

# 模拟电子技术课程设计 实验报告

2019/2020 学年 第 2 学期

姓名： 凌智城

班级： 通信工程 1803 班

学号： 201806061211

# 目 录

一、 实验目的 .....	1
二、 实验任务 .....	1
三、 电路设计、参数计算及相关电路原理图 .....	2
四、 电路仿真的结果及问题分析 .....	5
4.1 仿真数据和波形图记录 .....	5
4.2 仿真中发现的问题及分析 .....	12
五、 电路的安装、调试和测试 .....	13
5.1 所用仪器调备 .....	13
5.2 安装调试步骤 .....	14
5.3 数据和波形图记录与处理 .....	14
5.4 安装调试过程中出现的问题及解决办法 .....	17
六、 实验注意事项 .....	18
七、 意见和建议 .....	18

## 题目： 信号发生器

日期 成绩 教师签名

## 一、实验目的

1. 掌握由集成运算放大器组成的方波、三角波、正弦信号发生器的方法；
2. 熟悉信号发生器的一些主要技术指标及其测量方法；
3. 掌握三端集成稳压器组成的直流稳压电源的调试及其主要特性指标的测量方法；
4. 学习有源滤波器单元电路的设计、调试及其幅频特性测量方法。

## 二、实验任务

需要完成的试验任务有：

任务 1. 设计一个单运放组成的 M 阶有源低通滤波电路，其主要指标如下：通带电压增益等于 1，截止频率 500Hz。并完成该电路的仿真调试、幅频特性的测量和实际电路的搭建、调试及幅频特性的测量。

任务 2. 完成有四运放组成的方波、三角波、正弦信号发生器的仿真和实际电路的搭建与调测。输出的方波具有频率可调的功能，输出的三角波具有幅值、频率和直流偏移量可调的功能，输出的正弦波幅值和频率可调。

实验电路的整体框图如图 1 所示，图中  $U_4$  单元电路是上述任务 1 中所设计完成的有源低通滤波电路，在图一中用于产生正弦波信号。

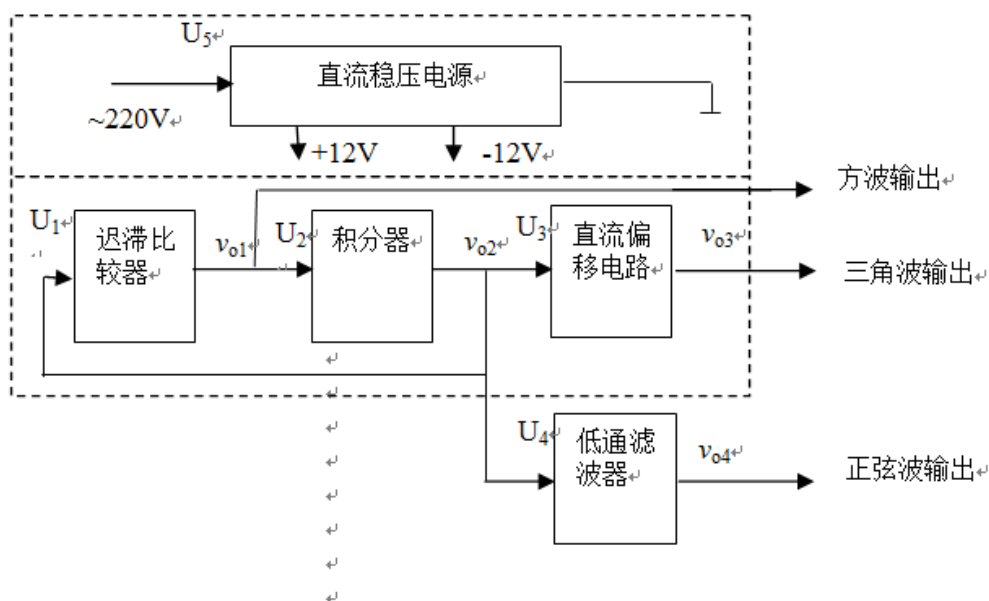
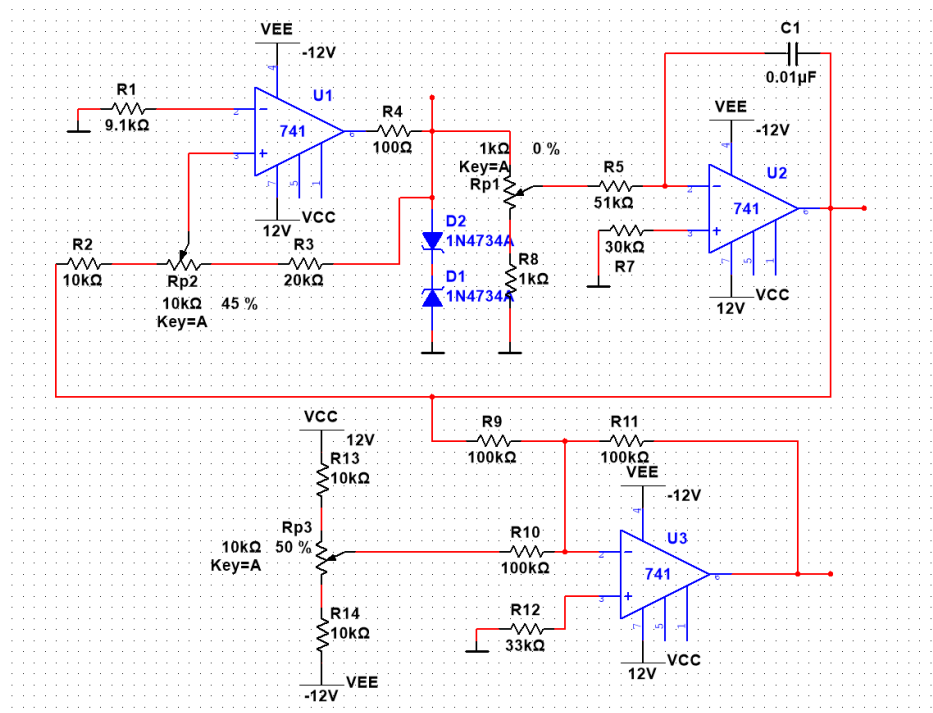


