



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)

实验名称: 传输网络频率特性的研究

RLC 串联谐振电路

学 院: 集成电路科学与工程学院

(产教融合学院)

班 级: B240305

学 号: B24030513

姓 名: 李宝宣

指导教师: 郑开来

学 期: 2025-2026 学年第 一 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、主要仪器设备及软件

软件：Multisim 14.3

## 三、实验原理

### 1. RC 低通网络

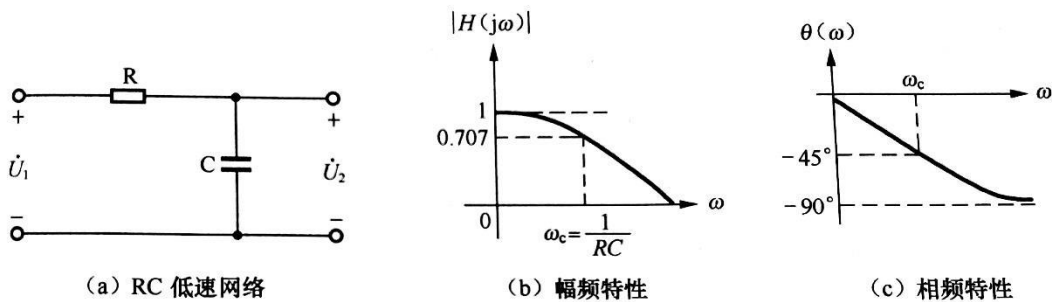


图 1 RC 低通网络及其频率特性曲线

图 1 所示为 RC 低通网络，它的传输函数为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{U_2}{U_1} = \frac{1/(j\omega C)}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\tan^{-1}(\omega RC) \\ |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \\ \phi(\omega) &= -\tan^{-1}(\omega RC) \end{aligned}$$

式中， $|H(j\omega)|$  为幅频特性，显然它会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被抑制。

通常把  $U_2$  降低到  $0.707U_1$  时的角频率  $\omega$  称为截止角频率  $\omega_c$ ，即  $\omega = \omega_c = \frac{1}{RC}$ 。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  $-45^\circ$ 。

### 2. RC 高通网络

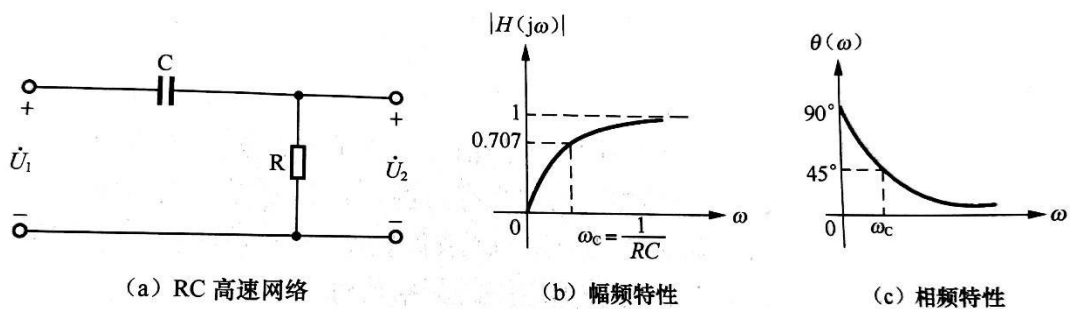


图 2 RC 高通网络及其频率特性曲线

图 2 所示为 RC 高通网络，它的网络传输函数为

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

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}} \angle 90^\circ - \arctan(\omega RC)$$

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  $\omega_c = \frac{1}{RC}$ ，当  $\omega = \omega_c$  时， $|H(j\omega)| = 0.707$ 。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  $45^\circ$ 。

### 3.RC 带通网络 (RC 选频网络)

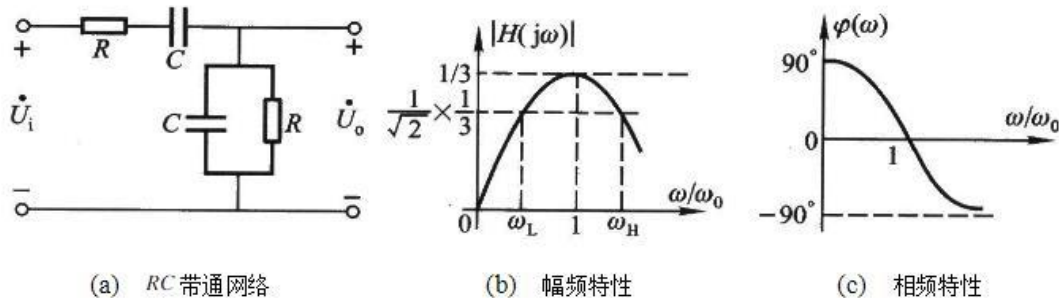


图 3 RC 带通网络及其频率特性曲线

图 3 所示为 RC 带通网络。该网络允许以  $\omega = \omega_0 = 1/RC (\neq 0)$  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。且信号频率偏移  $\omega = 1/RC$  越远，信号衰减的越厉害。 $\omega_0$  称为中心角频率，此时输入、输出信号之间的相位差为  $0^\circ$ 。

