

# 浙江大学实验报告

## Lab6 滤波器的设计与实现

2024/4/2

### 一、实验目的

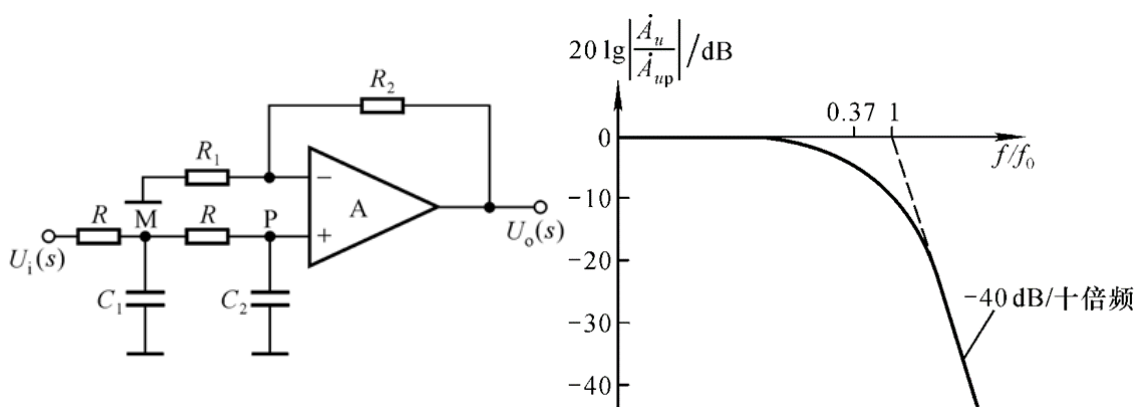
1. 掌握有源滤波器的分析和设计方法；
2. 学习有源滤波器的调试方法和幅频特性的测量方法；
3. 了解滤波器的结构和参数对滤波器性能的影响；
4. 学习用仿真的方法来研究滤波电路，了解元件参数对滤波效果的影响。

### 二、实验要求

1. 在实验板上安装所设计的电路。
2. 有源滤波器的静态调零。
3. 测量滤波器的通带增益 $\dot{A}_{up}$ 、通带截止频率 $f_p$ 。
4. 测量滤波器的频率特性。
5. 改变电路参数，研究品质因数 $Q$ 对滤波器频率特性的影响。

### 三、实验原理

#### (1) 简单二阶LPF



$$\dot{A}_{up} = 1 + \frac{R_f}{R} < 3$$

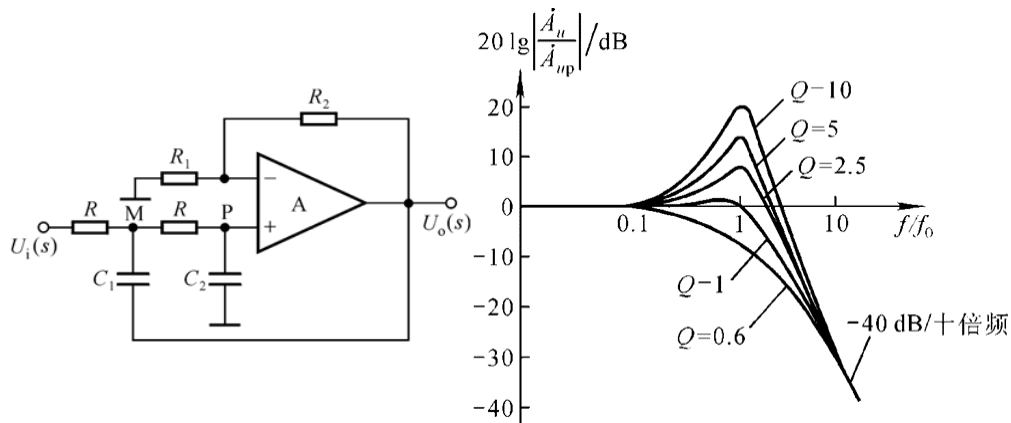
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{vp}}{-(wRC)^2 + 3jwRC + 1}$$

$$\dot{A}_u = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{1}{1 + j3\frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_p = 0.37f_0$$

## (2) 压控电压源 (VCVS) 二阶LPF



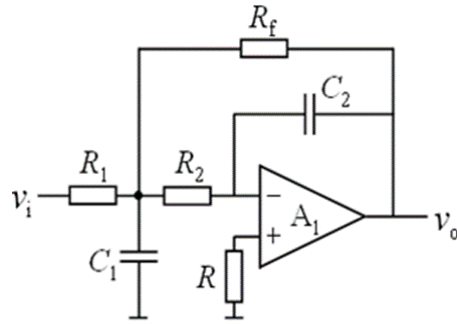
$$\begin{aligned} \dot{A}_v &= \frac{\dot{A}_{vp}}{-(wRC)^2 + (3 - \dot{A}_{vp})jwRC + 1} \\ &= \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{1}{1 + j(3 - \dot{A}_{vp})\frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \end{aligned}$$

$$\text{定义 } Q = \left| \frac{1}{3 - \dot{A}_{up}} \right|$$

$$\text{当 } f = f_0 \text{ 时, } |\dot{A}_v| = |Q \dot{A}_{vp}|$$

- $\dot{A}_{up}$  的改变, 能够改变  $Q$  的值, 相应改变在  $f_0$  左右的幅频特性 (电容在  $f_0$  附近进行正反馈, 增大原来的幅频特性), 使其接近理想情况。
- 同时可以知道,  $\dot{A}_{vp} \geq 3$  时,  $Q = \infty$  电路产生自激振荡, 无法稳定工作。
- 由于为二阶滤波, 所以以 -40dB/十倍频的大小幅频大小下降。

### (3) 多路负反馈型二阶LPF(MFP)



$$\dot{A}_{us} = \frac{\frac{R_f}{R}}{1 + sC_2R_2R_f\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}\right) + s^2C_1C_2R_2R_f}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1C_2R_2R_f}}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\left(\frac{f}{f_0}\right)}$$

$$Q = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}}\right)\sqrt{\frac{C_1}{C_2R_2R_f}}$$

$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{\left(2 - \frac{1}{Q^2}\right)^2 + 4}}{2}}f_0$$

若实验过程中, 选择 $R_1 = R_2 = R_f = R$ , 则:

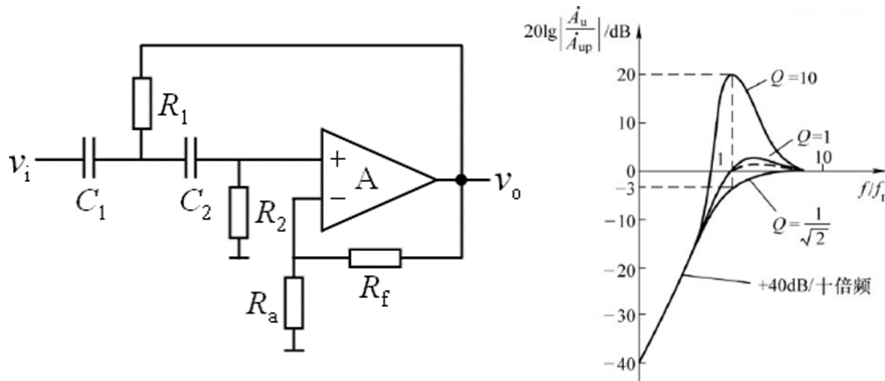
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1C_2}R}$$

$$C_f = \sqrt{C_1C_2}$$

$$Q = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

- $\dot{A}_{up}$ 的改变, 能够改变Q的值, 相应改变在 $f_0$ 左右的幅频特性, 使其接近理想情况。
- 以-40dB/十倍频的大小幅频大小下降

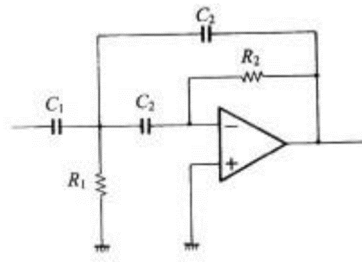
### (4) 压控电压源 (VCVS) 二阶HPF



$$\dot{A}_{vp} = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{1}{1 + j\left(3 - \dot{A}_{vp}\right)\frac{f_0}{f} - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}$$

- 与VCVS LPF相对应

## (5) 多路负反馈二阶HPF(MFB)



与LPF相对应，若选用 $C_1 = C_2 = C_3 = C$ ，理论计算如下：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2} C}$$

$$R_f = \sqrt{R_1 R_2}$$

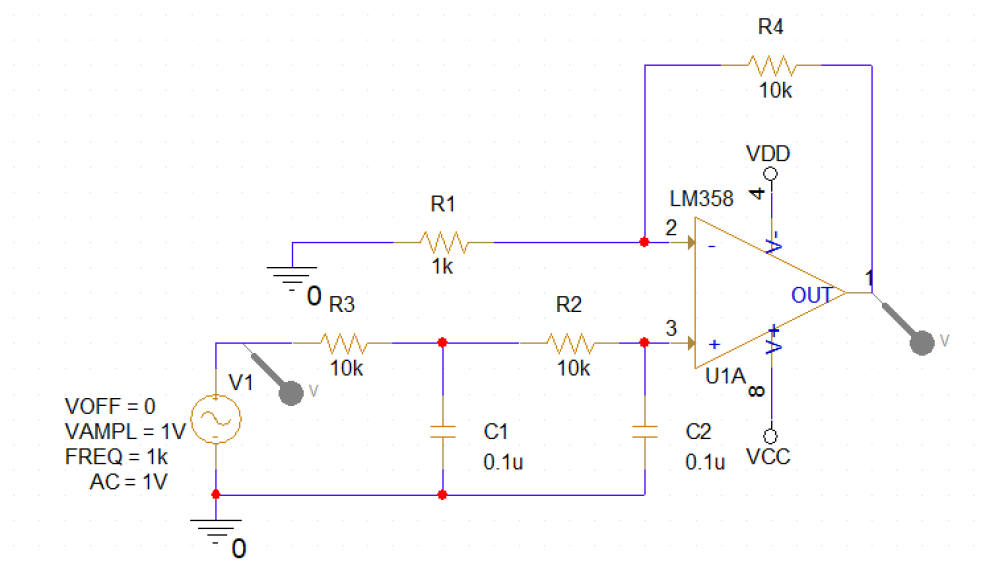
$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

