



实验与创新实践教育中心

# 实验报告

课程名称： 模拟电子技术实验 实验名称： 实验五：有源滤波电路的研究

专业-班级： 21级自动化6班 学号： 210320621 姓名： 吴俊达

实验日期： 2023 年 5 月 18 日 评分： \_\_\_\_\_

教师评语：

助教签字： \_\_\_\_\_

教师签字： \_\_\_\_\_

日 期： \_\_\_\_\_

# 实验预习

## 实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：\_\_\_\_\_ 原始数据审核：\_\_\_\_\_

(包括预习时，计算的理论数据)

- 1、一阶有源低通滤波器实域仿真：按照 5-8 图参数进行仿真

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量不同频率下的输入输出信号的幅值、周期并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

- 2、一阶有源低通滤波器仿真：按照 5-9 图参数，计算的截止频率= 361.7 Hz (写出计算过程)

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 22nF \times 20k\Omega} = 361.7 \text{ Hz}$$

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图 (幅频特性曲线)，测量其截止频率并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

- 3、二阶有源低通滤波器频域仿真：按照 5-10 图参数，计算的特征频率= 361.7 Hz，截止频率= 339.84 Hz  $Q = \frac{2}{3}$ 。改变  $R_3, R_4$  大小， $R_3=10k\Omega, R_4=10k\Omega$ ，计算的  $Q_1 = \underline{1}$ ； $R_3=20k\Omega, R_4=10k\Omega$ ，计算的  $Q_2 = \underline{\infty}$ 。(写出计算过程)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 22nF \times 20k\Omega} = 361.7 \text{ Hz} \quad \text{令} \quad \left| 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\frac{\omega}{Q\omega_0} \right| = \sqrt{2}, \text{ 此时 } Q = \frac{1}{3 - (1 + \frac{R_3}{R_4})} = \frac{2}{3}$$

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1 + \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q^2} = 2 \Rightarrow \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 + \frac{1}{3}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1 = 0 \Rightarrow \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \frac{-\frac{1}{3} \pm \sqrt{\frac{1}{9} + 4}}{2} \Rightarrow \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 0.88 \Rightarrow f = 0.94 f_0 = 339.84 \text{ Hz}$$

$$R_3 = 10k\Omega, R_4 = 10k\Omega, Q_1 = \frac{1}{3 - (1 + \frac{R_3}{R_4})} = 1; \quad R_3 = 20k\Omega, R_4 = 10k\Omega, Q_1 = \frac{1}{3 - (1 + \frac{R_3}{R_4})} = \infty$$

保存三组 Q 值下仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图 (幅频特性曲线)，测量其截止频率并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

在  $Q=\infty$  时，选择一合适的输入电压 (幅值、频率)，测试此电路的实域波形并保存，实验最后要求统一给老师看波形图。

- 4、二阶有源高通滤波器频域仿真：按照 5-11 图参数，计算的特征频率= 361.7 Hz (写出计算过程)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 22nF \times 20k\Omega} = 361.7 \text{ Hz} \quad (\text{截止频率为 } f = \frac{1}{0.94} f_0 = 384.8 \text{ Hz})$$

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图 (幅频特性曲线)，测量其截止频率并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

- 5、二阶有源带通滤波器频域仿真：按照 5-12 图参数，计算的中心频率= 79.6 Hz 上限截止频率= 128.8 Hz 下限截止频率= 49.2 Hz 通频带 79.6 Hz。(写出计算过程)

$$\text{中心频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 0.1\mu F \times 20k\Omega} = 79.6 \text{ Hz}$$

$$\text{截止频率的计算: 令 } \left| 1 + j\frac{1}{3 - A_{uf}} \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right) \right| = \sqrt{2} \quad \text{此时 } A_{uf} = 1 + \frac{R_3}{R_4} = 2 \quad f_{bw} = 79.6 \text{ Hz}$$

$$\text{则 } 1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - 2 = 2 \Rightarrow \left(\frac{f}{f_0}\right)^4 + 1 - 3\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 = 0 \Rightarrow \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 = \frac{3 \pm \sqrt{5}}{2} \Rightarrow f_{p1} = \frac{\sqrt{5}-1}{2} f_0 = 49.2 \text{ Hz} \quad f_{p2} = \frac{\sqrt{5}+1}{2} f_0 = 128.8 \text{ Hz}$$

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图 (幅频特性曲线)，测量其中心频率，上下限截止频率并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

- 6、二阶有源带阻滤波器频域仿真：按照 5-13 图参数，计算的中心频率= 49.97 Hz。(写出计算过程)

$$\text{中心频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 0.1\mu F \times 31.8k\Omega} = 49.97 \text{ Hz}$$

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其中心频率并截图，实验最后要求统一给老师看波形图。

## 一、实验目的

1. 掌握有源滤波器的组成原理及滤波特性，学会用运算放大器、电阻、电容设计组成的有源低通、高通、带通、带阻滤波器。
2. 掌握仿真软件 ORCAD PSPICE 的使用。
3. 学习 RC 有源滤波器的设计，并用仿真软件验证其工作特性。
4. 学会调节滤波器截止频率及了解等效 Q 值对滤波器幅频特性的影响。

## 二、实验设备及元器件

ORCAD PSPICE 软件 SPB 16.6

## 三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

### （一）Pspice 软件简介

Pspice 是由 SPICE (Simulation Program with Intergrated Circuit Emphasis) 发展而来的用于微机系列的通用电路分析程序。Pspice 软件是一个通用的电路分析程序，它可以仿真和计算电路的性能。由于该软件提供了丰富的元件库，使得各种常用元器件随手可得，在软件上我们可以搭接任何模拟和数字或者数模混合电路。该软件使用的编程语言简单易学，对电路的计算和仿真快速而准确，强大的图形后处理程序可以将电路中的各电量以图形的方式显示在计算机的屏幕上，就像一个多功能、多窗口的示波器一样。Pspice 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能，以图形方式输入，自动进行电路检查，生成图表，模拟和计算电路。它的用途非常广泛，不仅可以用于电路分析和优化设计，还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学。与印制版设计软件配合使用，还可实现电子设计自动化。被公认是通用电路模拟程序中最优秀的软件，具有广阔的应用前景。