图 1 实验电路的整体框图

### 三、电路设计、参数计算及相关电路原理图（含总电路原理图）

#### 1. 方波、三角波信号发生器



#### 2. 方波、三角波主要参数计算

上门限电压

$$V_{T+} = \frac{R_2'}{R_3'} \times V_z$$

此即为  $v_{o2}$  的正最大值  $V_{02M+}$ （通过  $R_{p2}$  可调）。

下门限电压

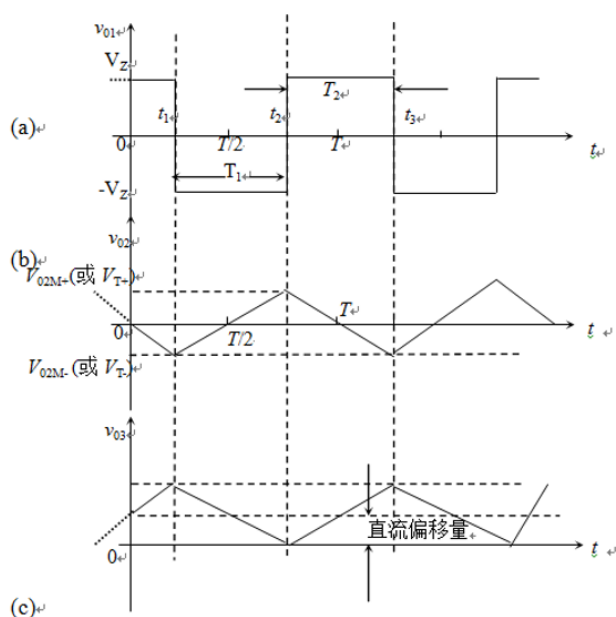
$$V_{T-} = -\frac{R_2'}{R_3'} \times V_z$$

此即为  $v_{o2}$  的负最大值  $V_{02M-}$ （通过  $R_{p2}$  可调）。

$$T_1 = T_2 = \frac{2R_2'}{R_3'} \frac{R_{p1} + R_8}{R_{p1} + R_8} (R_5)C, \text{ 故波形周期:}$$

$$T = T_1 + T_2 = \frac{4R_2'}{R_3'} \frac{R_{p1} + R_8}{R_{p1} + R_8} (R_5)C$$

### 3. 方波、三角波理想输出波形



### 4. 正弦波信号产生电路设计

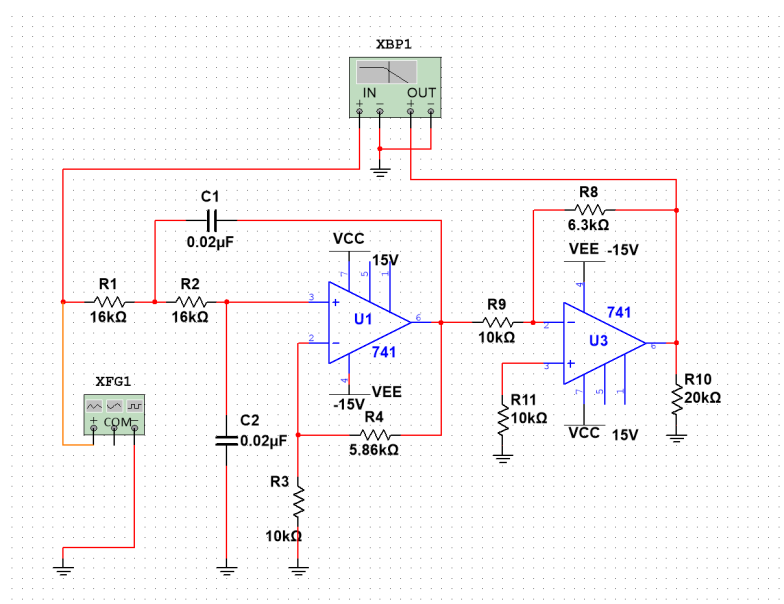
三角波输入  $\rightarrow$  有源低通滤波器  $\rightarrow$  输出正弦信号

常用的方法有滤波法、运算法和折现法，本实验采用滤波法实现。

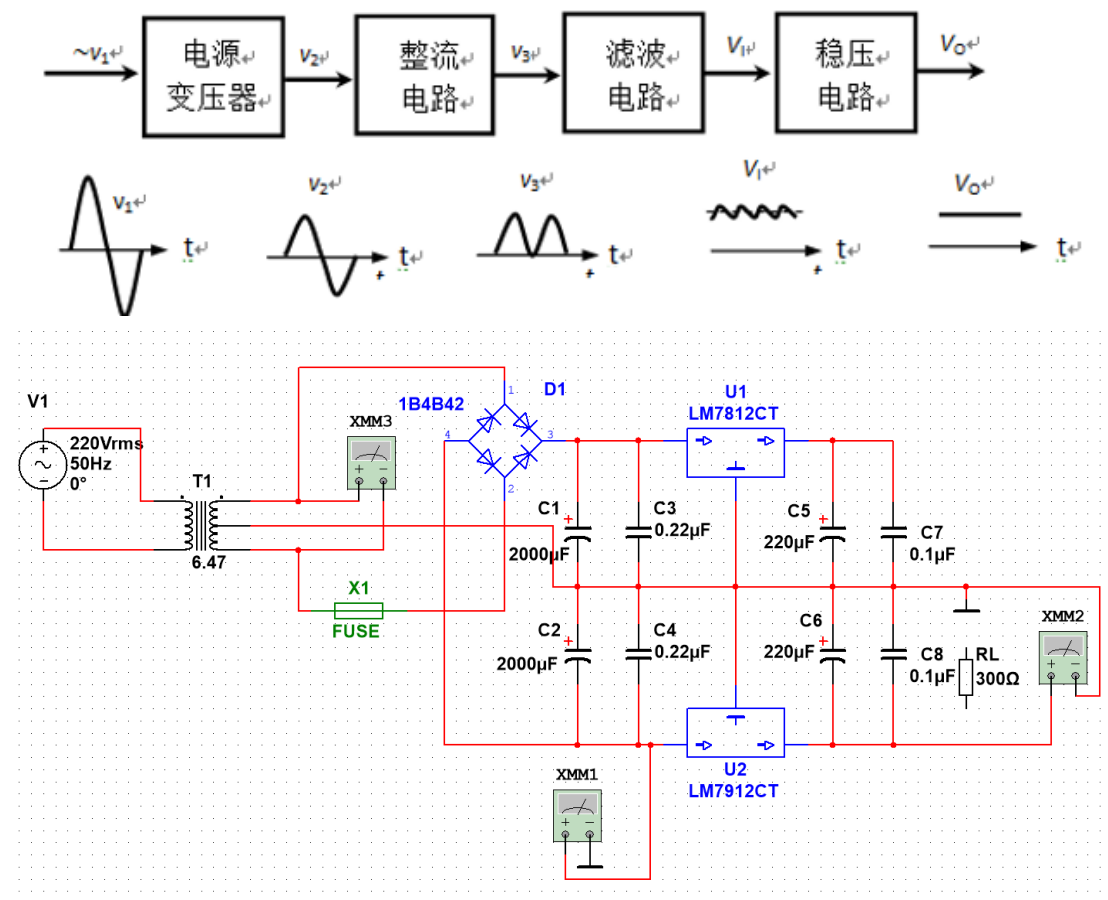
傅里叶级数展开：
$$v_{o2} = \frac{8}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t - \frac{1}{7^2} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

