



南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

电工电子实验报告

课程名称： 电工电子实验（一）
实验项目： 1. 传输网络频率特性的研究
2. RLC串联谐振电路

学 院： 贝尔英才学院
班 级：
学 号：
姓 名：
学 期： 2021-2022学年第1学期

传输网络频率特性的研究

一、实验目的

1. 加深理解低通、高通、带通、带阻电路的频率特性；
2. 掌握传输网络频率特性的测试方法。

二、主要仪器设备

EDA软件：NI Multisim 14.0

三、实验原理

研究电路的频率特性,即分析研究不同频率的信号作用于电路所产生的响应函数与激励函数的比值关系。通常情况下,研究具体电路的频率特性,并不需要测试构成电路所有元件上的响应与激励之间的关系,只需要研究某个元件或支路的响应与激励之间的关系。本实验主要研究一阶低通、高通、带通、带阻滤波器电路的频率特性。

1. RC 低通网络

图 3.43(a)所示为 RC 低通网络,它的网络传输函数为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\arctan(\omega RC) \end{aligned} \quad (3.9.1)$$

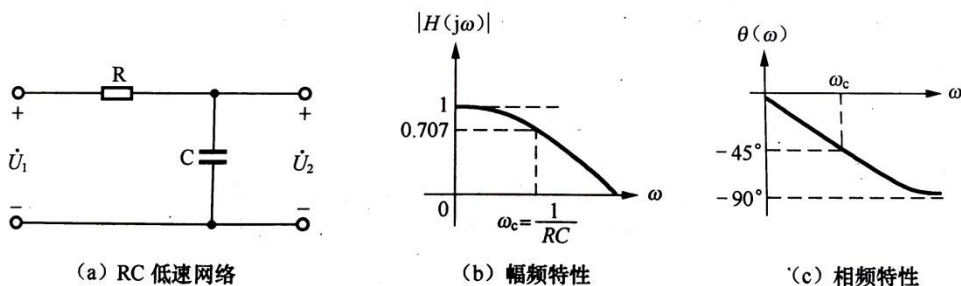


图 3.43 RC 低通网络及其频率特性

式中, $|H(j\omega)|$ 为幅频特性, 显然它随着频率的增高而减小, 说明低频信号可以通过, 而高频信号被衰减或抑制。

$$\begin{aligned} \text{当 } \omega = 1/RC \text{ 时, } |H(j\omega)|_{\omega=1/RC} &= \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707, \text{ 即 } U_2/U_1 = 0.707, \text{ 有} \\ 201 \lg |H(j\omega)|_{\omega=1/RC} &= 201 \lg \frac{U_2}{U_1} \bigg|_{\omega=1/RC} = -3(\text{dB}) \end{aligned} \quad (3.9.2)$$

通常把 U_2 降低到 $0.707U_1$ 时的角频率 ω 称为截止角频率 ω_c , 即 $\omega = \omega_c = \frac{1}{RC}$ 。图 3.43(b)(c) 分别为 RC 低通网络的幅频特性曲线和相频特性曲线。低通滤波器的截止频率为 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 。此时输入、输出信号之间的相位差为 -45° 。

2. RC 高通网络

图 3.44(a)所示为 RC 高通网络, 它的网络传输函数为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}} \angle 90^\circ - \arctan(\omega RC) \quad (3.9.3)$$

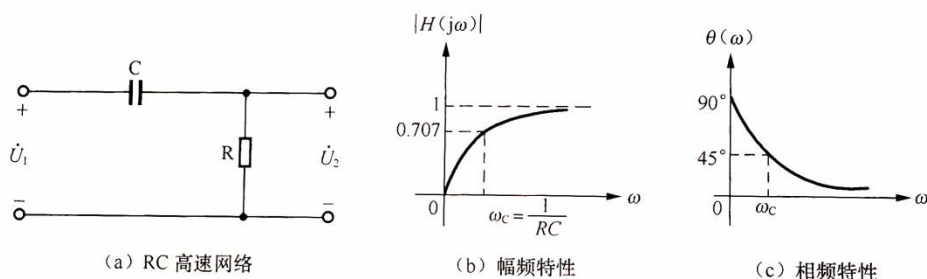


图 3.44 RC 高通网络及其频率特性

可见, $|H(j\omega)|$ 随着频率的降低而减小, 说明高频信号可以通过, 低频信号被衰减或被抑制。网络的截止角频率仍为 $\omega_c = \frac{1}{RC}$, 因为 $\omega = \omega_c$ 时, $|H(j\omega)| = 0.707$ 。它的幅频特性和相频特性分别如图 3.44(b)(c) 所示。高通滤波器的截止频率为 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 。此时输入、输出信号之间的相位差为 45° 。

