

# 东南大学电工电子实验中心

## 实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

### 第 1 次实验

实验名称： 运算放大器的基本应用

院（系）： 电子科学与工程学院

专 业： 电子科学与技术

姓 名： 孙寒石 学 号： 06219109

实 验 室： 104 实验组别：

同组人员：  实验时间： 2021 年 4 月 7 日

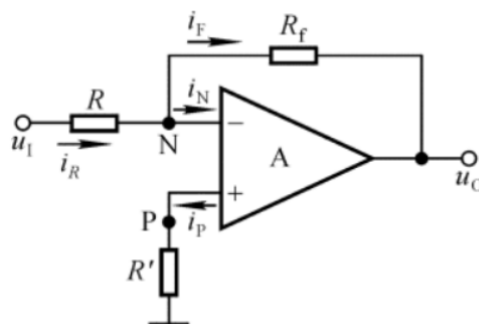
评定成绩：  审阅教师：

## 一、实验目的

1. 熟练掌握反相比例、同相比例、加法、减法等电路的设计方法；
2. 熟练掌握运算放大电路的故障检查和排除方法；
3. 了解运算放大器的主要直流参数（输入失调电压、输入偏置电流、输入失调电流、温度漂移、共模抑制比，开环差模电压增益、差模输入电阻、输出电阻等）、交流参数（增益带宽积、转换速率等）和极限参数（最大差模输入电压、最大共模输入电压、最大输出电流、最大电源电压等）的基本概念。
4. 熟练掌握运算放大电路的增益、幅频特性、传输特性曲线的测量方法。

## 二、实验原理（主要写用到的的理论知识点，不要长篇大论）

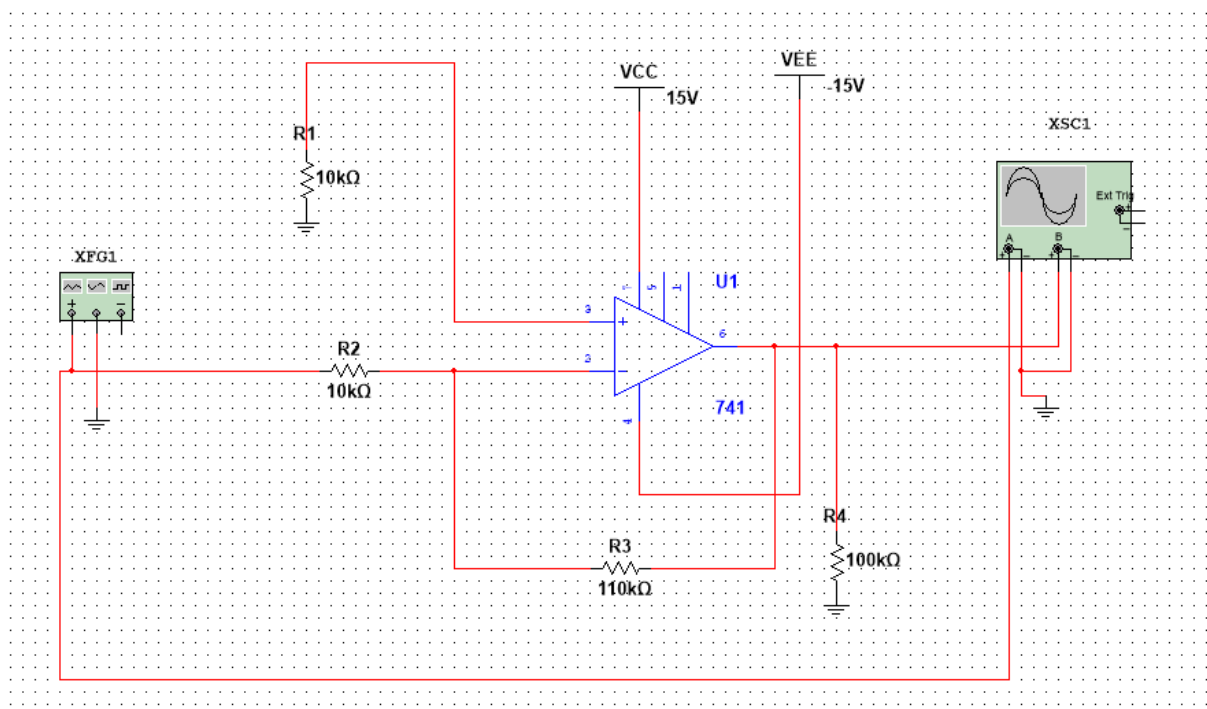
### 1. 反相比例放大电路



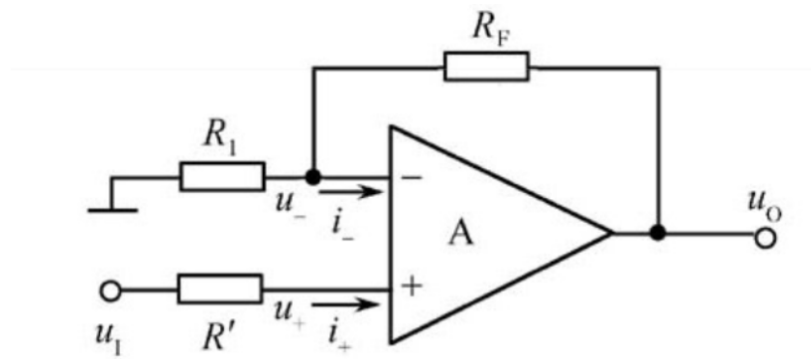
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i, \text{ 该电路的输入阻抗为 } R_1.$$

当  $R_1 = R_f$  时，该电路为倒向器。

- 优点：抗共模干扰能力强，共模信号几乎为0
- 低输入电阻



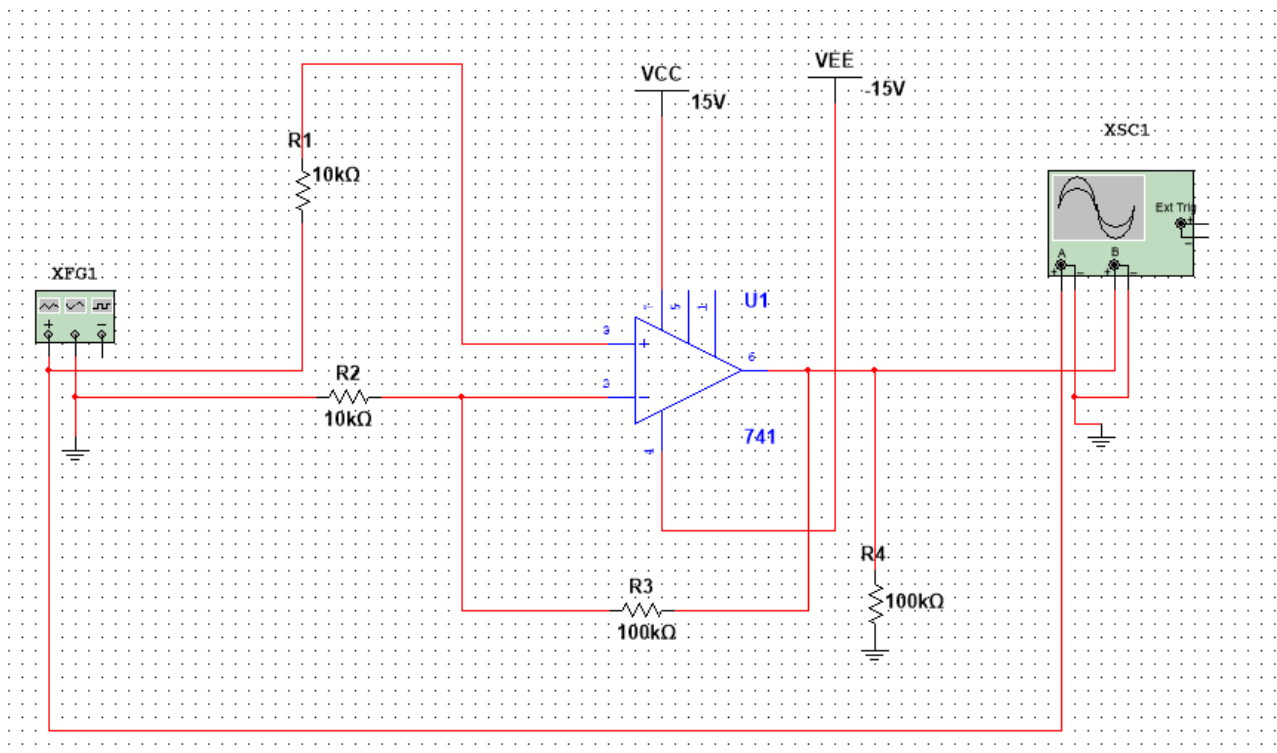
## 2. 同相比例放大电路



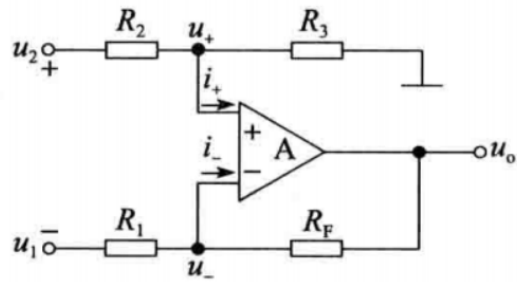
$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})u_i$ , 该电路的输入阻抗为 $\infty$ 。

当 $R_1 = \infty$  或者 $R_f = 0$ 时, 该电路为电压跟随器。

- 优点: 输入电阻无穷大
- 存在较大共模信号, 应该选用 $K_{CMR}$ 高的运放



### 3. 减法电路



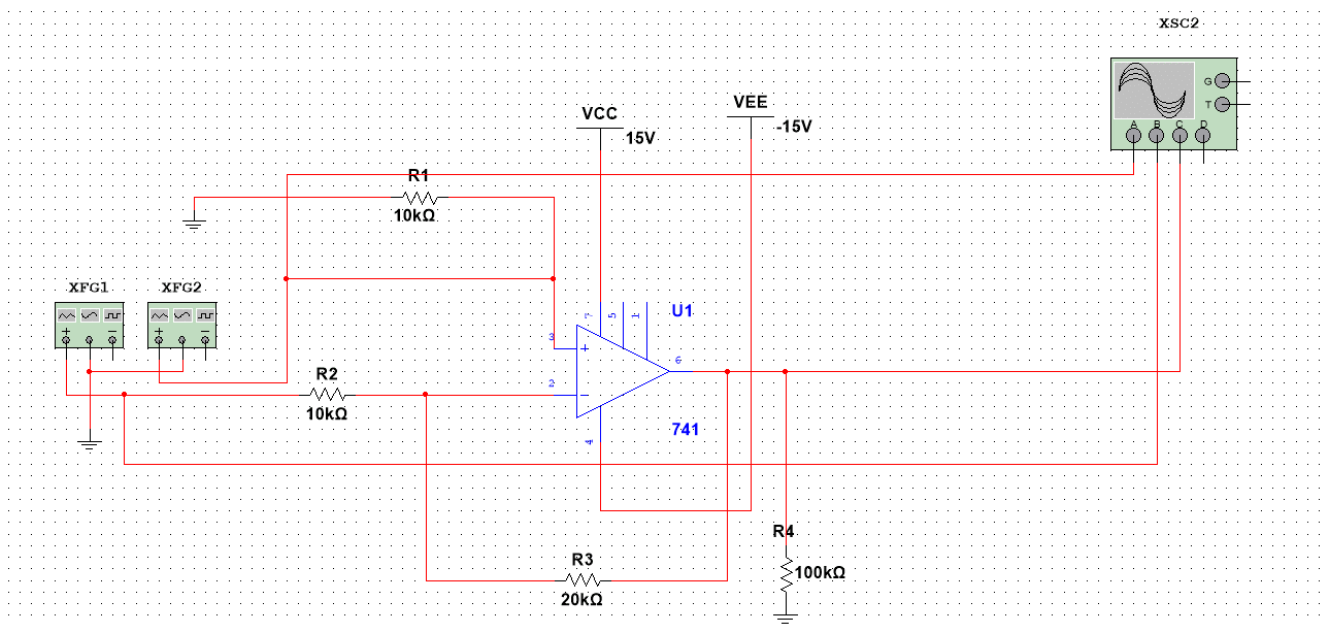
利用叠加定理

$$u_{o1} = -\frac{R_F}{R_1} u_1,$$

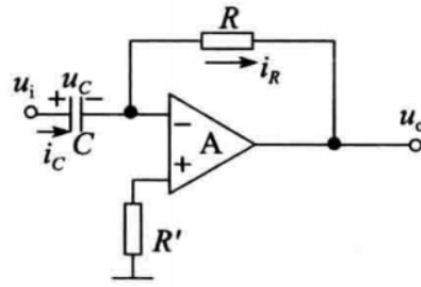
$$u_{o2} = (1 + \frac{R_F}{R_1}) u_+ = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_2,$$

$$\text{若满足 } \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_F}{R_1}, \text{ 则 } u_o = \frac{R_F}{R_1} (u_2 - u_1)$$

- 共模信号较大



#### 4. 微分电路

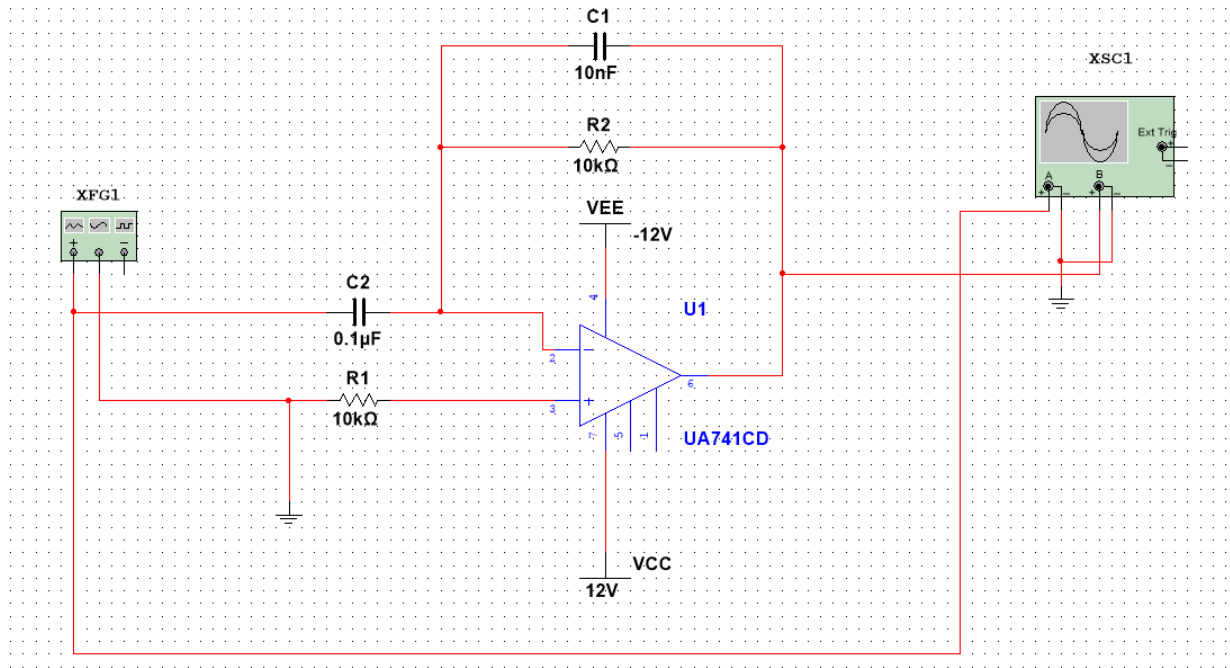


$$i_C = C \frac{du_C}{dt},$$

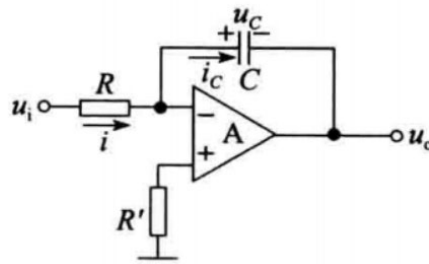
$$u_o = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{du_i}{dt}$$

若输入为正弦波, 则输出变为:  $u_o = -RC \frac{du_i}{dt} = -\omega RC U_{im} \cos \omega t$

- 该电路对高频噪声特别敏感, 设计时要注意
- 输入为正弦波时, 输出相位会变化, 输出的相位会滞后 $90^\circ$



## 5. 积分电路

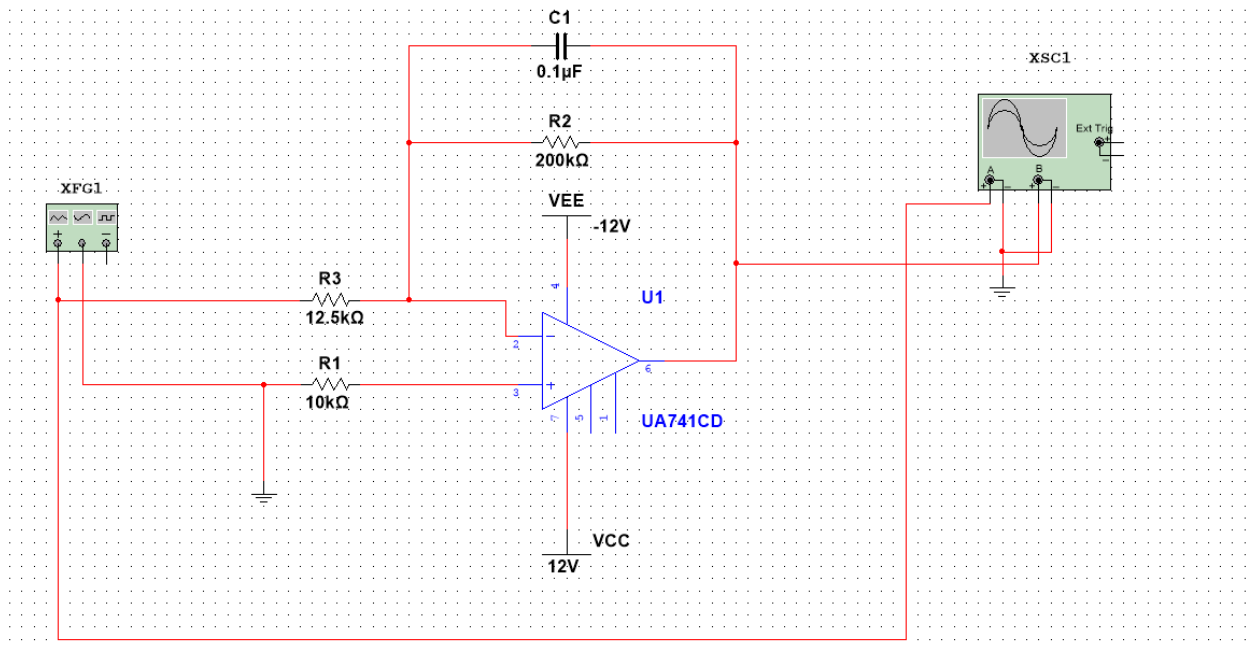


$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt,$$

$$i_c = i = \frac{u_i}{R},$$

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{C} \int i_c dt = -\frac{1}{C} \int \frac{u_i}{R} dt,$$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$



三、 预习思考：

查阅  $\mu A741$ 运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义。

参数名称		参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
直流参数	输入失调电压 $U_{I0}$	典型值 $1\sim 10mV$	实际运放中，当输入电压为零时，输出端有一个偏离零的直流电 $U_{os}$ ，为了使其为零，需要在输入端加一个直流电压，即为输入失调电压。
	输入偏置电流 $I_{IB}$	$80\sim 500nA$	运放输入级差分对管的基极电流 $I_{B1}$ ， $I_{B2}$ ， $I_{B1} = UA/R1$ ， $I_{B2} = UB/R3$
	输入失调电流 $I_{IO}$	$20\sim 200nA$	当运放输出电压为零时，俩个输入端静态电流的差值 $I_{IO} = I_{B1} - I_{B2}$
	失调电压温漂 $\alpha U_{I0}$	$20uV/^\circ C$	在工作温度范围内，失调电压随温度变化的比例
	共模抑制比 $K_{CMR}$	$70\sim 90dB$	差模电压增益 $A_{od}$ 与共模电压增益 $A_{oc}$ 之比 $K_{CMR}(dB) = 20 \lg(A_{od}/A_{oc})$
	开环差模电压增益 $A_{v0}$	$10^6$	无反馈时，运放输出电压除以同向端和反相端之间的电压差
	输出电压摆幅 $U_{om}$	$12\sim 14V$	当电压为输出信号时，外部量变化引起的的输出电压变化
	差模输入电阻 $R_{id}$	$0.3\sim 2M\Omega$	输入差模信号时，运放的输出电阻
	输出电阻 $R_o$	$75\Omega$	运放输出电压和输出电流之比，即从输出端看运放的等效电阻
交流参数	增益带宽积 $G. BW$	$0.7\sim 1.6MHz$	增益和带宽之比
	转换速率 $S_R$	$0.5V/us$	当运放在闭环状态下，其输出端加上大信号（通常为阶跃信号）时，每 $1us$ 内输出电压变化的最大值。1

极限参数	最大差模输入电压 $U_{Ior}$	$\pm 15V$	同向反向端能承受的最大差模输入电压
	最大共模输入电压 $U_{Icr}$	$\pm 12 \sim \pm 13V$	运放能承受的最大共模输入电压范围
	最大输出电流 $I_{os}$	$25 \sim 40mA$	运放能输出的电流最大值
	最大电源电压 $U_{sr}$	$\pm 18V$	运放能承受的所加电源电压最大值

四、 实验内容

1. 实验内容一（见在线实验 1）：

反相输入比例运算电路各项参数测量实验（预习时，查阅  $\mu A741$  运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义）。

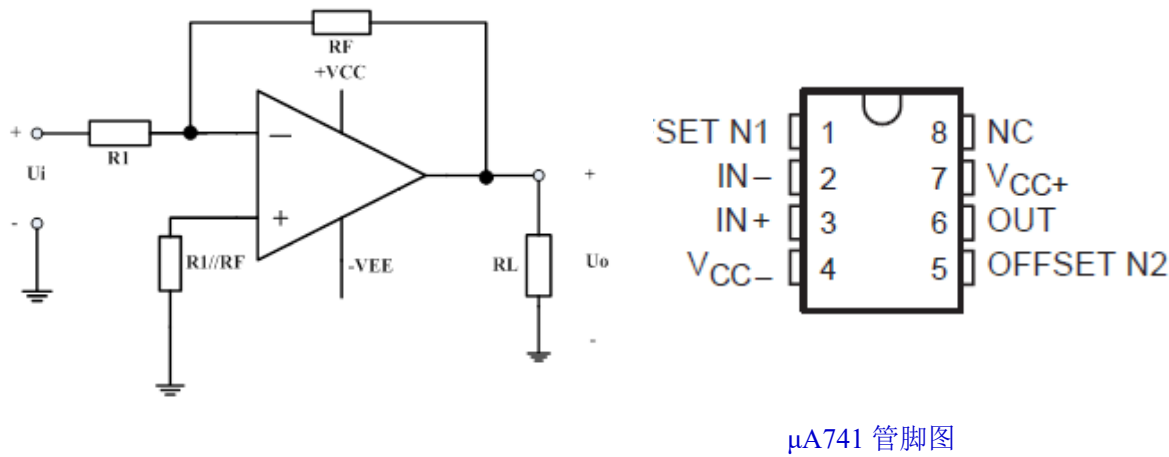


图 1.1 反相输入比例运算电路

(1) 直流特性测量：

直流特性测量记录表			
$U_i/V$	$U_o/V$	$A_u$	
		测量值	理论值
-2	14.82	-7.41	-10
-0.5	4.86	-9.72	-10
0.5	-4.58	-9.16	-10
2	-12.67	-6.335	-10

实验结果分析：

当输入信号为  $\pm 0.5V$  的电压时，电路能够输出输入信号 10 倍放大功能，当输入信号增大到其输出信号理论值超过电源电压时，电路不能实现正常的放大功能，运放的输出电压只能达到电源电压(此处为 15V)，实际上这种情况发生时，为了保护元件，输出电压往往比



电源电压低上 1-2V。 在本实验中，输入电压为 $\pm 2V$  时，理论输出电压为 $-20V$  或 $+20V$ ，超过了电源电压，实际输出为 $-12.67V$  和  $14.82V$ 。我们可以进一步观察数据发现，在输入电压的绝对值一定时，运放输出的正电压大于负电压，在输出电压接近电源电压时表现得更加明显，由于放大器及电路本身结构具有不对称性特征，所以我们这样的结果是意料之中过的。

(2) 交流特性测量：

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	$A_u$	误差
200 (206)	2040	图 1	-9. 90	1%
400	4040	图 2	-10. 1	1%
4000 (3960)	26400	图 3	-6. 6	33. 3%
2620	26400	图 5 (最大不失真)	-10. 08	0. 8%

实验结果分析：

对于不失真的情况，从波谷波峰来看，输出信号波峰对应于输入信号波谷，同样的，从输出信号波谷对应输入信号波峰我们可以发现，实现了反相的功能。同时由信号的峰峰值的大小情况来看，实现 $|A_u| = 10$ 的放大功能。失真时，波形发生畸变，如图 3。