若三角波的频率变化范围不大，则可以用低通滤波器滤除高次谐波保留基波，即可得到正弦波，且与三角波间具有固定的幅值关系。

### 5. 有源低通滤波器设计



## 6. 三端集成稳压器组成的直流稳压电源设计



## 7. 直流稳压电源的主要性能指标

(a) 输出电压额定值  $V_O$

在所规定的条件下和误差允许的范围内应达到的输出稳压值。

(b) 稳压系数  $\gamma = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I / V_I} \bigg|_{\Delta I_O=0} = \frac{(V'_O - V''_O) / V_O}{(V'_I - V''_I) / V_I} \bigg|_{\Delta I_O=0}$

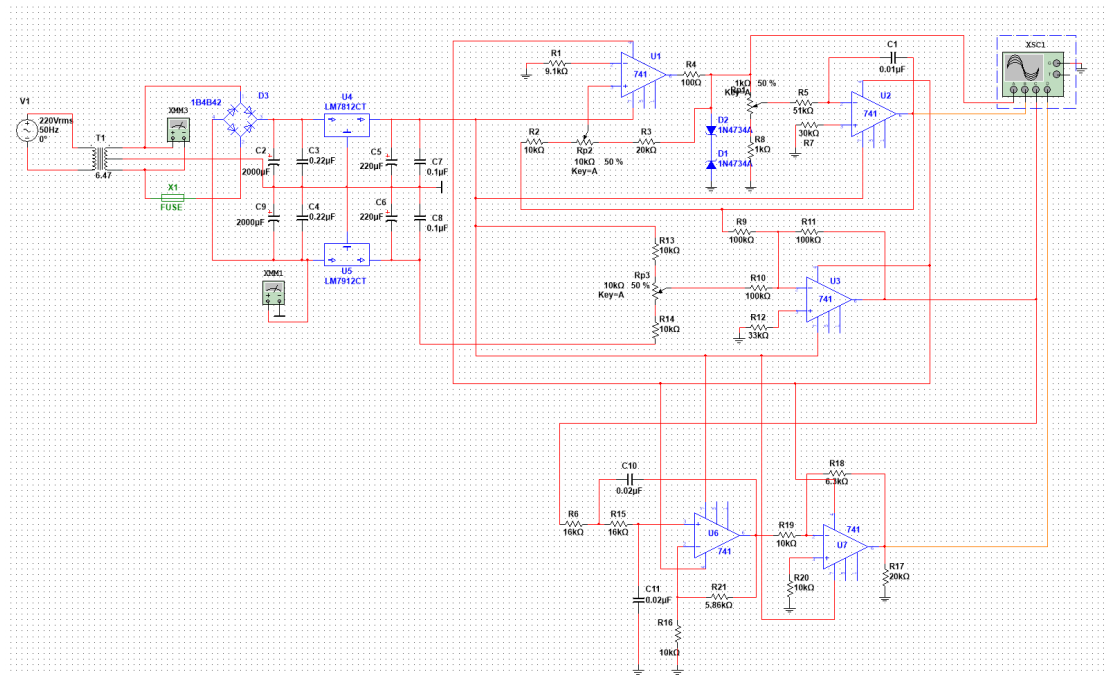
(c) 输出电阻:  $R_o = \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} \bigg|_{\Delta V_I=0, \Delta T=0}$