### 4.RC 带阻网络

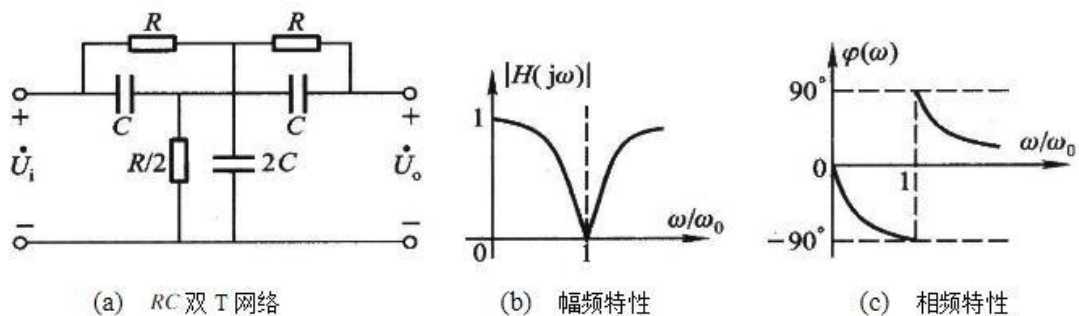


图 4 RC 带阻网络及其频率特性曲线

图 4 所示为 RC 带阻网络。该网络使以  $\omega = \omega_0 = 1/RC (\neq 0)$  为中心的、一定频率范围（频带）内的信号受阻，而其他频率的信号允许通过。

