

# 模拟电子技术基础第三次仿真作业

## 实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 赵文亮 \_\_\_\_\_

学号：\_\_\_\_\_ 2016011452 \_\_\_\_\_

班级：\_\_\_\_\_ 自 64 \_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_ 2018 年 5 月 28 日 \_\_\_\_\_

目录

1	实验目的	1
2	实验内容	1
	仿真题 3-1 .....	1
	仿真题 3-2 .....	14
	仿真题 3-3 .....	15
3	仿真中遇到的问题及解决方法	18
4	收获和体会	19
A	MATLAB 代码	20

# 1 实验目的

- 1. 研究负反馈放大电路的应用
- 2. 研究运算电路设计方法、滤波电路的特性和设计方法
- 3. 熟悉信号发生及转换电路的应用及分析
- 4. 进一步熟悉仿真软件的基本分析和测量方法

# 2 实验内容

**仿真题 3-1:** 利用运放分别设计截止频率为 1kHz 的 VCVS 二阶低通、高通、带通、带阻滤波器。

- (1) 测量四种滤波器的幅频和相频特性，观察不同  $Q$  值对幅频特性的影响；
- (2) 测量输入信号为 1kHz 方波时四种滤波器的输出信号波形，并分析为何会产生这种形状的波形；
- (3) 分析 VCVS 二阶带通滤波器稳定工作的条件，并观察不稳定工作的现象（在输入端加入频率 1kHz、幅值 1mV 的正弦激励信号，观察电路的不稳定现象）。

## VCVS 二阶低通滤波器

电路如图 1 所示。可以求得截止频率

$$f_p \approx f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \times 10\text{k}\Omega \times 16\text{nF}} = 994.7\text{Hz} \approx 1\text{kHz} \tag{1}$$

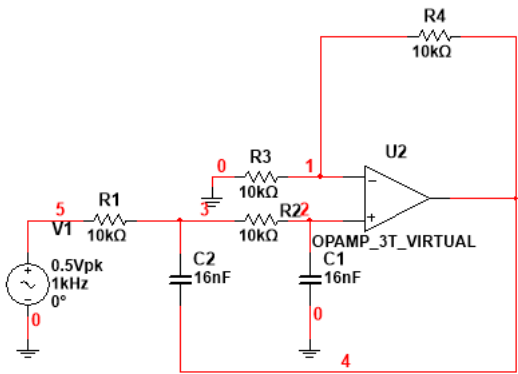


图 1: VCVS 二阶低通滤波器电路

**测量幅频和相频特性，观察不同  $Q$  值对幅频特性的影响** 首先使用交流分析得到幅频和相频特性曲线，如图 2 所示。

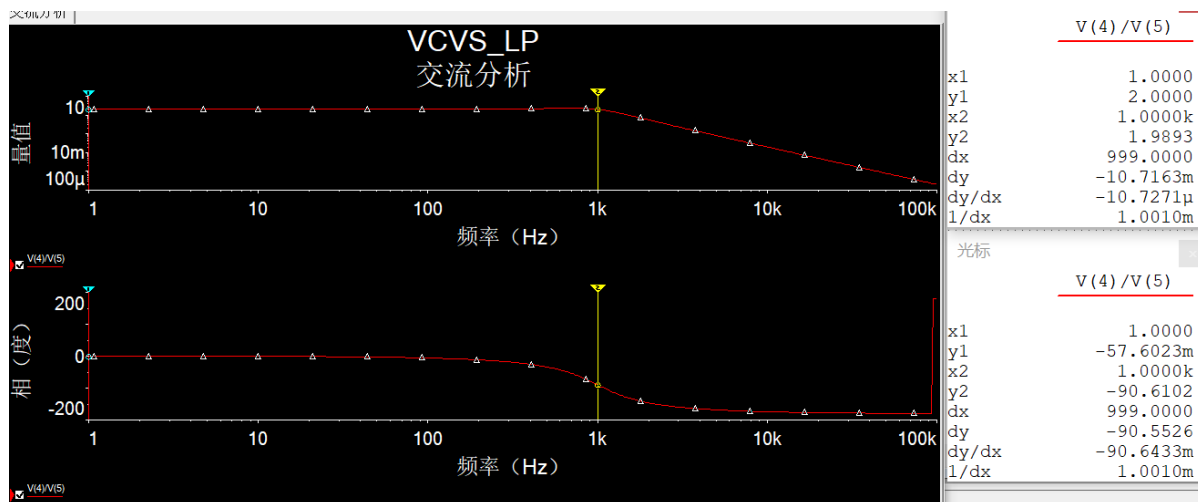


图 2: 二阶低通滤波器幅频和相频特性

在  $f = 1\text{kHz}$  时, 从幅频特性中可以看出, 有  $\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \approx 2$ ; 从相频特性汇总可以看到相移约为  $-90^\circ$ 。从电路中可以分析得

$$\dot{A}_{up} = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (2)$$

而

$$Q = \frac{1}{|3 - \dot{A}_{up}|} \quad (3)$$

则可以通过改变  $R_4$  的值来改变  $Q$ 。对  $R_4$  进行参数扫描即可得到不同  $Q$  值下的幅频特性和相频特性曲线。为了更加清晰地看出  $Q$  值对频率响应的影响, 这里使用

$$\frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} = \frac{V(4)/V(5)}{1 + \frac{V(4) - V(1)}{I(R4)} \cdot \frac{I(R3)}{V(1)}}$$

作为纵坐标。其中由于参数扫描功能中的表达式没有电阻阻值, 我使用了电压与电流的比值来表示  $R_3$  和  $R_4$  的阻值。如图 3 所示。可见  $Q$  值越大, 幅频特性在截止频率附近的值就越大, 相频特性在截止频率附近的变化就越剧烈。

**测量输入信号为 1kHz 方波时输出信号波形, 并分析为何会产生这种形状的波形** 将输入信号接入振幅为 1V, 频率为 1kHz 的方波, 使用示波器观察输入输出波形。如图 4 所示。

可以看出, 输出信号基本近似于正弦波。根据傅里叶级数分解, 对于周期为  $T$ , 幅值为  $A$  的方波

$$f(t) = \begin{cases} A, & t \in (kT, (k + \frac{1}{2})T] \\ -A, & t \in ((k + \frac{1}{2})T, 2kT] \end{cases} \quad k \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

有傅里叶展开

$$f(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)\omega t}{2k-1} \quad (5)$$

其中  $\omega = 2\pi f$ 。由此可见, 方波可以看成多种频率的正弦波的叠加, 而基频即为 1kHz。从幅频特性可以看出, 电路对高频的抑制十分明显, 故高次谐频经过电路后会有衰减。所以最终的输出中包含了大量的基