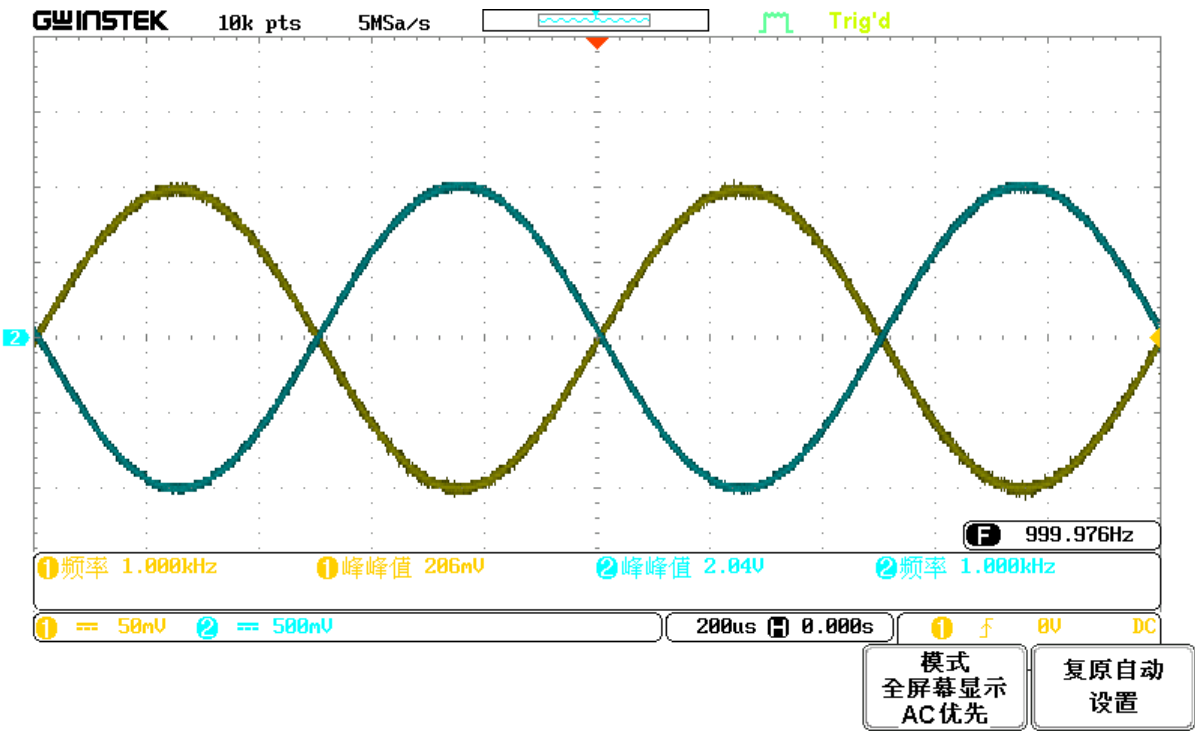


图 1

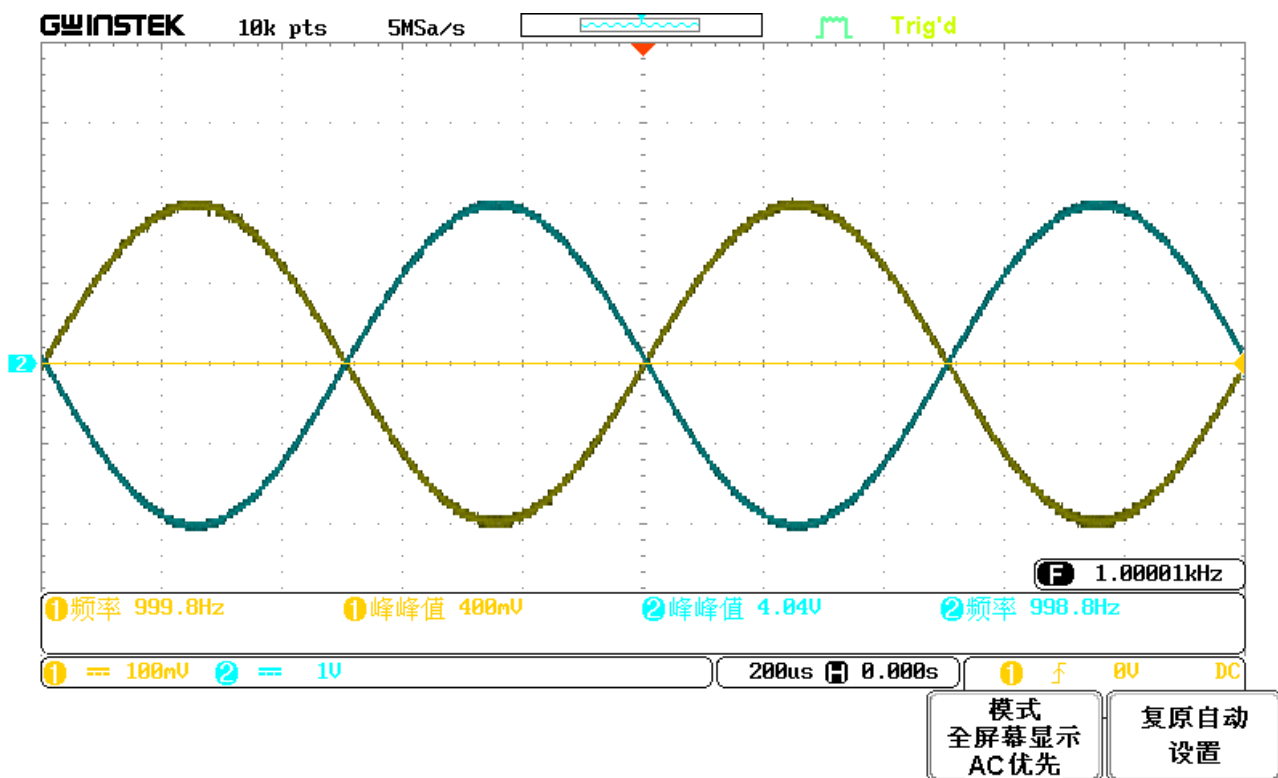


图 2

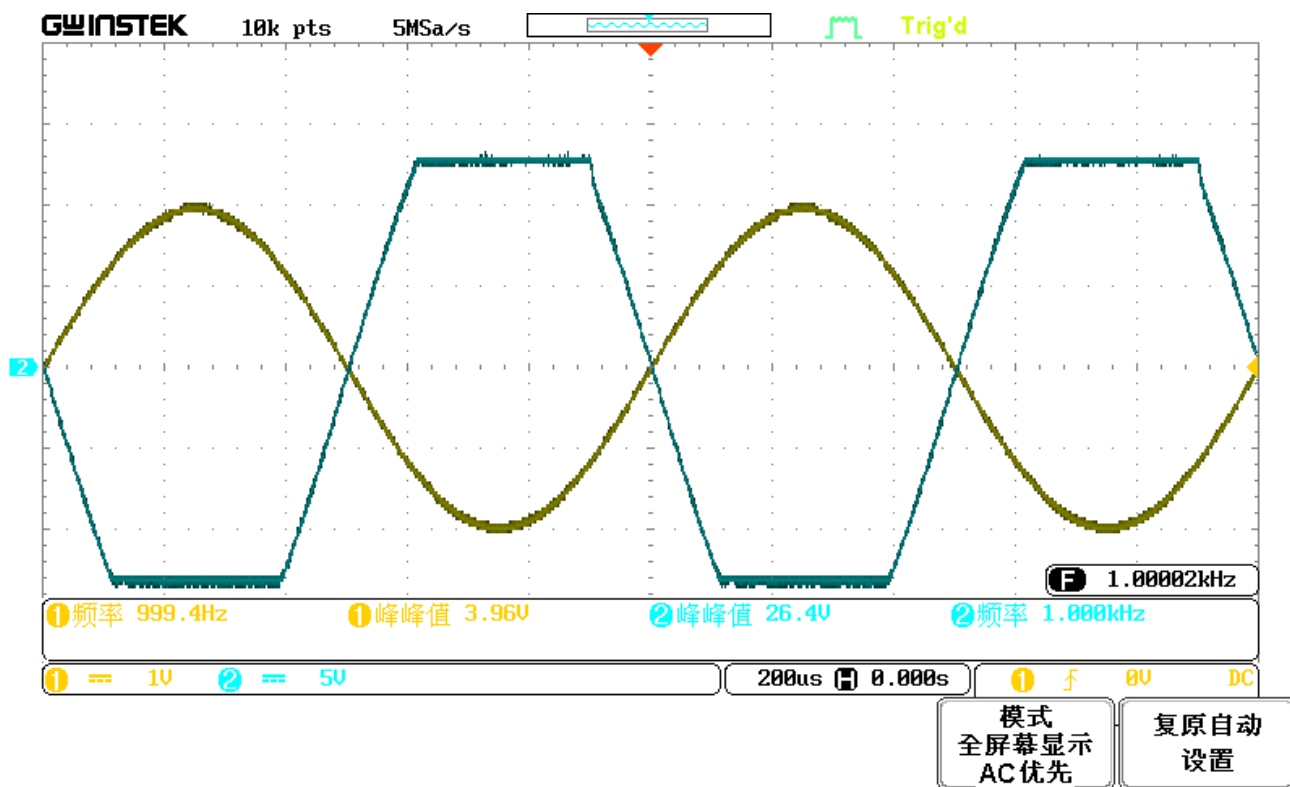


图 3

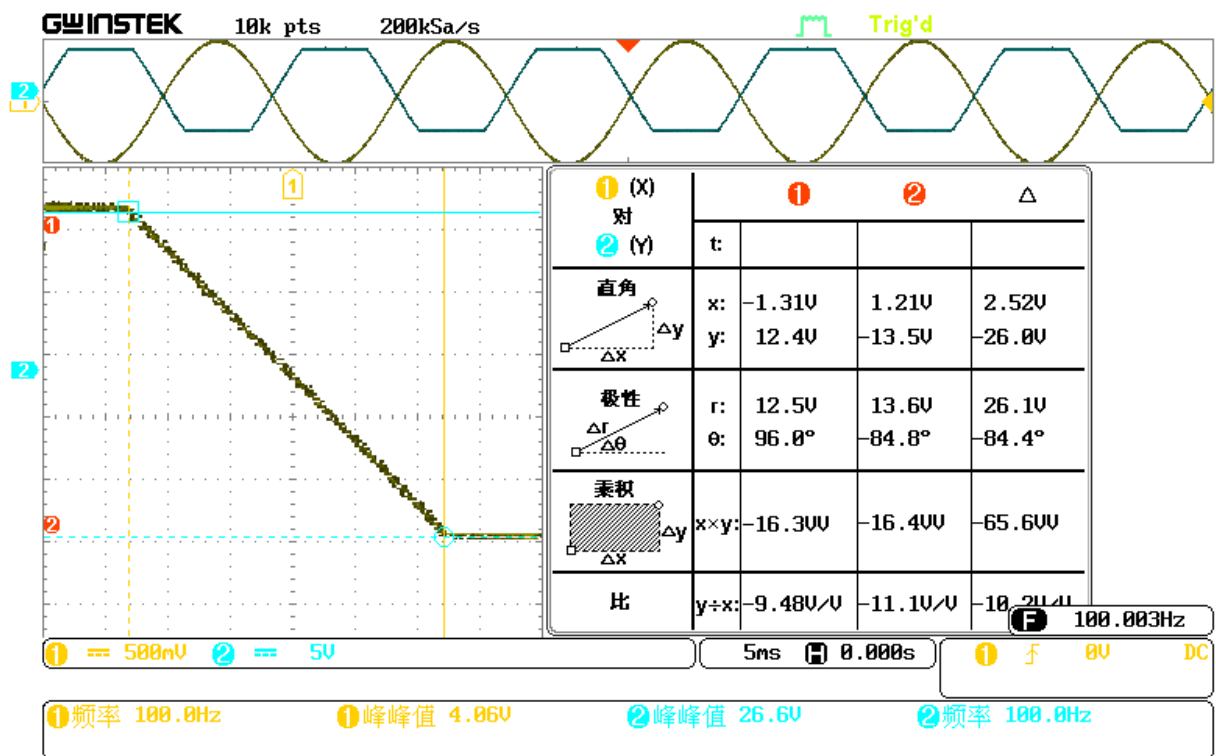


图 4

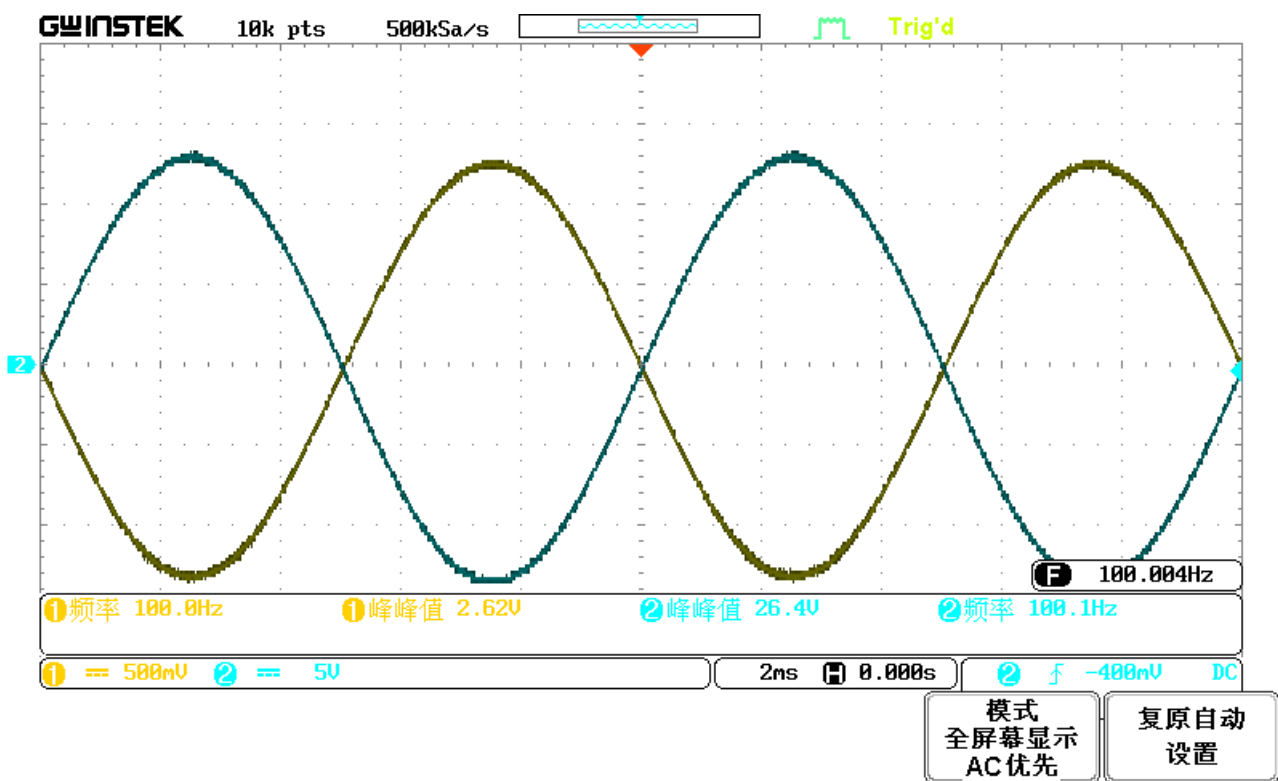


图 5

(3) 增益改变的测量:

增益改变的测量记录表						
$R_1$ K $\Omega$	$R_F$ K $\Omega$	$U_i$ mVpp	$U_o$ mVpp	$A_u$ 实验值	$A_u$ 理论值	误差
10	100	100	1040	-10.4	-10	4%
10	200	100	1960	-19.6	-20	2%
20	100	100	496	-4.96	-5	0.8%

(4) 运放特性测量——最大输出电压: 21.6V (峰峰值)

自拟表格测量此时的运放交流特性和最大输出电压:

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	$A_u$	误差
200 (204)	2060	图 6	-10.1	2%
400 (404)	4040	图 7	-10	0%
4000 (3960)	21600	图 8	-5.4	46%
1880	19000	图 10 (最大不失真)	-10.106	1.06%

实验结果分析:

当电源电压变为 $\pm 12V$ 时, 最大不失真输出电压峰峰值为 19V。失真时, 最大输出电压峰峰值为 21.6V。而当电源电压变为 $\pm 15V$ 时, 最大不失真电压峰峰值为 26.4V。失真时, 最大输出电压峰峰值为 26.4V。可以发现, 当电源电压减小时, 最大不失真电压和最大输出电压的峰峰值都会变小。