(d) 温度系数  $S_T$

(e) 输出纹波电压

(f) 最大输出电流  $I_{Omax}$

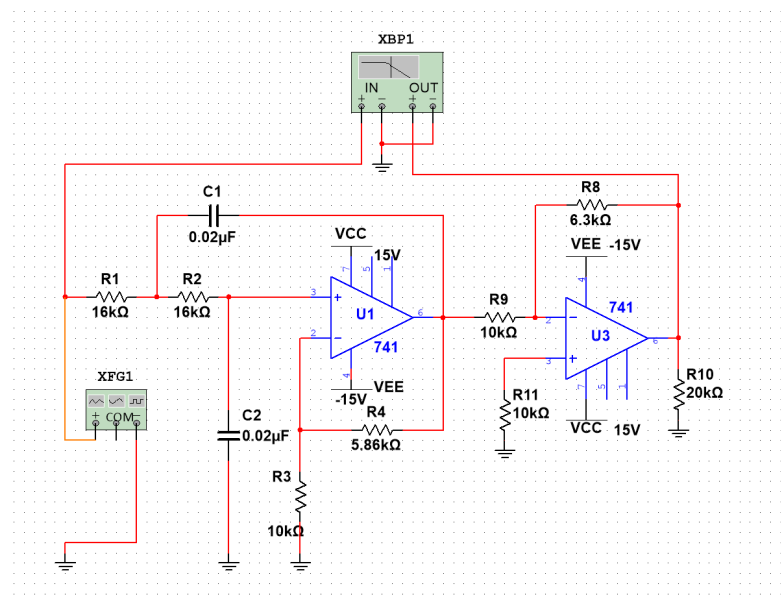
## 8.总电路原理图

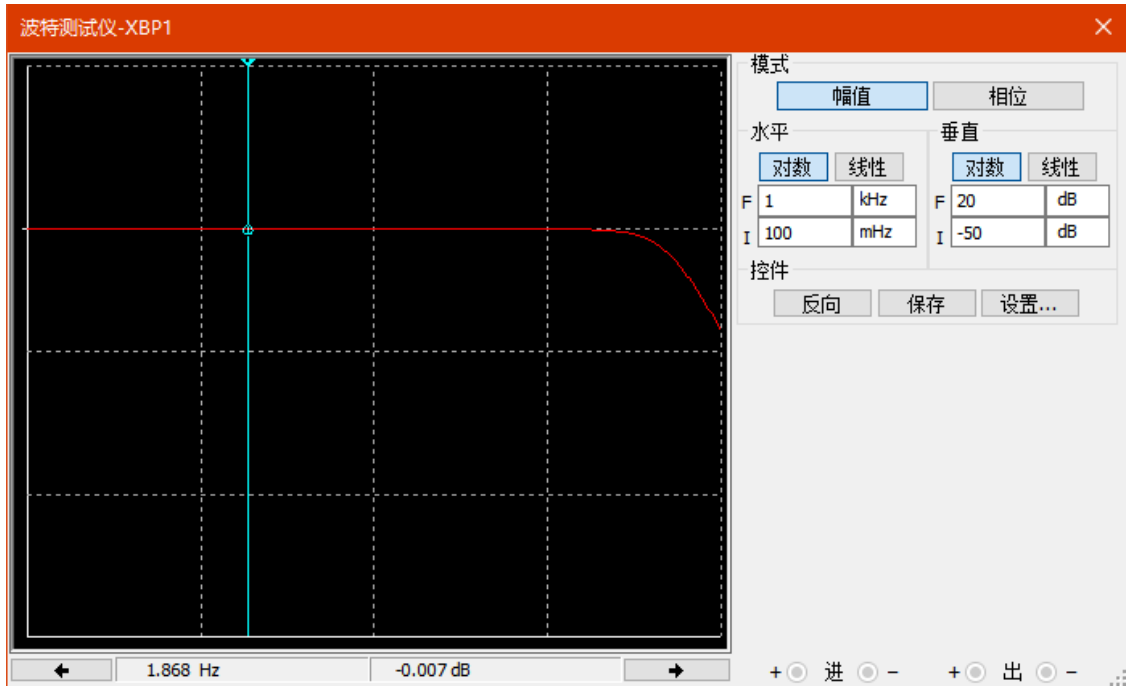


## 四、电路仿真的结果及问题分析

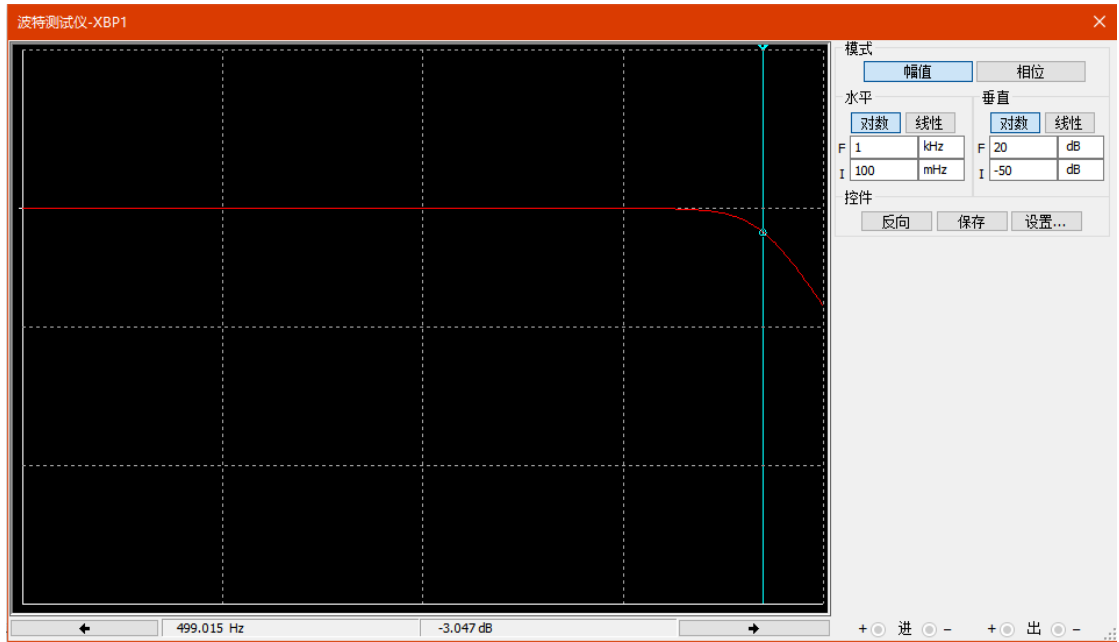
### 4.1 仿真数据和波形图记录（包括仿真电路图、相应表格、波形，及说明）

#### （1）有源低通滤波单元电路的 Multisim 仿真实验





通带增益约为 1



截止频率约为 500Hz

测试项目	测试条件	实际测量值	理论计算值
通带电压增益	通频带内的 $A_v$	0.999	1
截止频率	$A_{vM}$ 下降 3dB 时对应的频率	499.0Hz	500Hz
$A_v$ 衰减斜率	dB/十倍频程	-40	-40



## (2) 波形产生电路的 Multisim 仿真实验

	实际测量值		理论计算值	
	最大值	最小值	最大值	最小值
$v_{o2}$ 的幅值调节范围	6.268V	2.165V	6.2V	2.07V
$v_{o3}$ 周期调节范围	4.228ms	0.768ms	4.05ms	0.68ms
$v_{o3}$ 的直流偏移量调节范围	4.78V	-7.72V	4V	-4V
$v_{o4}$ 的周期值调节范围	4.118ms	0.704ms	4.08ms	0.68ms

改变  $R_{p2}$  可以改变三角波的输出幅值

$$V_{o2}(\max) = V_{T+(\max)} = \frac{R'_{2(\max)}}{R'_{3(\min)}} V_z = \frac{10k + 10k}{20k} \times (5.6 + 0.6) = 6.2V$$

$$V_{o2}(\min) = V_{T+(\min)} = \frac{R'_{2(\min)}}{R'_{3(\max)}} V_z = \frac{10k}{10k + 20k} \times (5.6 + 0.6) = 2.07V$$

调节  $R_{p1}$ 、 $R_{p2}$  可改变三角波的周期（正弦波的周期调节情况需考虑滤波器截止频率的限制，但在允许输出波形幅值见效的情况下，可得到与三角波相同的频率范围）

