

# 电子科技大学

## 《Multisim 与电路仿真设计》实验报告

实验 7: 集成运放电路特性分析

学生姓名: 李聪

学号: 2019010398114

教师姓名: 张彪

日期: 2021-10-13

### 一、实验目的与任务

#### 1、实验目的

熟悉实际集成运放电路参数及使用方法，理解负反馈放大电路构成原理及作用，掌握集成运放电路仿真分析方法；仿真分析集成运放构成的运算电路特性；仿真分析有源和无源滤波电路区别，二阶低通滤波电路特性。

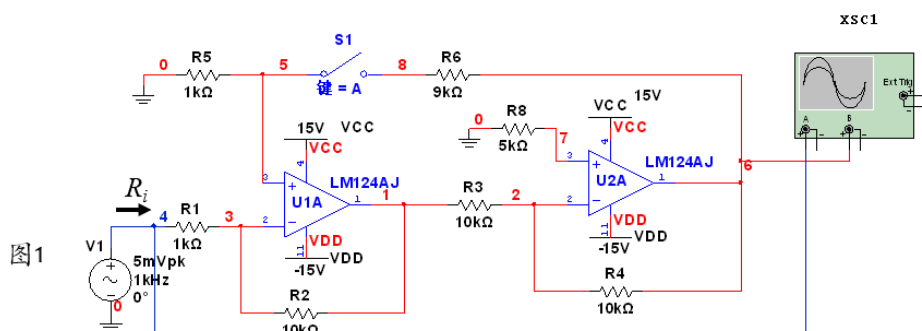
#### 2、实验内容

##### 1、运算电路及负反馈分析

电路如图1， $f=1\text{kHz}$ ，输入电压振幅 $5\text{mV}$ ，集成运放选用LM124，直流电源为正负 $15\text{V}$ 。

- 断开S1，测试输入、输出电压波形，测试级联电路的电压放大倍数 $A_u$ 和输入电阻 $R_i$ ，完成表1测试数据，与理论值比较。
- 闭合S1，改变R2的阻值，测试含级间反馈的电路的电压放大倍数 $A_u$ 和输入电阻 $R_i$ ，完成表1测试数据，与理论值比较。

问题1: S1闭合后，电路引入了哪种类型的级间负反馈，解释该负反馈对电压放大倍数和输入电阻产生了什么影响，为什么？



$R_2$ (k $\Omega$ )	10 (S1断开)	10 (S1闭合)	1000 (S1闭合)
$A_u$	10	4.77	9.89
$R_i$ (k $\Omega$ )	1	1.9	92

表1 运算电路实验数据

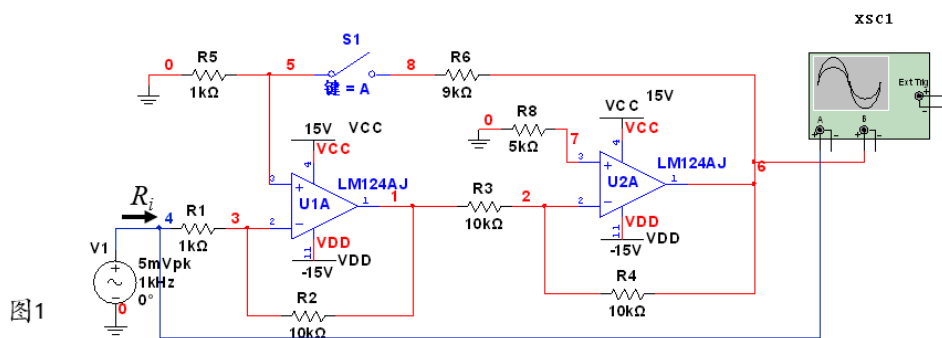


图1

## • 2、有源和无源滤波电路分析

无源和有源二阶低通滤波器如图2和图3所示，完成以下数据测试并填写表2。

- 测试无源空载时（S1断开）滤波电路的幅频特性、通带电压增益和截止频率；
- 测试无源带载时（S1闭合）滤波电路的幅频特性、通带电压增益和截止频率；
- 测试有源低通滤波电路幅频特性、通带电压增益和截止频率。

问题2：根据表2的实验数据，分析有源滤波电路具有的优势。

图中 $R_1=R_2=R$ ,  $C_1=C_2=C$

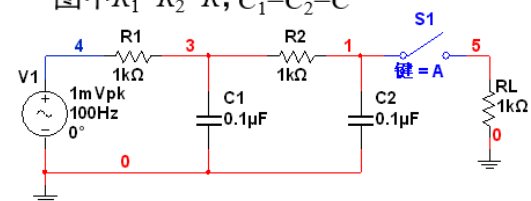


图2 无源低通滤波器

滤波器状态	无源空载	无源带载	有源
通带电压增益 $20\lg A_{up} $ (dB)	0	-9.54	6.02
截止频率 $f_p$ (kHz)	0.59	1.4	0.59