### （二）有源滤波电路

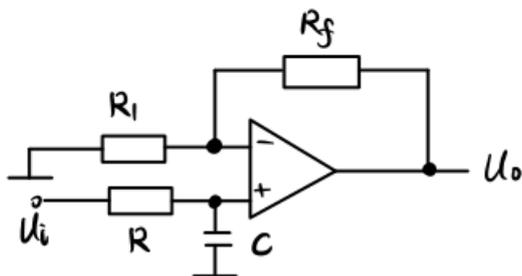
若滤波电路含有有源元件（双极型管、单极型管、集成运放）组成，则称为有源滤波电路。

有运算放大器和阻容元件组成的选频网络。用于传输有用频段的信号，抑制或衰减无用频段的信号。滤波器阶数越高，性能越逼近理想滤波器特性。有源滤波器主要分为四类：低通滤波器 (LPF)，高通滤波器 (HPF)，带通滤波器 (BPF)，带阻滤波器 (BEF)。

集成运算放大器是具有高开环电压放大倍数的多级直接耦合放大器。它具有体积小、功耗低、可靠性高等优点，广泛应用于信号的运算、处理和测量以及波形的发生等方面。

(1) 有源低通滤波器

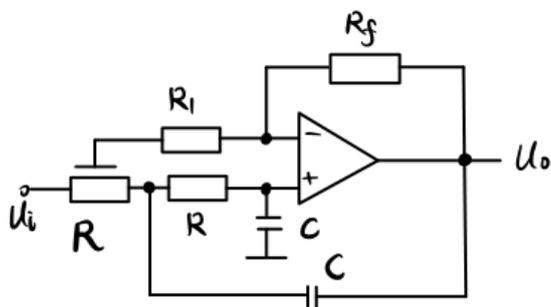
低通滤波器是一种用来传输低频段信号，抑制高频段信号的电路。  
一阶有源低通滤波器，如图 1 (a) 所示。



$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}}$$

$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}, \quad \omega_H = \frac{1}{RC}$$

二阶有源低通滤波器有多种电路连接形式，如图 2 和图 3 所示有源滤波器都是二阶有源低通滤波器，但滤波器特征参数略有不同。

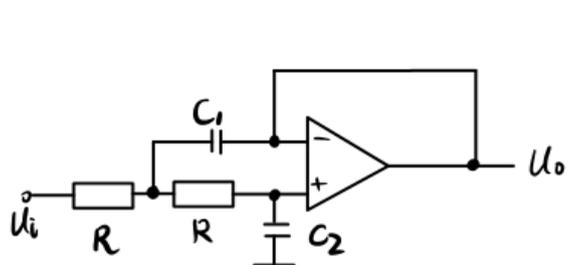


$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j\frac{\omega}{Q\omega_0}}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_0}, \quad A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1},$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

二阶压控电压源有源滤波器



$$H(j\omega) = \frac{1 = A_0}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j\frac{\omega}{Q\omega_0}}$$

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}}$$

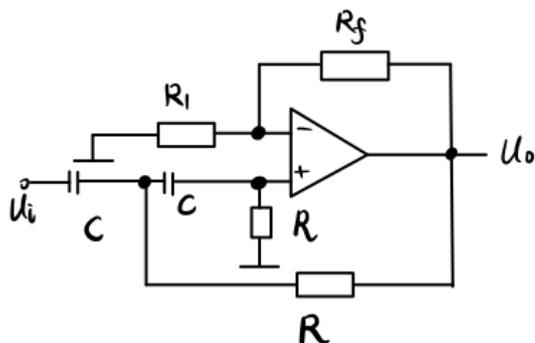
二阶有源滤波器

两有源低通滤波器频率特性的表达式相同，所以他们有相似的频率特性。两有源低通滤波器的差异：首先，是通带内放大倍数，一个是  $A_0$ ，另一个是 1；其次，是两有源低通滤波器的等效品质因素  $Q$  的表达式不一样，一个取决于  $A_0$ ，另一个取决于电容比值。

二阶有源低通滤波器幅频特性曲线和一阶有源低通滤波器不同：在  $Q=0.707$  时，两者幅频特性曲线相似，但二阶有源低通滤波器是按 40dB/10 倍频的速率衰减，一阶有源低通滤波器是按 20dB/10 倍频的速率衰减，即二阶滤波器有较好的衰减特性；其二是  $Q>0.707$  时二阶有源低通滤波器在  $\omega_0$  处出现峰值。

(2) 高通有源滤波器

高通滤波器是一种用来传输高频段信号，抑制或衰减低频段信号的电路。将低通滤波器中电阻电容位置互换，低通滤波器就变换为高通滤波器。二阶压控电压源高通有源滤波器，如图 4 (a) 所示。



$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 - (\frac{\omega_0}{\omega})^2 + jQ\frac{\omega_0}{\omega}}$$

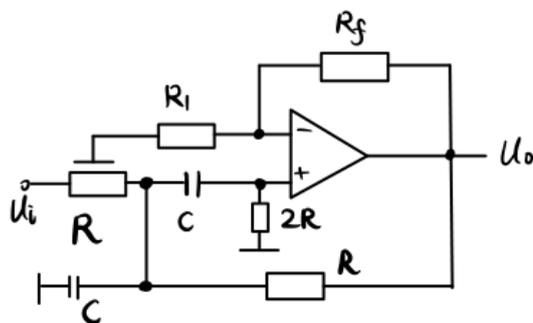
$$Q = \frac{1}{3 - A_0} \quad A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

(3) 二阶有源带通滤波器

带通滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号，而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以抑制或者衰减。如图 5 (a) 所示，二阶低通滤波器其中一级改成高通就构成了基本的二阶有源带通滤波器。