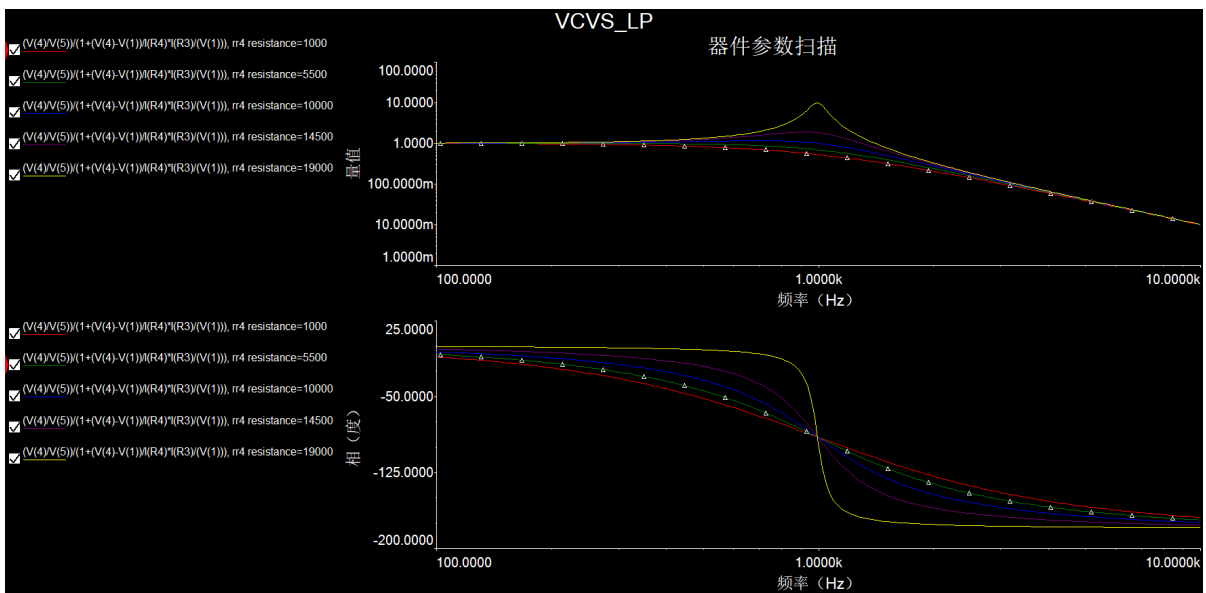


图 3: 二阶低通滤波器不同  $Q$  值的幅频特性和相频特性曲线

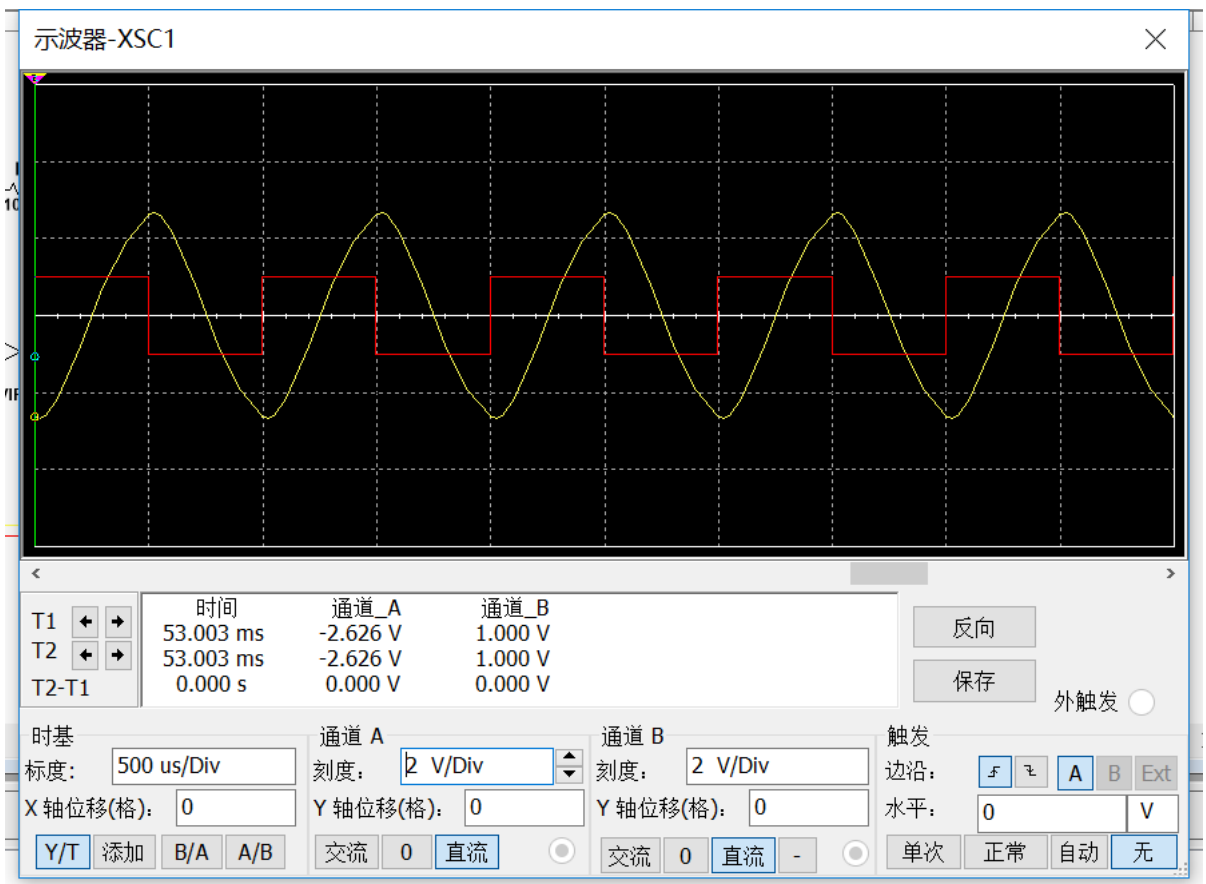


图 4: 二阶低通滤波器输入方波

频和极少的谐频，看起来就近似于一个正弦波。从波形中也可以看出正弦波的相位落后于方波  $90^\circ$ ，这也符合理论。

# VCVS 二阶高通滤波器

电路如图 5 所示。电路整体与 VCVS 二阶低通滤波器电路类似，只是将电阻和电容互换（即把低通变为高通）。

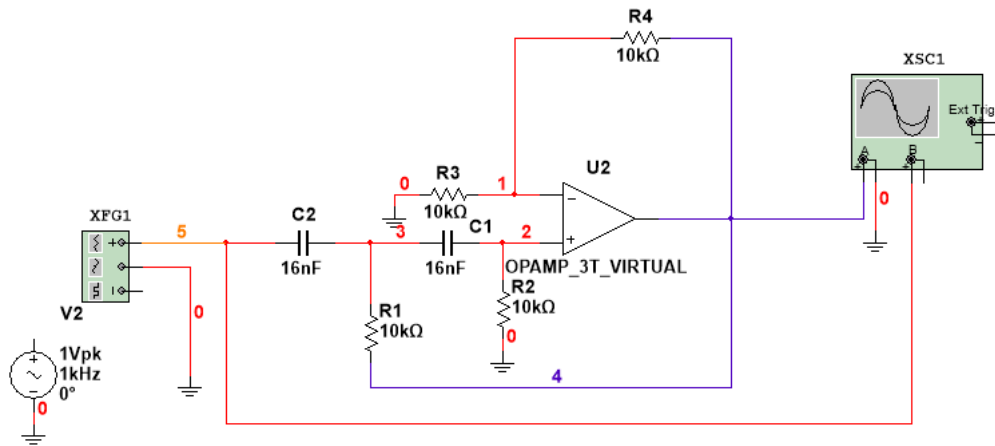


图 5: VCVS 二阶高通滤波器电路

测量幅频和相频特性，观察不同  $Q$  值对幅频特性的影响 使用交流分析得到幅频和相频特性曲线，如图 6 所示。在  $f = 1kHz$  时，从幅频特性中可以看出  $\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \approx 2$ ；从相频特性中可以看出相移约为  $90^\circ$ 。

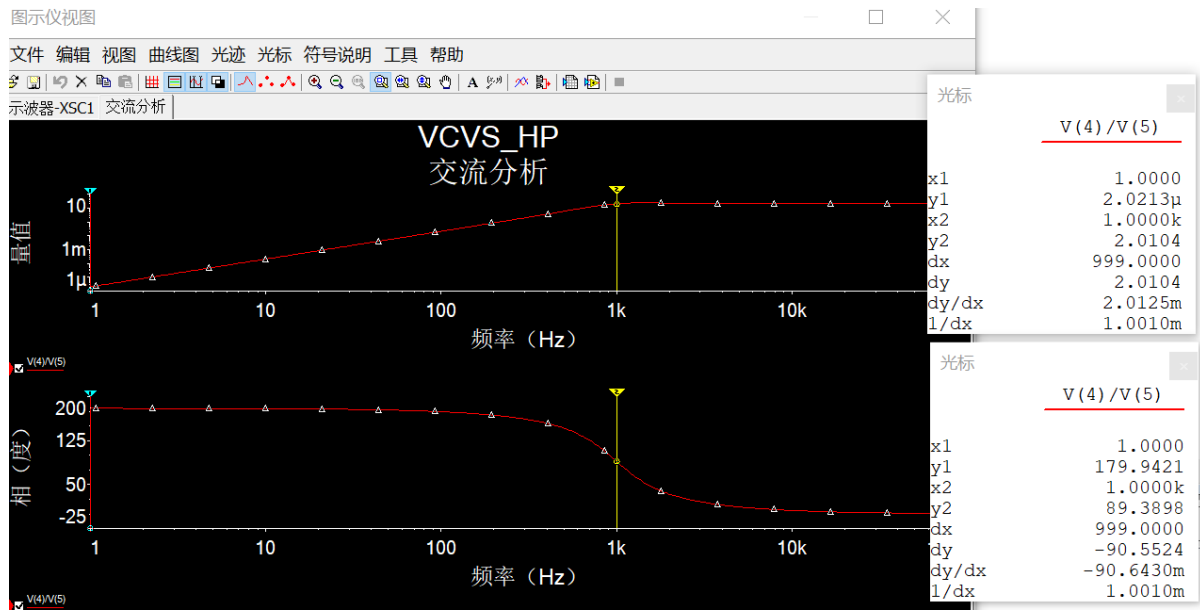


图 6: 二阶高通滤波器幅频和相频特性

该电路的  $\dot{A}_{up}$  的表达式与二阶低通滤波器的表达式相同，仍然可以通过改变  $R_4$  的阻值来改变  $Q$  值。使用类似的方法，做出不同  $Q$  值下幅频特性和相频特性曲线，如图 7 所示（纵坐标仍为  $|\dot{A}_u/\dot{A}_{up}|$ ）。可以