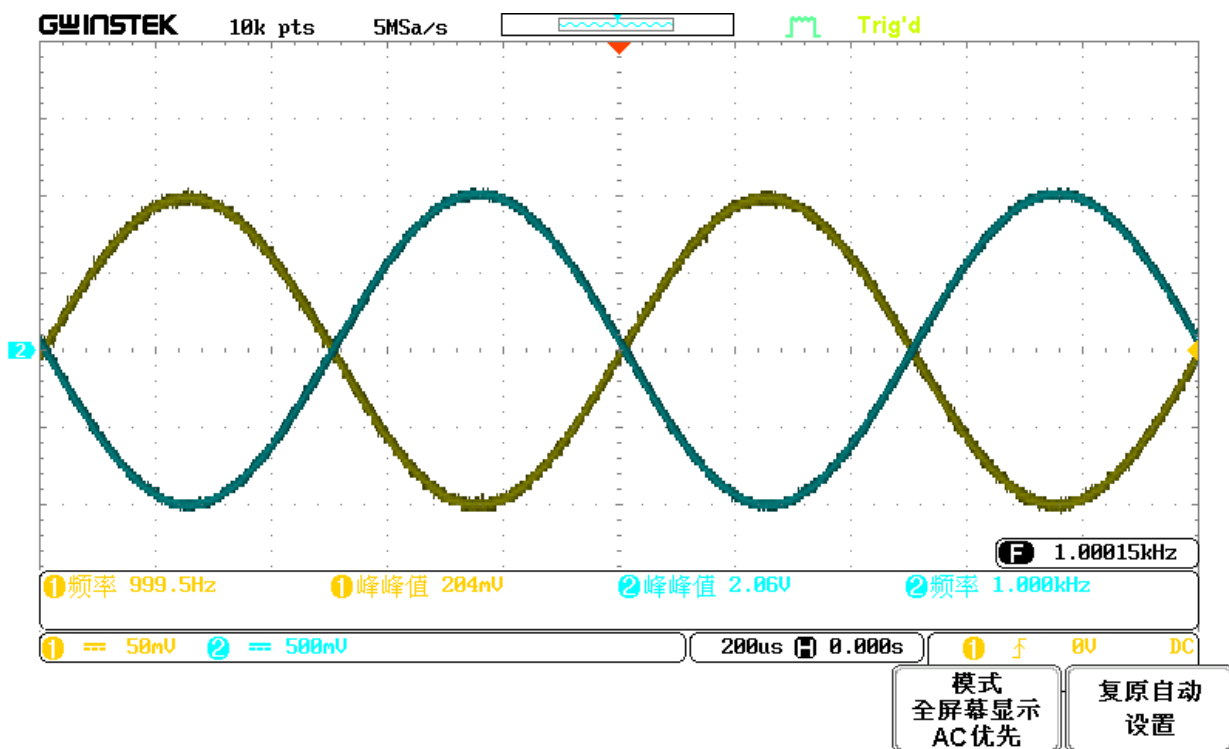


图 6

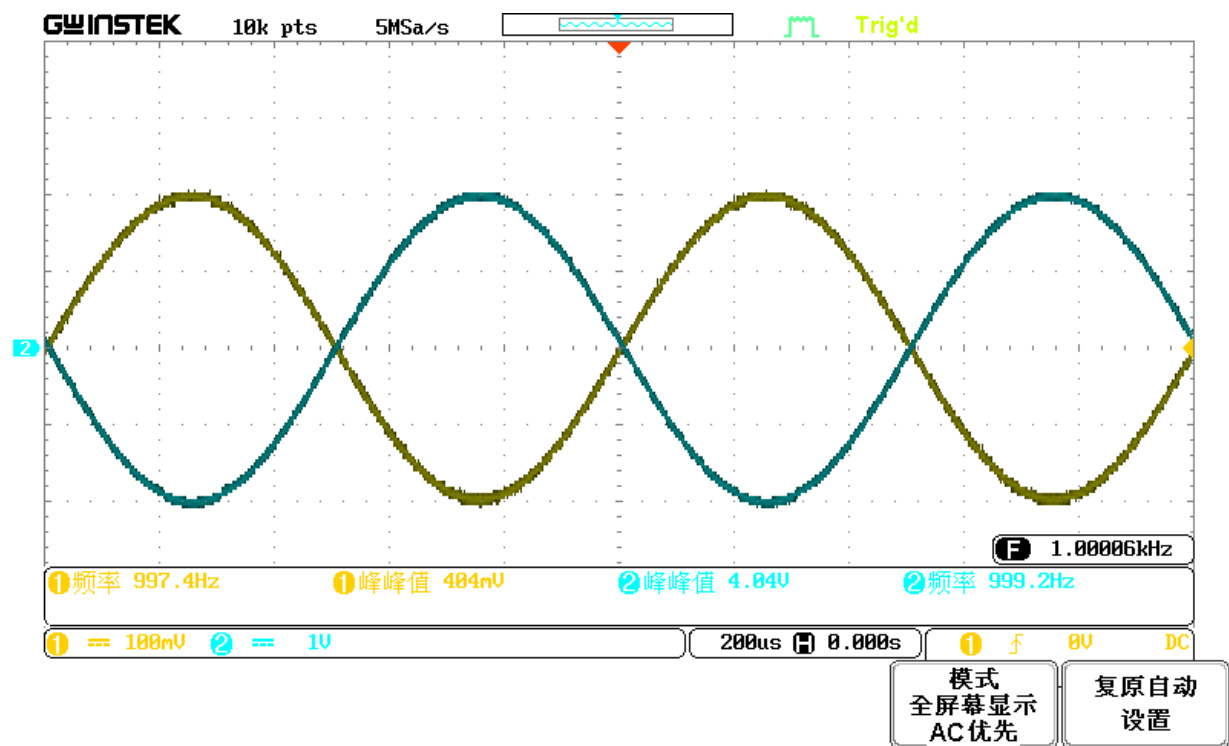


图 7

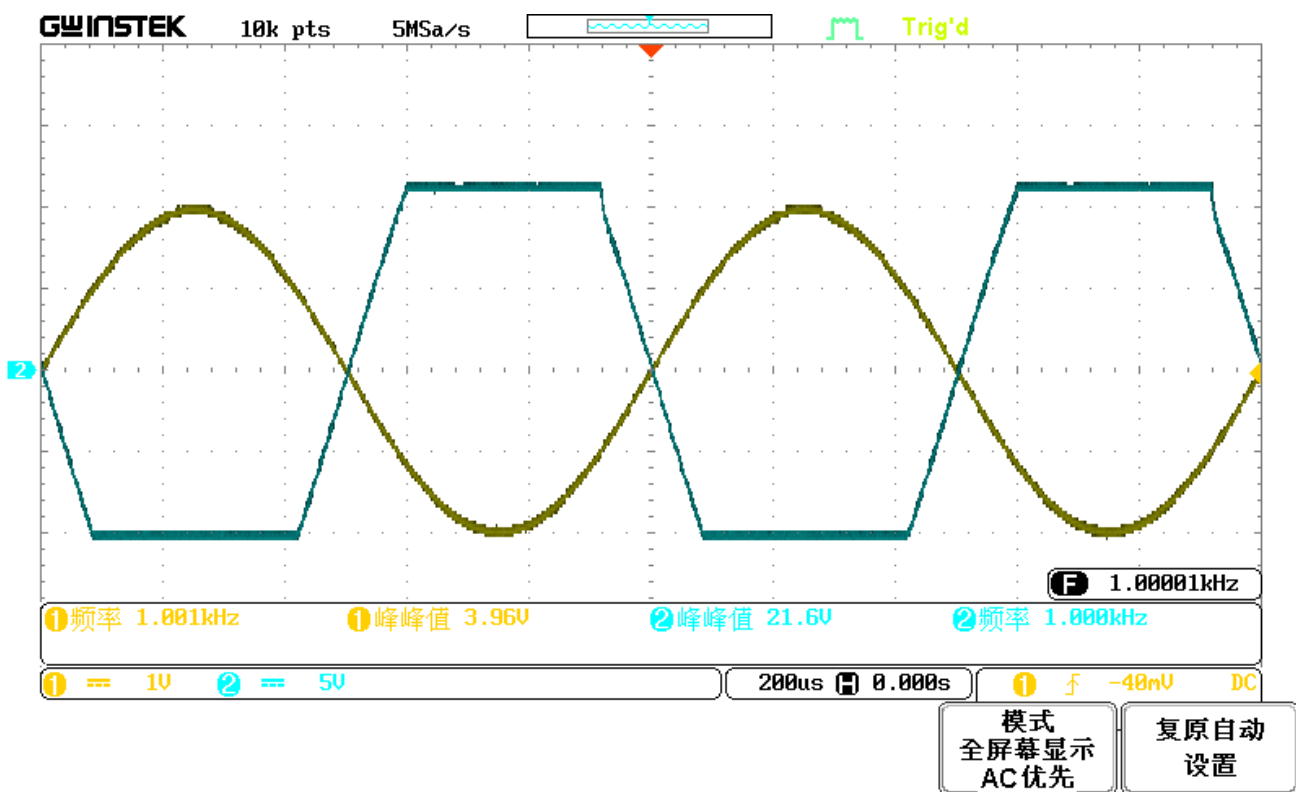


图 8

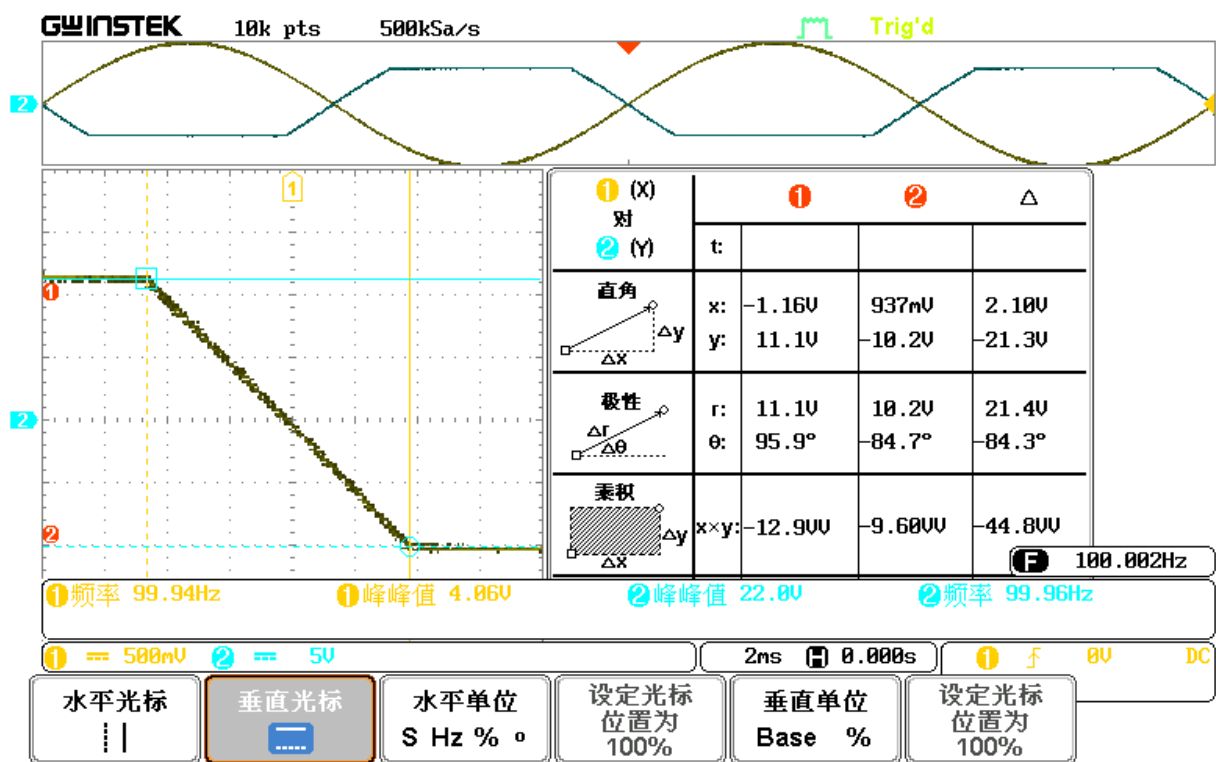


图 9

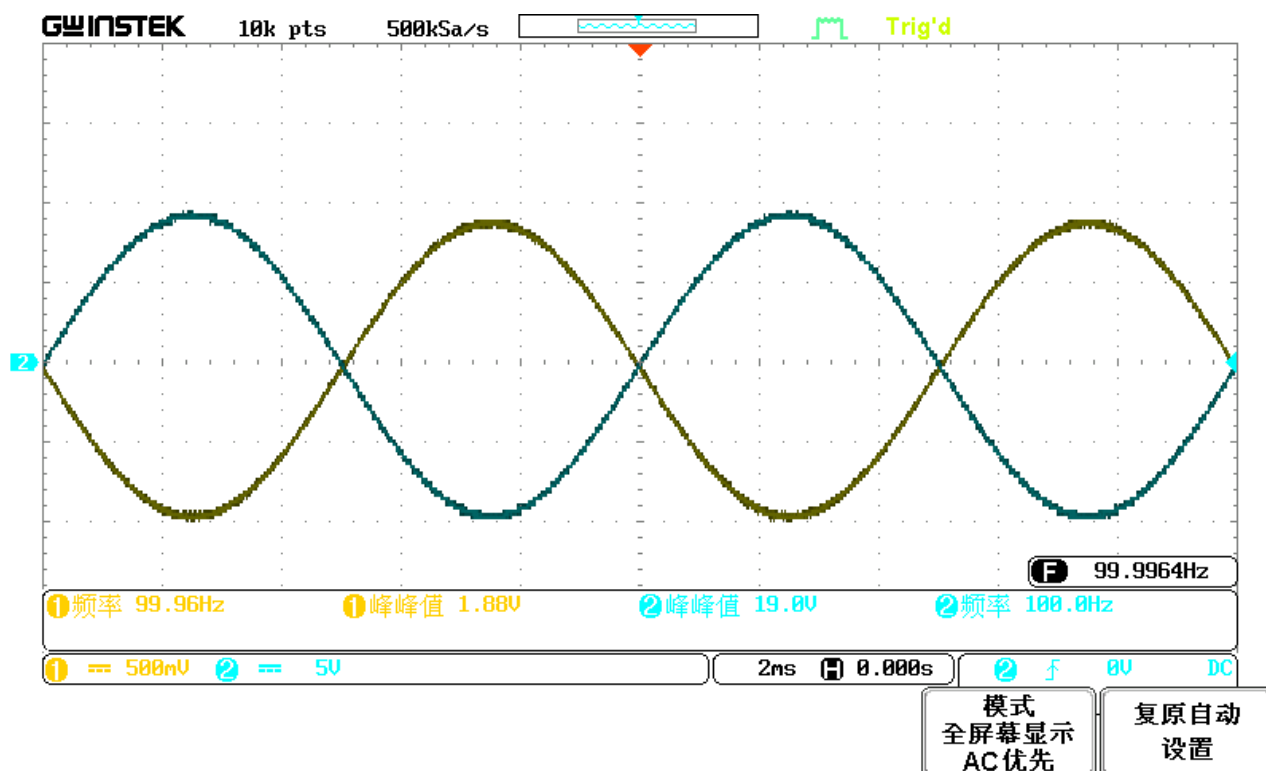
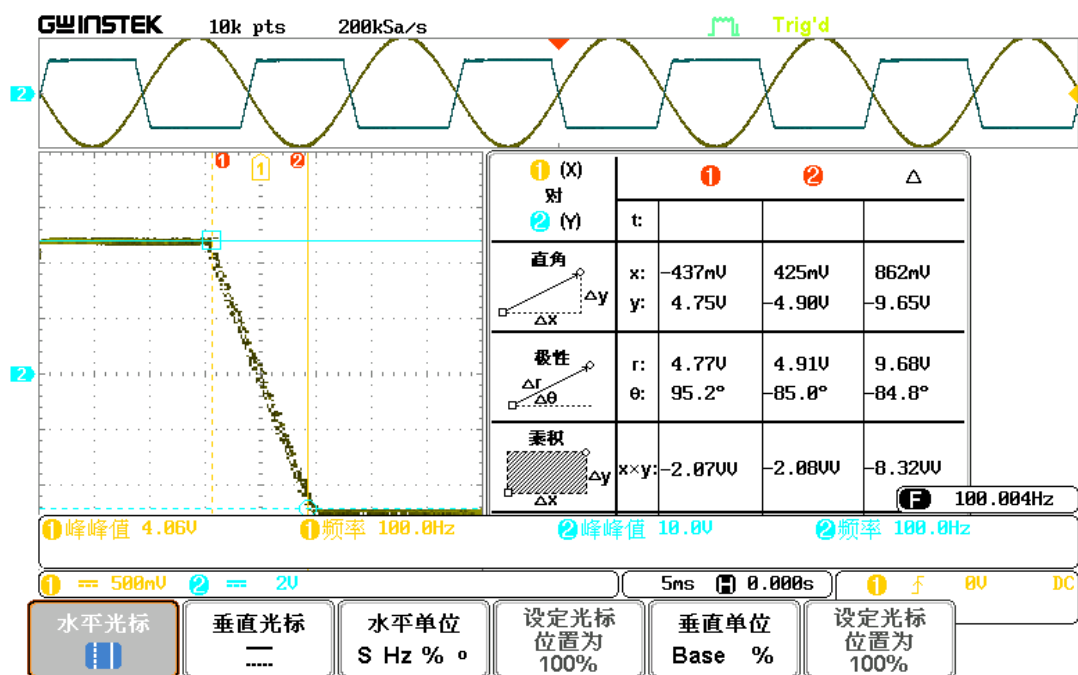


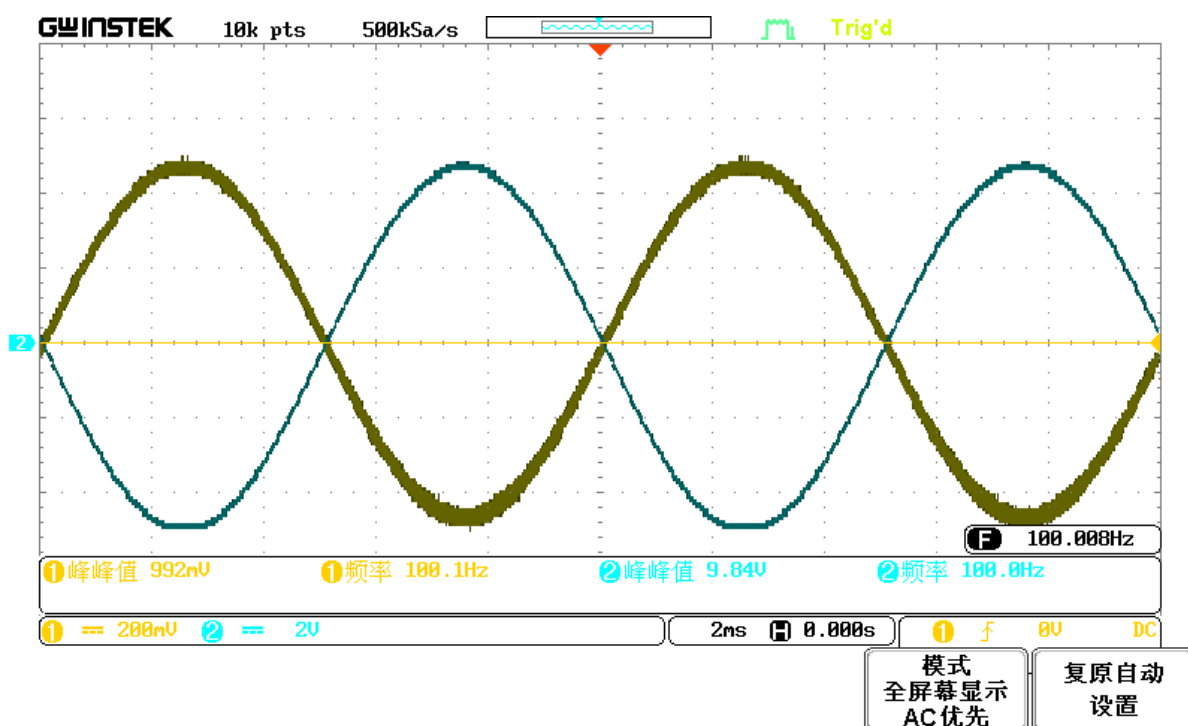
图 10

(5) 运放特性测量——最大输出电流：22.4mA

最大不失真输出电压：峰峰值为9.84V

实验结果分析：与  $R_L = 100k\Omega$  时相比，最大不失真输出电压要小很多，这是最大输出电流限制导致的。





- (6) 设计一个同相输入比例运算电路，要求其放大倍数为 11。完成同相比比例放大电路的设计及仿真。测量同相比比例放大电路的交、直流特性。测量运放的最大输出电压和最大输出电流。拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形。

答：

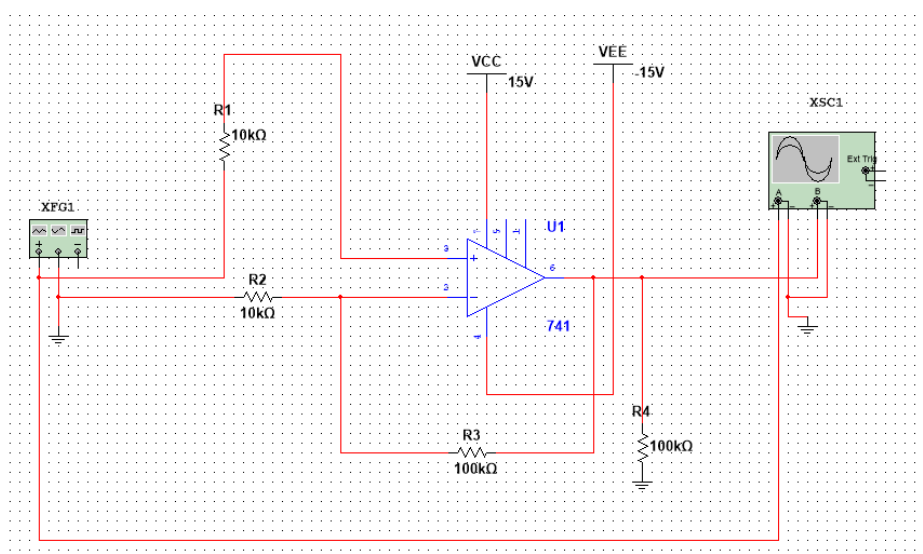
$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

要求放大倍数为 11，则

$$\frac{R_f}{R_1} = 10$$

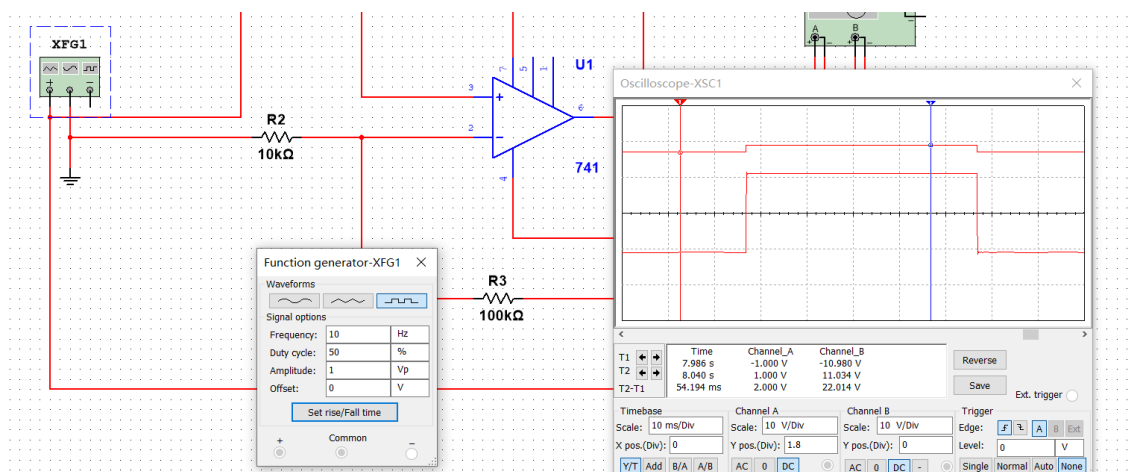
所以，取  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_f = 100k\Omega$ ，得到如下电路：

同相输入比例运算电路仿真图：





### 仿真示例：



仿真直流特性测量数据： $V_{cc} = 15V$

直流特性测量记录表			
$U_i/V$	$U_o/V$	$A_u$	
		测量值	理论值
-1	-10.982	10.982	11
1	11.341	11.341	11
0.5	5.530	11.060	11
2	14.118	7.059	11

仿真交流特性测量数据： $V_{cc} = 15V$

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	$A_u$	误差
200(199.868)	2222	图 11	11.1173	1.07%
400(396.912)	4390	图 12	11.0604	0.55%
600(599.338)	6618	图 13	11.0422	0.38%
800(799.972)	8824	图 14	11.0300	0.27%
8000(7996)	28236	图 15	3.5312	67.90%