二阶压控电压源带通有源滤波器，如图 5 所示。



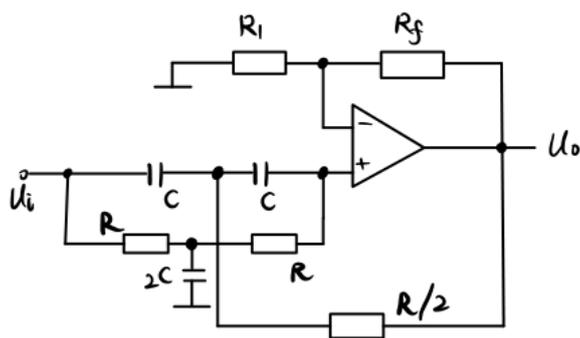
$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 + jQ(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$$

$$\omega_0 = 1/RC, \quad A_0 = \frac{R_1 + R_f}{2R_1 - R_f}$$

$$Q = \frac{R_1}{2R_1 - R_f}$$

(4) 二阶带阻滤波器

带阻滤波器是可以用来抑制或衰减某一频段信号，并让该频段以外的所有信号都通过的滤波器。如图 6 (a) 所示，无源低通滤波器和无源高通滤波器并联构成的双 T 网络，加上一级同相比例放大器就构成了基本的二阶有源带阻滤波器。



$$H(j\omega) = \frac{A_0 (1 - \frac{\omega}{\omega_0})^2}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + jQ\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$Q = \frac{1}{4 - 2A_0} \quad A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

## 四、实验过程

（叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-1”）

本次实验过程可简述，不需要描述软件的使用，需要描述遇到的问题，以及你是怎么解决的。

问题：在仿真带阻滤波器时，调用 CenterFrequency 函数无法显示正确结果。

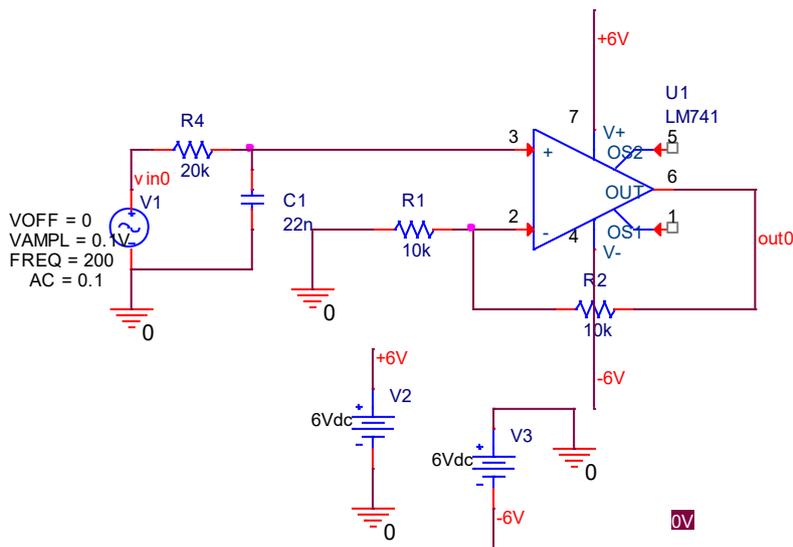
解决方法：采用光标来对齐放大倍数最低点，获得此点对应频率，即为中心频率。

## 五、实验数据分析

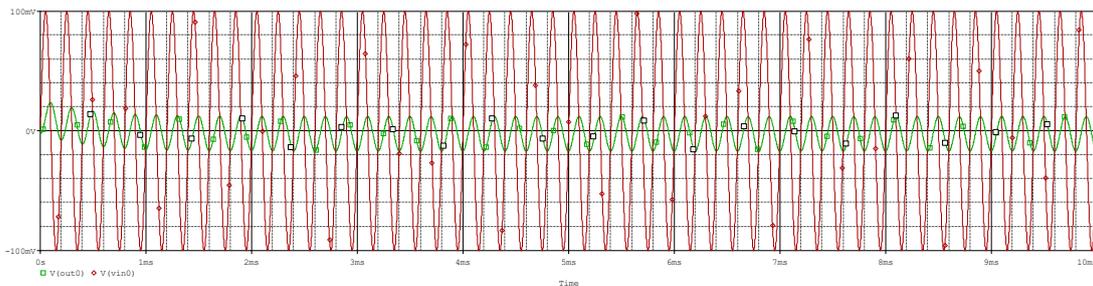
（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析和处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行。也可以按要求自拟实验数据分析文档附上。）

1、一阶有源低通滤波器实域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）

在两种输入条件下，测试并保存仿真电路图截屏和输入、输出波形图，测量输入信号和输出信号的幅值、周期等信息并截图。

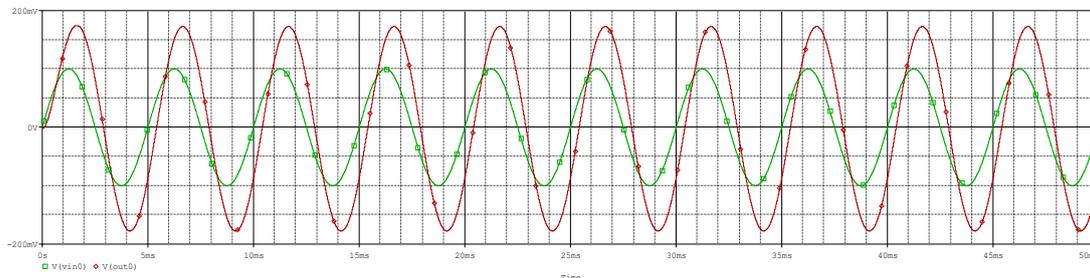


$f=5\text{kHz}$  时（测量量依次为：输出、输入的周期；输入、输出的幅值，可以看到信号被衰减）



Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Period(V(out0))	212.24427u
<input checked="" type="checkbox"/>	Period(V(vin0))	199.99999u
<input checked="" type="checkbox"/>	(Max_XRange(V(vin0),2ms,8ms)- Min_XRange(V(vin0),2ms,8ms))/2	99.99469m
<input checked="" type="checkbox"/>	(Max_XRange(V(out0),2ms,8ms)- Min_XRange(V(out0),2ms,8ms))/2	14.48885m