看到， $R_4$  越大， $Q$  值越大，幅频特性曲线在截止频率附近上凸得越明显，相频特性曲线在截止频率附近变化越剧烈。

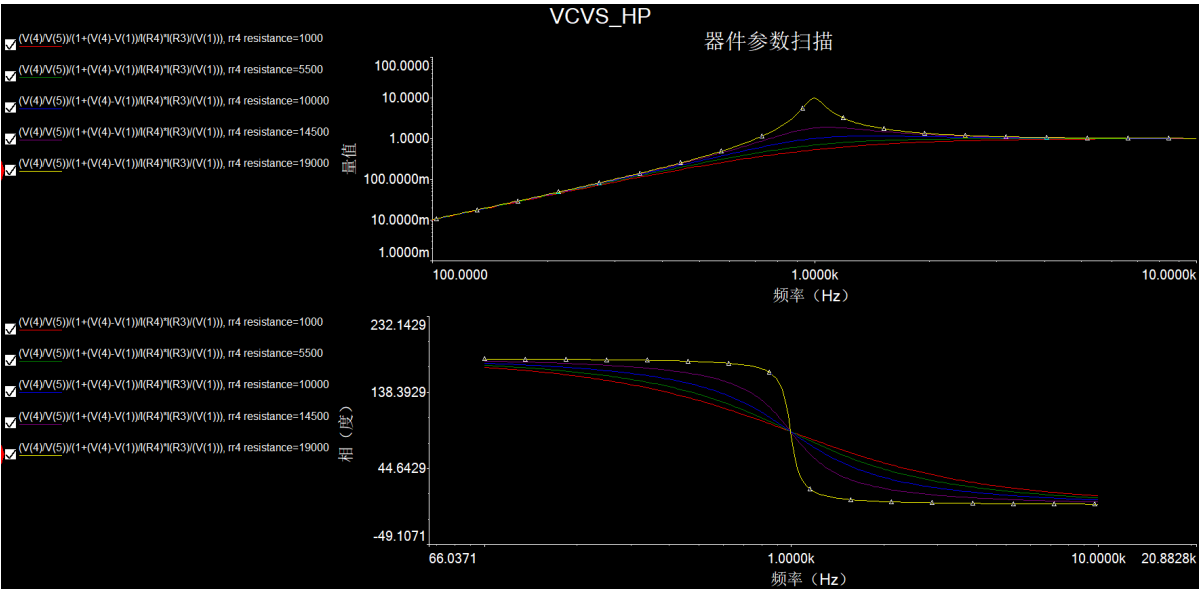


图 7: 二阶高通滤波器不同  $Q$  值的幅频特性和相频特性曲线

测量输入信号为 1kHz 方波时输出信号波形，并分析为何会产生这种形状的波形 输入信号接入幅度为 1V，频率为 1kHz 的方波，输入输出波形如图 8 所示。

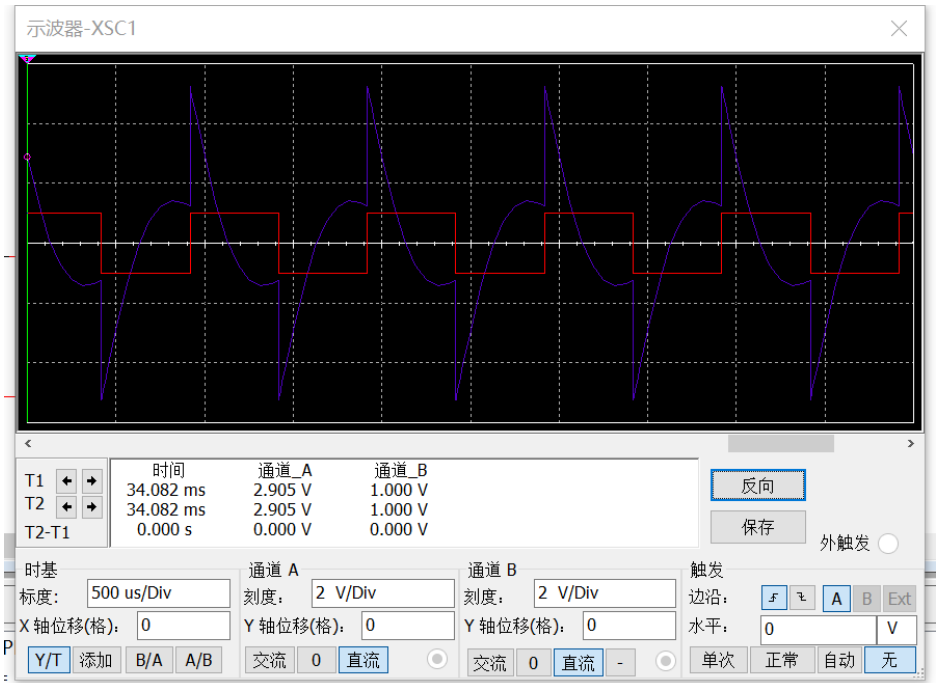


图 8: 二阶高通滤波器输入方波

下面分析该波形产生的原因。仍然将方波做傅里叶展开，如式 (5) 所示。对于高通滤波器，注意到基频

和谐频的幅度几乎没有衰减，而由相频特性可知在  $f = 1\text{kHz}$  时输出会超前  $90^\circ$ 。据此，可以使用 MATLAB 做出图像如图 9 所示。

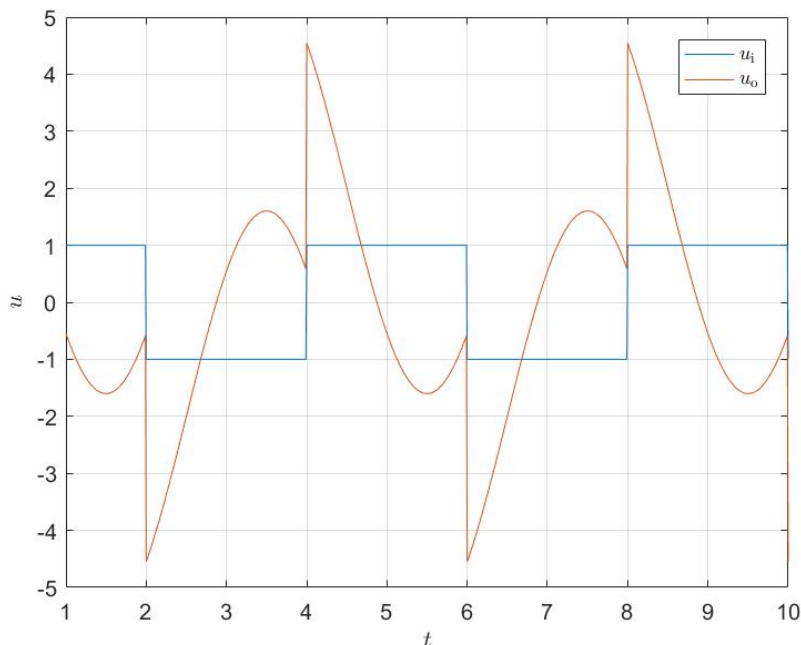


图 9: 二阶高通滤波器输入方波 MATLAB 仿真结果

可见使用 MATLAB 作出的波形图与 MULTISIM 仿真的结果十分接近，即这样的波形确实是由于基频分量相移导致的。

## VCVS 二阶带通滤波器

二阶带通滤波器的电路如图 10 所示。电路总体上由一个低通滤波器和一个高通滤波器构成，基本结构与二阶低通和二阶高通类似。

**测量幅频和相频特性，观察不同  $Q$  值对幅频特性的影响** 使用交流分析的方法获得幅频和相频曲线。如图 11。使用游标可以读出在  $f = 1\text{kHz}$  处，放大倍数达到最大，约为 2；相移约为 0。这完全符合 VCVS 二阶带通滤波器的理论值。进一步可以分析不同  $Q$  值下的幅频和相频曲线。仍然通过改变  $R_4$  的值来改变  $Q$  值，作出不同  $Q$  值下的幅频特性和相频特性曲线，如图 12 所示。

可以看到， $R_4$  越大， $Q$  值越大，幅频特性曲线在截止频率出越尖锐，选频特性就越好；相频特性曲线在截止频率附近变化越剧烈。

**测量输入信号为  $1\text{kHz}$  方波时输出信号波形，并分析为何会产生这种形状的波形** 将输入信号接入  $1\text{kHz}$  的方波，用示波器观察输出信号，波形如图 13。

从中可见波形基本为一个  $1\text{kHz}$  的正弦波，但仍有些失真。。这是由于带通滤波器在  $f = 1\text{kHz}$  时的增益最大，所以将基频部分分量大部分保留下来。而由于电路的  $Q$  值不是很大（此时取  $R_4 = R_3$ ，即  $Q = 1$ ）高频部分的增益衰减不是十分明显，故会有少量高频成分泄漏，导致波形与标准的正弦有所差别。



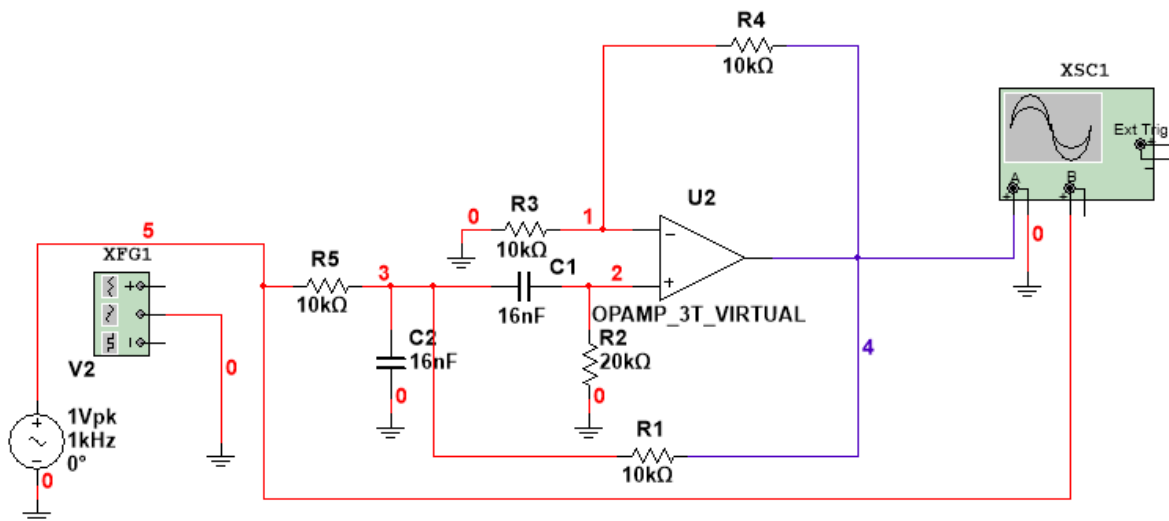


图 10: VCVS 二阶带通滤波器电路

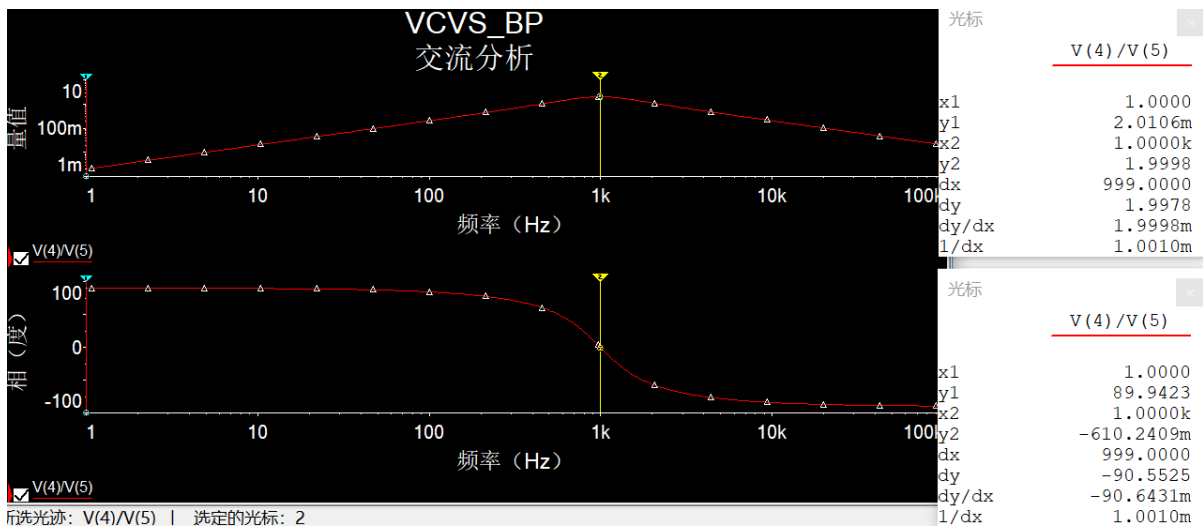


图 11: 二阶带通滤波器幅频和相频特性

分析 VCVS 二阶带通滤波器稳定工作的条件，并观察不稳定工作的现象（在输入端加入频率 1kHz、幅值 1mV 的正弦激励信号，观察电路的不稳定现象）。首先在输入端接入满足条件的信号，仍然保持当前  $R_4 = 10\text{k}\Omega$ ，即  $Q = 1$ ，得到图 14 所示的波形。可见输出波形的幅值是输入波形的二倍，且没有相移。

增大  $R_4$  的阻值至  $19\text{k}\Omega$ ，此时  $Q = 10$ ，波形如图 15 所示。

可见输入输出已经产生了相移，但是输出仍然比较稳定。继续调节  $R_4 = 20\text{k}\Omega$ ，此时  $Q = \infty$ 。波形如图 16 所示。

可以看到输出波形的幅值在不断变化，从总体趋势图中可以比较明显地看出，输出波形出现了类似于调幅信号的优美波形。进一步我们令  $R_4 = 30\text{k}\Omega$ ，此时  $\dot{A}_{up} = 4 > 3$  得到图 17。

由此可知，VCVS 二阶带通滤波器的稳定性与通频带放大倍数  $\dot{A}_{up}$  有关。当  $\dot{A}_{up} < 3$  时，输出波形较为稳定；当  $\dot{A}_{up} = 3$  时，输出波形的幅值呈现振荡的趋势； $\dot{A}_{up} > 3$  时，输出波形的幅值理论上会无穷大