表2 滤波器比较实验数据

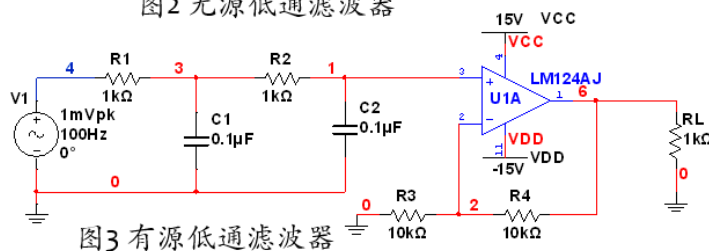


图3 有源低通滤波器

$$\text{特征频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

图2

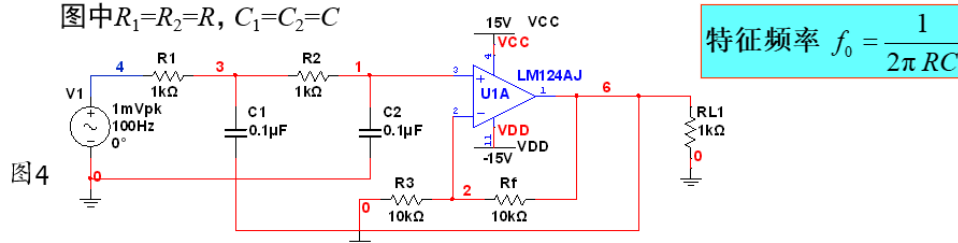
### • 3、压控电压源二阶低通滤波电路分析

压控电压源二阶低通滤波电路如图4所示。

- 如表3，改变反馈电阻 $R_f$ 的阻值，利用参数扫描分析法测试 $R_f$ 取值不同时电路的幅频特性。根据特性曲线，得到通带电压放大倍数 $A_{up}$ 和特征频率 $f_0$ 处的电压放大倍数 $A_u$ ，计算品质因数 $Q$ ，完成表3。

问题3：解释 $R_f$ 对 $Q$ 值和滤波电路特性的影响。

图中 $R_1=R_2=R$ ,  $C_1=C_2=C$



$R_f$ (kΩ)	特征频率 $f_0$ (kHz)	通带电压放大 倍数 $A_{up}$	$f=f_0$ 电压放大 倍数 $A_u$	品质因数 $Q= A_u/A_{up} $
5	1.59	1.5	1	0.67
10		2	2	1
14		2.4	4.01	1.67

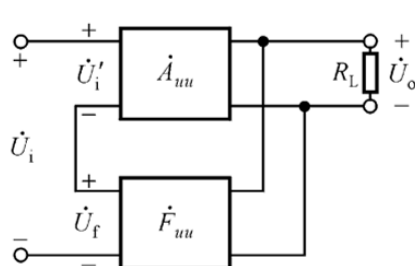
表3 压控电压源二阶低通滤波电路实验数据

图2

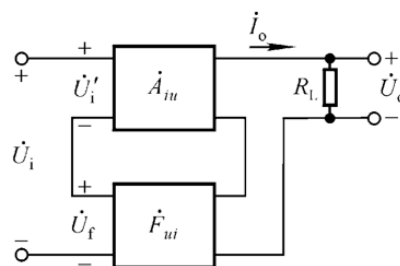
## 二、实验原理

### 1. 负反馈类型和作用

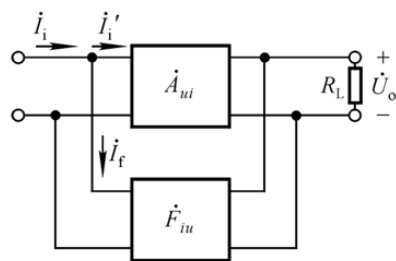
#### □ 负反馈的类型



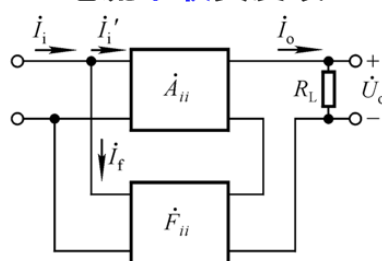
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈



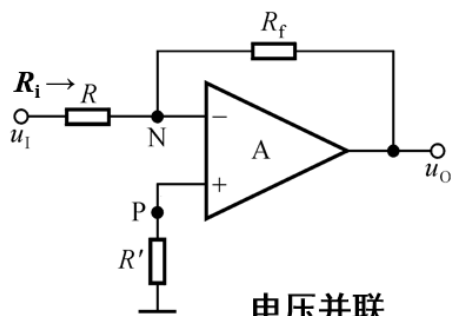
电流并联负反馈

## □ 负反馈对放大电路的影响

反馈组态	电压串联 负反馈	电压并联 负反馈	电流串联 负反馈	电流并联 负反馈
稳定和展宽频带的对象	$\dot{A}_{uu} = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ 无量纲	$\dot{A}_{ui} = \dot{U}_o / \dot{I}_i$ 电阻	$\dot{A}_{iu} = \dot{I}_o / \dot{U}_i$ 电导	$\dot{A}_{ii} = \dot{I}_o / \dot{I}_i$ 无量纲
输入电阻	↑增大( $\infty$ )	↓减小(0)	↑增大( $\infty$ )	↓减小(0)
输出电阻	↓减小(0)	↓减小(0)	↑增大( $\infty$ )	↑增大( $\infty$ )
功能	$\dot{U}_i$ 控制 $\dot{U}_o$ 电压放大	$\dot{I}_i$ 控制 $\dot{U}_o$ 电流转换成电压	$\dot{U}_i$ 控制 $\dot{I}_o$ 电压转换成电流	$\dot{I}_i$ 控制 $\dot{I}_o$ 电流放大

## 基本运算电路

### □ 反相比例运算电路

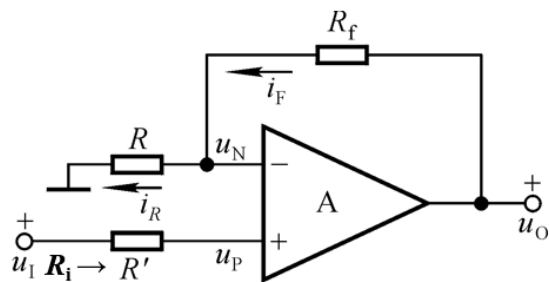


电压并联

$$A_u = -\frac{R_f}{R}$$

$$\underline{R_i} = R, \quad R_o = 0$$

### □ 同相比例运算电路

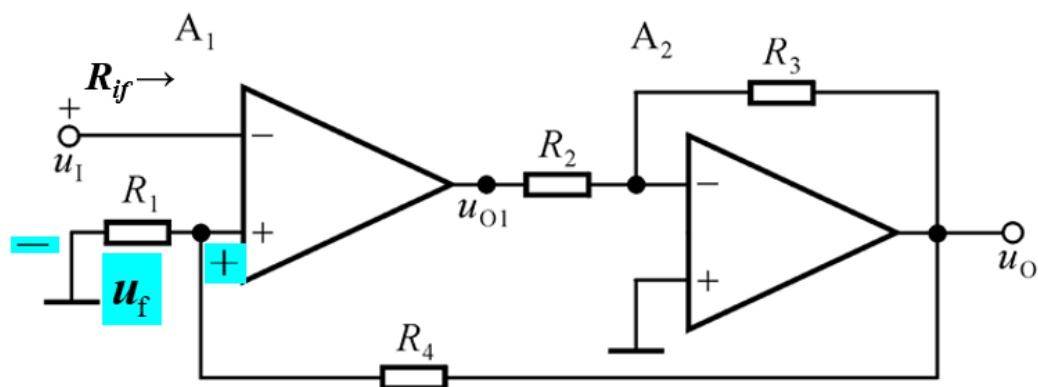


电压串联

$$A_u = 1 + \frac{R_f}{R}$$

$$\underline{R_i} \rightarrow \infty, \quad R_o = 0$$

## 典型的电压串联级间负反馈电路

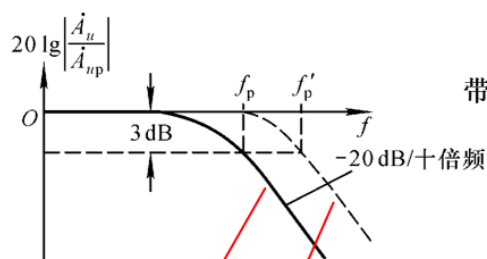
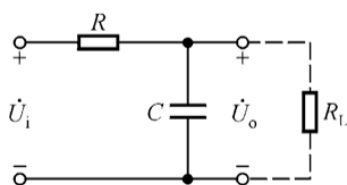


$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}F} \quad A = A_1 \cdot A_2 \quad F = \frac{R_1}{R_1 + R_4}$$

$$\text{当 } \dot{A}F \gg 1 \text{ 时, } \dot{A}_f \approx \frac{1}{F}$$

$$R_{if} = (1 + AF)R_i$$

## 2. 有源和无源滤波电路



空载时

带负载时

负载变化, 通带放大倍数和截止频率均变化。

空载: 通带电压放大倍数  $\dot{A}_{up} = 1$

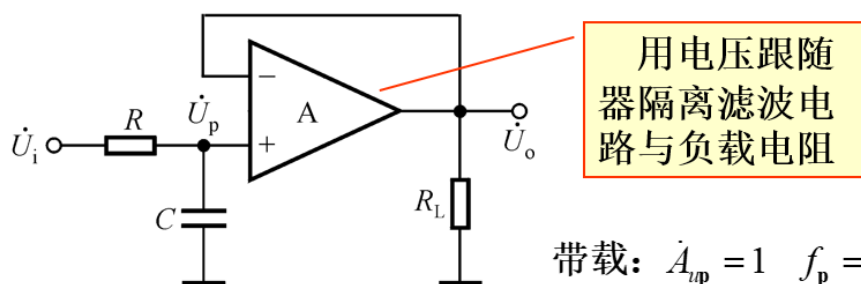
$$\text{截止频率 } f_p = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j\frac{f}{f_p}} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$