## (6) 带通滤波器

- 由一个低通滤波器和一个高通滤波器组成，这样子能够很好地限制通过滤波器的频率大小。

# 四、实验过程

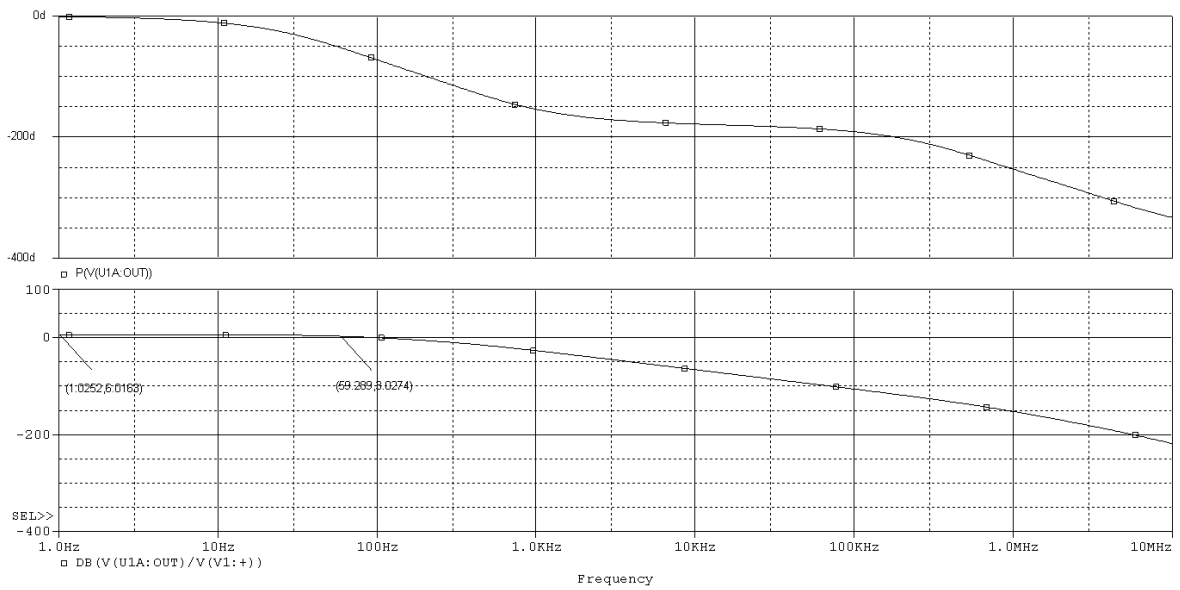
## (1) 简单二阶LPF



1. 理论计算该情况下的理论低通理论低通滤波值为：

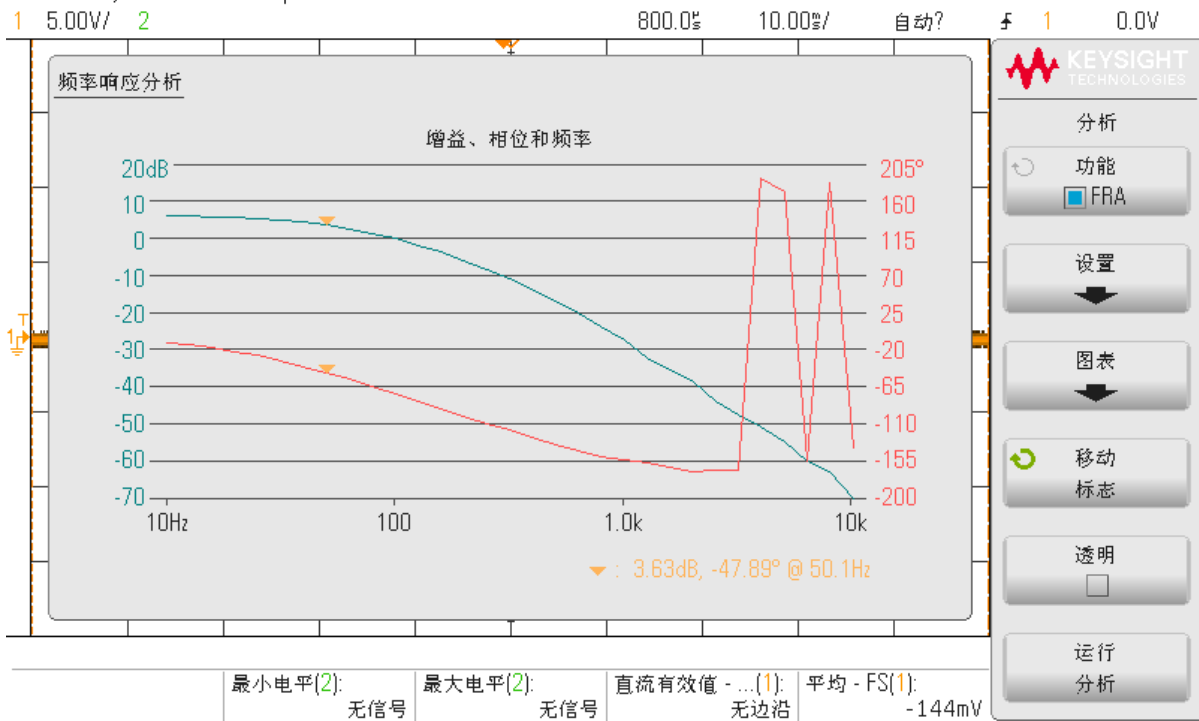
$$f_p = 0.37 f_0 = 58.9 Hz$$

2. 使用Pspice搭建如上电路图进行仿真，其中选择AC=1V，使得输出电压大小即为幅值放大大小，输入函数 $P(V)$ 和 $DB(V)$ ，得到幅频相频曲线：



3. 搭建实际电路测得如下结果：

DSO-X 1102G, CN58526268, Tue Apr 02 14:42:00 2024



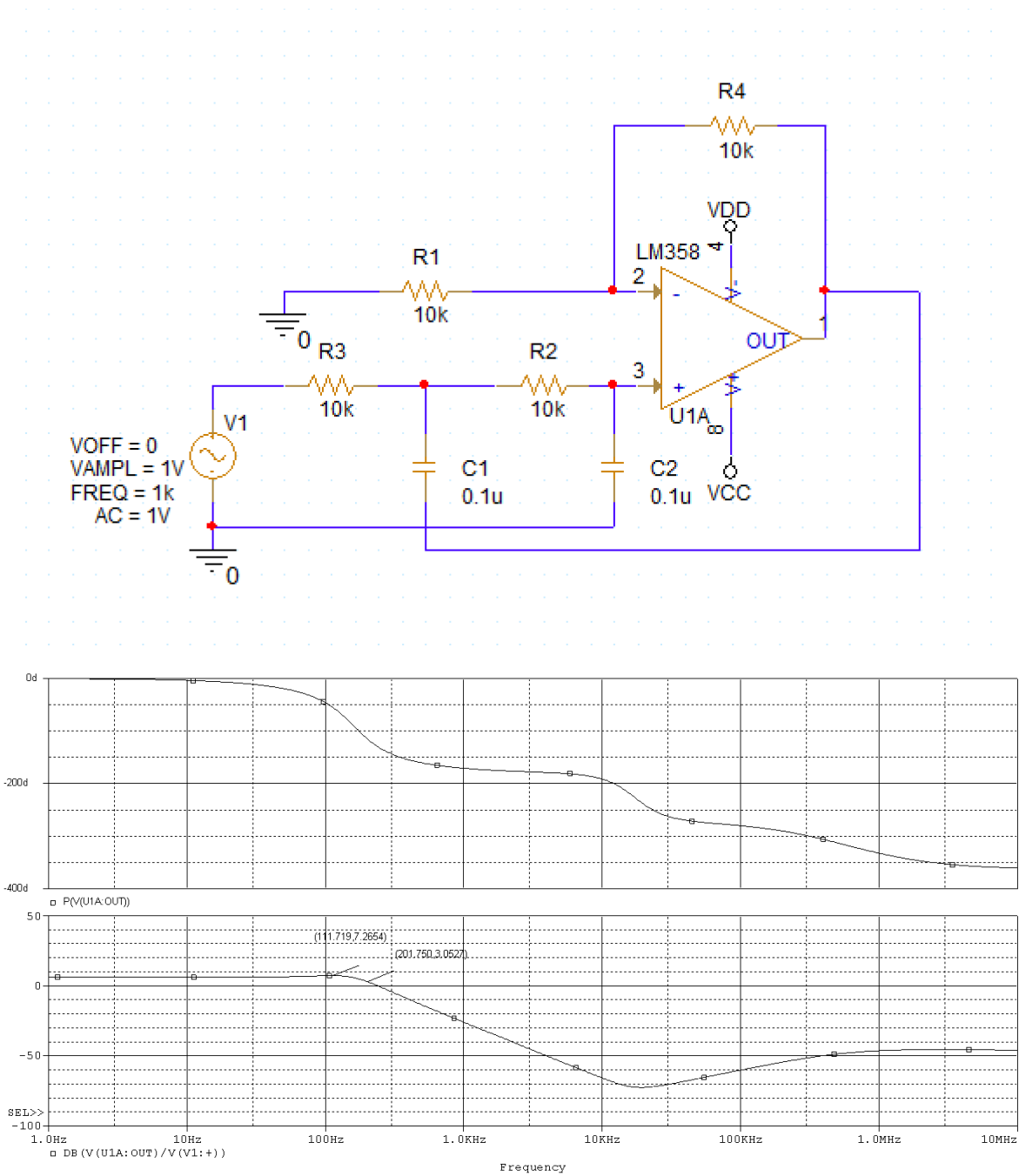
数据记录如下：

	$f_p/\text{Hz}$	
理论	58.9Hz	以-20dB/十倍频下降
仿真	59.289Hz	以-20dB/十倍频下降
实验	50.1Hz	以-20dB/十倍频下降

- 实验与理论和仿真值相差较大的原因为：测量点数过少，无法精确得到降低3dB的数据，只能在降低3dB附近取值，但是左右点的间隔不超过10dB，也就意味着结果比较正确。