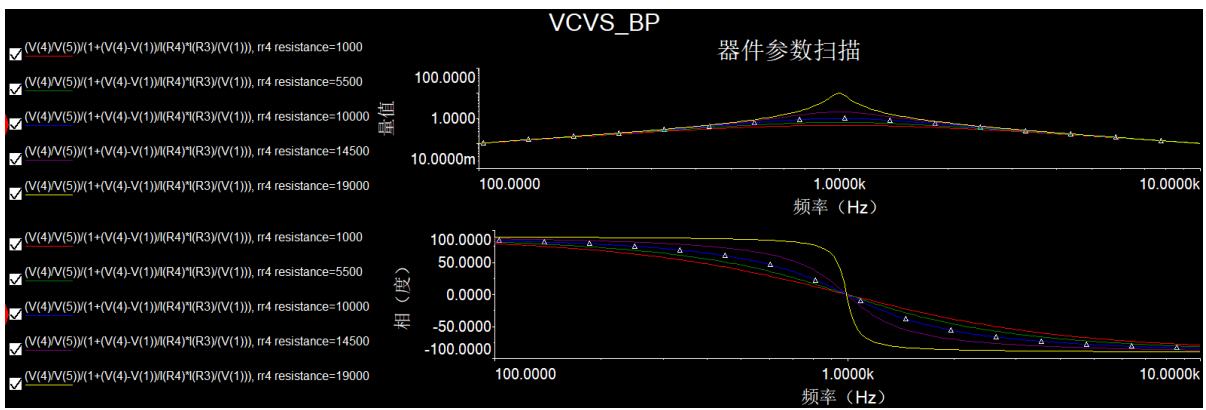


图 12: 二阶带通滤波器不同  $Q$  值的幅频特性和相频特性

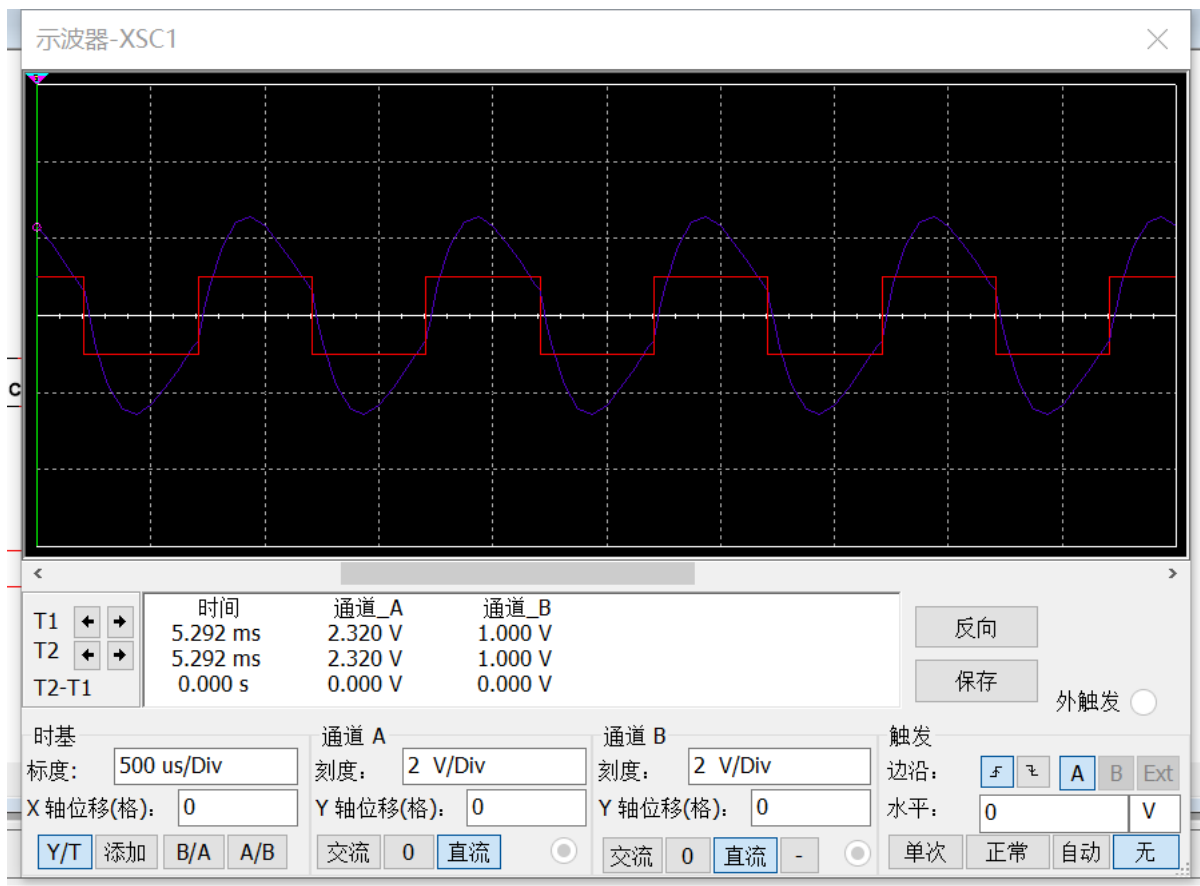


图 13: 二阶带通滤波器输入方波

(此时已引入正反馈)，但实际上会受到运放的最大输出电压的限制，从而产生顶部失真的正弦波。

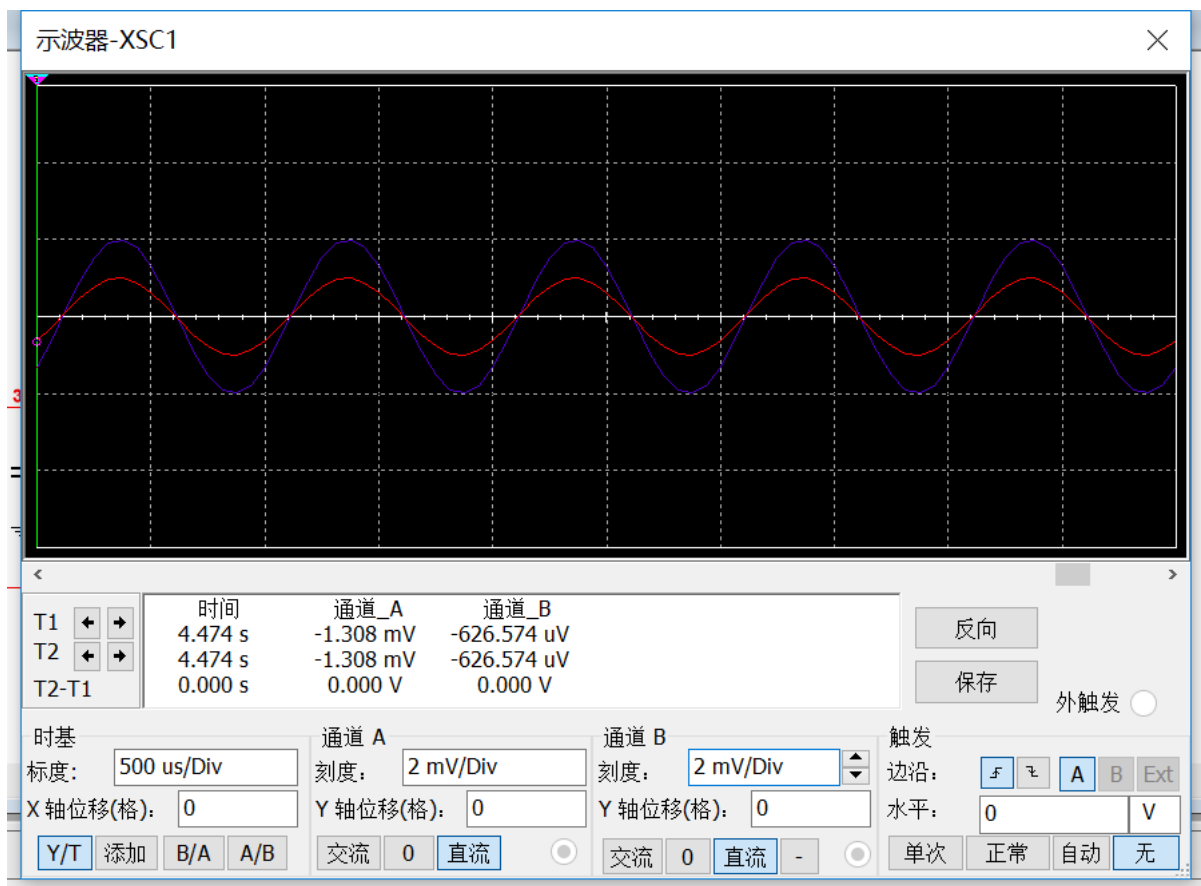
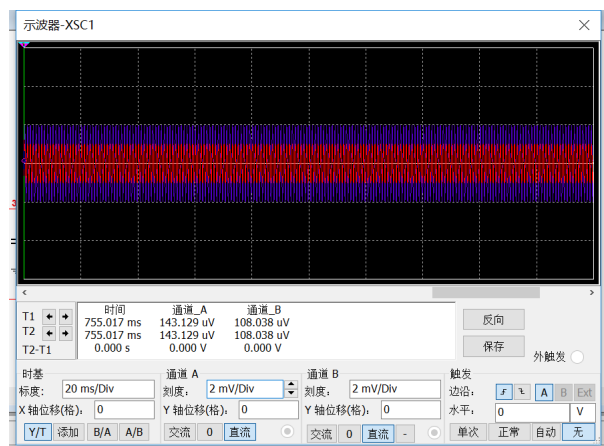
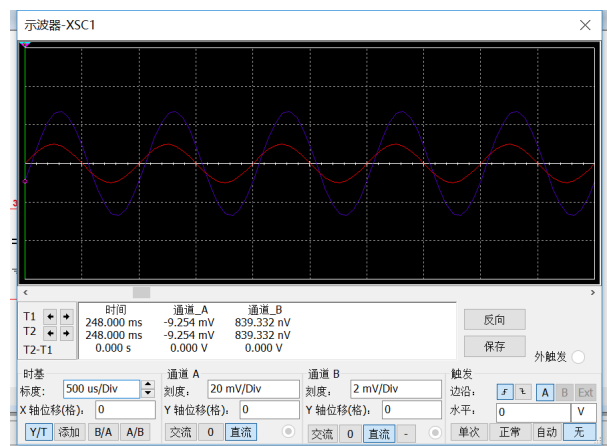