#### 四、实验电路图

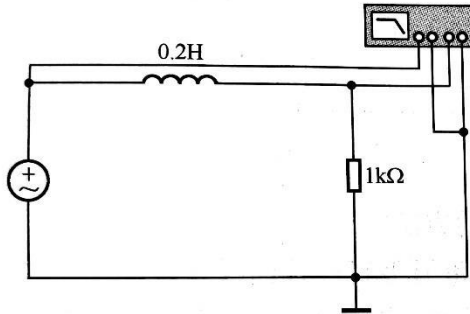


图 5 RL 低通电路

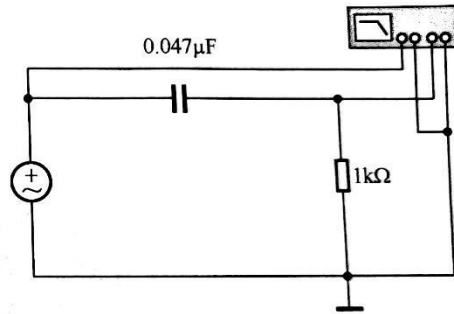


图 6 RC 高通电路

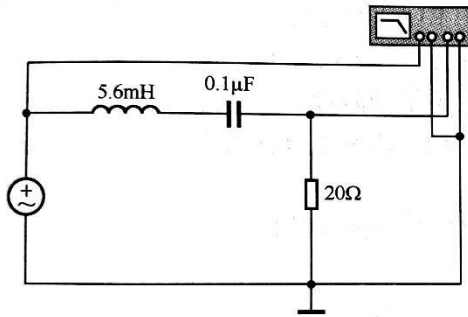


图 7 RLC 带通电路

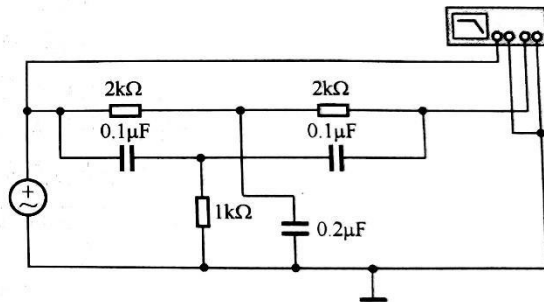


图 8 RC 带阻电路

#### 五、实验内容和实验结果

##### 1. 测试一阶 RL 低通滤波器的频率特性

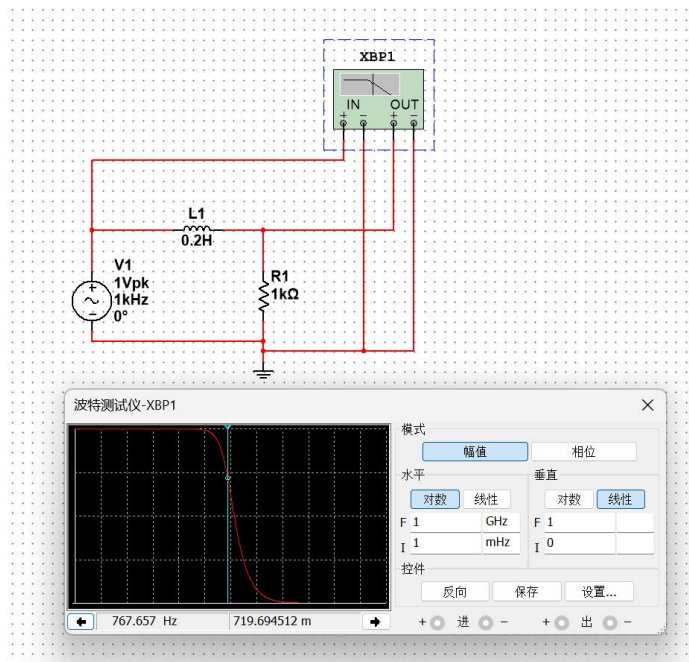


图 9 一阶 RL 滤波电路幅频特性测试

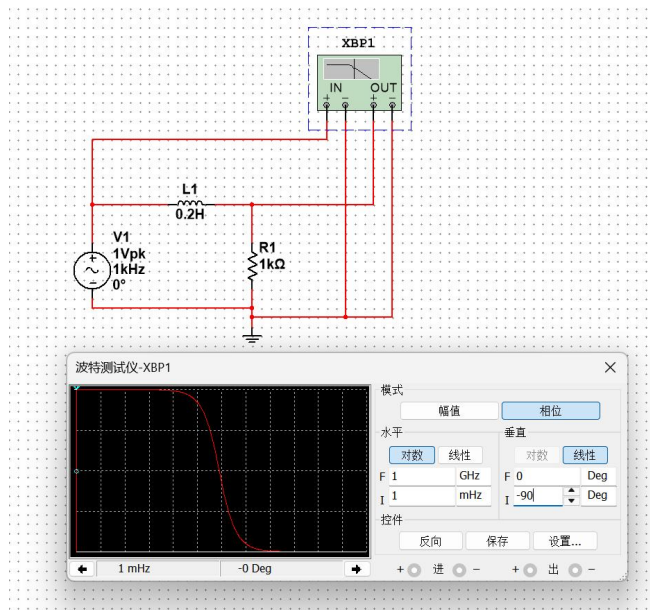


图 10 一阶 RL 低通电路相频特性测试

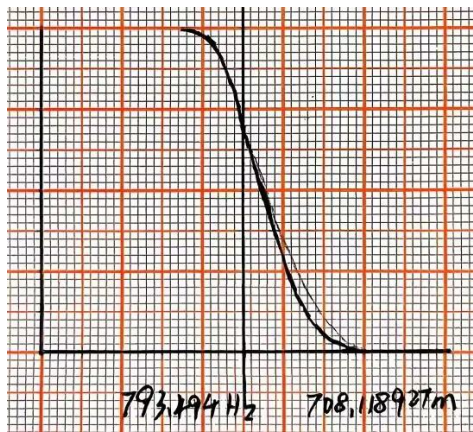


图 11 一阶 RL 低通电路幅频特性

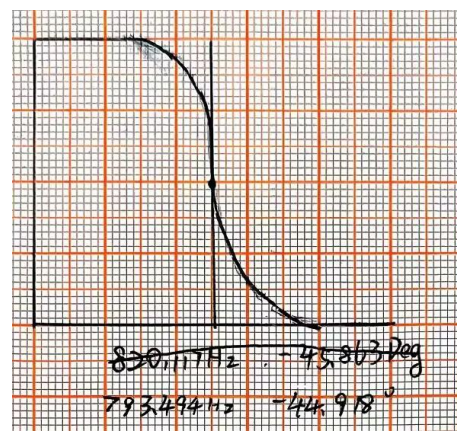


图 12 一阶 RL 低通电路相频特性

该低通滤波器的截止频率  $f_c = 793.494 \text{ Hz}$ , 对应的相位差  $\theta = -44.918^\circ$ , 电压比  $|H| = 0.708$ 。