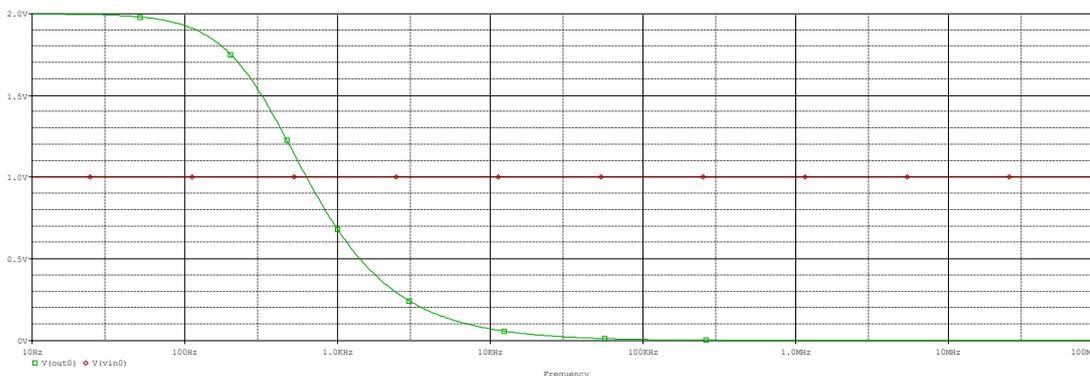
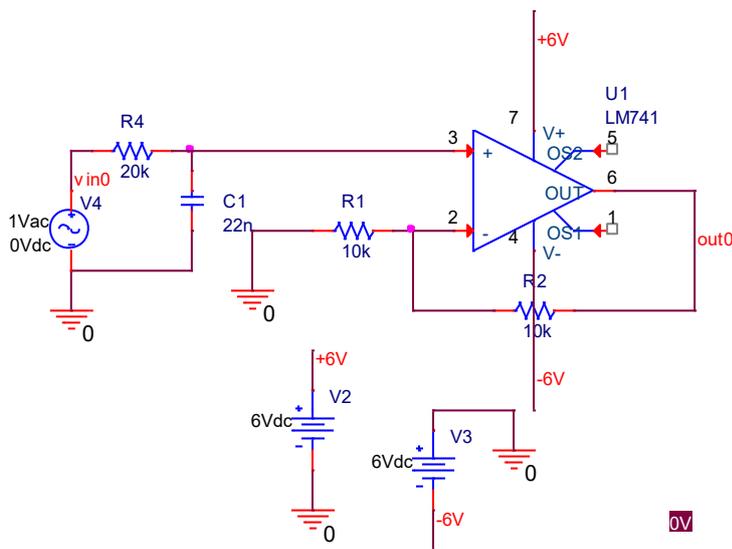
$f=200\text{Hz}$  时（测量量依次为：输出、输入的周期；输入、输出的幅值）



Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Period(V(out0))	5.34565m
<input checked="" type="checkbox"/>	Period(V(vin0))	5.00000m
<input checked="" type="checkbox"/>	(Max_XRange(V(vin0),2ms,8ms)- Min_XRange(V(vin0),2ms,8ms))/2	99.99999m
<input checked="" type="checkbox"/>	(Max_XRange(V(out0),2ms,8ms)- Min_XRange(V(out0),2ms,8ms))/2	175.01473m

2、一阶有源低通滤波器频域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其截止频率并截图，同计算的截止频率相比较，得出实验和理论分析结论



Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(out0))	361.13203

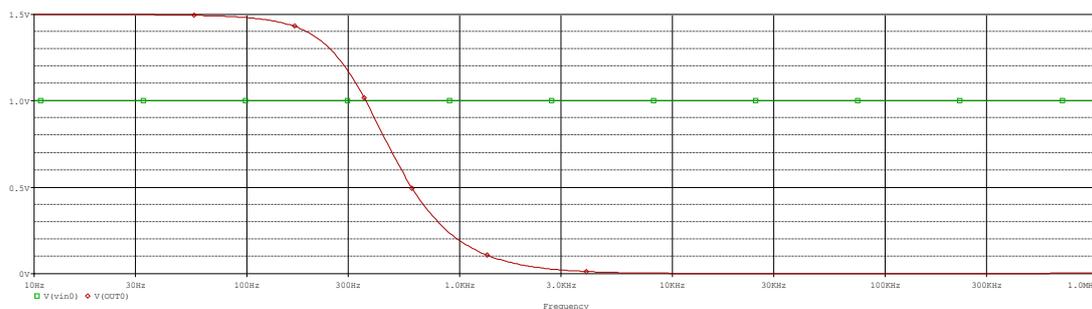
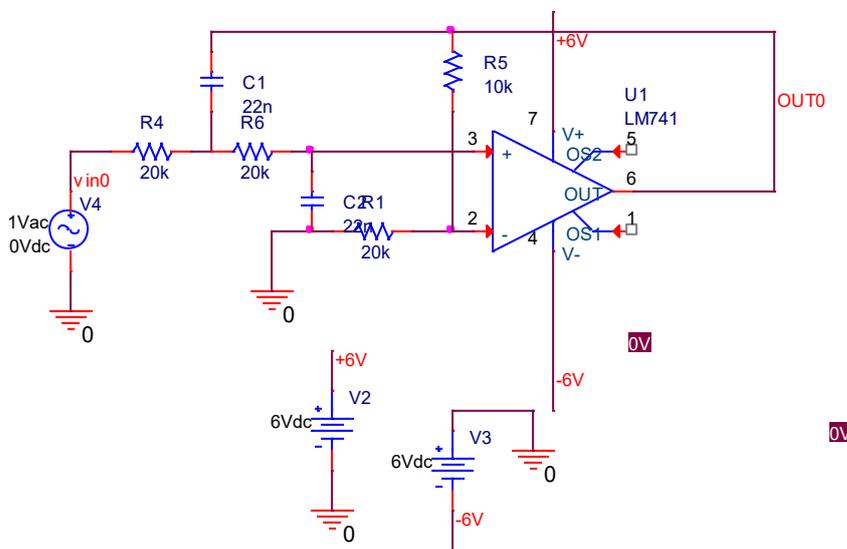
与理论计算所得截止频率接近，在误差允许范围内的情况下，认为理论计算值是准确的。