带载: 通带电压放大倍数  $\dot{A}_{up} = \frac{R_L}{R + R_L}$

$$\text{截止频率 } f'_p = \frac{1}{2\pi (R // R_L) C}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j\frac{f}{f'_p}} = \frac{R_L}{R + R_L} \frac{1}{1 + j\frac{f}{f'_p}}$$



带载:  $\dot{A}_{up} = 1 \quad f_p = \frac{1}{2\pi RC}$

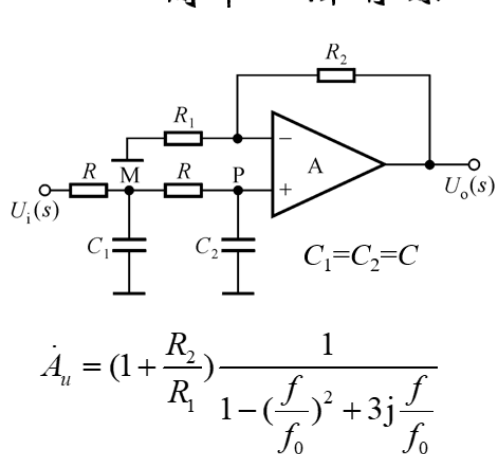
有源滤波电路

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j\frac{f}{f_p}} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$

无源滤波电路的滤波参数随负载变化；有源滤波电路的滤波参数可以不随负载变化，还可以有放大。

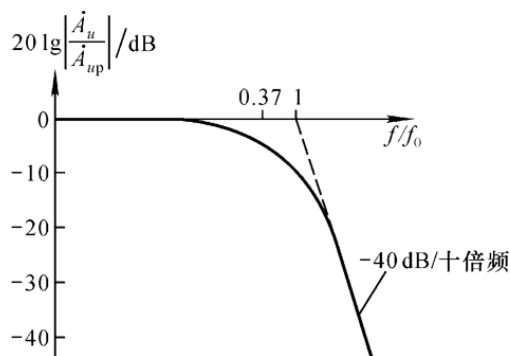
### 3、二阶低通滤波电路

#### □ 简单二阶有源LPF



$$\dot{A}_u = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 3j\frac{f}{f_0}}$$

通带电压放大倍数  $\dot{A}_{up} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$



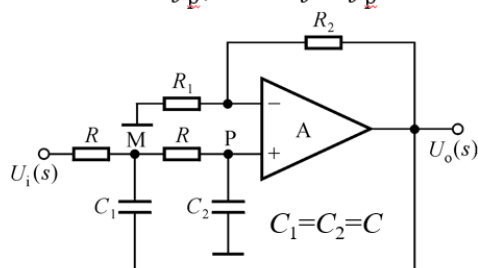
截止频率  $f_p \approx 0.37f_0$

特征频率

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

## □ 压控电压源二阶LPF

为提高 $f_p$ ，且在 $f=f_p$ 时幅频特性按 $-40\text{dB}/十倍频$ 下降。



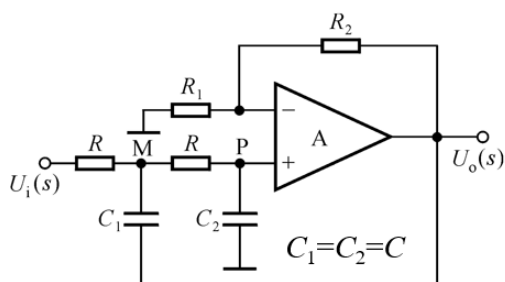
引入正反馈

$f \rightarrow 0$ 时， $C_1$ 断路，正反馈断开，放大倍数为通带放大倍数。

$f \rightarrow \infty$ ， $C_2$ 短路，正反馈不起作用，放大倍数 $\rightarrow 0$ 。

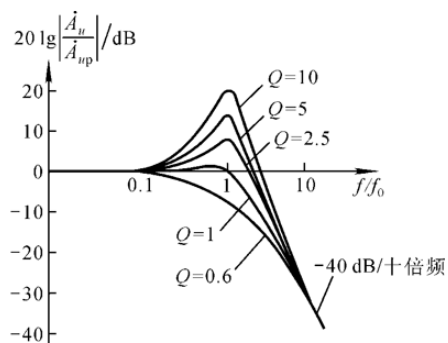
因而有可能在 $f=f_0$ 时放大倍数等于或大于通带放大倍数。对于不同频率的信号正反馈的强弱不同。