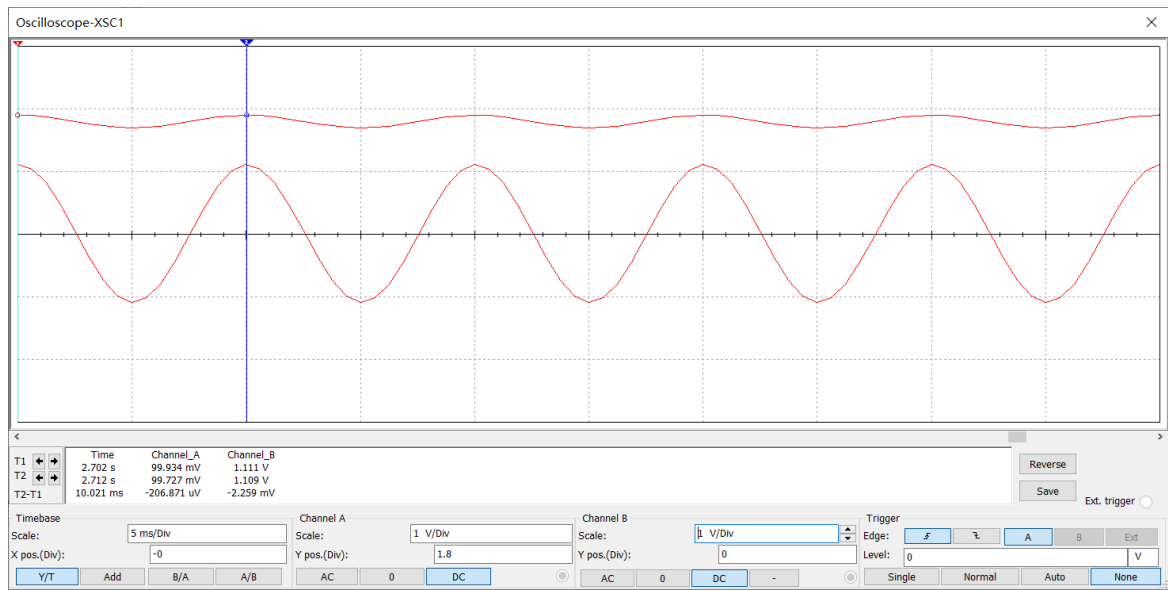


图 11

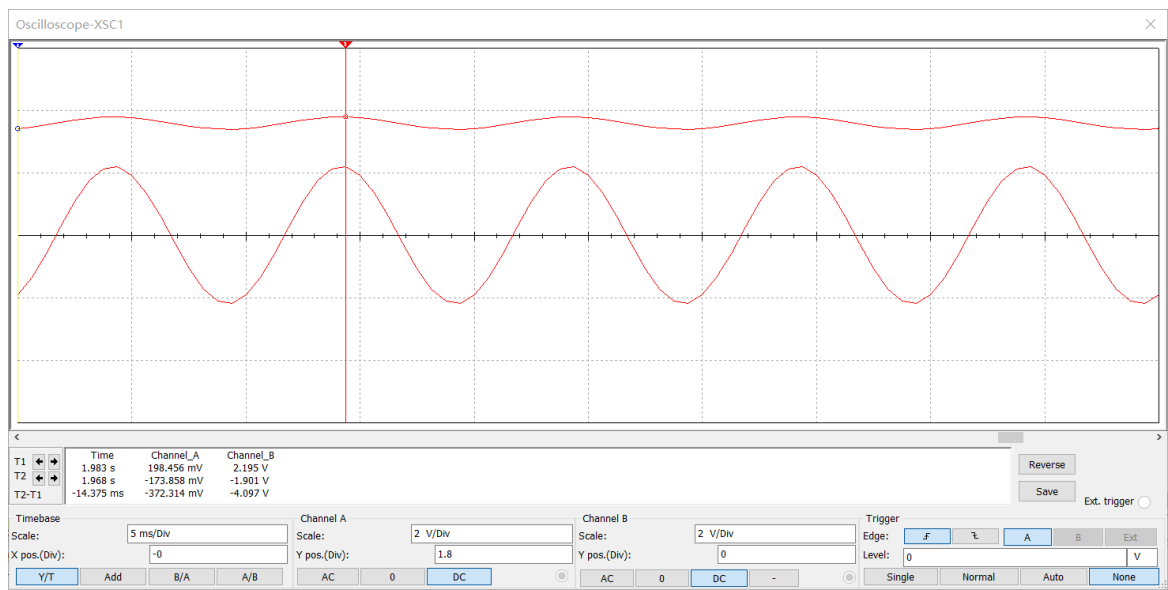


图 12

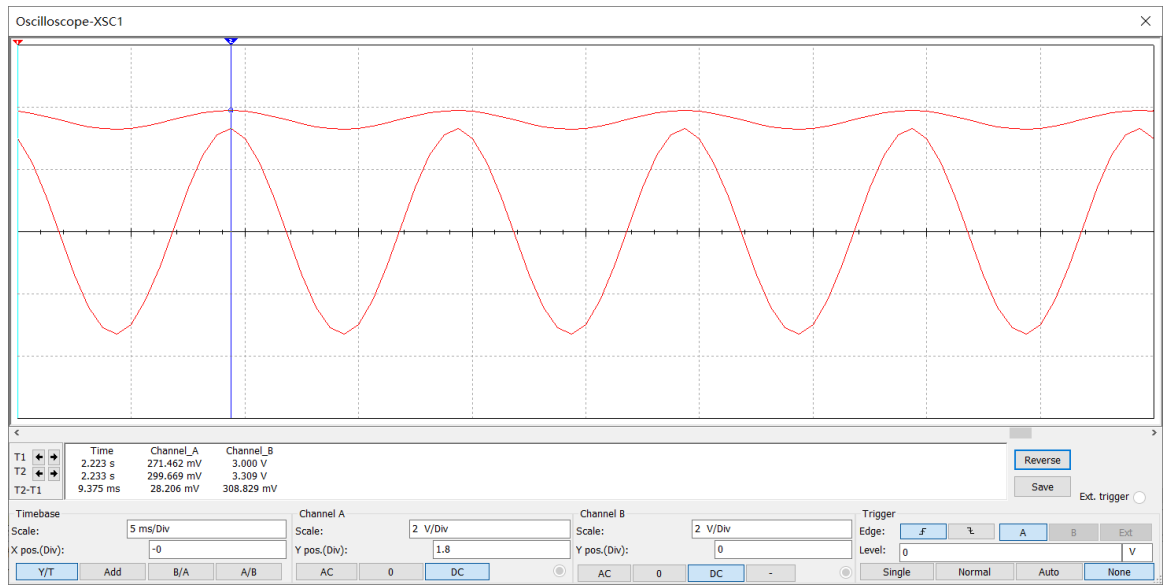


图 13

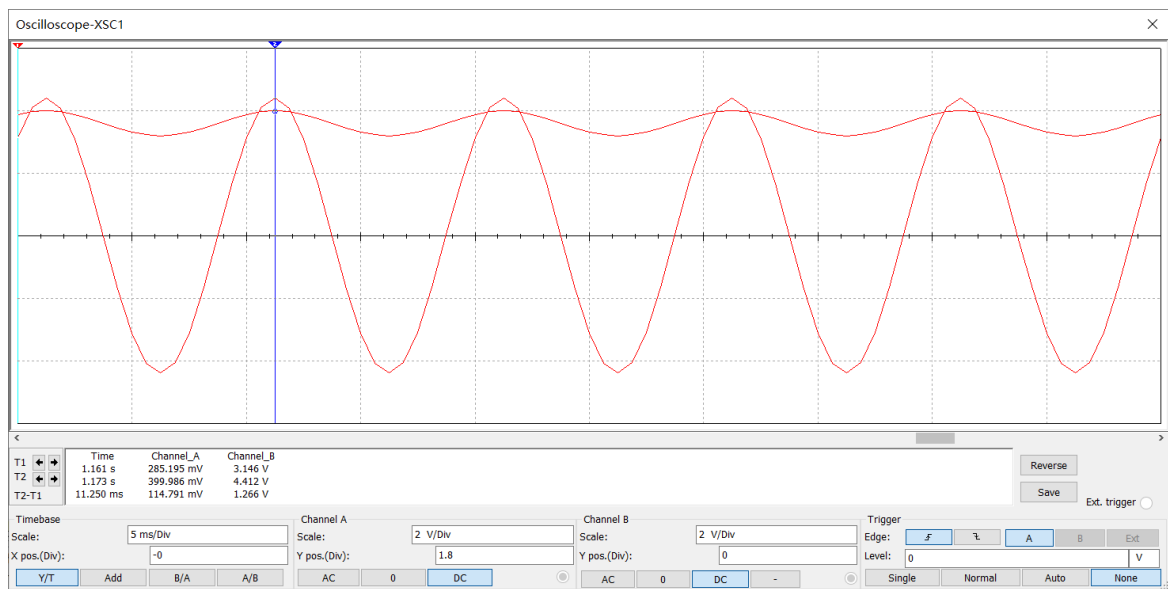


图 14

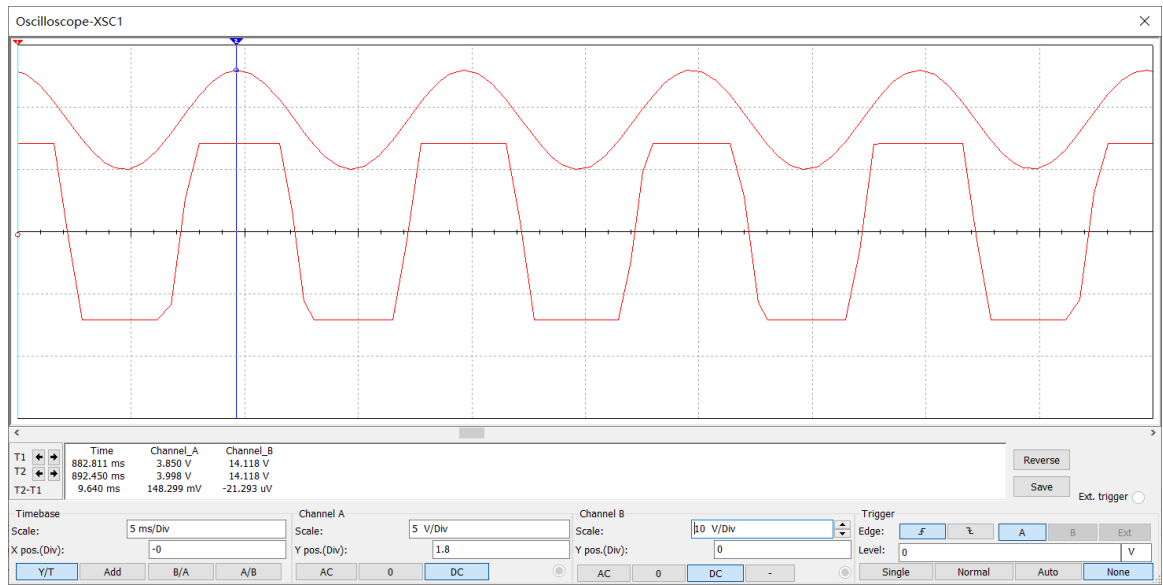
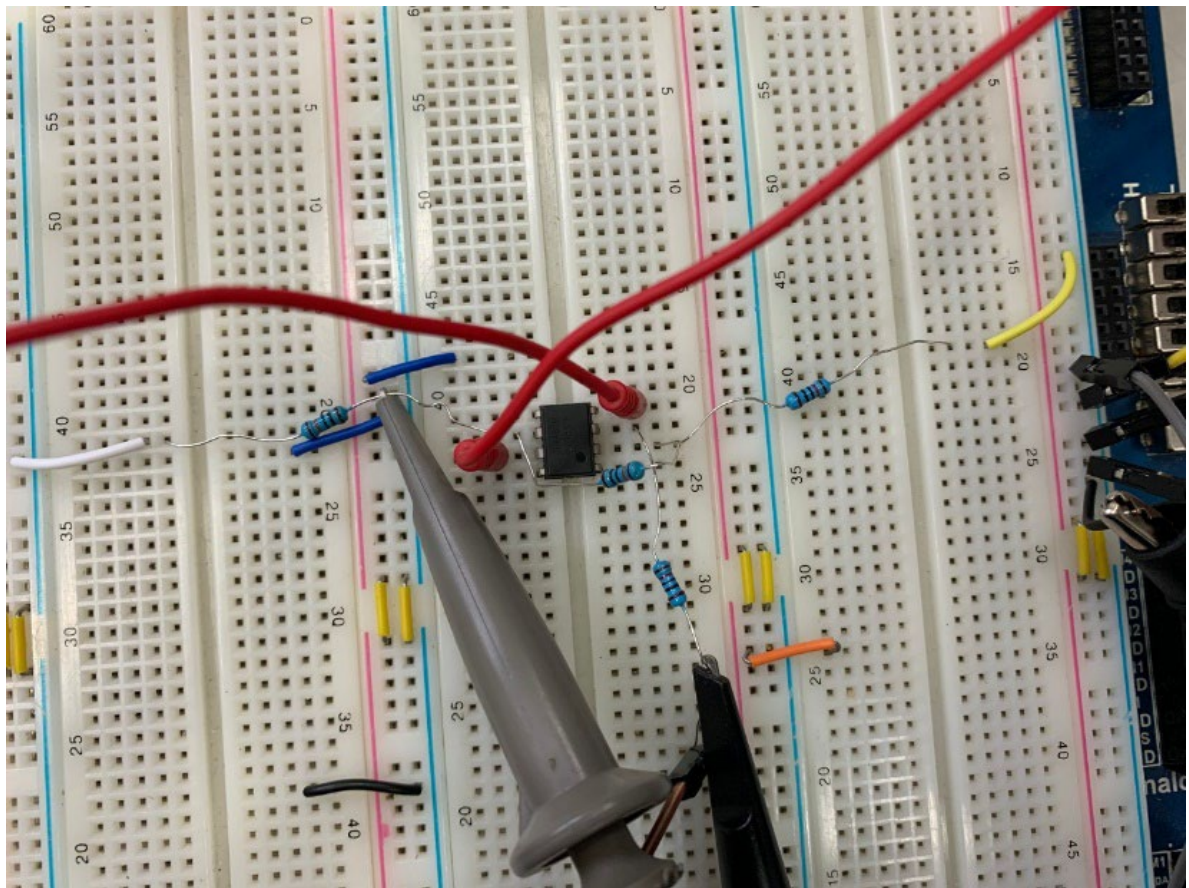


图 15

实物电路：



直流特性测量:

直流特性测量记录表			
$U_i/V$	$U_o/V$	$A_u$	
		测量值	理论值
-2	-12.66	6.33	11
-0.5	-5.3	10.6	11
0.5	5.67	11.34	11
2	14.10	7.05	11

实验结果分析:

在电压较小时，很好地实现了 11 倍放大；较大时，由于高于最大输出电压，所以无法实现 11 倍放大。

交流特性测量:

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	$A_u$	误差
200 (210)	2300	图 16	10.95	0.45%
400	4520	图 17	11.3	27.2%
4000	27600	图 18	6.9	37.27%
2400	27000	图 20 (最大不失真)	11.25	2.27%

实验结果分析:

对于不失真的情况，从波谷波峰来看，输出信号波峰对应于输入信号波峰，同样的，从输出信号波谷对应输入信号波谷，我们可以发现，实现了同相的功能。同时由信号的峰峰值的大小情况来看，实现 $|A_u| = 11$ 的放大功能。失真时，波形发生畸变，如图 18。

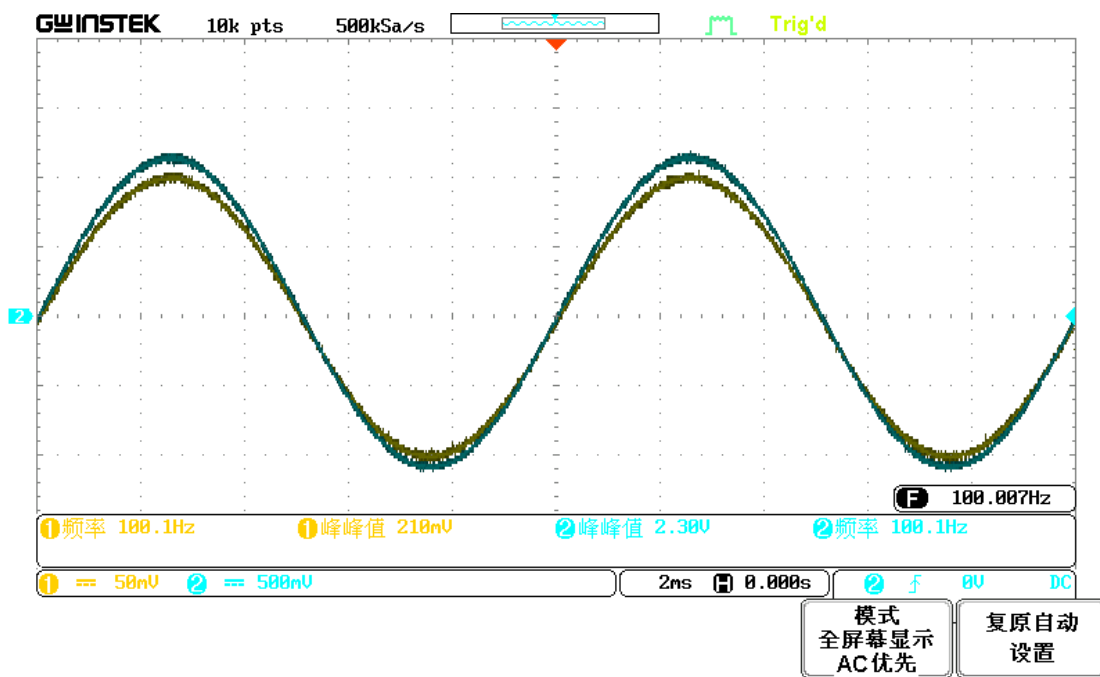


图 16

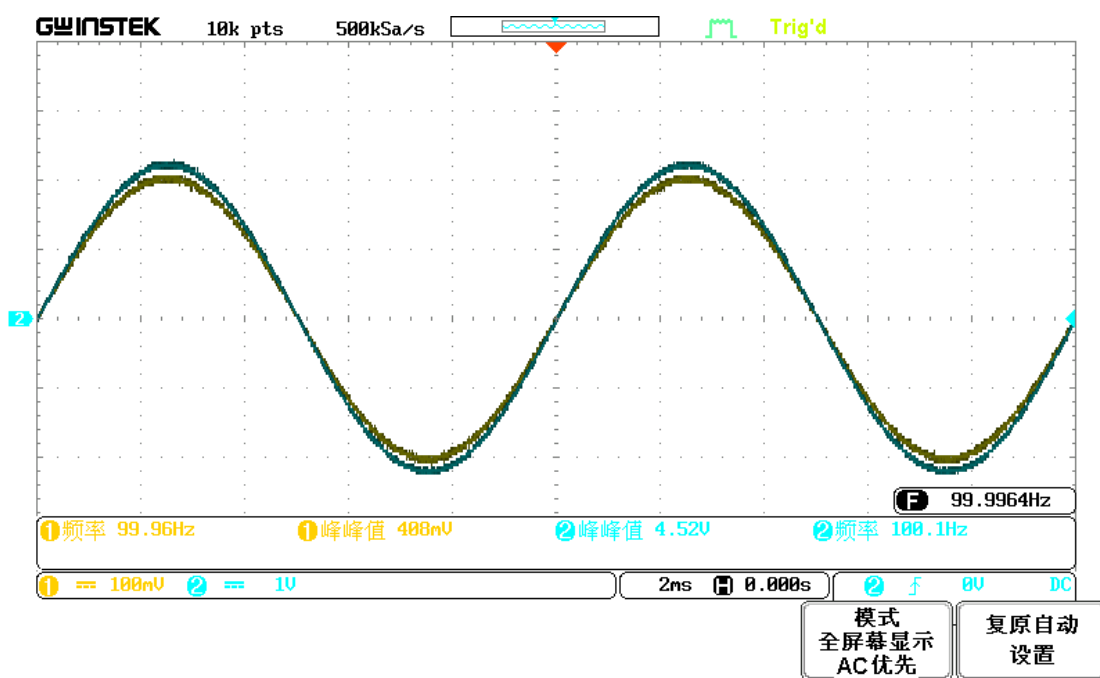


图 17

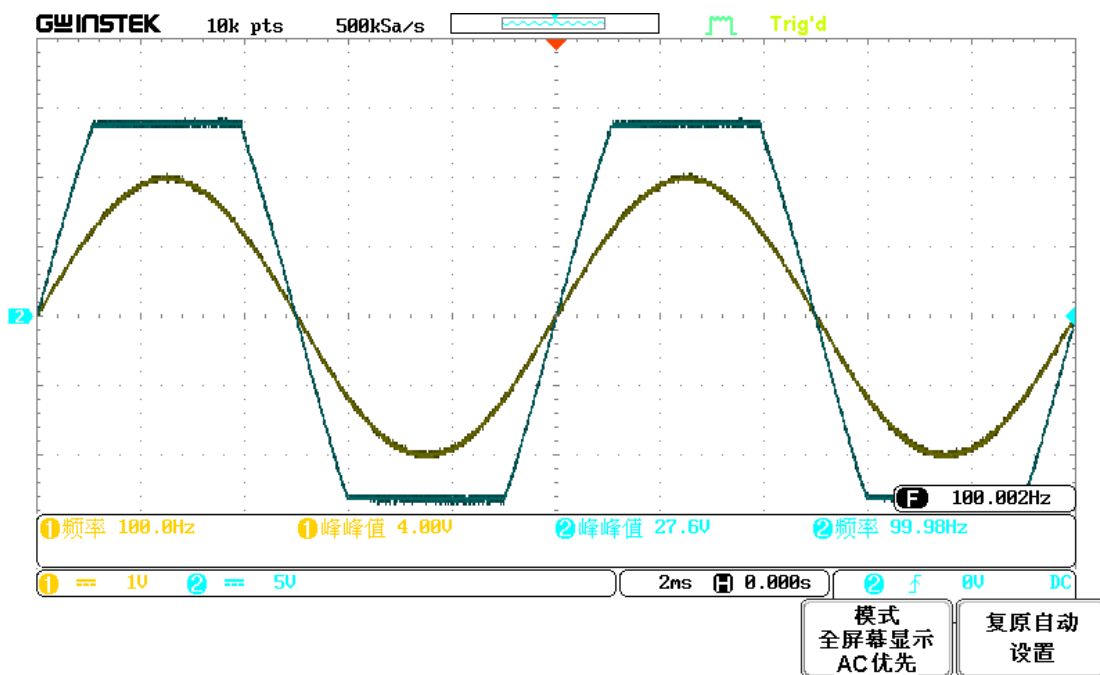


图 18

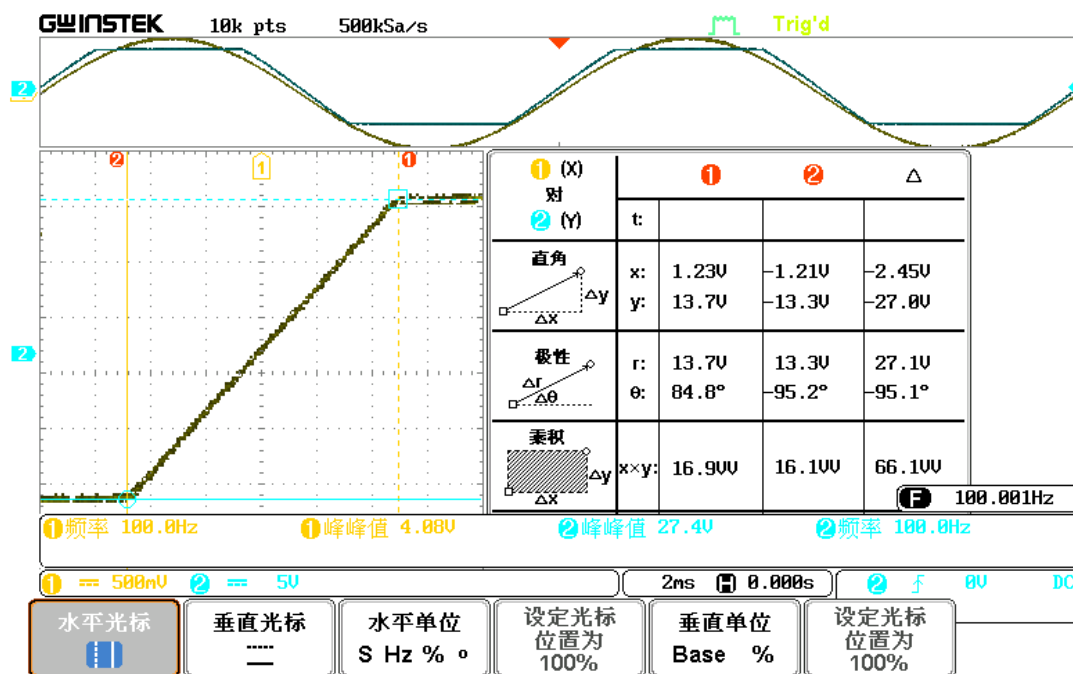


图 19

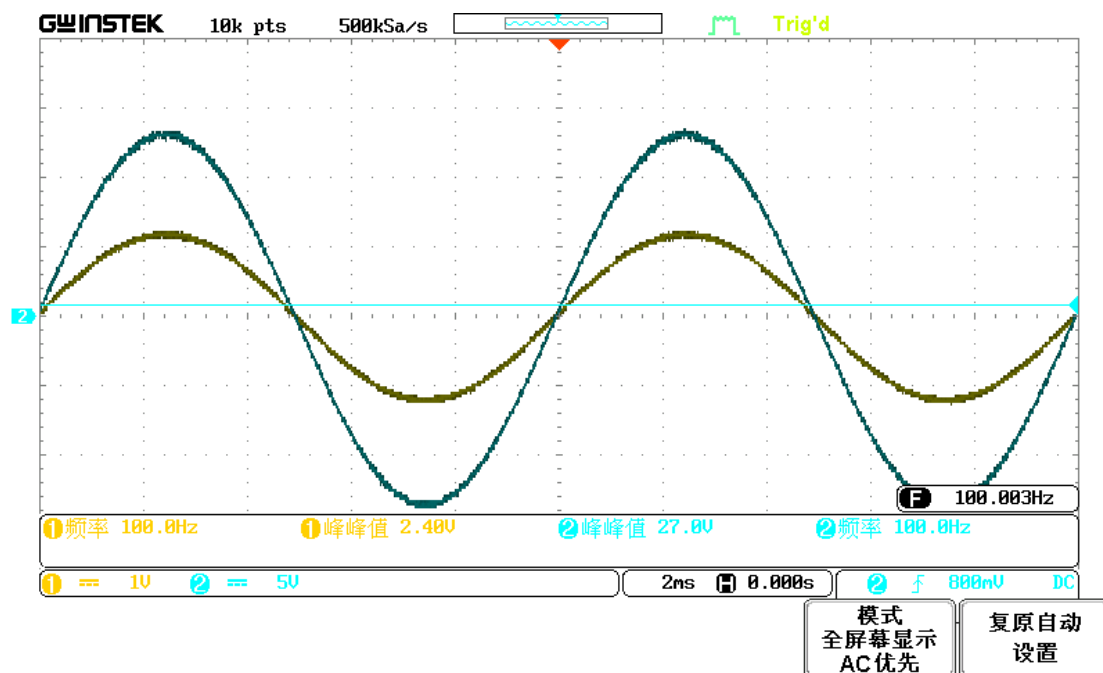


图 20

运放特性测量——最大输出电压：20.6V（峰峰值）

自拟表格测量此时的运放交流特性和最大输出电压：

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	$A_u$	误差
200 (206)	2280	图 21	11.068	0.62%
400	4520	图 22	11.3	2.7%
4000	21800	图 23	5.45	50.45%
1880	20600	图 25 (最大不失真)	10.96	0.36%

### 实验结果分析：

当电源电压变为 $\pm 12V$ 时，最大不失真输出电压峰峰值为 20.6V。失真时，最大输出电压峰峰值为 21.6V。而当电源电压变为 $\pm 15V$ 时，最大不失真电压峰峰值为 26.4V。失真时，最大输出电压峰峰值为 26.4V。可以发现，当电源电压减小时，最大不失真电压和最大输出电压的峰峰值都会变小。



