

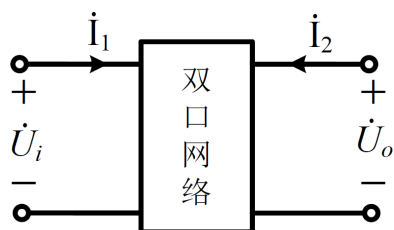
RC 电路频率特性的研究实验报告

1. 实验目的

- 1) 熟悉正弦稳态分析中相量的基本概念。
- 2) 掌握 RC 低通、高通和串并联选频电路的频率特性的测试方法。
- 3) 掌握用示波器测量同频率正弦信号相位差的方法。

2. 实验原理

2.1. 频率特性的定义：

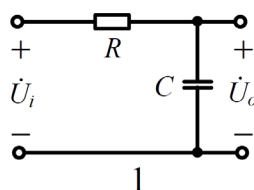


转移函数：
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = |H(j\omega)| \angle \phi(\omega) = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| \angle (\varphi_{u_o} - \varphi_{u_i})$$

其中：
$$|H(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| \dots\dots\dots \text{转移函数的幅频特性}$$

$$\phi(\omega) = \varphi_{u_o} - \varphi_{u_i} \dots\dots\dots \text{转移函数的相频特性}$$

2.2. RC 低通电路（RC 相位滞后电路）



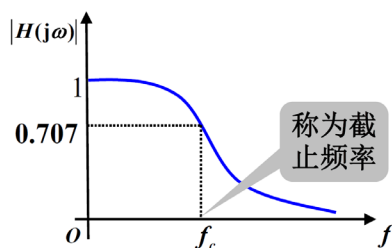
输出电压：
$$\dot{U}_o = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i}{j\omega RC + 1}$$

此电路的电压转移函数为：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{j\omega RC + 1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\text{tg}^{-1}(\omega RC)$$

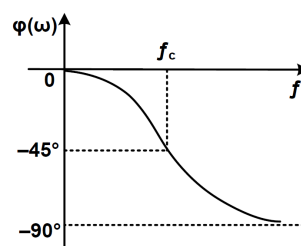
$$= |H(j\omega)| \angle \phi(\omega)$$

式中，
$$|H(j\omega)| \triangleq \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

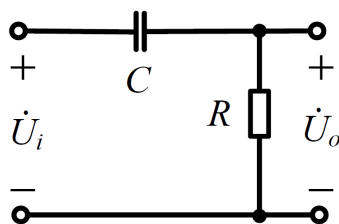


式中，
$$\phi(\omega) = -\text{tg}^{-1}(\omega RC)$$

显然是输出滞后输入角度为 $\text{tg}^{-1}(\omega RC)$



2.3. RC 高通电路 (RC 相位超前电路)



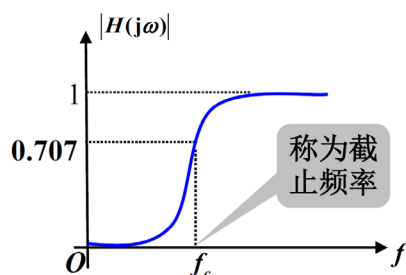
输出电压为 $\dot{U}_o = \frac{R}{R + 1/j\omega RC} \dot{U}_i = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} \dot{U}_i$

此电路的电压转移函数为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega RC)$$

$$= |H(j\omega)| \angle \phi(\omega)$$

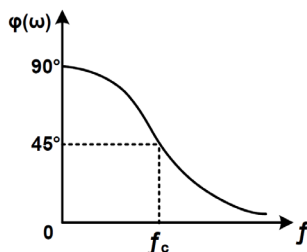
式中, $|H(j\omega)| \triangleq \frac{|\dot{U}_o|}{|\dot{U}_i|} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$



其幅频特性曲线如右图所示。

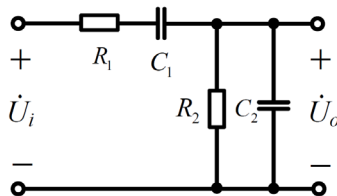
转移函数式中, $\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega RC)$

其相频特性曲线如下图所示。



显然是输出超前输入角度为 $\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega RC)$ 。

2.4. RC 串并联选频电路 (RC 带通电路)



此电路的电压转移函数为:

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}\right) + j\left(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1}\right)}$$