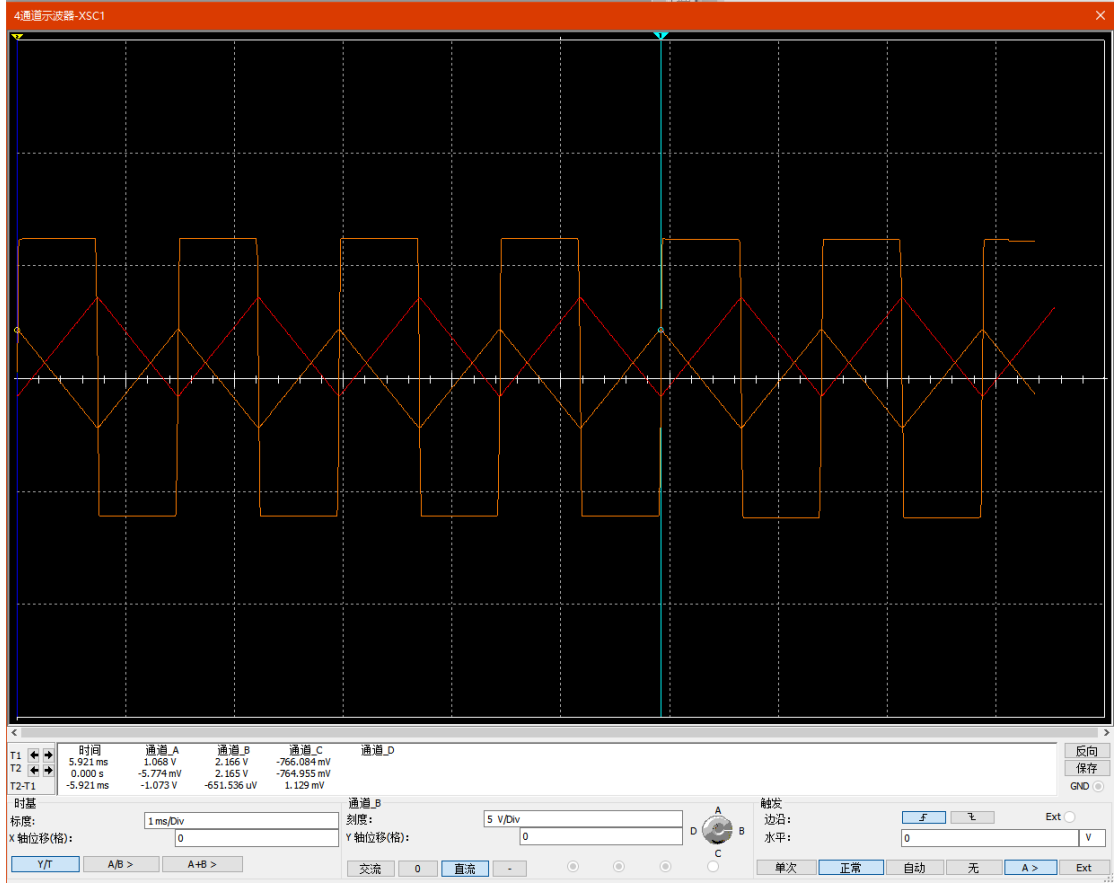
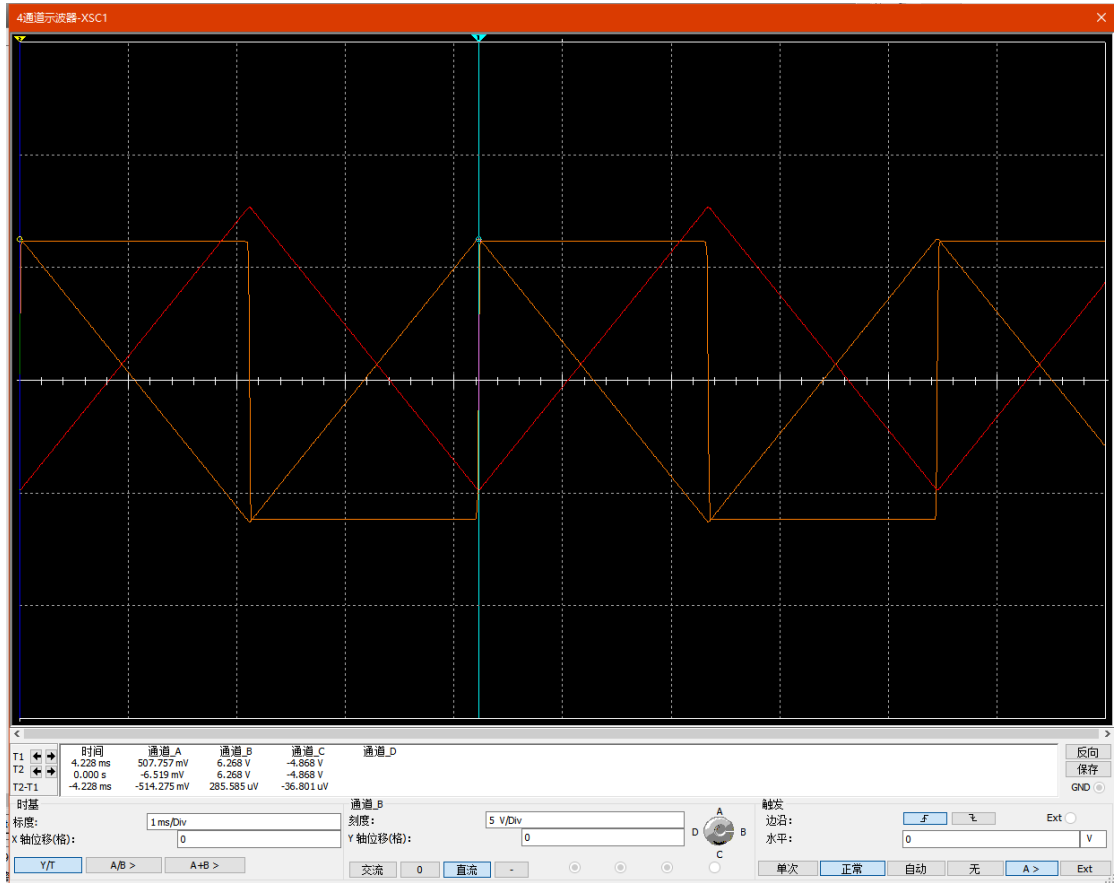
$$T_{\max} = \frac{4R'_{2(\max)}}{R'_{3(\min)}} \frac{R_{p1} + R_8}{R'_{p1(\min)} + R_8} R_5 C = \frac{4 \times (10 + 10)}{20} \frac{1 + 1}{0 + 1} \times (51 \times 10^3) \times (0.01 \times 10^{-6}) = 4.08ms$$

