

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 6 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）： 自动化学院 专 业： 自动化

姓 名： 陈鲲龙 学 号： 08022311

实 验 室： 204 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2023 年 12 月 12 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) Multisim 分析功能。

Multisim 的仿真分析大致可以分为

基本分析(包括直流工作点分析, 交流分析, 瞬态分析, 傅里叶分析)

噪声和失真分析(包括噪声分析, 噪声系数分析, 失真分析)

扫描分析(包括直流扫描分析, 参数扫描分析, 温度扫描分析)

极零点和传递函数分析(极零点分析, 传递函数分析)

灵敏度和容差分析(包括灵敏度分析, 最坏情况分析, 蒙特卡洛分析)

其它分析(布线宽度分析, 批处理分析, 用户自定义分析)

(2) 一阶 RC 电路频率特性, 完成内容 1。

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

$$H(j\omega) = u_o / u_i = |H(j\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}$$

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。

电路在一个正弦电压激励下稳定, 各部分响应都为同频正弦量。

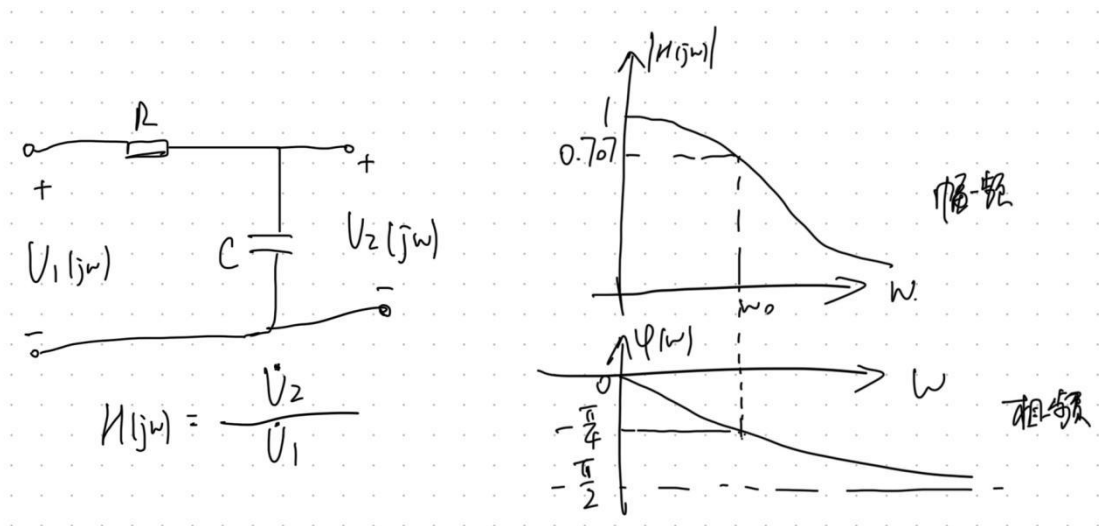
网络函数 $H(j\omega)$ 定义为:

$$H(j\omega) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{R_k(j\omega)}{\dot{E}_{s_j}(j\omega)}$$

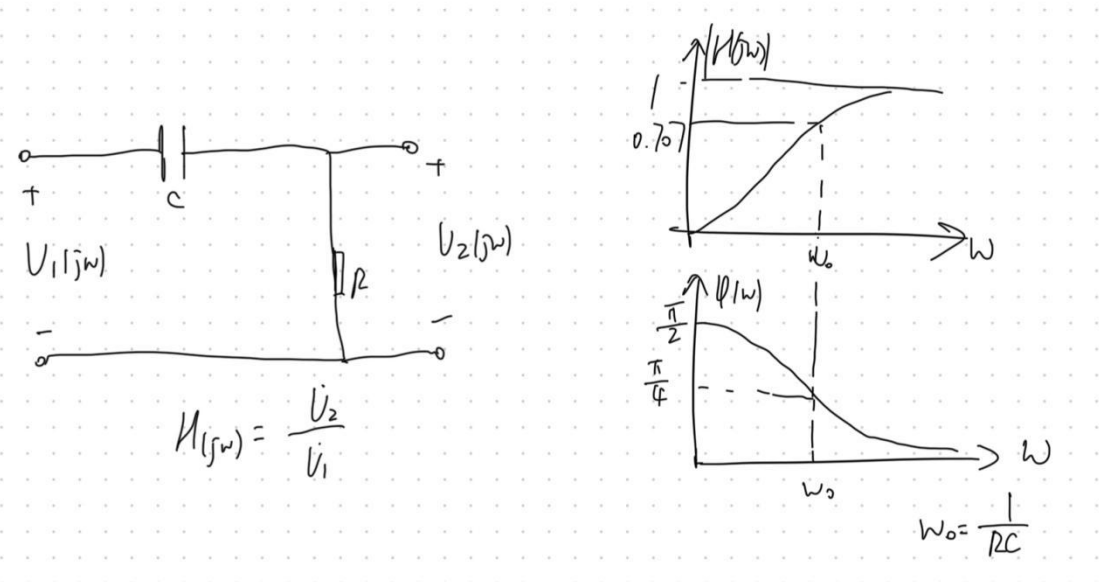
\rightarrow 输出端口 k 的响应
 \rightarrow 输入端口 j 的激励

(k 不同时, 不同端口, 称“转移函数”)

2) 一阶 RC 低通电路频率特性曲线

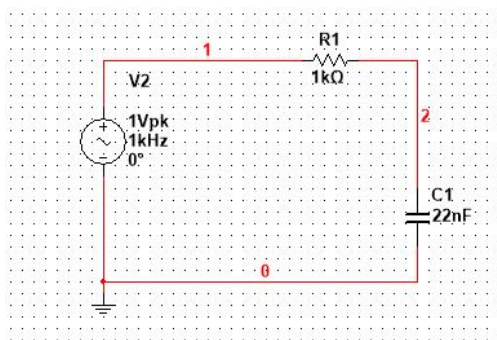


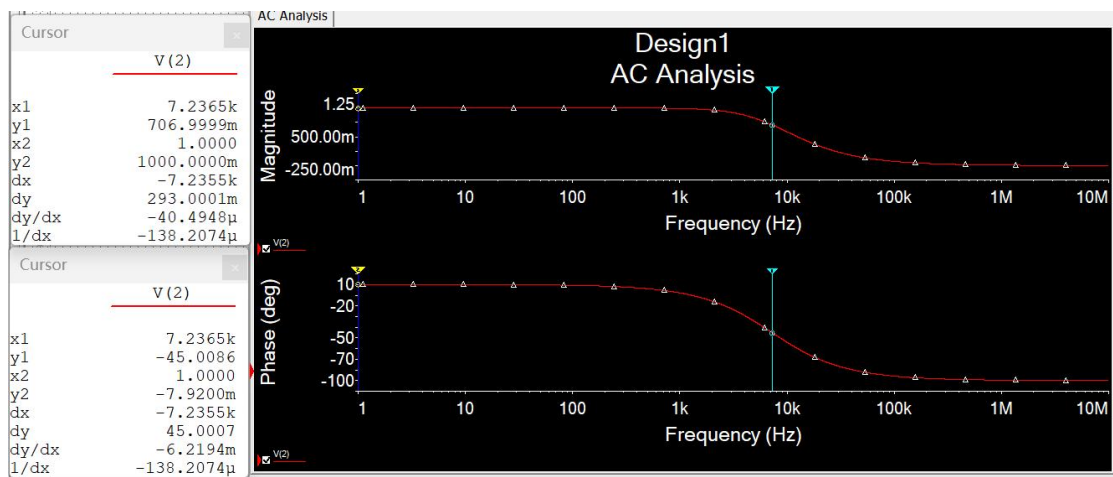
3) 一阶 RC 高通电路频率特性曲线



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。输入信号取信号源库(Sources)的电压源(SIGNAL_VOLTAGE_SOURCES)中的交流电压源(AC VOLTAGE)，双击图标，将其电压设置为 1V，频率设置为 1kHz。





(2) 测试电路的截止频率 f_0 由上图可见：截止频率 $f_0=7.2365k$

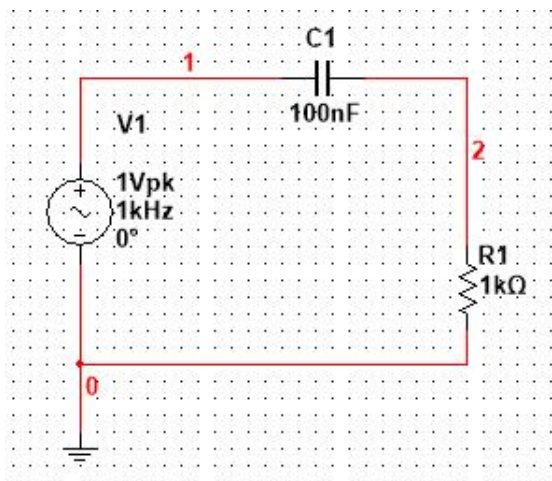
(3) 用上述方法分别测试 $0.01 f_0$ 、 $0.1 f_0$ 、 $0.5 f_0$ 、 f_0 、 $5 f_0$ 、 $10 f_0$ 、 $100 f_0$ 点所对应的 $|H(j\omega)|$ 和 ϕ 的值。