## □ 压控电压源二阶LPF的分析



通带电压放大倍数 $A_{up} = (1 + \frac{R_2}{R_1})$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 - (\frac{f}{f_0})^2 + j[3 - \dot{A}_{up}] \frac{f}{f_0}}$$



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

$$\left| \dot{A}_u \right|_{f=f_0} = \left| \frac{\dot{A}_{up}}{3 - \dot{A}_{up}} \right| = Q \left| \dot{A}_{up} \right|$$

当 $2 \leq \left| \dot{A}_{up} \right| < 3$ 时， $\left| \dot{A}_u \right|_{f=f_0} \geq \left| \dot{A}_{up} \right|$

### 三、实验步骤

根据实验内容，搭建相应的 Multisim 电路图，然后使用探针以及示波器和参数扫描等方法按照实验内容要求，测量放搭电路的数据。

### 四、实验数据和数据分析

R2 和开关在不同状态时的 3 张图片（电路图及对应的输入输出电压波形测试图。探针测试输入电阻，示波器双通道分别测试输入输出波形，AC 耦合，光标测试峰峰值，横坐标 500uS/格，纵坐标输入波形 5mV/格，输出 20mV/格）图

1, 2, 3 所示，得到结果在两个串联负反馈的电路中，放大倍数为两个负反馈电路单独放大倍数相乘，在引入极间负反馈之后，会增大电路的输入电阻，减小放大倍数，从而增强电路的稳定性。