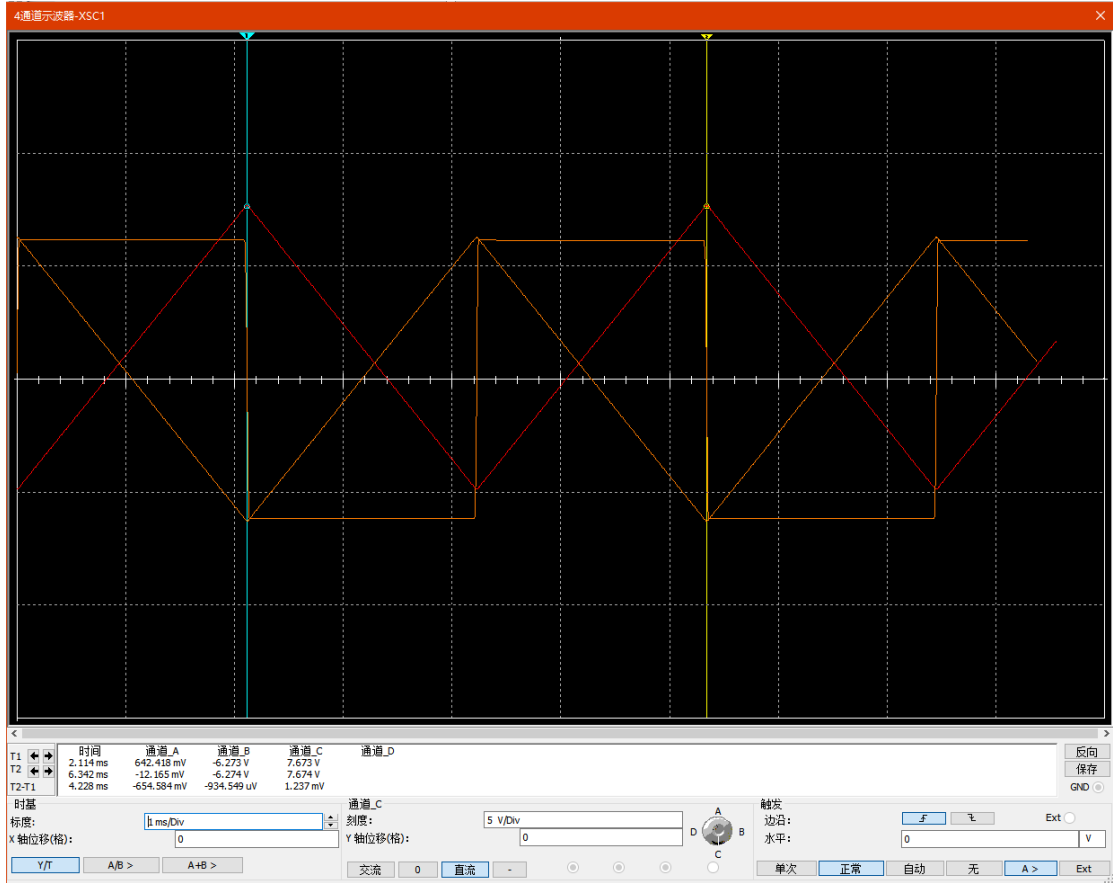
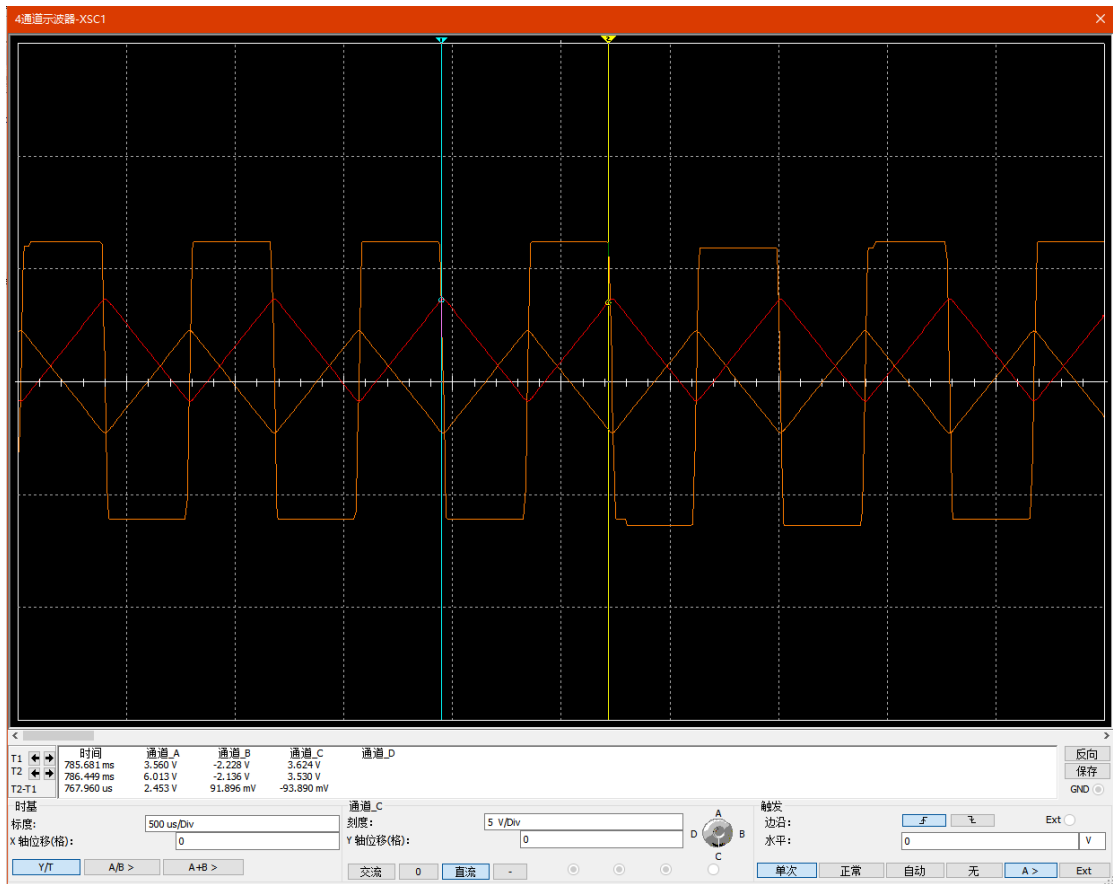
$$T_{\min} = \frac{4R'_{2(\min)}}{R'_{3(\max)}} \frac{R_{p1} + R_8}{R'_{p1(\max)} + R_8} R_5 C = \frac{4 \times 10}{20 + 10} \frac{1 + 1}{1 + 1} \times (51 \times 10^3) \times (0.01 \times 10^{-6}) = 0.68ms$$