3. RC 带通网络(RC 选频网络)

图 3.4.5 所示为 RC 选频网络, 它的网络传输函数为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{R}{1+j\omega RC}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{1+j\omega RC}} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \angle \arctan \frac{\omega RC - \frac{1}{\omega RC}}{3} \quad (3.9.4)$$

显然, 当信号频率 $\omega = \frac{1}{RC}$ 时, 对应的模 $|H(j\omega)| = \frac{1}{3}$ 为最大, 信号频率偏离 $\omega = \frac{1}{RC}$ 越远信号被衰减得越厉害。说明该 RC 网络允许以 $\omega = \omega_0 = 1/RC (\neq 0)$ 为中心的、一定频率范围(频带)内的信号通过, 而衰减或抑制其他频率的信号, 即对某一窄带频率的信号具有选频通过的作用, 因此, 将它称为带通网络, 或选频网络, ω_0 称为中心角频率。此时输入、输出信号之间的相位差为 0° 。

4. RC 带阻网络

如图 3.46 所示是一个 RC 双 T 带阻滤波器, 其网络传输函数的幅频特性及相频特性自行推导。

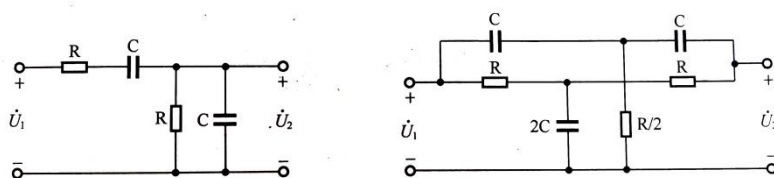


图 3.45 RC 带通网络

图 3.46 RC 带阻网络

5. 测试电路的截止频率 f 和 f 对应的相位差的方法

按图 3.43 完成电路接线, 双击波特图仪图标, 展开波特图仪面板。如图 3.47 所示, 在波特图仪面板界面中, 按下幅频特性测量选择按钮(Magnitude); 垂直坐标(Vertical)的坐标类型选择为对数(Log), 其起始值(1)、终止值(F)即幅度量程设定分别设置为 -100dB 和 dB 水平坐标(Horizontal)的坐标类型选择为对数(Log), 频率范围

的起始值(I)和终止值(F)分别设为 1MHz 和 1GHz。

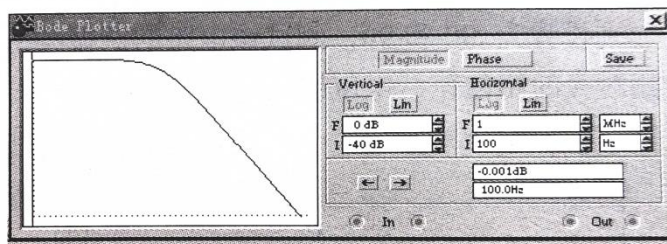


图 3.47 波特图仪

单击仿真开关,单击波特图仪读数游标移动按钮 $\rightarrow\leftarrow$ 或者直接拖曳读数游标,使游标与曲线交点处垂直坐标的读数非常接近-3dB,即对应的网络函数的模值 $|H(j\omega)|$,此时交点处水平坐标的读数即为 f_c 的数值。为了提高读数的精度,将水平坐标轴的起始值(I)、终止值(F)即频率范围设置为接近初步测试 f_c 的 $\pm 0.1f_c$ 范围,展开测试段的显示曲线,重新启动仿真程序,读出的精确值。

按下相频特性选择按钮,垂直坐标的起始值(I)、终止值(F)即相位角量程设定分别设置为-90 和 0。重新启动仿真程序,使游标与曲线交点处水平坐标的读数非常接近 f_c ,此时交点处垂直坐标的读数为 f_c 点对应的相位角(φ)的值。