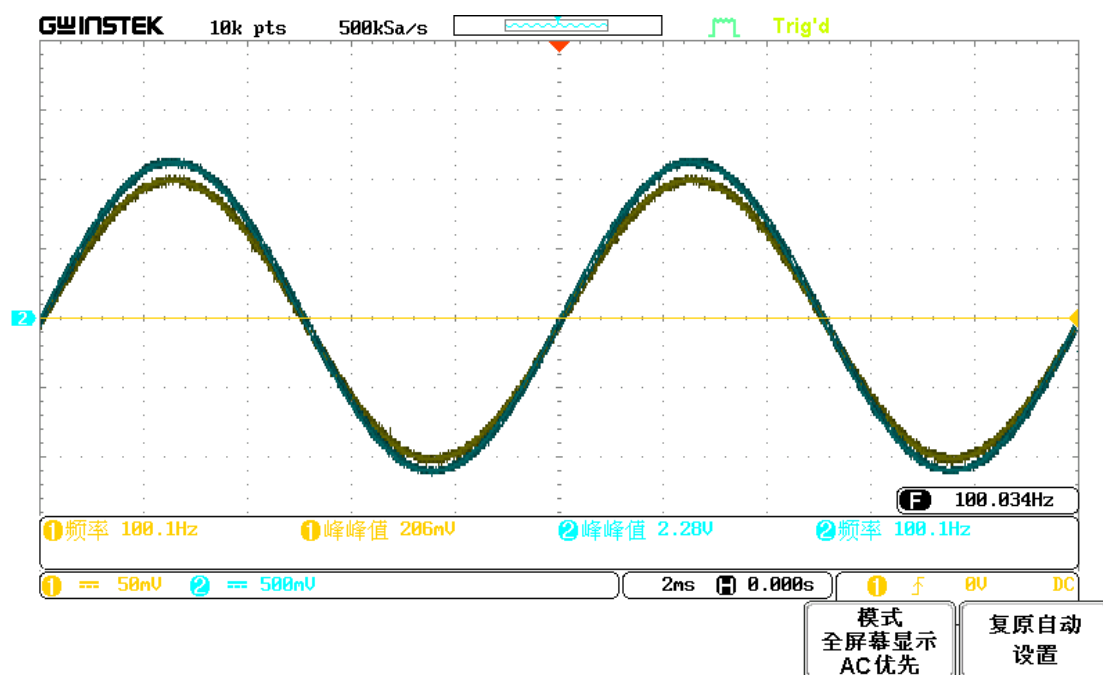


图 21

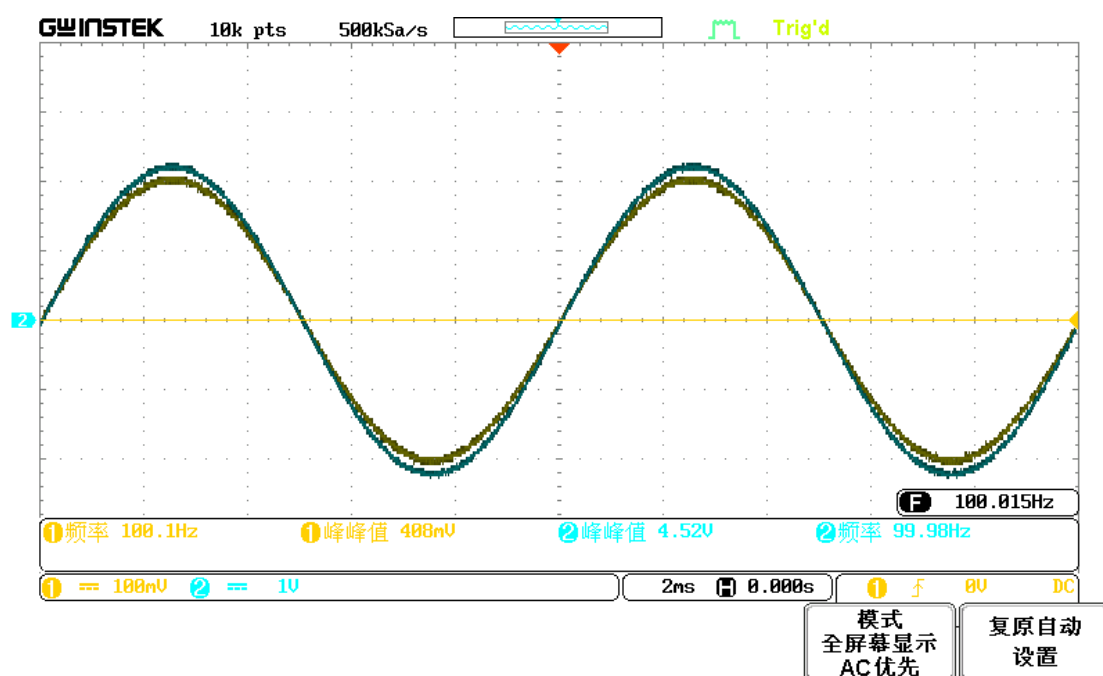


图 22

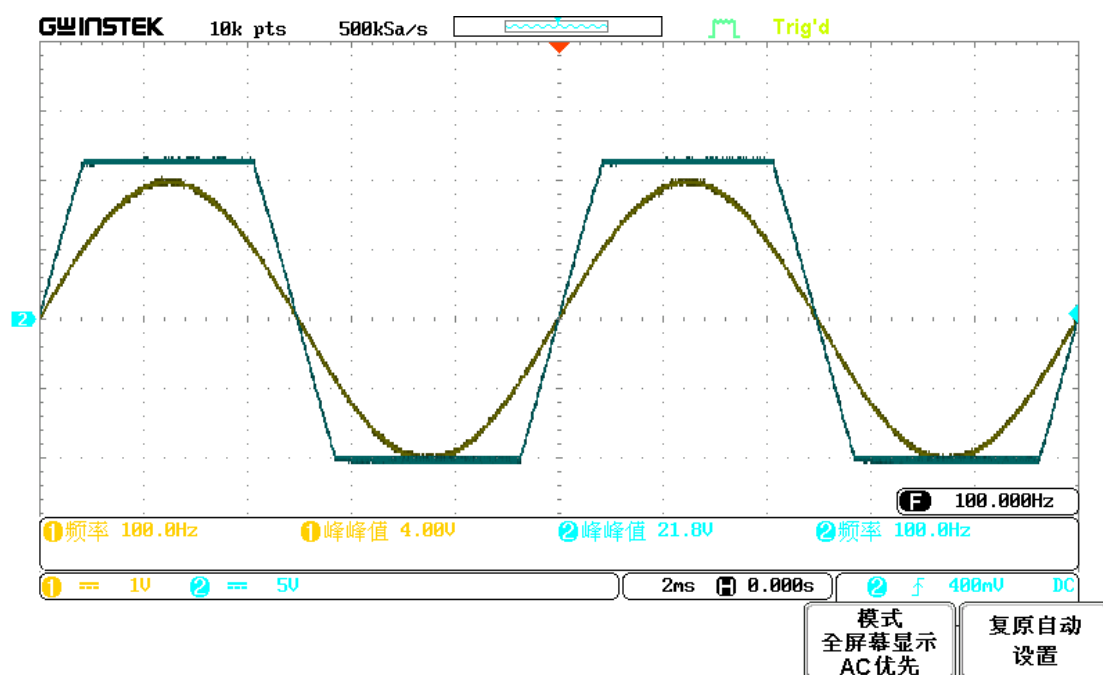


图 23

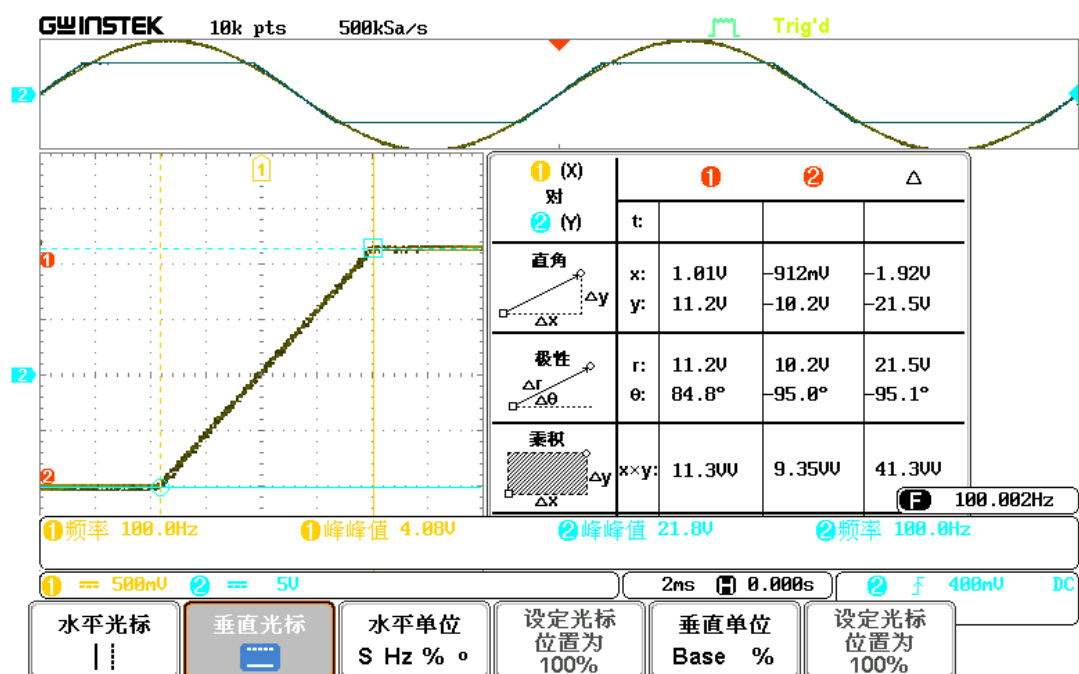


图 24

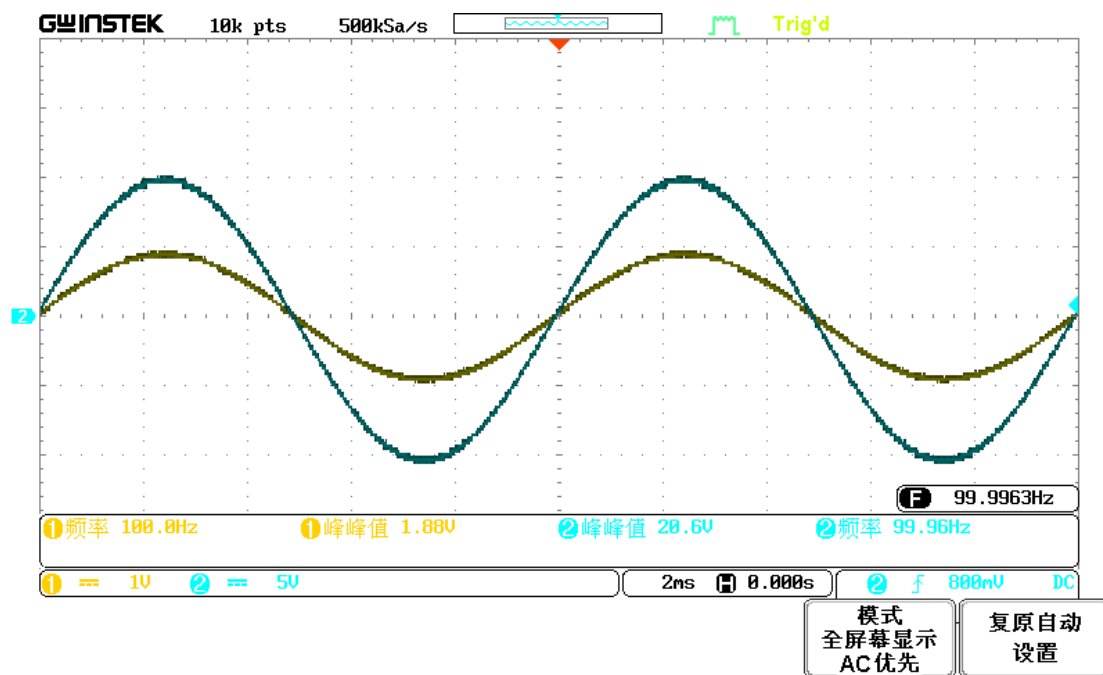


图 25

运放的最大输出电流: 22.56mA  
最大不失真输出电压: 峰峰值为9.84V

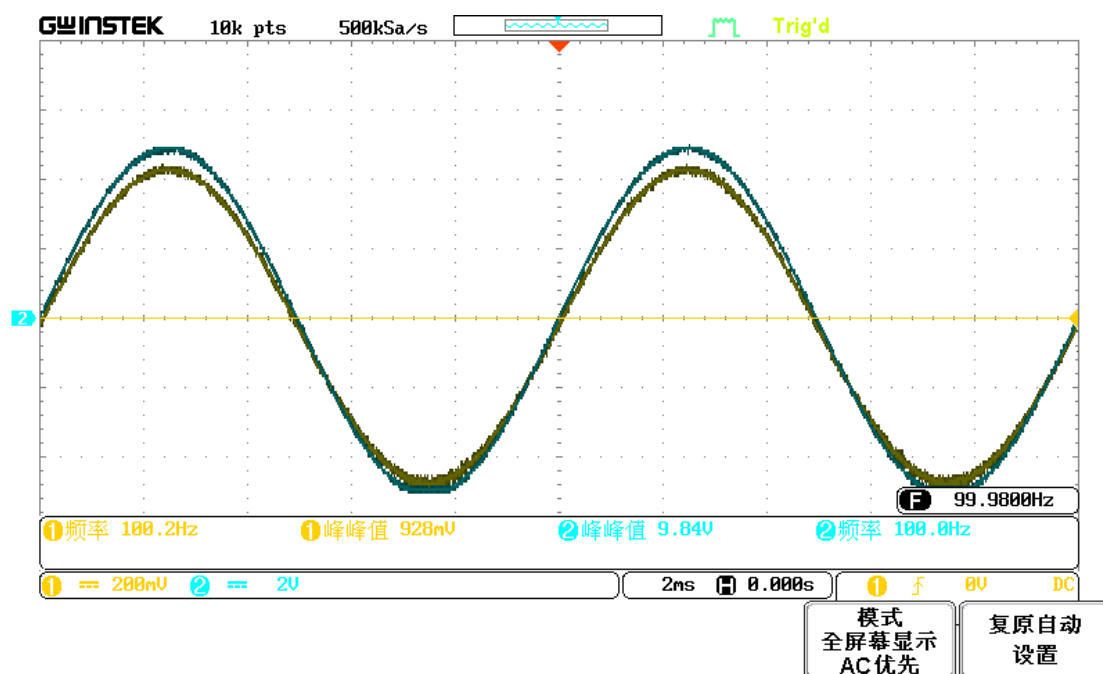


图 26

实验数据分析:

与  $R_L = 100k\Omega$  时相比, 最大不失真输出电压要小很多, 这是最大输出电流限制导致的。

## 2. 实验内容（见在线实验 2）:

(1) 设计一个减法电路, 满足  $u_o = 3u_1 - 2u_2$ , 预习时设计好电路图, 并用 Multisim 软件

仿真, 完成减法电路的设计及仿真测量; 按仿真设计的电路参数完成电路的连接; 用不同的直流电压输入测量输出与输入的关系; 用一个方波信号和一个正弦波信号观察波形叠加; 改变输入波形幅度观察输出波形变化规律; 其他自主测量与发现(例如输入幅度、频率变化, 输入电阻对测量的影响……); 拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形、撰写实验报告(见在线实验第 2 单元的作业)。

答:

$$u_o = 3u_1 - 2u_2$$

我们利用正相和反相输入, 可以得到:

取  $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ ,  $R_f = 20k\Omega$ , 得到如下电路:

减法电路运算电路仿真图:

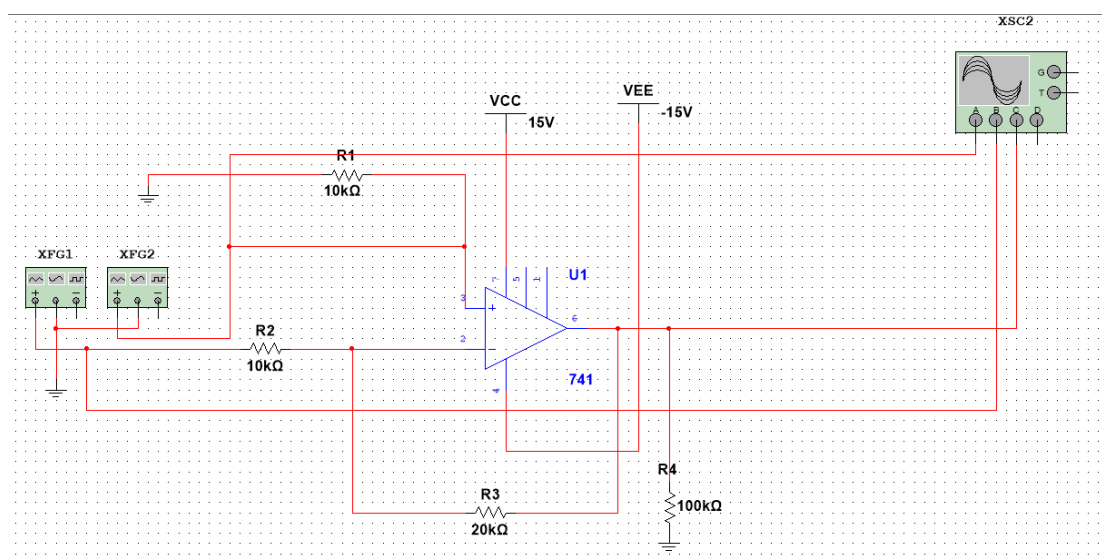


图 27

仿真示例:

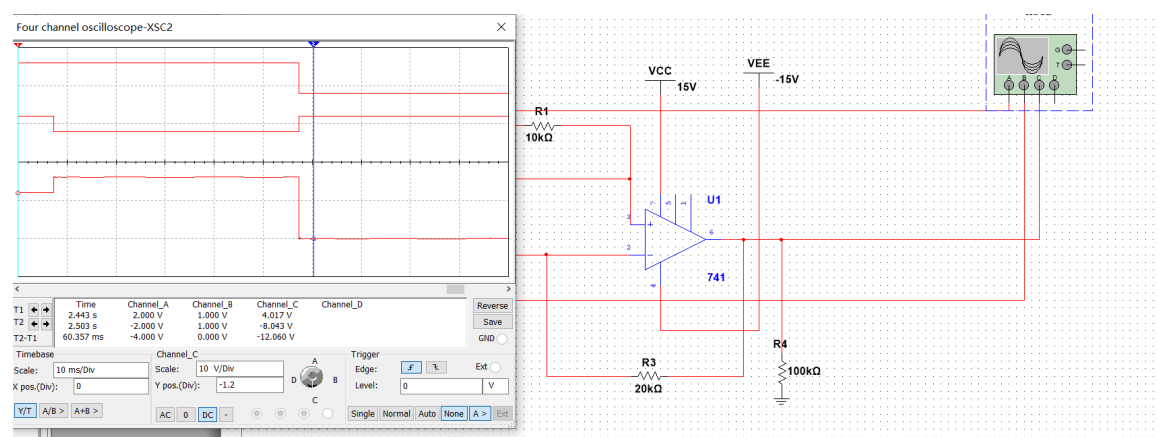


图 28

功能仿真演示：  
直流演示：

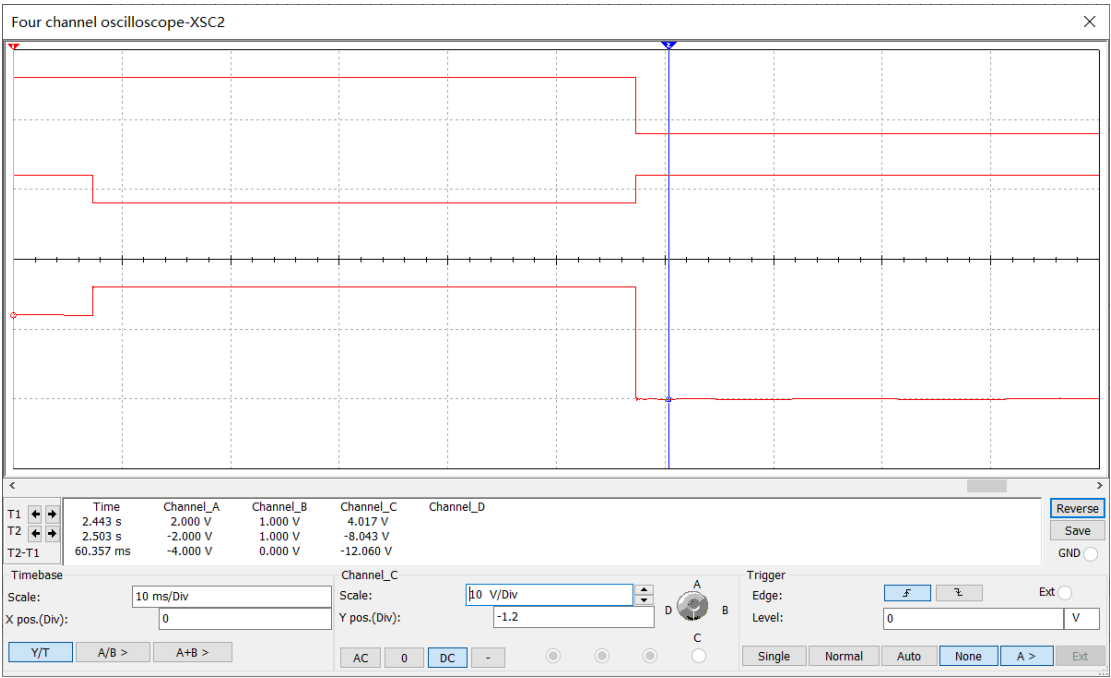


图 29

交流演示：



图 30

a) 直流减法功能测量:

直流减法功能测量记录表

	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
$U_1/V$	0.968	0.986	3	4.98	4
$U_2/V$	2.92	1.04	-1.93	-1.96	-4.94
$U_0/V$ (理论值)	-2.936	0.878	12.86	18.89	21.88
$U_0/V$ (测量值)	-2.90	0.907	12.90	14.10	14.08

如有易派，请截图示波器上的两个输入和一个输出的波形：

见图31、32

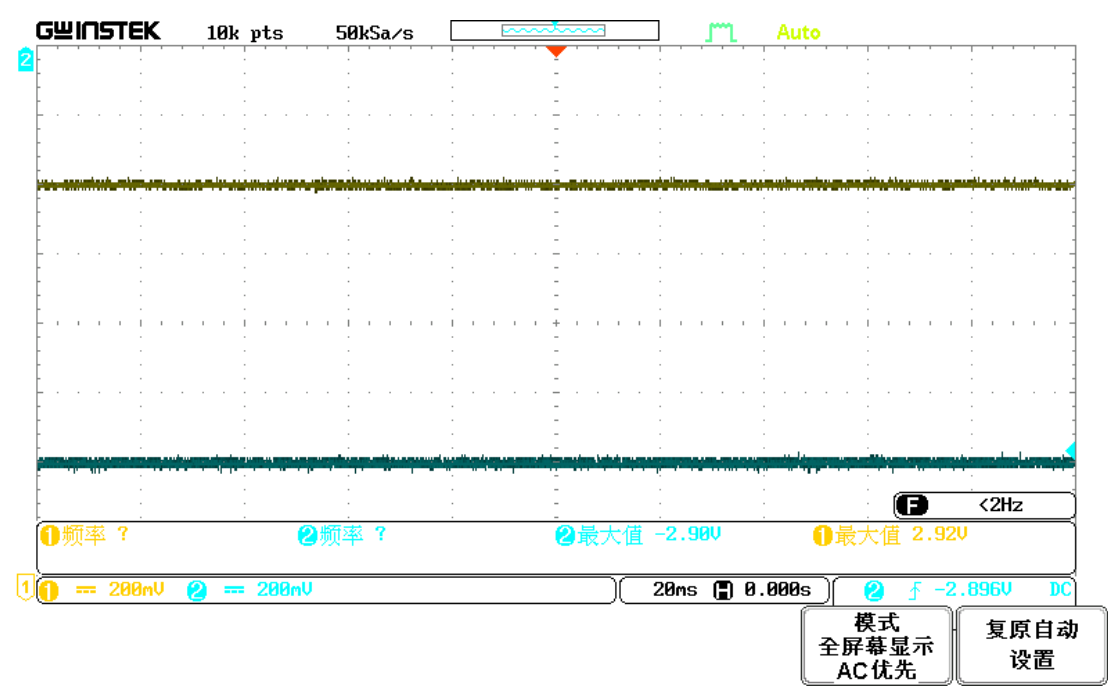


图31

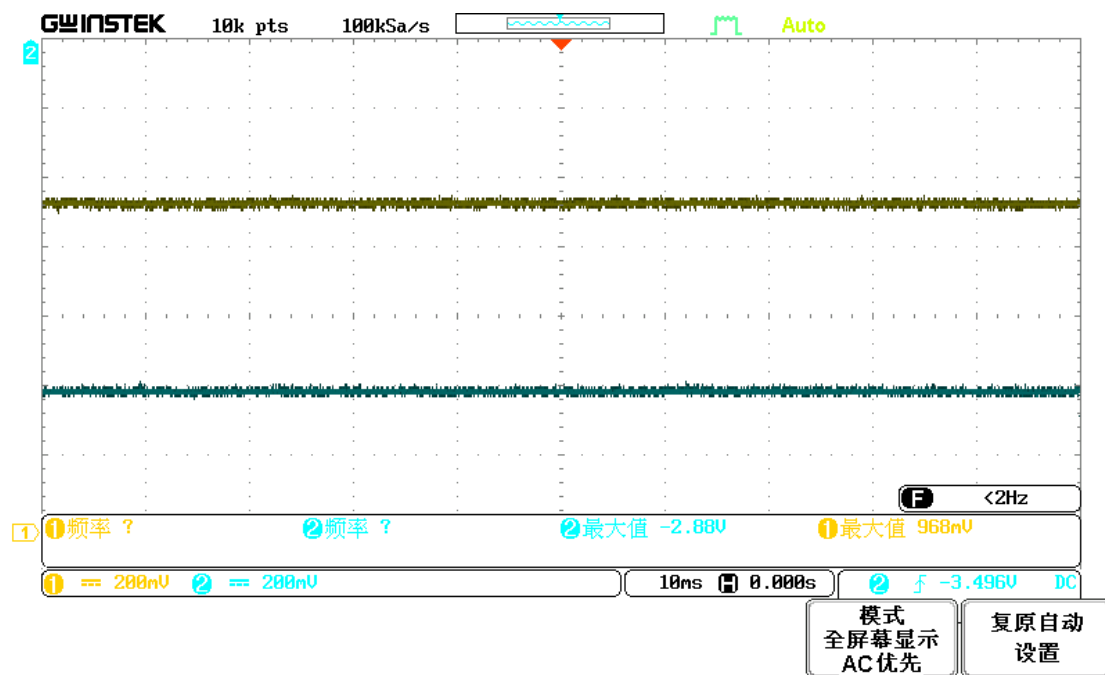


图32

#### 实验结果分析：

有明显不满足减法关系的测量结果，是什么原因？

如果用负电压输入，减法电路可以实现加法功能？

当  $u_0$  的理论值大于电源电压 ( $\pm 15V$ ) 时，输出电压会因此不满足理想的减法关系，如第4组和第5组实验。实验中，若  $u_2$  用负电压输入，就可以实现加法功能，所以这也可以当加法器使用。

#### b) 交流减法功能测量：

交流减法功能测量记录表

输入	第一组实验波形	误差	第二组实验波形	误差
$U_1$	1kHz 方波， 幅度为 1V 见图 33, 34	4%	2.5kHz 三角波， 幅度为 1V 见图 35, 36	2%
$U_2$	5kHz 正弦波， 幅度为 200mV 见图 33, 34	10%	5kHz 正弦波， 幅度为 200mV 见图 35, 36	20%
$U_0$	见图 33, 34	10%	见图 35, 36	12%