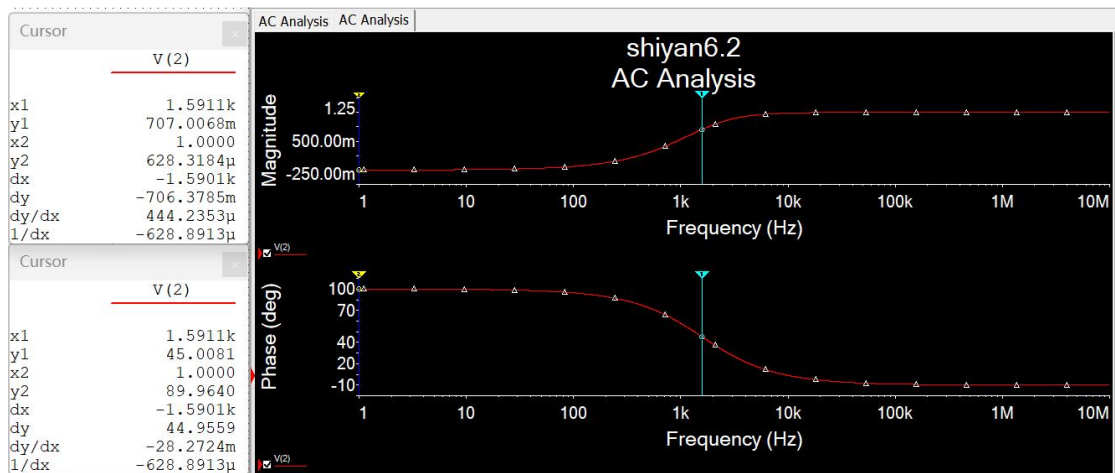
测量	$0.01 f_0$	$0.1 f_0$	$0.5 f_0$	f_0	$5 f_0$	$10 f_0$	$100 f_0$
$ H(j\omega) $	999.9500m	995.0342m	894.3730m	706.9999m	196.0593m	99.4740m	9.9965m
$\phi (^{\circ})$	-573.1121m	-5.7123	-26.5720	-45.0086	-78.6934	-84.2911	-89.4272

(3) 在现有器件参数的基础上完成实验内容 2 的设计。

设计一个一阶高通电路，要求 f_0 在 1.6kHz 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。

设计如下图，其中 $R=1000 \Omega$ ， $C=100nF$ 。





由频率特性曲线可得 f_0 的值为 1.5911k。

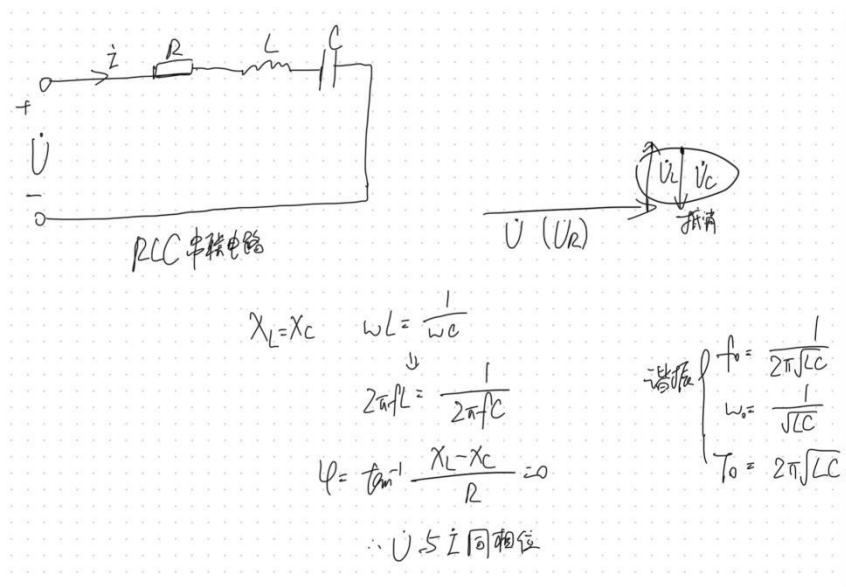
$f_0=1.5911k$

测量	$0.01f_0$	$0.1f_0$	$0.5f_0$	f_0	$5f_0$	$10f_0$	$100f_0$
$ H(j\omega) $	9.9967m	99.4760m	447.1126m	707.0068m	980.5700m	995.0344	999.9500m
$\phi(^{\circ})$	89.4272	84.2910	63.4414	45.0081	11.3131	5.7122	573.1008m

(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所示。



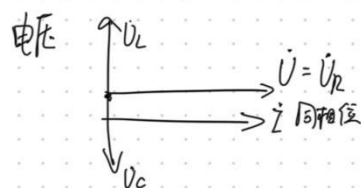
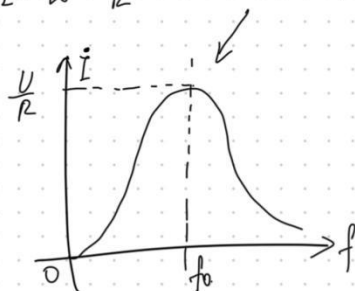
串联谐振电路的谐振频率 f_0 完全由电路本身的有关参数来决定，是电路本身的固有性质，而且每一个 RLC 串联电路，只有一个对应的谐振频率。因此，只有外施加电压的频率与 RLC 串列电路的谐振频率相等时，电路才会发生谐振。实际应用中往往采用两种方法使电路发生谐振，一种使外施加电压的频率一定，改变电路电感 L 或者电容 C 的方法，使电路满足谐振条件；另一种是电路电感 L 和电容 C 参数一定，采用改变外施加电压的频率的方法，使电路在其谐振频率下达到谐振。

谐振时:

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

电源能量全被电阻消耗(电阻性)
L、C 之间能量交换

$$\text{电流 } I = I_0 = \frac{U}{R} \quad (\text{谐振时电流最大})$$



U_C 和 U_L 抵消，但不为 0!!!
* 且可能大于电源 U !!!

$$\text{品质因数 } Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

Q 越大，谐振曲线越尖锐

(5) 理论计算内容 4 RLC 串联电路的谐振频率。

谐振时: $X_L = X_C$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

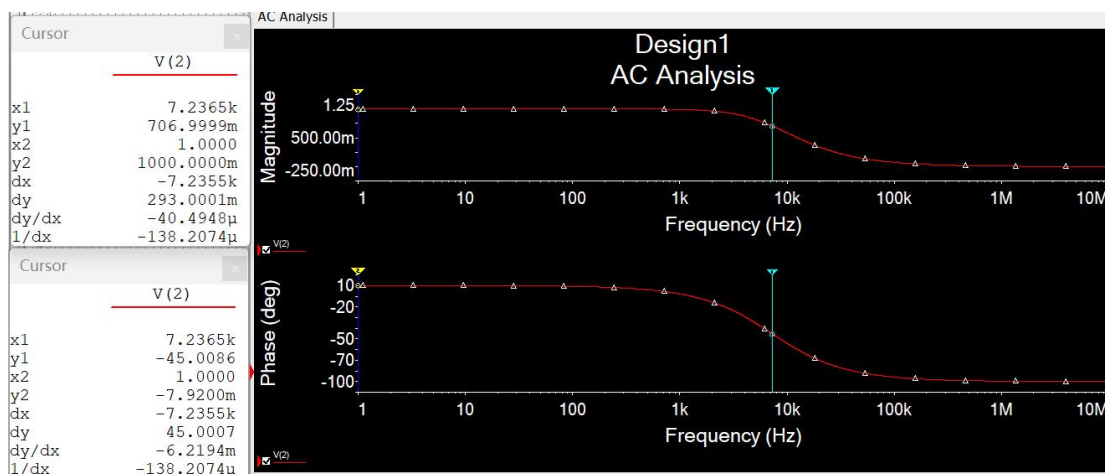
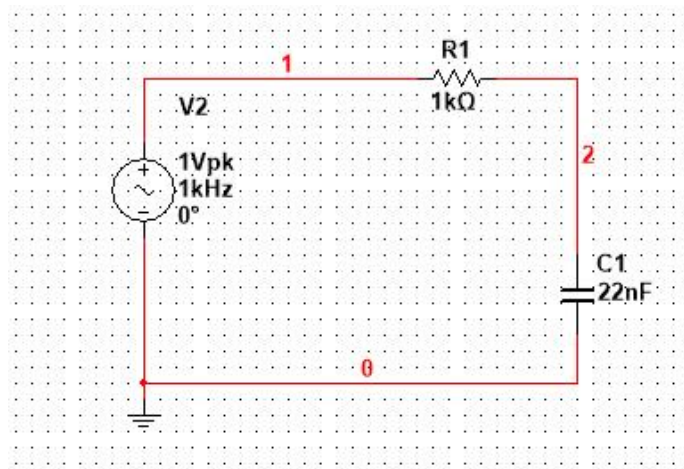
$$\therefore f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$L = 330 \mu\text{H}, C = 3.3 \text{ nF}$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{330 \times 10^{-6} \times 3.3 \times 10^{-9}}} = 152512.764 \text{ Hz}$$

