电路的幅频特性

按图 10 连线，取 $R=500\Omega$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ 。测量过程中需经常调节信号源幅度，使总电压有效值 $U=5.0\text{V}$ 保持不变。频率 f 取 (100、300、600、1k、3k、6k、10k) Hz，用图 10 (a) 测 U_R ，用图 10 (b) 测量 U_C 。作 $(U_R, U_C) \sim f$ 关系曲线，并分析实验结果。

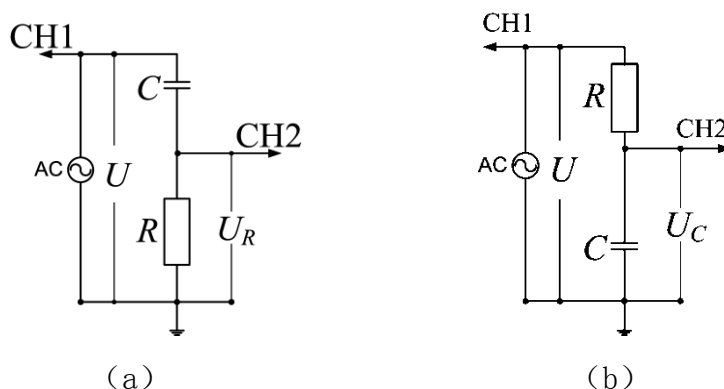


图 10 RC 串联电路稳态特性分析原理图

(2) 观测 RC 串联电路的相频特性

按图 10 (a) 连线，总电压接 CH1 通道，电阻两端电压接 CH2 通道，频率 f 取 (100、300、600、1k、3k、6k、10k) Hz。对应每个频率，如图 9，用双踪示波器测出流过电路的电流与总电压之间的相位差

$$\Delta\phi = \phi_{U_R} - \phi_U = \phi_2 - \phi_1 = (\Delta L/L) \times 360^\circ \quad (15)$$

并作 $\Delta\phi \sim f$ 相频特性曲线。计算时要注意 ΔL 的正负。

※ 波峰位置比较平滑，不易判断，用波形与接地扫描线的交点来测量更为准确。

※ 也可按 Cursor、类型，选择“时间”调出数字示波器的光标读出功能，用波形的时间间隔 Δt 来计算相位差 $\Delta\phi = (\Delta t/T) \times 360^\circ$ 。

2. 观测 RL 串联电路的幅频特性和相频特性

(1) 方法与 RC 串联电路分析类似，参照图 10 接线，但将其中的电容改为 $L=33\text{mH}$ 的电感。取 $R=500\Omega$ ， $U=5.0\text{V}$ 并保持不变。频率 f 取 (100、300、600、1k、3k、6k、10k) Hz，测出各频率下的 U_R 和 U_L 值，以及 U_R 和 U 之间的相位差，作幅频特性曲线和相频特性曲线。

(2) 取 $f = 200\text{Hz}$ 时的 U_R 和 U_L 值, 计算电压 $U' = U_R + U_L$, 验算 U' 是否等于总电压 $U = 5.0\text{V}$ 。若不相等, 请解释原因。

3. 观测 RLC 串联电路的相频特性

(1) 测量 RLC 串联电路的谐振频率

按图 11 连线, 测出 U_R 与 U 之间的相位差正好为零时对应的频率, 即为 RLC 串联电路的谐振频率 f_0 。将实验值与理论值 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 比较。

(2) 测量 RLC 串联电路的相频特性曲线

频率取 (100、200……900、1k、2k、3k……9k、10k) Hz, 测出各频率下 U_R 和 U 之间的相位差, 作 $\Delta\phi \sim f$ 相频特性曲线, 并分析实验结果。

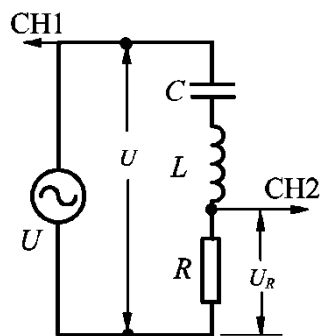


图 10 RLC 串联电路图

[数据记录]

1. RC 串联电路的幅频特性和相频特性

 $R =$ $C =$ $U =$

f / Hz										
U_C / V										
U_R / V										
L / div										
$\Delta L / \text{div}$										
T / s										
$\Delta T / \text{s}$										

2. RL 串联电路的幅频特性和相频特性

 $R =$ $L =$ $U =$

f / Hz										
U_L / V										
U_R / V										
L / div										
$\Delta L / \text{div}$										
T / s										
$\Delta T / \text{s}$										

3. RLC 串联电路的相频特性

$R =$

$L =$

$C =$

谐振频率： $f_0 =$

f / Hz										
T / s										
$\Delta T / \text{s}$										
f / Hz										
T / s										
$\Delta T / \text{s}$										

[数据处理与分析]

1. 画出 RC 串联电路的幅频特性曲线和相频特性曲线。
2. 画出 RL 串联电路的幅频特性曲线和相频特性曲线。
3. 取 $f = 200\text{Hz}$ 时数据，验算电压 ($U' = U_R + U_L$) 是否等于总电压 $U = 5.0\text{V}$ 。若不相等，请解释原因。
4. 画出 RLC 串联电路的相频特性曲线，并从图中找出谐振点。由于频率跨度大，要求采用单对数坐标系画图，横坐标为以 10 为底的对数，纵坐标为线性坐标。

[实验后思考题]

1. 怎样测量两个同频率正弦信号的位相差？包括数值和符号。
2. 测量电路的幅频特性时，能否采用三角波或方波？为什么？