

# 东南大学电工电子实验中心

## 实 验 报 告

课程名称: 电路实验

## 第 4 次实验

实验名称: 双端口网络频率特性测试及谐振电路分析

院（系）： 电子科学与工程

专 业： 电子信息大类（无锡）

姓 名: 孙寒石 学 号: D2219117

实 验 室: 104      实验组别: 17

同组人员： 张扬 实验时间： 2020 年 9 月 10 日

评定成绩: 审阅教师:

## 一、实验目的：

- (1) 掌握低通、高通、带通电路、带阻电路的频率特性；
- (2) 应用 Multisim 软件测试低通、高通、带通电路、带阻电路及有关参数；
- (3) 掌握 Multisim 软件中的交流分析功能测试电路的频率特性；
- (4) 掌握电路谐振及其特征；
- (5) 掌握 RLC 串联谐振现象观察、测量方法。

## 二、实验原理

- (1) 查阅相关资料，了解 Multisim 分析功能。

Multisim 具有较强的分析功能，用鼠标点击 Simulate(仿真)菜单中的 Analysis(分析)菜单(Simulate→Analysis)，可以弹出电路分析菜单。

分析功能包括 DC operating point, AC analysis 等。

DC Operating Point...	直流工作点分析
AC Analysis...	交流分析
Transient Analysis...	瞬态分析
Fourier Analysis...	傅里叶分析
Noise Analysis...	噪声分析
Noise Figure Analysis...	噪声系数分析
Distortion Analysis...	失真分析
DC Sweep...	直流扫描分析
Sensitivity...	灵敏度分析
Parameter Sweep...	参数扫描分析
Temperature Sweep...	温度扫描分析
Pole Zero...	零一极点分析
Transfer Function...	传递函数分析
Worst Case...	最坏情况分析
Monte Carlo...	蒙特卡罗分析
Trace Width Analysis...	导线宽度分析
Batched Analysis...	批处理分析
User Defined Analysis...	用户自定义分析
Stop Analysis	停止分析

交流分析用于分析电路的频率特性。需先选定被分析的电路节点，在分析时，电路中的直流源将自动置零，交流信号源、电容、电感等均处在交流模式，输入信号也设定为正弦波形式。若把函数信号发生器的其它信号作为输入激励信号，在进行交流频率分析时，会自动把它作为正弦信号输入。因此输出响应也是该电路交流频率的函数。

用鼠标点击 Simulate→Analysis→AC Analysis，将弹出 AC Analysis 对话框，进入交流分析状态，AC Analysis 对话框有 Frequency Parameters, Output, Analysis Options 和 Summary 4 个选项，可以用来进行具体要求操作。

- (2) 复习一阶 RC 电路频率特性：

### 1) 网络频率特性的定义

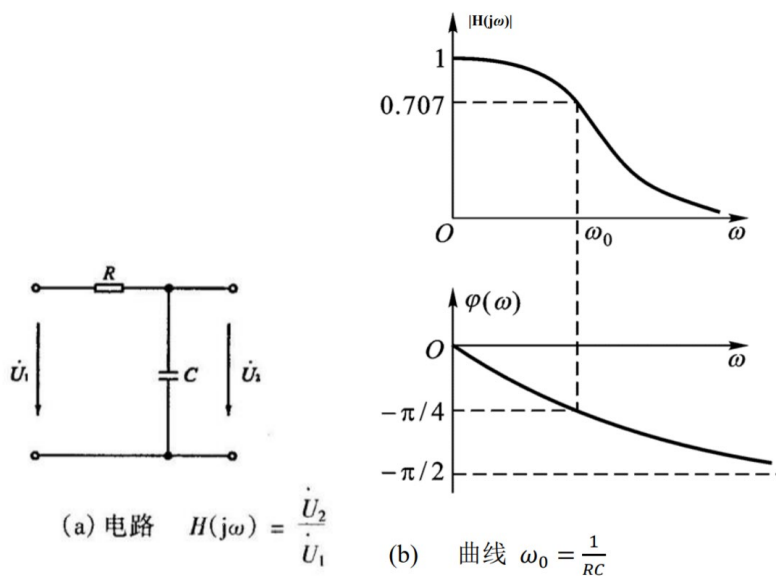
网络的响应向量与激励向量之比是频率的函数，称为正弦稳态下的网络函数。表示为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$$

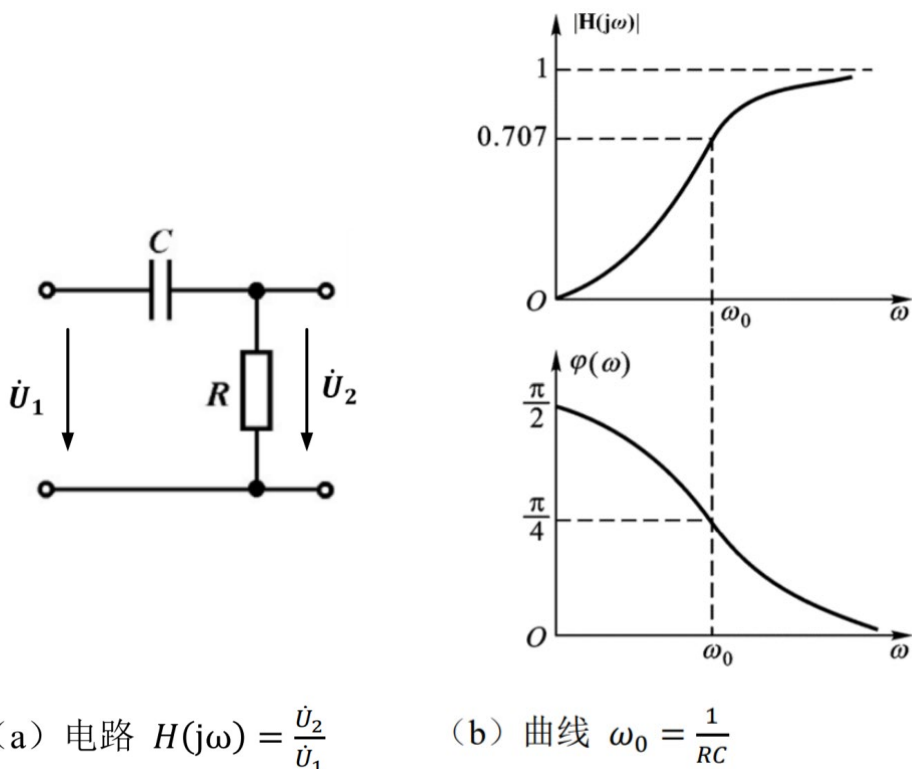
其模 $|H(j\omega)|$ 随频率变化的规律称为幅频特性，相角 $\varphi(\omega)$ 随频率变化的规律称为相频特性，后者表示了响应与激励的相位差与频率的关系。