四、实验内容

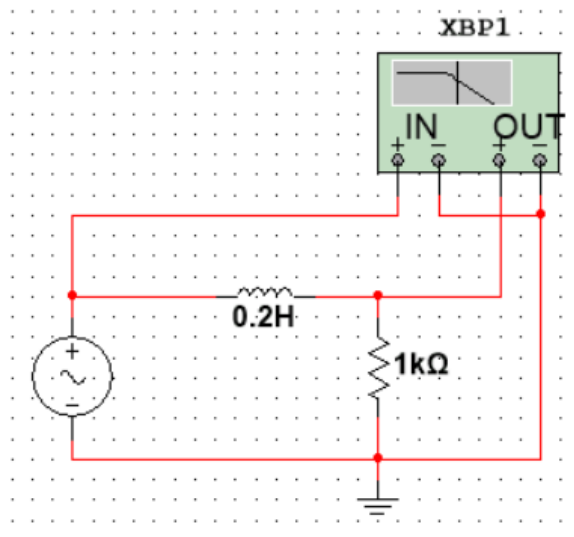
1.测试一阶 RL 低通滤波器的频率特性

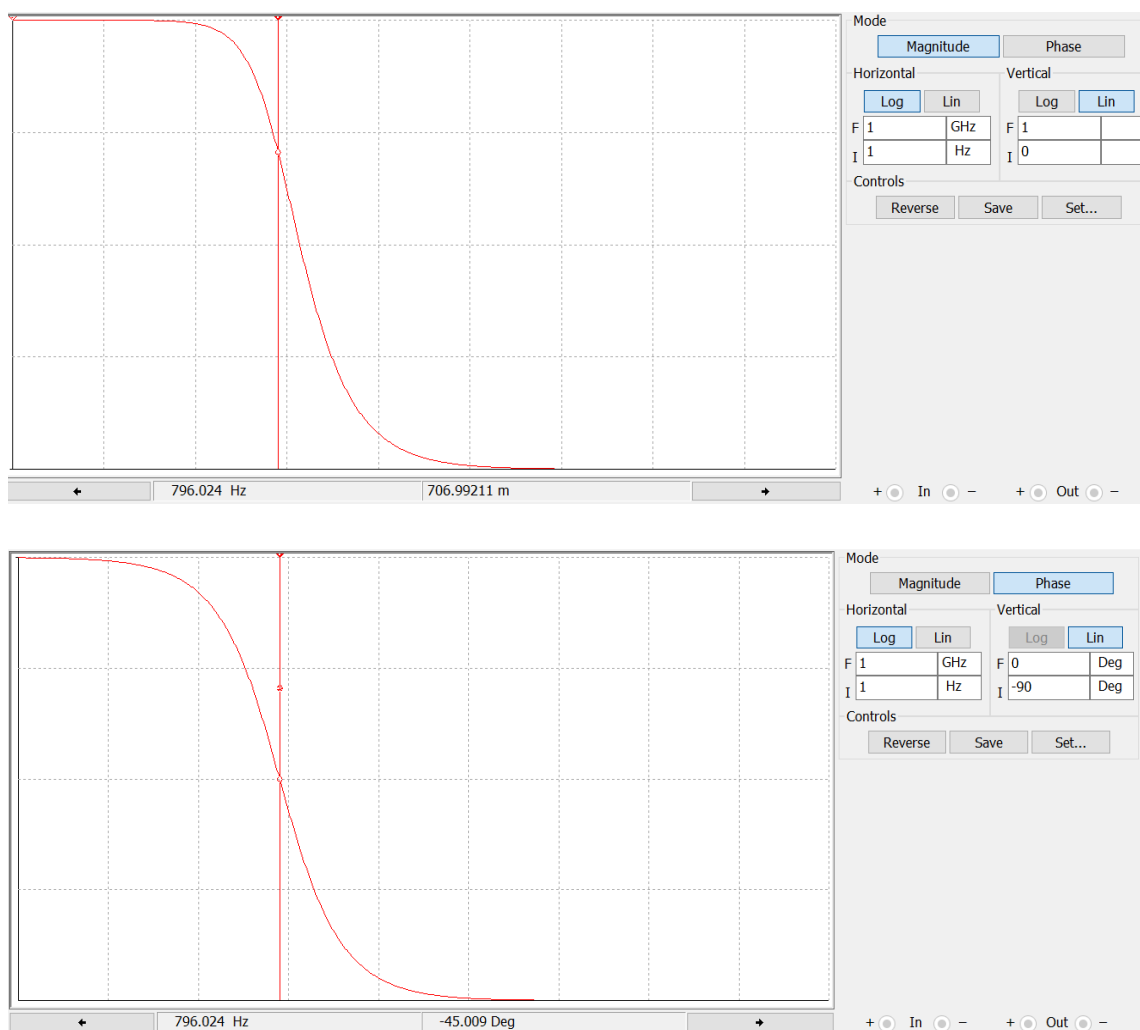
如图 3.48 所示电路,用波特图仪测试该电路的幅频特性时,将垂直坐标的坐标类型选择为线性(Lin),起始值(I)、终止值(F)分别设 0 和 1,将水平坐标类型选为对数,起始值(I)和终止值(F)分别设为 1MHz 和 1GHz 测试相频特性时,将垂直坐标起始值(I)、终止值(F)别设置为-90 和 0。测量该低通滤波器的截止频率和后对应的相位差以及电压比。