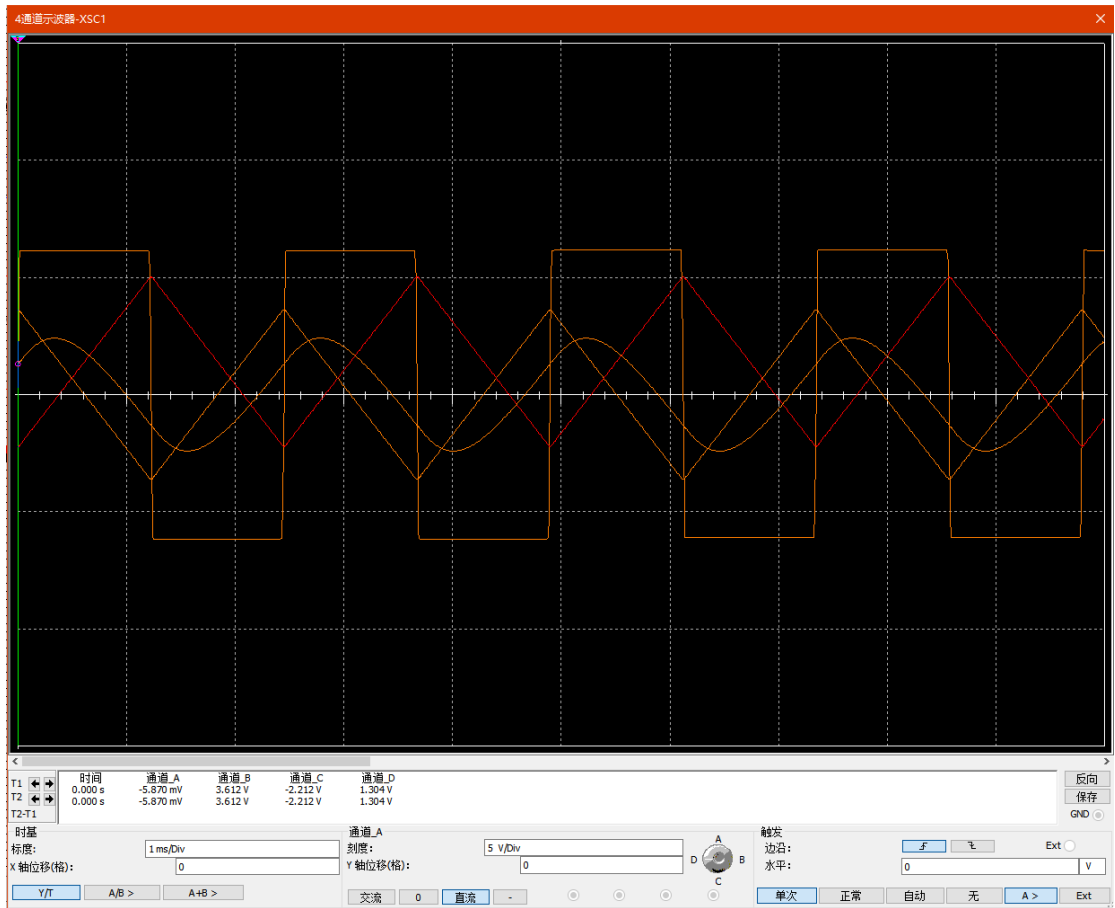
调节  $R_{p3}$  可改变三角波的直流偏移量

$$V_{(\max)} = \frac{R_{13} + R'_{p3(\max)}}{R_{13} + R_{p3} + R_{14}} [V_{cc} + (-V_{cc})] + (-V_{cc}) = \frac{10k + 10k}{10k + 10k + 10k} \times [12 - (-12)] + (-12) = 4V$$

$$V_{(\min)} = \frac{R_{13} + R'_{p3(\min)}}{R_{13} + R_{p3} + R_{14}} [V_{cc} + (-V_{cc})] + (-V_{cc}) = \frac{10k + 10k}{10k + 10k + 10k} \times [12 - (-12)] + (-12) = -4V$$







(3) 12V 稳压直流电源仿真实验

(a) +12V 直流稳压电源指标测试

测试条件		实际测量值		测量计算值		
a、b	$R_L$	$I_{o1}(\text{mA})$	$V_{o1}(\text{V})$	$\Delta V_{o1}$	$\Delta I_{o1}$	$R_{o1}(\Omega)$
端电压	$R_L$ 不接 (开路)	$I_{o1c}=0$	$V_{o1c}=12.569$	0.697V	39.572mA	17.6
	$R_L=300\Omega$	$I_{o1}=39.572$	$V_{o1}=11.872$			

(b) 测量+12V 直流稳压电源的稳压系数 $\gamma$

在有  $300\Omega$  负载情况下模拟电网 10%的波动

测试条件		实际测量值			测量计算值
a、b 端电压	$R_L$	$V_2(V)$	$V_{II}(V)$	$V_{OI}(V)$	$\gamma$
$15.3 \times 2V$	300 $\Omega$	30.6	$V_{II} = 20.421$	$V'_{OI} = 11.869$	0.002
$17 \times 2V$		34	$V_{II} = 22.821$	$V_{OI} = 11.872$	
$18.7 \times 2V$		37.4	$V''_{II} = 25.228$	$V''_{OI} = 11.874$	

$$\text{稳压系数 } \gamma = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I / V_I} \bigg|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}} = \frac{\left( V'_O - V''_O \right) / V_O}{\left( V'_I - V''_I \right) / V_I} \bigg|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

(c) -12 V 直流稳压电源指标测试

测试条件		实际测量值		测量计算值		
a、b 端电压	$R_L$	$I_{O2}(mA)$	$V_{O2}(V)$	$\Delta V_{OI}$	$\Delta I_{OI}$	$R_{OI}(\Omega)$
$\sim 17 \times 2V$	$R_L$ 不接 (开路)	$I_{OIC} = 0$	$V_{OIC} = -12.606$	0.689V	39.724mA	17.3
	$R_L = 300\Omega$	$I_{O2} = -39.742$	$V_{O2} = -11.917$			

(d) 测量-12V 直流稳压电源的稳压系数  $\gamma$

在有  $300\Omega$  负载情况下模拟电网 10% 的波动

测试条件		实际测量值			测量计算值
a、b 端电压	$R_L$	$V_2(V)$	$V_{12}(V)$	$V_{O2}(V)$	$\gamma$
$15.3 \times 2V$	300	30.6	$V_{12} = -20.348$	$V'_{O2} = -11.909$	0.006
$17 \times 2V$	$\Omega$	34	$V_{12} = -22.756$	$V_{O2} = -11.917$	
$18.7 \times 2V$		37.4	$V''_{12} = -25.156$	$V''_{O2} = -11.924$	

#### 4.2 仿真中发现问题及分析

- 1) 在 12V 直流稳压电源电路中，使用 7912 三端集成稳压器，与 7812 相比，负载阻值需要取稍微大一些，在 Multisim12.0 可能会出现 simulation error，但使用更高版本的如 Multisim14.0 不会出错；
- 2) 变压器副边需要中心抽头接地，否则电源无法正常工作；
- 3) 用仿真得到的 12 伏稳压电源实际上并不能得到刚好的 12V，在调节三角波幅度和周期的时候会导致三角波部分失真；
- 4) 在仿真时做了用一个二阶低通滤波器和一个一阶低通滤波器级联而成的三阶低通滤波器，但是发现在仿真中由于输出阻抗的原因，截止频率与计算结果有着较大的差异，并且难以在实际电路中实现，升高阶次虽然可以增大滤波器的性能，但是相应的设计成本也会大大提高；
- 5) 仿真初期是分多个模块进行仿真的，但是再将各个模块组合之后