根据 $|H(j\omega)|$ 随频率变化的趋势，将 RC 网络分为“低通电路”、“高通电路”、“带通电路”、“带阻电路”等。

## 2) 一阶 RC 低通电路频率特性曲线



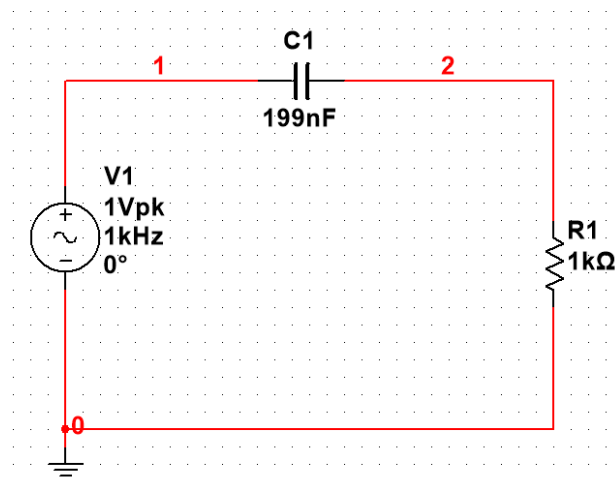
## 3) 一阶 RC 高通电路频率特性曲线



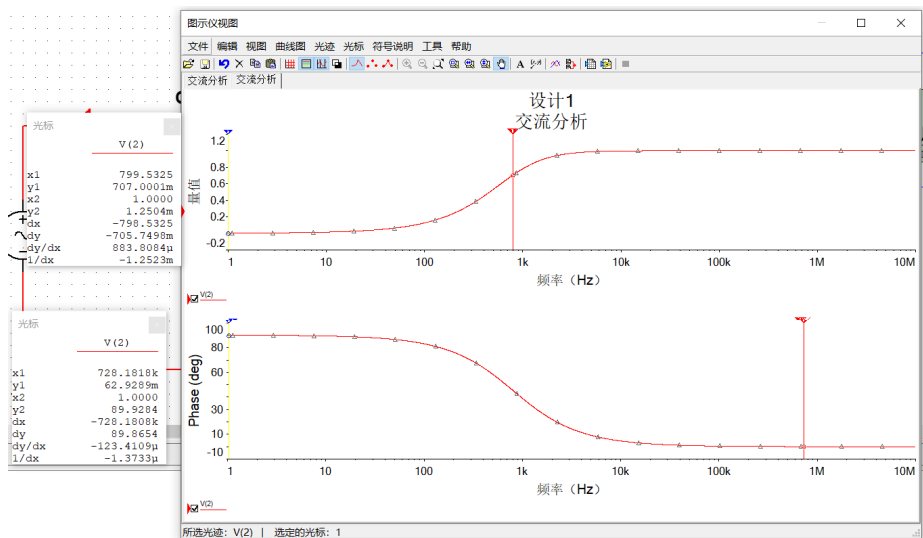
(3) 完成实验内容 2 的设计。

由  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 800\text{Hz}$ ，不妨取 R 为  $1k\Omega$ ，此时计算得到 C 取  $198.94367\text{nF}$ ，我们

在设计电路时，取近似值 199nF。此时电路如下：



经测试发现其 $f_0$ 在 800Hz 左右，符合要求：

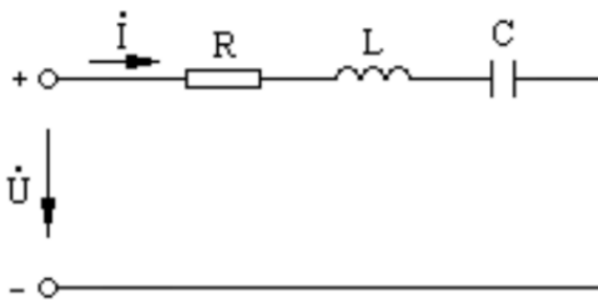


#### (4) 复习相关谐振电路的原理知识。

##### 1) RLC 串联电压谐振

在具有电阻、电感和电容元件的电路中，电路两端的电压与电路中的电流一般是不同相的。如果调节电路中电感和电容元件的参数或改变电源的频率，就能够使得电路中的电流和电压出现了同相的情况。电路的这种状态称为谐振。RLC 串联谐振又称为电压谐振。

由 RLC 组成的串联电路如下图 3 所示。



当感抗等于容抗时，电路的电抗等于零。即  $X_L = X_C; \omega L = \frac{1}{\omega C}; 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC};$

$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$  则  $\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = 0$ ; 即电源电压  $\dot{U}$  电路中电流  $\dot{I}$  同相。

谐振时频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ; 角频率  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ; 周期  $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ 。