(2) 压控电压源 (VCVS) 二阶LPF

1. 搭建PSPice仿真图如下，对该电路图测量幅频相频特性：



$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 159.2Hz$$

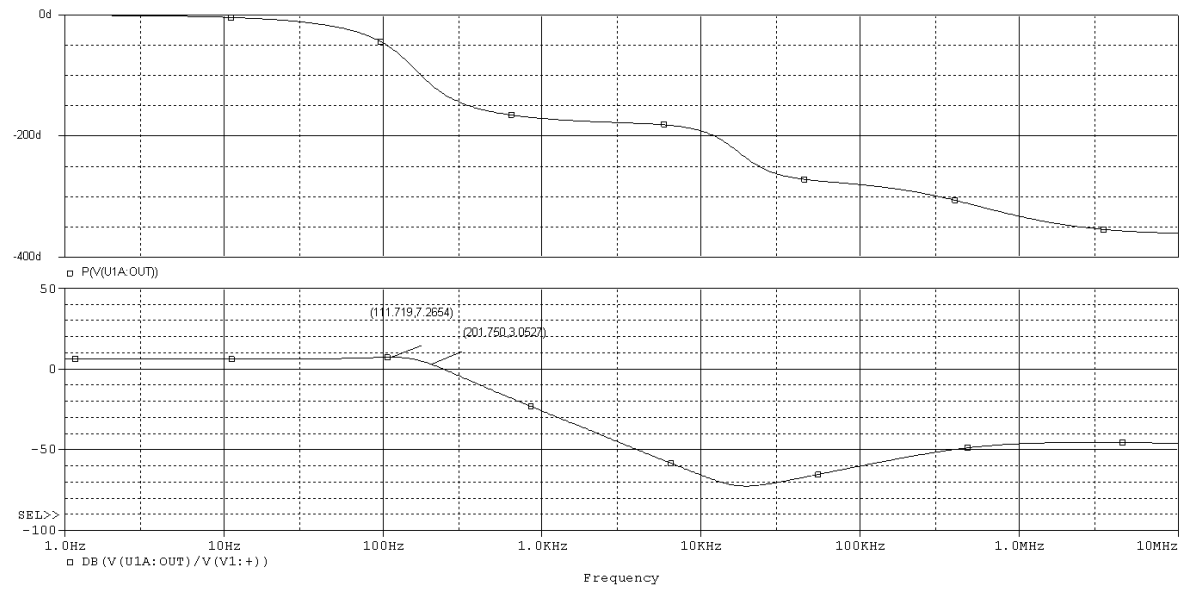
2. 改变电路参数，重新进行测量

R	$R_f$	Q	仿真幅 频曲线 图	$f = f_0, \dot{A}_v$	$f_p/\text{Hz}$	实验幅 频曲线 图	$f = f_0, \dot{A}_v$	$f_p/\text{Hz}$
10k	10k	1	【1】	7.2654	201.750	【2】	7.58	199.5
20k	10k	0.6	【3】	0.03	159.665	【4】	/	158.5
5.1k	10k	25.5	【5】	37.238	246.873	【6】	29.71	/

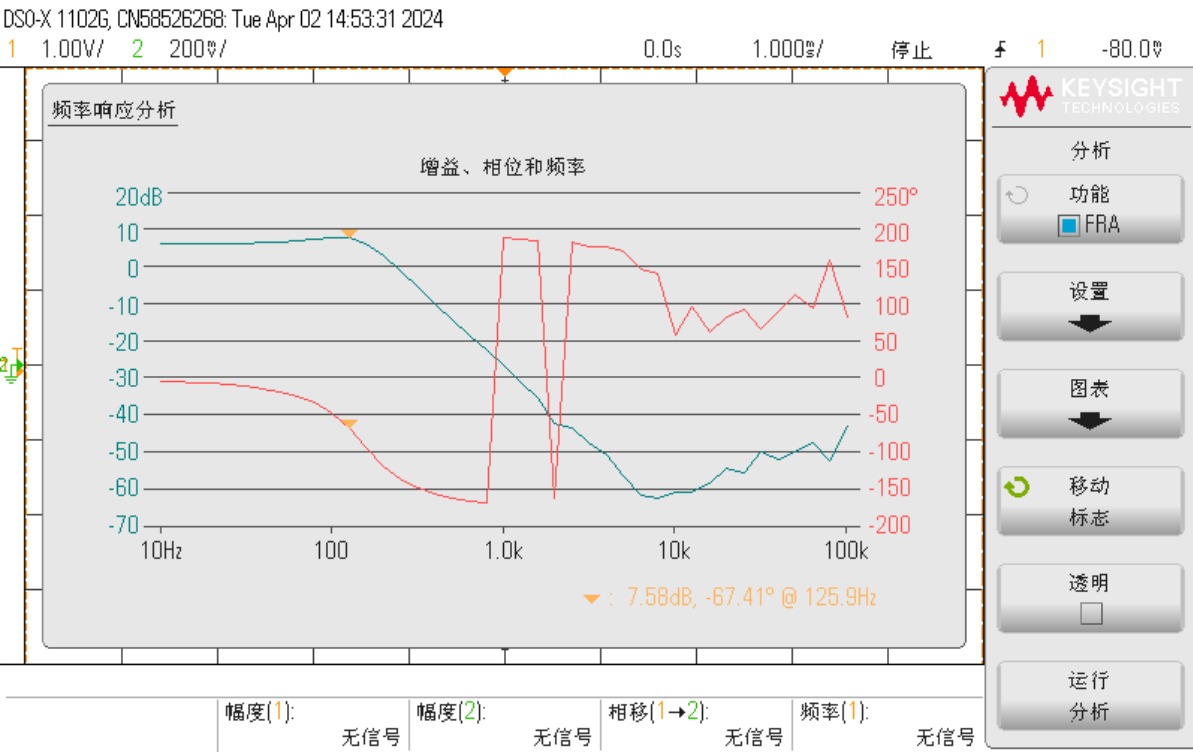
• 仿真结果与理论值有一定的偏差，但基本一致。

- Q的变化会使得 $f_0$ 附近的点的大小，能够使它更加接近理想滤波器。
- 仿真结果中可以看到，幅频下降部分，基本以-40dB/十倍频的幅度下降。
- 10k,10k