三、实验内容

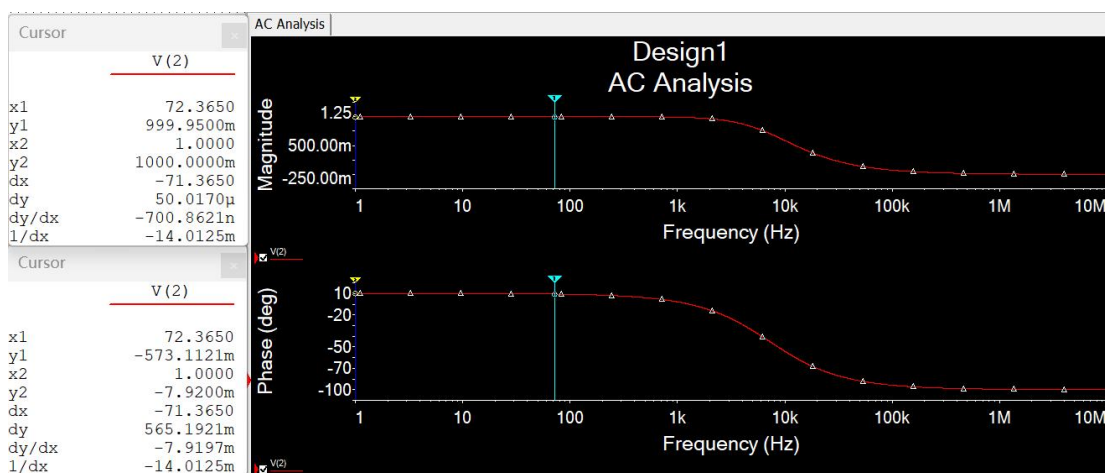
1. 用 Multisim 分析功能测试一阶 RC 低通电路的频率特性



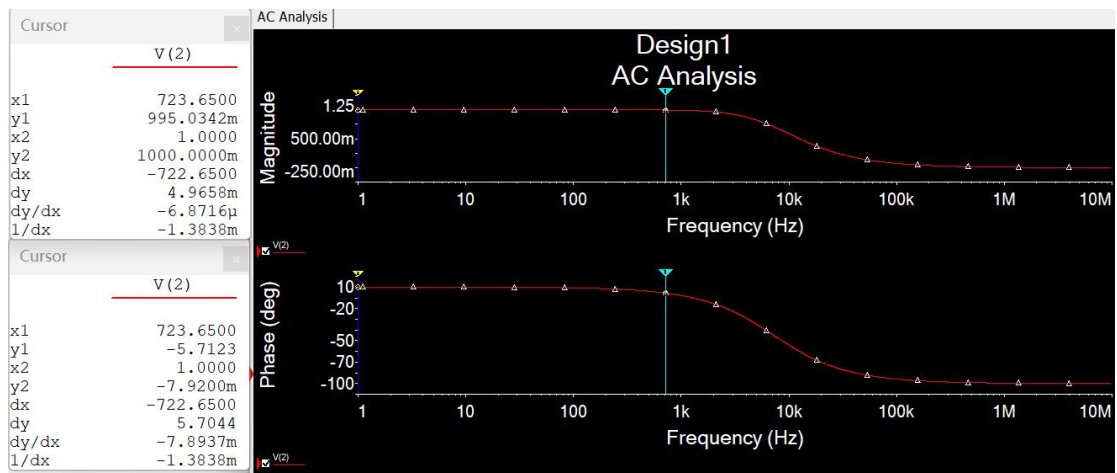
(2) 测试电路的截止频率 f_0 由上图可见：截止频率 $f_0=7.2365k$