图 14: 二阶带通滤波器  $Q = 1$  时波形

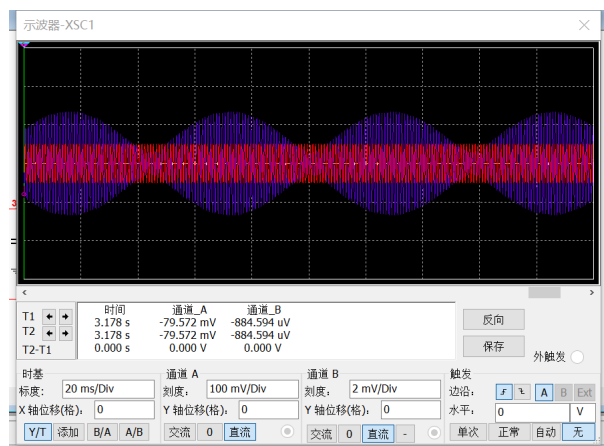


(a) 总体趋势

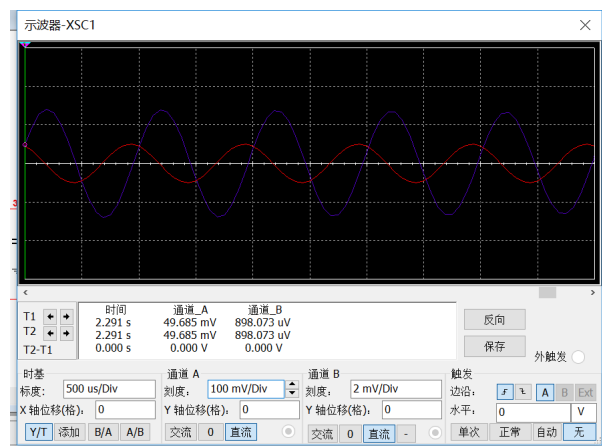


(b) 局部波形

图 15: VCVS 二阶带通滤波器  $Q = 10$  时输入输出波形



(a) 总体趋势



(b) 局部波形

图 16: VCVS 二阶带通滤波器  $Q = 10$  时输入输出波形

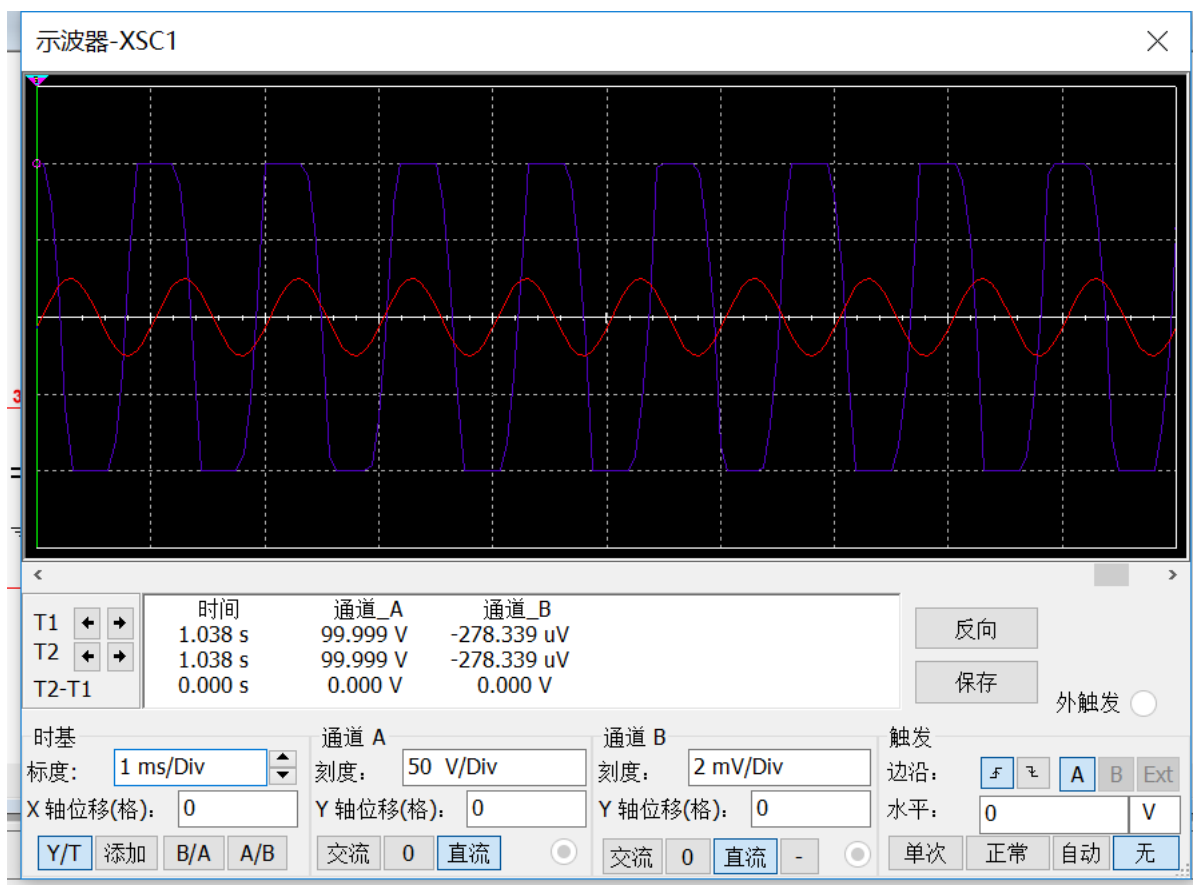


图 17:  $\dot{A}_{up} > 3$  时输入输出波形

## VCVS 二阶带阻滤波器

电路如图 18 所示。

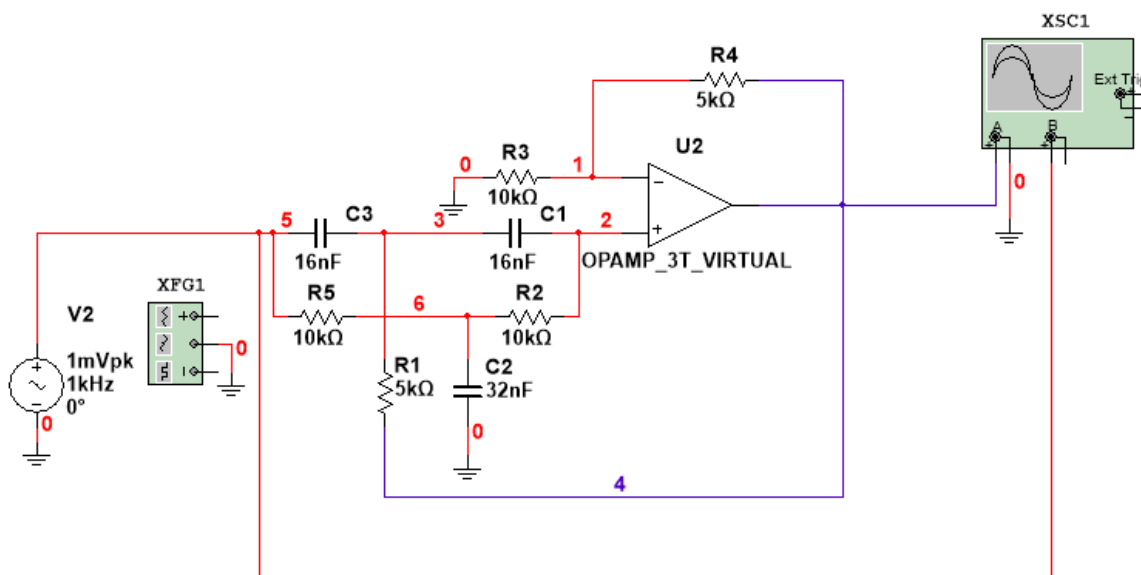


图 18: VCVS 二阶带阻滤波器

测量幅频和相频特性，观察不同  $Q$  值对幅频特性的影响。幅频特性和相频特性如图 19 所示。从游标中可以读出，当  $f = 1\text{kHz}$  时增益仅为 0.016 左右，而相移约为  $90^\circ$ 。