#### 实验结果分析：

除了输入信号的有所误差之外，电路很好地实现了交流减法功能，波形表现也十分良好。在这个实验中，注意要调节频率和幅度，否则输出的波形将不会那么好看。

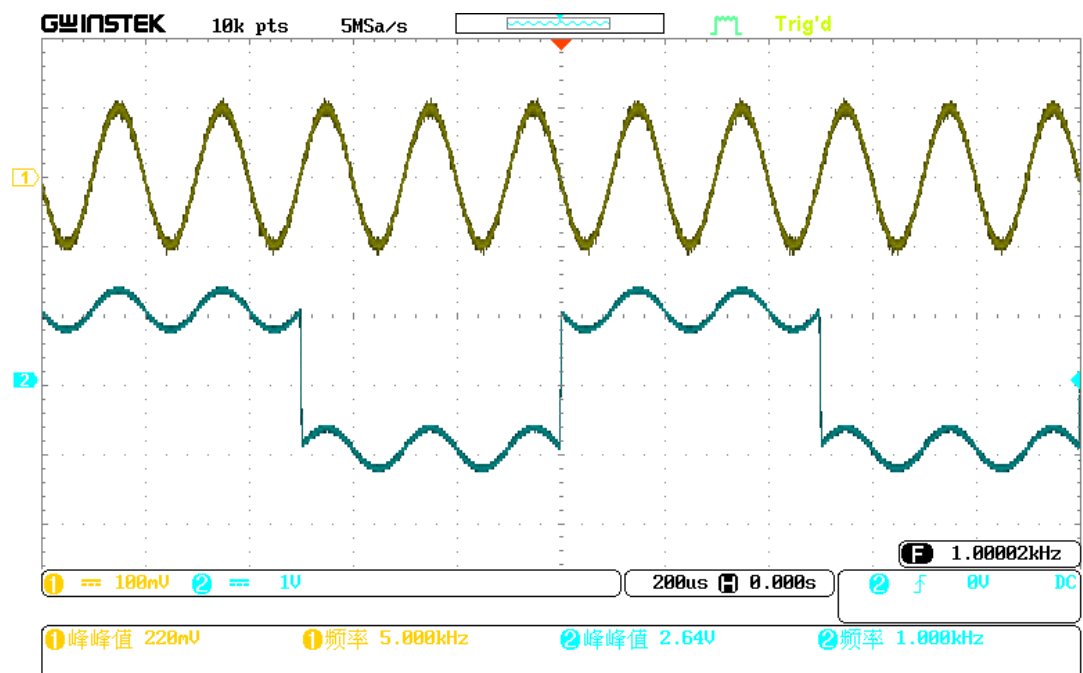


图 33

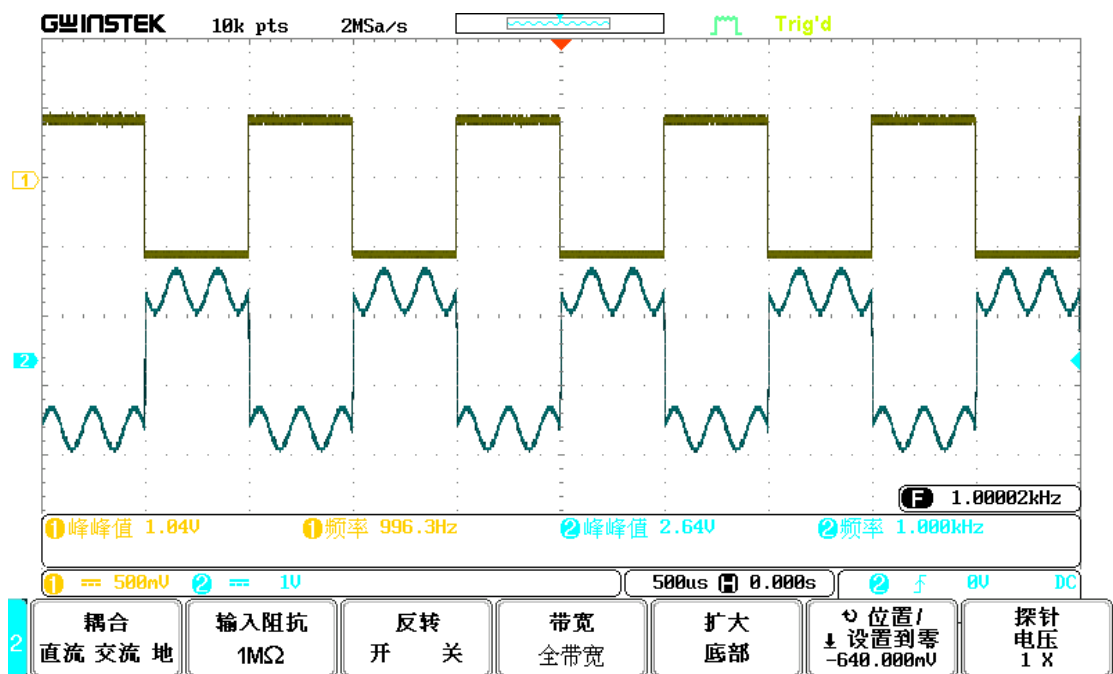


图 34



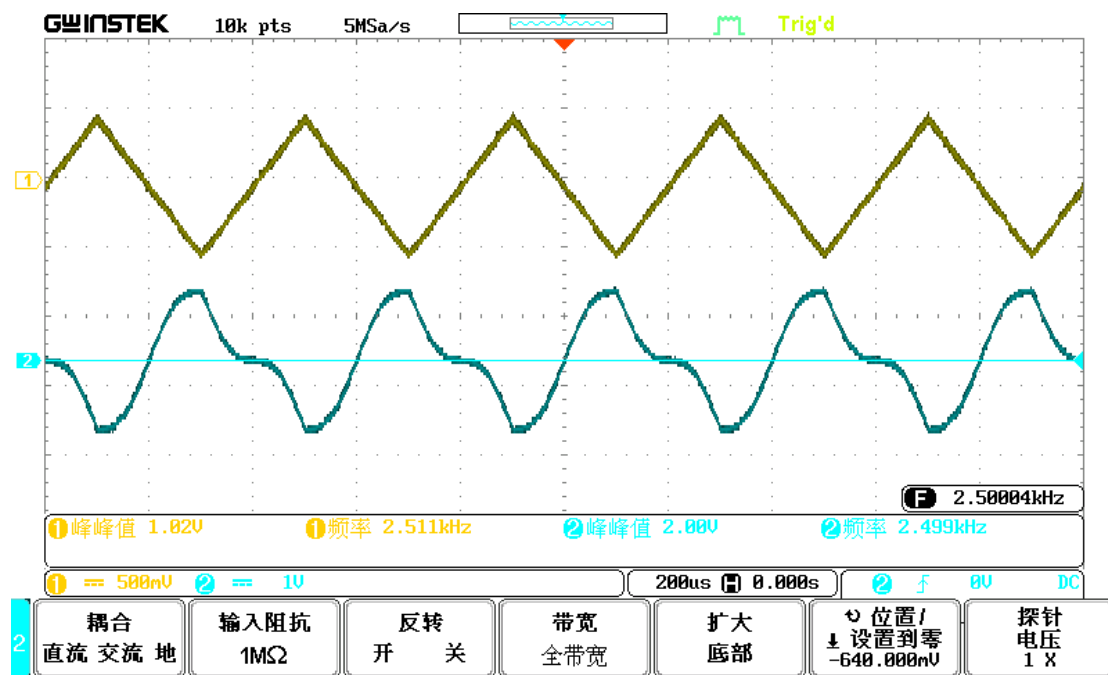


图 35

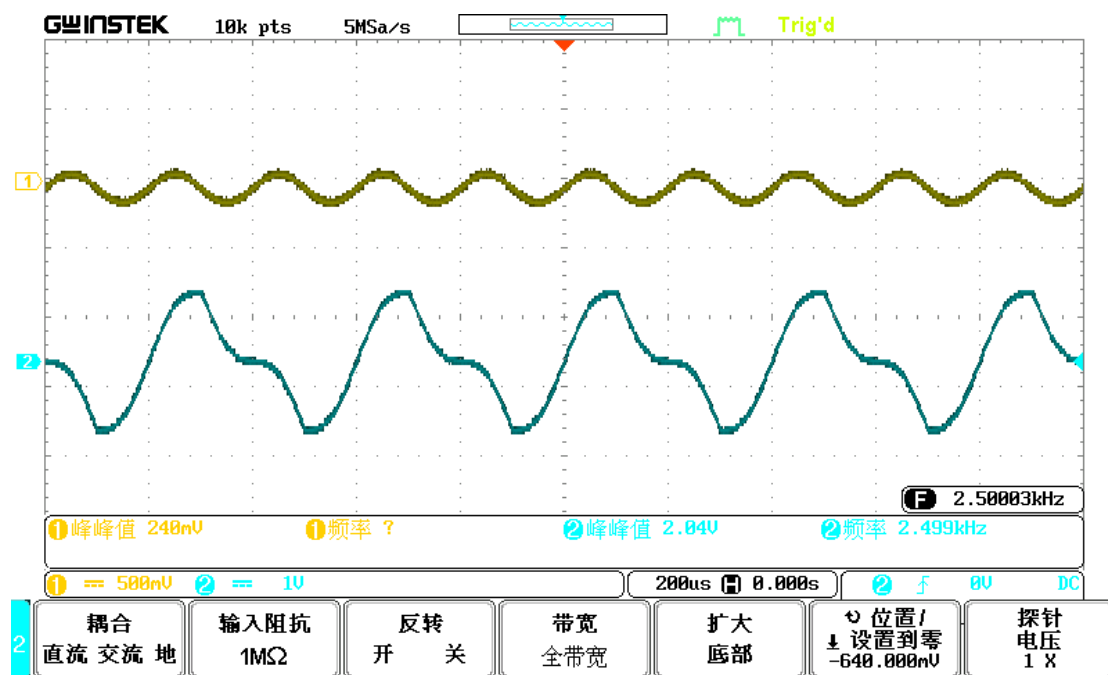


图 36

c) 其他自主测量与发现（例如输入幅度、频率变化，输入电阻对测量的影响……）；  
输入幅度变化：

输入	第一组实验波形	第二组实验波形	第二组实验波形
$U_1$	1kHz 方波， 幅度 $V_{pp} = 1V$ 见图 37	频率=1kHz 幅度 $V_{pp} = 1V$ 见图 38	频率=1kHz 幅度 $V_{pp} = 2V$ 见图 39
$U_2$	5kHz 正弦波， 幅度为 220mV 见图 37	5kHz 正弦波， 幅度为 412mV 见图 38	5kHz 正弦波， 幅度为 200mV 见图 39
$U_0$	见图 37	见图 38	见图 39

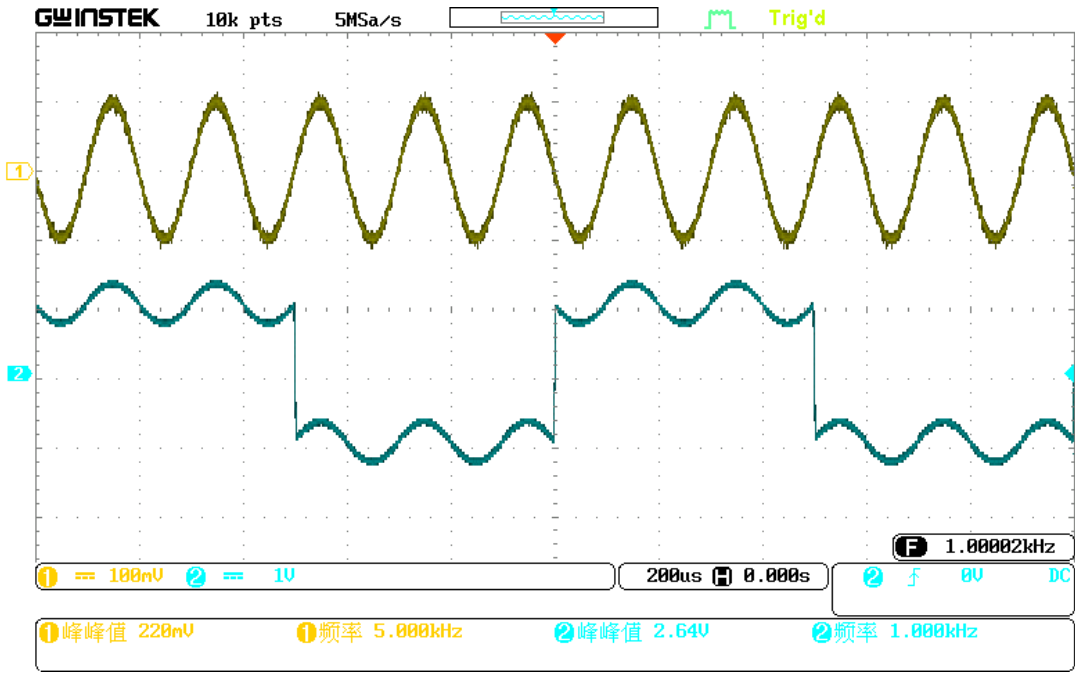


图 37

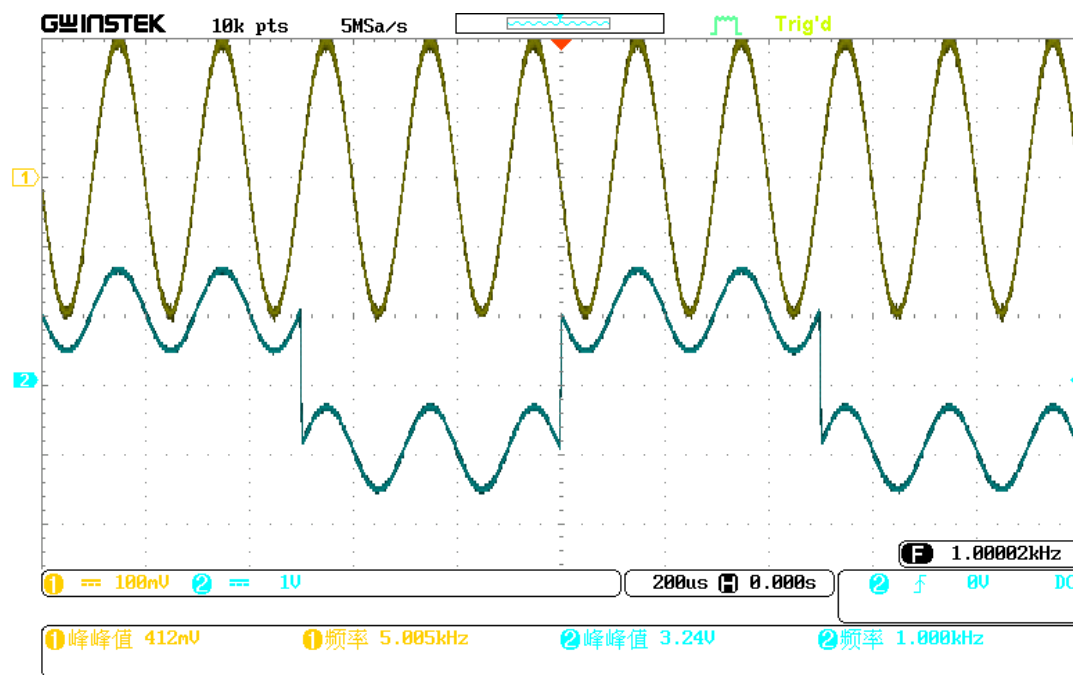


图 38

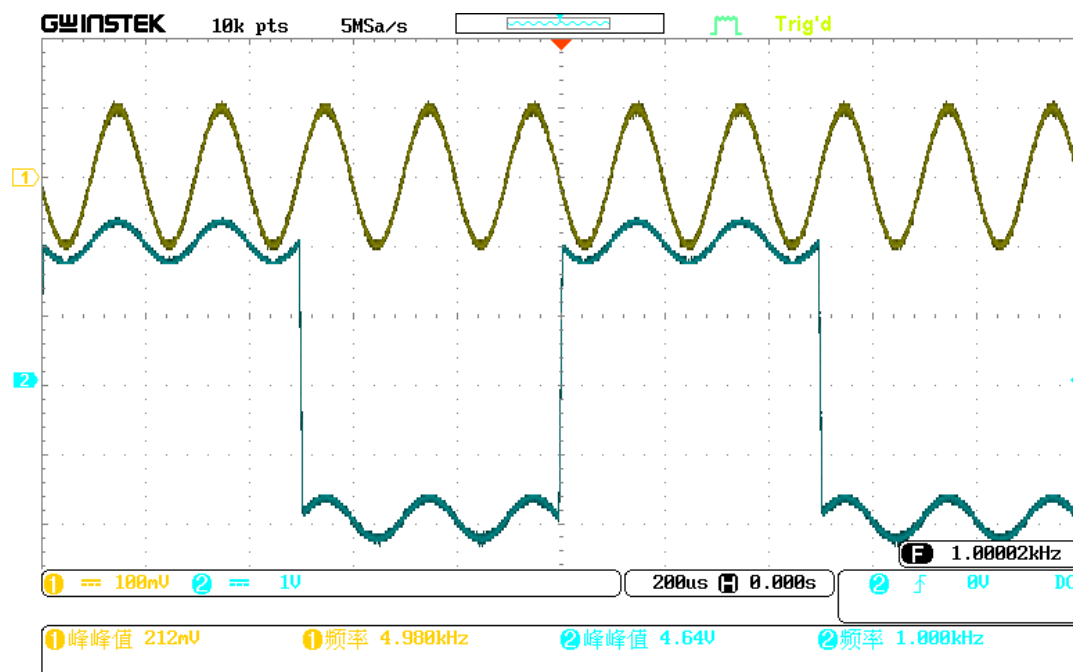


图 39

可知当输入波形幅度发生变化时,根据减法运算,输出方波形状有一定变化,频率不变。

频率变化:

输入	第一组实验波形	第二组实验波形	第二组实验波形
$U_1$	1kHz 方波， 幅度 $V_{pp} = 1V$ 见图 40	频率=5kHz 幅度 $V_{pp} = 1V$ 见图 41	频率=1kHz 幅度 $V_{pp} = 2V$ 见图 42
$U_2$	5kHz 正弦波， 幅度为 220mV 见图 40	5kHz 正弦波， 幅度为 412mV 见图 41	2kHz 正弦波， 幅度为 200mV 见图 42
$U_0$	见图 40	见图 41	见图 42

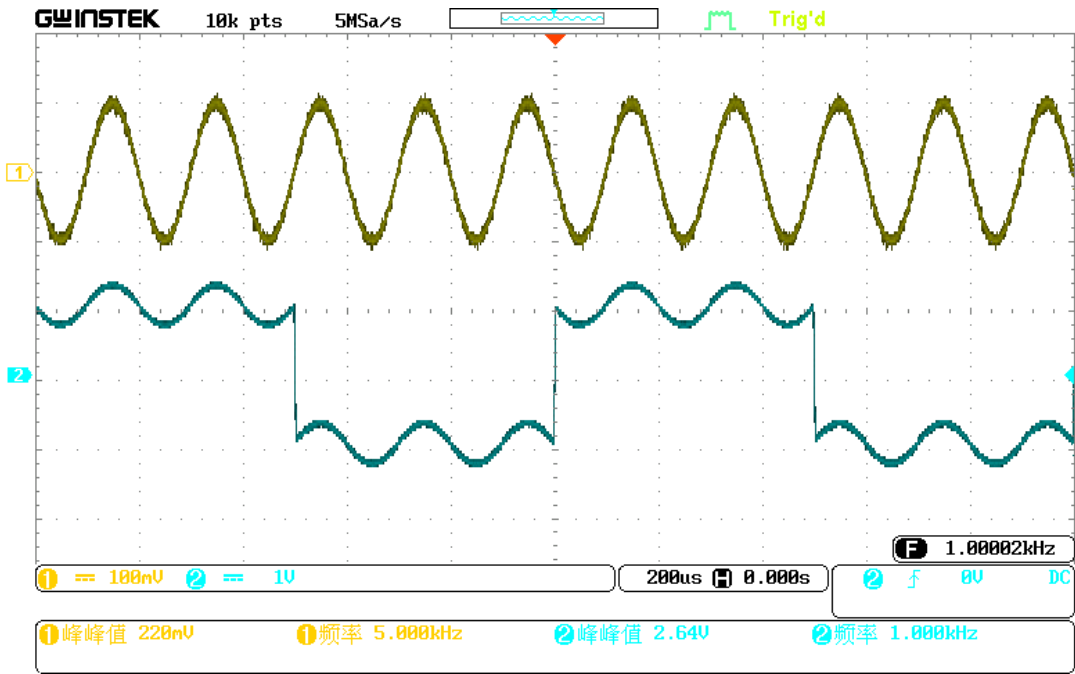


图 40

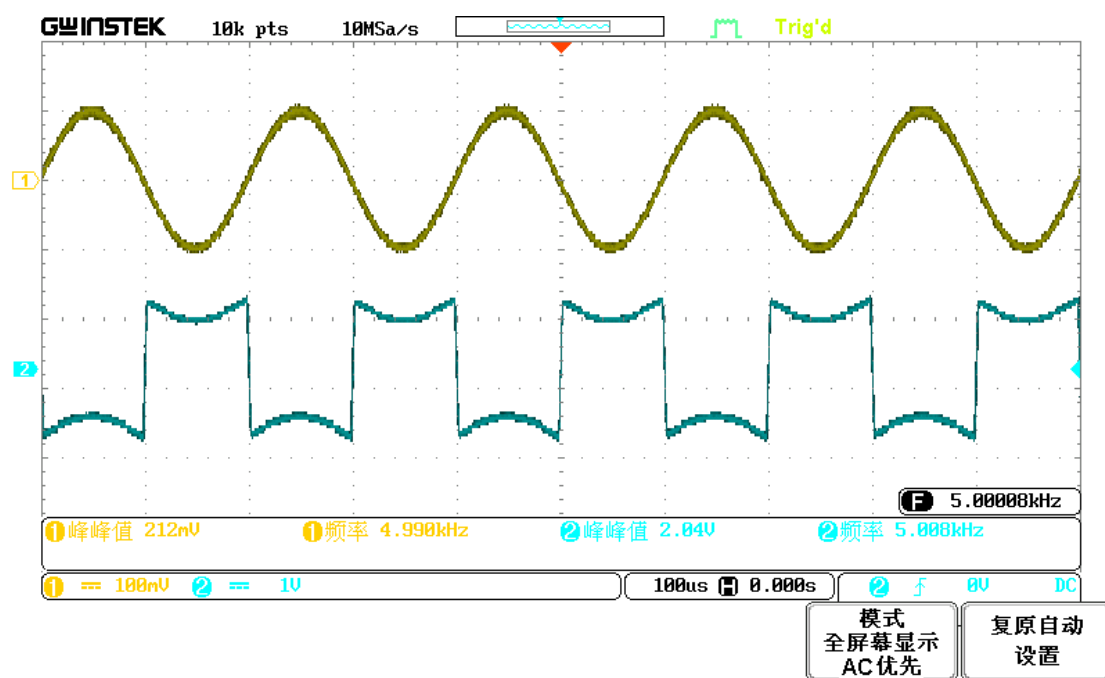


图 41

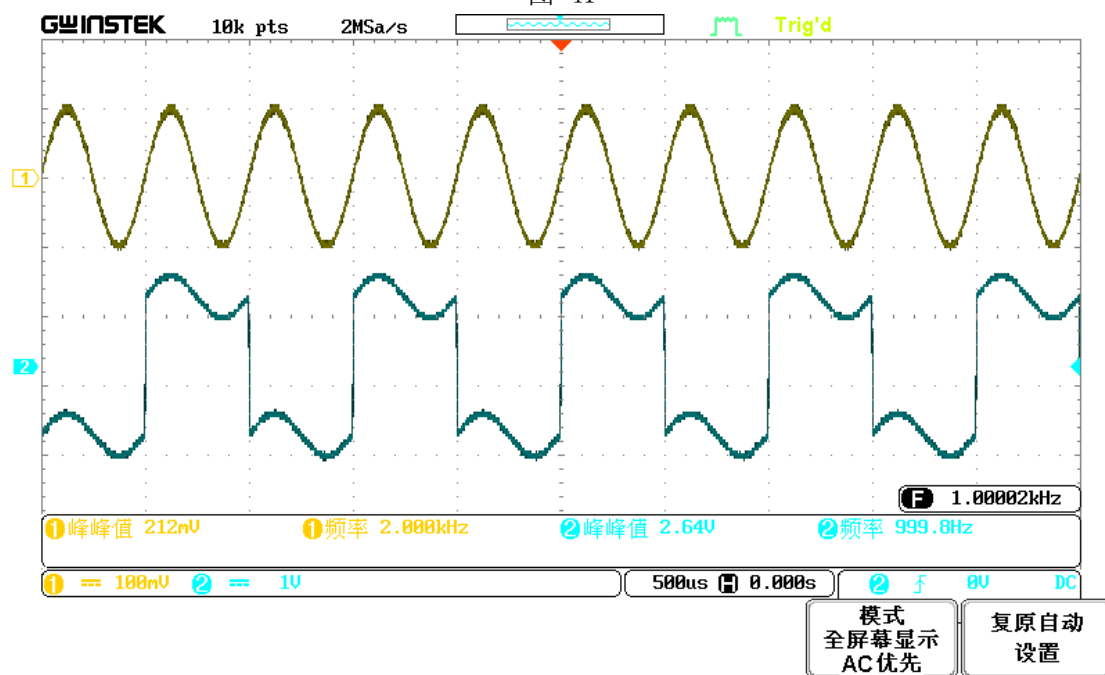
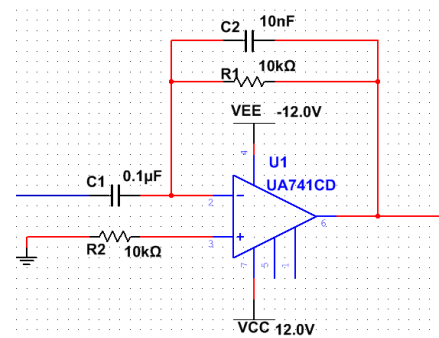


图 42

可知当输入波形频率发生变化时，根据减法运算，输出方波形状有一定变化，频率也可能会变化。

### 3. 实验内容（见在线实验 3）：

- (1) **微分电路：**用  $\mu A741$  运放，按图示电路结构和参数： $R_1=10k\Omega$ ， $R_2=10k\Omega$ ， $C_1=0.1\mu F$ ， $C_2=10nF$ 。连接好电路，确保正确无误，运放使用正负 12V 电源供电，检查正确后可以加电开始实验。