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

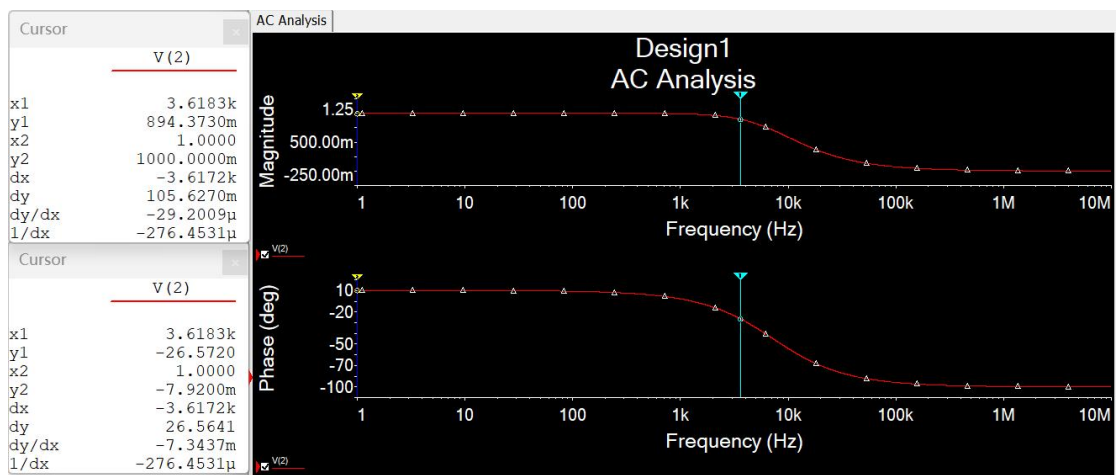
$0.01 f_0$



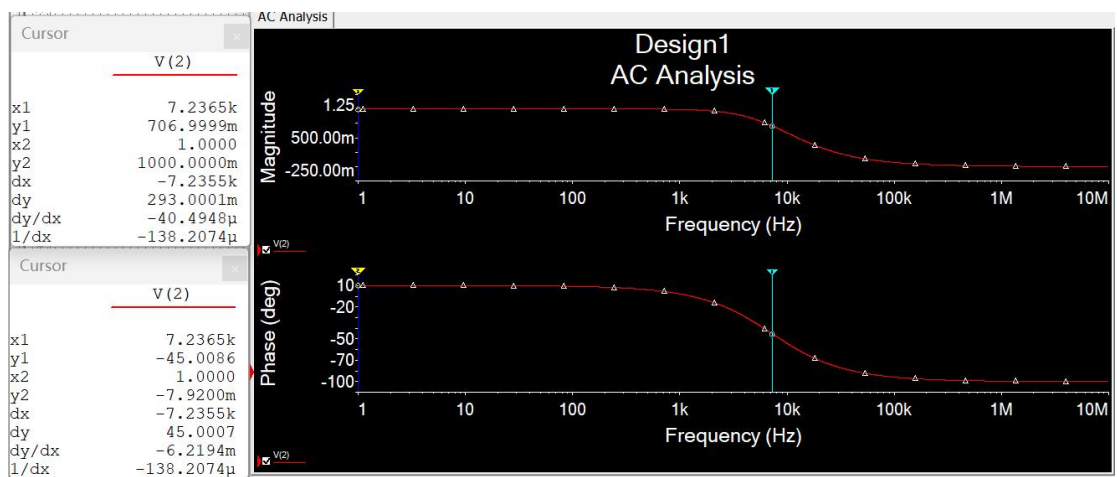
0.1f₀



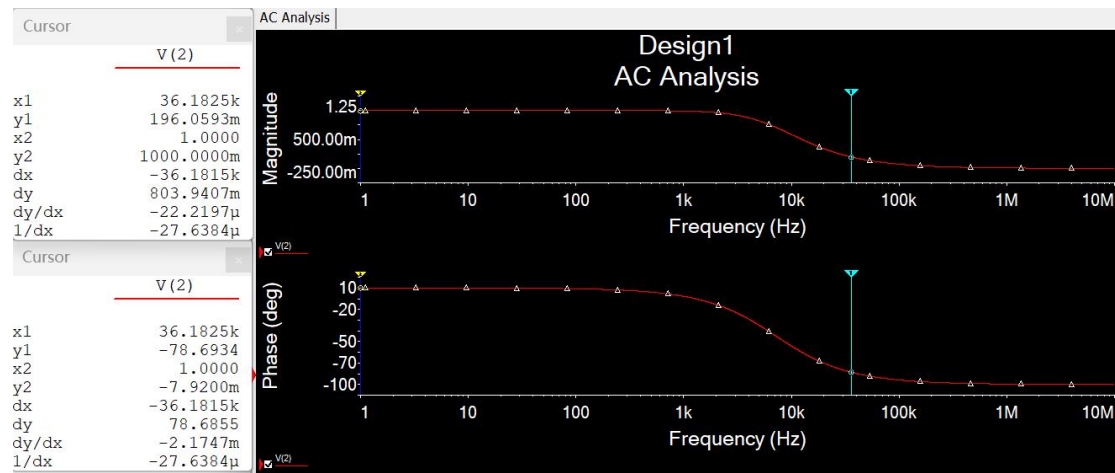
0.5f₀



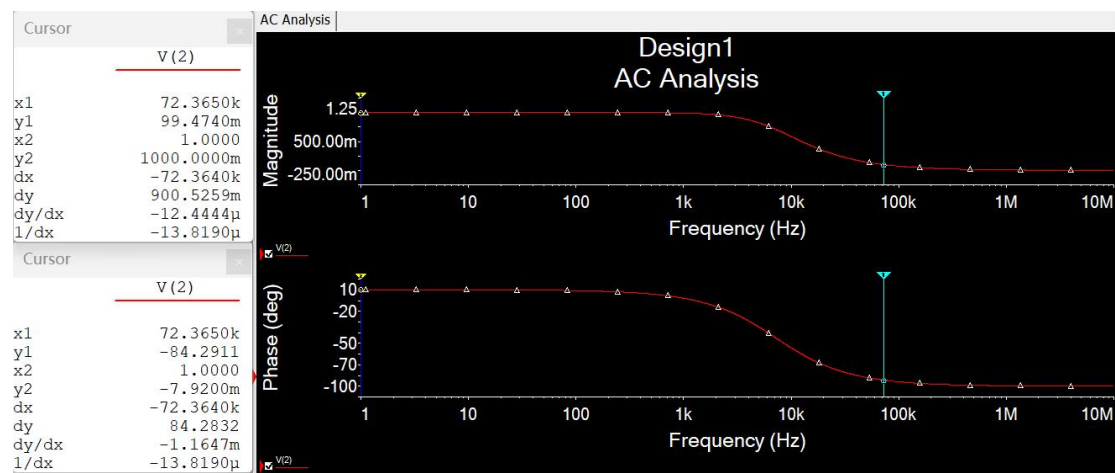
f₀



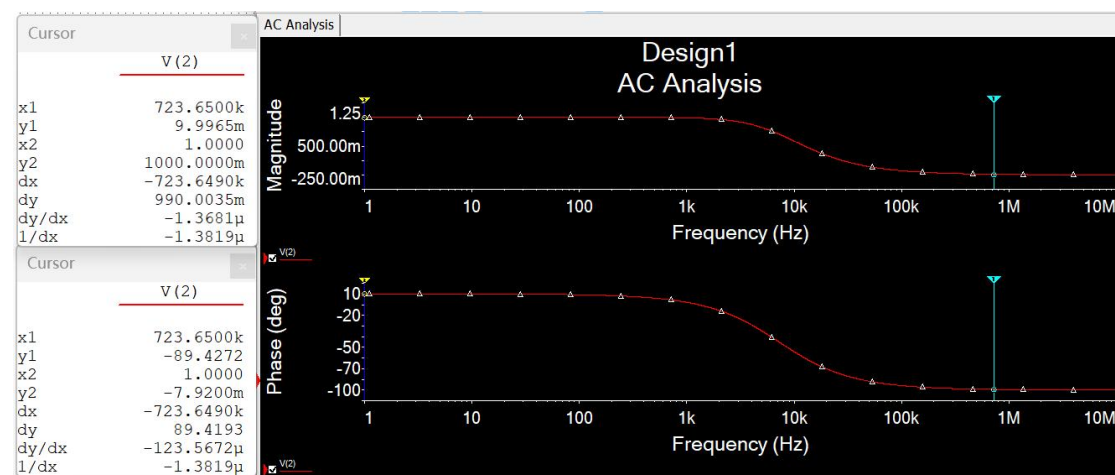
5f₀



10f₀



100f₀



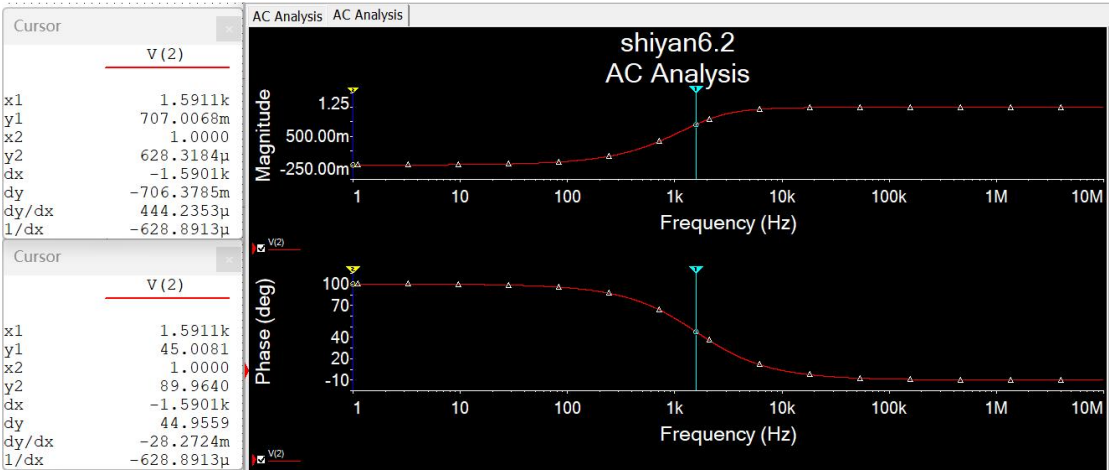
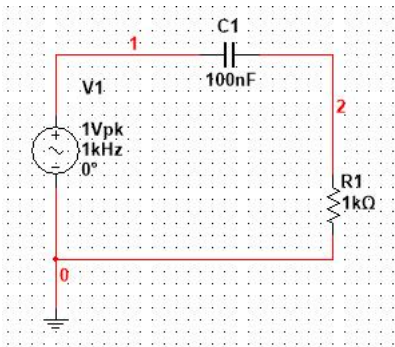
$f_0=7.2365k$

测量	$0.01f_0$	$0.1f_0$	$0.5f_0$	f_0	$5f_0$	$10f_0$	$100f_0$
$ H(j\omega) $	999.9500m	995.0342m	894.3730m	706.9999m	196.0593m	99.4740m	9.9965m
$\Phi(^{\circ})$	-573.1121m	-5.7123	-26.5720	-45.0086	-78.6934	-84.2911	-89.4272

2. 设计一阶高通电路，用 Multisim 分析测试其频率特性

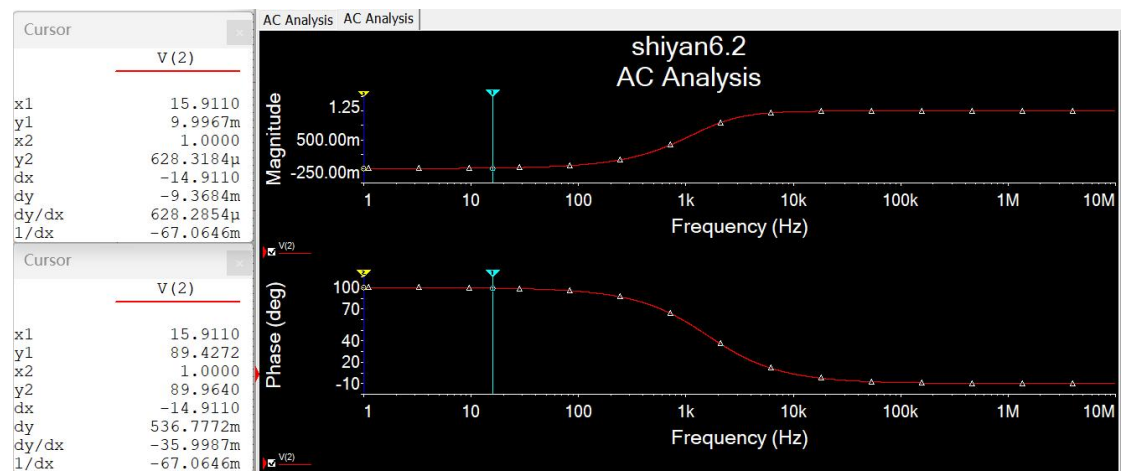
设计一个一阶高通电路，要求 f_0 在 1.6kHz 左右。设计电路，并分析测量电路 f_0 值。记录电路频率特性曲线。