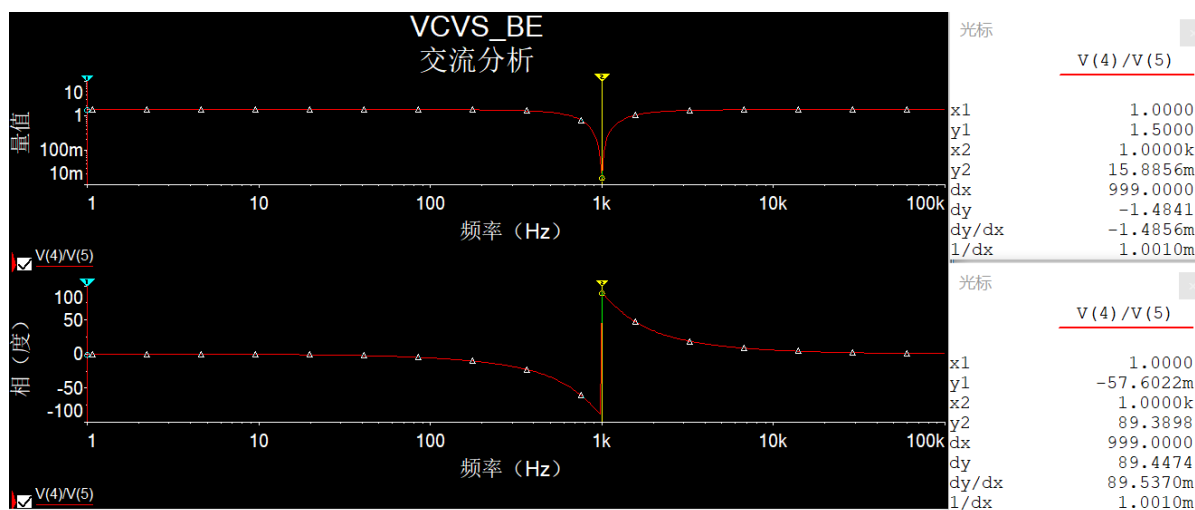


图 19: 二阶带阻滤波器幅频和相频特性

改变  $R_4$  的取值即可改变  $Q$  值。需要指出的是，该电路的  $Q$  值的表达式有所变化：

$$Q = \frac{1}{2|2 - \dot{A}_{up}|} \quad (6)$$

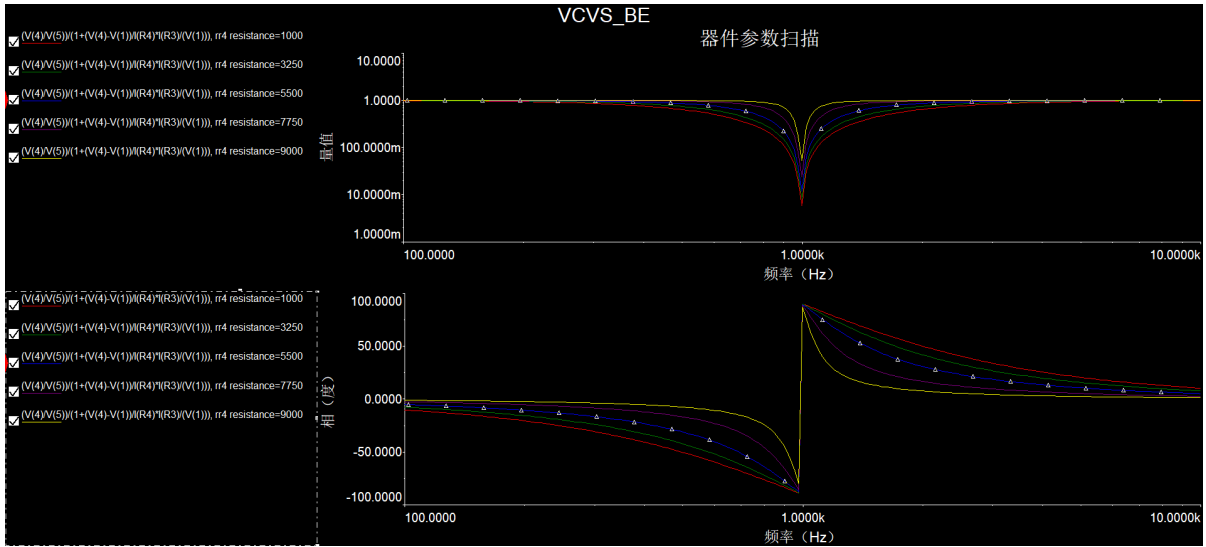


图 20: 二阶带阻滤波器不同  $Q$  值的幅频特性和相频特性曲线

对  $R_4$  进行参数扫描，得到不同  $Q$  值下的幅频和相频曲线，如图 20 所示。

其中黄色的曲线  $R_4$  的值最大，对应的  $Q$  也最大。从幅频特性中可以看出， $Q$  越大，曲线在截止频率出就越不尖锐，带宽越窄。这也可以由带宽的公式

$$BW = \frac{f_0}{Q} \quad (7)$$

来验证。从相频特性中可以看出， $Q$  越大，在截止频率附近曲线越陡。而在截止频率处，不同  $Q$  值的曲线几乎完全重合。

**测量输入信号为 1kHz 方波时输出信号波形, 并分析为何会产生这种形状的波形** 测得输出波形如图 21 所示。产生这一波形的原因如下：一方面，带阻滤波器对方波中 1kHz 的分量有很大程度的衰减而基本保留住高频分量；另一方面，从相频特性中可知，带阻滤波器对于 1kHz 的输入会产生  $90^\circ$  的相移。输出波形大致为

$$u_o(t) = \frac{4A}{\pi} \left( k \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right) \quad (8)$$

其中  $k$  表示基频经过带阻滤波器之后衰减的比例系数。使用 MATLAB 进行仿真验证，得到图 22 所示的波形，可见与电路仿真的结果十分接近。

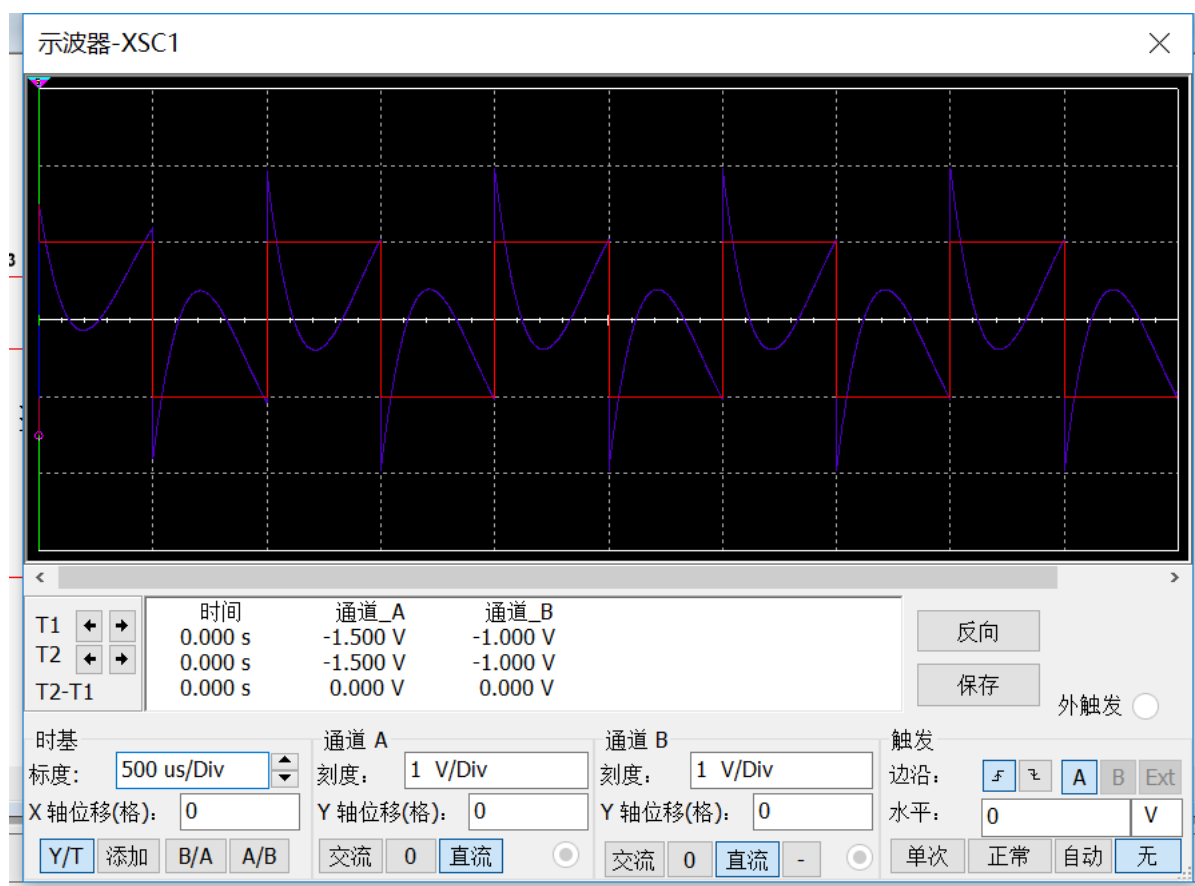


图 21: 二阶带阻滤波器输入方波

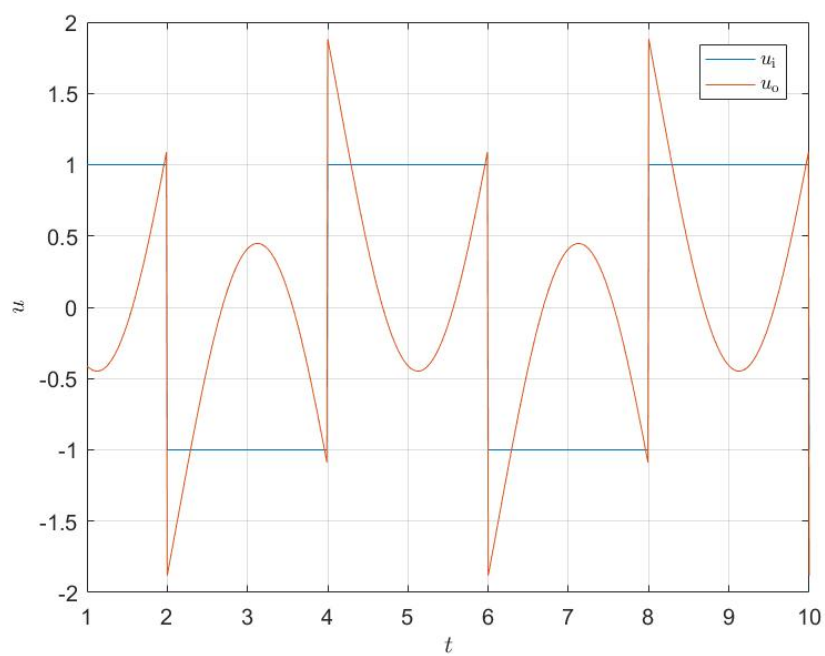


图 22: 二阶带阻滤波器输入方波 MATLAB 仿真结果

**仿真题 3-2:** 以下题目任选一题完成:

(1) 利用运放和模拟乘法器设计一个正弦波有效值测量电路。

(2) 设计一个求解一阶微分方程  $u_i = a * u_o + b * du_o/dt$  的电路, 其中  $a, b$  为常数。要求简述电路工作原理, 并实际测量多个求解结果进行验证。

选择第一题, 即正弦波有效值测量电路的设计。设正弦波有效值为  $A$ , 频率为  $\omega$ , 即表达式为

$$x(t) = \sqrt{2}A \sin \omega t \quad (9)$$

现在对该信号处理得到所求的有效值。步骤如下:

- 使用乘法器将原信号平方。可得

$$y_1(t) = x^2(t) = 2A^2 \sin^2 \omega t = A^2(1 - \cos(2\omega t)) \quad (10)$$

- 使用低通滤波器滤除高频部分, 得到

$$y_2(t) = A^2 \quad (11)$$

其中  $k$  为比例系数

- 使用乘法器和运放搭建开方电路, 即可得到

$$y_3 = A \quad (12)$$

实际电路如图 23 所示。与之前的原理推导相同, 电路分为平方、低通滤波、开方三个模块。其中平方和

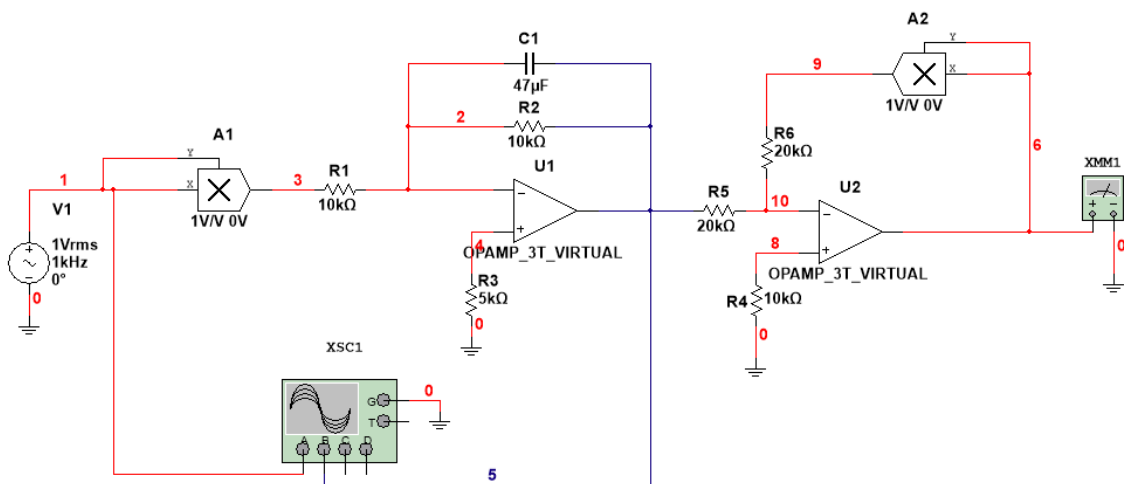


图 23: 正弦波有效值测量电路

开方部分比较简单, 下面分析中间的低通滤波电路。从电路的  $s$  域模型可得

$$\dot{A}_u = \frac{R_2 // \frac{1}{sC_1}}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{sR_2C_1 + 1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{j\omega R_2C_1 + 1} \quad (13)$$

可见确实为低通滤波电路。可以选取  $R_2$  和  $C_1$  的取值使得高频部分的增益很小, 而低频部分得到保留。



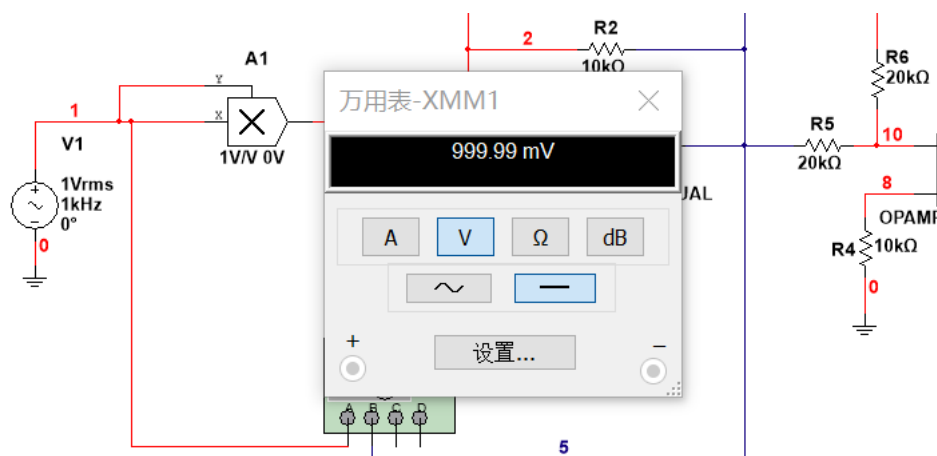


图 24: 正弦波有效值测量结果

使用万用表的直流档位测量输出电压，即可得到正弦波的有效值。如图 24，仿真时接入了有效值为 1V 的正弦波，测得输出结果为 999.99mV，与实际值十分接近。

**仿真题 3-3:** 教材习题 7.29: 试将峰值为 1V，频率为 100Hz 的正弦波输入电压，变换为放置为 5V、频率为 200Hz 的锯齿波电压。

电路如图 25 所示。

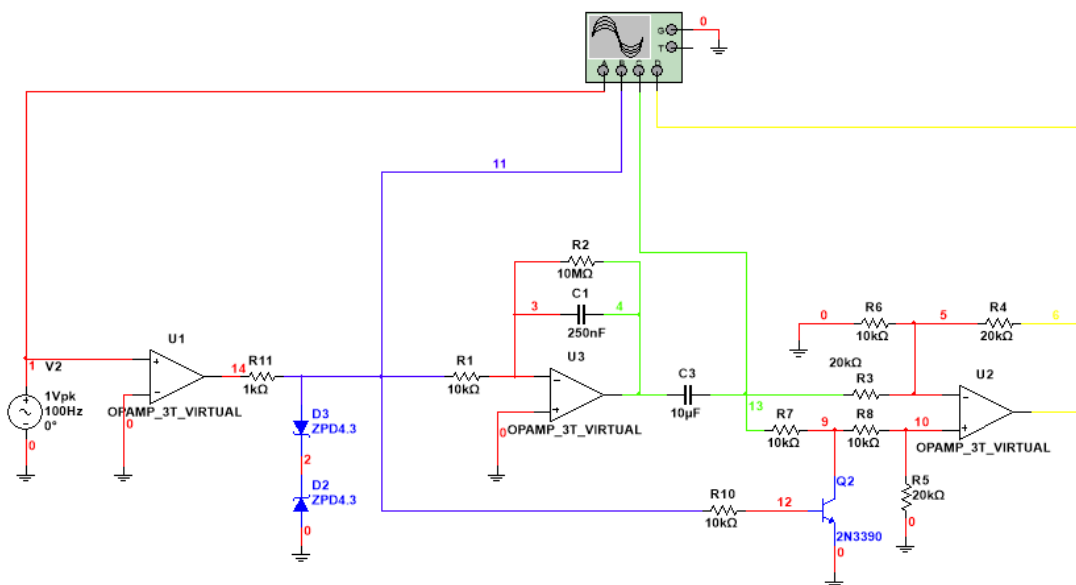


图 25: 正弦波转锯齿波电路图

整个电路分为正弦波转方波、方波转三角波、三角波转锯齿波三级电路。

**正弦波转方波** 第一级电路比较简单，只需一个单限比较器，由一个运放构成，如图 26 所示。输出部分使用了稳压管进行限幅，由于稳压管具有正向导通压降，使用两个相对连接的 4.3V 的稳压管保证了输出为 5V。

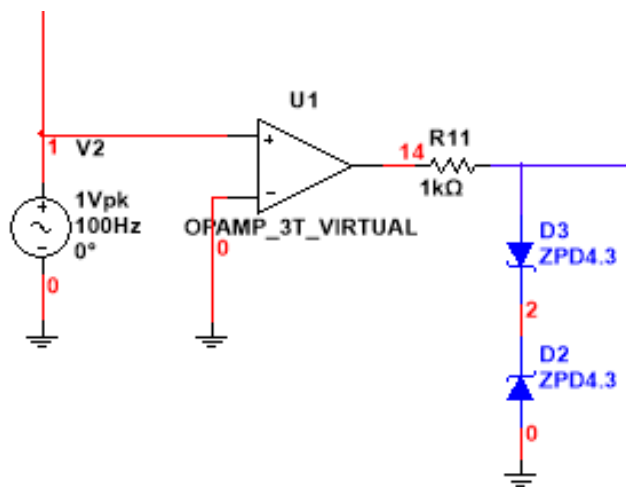


图 26: 正弦波转方波电路

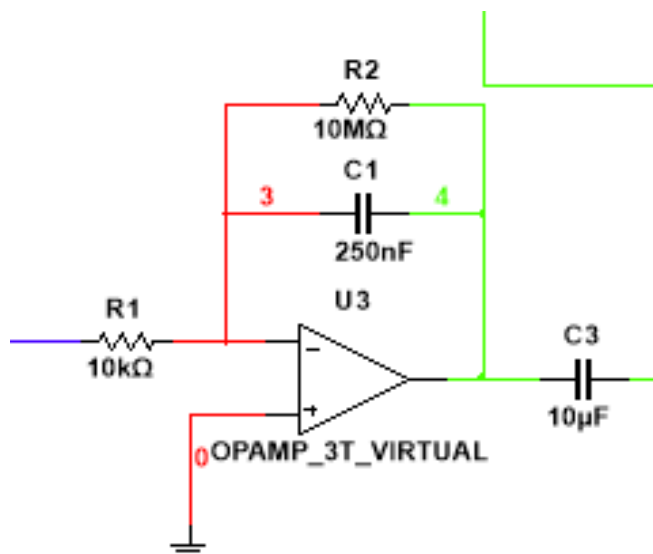


图 27: 方波转三角波电路

**方波转三角波** 方波转三角波的电路如图 27 所示。其中  $R_2$  的作用是保证在低频部分仍然存在负反馈。该电路使用积分器实现。不难推导出

$$\begin{aligned} u_{O1}(t) &= -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_O(t_0) \\ &= -\frac{1}{RC} u_i(t - t_0) + u_O(t_0) \end{aligned} \quad (14)$$

为了保证输入输出幅值不变，需要有

$$U_{O1} = \frac{U_I}{RC} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{1}{2} = U_I \quad (15)$$

其中  $U_{O1}$  和  $U_I$  分别表示积分器输出和输入的幅值， $T = 0.1s$  为输入信号的周期。所以此处取  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $C_1 = 250nF$ 。输出后使用了一个电容来隔离直流分量，以便后级三角波转锯齿波的同时实现倍频。

**三角波转锯齿波** 电路如图 28 所示。该电路借鉴了教材中的设计，其中电子开关直接通过一个 PNG 三极管来实现。

该电路可以将三角波的下降部分翻转，上升部分不变。

**波形分析** 首先使用四通道示波器观察输入和每一级电路的输出，如图 29 所示。可以看到，各级电路均正常工作，分别产生了方波、三角波、锯齿波。

为了检验输出波形是否符合要求，只观察输入和输出的波形，如图 30 所示。从示波器中可以明显看到，输出的锯齿波的幅值大约为 1 个大格 (5V/Div)。使用游标进行测量，可知幅值约为 5.016V。同时也可以明显看出，每次当正弦波过零点时，锯齿波恰好达到下降沿，由此可知确实实现了 200Hz 的锯齿波。