通常取, $R_1 = R_2$, $C_1 = C_2$

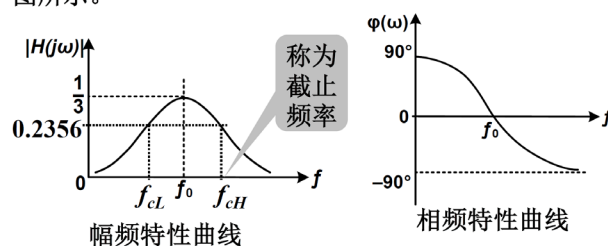
$$\text{式中, } |H(j\omega)| \triangleq \frac{\left| \dot{U}_o \right|}{\left| \dot{U}_i \right|} = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right)^2}}$$

$$\text{式中, } \phi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \left(\frac{\omega RC - \frac{1}{\omega RC}}{3} \right)$$

当频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, $|H(j\omega)| = \frac{1}{3}$, $\phi(\omega) = 0^\circ$

式中, $\omega_0(f_0)$ 称为电路谐振频率。

此时输出幅度 U_o 最大, 且 U_i 与 U_o 同相位, 其频率特性曲线如下图所示。



2.5. 测量相位差角的两种方法:

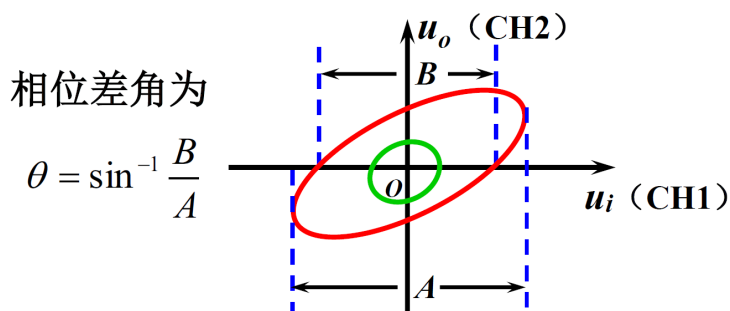
2.5.1. 时域法:

根据两个同频率的正弦信号, 可以比较相位差, 对于图 1-3(a) 所示的两信号, 其相位差角为

$$\varphi = \frac{\Delta T}{T} \times 360^\circ$$

其中 ΔT 为两信号之间的时间差, T 为信号的周期。

2.5.2. 李萨如图形法



式中, A 是李萨如图形在水平方向上的投影, B 是李萨如图形在水平方向上两交点之间的距离。观察李萨如图形时, 示波器【Acquire】采集选择高分辨率。

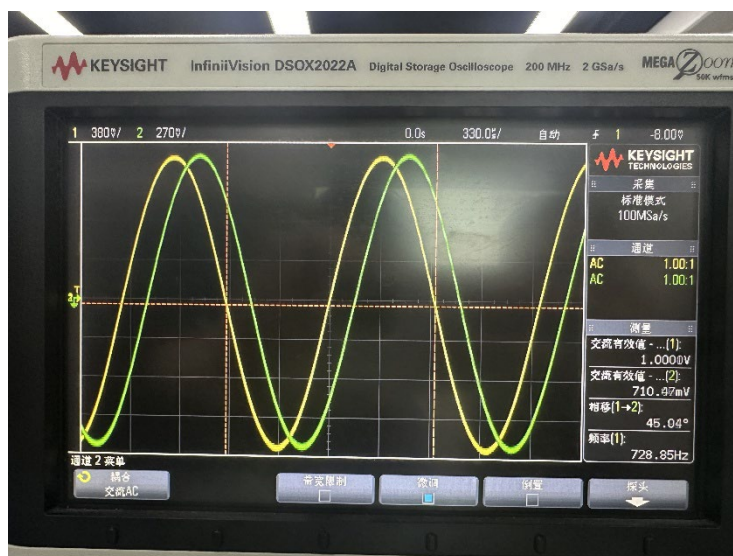
3. 实验内容

3.1. RC 低通电路

按照原理图接线，测量得电阻实际值 $R=2.2\text{k}\Omega$ ，电容实际值 $C=0.1\mu\text{F}$ 。调节至 $U_i=1\text{V}$ （有效值）。当输出电压 $U_o=0.707\text{V}$ 时，信号频率 $f_c=729\text{Hz}$ 。改变输入电压信号频率，得到下表：

f(Hz)	50	100	200	500	729	800	1k	1.5k	2k	5k
$U_i(\text{V})$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$U_o(\text{V})$	0.998	0.989	0.958	0.826	0.707	0.678	0.599	0.452	0.362	0.156
$\varphi(^{\circ})$	4.8	8.1	14.9	34.5	45.8	47.1	53.2	63.1	69.3	81.4