设计如下图，其中 $R=1000\Omega$ ， $C=100nF$ 。

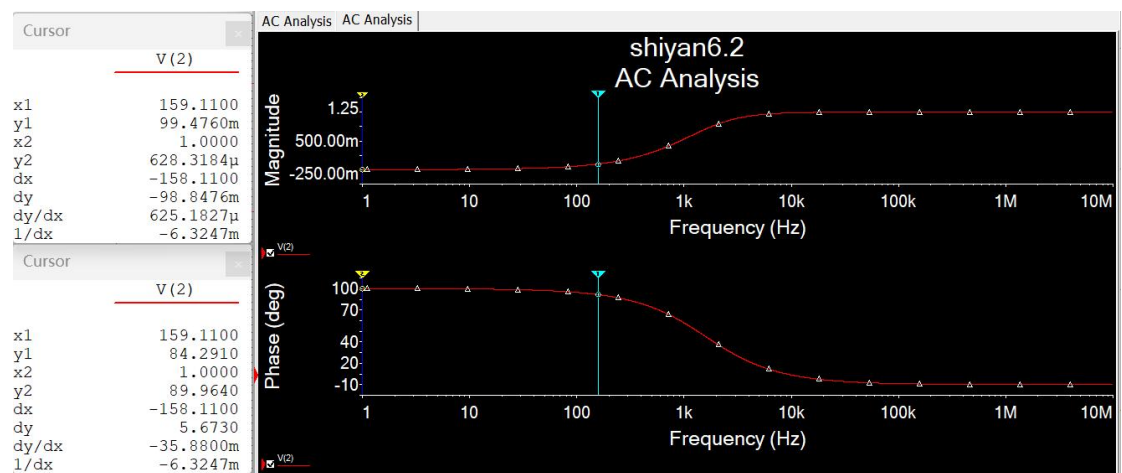


由频率特性曲线可得 f_0 的值为 1.5911k。

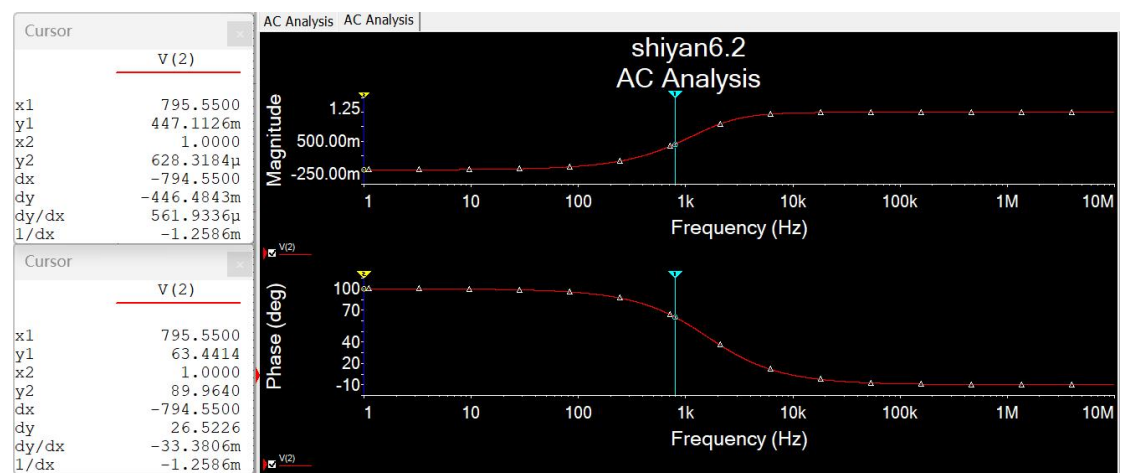
0.01f0



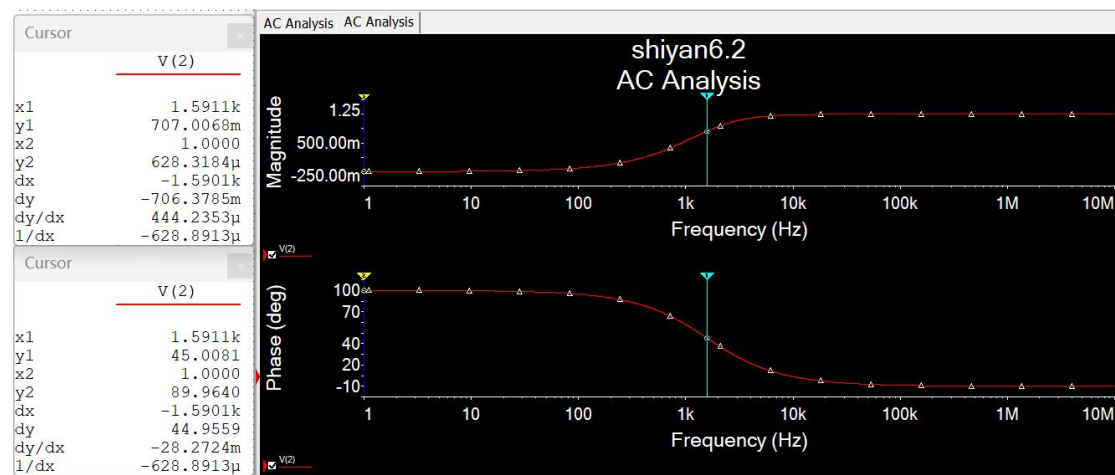
0.1f0



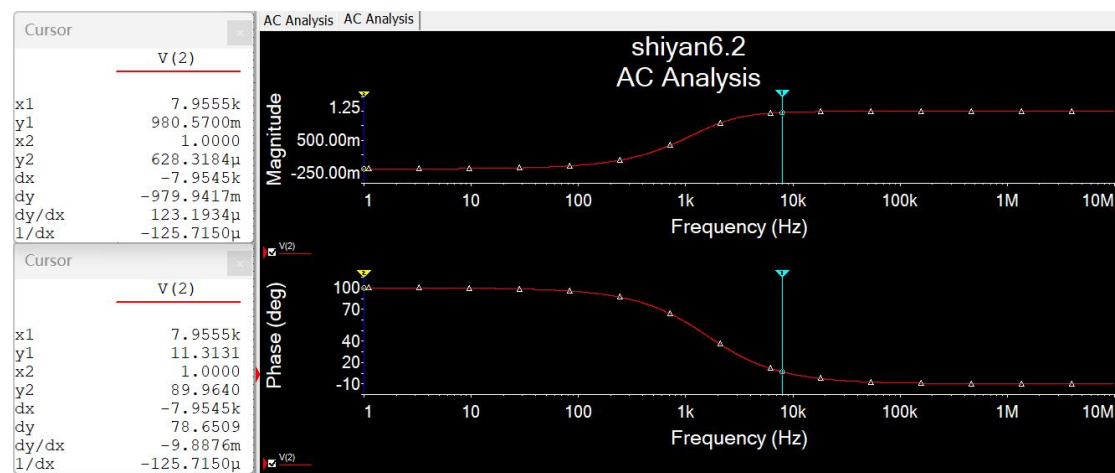
0.5f0



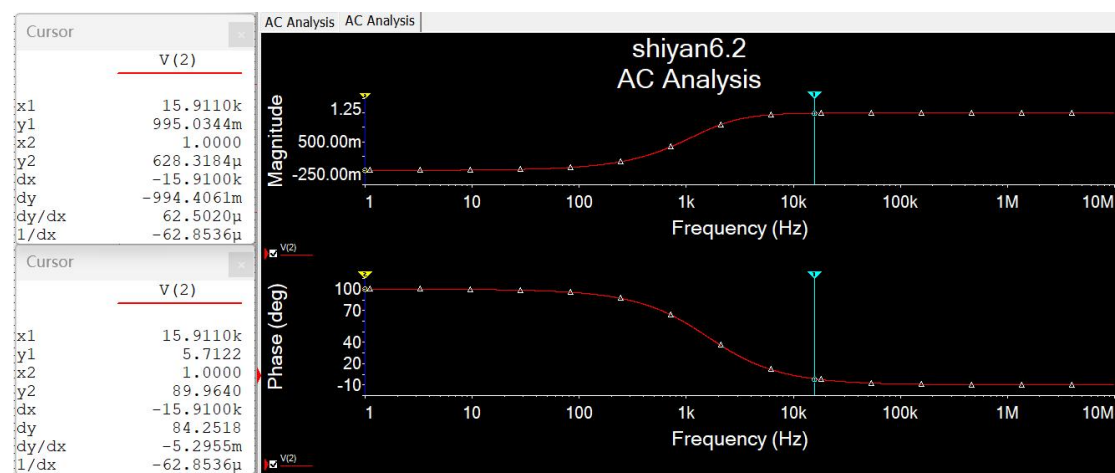
f0



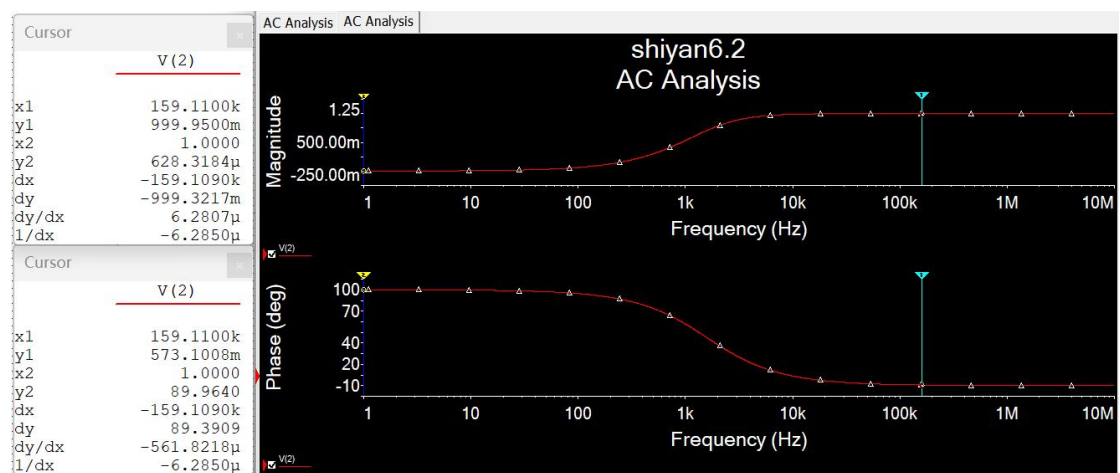
5f0



10f0



100f0

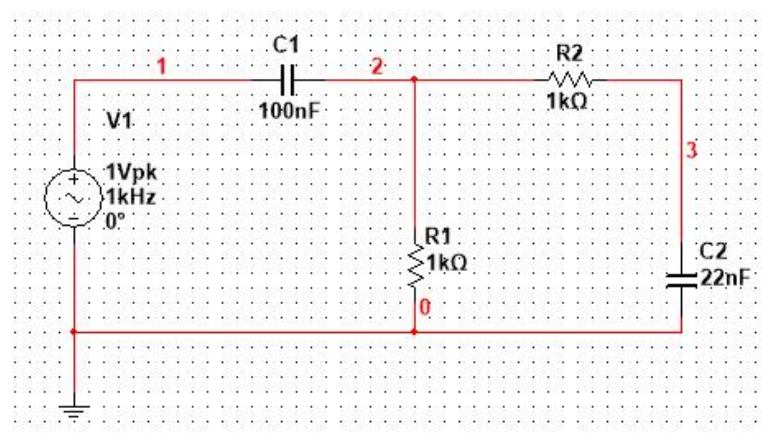


f0=1.5911k

测量	0.01f0	0.1f0	0.5f0	f0	5f0	10f0	100f0
H(jω)	9.9967m	99.4760m	447.1126m	707.0068m	980.5700m	995.0344	999.9500m
Φ(°)	89.4272	84.2910	63.4414	45.0081	11.3131	5.7122	573.1008m

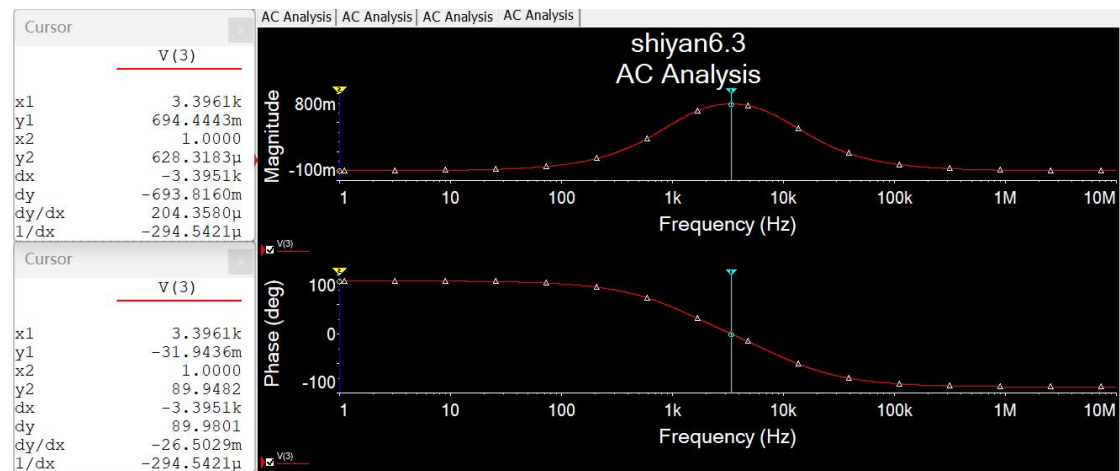
3. 将内容 2、1 电路串联，用 Multisim 测试其电路的频率特性，并进行说明分析。