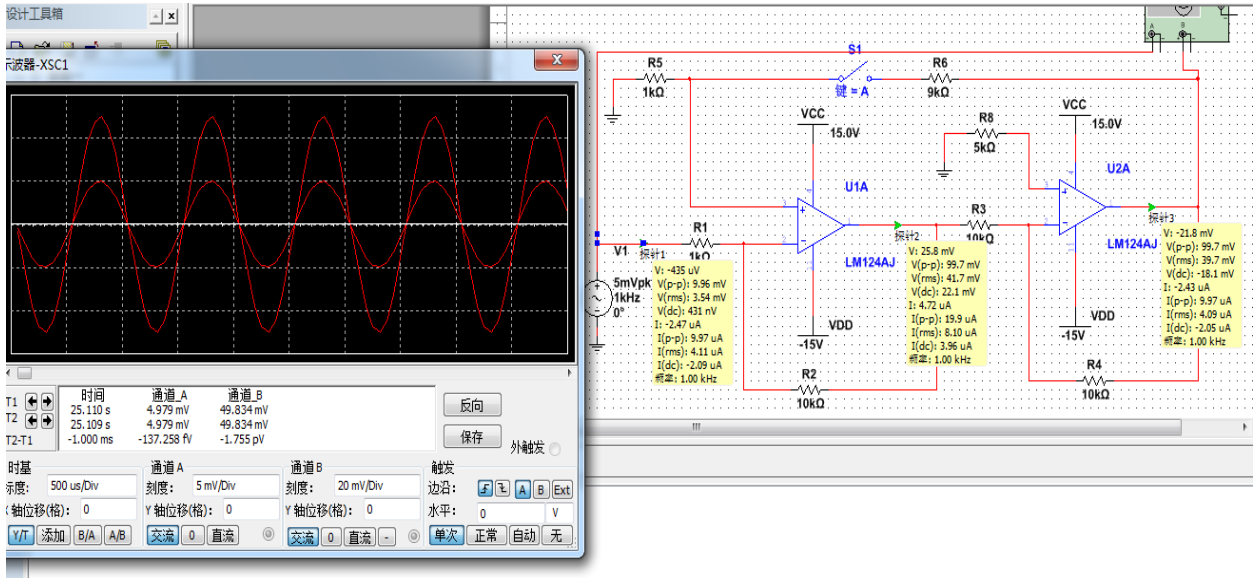


图 1

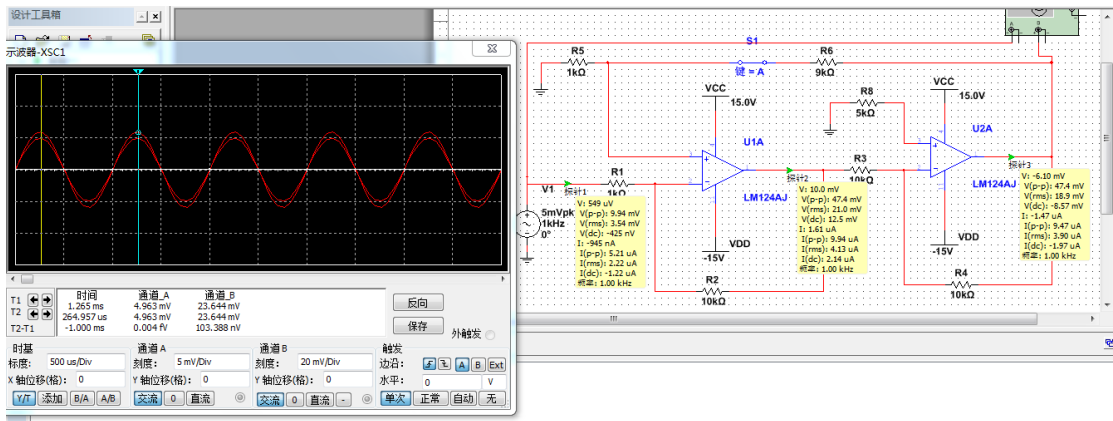


图 2



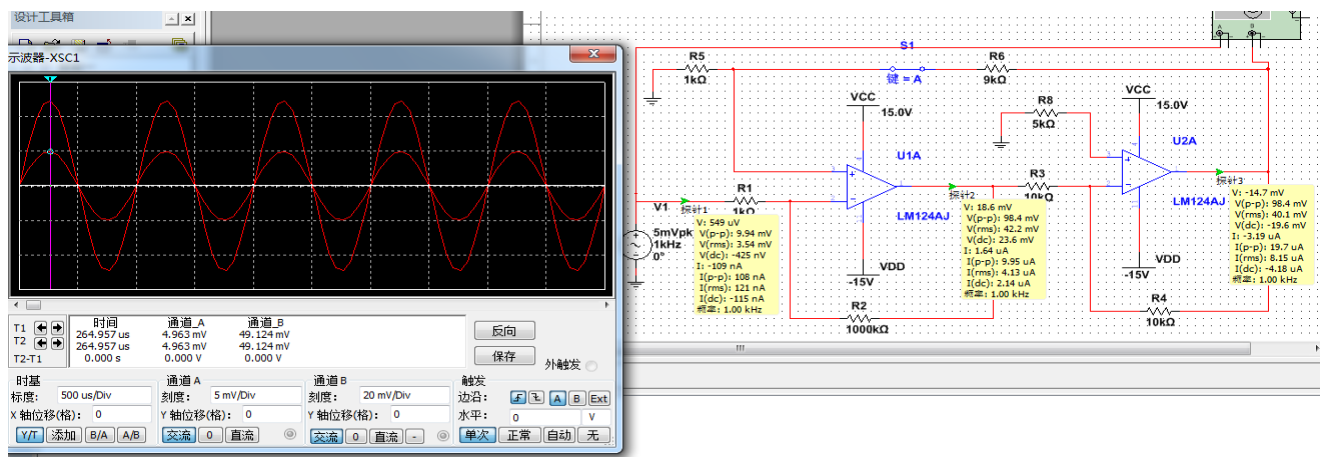


图 3

3 张幅频特性测试图片如图 4, 5, 6 所示 (AC 分析方法测试, 只截图对应电路图及幅频特性曲线。起始频率 1Hz, 停止频率 1MHz, 1000 点, 10 倍频扫描, 垂直坐标 dB。特性曲线的光标分别测试通带电压增益和截止频率。)

电路空载时, 电压增益为 0db, 截止频率为 0.59, 在带负载的情况下, 信号通过无源滤波电路会有一定衰减, 而通过有源滤波电路, 信号则会增强, 但与无源滤波电路相比, 有源滤波电路的幅频特性不如无源滤波。引入正反馈则会提高幅频特性。