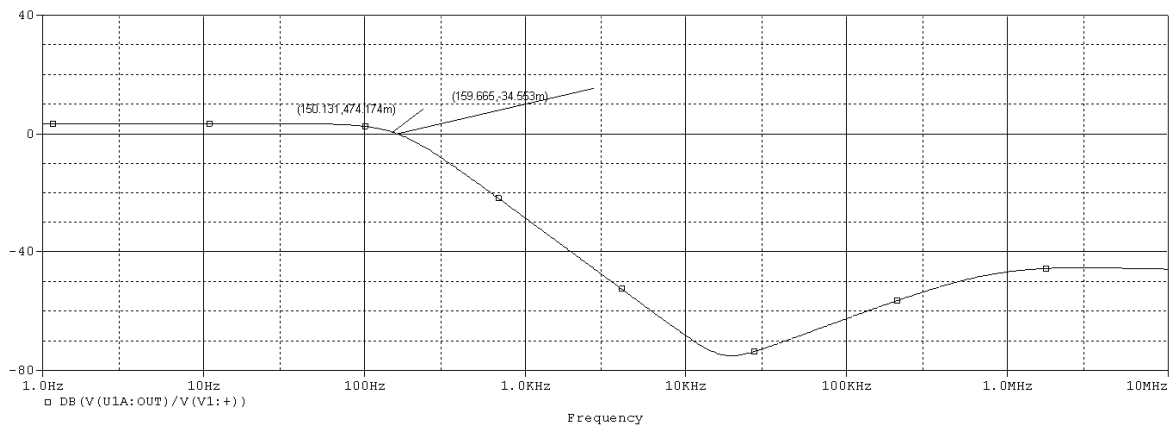
【1】：



【2】：

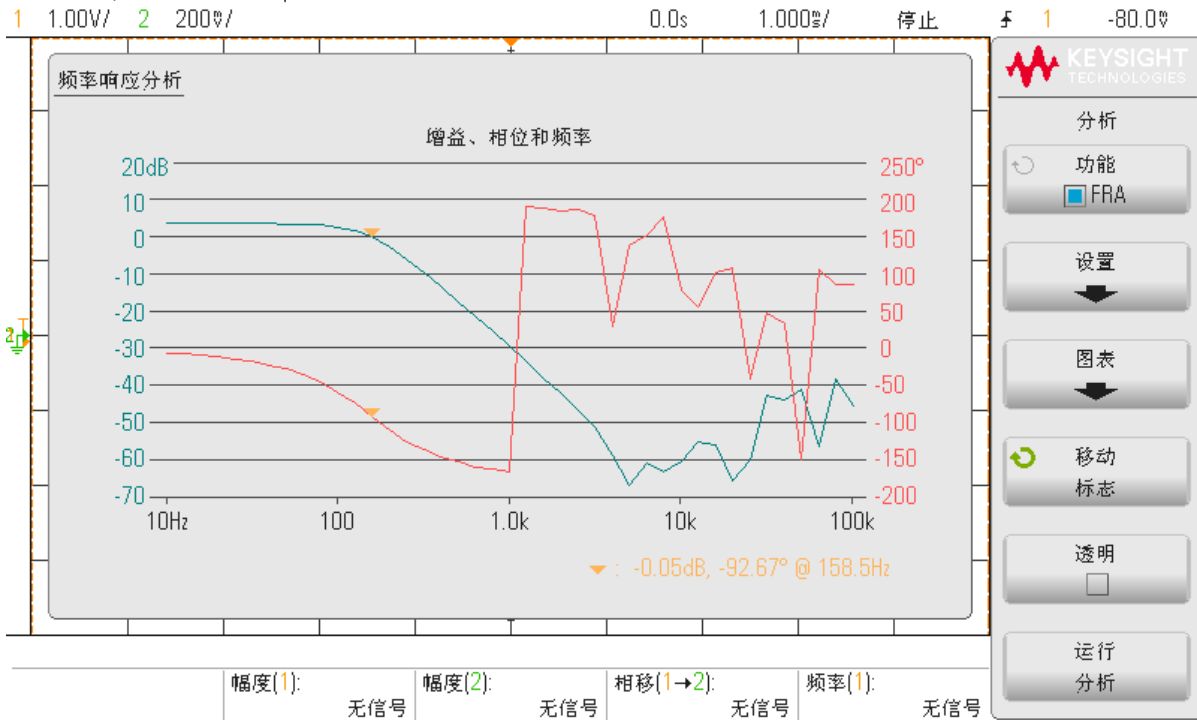


【3】：

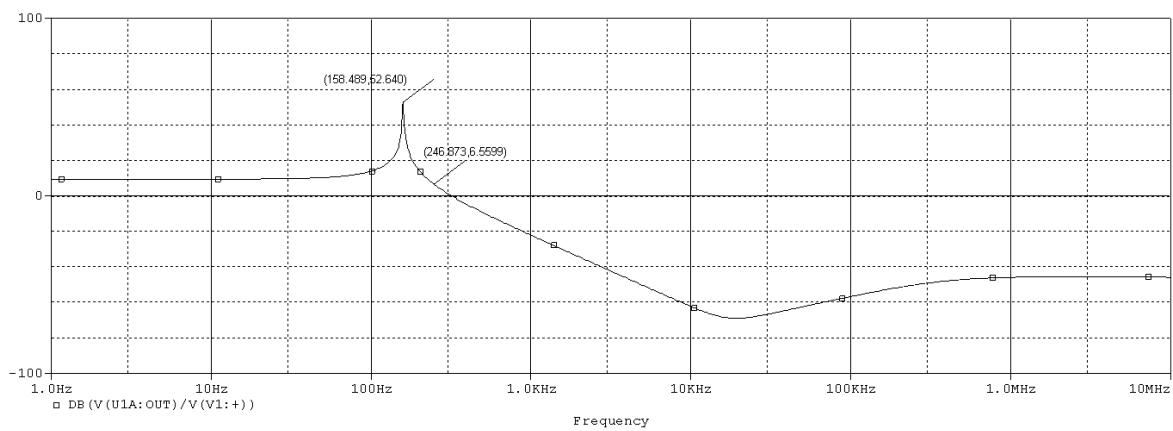


【4】

DSO-X 1102G, CN58526268, Tue Apr 02 15:10:28 2024

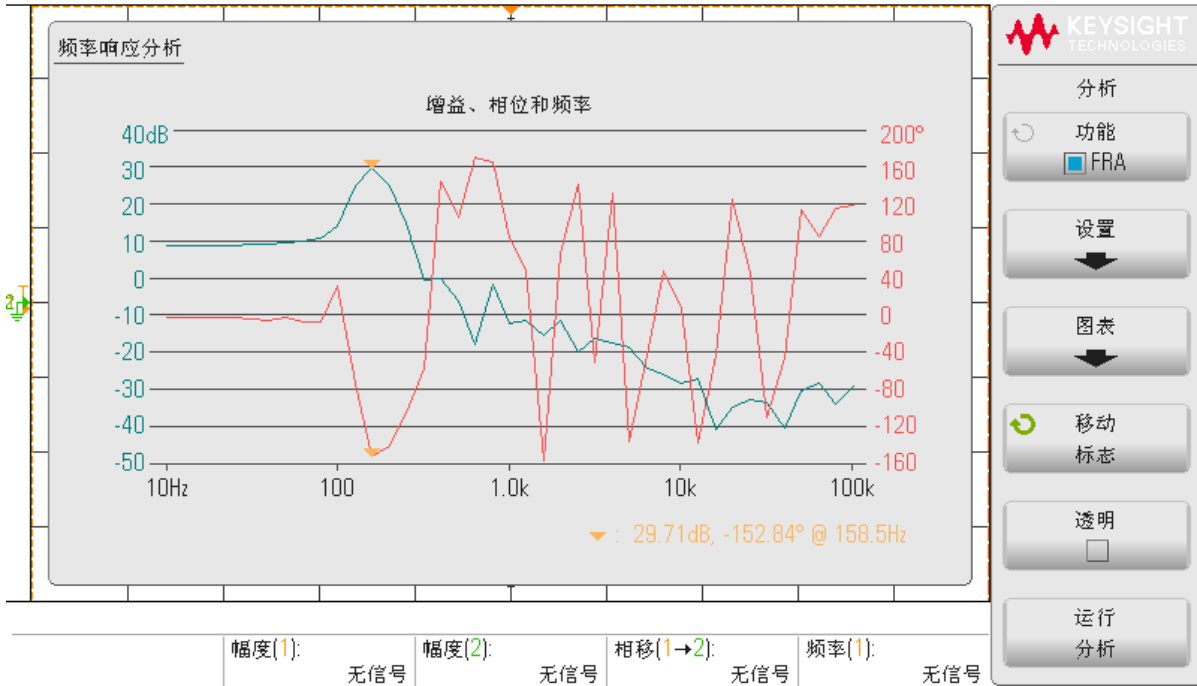


【5】 :

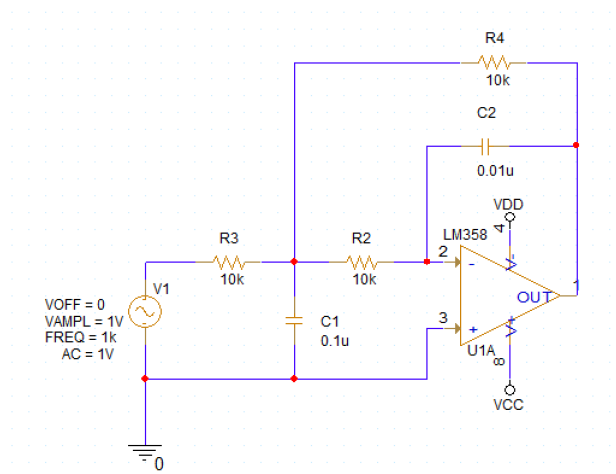


【6】 :





### (3) 多路负反馈型二阶LPF(MFP)



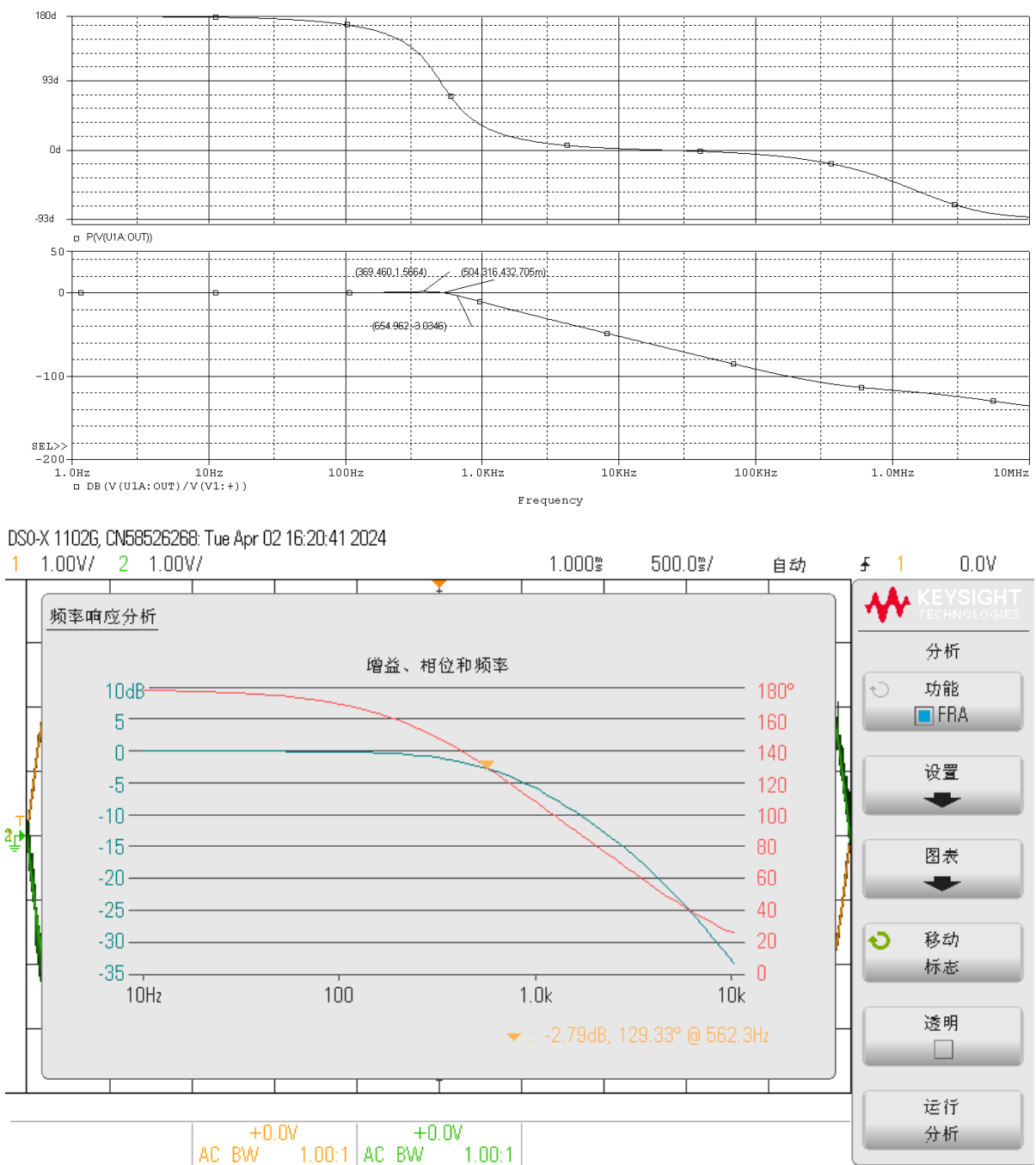
1. 根据上图进行理论计算：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_f}} = 503.3Hz$$

$$Q = \left( \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}} \right) \sqrt{\frac{C_1}{C_2 R_2 R_f}} = 1.054$$

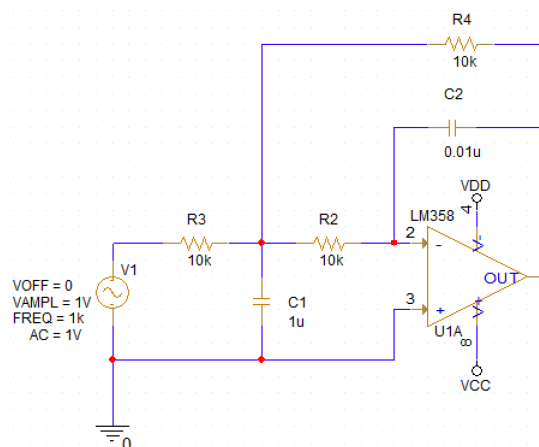
$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_0 = 652.2Hz$$