微分电路运算电路仿真图：

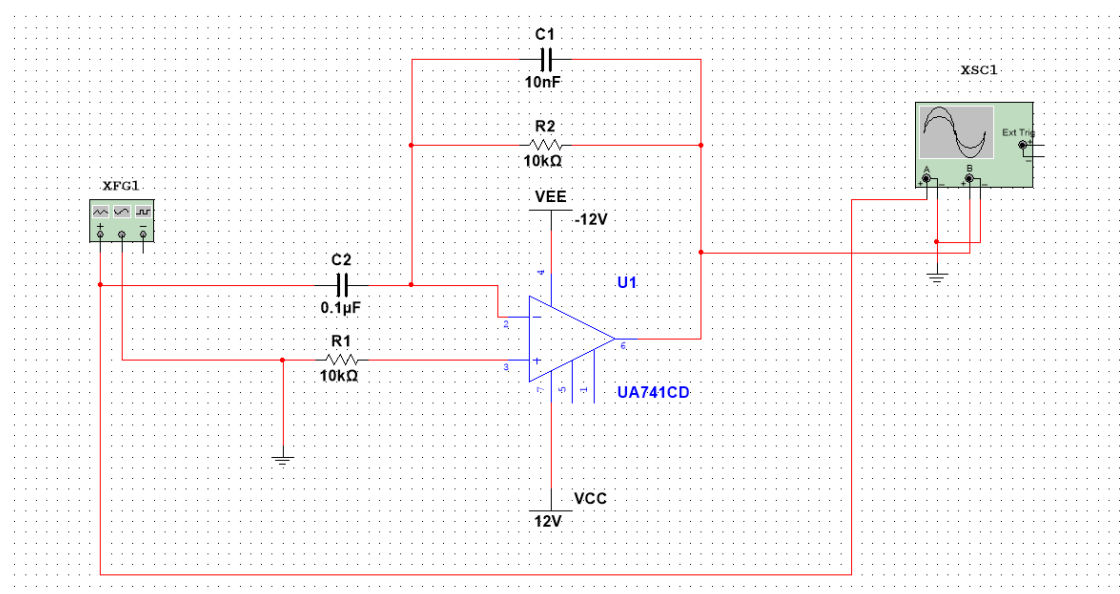


图 43

仿真示例：

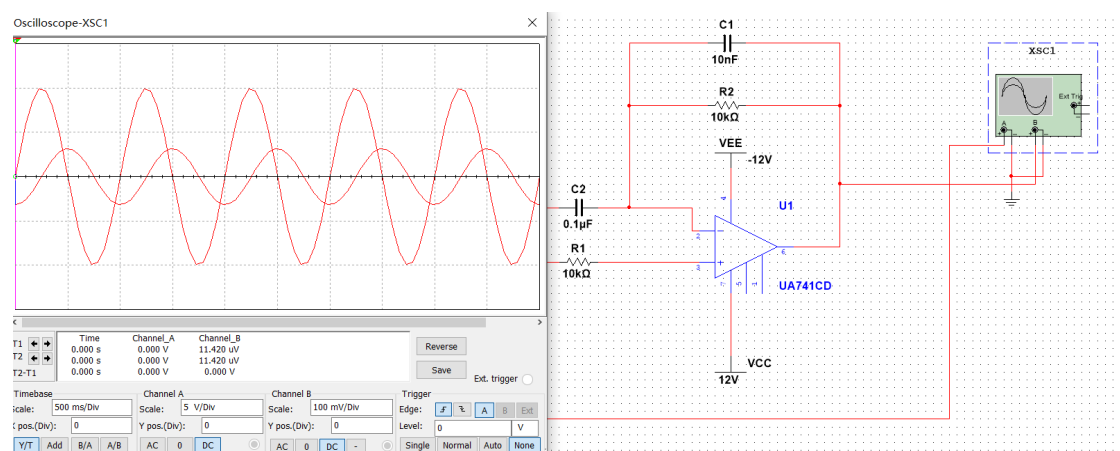


图 44

功能仿真演示：  
正弦波：

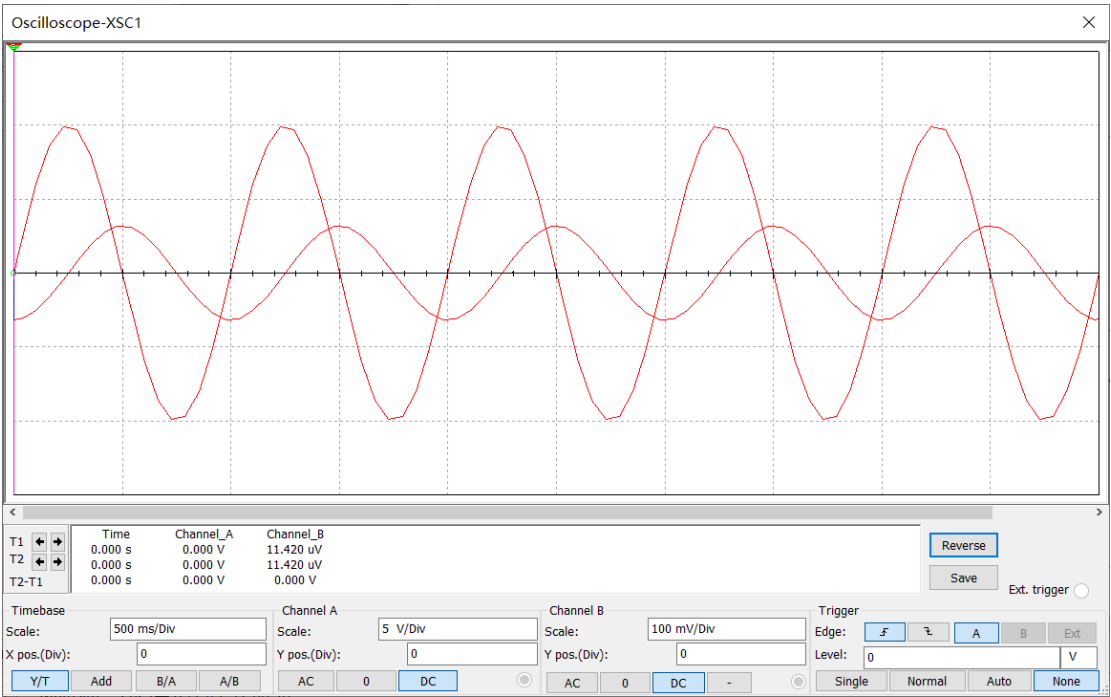


图 45

三角波：

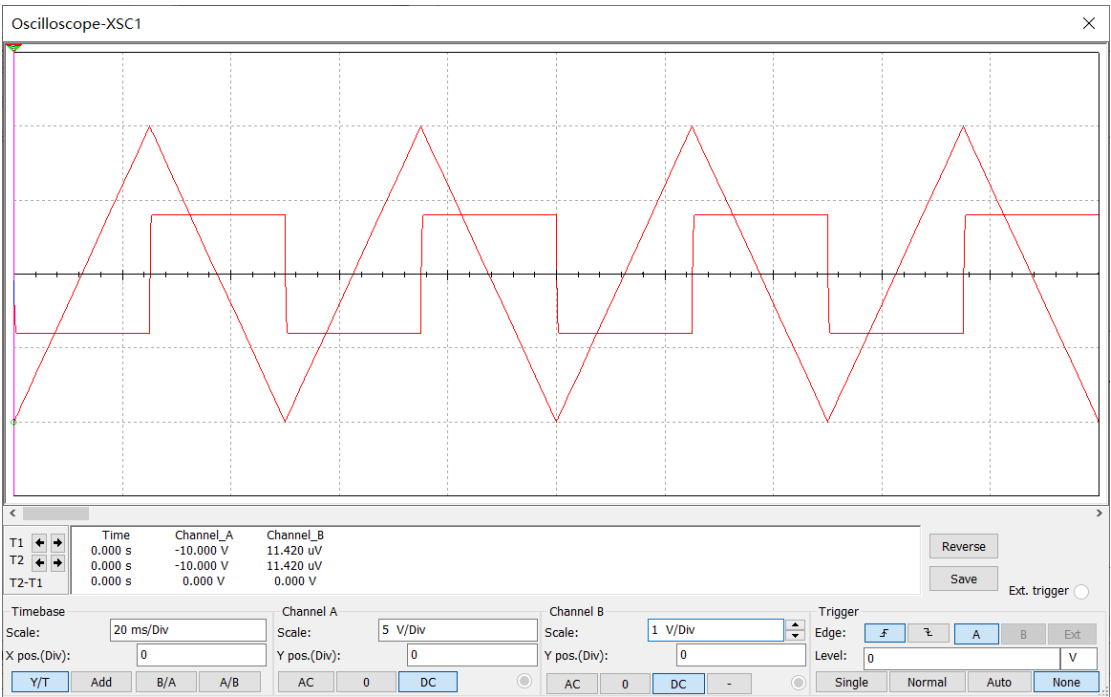


图 46

微分电路性能测量与研究记录表

输入波形	方波				
输入波形参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=1\mu\text{F}$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$
$U_i$	见图 47	见图 50	见图 53	见图 56	见图 59
$U_o$	见图 47	见图 50	见图 53	见图 56	见图 59
输入波形	三角波				
输入波形参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=1\mu\text{F}$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$
$U_i$	见图 48	见图 51	见图 54	见图 57	见图 60
$U_o$	见图 48	见图 51	见图 54	见图 57	见图 60
输入波形	正弦波				
输入波形参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=1\mu\text{F}$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10\text{k}\Omega$ $C_2=10\text{nF}$
$U_i$	见图 49	见图 52	见图 55	见图 58	见图 61
$U_o$	见图 49	见图 52	见图 55	见图 58	见图 61

**实验结果分析：**（提示：**微分电路性能测量：**在微分电路的输入端加上不同的信号波形，利用双踪示波器观察输入和输出的波形，记录波形及参数，分析波形之间的关系。

**微分电路性能研究：**改变反馈电阻  $R_1$ ，由原来的  $10\text{k}\Omega$ ，改为  $20\text{k}\Omega$ ，可以调整微分电路的时间参数，观察波形的变化，记录波形相关参数，分析实验结果；如果电容  $C_2$  选择不合理，会导致输出波形发生何种变化？如果  $C_2$  由  $10\text{nF}$  改为  $1\mu\text{F}$ ，观察波形的变化，记录波形相关参数，分析实验结果。）