需要的工作区大小也想要变大，可在编辑→属性→工作区中修改大小；

6) 仿真成功，结束后退出 Multisim，再次打开进入设计可能会出现仿真出错，可以重新创建一个设计，将所有元器件复制粘贴到新的设计中，再次仿真即可；

7) 不能再仿真过程中修改电路元器件的各个参数以及更改元器件的联系那，一定要在结束之后修改，修改之后观测波形需要重新进行仿真。

## 五、电路的安装、调试和测试

### 5.1 所用仪器调备

序号	名称	型号	数量	备注
1	模拟电子技术试验箱	THM-7 型	1	
2	双踪示波器	Tektronix TBS 1102B-EDU	1	
3	万用电表	KEITHLEY 2110 5 1/2	1	
4	函数信号发生器	Tektronix AFG1022	1	
6	装有 Multisim 软件的 计算机		1	
7	主要元器件	uA741	5	
		7812 和 7912	各 1	

## 5.2 安装调试步骤

(1) 用实际元器件搭建+12V 和-12V 直流稳压电源。测试输出电压及相关参数；

- +12V 直流稳压电源的输出电压额定值  $V_o$  及输出电阻  $R_o$  的测量；
- 测量+12V 直流稳压电源的稳压系数  $\gamma$ ；

(2) 用实际元器件搭建和调测有源低通滤波器；

• 连接好线后，输入端接 AFG1022 函数信号发生器，由 AFG1022 函数信号发生器输出的正弦波作为滤波器的输入，滤波器的输出接示波器，测量其幅频响应、截止频率和通带增益。

(3) 用实际元器件搭建和调试信号发生器，观测波形，并测试相关参数。

• 搭建并调测下图所示的信号发生器，要求用上述已调测好的直流稳压电源给信号发生器供电（若上一步的直流稳压电源没有调试成功，则可以暂时先用实验箱中现有的直流稳压电源供电）。

## 5.3 数据和波形记录与处理

(1) 12V 稳压直流电源实际电路测试

(a) +12V 直流稳压电源指标测试

测试条件		实际测量值		测量计算值		
a、b	$R_L$	$I_{o1}(\text{mA})$	$V_{o1}(\text{V})$	$\Delta V_{o1}$	$\Delta I_{o1}$	$R_{o1}(\Omega)$
端						
电						
压						
~17	$R_L$ 不接	$I_{o1c}=0$	$V_{o1c}=12.074$	0.645V	36.043mA	17.9
×	(开路)					
2V	$R_L=300\Omega$	$I_{o1}=36.043$	$V_{o1}=11.429$			



(b) 测量+12V 直流稳压电源的稳压系数 $\gamma$

在有  $300\Omega$  负载情况下模拟电网 10%的波动

测试条件		实际测量值			测量计算值
a、b 端电压	$R_L$	$V_2(V)$	$V_{II}(V)$	$V_{OI}(V)$	$\gamma$
$15.3 \times 2V$	300 $\Omega$	31.042	$V_{II} = 18.973$	$V'_{OI} = 11.305$	0.135
$17 \times 2V$		34.333	$V_{II} = 20.081$	$V_{OI} = 11.429$	
$18.7 \times 2V$		38.203	$V''_{II} = 23.494$	$V''_{OI} = 11.652$	

(c) -12 V 直流稳压电源指标测试

测试条件		实际测量值		测量计算值		
a、b 端电压	$R_L$	$I_{O2}(mA)$	$V_{O2}(V)$	$\Delta V_{OI}$	$\Delta I_{OI}$	$R_{OI}(\Omega)$
$\sim 17 \times 2V$	$R_L$ 不接 (开路)	$I_{OIC} = 0$	$V_{OIC} = -11.996$	0.728V	38.162mA	19.1
	$R_L = 300\Omega$	$I_{O2} = -38.162$	$V_{O2} = -11.268$			

(d) 测量-12V 直流稳压电源的稳压系数 $\gamma$

在有  $300\Omega$  负载情况下模拟电网 10%的波动

测试条件	实际测量值	测量计算值
------	-------	-------

a、b 端电压	$R_L$	$V_2(V)$	$V_{I2}(V)$	$V_{O2}(V)$	$\gamma$
$15.3 \times 2V$	300	31.051	$V_{I2} = -19.284$	$V_{O2}' = -11.011$	0.039
$17 \times 2V$	$\Omega$	34.369	$V_{I2} = -20.883$	$V_{O2} = -11.268$	
$18.7 \times 2V$		38.213	$V_{I2}'' = -23.680$	$V_{O2}'' = -11.924$	

## (2) 实际元器件搭建和调测有源低通滤波器

截止频率约为 500Hz

测试项目	测试条件	实际测量值	理论计算值
通带电压增益	通频带内的 $A_v$	1	1
截止频率	$A_{vM}$ 下降 3dB 时对应的频率	485.0Hz	500Hz
$A_v$ 衰减斜率	dB/十倍频程	-40	-40

## (3) 实际元器件搭建和调试信号发生器

	实际测量值		理论计算值	
	最大值	最小值	最大值	最小值
$v_{o2}$ 的幅值调节范围	6.135V	2.171V	6.2V	2.07V
$v_{o3}$ 周期调节范围	4.331ms	0.644ms	4.05ms	0.68ms
$v_{o3}$ 的直流偏移量调节范围	4.65V	-6.26V	4V	-4V
$v_{o4}$ 的周期值调节范围	4.211ms	0.53ms	4.08ms	0.68ms

参数	实际测量值
$V_{o1}$ 的频率	505.3Hz
$V_{o1}$ 的峰峰值	13V
$V_{o1}$ 的上升沿时间	19.93us
$V_{o1}$ 的下降沿时间	21.20us

#### 5.4 安装调试过程中出现的问题及解决办法

(1) 第一次安装调试中将所有模块一次性组合完成，但是都不能输出波形，但是检查起来有比较困难，所有在安装调试中需要先分模块各自调试输出好波形然后一级一级相连，保证一旦出现调试错误，可以比较快速地找到问题出在哪里；

(2) 在分模块测试滤波器单元的时，用信号发生器产生的信号输入，滤波器输出接示波器，发现示波器显示滤波器后产生的正弦信号波形不明显，仔细检查后发现是需要用信号发生器产生正弦信号输入滤波器；

(3) 在分模块测试滤波器单元时，一直不能产生稳定的波形，经过检查后是信号发生器的 On 没有打开；

(4) 在分模块测试各单元时，示波器的波形输出不稳定，抖动较大而且有干扰信号，经过检查发现是整个电路的电源没有打开，741 集成芯片没有通电。

## 六、 实验注意事项

1. 电路中各运放、芯片引脚正确连接,特别注意二极管的正负方向不能接反;
2. 运放的正负电源端不能接反;
3. 极性电容器不能接反 。

## 七、 意见和建议

实验中由于实验箱的限制,若要设计二阶或者三阶滤波器需要更多的 uA741 芯片,但是能放置芯片的位置不太够,需要将芯片插在面包板上再进行连接,希望可以更新实验仪器,可以对整个实验有一个更加深入的操作。