## 2. 测试一阶 RC 高通滤波器的频率特性

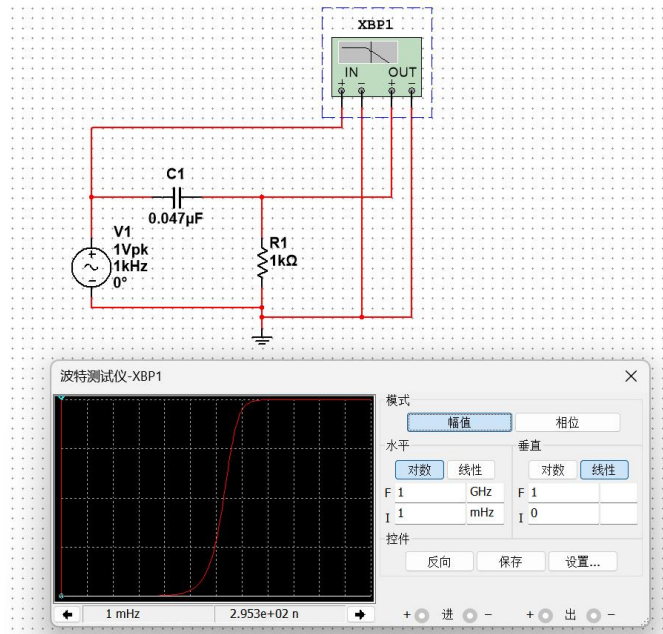


图 13 一阶 RC 高通电路幅频特性测试

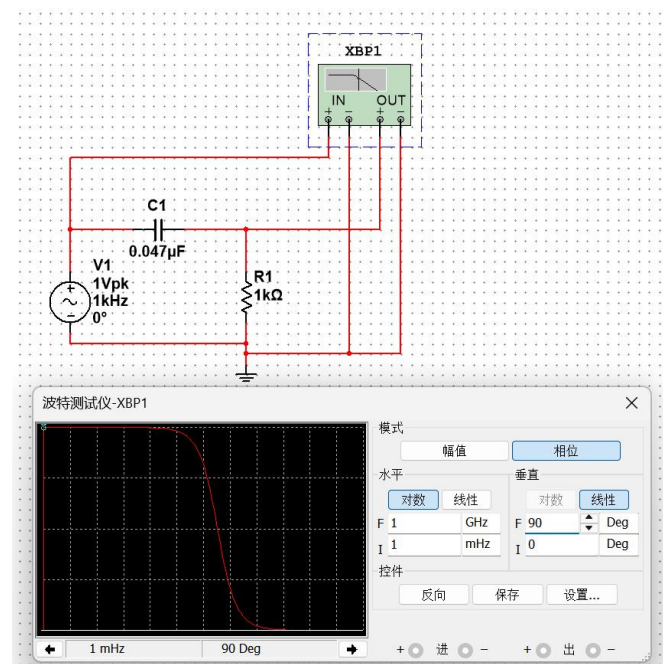


图 14 一阶 RC 高通电路相频特性测试

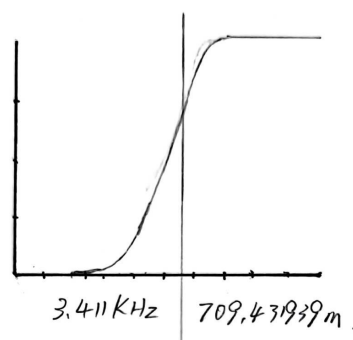


图 15 一阶 RC 高通电路幅频特性



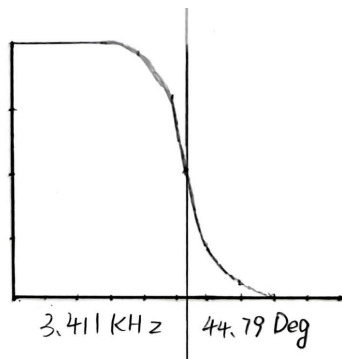


图 16 一阶 RC 高通电路相频特性

该高通滤波器的截止频率  $f_c=3.411\text{kHz}$ , 对应的相位差  $\theta=44.79^\circ$ , 电压比  $|H|=0.709$ 。

### 3. 测试 RLC 带通电路的频率特性和品质因数

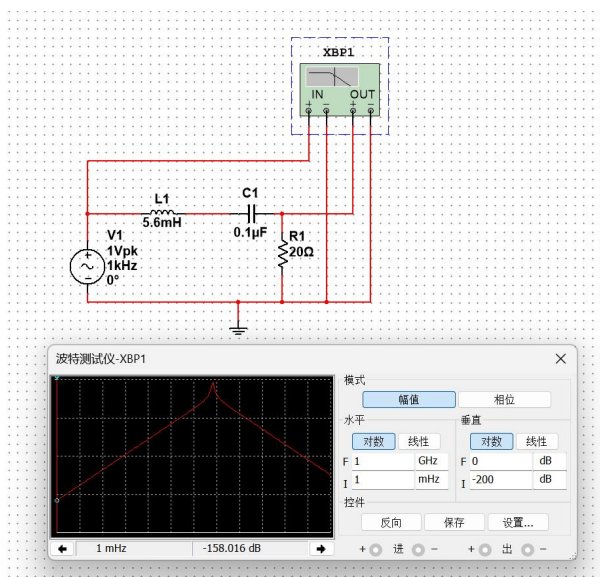


图 17 RLC 带通电路幅频特性测试

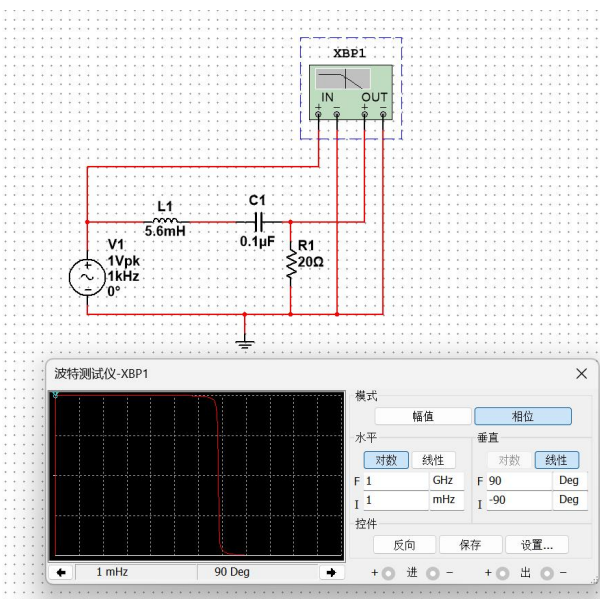


图 18 RLC 带通电路相频特性测试

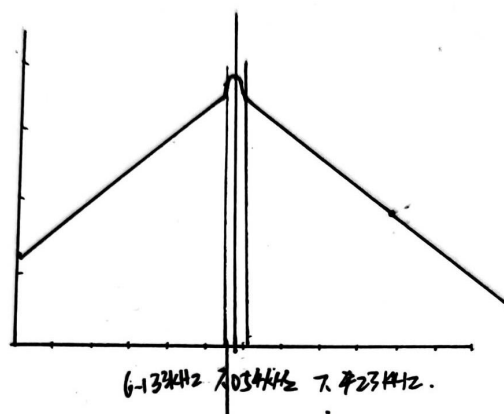


图 19 RLC 带通电路幅频特性

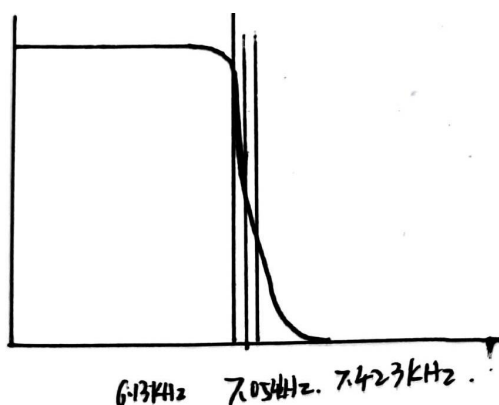


图 20 RLC 带通电路相频特性

表 1 RLC 带通电路测量结果

	$f/\text{kHz}$	$\phi/^\circ$	$ H $
上限频率	7.423	-45	0.707
谐振频率	7.054	0	1
下限频率	6.133	45	0.707
品质因数 $Q$	$Q=f_0/ f_{\text{上}}-f_{\text{下}} =5.00$		