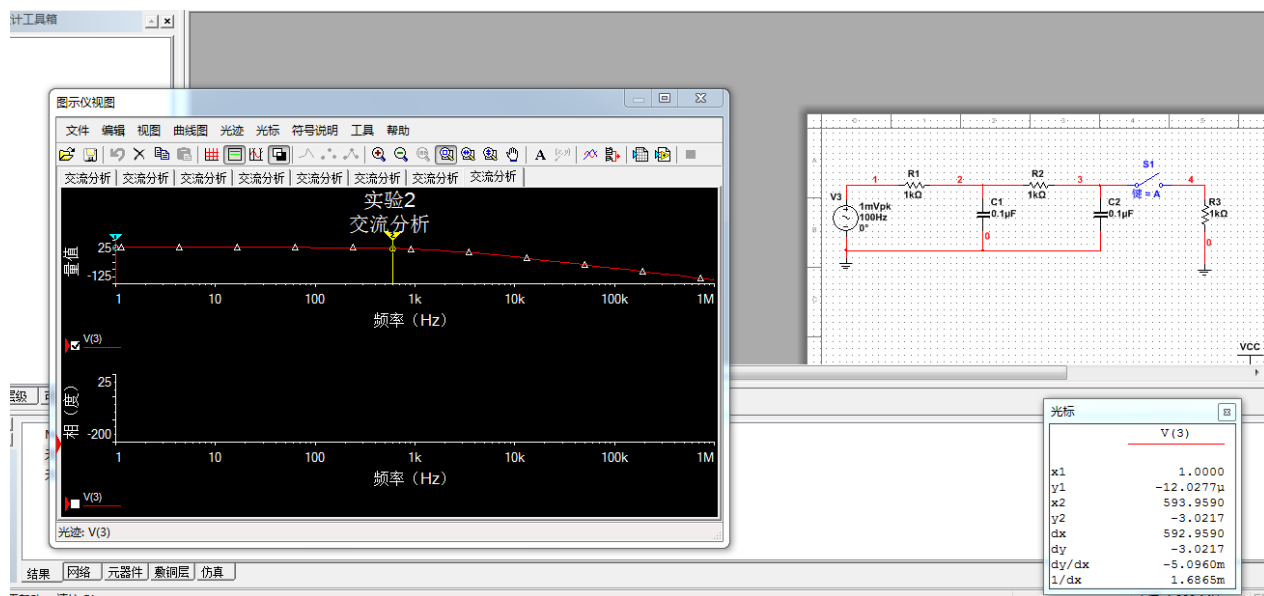


图 4

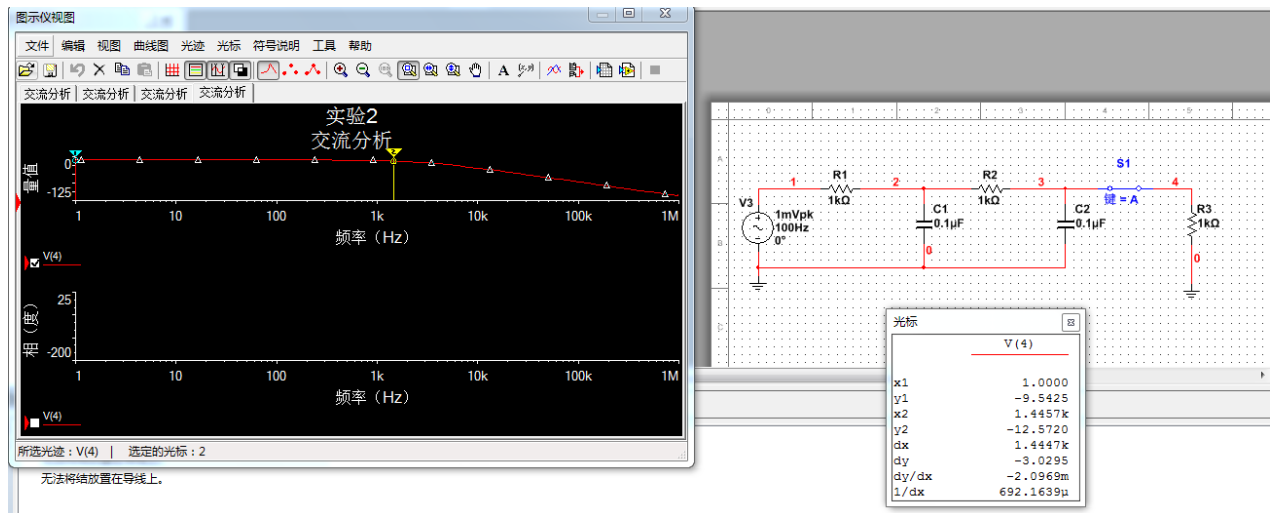


图 5

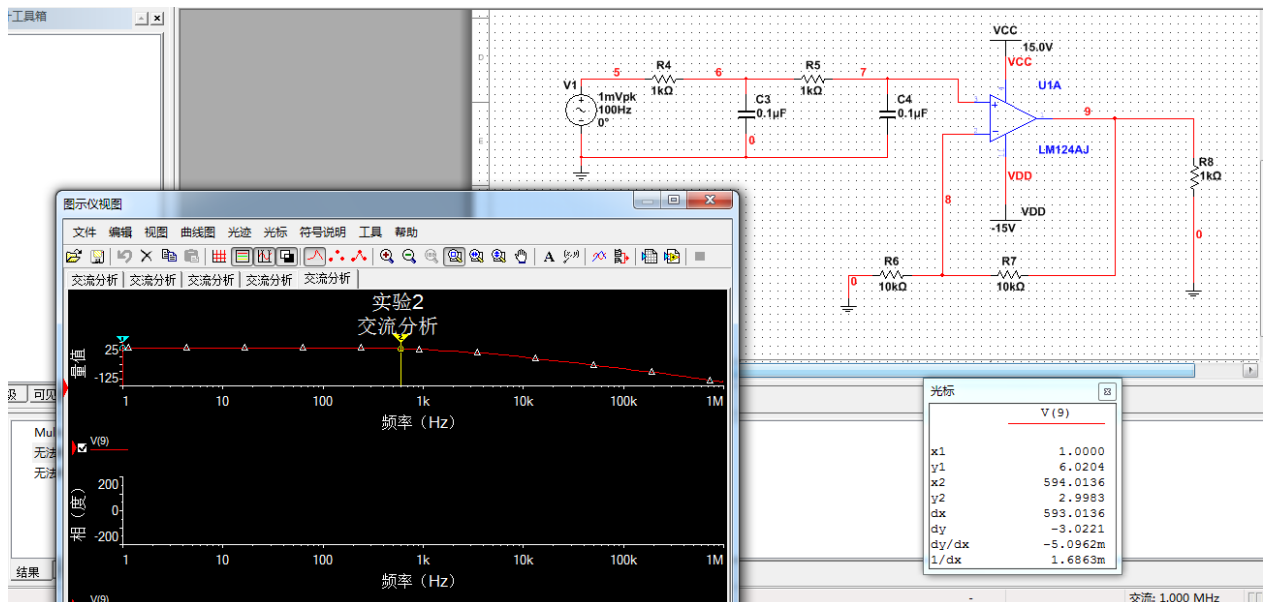


图 6

根据同相比比例放大电路增益计算公式， $R_F$  越大，电路的增益就越大。

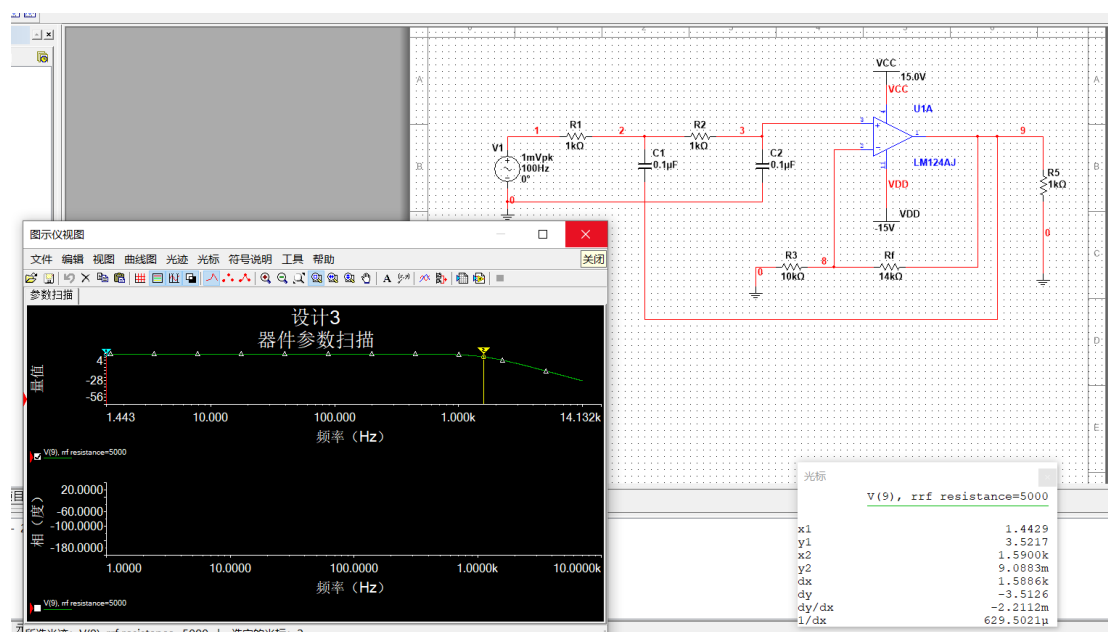


图 7

## 五、回答问题

问题 1: S1 闭合后, 电路引入了哪种类型的级间负反馈, 解释该负反馈对电压放大倍数和输入电阻产生了什么影响, 为什么?

引入了电压串联负反馈, 减小了放大倍数, 增加了输入电阻。电压串联负反馈的输入电阻  $R_{if} = (1+AF) R_i$  增大了电阻

问题 2: 根据表 2 的实验数据, 分析有源滤波电路具有的优势。

对比有源负载和无源负载的增益来看, 有源滤波对信号有增益的作用。

问题 3: 解释  $R_f$  对 Q 值和滤波电路特性的影响。

其他参量不变的情况下,  $R_f$  的值越大, 通带电压放大倍数也就越大, 品质因素 Q 也就越大, 电路的无功功率也就越大。

## 六、总结

通过本次实验, 我仿真分析动态电路的频率特性, 熟悉实际集成运放电路参数及使用方法, 理解负反馈放大电路构成原理及作用, 掌握集成运放电路仿真分析方法; 仿真分析集成运放构成的运算电路特性; 仿真分析有源和无源滤波电路区别, 二阶低通滤波电路特性, 在实验过程中, 我对 dB 转化为数值的计算方法还不是特别熟练, 在计算特征频率的时候, 由于取值 1.9kHz 不精确, 导致结果误差较大, 在第二次去  $f_0 = 1.59\text{kHz}$  的时候, 较为顺利的得出了精确的测量数据。