3、二阶有源低通滤波器频域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其截止频率并截图。通过改变  $R_3$ ,  $R_4$  的大小，来改变 Q 值的大小，需测试 3 种不同 Q 值下的波形。分析 Q 值大小对于二阶有源低通滤波器幅频特性的影响，并同一阶有源滤波器幅频特性进行比较。

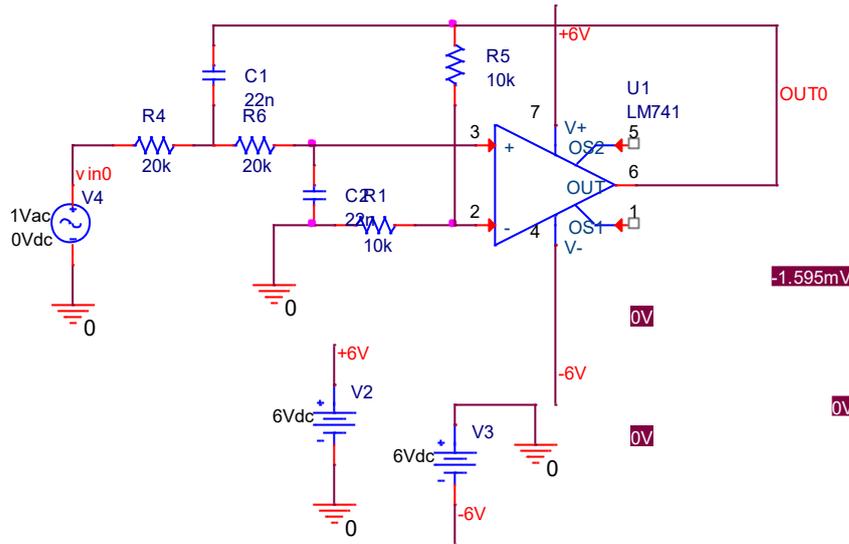
改变  $R_3$ ,  $R_4$  的大小，在  $Q=\infty$  时，选择一合适的输入电压（幅值、频率），测试此电路的实域波形并保存，观察输入电压 VSIN 和输出电压  $V_{out}$  之间的关系，得出结论，分析理论和仿真是否一致。

$R_3=10k\Omega$ ,  $R_4=20k\Omega$ :



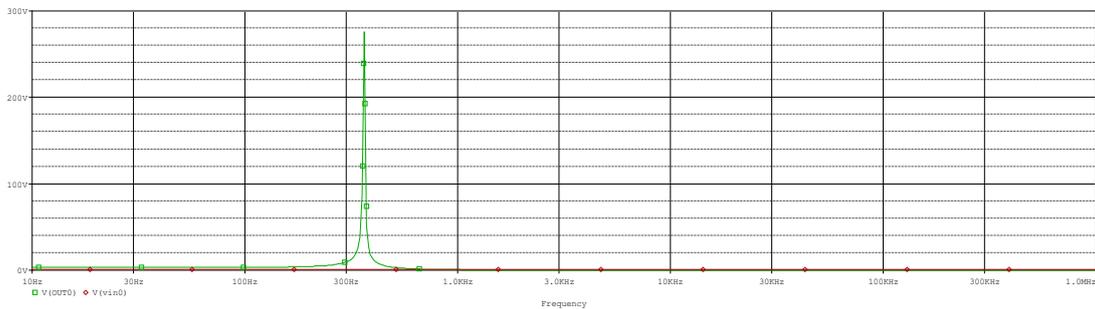
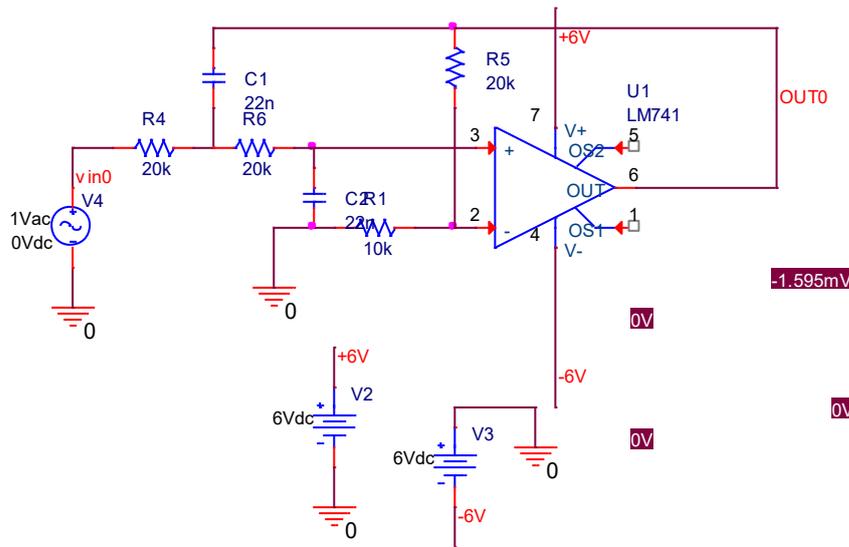
Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(OUT0))	339.43406

$R_3=R_4=10k\Omega$ :