$$f_c = 796.024 \text{ Hz}$$

$$\varphi = -45.009^\circ$$

$$|H| = 0.706$$





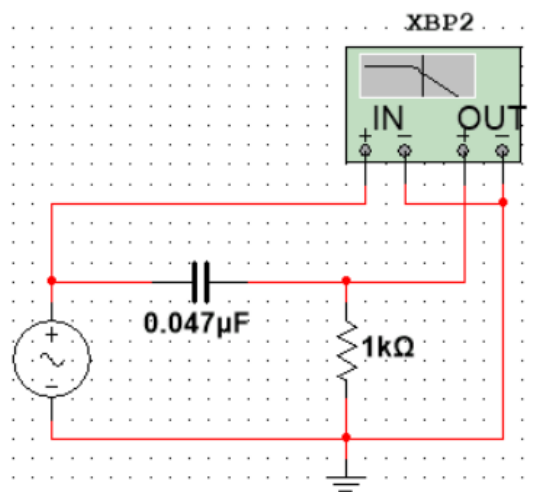
2.测试一阶 RC 高通滤波器的频率特性

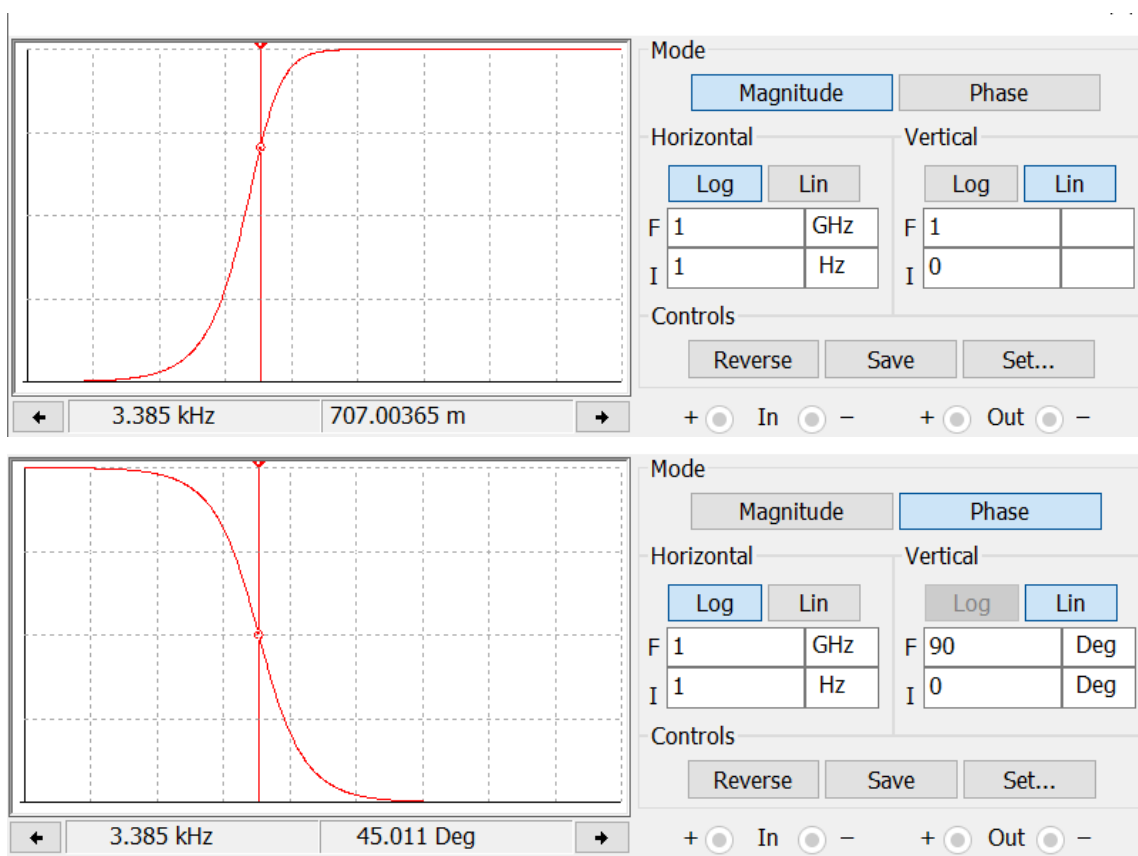
如图 3.49 所示电路,用波特图仪测试该电路的幅频特性时,将垂直坐标的坐标类型选择为线性(Lin),起始值(I)、终止值(F)分别设置 0 和 1,水平坐标的设置同实验内容测试相频特性时,将垂直坐标起始值(I)、终止值(F)分别设置为 0 和 90。测试该电路的截止频率 f_c 和 f_c 对应的相位差以及电压比。