电路图如下

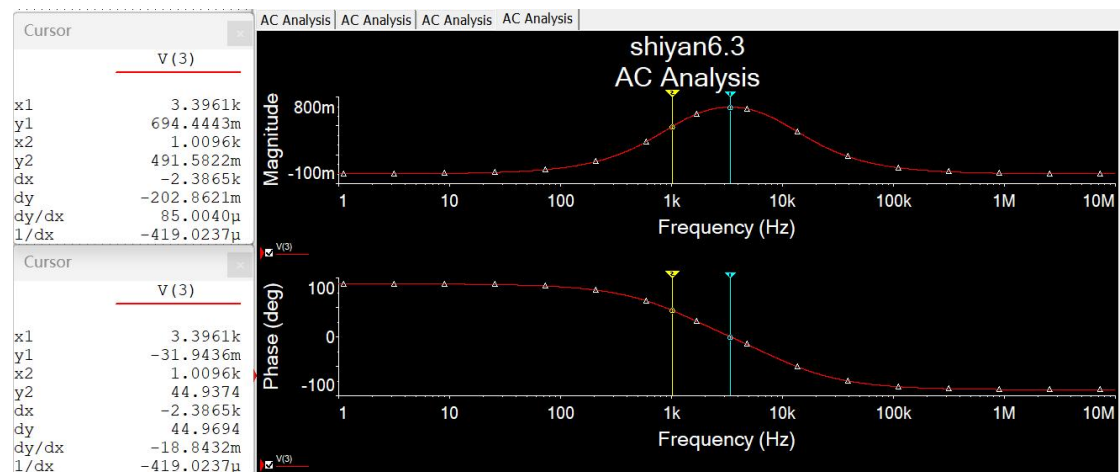


频率特性曲线如下

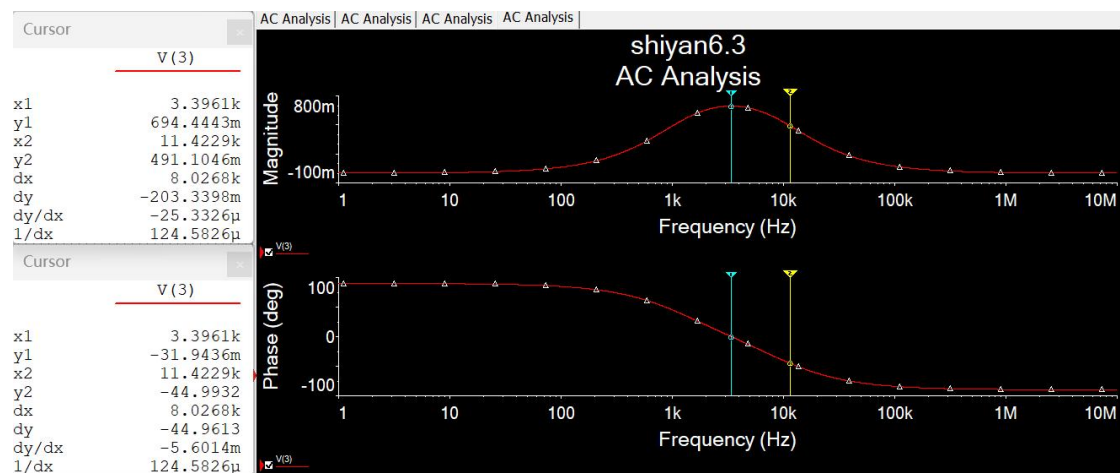
$f_0=3.3961\text{k}$; $|H(j\omega)|_{\max}=694.4443\text{m}$; $|H(j\omega)|_{\max} / \sqrt{2}=491.046\text{m}$



测量下截止频率为: $f_1=1.0096\text{k}$; $|H(j\omega)|=491.5822\text{m}$ (接近 491.046m)



测量上截止频率为: $f_2=11.4229\text{k}$; $|H(j\omega)|=491.1046\text{m}$ (接近 491.046m)



该电路可看作由 2 的高通电路作为 1 的低通电路的信号源，当频率大于 $f_1=1.0096\text{ kHz}$ 时，2 的高通电路输出给 1 的低通电路对应的网络函数的模值大于 0.707 倍的峰值，即大于该频率时产生的分贝数大于 20 分贝。但同时，当频率大于 $f_2=11.4229\text{ kHz}$ 时，1 的低通电路输出对应的网络函数的模值小于 0.707 倍的峰值，即小于该频率时产生的分贝数大于 20 分贝，所以该电路可以控制输出频率在 $f_1=1.0096\text{ kHz}$ 和 $f_2=11.4229\text{ kHz}$ 之间。

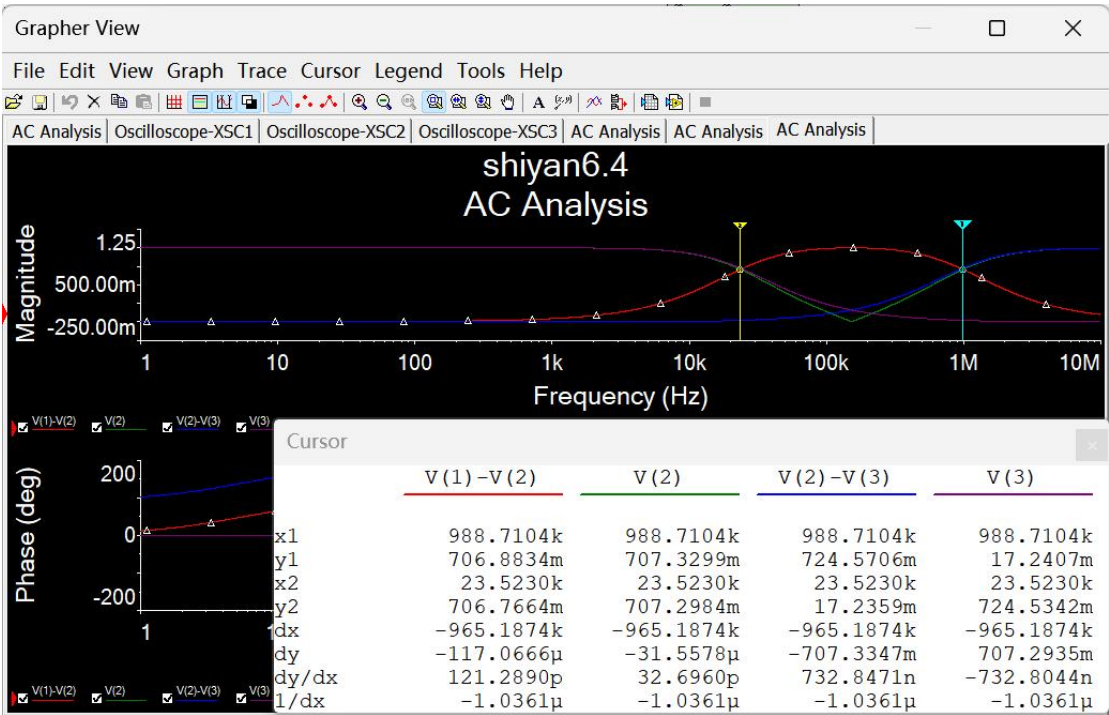
4. RLC 串联谐振电路测量

- (1) $R=2\text{ k}\Omega$, $L=330\text{ }\mu\text{ H}$, $C=3.3\text{ n F}$, 激励电压 4 VRMS 。
- (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。测量谐振频率点 U_R 、 U_L 、 U_C 值及波形。

规律：随频率不断变大， U_R 先增大再减小，在谐振频率处达到最大值并且此时与电源两端的电压相同、 U_L 不断增大、 U_C 不断减小。

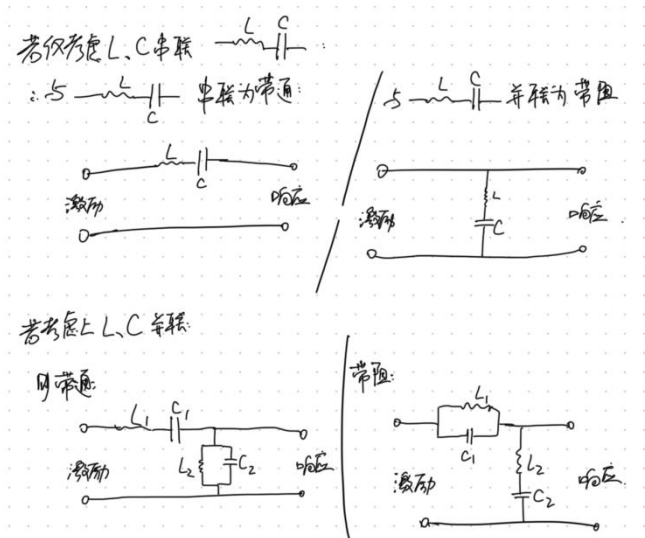
理论：根据电感和电容的计算公式，随频率增大， ω 增大，感抗增大，容抗减小，分压便会增大或减小。在谐振频率处，容抗等于感抗，两者之和没有分压， U_R 接近电源电压，达到最大值，而在谐振频率左右两侧，由于容抗和感抗的分压，电阻电压总小于最大值。

- (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。



带通：带通是一个允许特定频段的波通过同时屏蔽其他频段的设备。在 RLC 串联电路中测 R_1 两端电压。在 $f_1=23.5230\text{ kHz}$ 与 $f_2=988.7104\text{ kHz}$ 之间的频率可以通过，带宽为 $BW=965.1874\text{ kHz}$

带阻：是指通过大多数频率分量、但将某些范围的频率分量衰减到极低水平的滤波器，与带通的概念相对。在 RLC 串联电路中测（L 串联 C）两端电压。在小于 $f_1=23.5230\text{kHz}$ ，大于 $f_2=988.7104\text{kHz}$ 的范围可以通过。