串联谐振电路的谐振频率  $f_0$  完全由电路本身的有关参数来决定，是电路本身的固有性质，而且每一个 RLC 串联电路，只有一个对应的谐振频率。因此，只有外施加电压的频率与 RLC 串列电路的谐振频率相等时，电路才会发生谐振。实际应用中往往采用两种方法使电路发生谐振，一种使外施加电压的频率一定，改变电路电感 L 或者电容 C 的方法，使电路满足谐振条件；另一种是电路电感 L 和电容 C 参数一定，采用改变外施加电压的频率的方法，使电路在其谐振频率下达到谐振。

## 2) RLC 串联电压谐振特征

### ①电路的阻抗

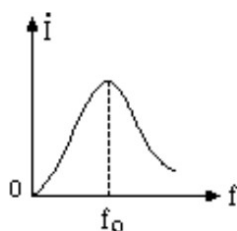
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

电路对电源呈现电阻性，电源供给电路的能量全部被电阻所消耗，电源与电路之间不发生能量互换。能量互换只能发生在电感线圈 L 与电容器 C 之间。

### ②电路的电流

$$I = I_0 = U/R$$

当电源电压 U 不变的情况下，如下图 4 所示，电路的电流将在谐振时达到最大值，电流的大小取决于电阻 R 的大小，电阻 R 越小电流越大。反之电流越小。



### ③电路的电压

$$\dot{U} = \dot{U}_R$$

由于  $X_L = X_C$ ，则  $U_L = U_C$ ，如下图所示， $\dot{U}_L$   $\dot{U}_C$  在相位上相反，互相抵消，对整个电路不起作用，因此电阻  $R$  上电压  $\dot{U}_R$  等于电源电压  $\dot{U}$ 。

$U_L$ 、 $U_C$  单独作用不容忽视，因为  $U_L = IX_L = \frac{U}{R} X_L$ ,  $U_C = IX_C = \frac{U}{R} X_C$ ，当  $X_L = X_C > R$  的时候， $\dot{U}_L$   $\dot{U}_C$  都大于电源电压  $U$ ；当  $X_L = X_C < R$  的时候， $U_L$  和  $U_C$  都小于电源电压  $U$ ；当  $X_L = X_C \gg R$  的时候， $\dot{U}_L$   $\dot{U}_C$  将远远高于电源电压多少倍。

### ④电路的品质因数 Q

$$Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

品质因数  $Q$  也是由电路的参数决定的，当  $L$ 、 $C$  一定， $R$  值越小， $Q$  值越大，谐振曲线越尖锐， $R$  值越大， $Q$  值越小，谐振曲线越平坦。

(5) 理论计算内容 4 RLC 串联电路的谐振频率。

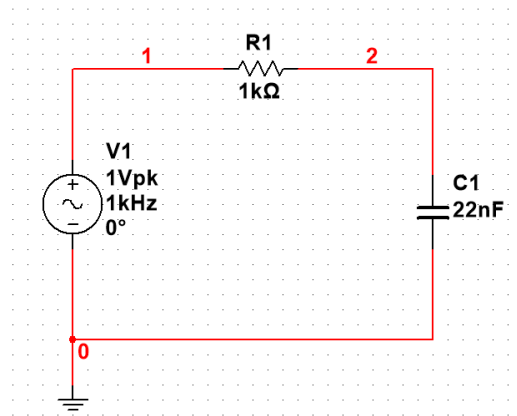
$$\text{由谐振条件 } \omega L = \frac{1}{\omega C}, \text{ 得谐振频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 152,512.764 \text{ Hz}$$

## 三、实验内容

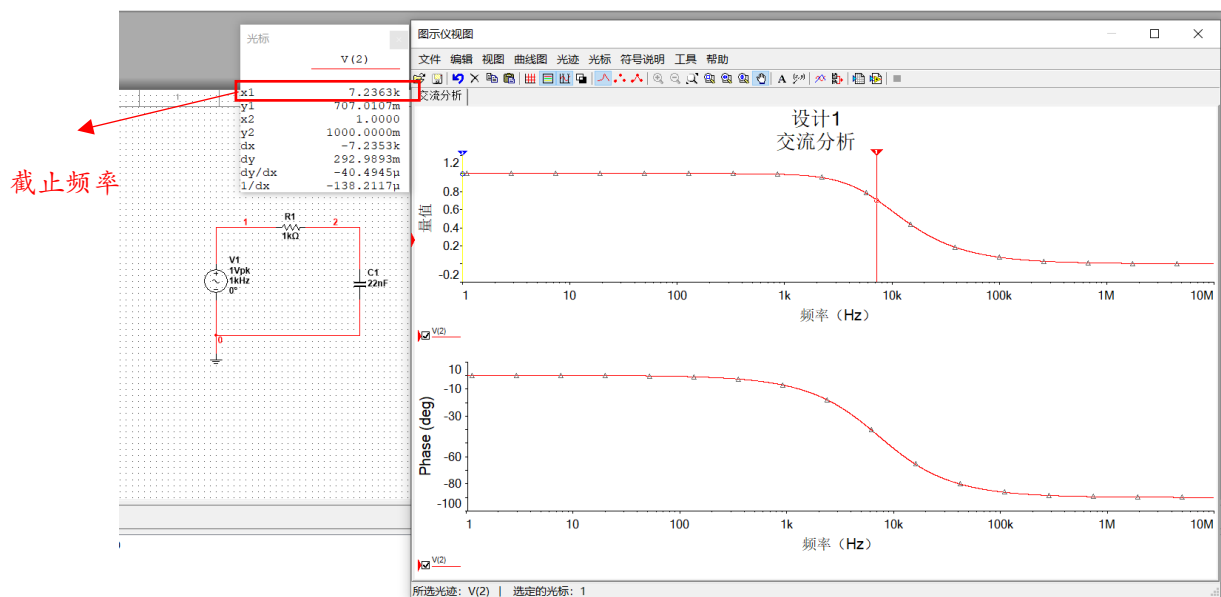
### 1. 用 Multisim 分析功能测试一阶 RC 低通电路的频率特性

(1) 建立电路如图 6。输入信号取信号源库 (Sources) 中的交流电压源 (AC Voltage Source)，双击图标，将其电压设置为 1V，频率设置为 1kHz。