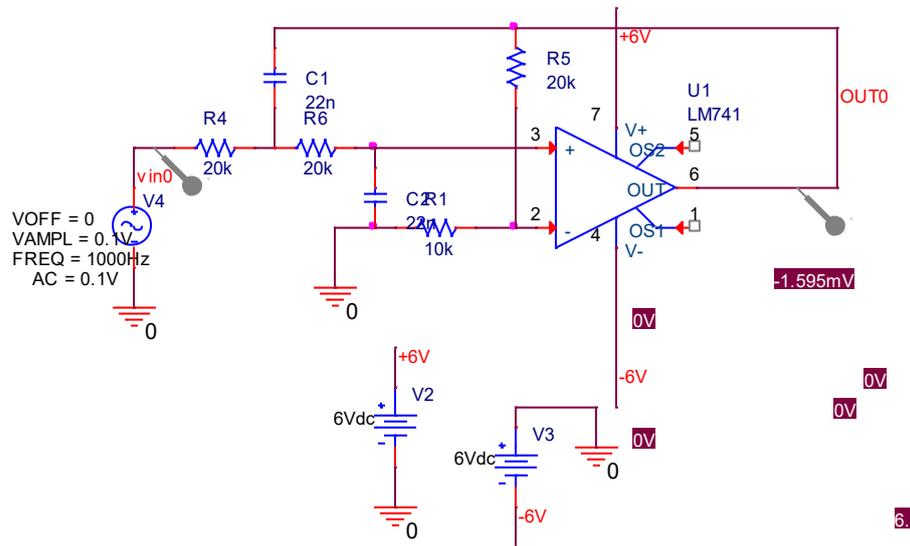
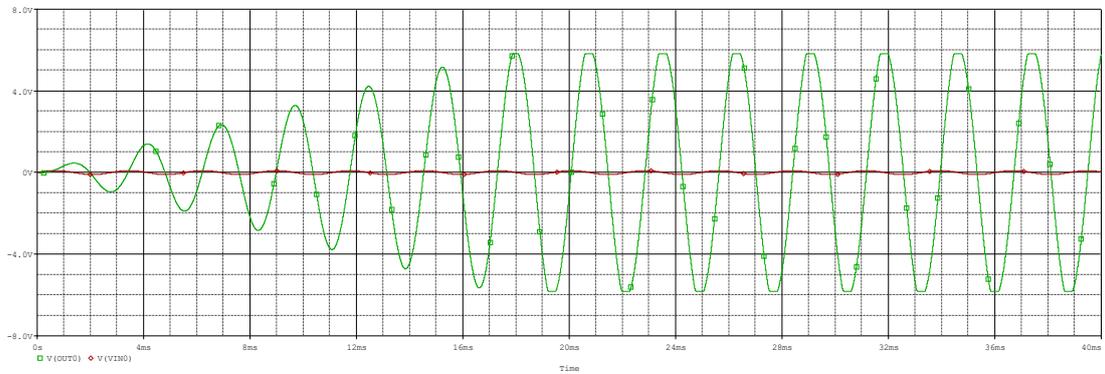
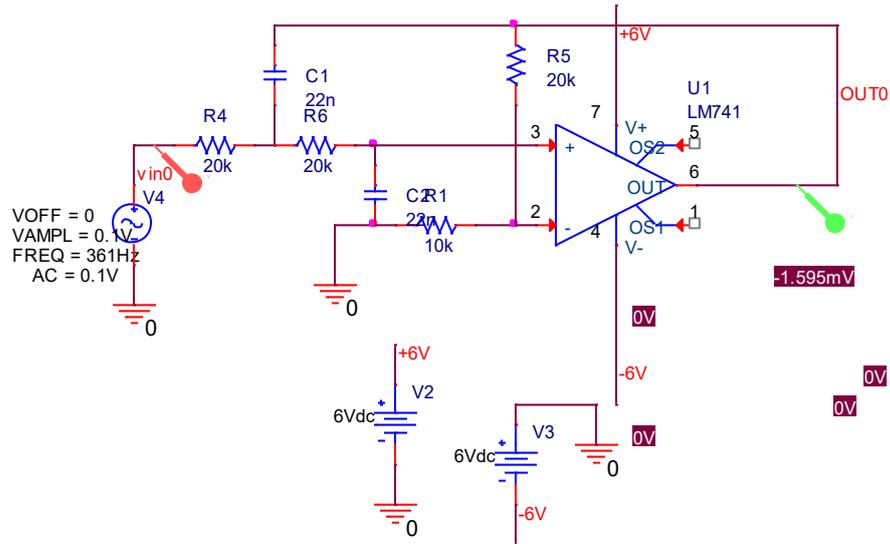


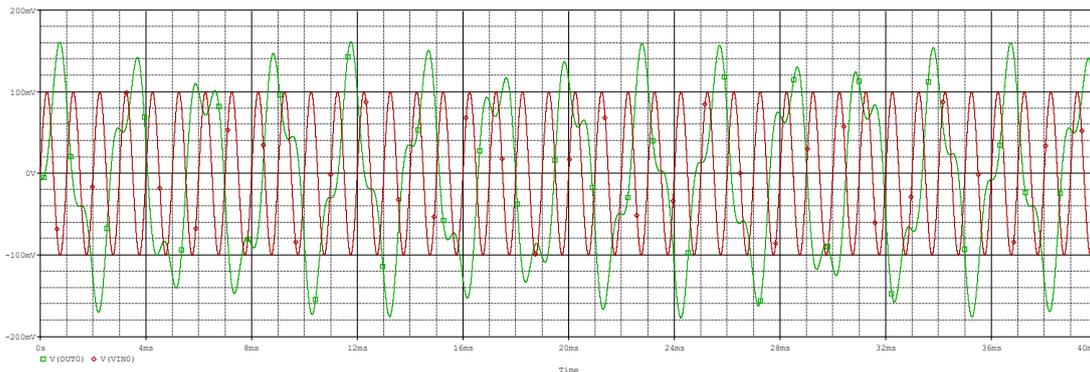
Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(OUT0))	422.15513