频率为 $f_c=729\text{Hz}$ 时，输入输出电压波形图如下所示：



其中 U_o 滞后于 U_i 。测量得 $\Delta t=0.167\text{ms}$, $T=1.326\text{ms}$, $\theta=(\Delta t/T)*360^{\circ}=45.34^{\circ}$ 。

输入输出电压李萨如图形如下所示：



测量得到 $A=2.813\text{V}$, $B=1.975\text{V}$, $\varphi=\sin^{-1}(B/A)=44.6^{\circ}$ 。误差值为 0.98%。

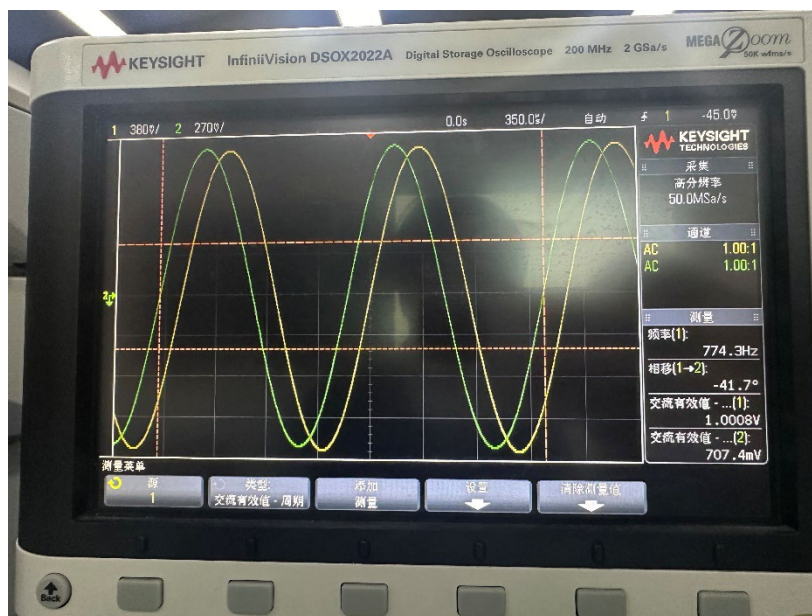
可以看出使用时域法测得的相位差角与使用李萨如图法测得的结果基本一致。

3.2. RC 高通电路

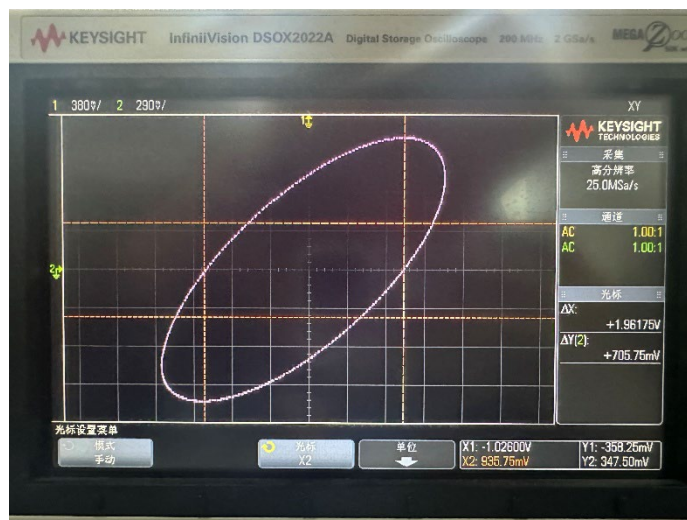
按照原理图接线，测量得电阻实际值 $R=2.2\text{k}\Omega$ ，电容实际值 $C=0.1\mu\text{F}$ 。调节至 $U_i=1\text{V}$ （有效值）。当输出电压 $U_o=0.707\text{V}$ 时，信号频率 $f_c=774\text{Hz}$ 。改变输入电压信号频率，得到下表：

f(Hz)	50	100	200	500	774	800	1k	1.5k	2k	5k
$U_i(\text{V})$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$U_o(\text{V})$	0.068	0.134	0.263	0.556	0.707	0.720	0.793	0.892	0.936	0.983
$\varphi(^{\circ})$	-84.2	-80.0	-72.1	-52.8	-41.9	-40.5	-34.8	-25.6	-20.3	-8.8