电路图：

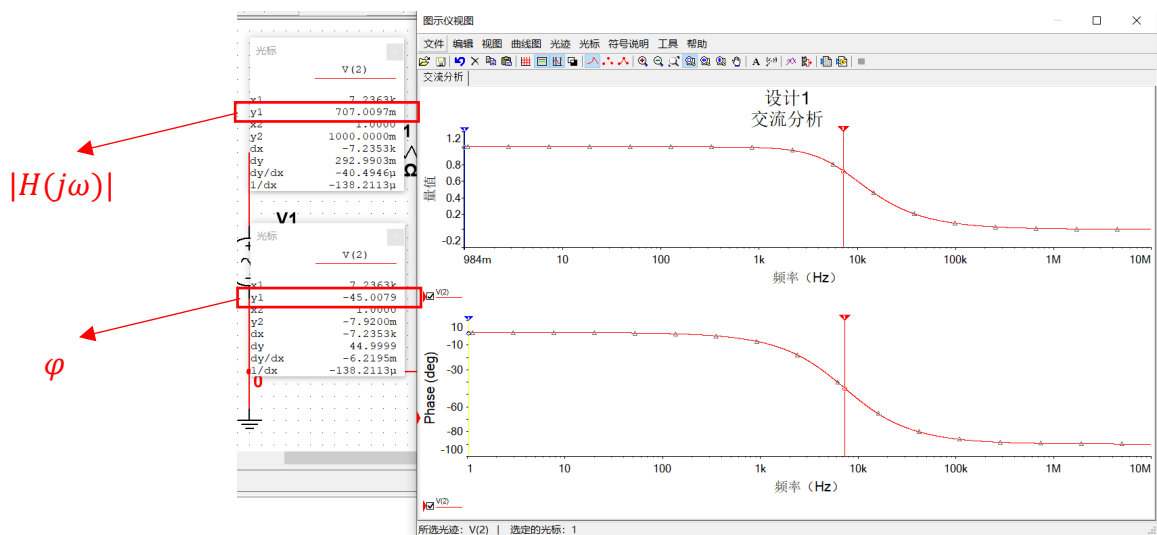


## (2) 测试电路的截止频率 $f_0$



(3) 用上述方法分别测试  $0.01 f_0$ 、 $0.1 f_0$ 、 $0.5 f_0$ 、 $f_0$ 、 $5 f_0$ 、 $10 f_0$ 、 $100 f_0$  点对应的  $|H(j\omega)|$  和  $\varphi$  的值。

截止频率  $f_0$  时的  $|H(j\omega)|$  和  $\varphi$ ：

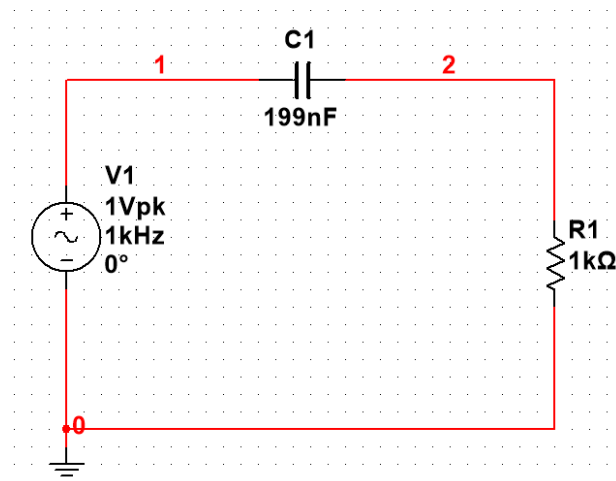


测量	$0.01f_0$	$0.1f_0$	$0.5f_0$	$f_0$	$5f_0$	$10f_0$	$100f_0$
$ H(j\omega) $	999.95m	995.0345m	894.378m	707.0097m	196.0645m	99.4768m	9.9968m
$\varphi(^{\circ})$	-573.0962m	-5.7122	-26.5713	-45.0079	-78.6931	-84.2910	-89.4272