2. 根据上述实验电路，搭建PSpice仿真电路，得到幅频相频曲线图，并搭建实际电路进行理论论证：



3. 更改实验电路中的参数（改变Q值），重复进行上述实验：

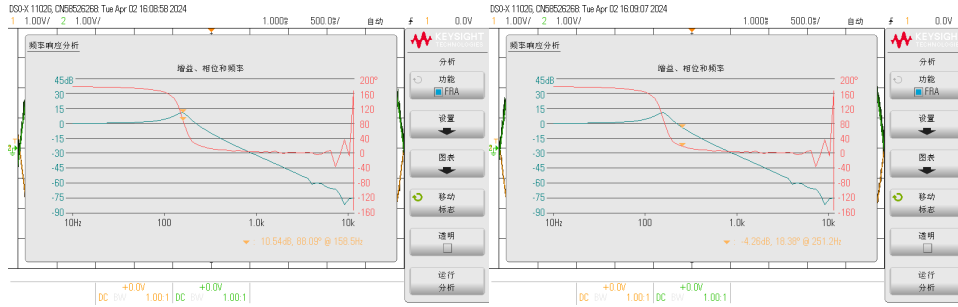
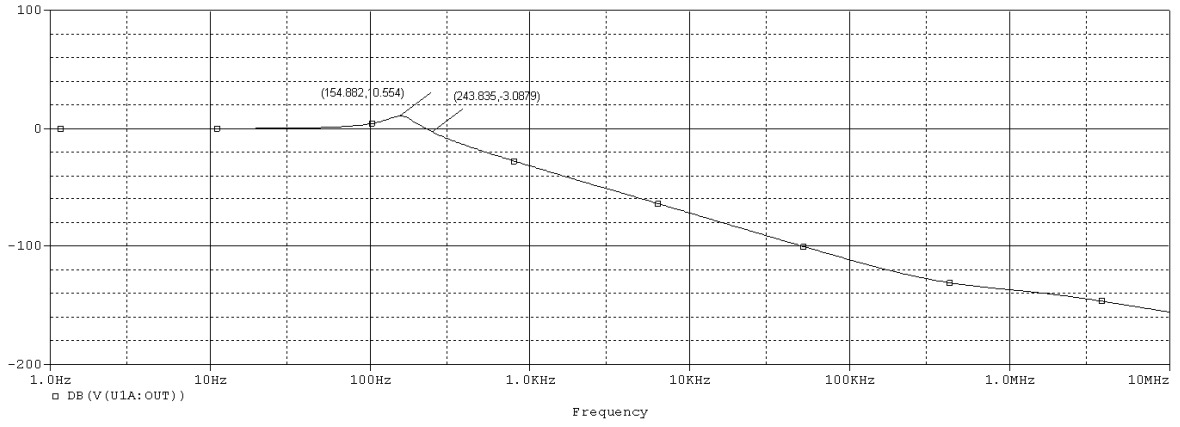
- 更改  $C_1 = 1\mu F$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_f}} = 159.2Hz$$

$$Q = \left( \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}} \right) \sqrt{\frac{C_1}{C_2 R_2 R_f}} = 3.33$$

$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_0 = 243.4Hz$$

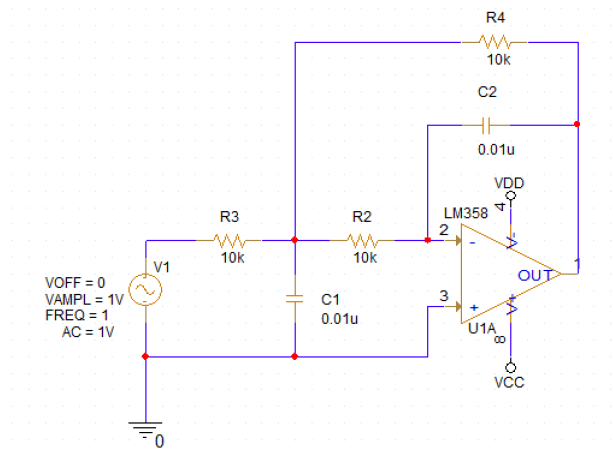


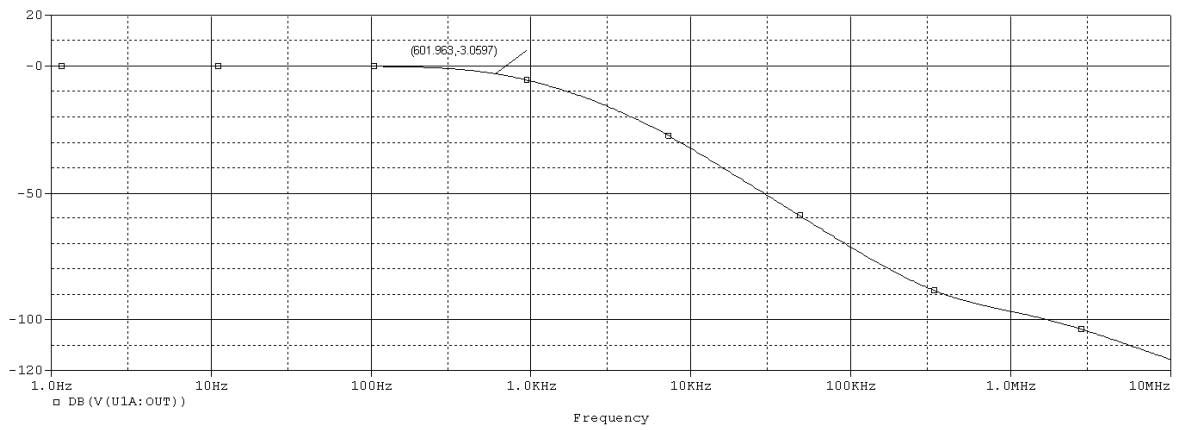
- 更改  $C_1 = 0.01\mu F$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_f}} = 1592Hz$$

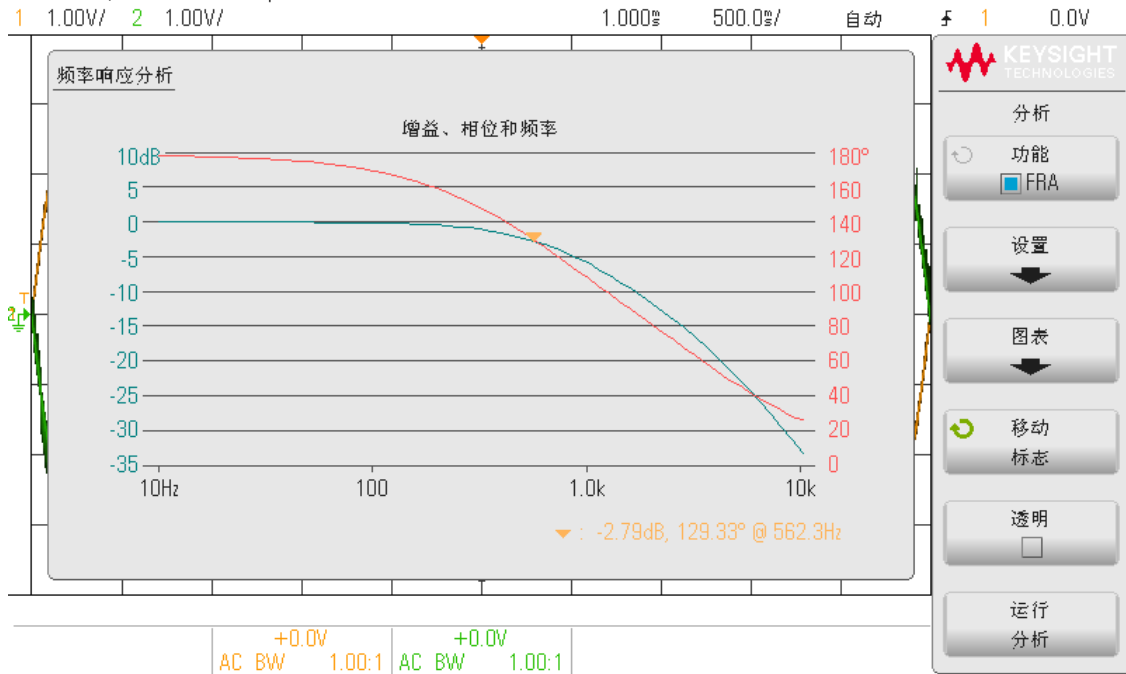
$$Q = \left( \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}} \right) \sqrt{\frac{C_1}{C_2 R_2 R_f}} = 0.333$$

$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_0 = 745Hz$$





DSO-X 1102G, CN58526268, Tue Apr 02 16:20:41 2024

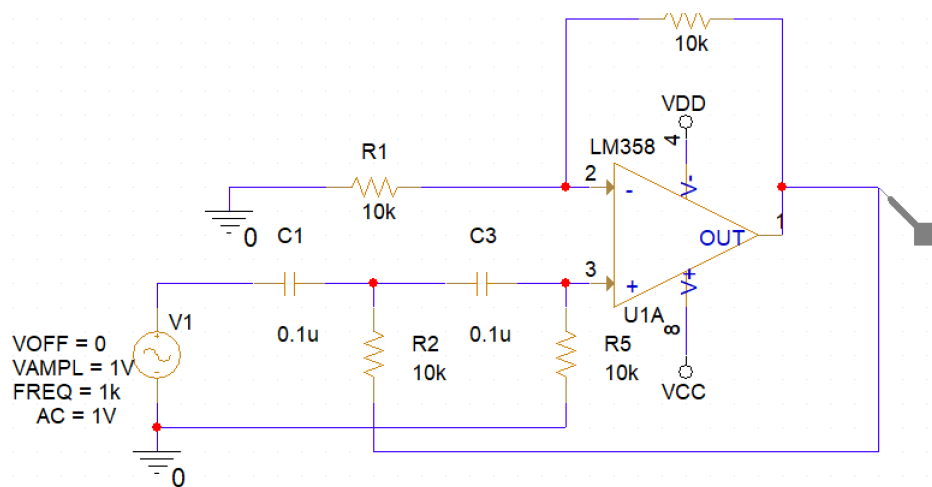


#### 4. 总结变化规律：

	$C_1$	$C_2$	$f_0/\text{Hz}$	$Q$	$f_p/\text{Hz}$
理论	0.1uF	0.01uF	503.3	1.054	652.2
仿真	0.1uF	0.01uF	504.316	/	654.962
实验	0.1uF	0.01uF	/	/	562.3
理论	1uF	0.01uF	159.2	3.33	243.4
仿真	1uF	0.01uF	154.882	/	243.835
实验	1uF	0.01uF	158.5	/	251.2
理论	0.01uF	0.01uF	1592	0.333	745
仿真	0.01uF	0.01uF	/	/	601.953
实验	0.01uF	0.01uF	/	/	562.3