$R_3=20k\Omega$ ,  $R_4=10k\Omega$ : (也即  $Q=\infty$ )

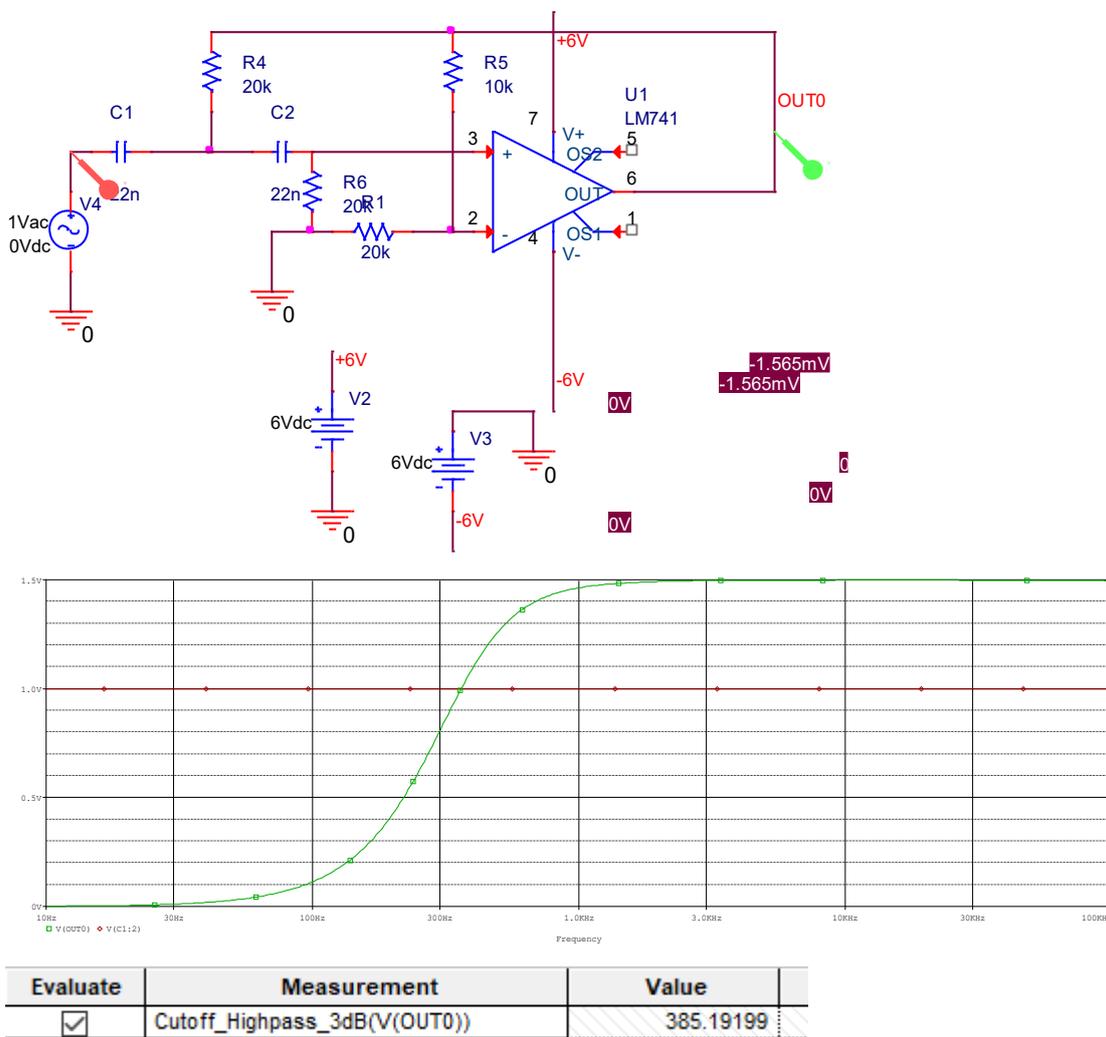


用 cursor 测出下限截止频率 364.8Hz

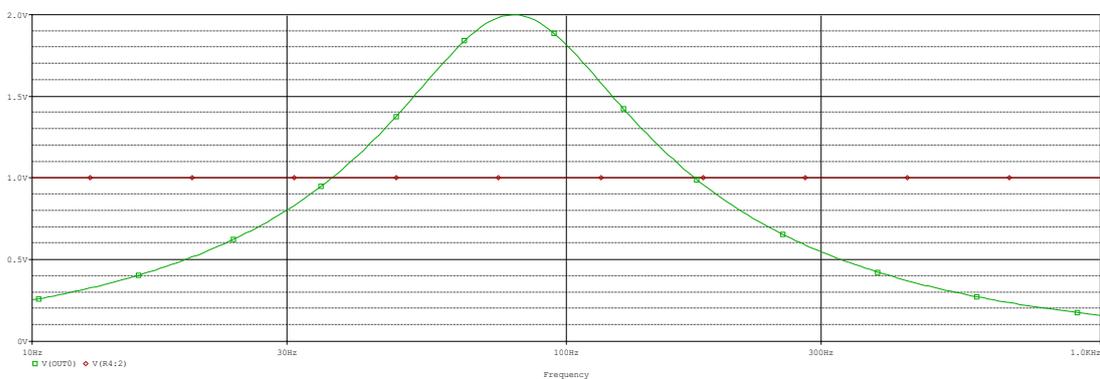
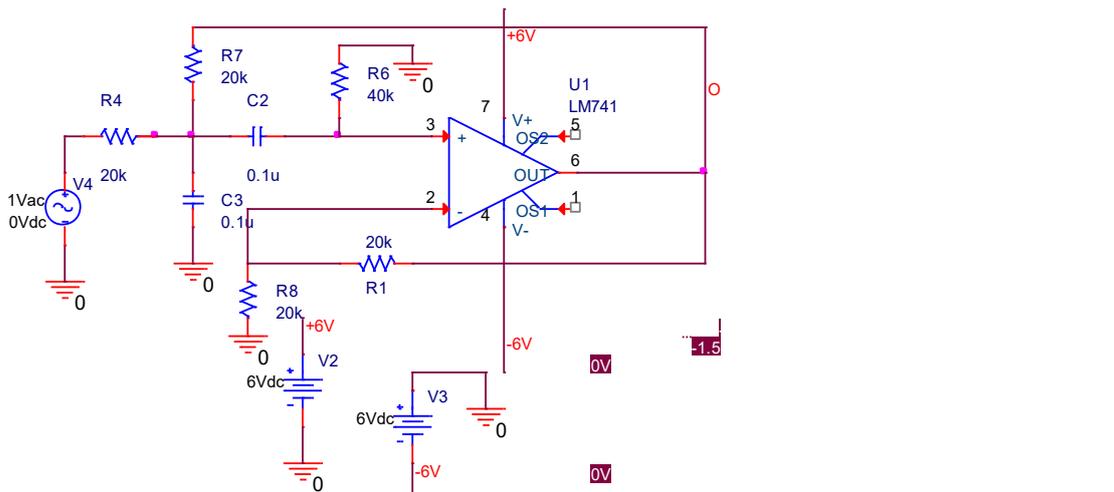