## 2. 设计一阶高通电路，用 Multisim 分析测试其频率特性

设计一个一阶高通电路，要求  $f_0$  在 800Hz 左右。设计电路，并分析测量电路  $f_0$  值。记录电路频率特性曲线。

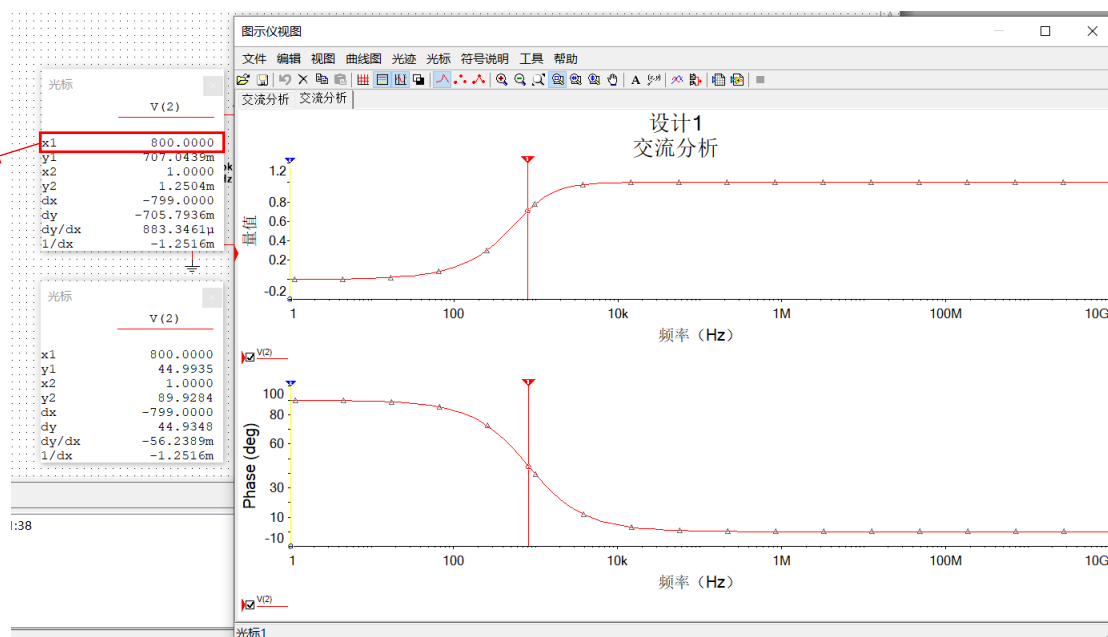
设计的电路如下：



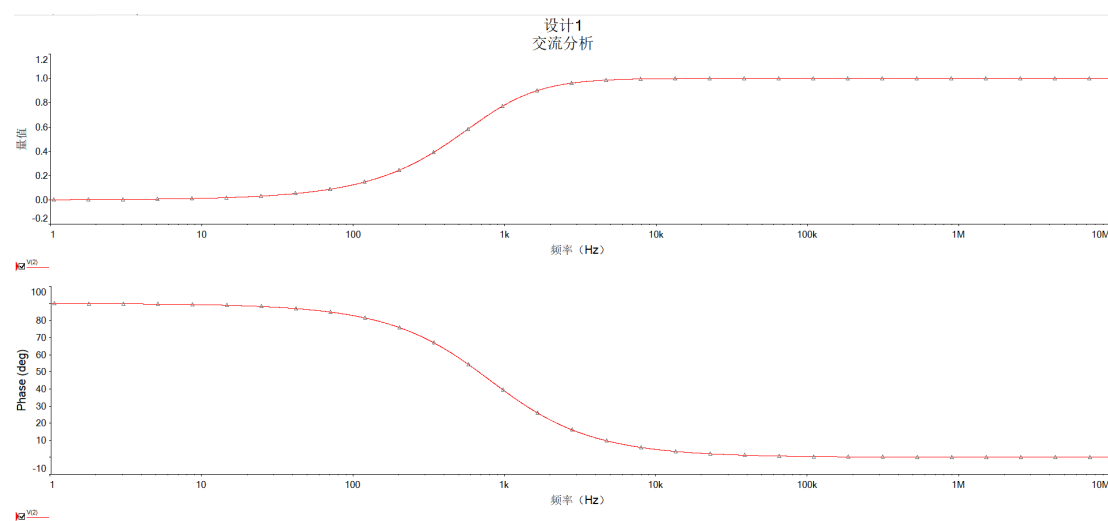
经测试发现其  $f_0 = 800\text{Hz}$ ，符合要求：



截止频率

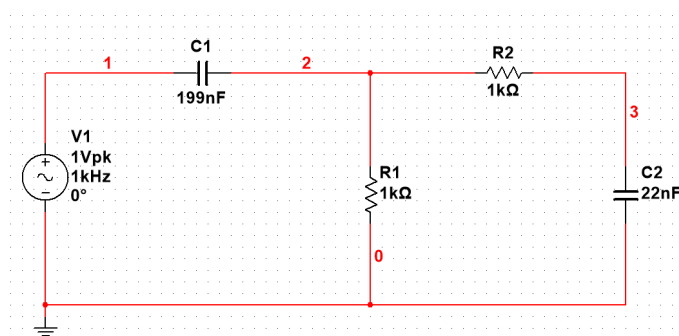


记录其频率特性曲线如下：