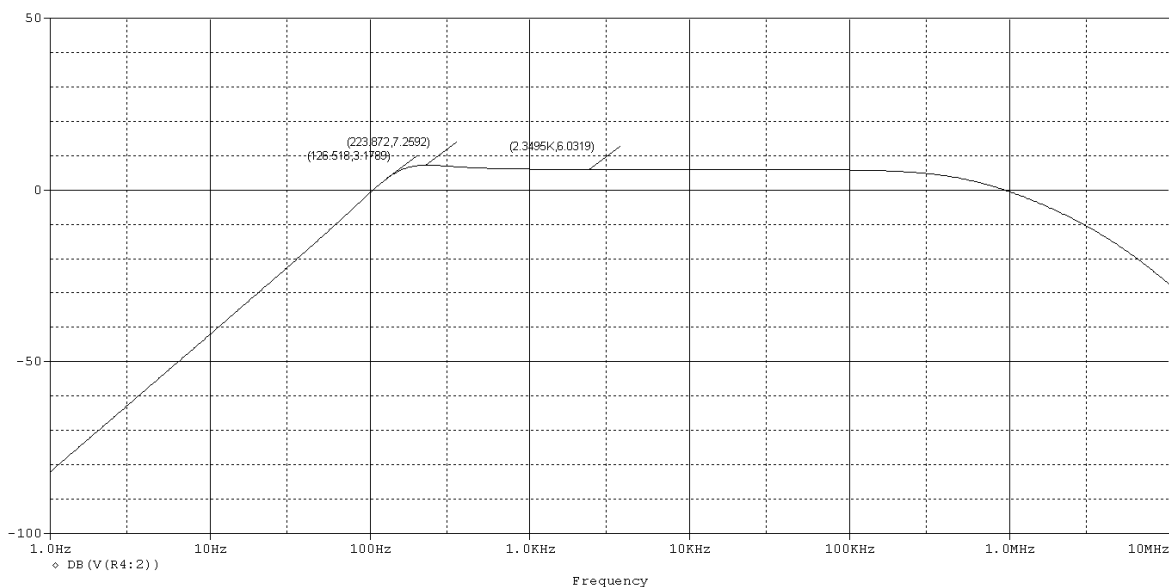
- 仿真和理论数据基本一致，实验数据有几组偏差较大
- 可以看到当Q明显大于1时，会弥补在 $f_0$ 处的下降，使其更加接近理想的低通滤波器
- 在高频处以-40dB/十倍频下降

#### (4) 压控电压源 (VCVS) 二阶HPF



- $R_1 = R_f = 10k\Omega$

$$Q = \left| \frac{1}{3 - A_{vp}} \right| = 1$$



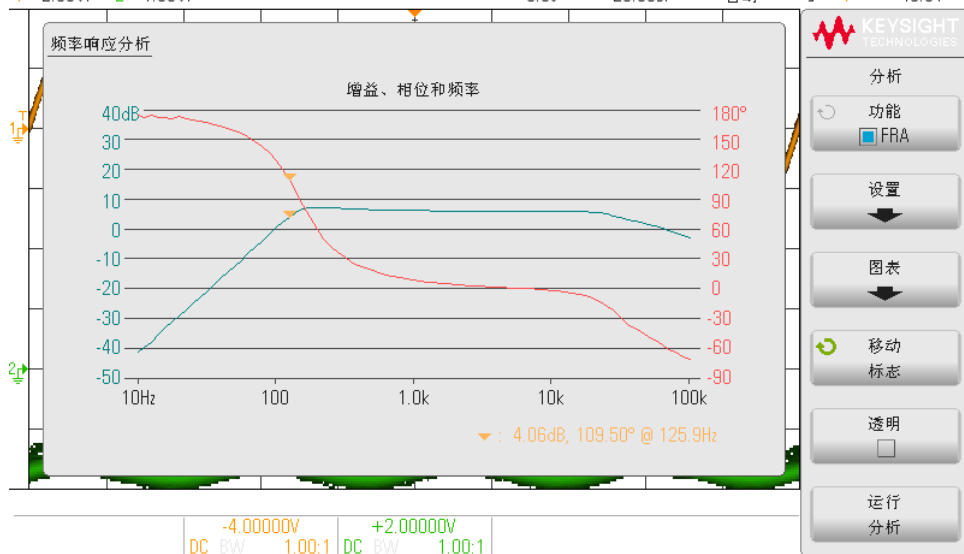
DSO-X 1102G, CN58526268, Tue Apr 02 16:34:22 2024

1 2.00V/ 2 1.00V/

0.0s 20.00%/

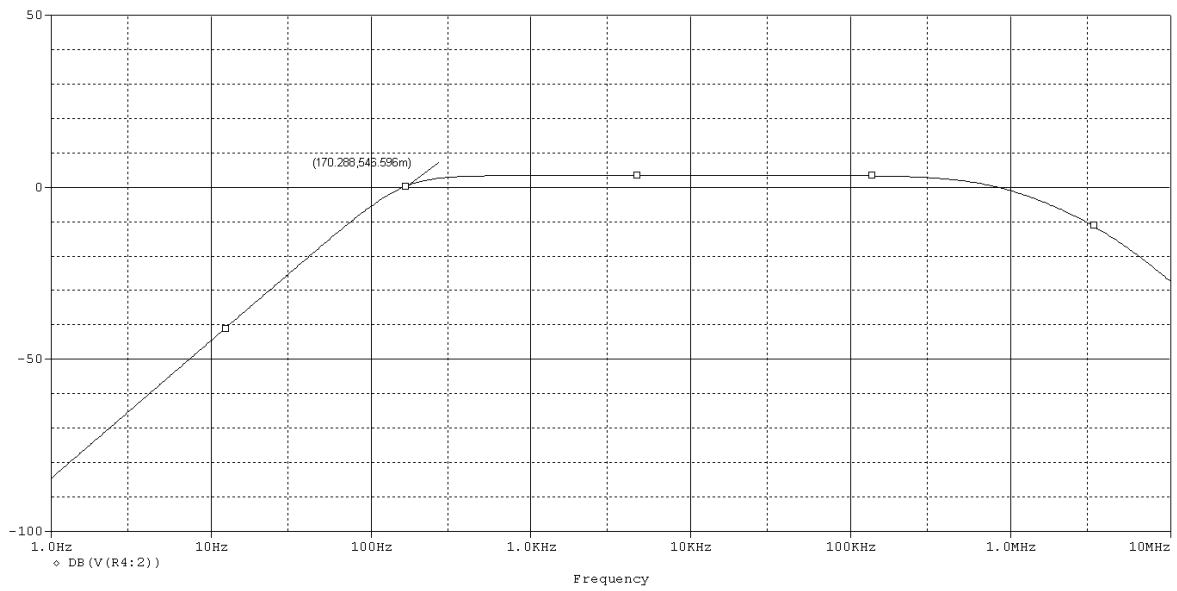
自动

f 1 -40.0%

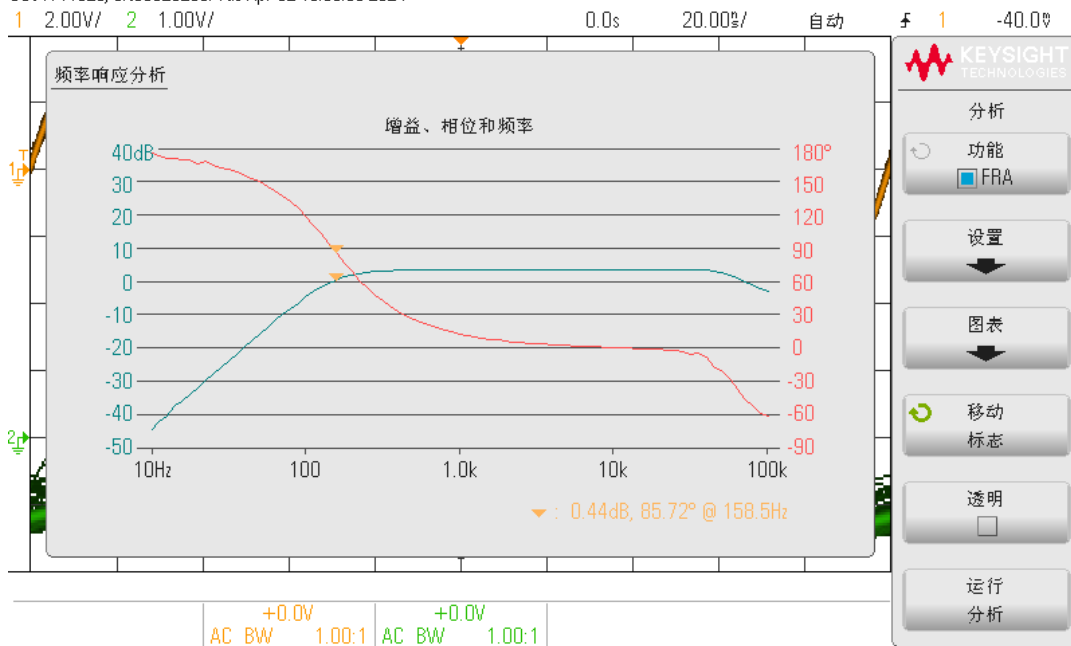


- $R_1 = 20k\Omega, R_f = 10k\Omega$

$$Q = \left| \frac{1}{3 - \dot{A}_{vp}} \right| = 0.67$$

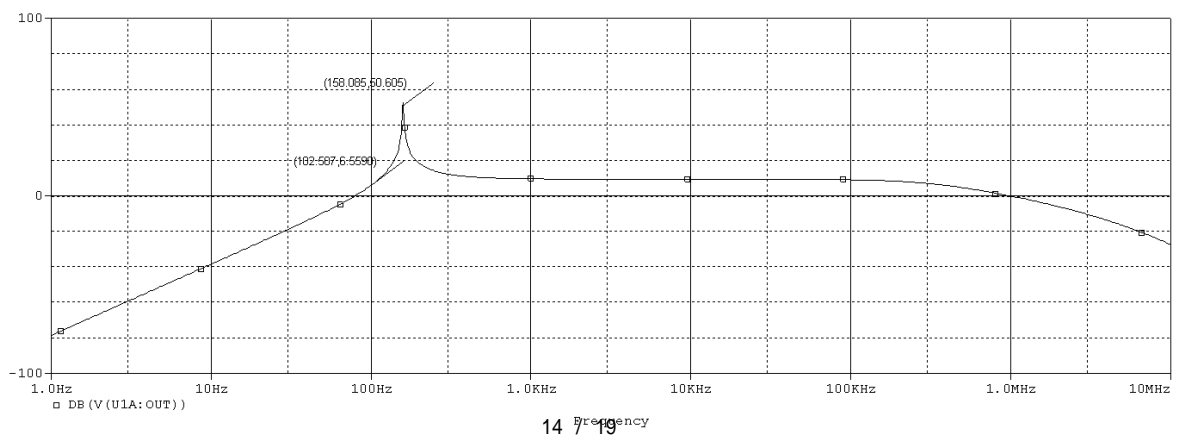


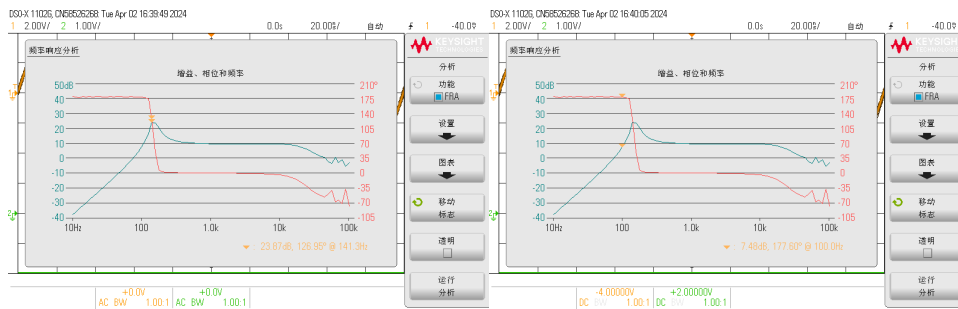
DSO-X 1102G, CN58526268, Tue Apr 02 16:36:30 2024