(4) 搭建实物电路，再现谐振现象，测量谐振频率，记录此时 U_R 、 U_L 、 U_C 值及波形。

(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。

仿真实验数据的误差非常小，而实物电路测得的数据误差较大，原因是搭建实物电路时，元器件如电阻，电感和电容与标称值有差异，导致 U_L 不等于 U_C ，所以在搭建实物电路时，将频率变大了一些才使 $U_L=U_C$ 。

理论计算内容 4 RLC 串联电路的谐振频率：

谐振时： $X_L = X_C$

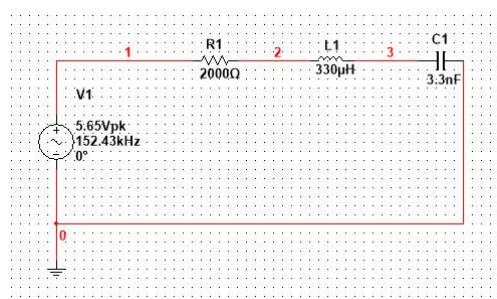
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\therefore f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

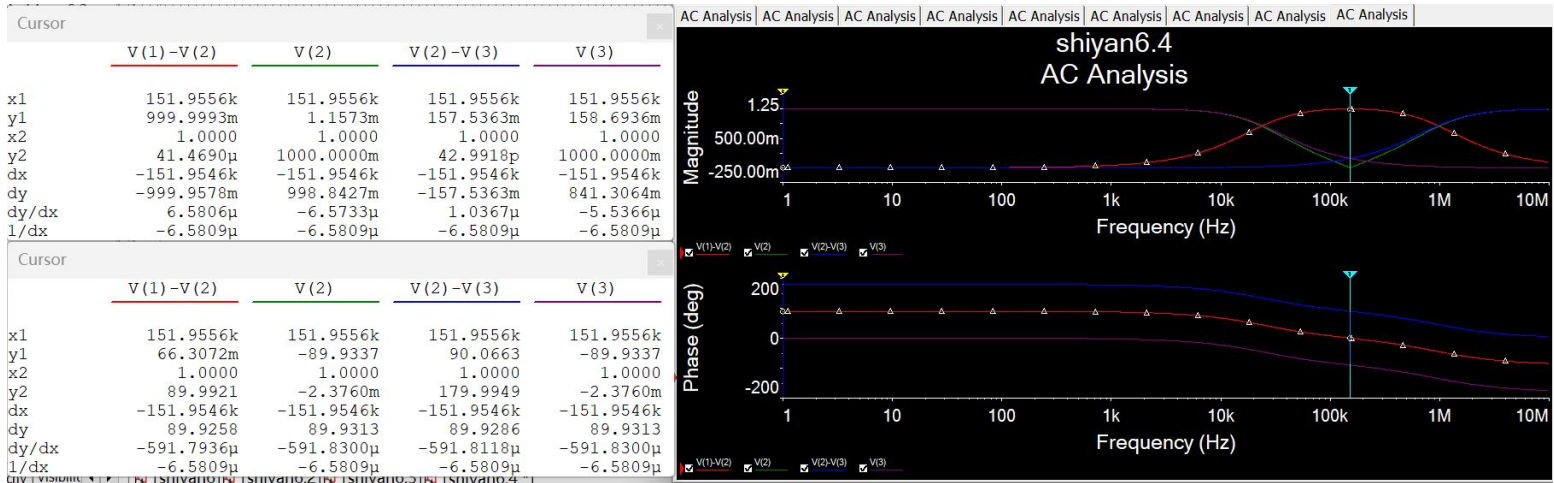
$L = 330\mu\text{H}$, $C = 3.3\text{nF}$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{330 \times 10^{-6} \times 3.3 \times 10^{-9}}} = 152512.764 \text{ Hz}$$