$$f_c = 3.385 \text{ kHz}$$

$$\phi = 45.011^\circ$$

$$|H| = 0.707$$





4.测试 RLC 带通电路的频率特性和品质因数

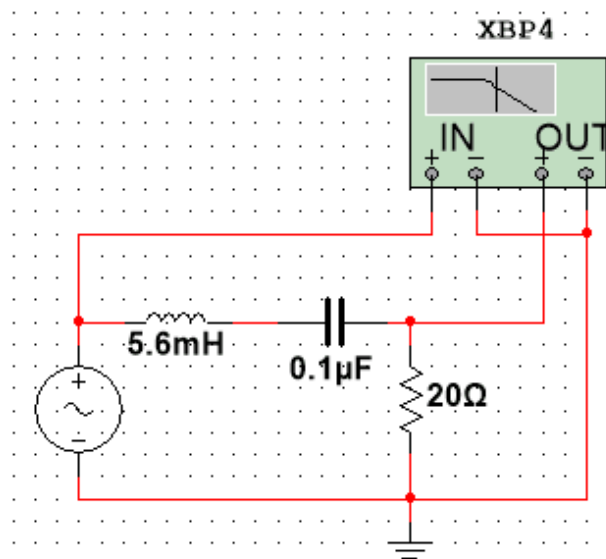
如图 3.51 所示电路。用波特图仪测试该电路的幅频特性时,将垂直坐标的坐标类型选择为线性(Lin),起始值(I)、终止值(F)分别设置为 0 和 1,测试相频特性时,将垂直坐标起始值(I)、终止值(F)分别设置为-90 和 90,测试谐振频率 f_0 、上限截止频率 $f_{\text{上}}$ 、下限截止频率 $f_{\text{下}}$ 和与之相对应的相位差、电压比,并计算出 Q 。 $Q=f_0/(f_2 - f_1)$ 。

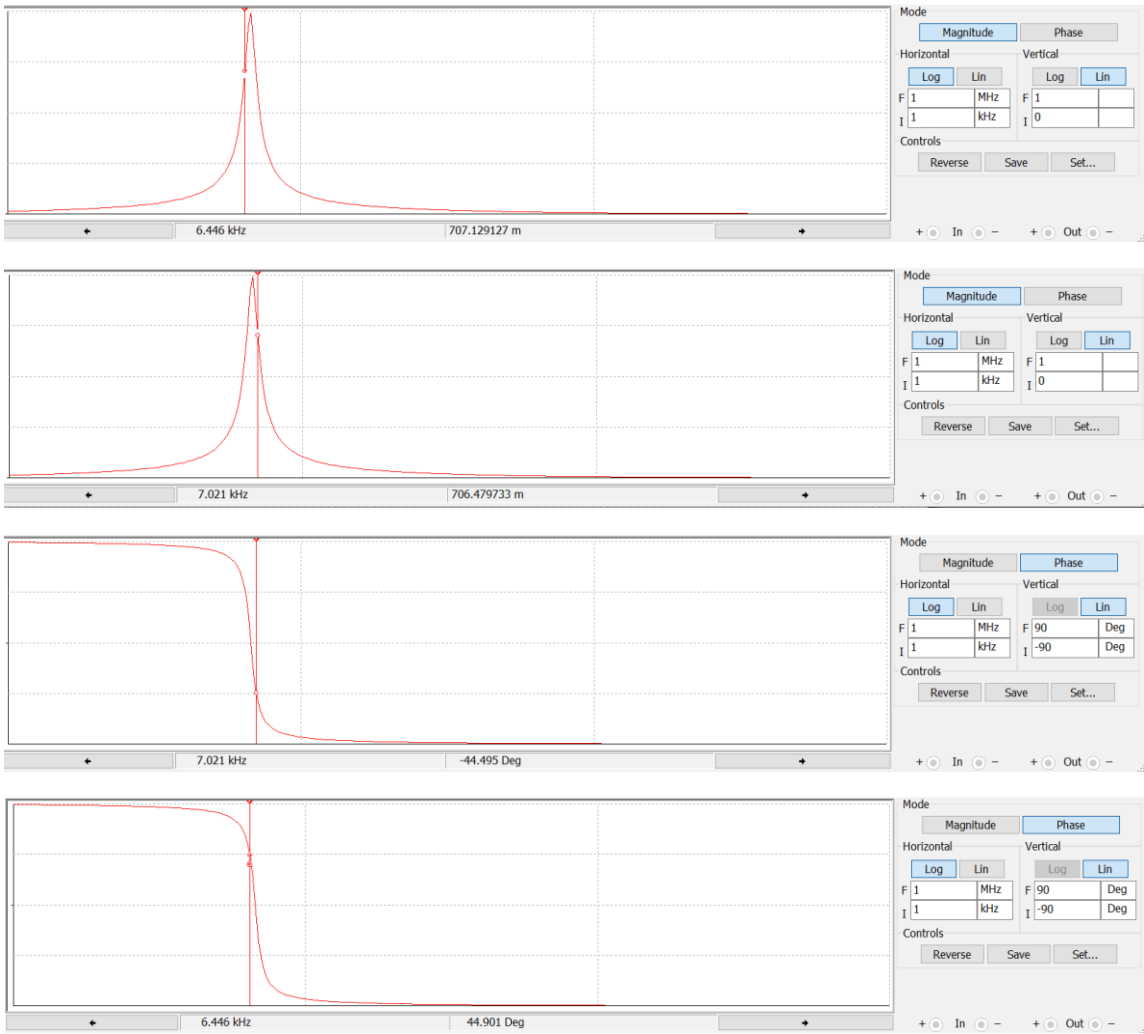
$$f_{\text{上}}=7.021\text{kHz} \quad \varphi_{\text{上}}=-44.495^\circ \quad |H_{\text{上}}|=0.706$$