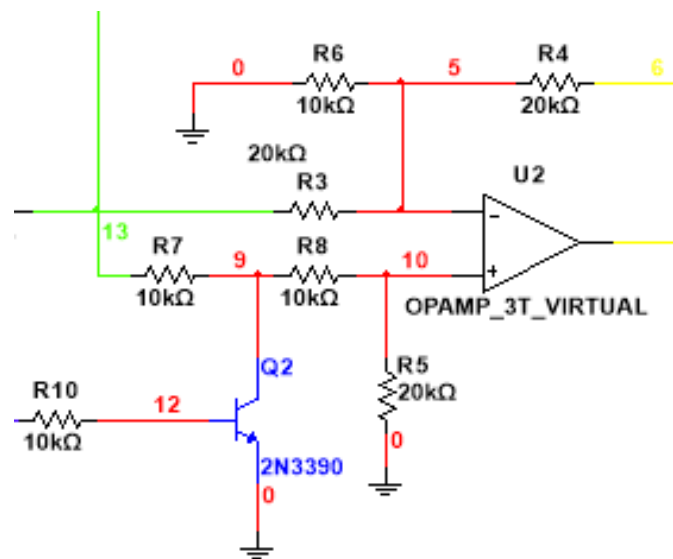


图 28: 三角波转锯齿波电路

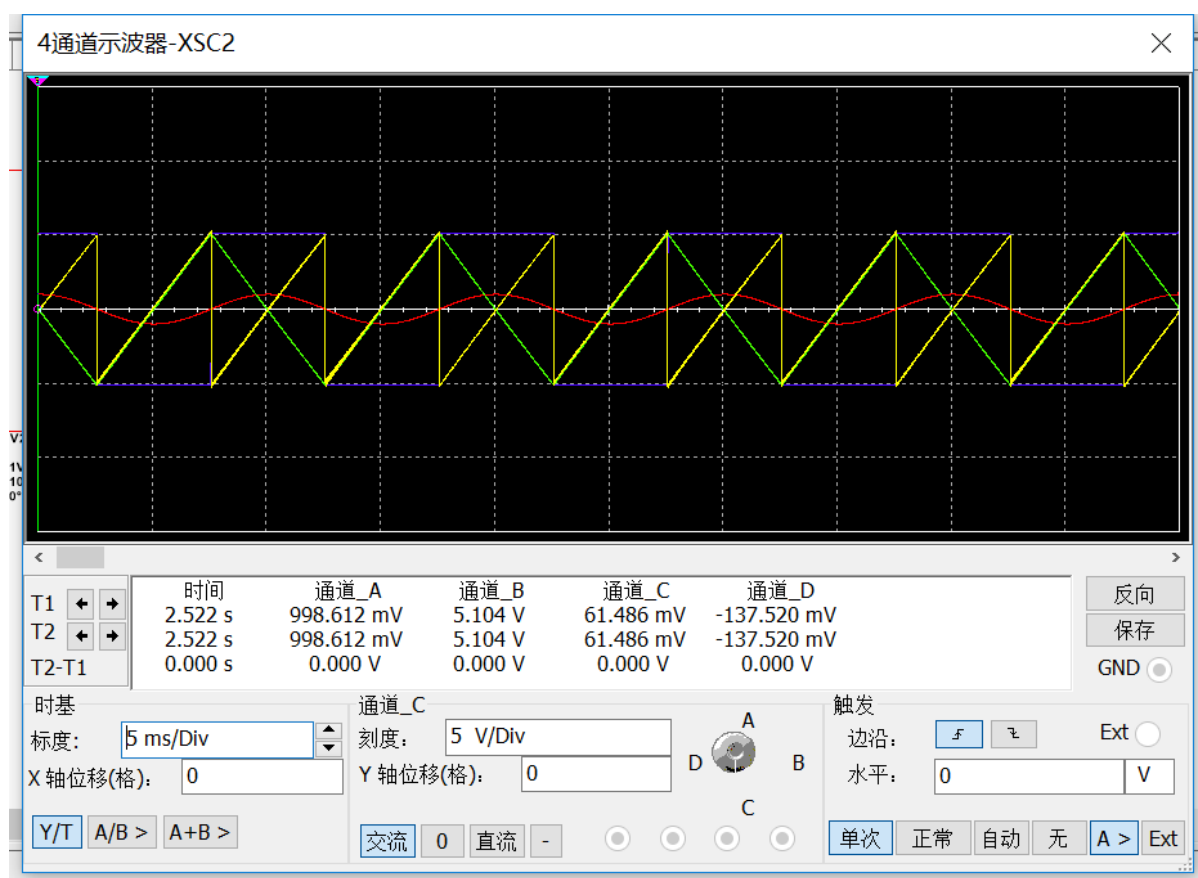


图 29: 输入与各级电路输出波形

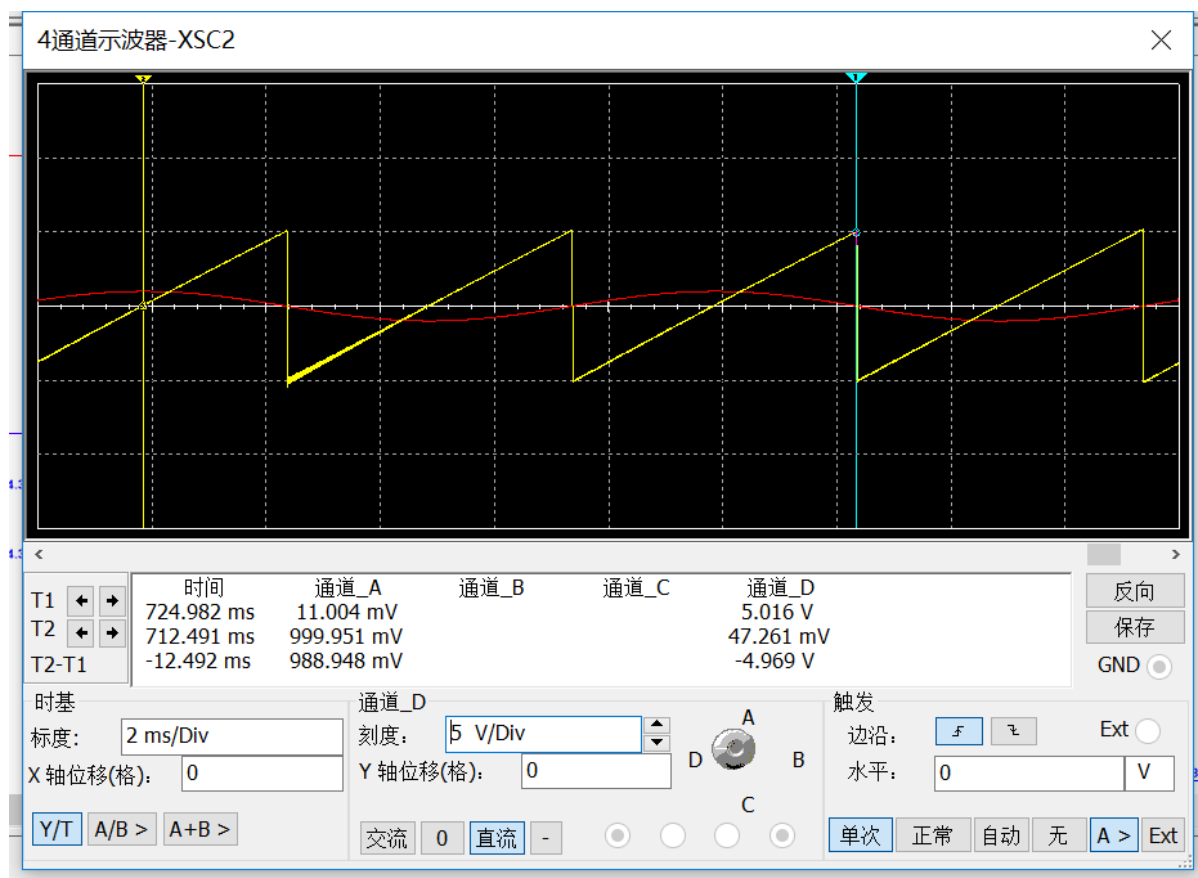


图 30: 正弦波转锯齿波输入输出波形

### 3 仿真中遇到的问题及解决方法

本次仿真的包括的内容比较多，仿真过程中主要遇到了以下问题：

1. 在 VCVS 二阶滤波器的仿真中，要求绘制出不同  $Q$  值的幅频和相频曲线。这就要求曲线中包含两种变量：频率和参数。之前在电路原理仿真中可能接触过这种方法，但是由于时间比较久远，我已经有所遗忘。不过我第一反应应该是在参数扫描里面寻找，果然在里面找到了交流分析的选项，完成了曲线的绘制。
2. 高通和带阻滤波器输入方波的解释。这两个滤波器输入方波后的输出波形比较奇特，难以直接用理论解释清楚。我分析了原理后，使用 MATLAB 进行作图，得到了相近的曲线，从而论证了分析的正确性。
3. 在正弦波有效值测量电路中，一开始由于没有正确分析开平方电路的负反馈条件而设计了错误的电路。后来我注意到了这一点，按照学过的分析方法正确地分析，解决了问题。
4. 波形转换电路中一个关键的地方是在积分器后增加一个隔直电容。初次设计电路的时候没有考虑到这一点，结果观察到输出波形不是完美的锯齿波，幅值和跳变时刻都不正确。我观察波形后马上意识到可能是因为输入给最后一级电路的不是均值为 0 的三角波，这就导致了翻转之后不是完美的锯齿波。因此，我使用隔直电容滤除了直流分量，完美地解决了问题。

## 4 收获和体会

本次实验中，我使用运放完成了诸多实用电路的设计，包括正弦波有效值测量电路、各种二阶滤波电路、正弦波转锯齿波电路。我也在仿真的过程中更加熟悉了 MULTISIM 中的一些测量方法的使用。

通过这些实验，我更加深刻地感受到运放的强大之处。在单管放大电路中，所有的数值都难以精确得出，而运放却可以实现精密的运算、滤波和波形转换等。在以后电子系统的设计中，我也可能会经常需要和运放打交道，完成信号的处理。

## 参考文献

- [1] 模拟电子技术基础/童诗白，华成英主编；清华大学电子学教研组编.-5 版.-北京：高等教育出版社，2015.7.ISBN 978-7-04-04252505-5

## A MATLAB 代码

---

```
1 A = 1;
2 T = 4;
3 omega = 2 * pi / T;
4 t = 1:0.01:10;
5
6 ui = zeros(1, length(t));
7 uo = zeros(1, length(t));
8
9 for i = 1 : length(t)
10     if (mod(floor(t(i) * 2 / T), 2))
11         ui(i) = -A;
12     else
13         ui(i) = A;
14     end
15 %     uo(i) = 2 * (ui(i) - 4 * A / pi * (sin(omega * t(i)) ...
16         - sin(omega * t(i) + pi / 2))); %高通
17     uo(i) = 1.5 * (ui(i) - 4 * A / pi * (sin(omega * t(i)) ...
18         - 0.2 * sin(omega * t(i) + pi / 2))); %带阻
19 end
20 plot(t, ui, t, uo);
21 l = legend('$u_{\rm i}$', '$u_{\rm o}$');
22 xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex');
23 ylabel('$u$', 'interpreter', 'latex');
24 set(l, 'interpreter', 'latex');
25 grid on;
```

---