4、二阶有源高通滤波器频域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）  
保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其截止频率并截图，同计算的截止频率相比较，得出实验和理论分析结论。



5、二阶有源带通滤波器频域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）  
保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其中心频率并截图，同计算的中心频率相比较，得出实验和理论分析结论。

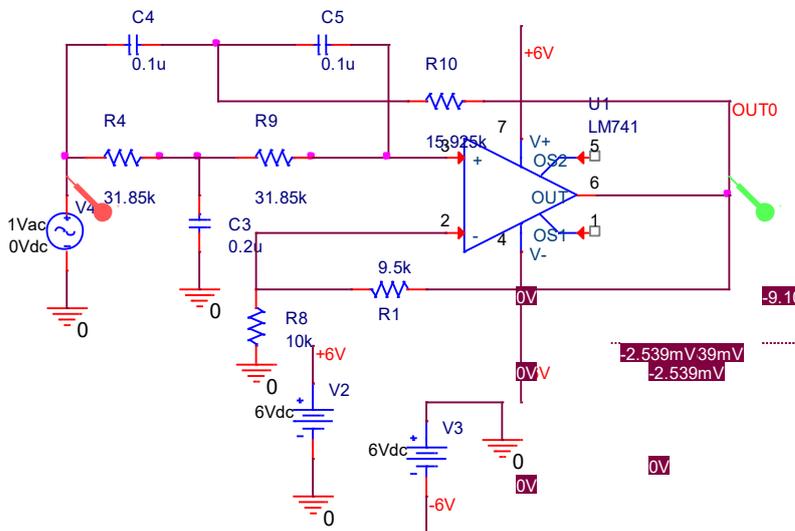


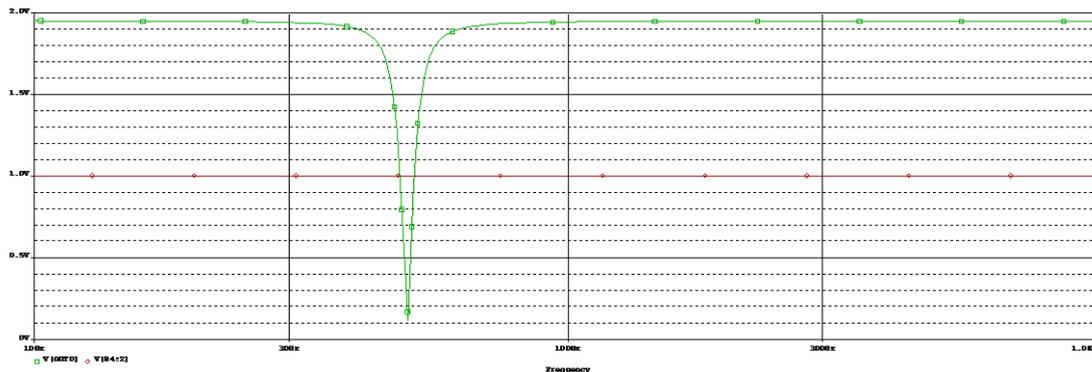
Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Highpass_3dB(V(OUT0))	49.23079
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(OUT0))	128.60017

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	79.433	10.000	69.433
CURSOR 1,2	V(U6:OUT)	1.9997	253.290m	1.7464

6、二阶有源带阻滤波器频域仿真：（打印出电路图，和输出波形图，贴上）

保存仿真电路图截屏和输出波形  $V_{out}$  图，测量其中心频率并截图，同计算的中心频率相比较，得出实验和理论分析结论。





Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	50.119

(单位: Hz)

## 六、问题思考

(回答指导书中的思考题)

1. 分析有源滤波器和无源滤波器的差异。

答: (1) 构成元件不同。若滤波电路仅由无源元件(电阻、电容、电感)组成,则称为无源滤波器;若滤波电路由无源元件和有源元件(如双极性管、场效应管、集成运放)构成,则称为有源滤波器。

(2) 带负载能力不同。无源滤波电路的通带放大倍数及其截止频率都随负载而变化,而有源滤波电路由于常常引入运放并加入负反馈构成隔离电路,所以负载变化对放大倍数的影响大大减小了,因此频率特性不变。

(3) 工作条件不同。有源滤波电路必须在合适的直流电源供电下才能起滤波作用,而无源滤波器不需要外加直流电源。

(4) 适用场合不同。无源滤波电路可适用于高电压大电流的情形,而有源滤波电路通常只适用于较小信号的处理。

2. 是否可以运用两个运放搭建二阶有源滤波器,如果可以,和单个运放构成的二阶有源滤波器有什么差异。

答: 可以。一般用两个运放组成带通滤波器。与单个运放相比,主要是输入阻抗和输出阻抗不同,特别是在小信号时容易产生相移。

## 七、实验体会与建议

无。