$$f_{\text{下}}=6.446\text{kHz} \quad \varphi_{\text{下}}=44.901^\circ \quad |H_{\text{下}}|=0.707$$

$$f_0=6.754\text{kHz} \quad \varphi_0=5.751^\circ \quad |H_0|=0.989$$

$$Q=11.746$$





RLC串联谐振电路

一、实验目的

1. 熟悉RLC串联谐振电路的特点,加深对串联谐振电路特性的理解;
2. 掌握RLC串联谐振电路各参数的测量方法;
3. 掌握用实验方法测量、绘制RLC电路频率特性曲线的方法;
4. 研究电路元件参数对谐振频率、品质因数和带宽的影响。

二、主要仪器设备

1. 函数信号发生器;
2. 双踪示波器;
3. 交流毫伏表;
4. 实验箱。

三、实验原理

对于含有动态元件的 RLC 串联电路,回路中的总阻抗随着电路输入信号的频率改变而改变,当频率达到某个频率点时,回路中的容抗和感抗相等,电路呈纯阻性,此时加在电路两端的输入电压和回路中的总电流同相,这种现象称为谐振,此时的输入信号频率就是谐振频率。

1. RLC 串联电路(见图 3.53)的阻抗是电源角频率 ω 的函数,即

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = |Z| \angle \phi \quad (3.10.1)$$

当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时,电路处于串联谐振状态,谐振角频率为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.10.2)$$

谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.10.3)$$

显然,谐振频率仅与元件 L、C 的数值有关,与电阻 R 无关。当 $\omega < \omega_0$ 时,电路呈容性,阻抗角 $\phi < 0$; 当 $\omega > \omega_0$ 时,电路呈感性,阻抗角 $\phi > 0$ 。

2. 电路处于谐振状态时的特性

(1) 谐振时,由于回路总电抗 $X_0 = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$, 因此,回路阻抗 $|Z_0|$ 为最小值,整回路相当于一个纯电阻电路,激励电源的电压 u_s 与回路的响应电流同相位。

(2) 在激励电压(有效值)不变的情况下,回路中的电流 $I = \frac{U_s}{R}$ 为最大值

(3) 谐振时感抗(或容抗)与电阻 R 之比称为品质因数 Q, 即

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{R} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C} R} \quad (3.10.4)$$

品质因数 Q 是一个只与电路参数 R、L、C 有关的量,它的大小反映了谐振电路的特征。在 L 和 C 为定值的条件下, Q 值仅由回路电阻 R 的大小决定。

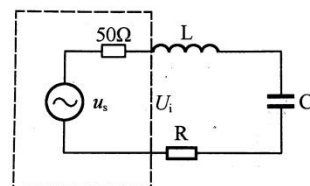


图 3.53 RLC 串联电路

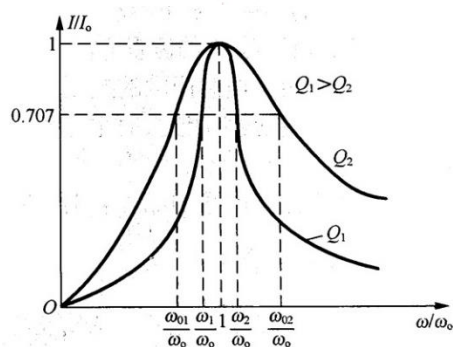


图 3.54 电流谐振曲线

(4)谐振时,由于感抗 $\omega_0 L$ 与容抗 $\frac{1}{\omega_0 C}$ 相等,所以电感上的电压 U_L 与电容上的电压 U_C 数值相等,且等于输入电压的 Q 倍,它们的相位差为 180°

3. 电路发生谐振的判别方法

(1)用示波器观察激励电源的电压与回路的响应电流的波形(即电阻两端的电压波形),当两个波形相位差为 0° ,即电流、电压同相时,电路发生谐振。

(2)在激励电压(有效值)不变的情况下,谐振时,回路中的电流 $I = \frac{U_s}{R}$ 为最大值。以用交流毫伏表测量电阻两端的电压达到最大值时,电路发生谐振。

4. 串联谐振电路的频率特性

回路的响应电流与激励电压的角频率的关系称为电流的幅频特性(表明其关系的图形为串联谐振曲线),表达式为

$$I(\omega) = \frac{U_s}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_s}{R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (3.10.5)$$