#### 4. 测试带阻网络的频率特性



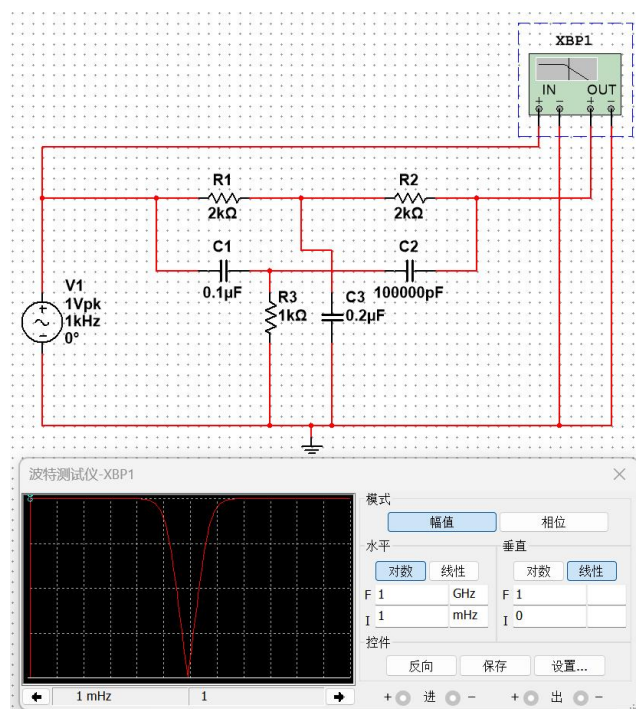


图 21 带阻电路幅频特性测试

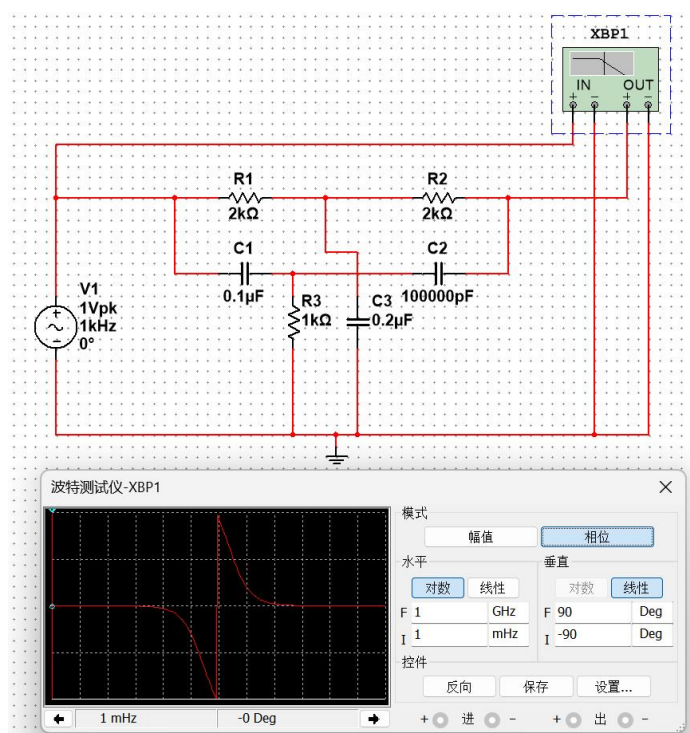


图 22 带阻网络相频特性测试

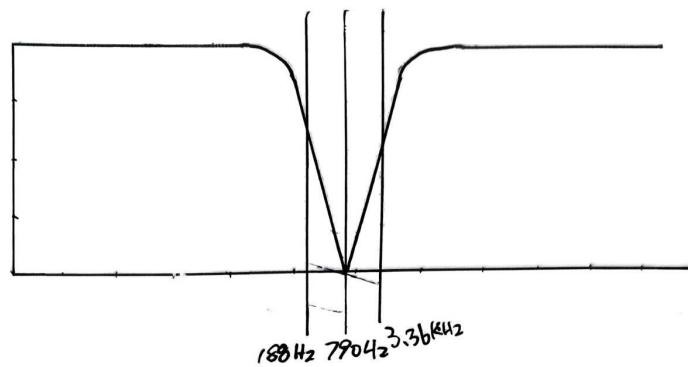


图 23 带阻网络幅频特性

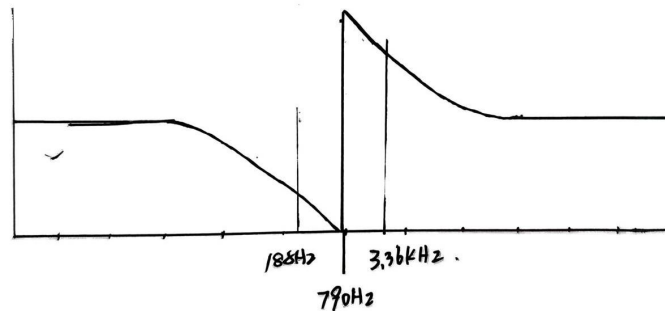


图 24 带阻网络相频特性

表 2 带阻电路测量结果

	f/kHz	$\Phi/^{\circ}$	H
上限频率	3.36	-45	0.707
谐振频率	0.790	N/A	1
下限频率	0.188	45	0.707

## 六、结果分析

本实验通过 Multisim 软件仿真，成功测量了四种基本滤波网络的频率特性，所有实测数据与理论预测高度吻合，有效验证了相关原理。

首先，对于一阶 RL 低通和 RC 高通滤波器，实测数据完美符合理论模型。RL 低通电路的截止频率为 793.494 Hz，该点的电压传输比（增益）为 0.708，相位差为  $-44.918^{\circ}$ ；RC 高通电路的截止频率为 3.411 kHz，该点增益为 0.709，相位差为  $44.79^{\circ}$ 。两者在截止频率处的增益均极为接近理论值 0.707，相位差也近乎理想的  $\pm 45^{\circ}$ ，充分证明了一阶滤波器幅频与相频特性的正确性。

其次，对于 RLC 带通电路，实验精准地捕捉到了其核心谐振参数。测得的中心谐振频率为 7.054 kHz，上限截止频率为 7.423 kHz，下限截止频率为 6.133 kHz。据此计算出的品质因数 Q 值为 5.00。在谐振点时，输入与输出信号相位差为零度，增益达到最大值 1；在两个半功率点（截止频率）处，增益均下降至 0.707，相位差分别为  $+45^{\circ}$  和  $-45^{\circ}$ 。这些数据系统地验证了带通电路的选频特性。

最后，RC 带阻网络的测试结果也明确展示了其阻碍特定频率信号的特性。实验数据显示，在中心频率 0.790 kHz 处信号受到最大衰减，并在设定的上下限频率点满足增益条件，完成了对带阻理论的验证。

## 七、实验小结

本实验利用 Multisim 仿真平台，系统地对低通、高通、带通和带阻四种基本滤波网络进行了频率特性研究。实验结果与理论分析高度一致，不仅深化了对网络传输函数、幅频特性（截止频率、增益）及相频特性（相位变化）的理解，更熟练掌握了使用先进软件工具进行电路特性分析的方法。整个实验过程顺利，数据可靠，为后续的硬件电路设计与调试提供了坚实的理论依据和实践经验。

# 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、主要仪器设备及软件

硬件：函数信号发生器，示波器，交流毫伏表，实验箱、阻容元件若干。

软件：Multisim 14.3