- $R_1 = 5.1k\Omega, R_f = 10k\Omega$

$$Q = \left| \frac{1}{3 - \dot{A}_{vp}} \right| = 25.5$$



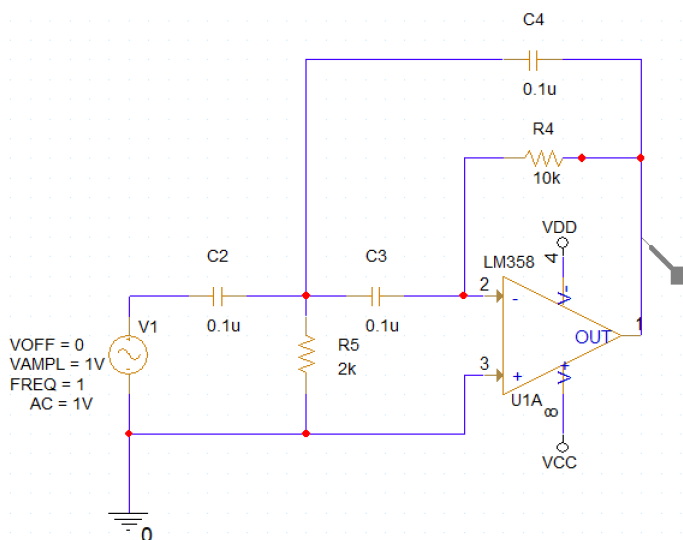


R	$R_f$	Q	仿真结果	$f = f_0, \dot{A}_v$	$f_p/Hz$	实验结果	$f = f_0, \dot{A}_v$	$f_p/Hz$
10k	10k	1		7.2592	126.518		/	125.9
20k	10k	0.67		0.03	170.288		/	158.5
5.1k	10k	25.5		50.605	102.507		23.87	100

- 低通滤波器与高通滤波器的  $f_p$  基本一致：高通滤波器和低通滤波只是电容和电阻的位置互换；
- 实验结果与仿真结果基本上一致，但由于实验中示波器取点数较少，无法得到精确结果；
- 在低频部分以40Hz/十倍频幅频上升。

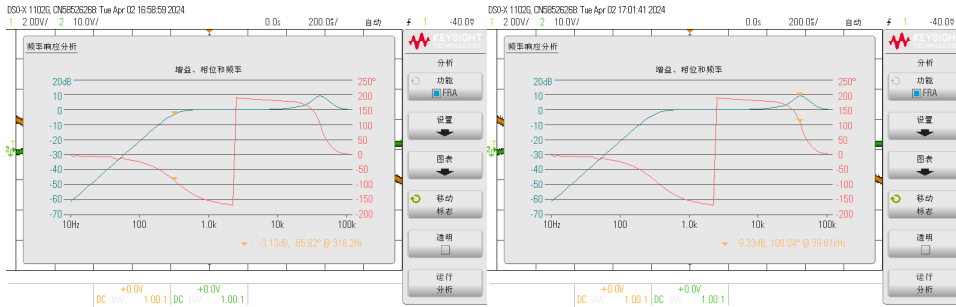
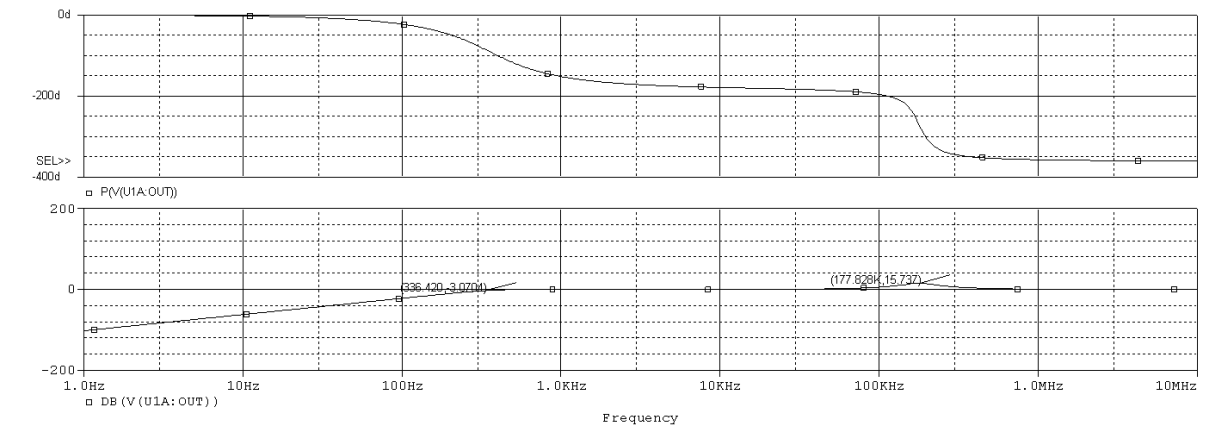
## (5) 多路负反馈二阶HPF(MFB)

- $R_1 = 2k\Omega, R_2 = 10k\Omega$

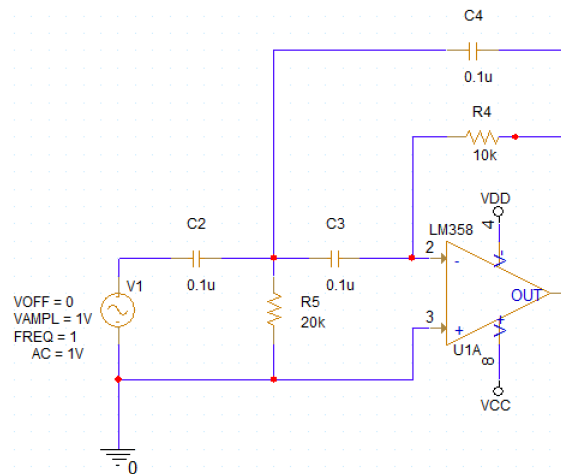


$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C}} = 355.9Hz$$

$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 0.745$$

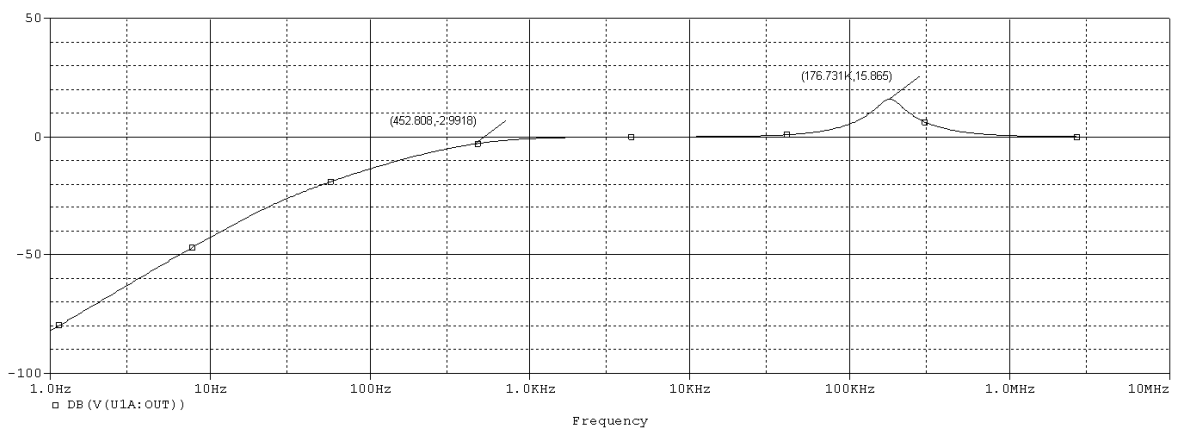


- $R_1 = 20k\Omega, R_2 = 10k\Omega$

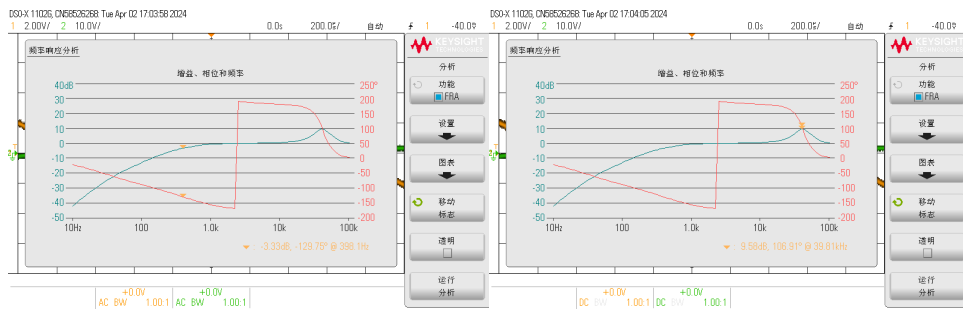


$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C}} = 112.5 Hz$$

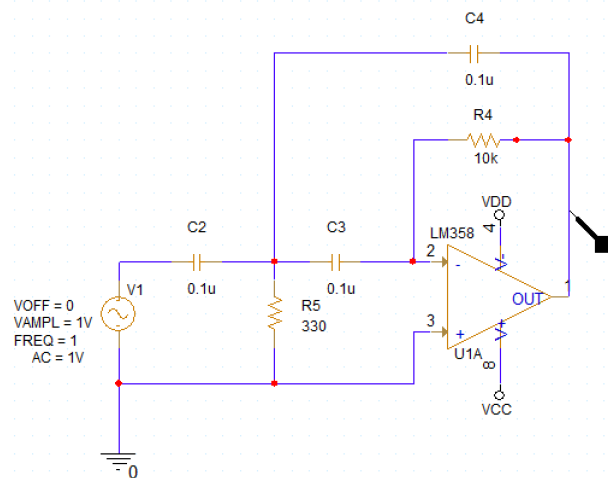
$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 0.236$$