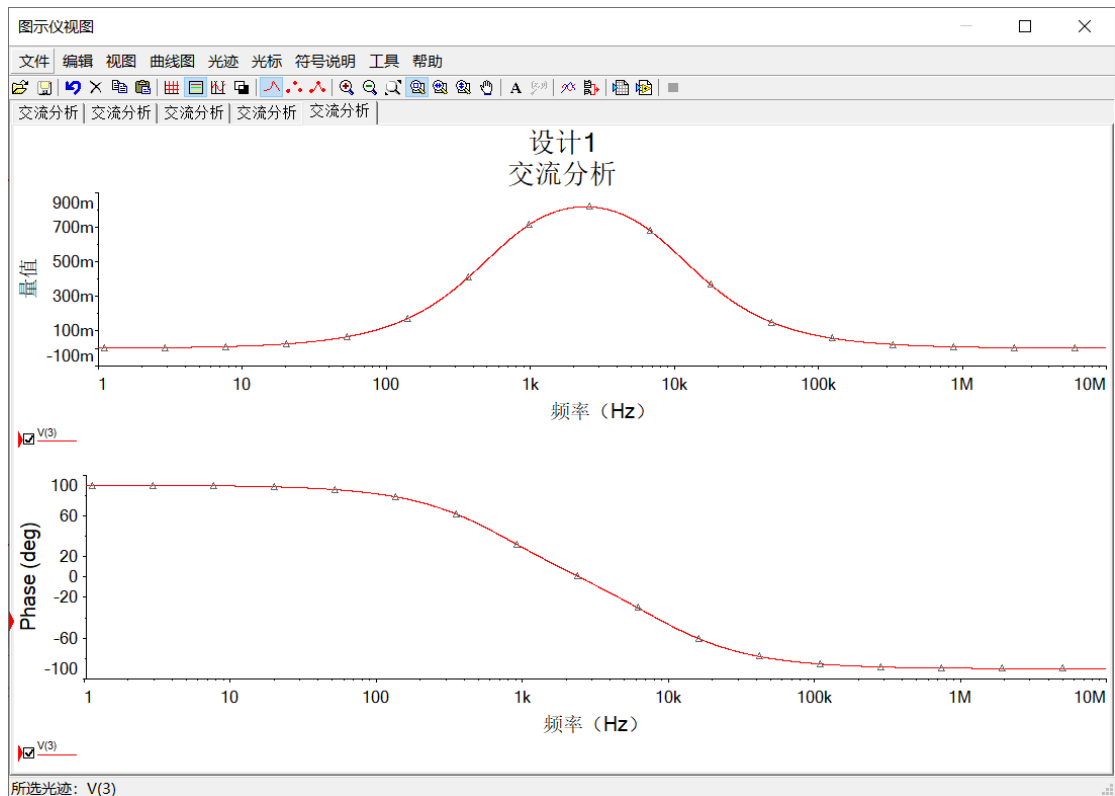


3. 将内容 2、1 电路串联，用 Multisim 测试其电路的频率特性，并进行说明分析。

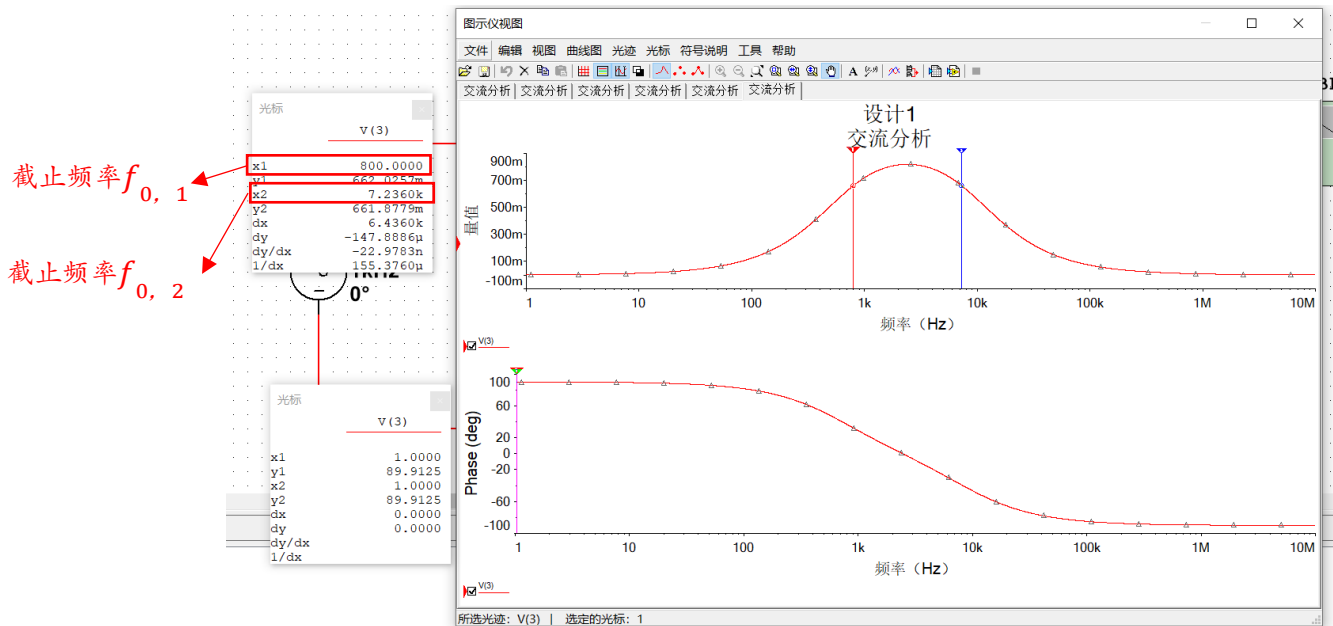
串联后的电路图：



作出频率特性曲线：



其截止频率如下：

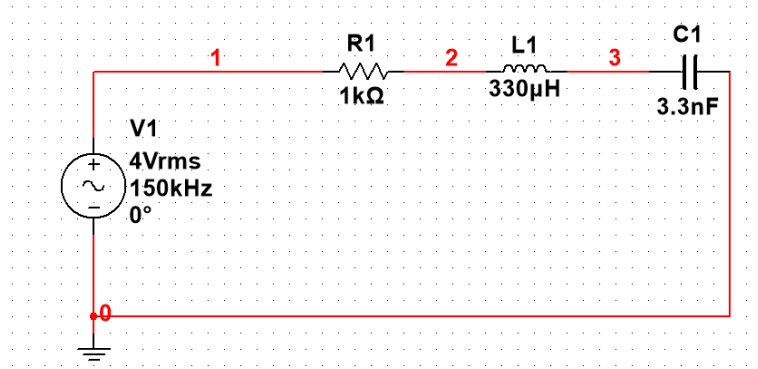


可以发现其截止频率为两段电路串联前的截止频率，构成一段带通电路。根据图像，我们可以得出结论，极低和极高的频率成分都完全被阻挡，不能通过；只有位于频率通带内的信号频率成分能通过。