## 三、实验原理

### 1. 谐振条件与谐振频率

当正弦交流信号作用于 RLC 串联电路时，其阻抗  $Z$  是信号角频率  $\omega$  的函数：

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C)$$

当回路总电抗为零，即满足  $\omega L = 1/(\omega C)$  时，电路发生串联谐振，呈纯电阻性。此时的角频率  $\omega_0$  和频率  $f_0$  称为谐振角频率和谐振频率，它们仅由电感  $L$  和电容  $C$  决定：

$$\text{谐振角频率公式: } \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$\text{谐振频率公式: } f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

### 2. 谐振时的电路特性

谐振时，电路具有以下关键特征：

阻抗最小且为纯阻性：总阻抗  $|Z_0| = R$ ，达到最小值。

电流最大且与电压同相：在输入电压  $U_s$  不变的情况下，回路电流  $I_0 = U_s / R$  达到最大值，且与电源电压相位相同。

电感与电容电压远大于电源电压：谐振时，电感电压  $U_L$  与电容电压  $U_C$  相等，且都是电源电压  $U_s$  的  $Q$  倍，即  $U_L = U_C = Q * U_s$ 。这种现象称为电压谐振。

### 3. 品质因数（Q 值）与频率特性

品质因数  $Q$  是衡量谐振电路性能的关键参数，定义为谐振时感抗（或容抗）与电阻之比：

$$\text{品质因数公式: } Q = \omega_0 L / R = 1/(\omega_0 C R) = (1/R) * \sqrt{L/C}$$

$Q$  值决定了电路的选择性。回路的响应电流  $I$  与角频率  $\omega$  的关系称为幅频特性，其归一化表达式为：

$$\text{电流比公式: } I/I_0 = 1 / \sqrt{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}$$

以  $I/I_0$  为纵坐标、 $\omega/\omega_0$  为横坐标绘制的曲线称为电流谐振曲线。 $Q$  值越高，谐振曲线越尖锐，电路对非谐振频率信号的抑制能力越强，选择性越好。

### 4. 通频带（BW）

通频带是衡量电路可通过频率范围的宽度，定义为电流值下降至最大值  $I_0$  的  $1/\sqrt{2}$  (约 0.707) 倍时所对应的两个频率点（下截止频率  $f_1$  和上截止频率  $f_2$ ）之间的宽度。通频带  $BW$  与  $Q$  值成反比。

$$\text{通频带公式: } BW = f_2 - f_1 = f_0 / Q$$

四、实验电路图

图中  $R=100\Omega$ ,  $L=5.6\text{mH}$ ,  $C=0.047\mu\text{F}$ ,  $U_s=0.5\text{V}$