当电路的 L 和 C 保持不变时,改变 R 的大小,可以得到不同 Q 值时电流的幅频特性曲线(见图 3.54)。显然 Q 值的大小影响曲线的尖锐程度。

为了反映一般情况,通常研究电流比 I/I_0 与角频率 ω/ω_0 之间的函数关系。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (3.10.6)$$

这里, I_0 为谐振时的回路响应电流。 ω_0 为谐振角频率, ω 为输入信号的角频率, I 为回路的响应电流。

串联谐振电路的电流通用谐振曲线可以由上式计算得出,也可以用实验方法测定。具体测量方法是:保持输入信号电压幅度不变,在较宽的频率范围内合理选择频率点,改变信号频率后,测量电阻两端的电压,再计算出相应的电流,然后在以电流比为纵坐标,角频率比为横坐标的坐标系下描点画线得到的曲线即为串联谐振电路的电流通用谐振曲线。

图 3.54 画出了不同 Q 值下的串联谐振电路的通用谐振曲线。从图中可以看出,信号角频率在 ω_0 附近时电路的电流大,而远离 ω_0 时电路的电流小,电路的这种性质称为选择性。显然, Q 值越高,曲线越尖锐,电路的选择性好。为了衡量谐振电路对不同频率的选择能力,定义通用幅频特性中幅值下降至峰值的 0.707 倍时的频率范围为通频带(以 BW 表示)

即

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} \quad (3.10.7)$$

式中, f_2 为上截止频率, f_1 为下截止频率(也称半功率点频率)

5. 谐振电路的测量

(1)谐振频率的测量:与判别电路发生谐振的方法相对应,测量谐振频率的方法有两种,

①用示波器观察激励电源的电压与回路的响应电流的波形(即电阻两端的电压波形),保持输入信号电压幅值(有效值)不变,改变输入信号的频率,当两个波形同相位,即两个波形的相位差为 0° 时,电路发生谐振。此时输入信号的频率就是谐振频率。

②保持输入信号电压幅值(有效值)不变,改变输入信号的频率,用交流毫伏表测量电阻两端的电压,当电压达到最大值时,电路发生谐振。此时输入信号的频率就是谐振频率。

(2)串联谐振曲线的测量:采用逐点测量法,保持输入信号电压幅值不变,先测出谐振频率 f_0 ,再分别测出两个半功率点 f_1 、 f_2 ;然后,依次从低到高选择若干频率点,改变输入信号的频率,测量电阻两端的电压,计算出相应的电流值:最后,在以 $\frac{f}{f_0}$ 为横坐标,以 $\frac{I}{I_0}$ 为纵坐标的坐标系下描点画线得到的光滑的曲线即为串联谐振曲线。

频率点 f_1 、 f_2 是当电阻两端的电压幅度下降到最大值(谐振时电阻两端的电压)的 0.707 倍时所对应的输入信号的频率,称为下半功率点频率和上半功率点频率,则通频带 $BW=f_2 - f_1$ 在输入信号频率为 f_1 时,电路中电流超前电压 45° ,电路呈容性;在输入信号频率为 f_2 时,电路中电压超前电流 45° ,电路呈感性。根据这两种特征可以用两种方法测量半功率点:

①用示波器观察激励电源的电压和电阻两端的电压波形,保持输入信号电压幅值(有效值)不变,改变输入信号的频率,测量激励电源的电压和电阻两端的电压波形的相位差。当两个波形的相位差等于 45° 时,此时输入信号的频率即为下半功率点频率或上半功率点频率。(在测量时注意区分下半功率点频率和上半功率点频率。)

②保持输入信号电压幅值(有效值)不变,改变输入信号的频率,用交流毫伏表测量电阻两端的电压,当电阻两端的电压达到最大值(谐振时电阻两端的电压)的 0.707 倍时,此时输入信号的频率就是下半功率点频率或上半功率点频率。

(3)品质因数 Q 的测量方法:

①谐振时,电感两端的电压和电容两端的电压相等并且等于输入电压 U 的 Q 倍。所以测量 Q 可以通过测量谐振时电容两端的电压 U 或电感两端的电压 U_L 以及输入信号的电压 U,则 $Q=U_c/U_i=U_L/U_i$