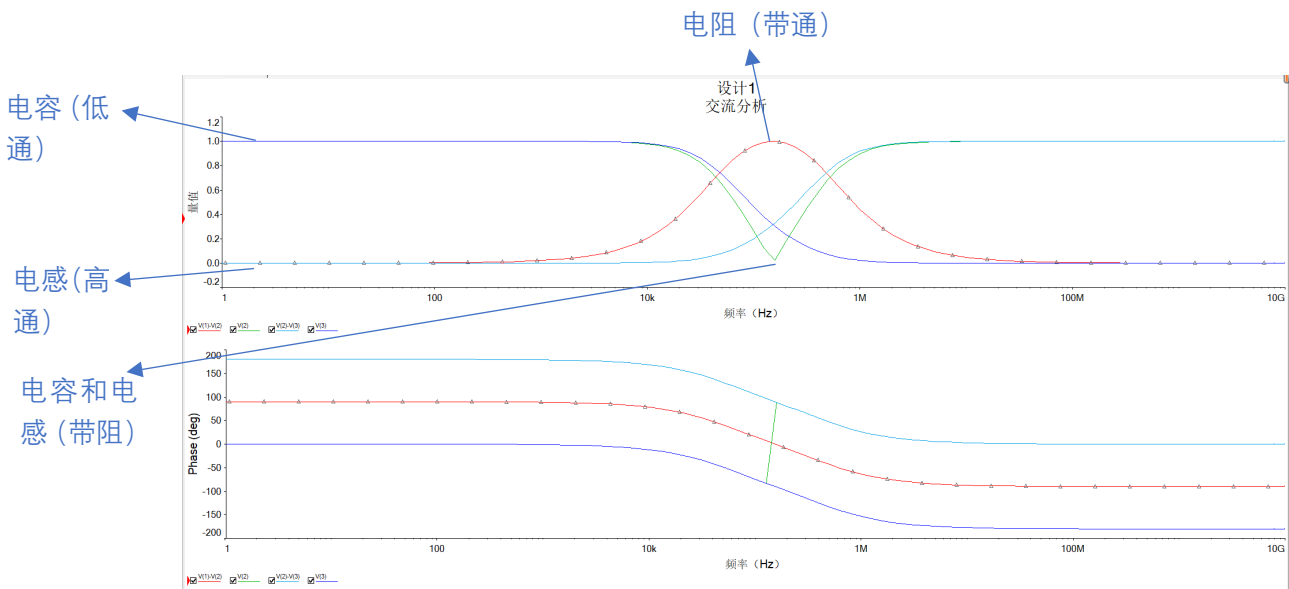
#### 4. RLC 串联谐振电路测量

(1)  $R=1k\Omega$  ,  $L=330\mu H$  ,  $C=3.3n F$  , 激励电压  $4V_{RMS}$ 。

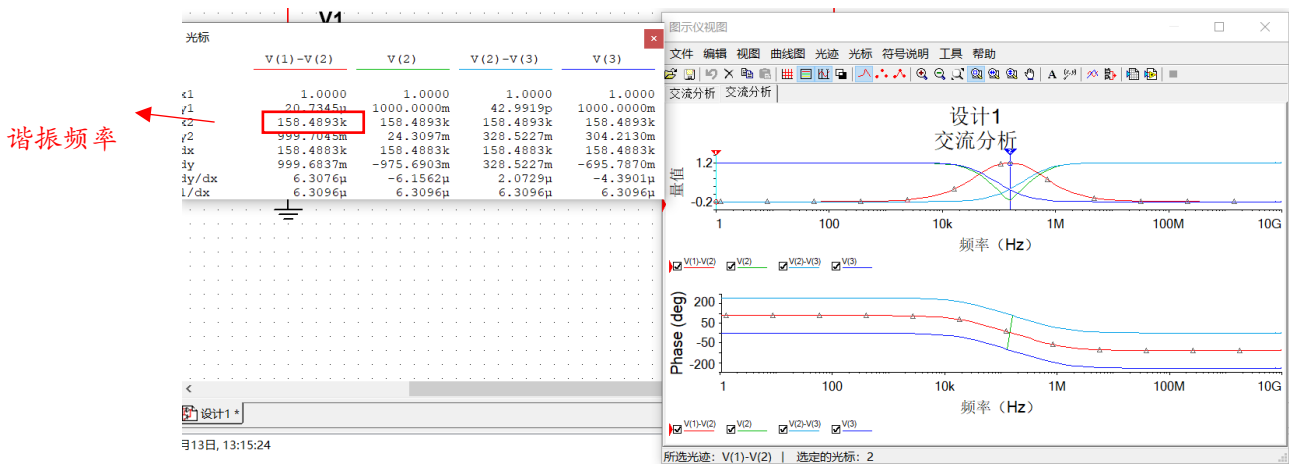
电路图：



(2) 用 Multisim 软件仿真，观察记录  $U_R$ 、 $U_L$ 、 $U_C$  随激励信号频率变化而变化的规律，分析实验现象的理论依据。



谐振状态：



$U_R$  为图中红线，谐振时有  $\dot{U} = \dot{U}_R$ ，此时  $U_R$  达到最大值，此时由于  $X_L =$

$X_C$ ，则  $U_L = U_C$ ， $\dot{U}_L \dot{U}_C$  在相位上相反，互相抵消，对整个电路不起作用。

电容和电感分别为图中深蓝色和淡蓝色的图线所示，由于本身的频率特性，分别构成了低通与高通电路。

(3) 根据上述测量，试分析如何利用 RLC 谐振电路实现带通及带阻。

分析：

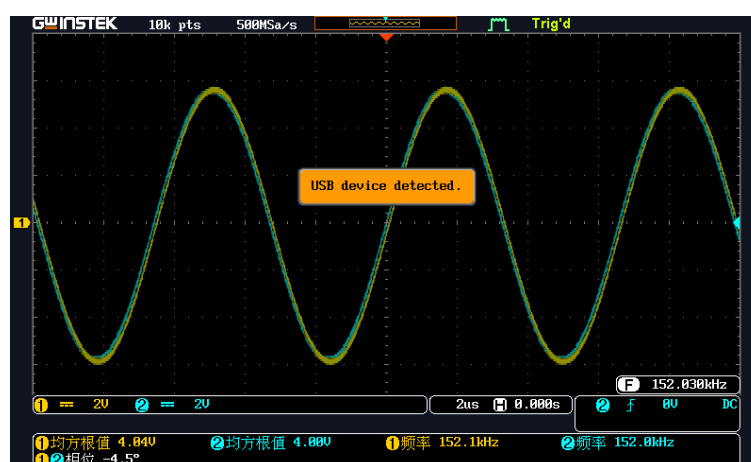
上图中红色曲线为带通曲线，绿色曲线为带阻曲线。我们不妨用 12 两端即电阻两端作为带通电路的输出端；02 两端即电容电感串联电路的两端为带阻电路输出端。