电路图：

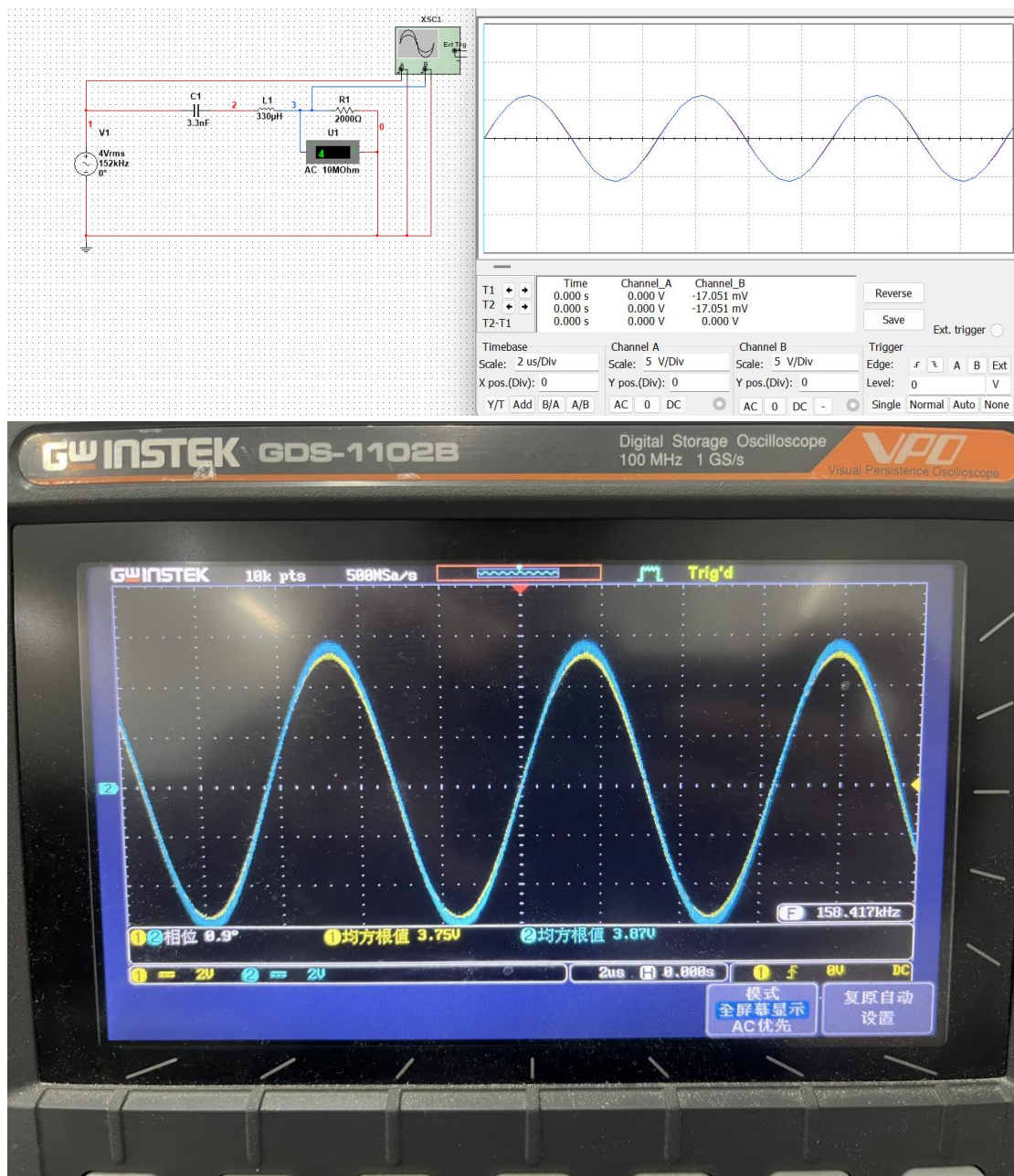


频率特性曲线图：（红线：带通、绿线：带阻、紫线：U 电容、蓝线：U 电感）

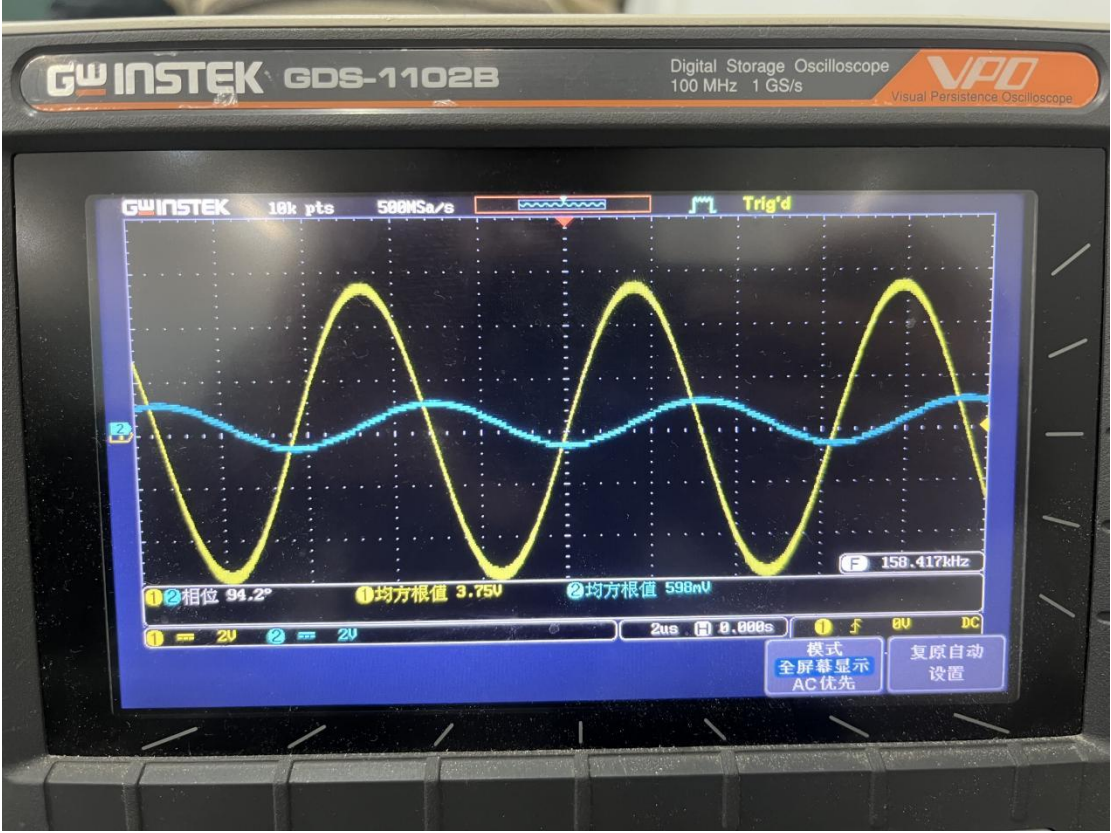
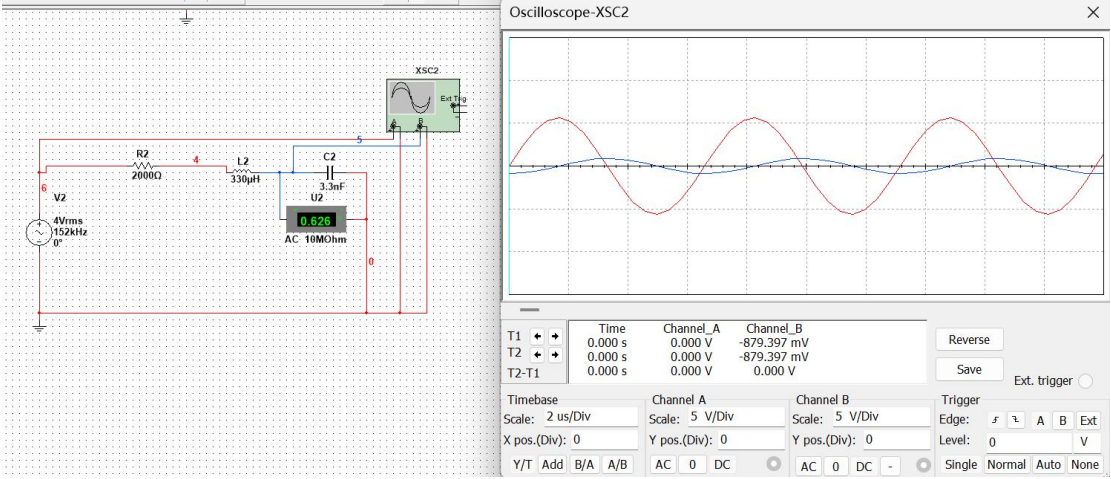


测量参数	f0	UR1	UL1	UC1
仿真值【1】 *5.65/根号 2	151.9556k	3995.15mV	629.382mV	634mV
Multisim 示波器 仿真值【2】	152k	4000mV	639mV	626mV
实物搭接 实测值【3】	158.4125k	3870mV	641mV	599mV
误差【1】&【3】	4.51%	-3.13%	18.64%	-5.52%

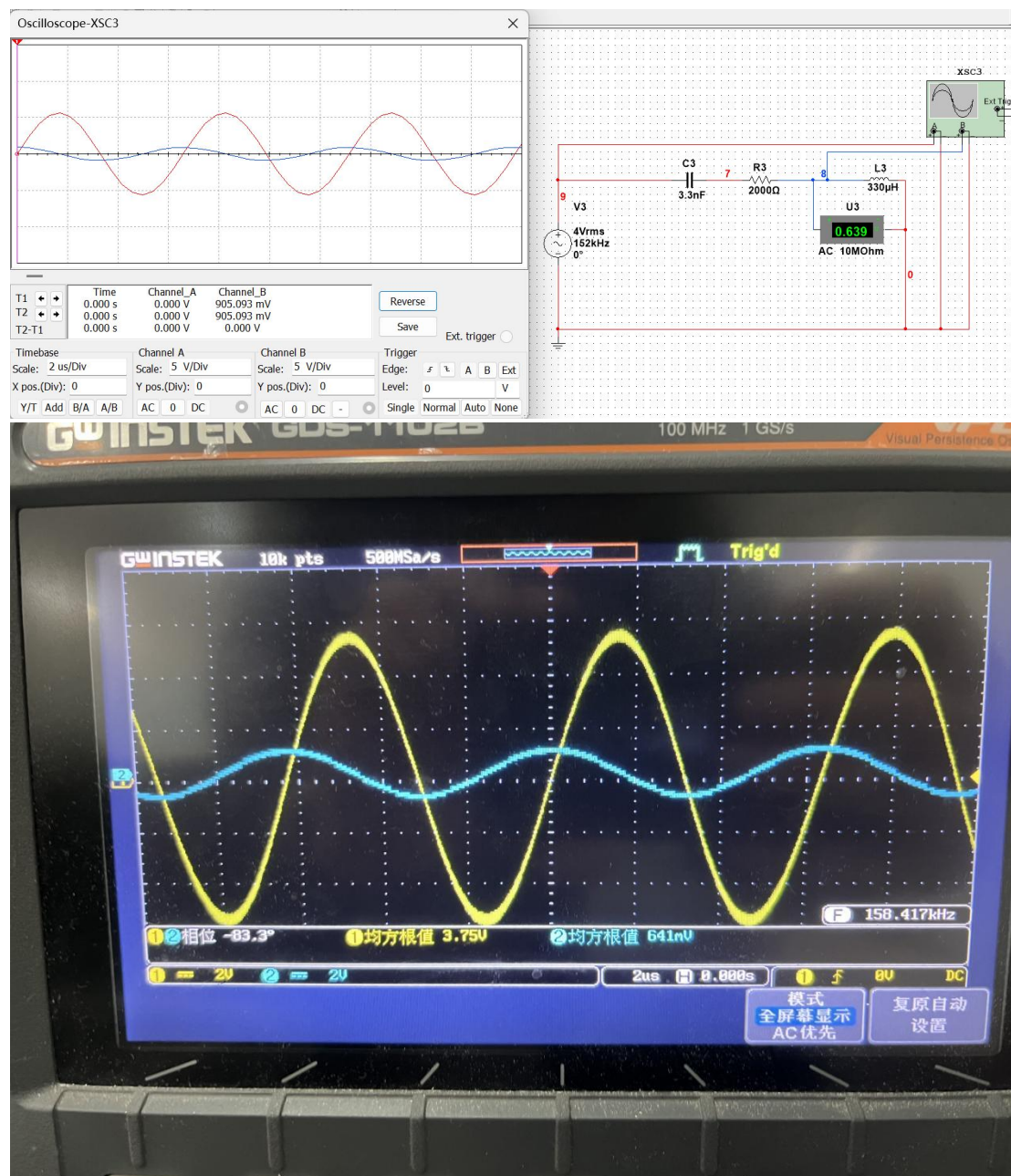
电阻 R:



电容 C:



电感 L:



四、实验使用仪器设备（名称、型号、规格、编号、使用状况）

SDG1032X 信号源

SDG3055X-E 万用表

GDS1102B 示波器

Multisim 软件

五、实验总结

（实验出现的问题及解决方法、思考题（如有）、收获体会等）

总结：

在本次实验中，掌握了 Multisim 幅频、相频特性的仿真、以及 Multisim 示波器的仿真，并将结果与实物搭接电路实验室示波器测量数据进行了对比，对于 RLC 谐振电路的理解更深刻了，在操作时要看清各变量的单位，尤其是注意判断是否是有效值（即均方根值）

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频率特性测试结果有无影响？

作用就是提供激励。改变参数无影响，因为频率 f 由电路元器件本身的性质决定。 $|H(j\omega)|$ 为电压比，与信号源的电压大小也无直接关联。

（2）试写出判定 RLC 串联电路处于谐振状态的三种实验方法。

方法 1 调节激励信号频率测量端口电压、电流（电阻电压）同相位

方法 2. 调节激励信号频率测量电阻电压的最大值

方法 3 调节激励信号频率测量电容 + 电感电压的最小值

方法 4 调节激励信号频率，使电容、电压两端电压相等

（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？

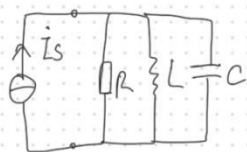
信号源输出信号幅度选择 $4V_{rms}$ 。没有变化。

（4）在谐振频率点、及谐振频率左右，电路的特性有什么变化？

在谐振频率点右侧，频率大于谐振频率，电感较大，电路呈现感性；
在谐振频率点左侧，频率小于谐振频率，电容较大，电路呈现容性。
无论在左侧还是右侧，电路的电压电流都变小，总阻抗变大。

（5）写出 RLC 并联电路处于谐振状态的特点。

RLC 并联谐振



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

$$\Downarrow$$

$$j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

\Downarrow
=0 时, 谐振时

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ 导纳 } Y = G = \frac{1}{R} \text{ (呈纯电阻, 且最小)}$$

$$U = \frac{I}{Y} \text{ 最大值}$$

电感和电容电流幅度相等, 且等于端口电流 Q 倍

$$I_{L0} = I_{C0} = Q I_s = Q I_{r0}$$

$$Q = \frac{R}{\omega_0 L} = R \omega_0 C = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

六、参考资料 (预习、实验中参考阅读的资料)

- [1]王玉清.信号发生器输出幅度对 RLC 串联谐振电路特性的影响[J].延安大学学报(自然科学版),2022,41(04):108-111.DOI:10.13876/J.cnki.ydnse.2022.04.108.
- [2]赵文来,杨俊秀,陈秋妹.Python 在 RLC 串联谐振实验数据处理中的应用[J].大学物理实验,2022,35(06):85-90.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.06.018.
- [3]陈宗桂,王立刚,薛峰等.串联谐振电路的仿真研究在实验教学中的应用[J].电子设计工程,2023,31(17):113-117.DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2023.17.023.