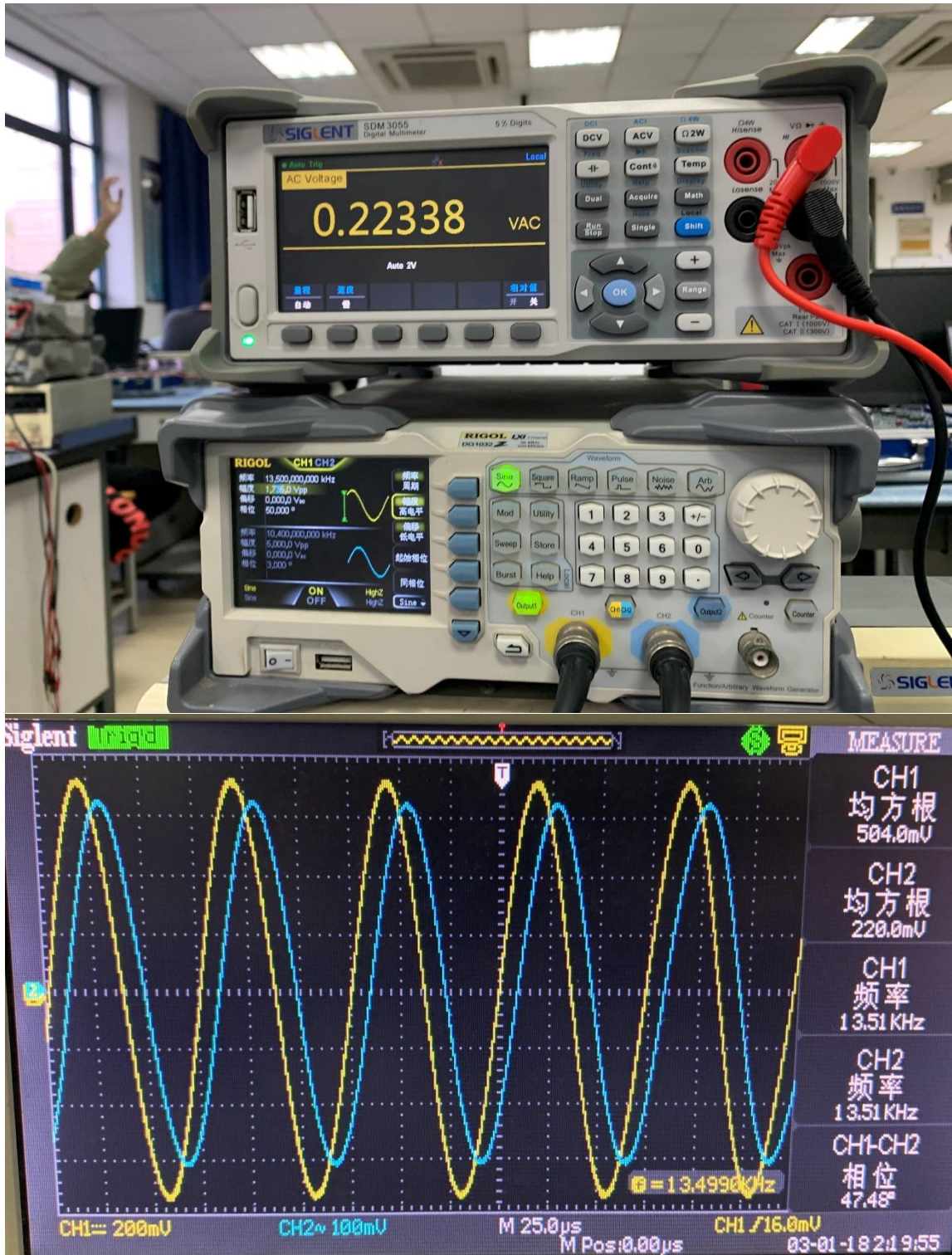
②因为品质因数 $Q=f_0/(f_2 - f_1)$,所以 Q 可以通过测量谐振频率和通频带后计算得到。

四、实验内容

- 1.按图3.53所示电路组成实验电路,图中 $R=20\Omega$, $L=5.6\text{mH}$, $C=0.1\mu\text{F}$, $U=3\text{V}$ 。
- 2.用示波器和交流毫伏表测量该电路的谐振频率。
- 3.用示波器和交流毫伏表测量该电路的通频带。
- 4.按表3.13数据表格,合理选择频率点,测量该电路的谐振曲线。
- 5.用两种方法测量Q值,比较这两种方法的测量误差及产生原因。

逐点法测量电路的谐振曲线的数据表格

| f(kHz) | 2.0 | 4.0 | 5.0 | 8.3 (f_1) | 9.0 | 10.2 (f_0) | 12.0 | 13.5 (f_2) | 15.0 | 20.0 | 25.0 | 30.0 |
|--------------|------------|------------|------------|------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| $U_{rt}(mV)$ | 0.02 99 | 0.06 75 | 0.09 99 | 0.22 80 | 0.29 82 | 0.32 25 | 0.27 97 | 1.22 80 | 1.18 03 | 0.11 21 | 0.08 14 | 0.06 45 |
| I(mA) | 0.02 99 | 0.06 75 | 0.09 99 | 0.22 80 | 0.29 82 | 0.32 25 | 0.27 97 | 1.22 80 | 1.18 03 | 0.11 21 | 0.08 14 | 0.06 45 |



误差原因:

- ① L、C都不是理想元件，存在着一定的阻抗，导致 U_L 、 U_C 偏高，Q值偏大
- ②测量通频带宽度产生误差，导致结果出现偏差。