(4) 搭试实物电路，再现谐振现象，测量谐振频率，记录此时  $U_R$ 、 $U_L$ 、 $U_C$  值。

实物电路：



谐振时的波形图：



$f_0$	$U_R$	$U_L$	$U_C$
152.0kHz	3.83V	1.640V	1.648V

记录  $U_R$ 、 $U_L$ 、 $U_C$  值如上表，可以看出谐振频率为 152.0kHz。

(5) 分析比较软件仿真及实物实验结果的差异，分析产生差异的原因。

**差异：**

测得的谐振频率 152.0kHz 和仿真实验的 158.5kHz 相差不大。但测量得到电阻元件最大电压为 3.83V，与理论值相差较大；而仿真实验得到最大电压为 3.998V，接近理论值，可见谐振时电阻上的电压相差较大。

**原因：**

谐振时由于电感和电容的做用相互抵消而产生的，只要电容和电感本身的特性相差不大，那么谐振频率就基本相似，所以谐振频率相差甚微。而由于实际元件与仿真用到的理想元件确实存在细微的误差，所以谐振频率的测量会存在细小误差。

而谐振时的电阻电压，实际测量的测量过程中，电容和电感的作用并不能完全抵消，且电容和电感都具有一定的内阻，都会产生一些阻抗，所以导致了电阻上的电压会偏小；而仿真实验元件相对理想，所以误差会比较小。

## 四、实验使用仪器设备（名称、型号、规格、编号、使用状况）

**Multisim 软件：**

名称：Multisim 13.0 使用状况：顺利。

**示波器：**

名称：数字存储示波器 GDS-1000B 系列、型号：GDS-1102B、使用状况：正常

**信号源：**

名称：SDG1000X 系列函数/任意波形发生器、型号：SIGLENT SDG 1032X、编号：UM0201X-C01A、使用状况：正常

**数字万用表：**

名称：5 1/2 位台式 SDM305 数字万用表、型号：SDM305 UM06035-C02A、使用状况：正常

## 五、实验总结

（实验误差分析、实验出现的问题及解决方法、思考题（如有）、收获体会等）

**实验误差分析：**

仿真实验由于元器件引起的误差比较小，但是在交流扫描分析时，由于光标

并不能完全定位在需要的数值点上，往往会有细微的差距，导致了实验的结果存在一定的误差。

在谐振实验中，实物搭建验证时，由于实物元件不能当成理想器件，电容和电感都具有一定的内阻，电容和电感的做用并不能完全抵消，都会产生一些阻抗，所以导致了电阻上的电压会比理想情况下应该有的值偏小，导致实验的结果不准确。

### 出现的问题以及解决方法：

在实物操作时，调整信号源频率用示波器记录电阻电感电容的电压度数时，有一段数据会出现忽大忽小的变化，应该出现电压下降的调整得到的电压值却上升了。后经检查发现，是由于没有及时调整示波器的“scale”和“position”，导致波形不能完整地显现在示波器上，导致度数不准确。调整后读数正常。

在仿真谐振时，交流扫描绘制的图像起初不太符合一贯的电压变化图像。后经检查发现时量程设置的不是“线性”，调整后更接近平时常见的频率特性图。

### 思考题：

(1) Multisim 仿真电路中输入信号源起什么作用，改变信号源的参数对测试结果有无影响？

信号源主要用来确定电源电压的有效值。改变信号源频率并不会改变仿真结果，因为频率是仿真时的变量，不受提供的输入信号源的频率所限制。

(2) 试写出判定 RLC 串联电路处于谐振状态的三种实验方法。

1. 电阻电压达到最大值，电感、电容总电压达到最小值
2. 电流达到最大值
3. 电阻电压相位和电源电压同相

(3) RLC 串联谐振电路实物实验中，信号源输出信号幅度该如何选择？测量过程中，信号源信号幅度有没有变化？

幅度选择：不宜选择过大的幅度，避免超出示波器量程；也不宜过小，会导致波形幅度太小，不容易读数，容易增大读数误差。

幅度变化：有变化，当输出频率发生较大变化时，信号源的幅度会有变化。

(4) 在谐振频率点、及谐振频率左右，电路的特性有什么变化？

在谐振频率点：电容、电感总电压达到最小，但不为零，电路中电流达到最大值  
在谐振频率左右：电容、电感总电压增大。且变化的幅度都相对比较大。

### 收获体会：

通过本次实验，深化了对于滤波器的认识和体会，学习了如何通过无源电路实现高通、低通、带通、带阻的功能，但也可以发现，无源滤波器的精度往往不

能做的很高，所以为了实现精准滤波，后续可能还需要有源滤波器。

此外，我们发现我们所使用的电阻、电感元件其实并非纯粹的电感电阻，这些元件也会具有内阻，在设计电路时，也需要考虑他们本身的阻性。

在做仿真方面，学习了 Multisim 在交流分析方面强力的能力，在研究电路的网络函数时，可以借助此功能较为方便地进行仿真分析。