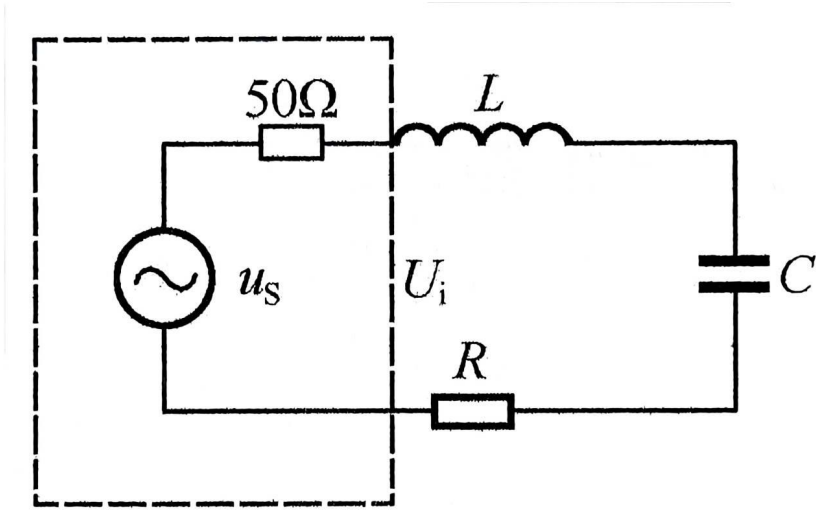


图 25 RLC 串联电路

五、实验内容和实验结果

1. 计算实验电路数据的理论值

如图 25 所示，根据实验电路元器件的理想值，计算该电路的谐振频率  $f_0=9.81\text{kHz}$ ，品质因数  $Q=1.89$ 。

2. 用示波器和台式万用表测量该电路的谐振频率

使用两种方法（幅值法和相位法）测量该电路的谐振频率，记为  $f_0$ ，记录数据于表 3 中。

表 3 RLC 串联电路谐振频率

	$f_0/\text{kHz}$
理论值	9.81
方法一（测量相对幅值为 0.707）	10.38
方法二（测量输出与输入相位差）	10.46

3. 用示波器和台式万用表测量该电路的通频带

使用两种方法（幅值法与相位法）测量该电路的两个半功率点，记为  $f_1$ 、 $f_2$  记录数据于表 4 中，并使用所测值计算出通频带宽度，计算结果填入表 4 中。

表 4 RLC 串联电路通频带

	方法 1（幅值法）	方法 2（相位法）
半功率点 1 频率 $f_1/\text{kHz}$	8.27	8.35
半功率点 2 频率 $f_2/\text{kHz}$	13.27	13.39
通频带 $BW=f_2-f_1/\text{kHz}$	5.04	5.00

4. 计算该电路的品质因数

使用两种方法计算该电路的品质因数：通过通频带与谐振点计算、测量电容/电感上电压计算。并将相关数据填写至表 5 中。

品质因数计算公式： $Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{U_L}{U_i} = \frac{U_C}{U_i}$

表 5 RLC 串联电路品质因数

电感电压 $U_L/V$	1.082
电容电压 $U_C/V$	1.047
品质因数 $Q(U_L)$	2.164
品质因数 $Q(U_C)$	2.094
品质因数 $Q(BW)$	2.092

5. 选择合适的频率点，测量该电路的频率曲线

取不同的输入信号频率值，保持输入电压有效值  $U=500mV$  恒定，测量电阻上的电压响应，并将数据填入表 6 中，绘制频率曲线。

表 6 逐点法测量电路的谐振曲线

$f/kHz$	$U_R/mV$	$I/mA$
1	14.31	0.1431
2	29.23	0.2923
4	65.02	0.6502
6	118.69	1.1869
f1	234.14	2.3414
9	274.64	2.7464
f0	318.57	3.1857
11	308.76	3.0876
12	272.22	2.7222
f2	219.39	2.1939
15	174.88	1.7488
20	106.44	1.0644
30	61.70	0.6170
50	34.76	0.3476
100	16.82	0.1682