频率为 $f_c=774\text{Hz}$ 时，输入输出电压波形图如下所示：



其中 U_o 提前于 U_i 。测量得 $\Delta t=-0.150\text{ms}$, $T=1.292\text{ms}$, $\theta=(\Delta t/T)*360^{\circ}=-41.80^{\circ}$ 。输入输出电压李萨如图形如下所示：



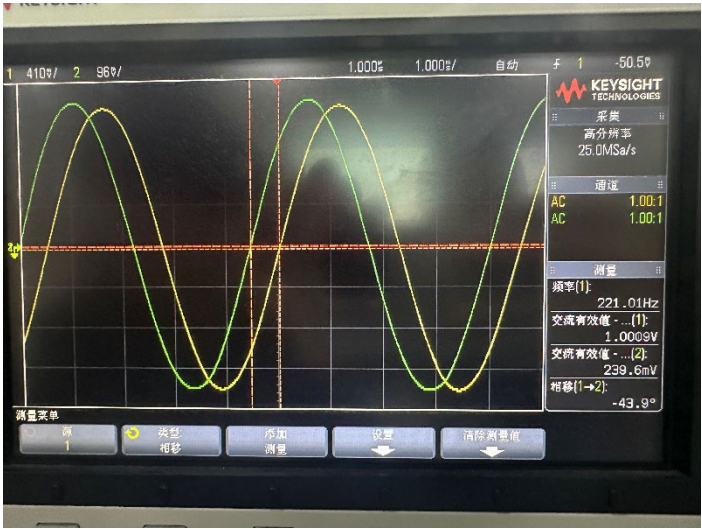
测量得到 $A=2.807\text{V}$, $B=1.962\text{V}$, $\phi=-\sin^{-1}(B/A)=-44.34^{\circ}$ 。误差值 1.47%。可以看出使用时域法测得的相位差角与使用李萨如法测得的结果基本一致。

3. 3. RC 串并联选频电路

按照原理图接线，测量得每个电阻实际值均为 $R=2.2\text{k}\Omega$ ，每个电容实际值均为 $C=0.1\mu\text{F}$ 。调节至 $U_i=1\text{V}$ （有效值）。当输出电压 $U_o=0.2356\text{V}$ 时，信号频率 $f_{c1}=221\text{Hz}$, $f_{ch}=2.6\text{kHz}$ 。当输出电压 $U_o=0.339\text{V}$ 时，信号频率 $f_c=740\text{Hz}$ 。改变输入电压信号频率，得到下表：

f(Hz)	50	100	$f_{c1}=221$	300	500	$f_c=740$
$U_i(\text{V})$	1	1	1	1	1	1
$U_o(\text{V})$	0.068	0.130	0.2356	0.280	0.330	0.339
$\varphi(^{\circ})$	-76.4	-65.9	-43.9	-33.3	-14.5	0.0
f(Hz)	800	1k	1.5k	2k	$f_{ch}=2.6\text{k}$	5k
$U_i(\text{V})$	1	1	1	1	1	1
$U_o(\text{V})$	0.340	0.334	0.306	0.273	0.2356	0.149
$\varphi(^{\circ})$	2.8	10.5	25.2	35.6	44.7	63.5

f_{c1} 频率时候的时域波形图如下所示：



其中 U_o 提前于 U_i 。

f_{ch} 频率时候的时域波形图如下所示：



其中 U_o 滞后于 U_i 。

4. 误差分析

本次实验大致误差均处于 2% 范围以内，可以证明通过时域法与直接读数均可得到所需相位差，实验误差主要来源是读数时电信号存在波动、李萨如图光标定位存在不精准现象。

5. 思考题

1) 两个不同频率的正弦量，能否测量其相位差？

不可以，因为相位差是两个作周期变化的物理量的相之间的差值，如果频率不同，则相位差会随时间变化，无法测量。

2) 据你所知，测量频率、振幅和相位差有哪些方法？

① 通过示波器的 meas 自动测量得到频率、振幅和相位差；

② 通过光标法，可在示波器上直接得出交流信号的振幅、相位差，通过运算得出频率；

③ 通过时域法根据李萨如图像计算得相位差。

3) 根据实验结果说明选频电路的作用？

通过不同选频电路，可以对相应对频率信号进行抑制作用从而达到去除杂音的效果，提高电信号的准确性。