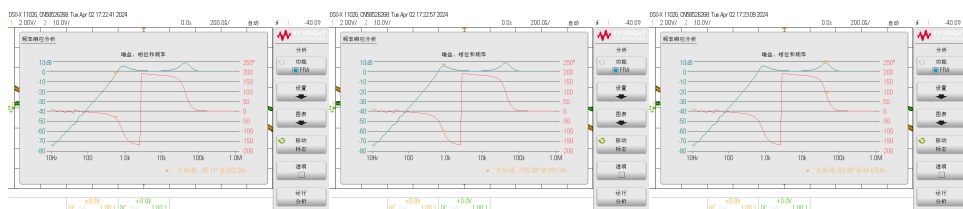
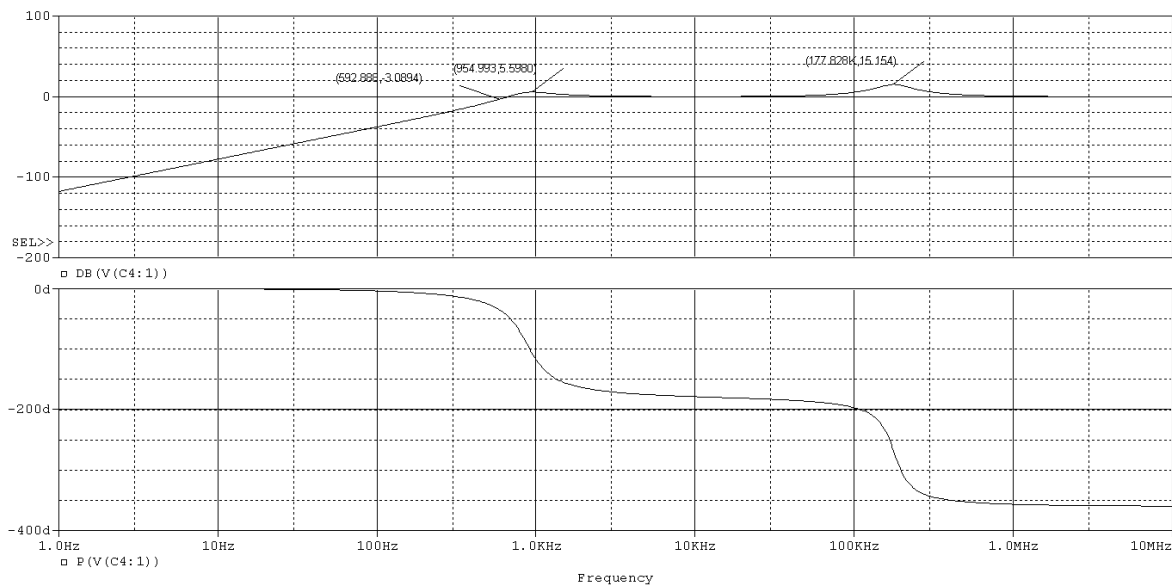


- $R_1 = 330\Omega, R_2 = 10k\Omega$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C}} = 876.1Hz$$

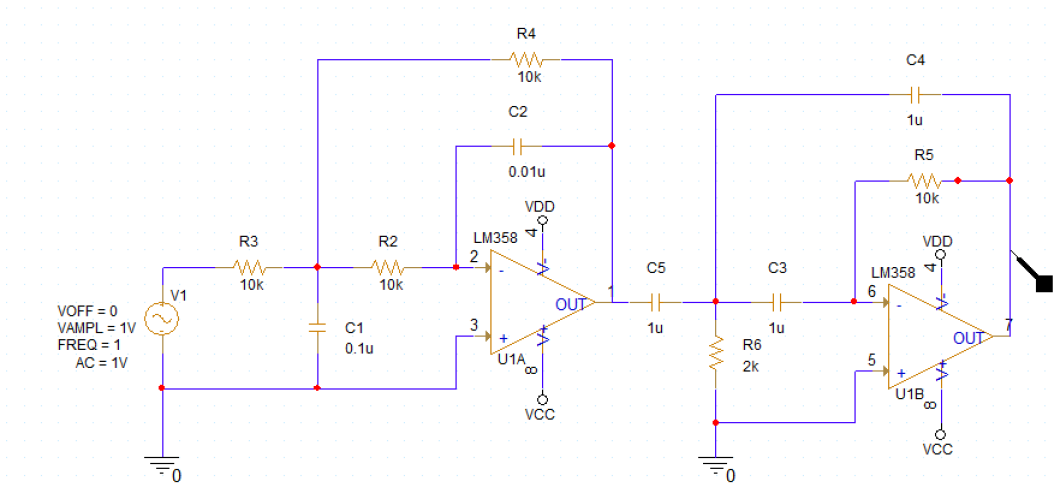
$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 1.835$$



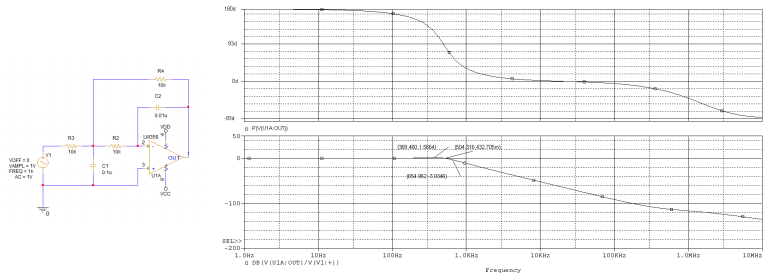
	$R_1/k\Omega$	$R_2/k\Omega$	$f_0/\text{Hz}$ (理论计算得到)	Q (理论计算得到)	$f_p/\text{Hz}$	高频凸起 $f/\text{Hz}$
仿真	2	10	355.9	0.745	336.420	177.828k
实验	2	10	/	/	316.2	39.81k
仿真	20	10	112.5	0.236	452.808	176.731k
实验	20	10	/	/	398.1	39.81k
仿真	0.33	10	876.1	1.835	592.886	177.828k
实验	0.33	10	/	/	562.3	44.67k

- 仿真结果与理论结果基本一致，但是由于实际实验精度并不高，所以结果有一定的偏差。
- 实验过程中发现在高频有一处幅频大大上升，测量各组高频凸起制高点频率发现，与运放前端电路无关，似乎只与运放本身有关，应该时被运放的Bandwidth限制住，导致在高频处产生波形。
- 可以发现实验电路中的电阻电容反馈能够很好地弥补在 $f_0$ 处的波形，能够形成较好的理想滤波器波形。
- 低频处以40dB/十倍频上升

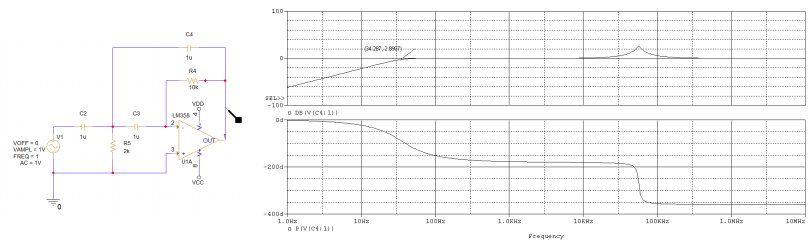
## (6) 带通滤波器



- 对于第二级高通滤波器，有高频截止频率654Hz

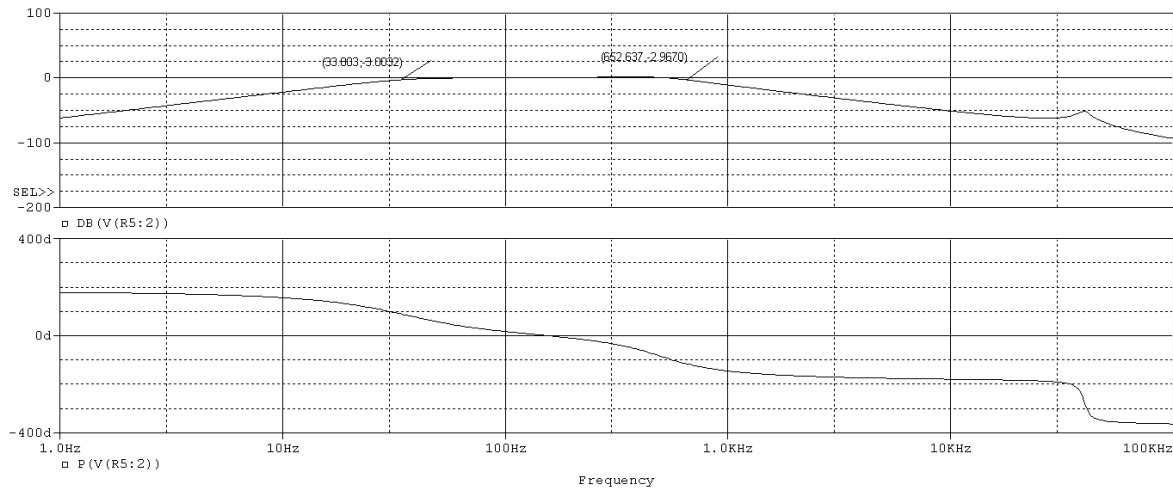


- 对于第二级高通滤波器，有低频通过频率34.297Hz

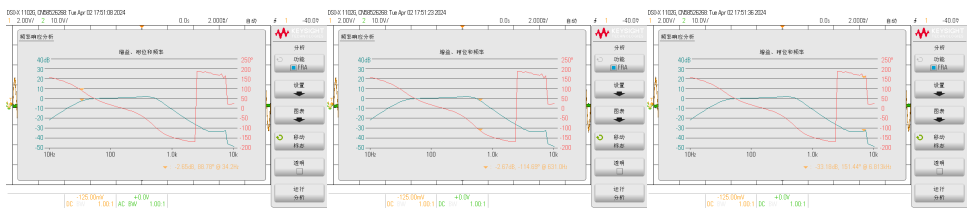


- 所以将两级串联，则应该带宽为：34Hz~654Hz

搭建串联仿真电路，得到如下结果：



搭建实际实验电路得到如下结果：



	$f_L/\text{Hz}$	$f_H/\text{Hz}$
两级分别搭建	34	654
仿真	33.8	652
实际实验	34.2	631

- 仿真结果与实际实验结果基本一致。
- 两端皆以40dB/十倍频上升/下降