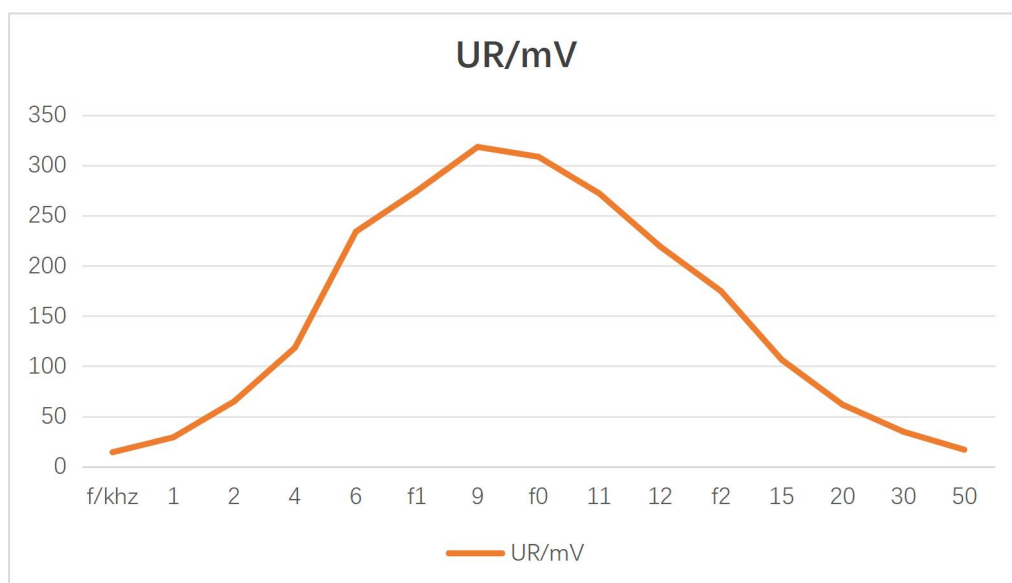


图 26 RLC 谐振电路频率响应曲线

## 6. 简述双迹法

双迹法是一种基于双踪示波器的测量技术，主要用于精确测量和比较两个电信号之间的相位关系和时间差。其核心原理是利用示波器的两个独立输入通道（CH1 和 CH2）同步显示待比较的信号波形，通过共用的时基系统确保两个波形在时间轴上严格对齐。

操作流程如下：

1. 信号接入：将参考信号（如 RLC 电路的总电压）接入 CH1 通道，将待测信号（如电阻电压）接入 CH2 通道
2. 触发设置：选择 CH1 作为触发源，使两个波形稳定同步显示
3. 时基调整：调节水平时基（TIME/DIV），使屏幕显示 1-2 个完整信号周期
4. 位置校准：垂直移动波形使二者的零电平线重合

相位差计算采用公式：

$$\varphi = (\Delta T / T) \times 360^\circ$$

其中  $\Delta T$  为两波形过零点的时间差， $T$  为信号周期。通过直接测量波形上相邻过零点（或峰值点）的水平距离，即可快速计算出相位差。

该方法通过可视化对比显著提高了测量精度，特别适用于分析滤波器、谐振电路等需要观测相位变化的场景。其核心优势在于消除了单通道依次测量时因触发不稳定引入的误差，同时支持实时观测信号相互作用的全过程。

## 7. RLC 实验中监测到的输入电压会随输入频率变化的原因

在 RLC 串联谐振实验中，观测到输入电压随信号频率变化的现象，其根本原因在于实际测量系统的非理想特性，主要可归结为以下两个层面：

### 7.1 信号源内阻的主导作用

这是最核心的因素。任何实际的信号发生器都存在一个固有的输出阻抗，通常为 50 欧姆。此时的完整电路模型为一个理想电压源与其内阻串联后，再与 RLC 串联电路连接。根据分压原理，实际施加在 RLC 电路两端的电压并非信号源的设定电压，而是由两者的阻抗比决定。

由于 RLC 串联电路的总阻抗是其频率的强函数，在远离谐振点时，感抗或容抗的数值很大，使得电路总阻抗远大于信号源内阻。此时，信号源内阻上的压降可以忽略，输入电压基本等于信号源电压。然而，当频率接近谐振点时，感抗与容抗相互抵消，电路总阻抗急剧下降至最小值。当该最小值与信号源内阻的数值相当时，信号源内阻上的分压变得显著，导

致实际加载在 RLC 电路两端的电压出现一个明显的凹陷。

## 7.2 测量系统引入的附加影响

在较高频率下，测量系统的寄生参数也会产生次要影响。示波器探头、连接导线等并非理想导体，其本身存在的分布电容和电感会形成一个复杂的高频响应网络。该网络的等效阻抗会随频率变化，从而与待测电路产生相互作用，轻微地改变系统的整体阻抗匹配状况，对监测到的电压值产生调制。

# 六、结果分析

本实验结合理论计算与硬件测量，深入探究了 RLC 串联谐振电路的各项特性，实测结果与理论预测基本一致，并对存在的偏差进行了合理解释。

在谐振频率测量方面，理论计算值为 9.81 kHz。采用幅值法（电阻电压最大）和相位法（总电压与电流同相）两种方法测得的谐振频率分别为 10.38 kHz 和 10.46 kHz。两种方法结果高度吻合，证明了测量方法的有效性；其数值略高于理论值，主要归因于实际电感元件的寄生参数（如线圈电阻和分布电容）导致电路的实际 L、C 值与标称值存在细微差异。

在通频带与品质因数测量上，结果尤为显著。通过幅值法和相位法测得的通频带宽度分别为 5.04 kHz 和 5.00 kHz，一致性非常好。品质因数的测量采用了三种方法进行交叉验证：通过测量电感和电容上的电压计算得到的 Q 值约为 2.13，通过谐振频率和通频带计算得到的 Q 值约为 2.09。三种方法结果相近，有力地验证了品质因数不同计算公式（ $Q = f_0/BW = U_L/U_S$ ）的等价性和正确性。实测 Q 值高于理论计算值（1.89），这与实测谐振频率偏高以及实际回路电阻略小于理论设定值有关。

此外，通过逐点法绘制的电流谐振曲线直观地展示了电路的选频特性，曲线形态规范，进一步佐证了定量分析的结果。

# 七、实验小结

本实验全面完成了对 RLC 串联谐振电路的研究。通过实践，不仅成功验证了电路在谐振时呈现阻抗最小、电流最大、电抗元件电压远大于电源电压等核心特性，还熟练掌握了测量谐振频率、通频带和品质因数的多种实验方法（幅值法、相位法、电压法）。对测量值与理论值之间偏差的分析，加深了对实际元件非理想特性的认识，理解了工程实践中理论与实际的辩证关系。本实验是一次将抽象理论转化为具体认知的成功实践，显著增强了对谐振现象的深刻理解。