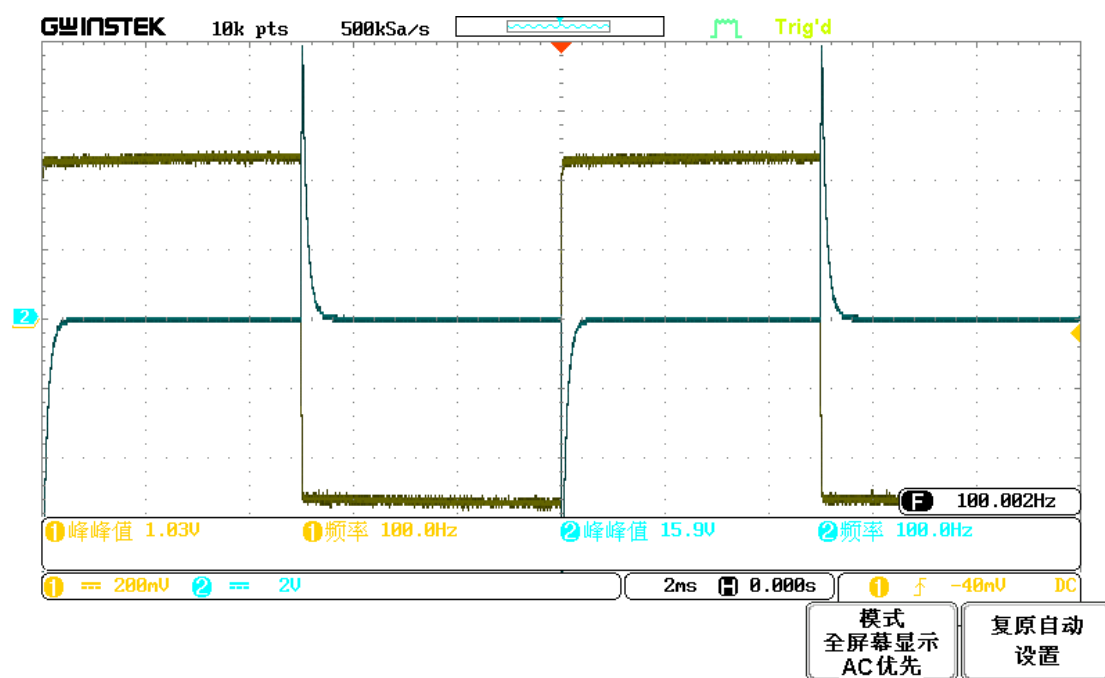


图 47

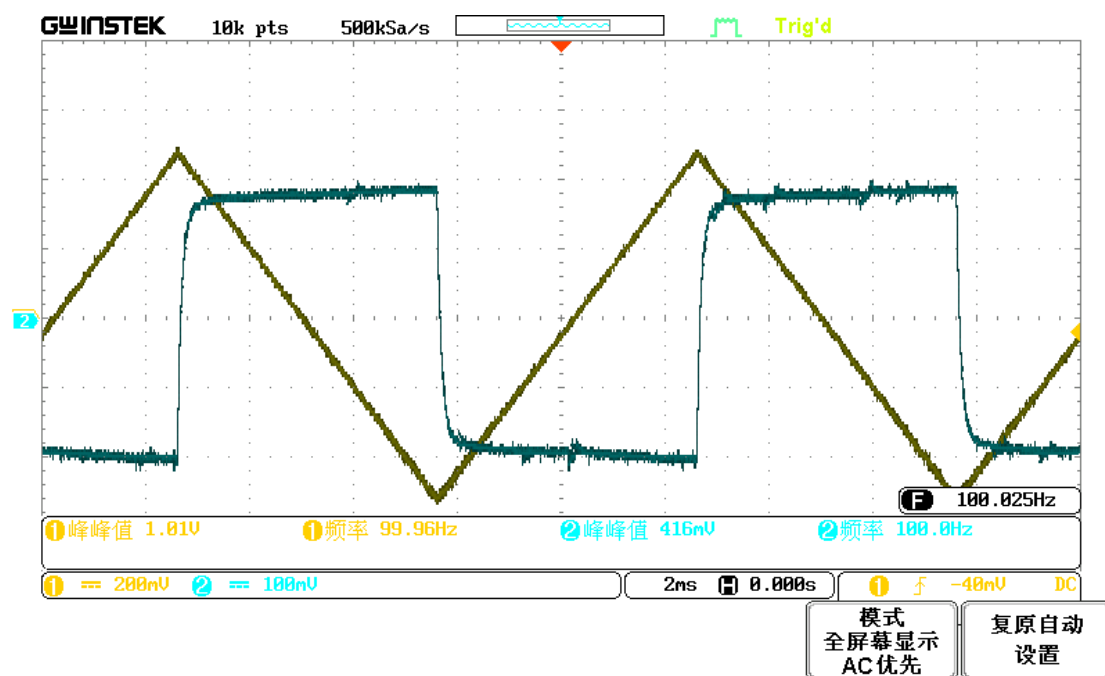


图 48

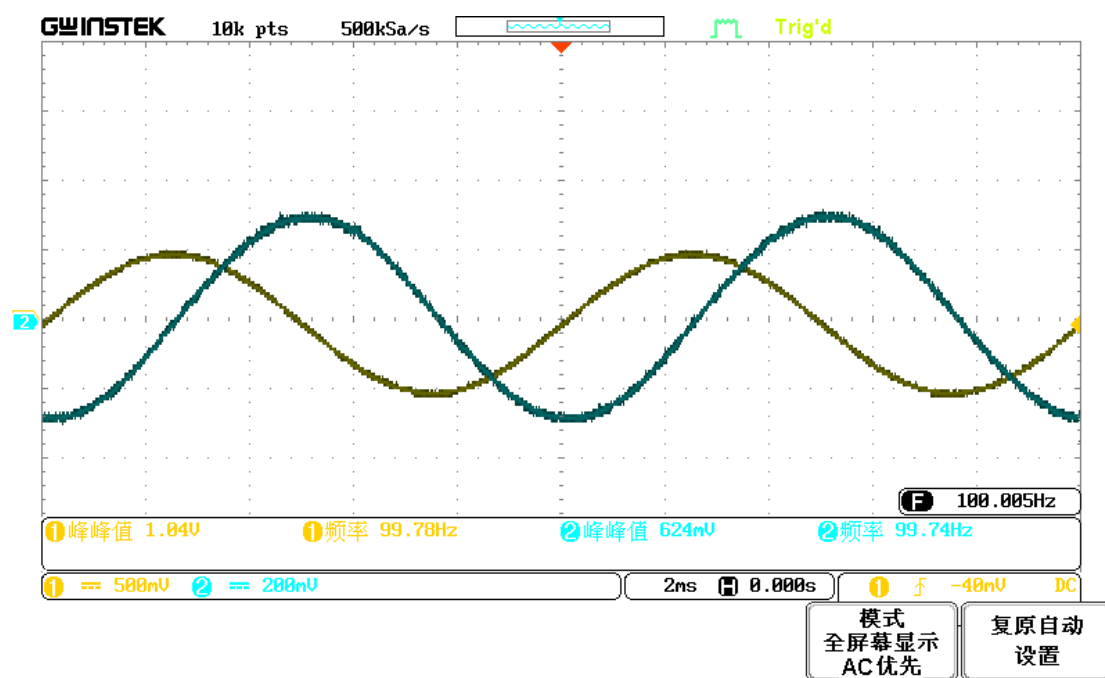


图 49

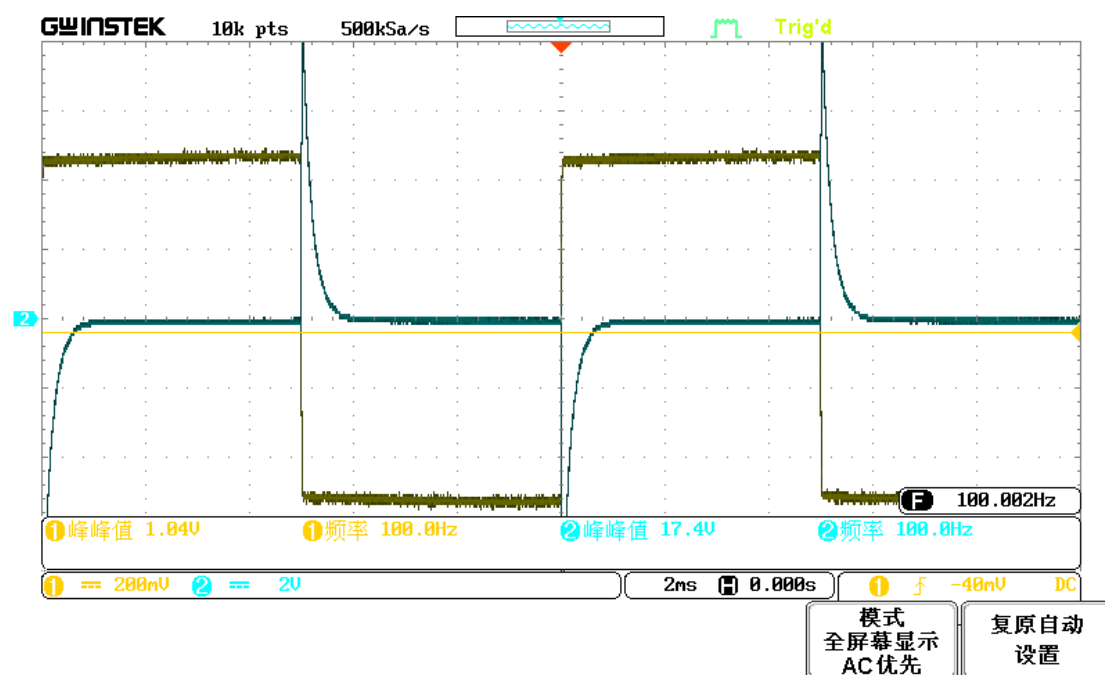


图 50

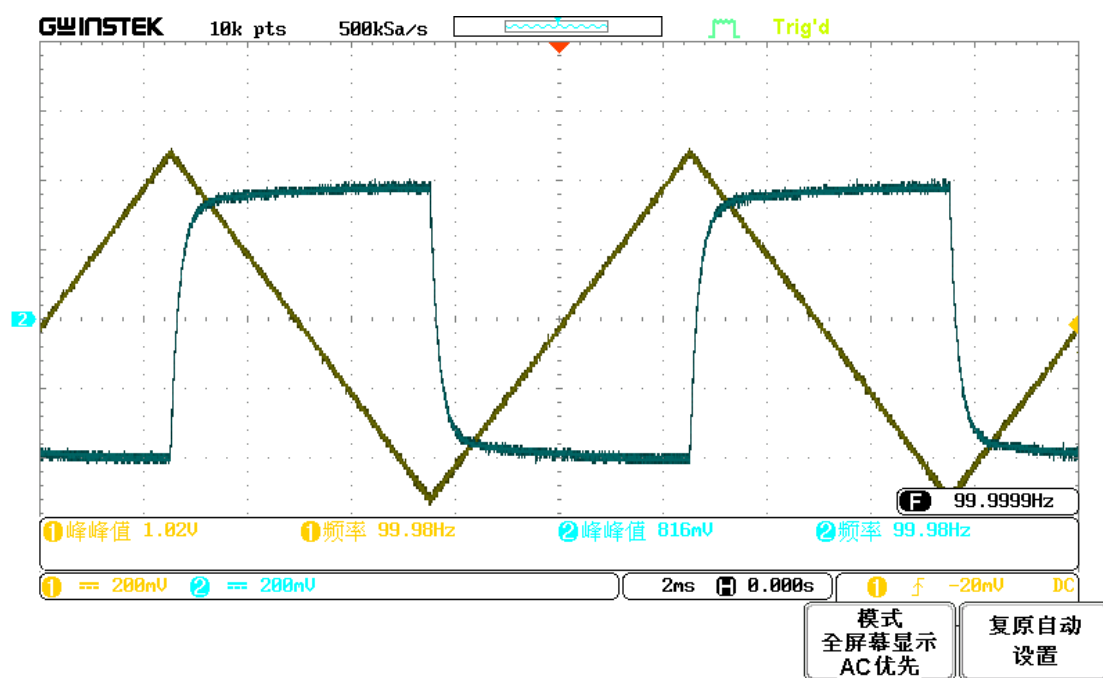


图 51

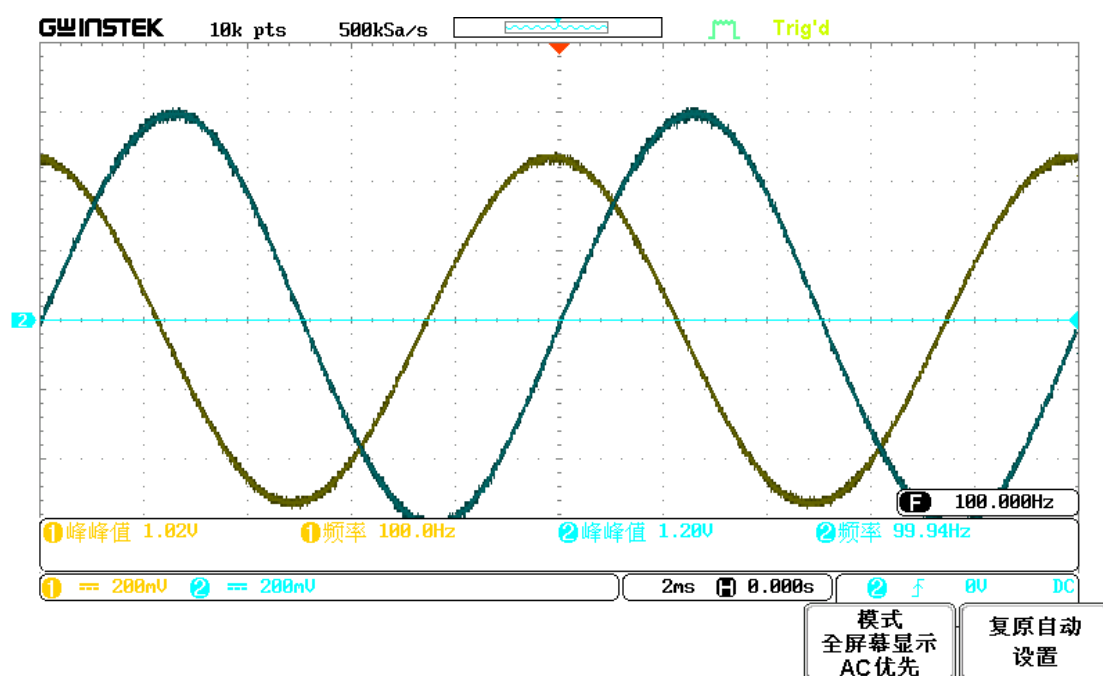


图 52

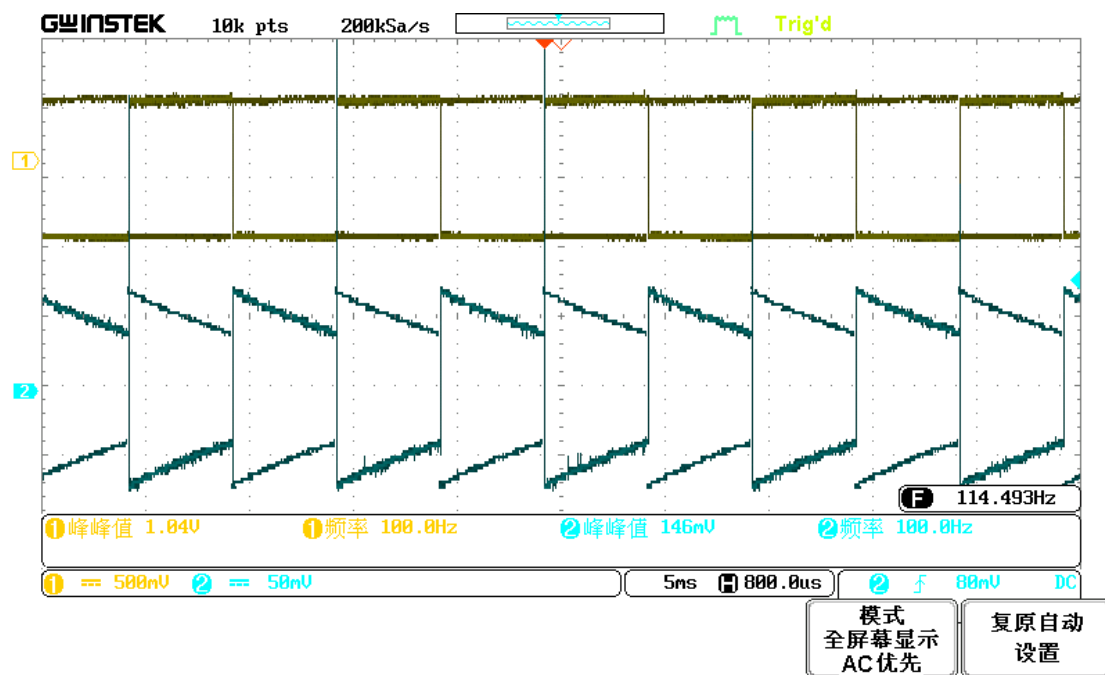


图 53

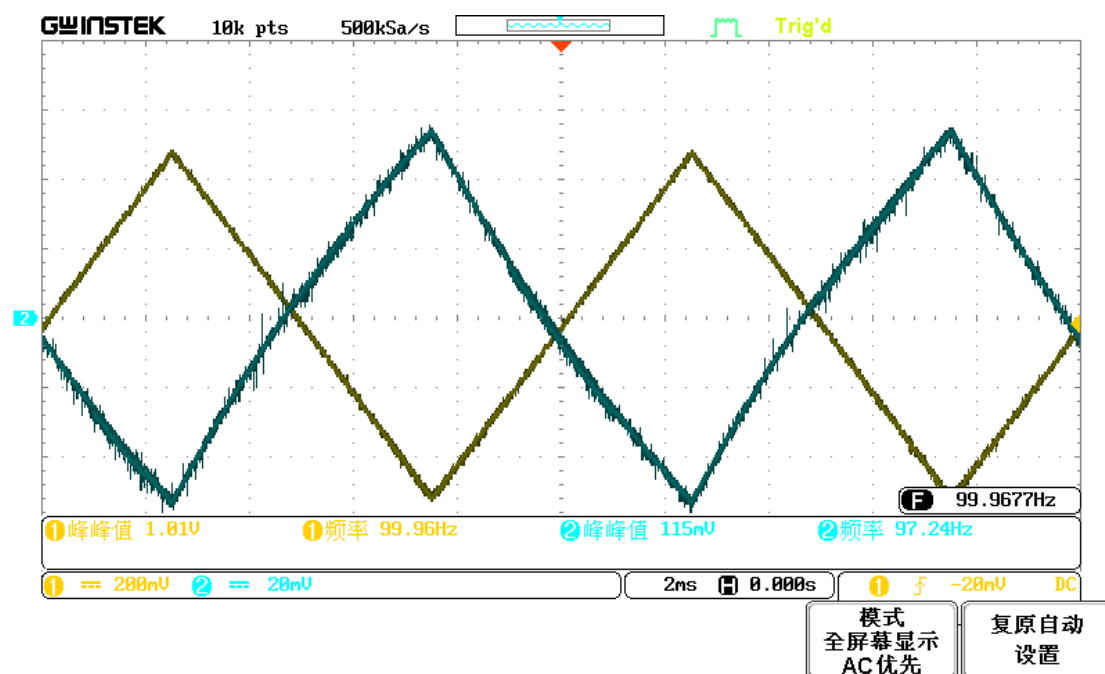


图 54

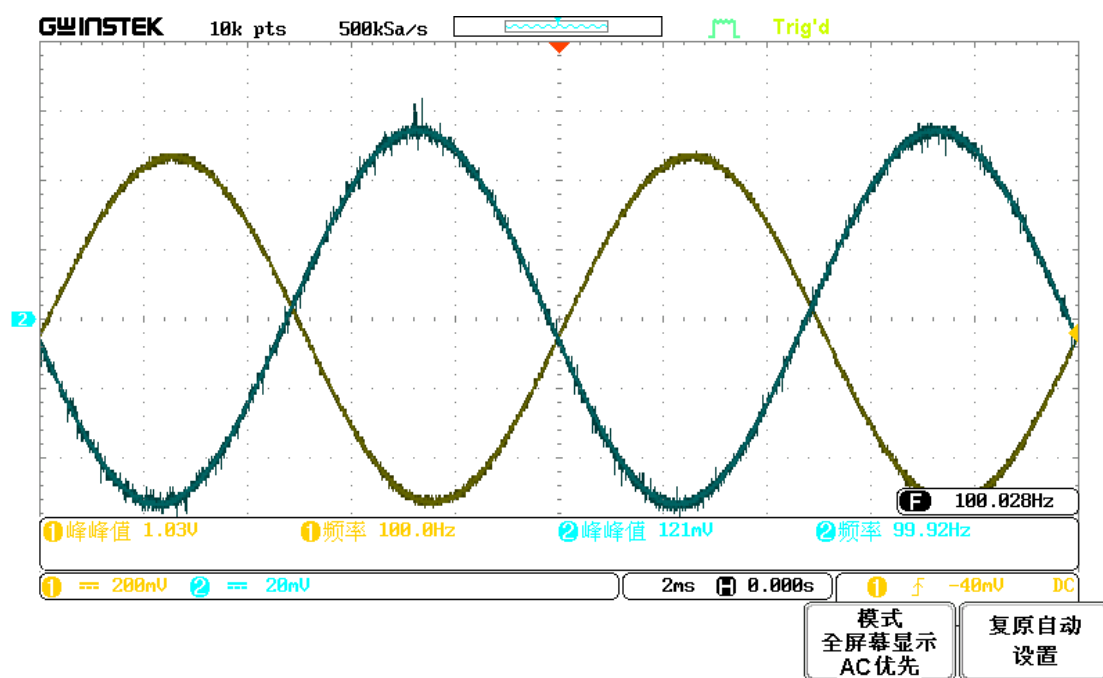


图 55

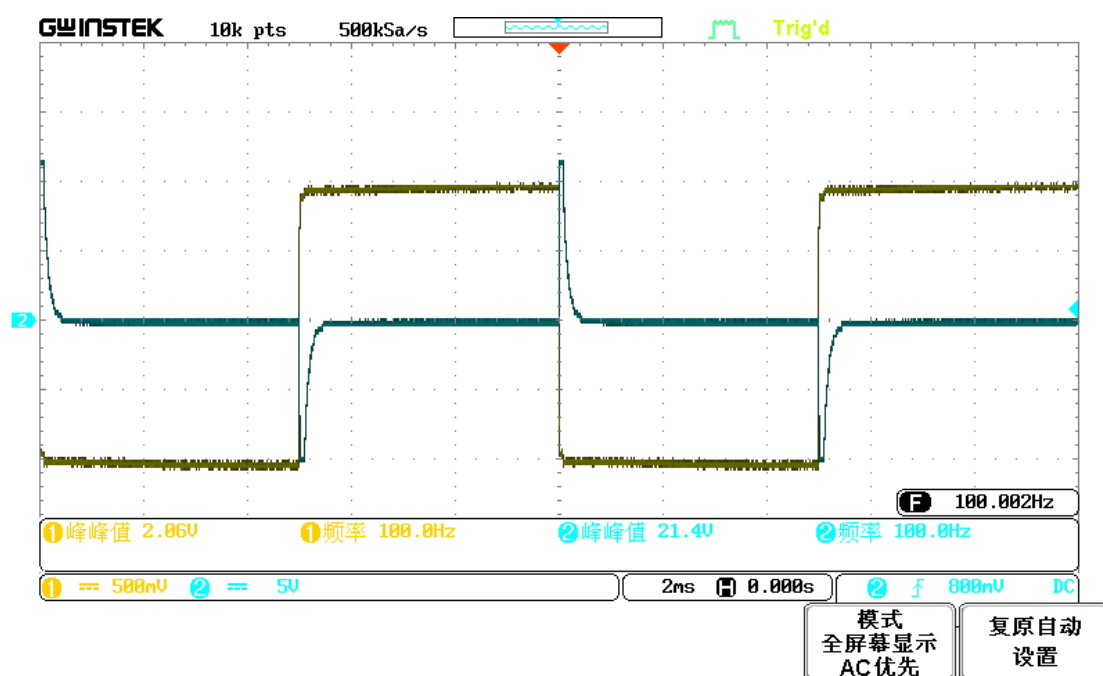


图 56

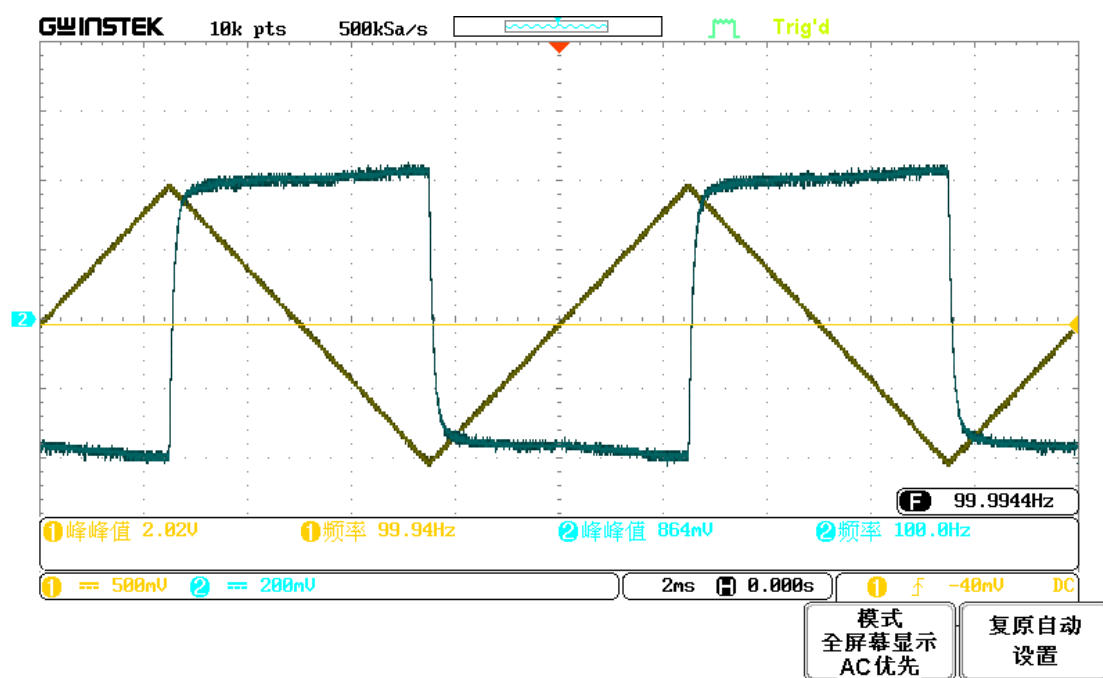


图 57

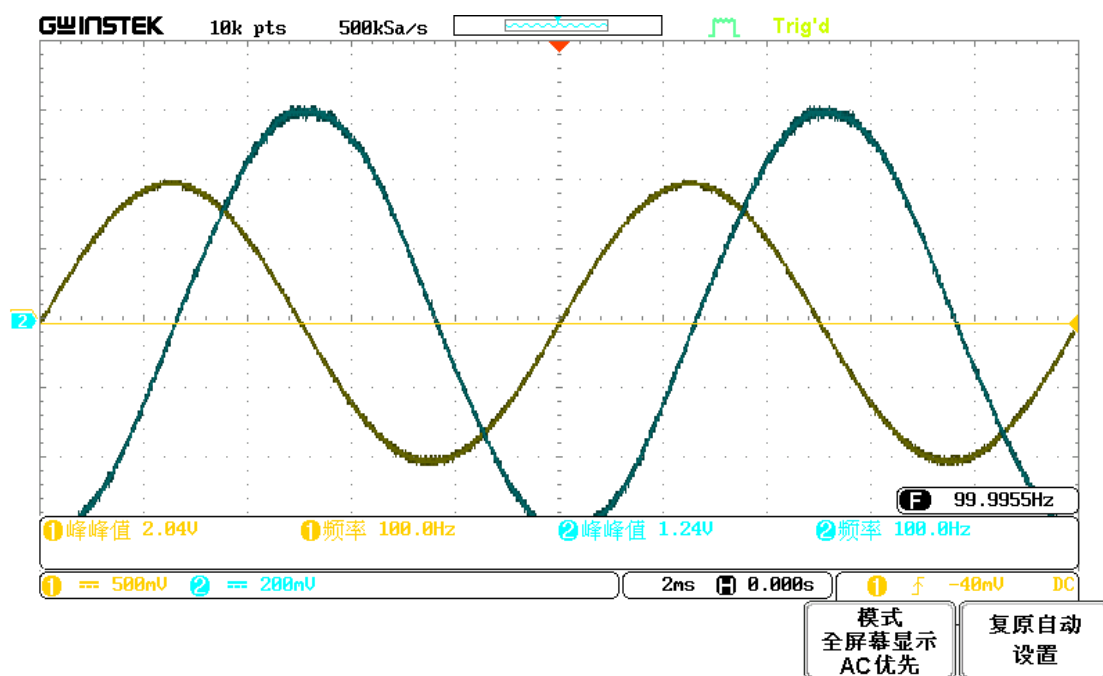


图 58

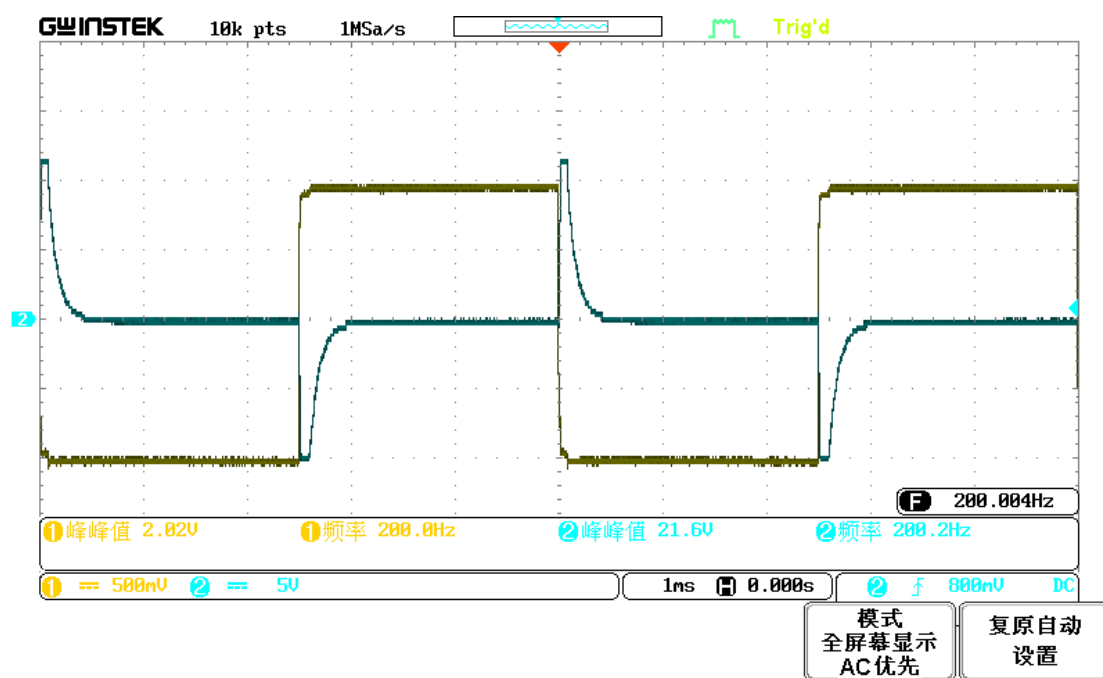


图 59

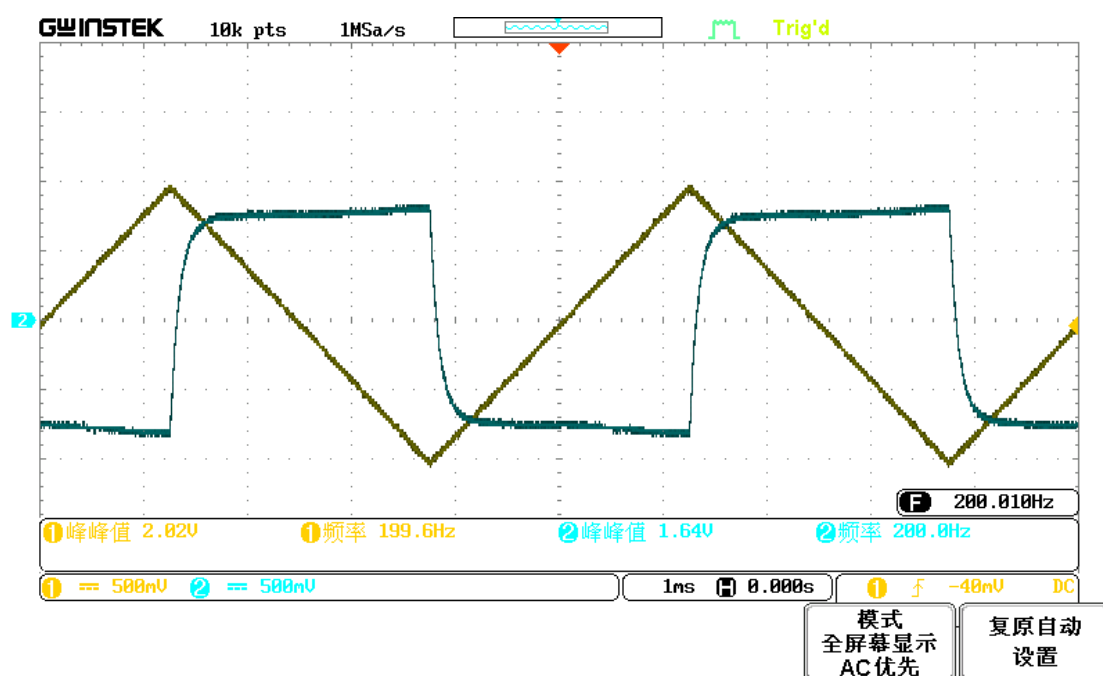


图 60

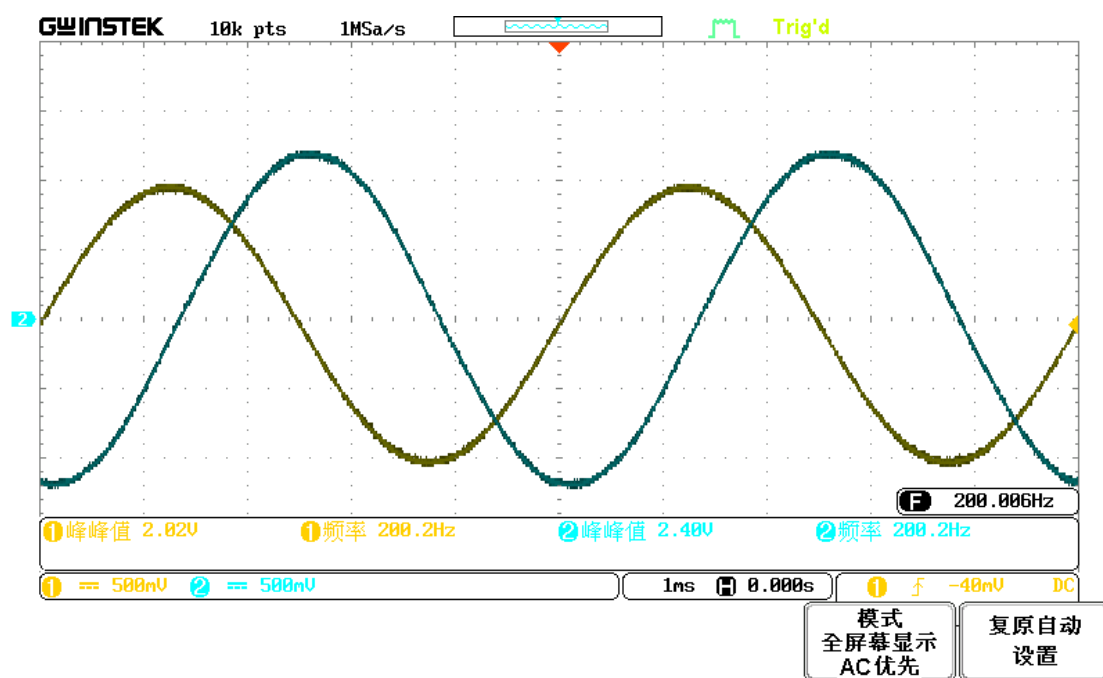


图 61

**实验结果分析：**（提示：**微分电路性能测量：**在微分电路的输入端加上不同的信号波形，利用双踪示波器观察输入和输出的波形，记录波形及参数，分析波形之间的关系。

当输入为方波时，输出为冲激信号。当输入为三角波时，输出为近似方波。当输入为正弦波时，输出为余弦波（相位滞后 90 度）。可见输出与输入成微分关系。

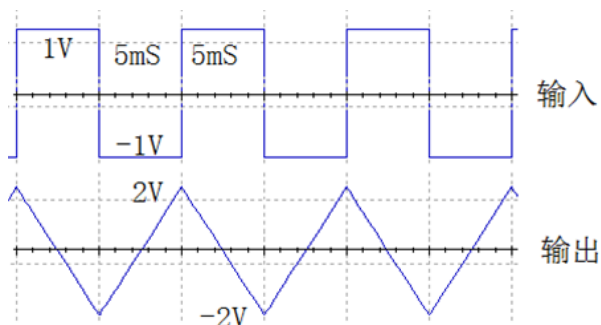
**微分电路性能研究：**改变反馈电阻  $R_1$ ，由原来的  $10k\Omega$ ，改为  $20k\Omega$ ，可以调整微分电路的时间参数，观察波形的变化，记录波形相关参数，分析实验结果；如果电容  $C_2$  选择不合理，会导致输出波形发生何种变化？如果  $C_2$  由  $10nF$  改为  $1\mu F$ ，观察波形的变化，记录波形相关参数，分析实验结果。）

- 当反馈电阻  $R_1$ ，由原来的  $10k\Omega$ ，变为  $20k\Omega$  时，输入为方波信号时，输出冲激信号峰值变大。输入为三角波和正弦波时，输出峰峰值变为原来两倍。与实验原理相一致。

- 当电容  $C_2$  选择不合理时，电路由微分电路变为反向比例放大电路。由图可知，当  $C_2$  由  $10nF$  改为  $1\mu F$  时，电路实现反向比例放大功能。这是因为  $f \ll f_c$ 。  $f_c = 1/2\pi RC$



(2) **积分电路：**设计一个波形变换电路，由输入方波转换成输出三角波，波形参数如图所示。完成转换电路的设计及仿真测量；按仿真设计的电路参数完成电路的连接；如果需要得到输出三角波不同的斜率或输出幅度，如何调整参数；如果输入波形的占空比不为 0.5，输出波形会发生什么变化？其他自主测量与发现（输出波形顶部或底部被削平的原因，工作频率和积分关系……）；拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形(见在线实验第 3 单元的作业)。



答：

积分电路运算电路仿真图：

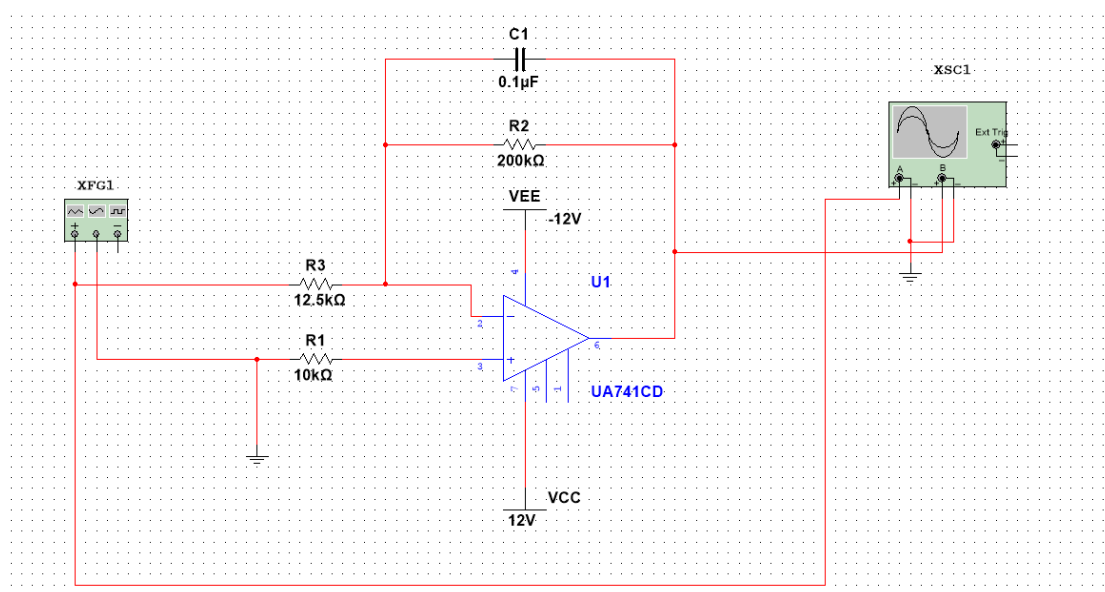


图 62

仿真示例：

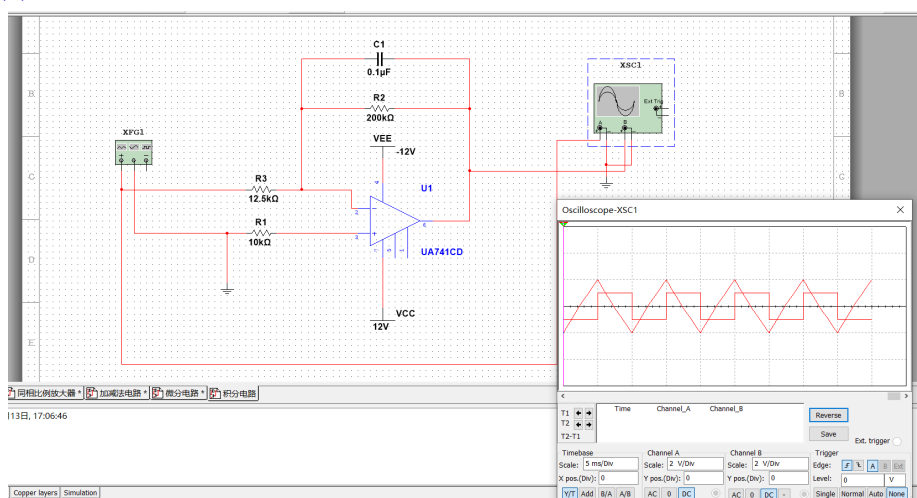


图 63

功能仿真演示：

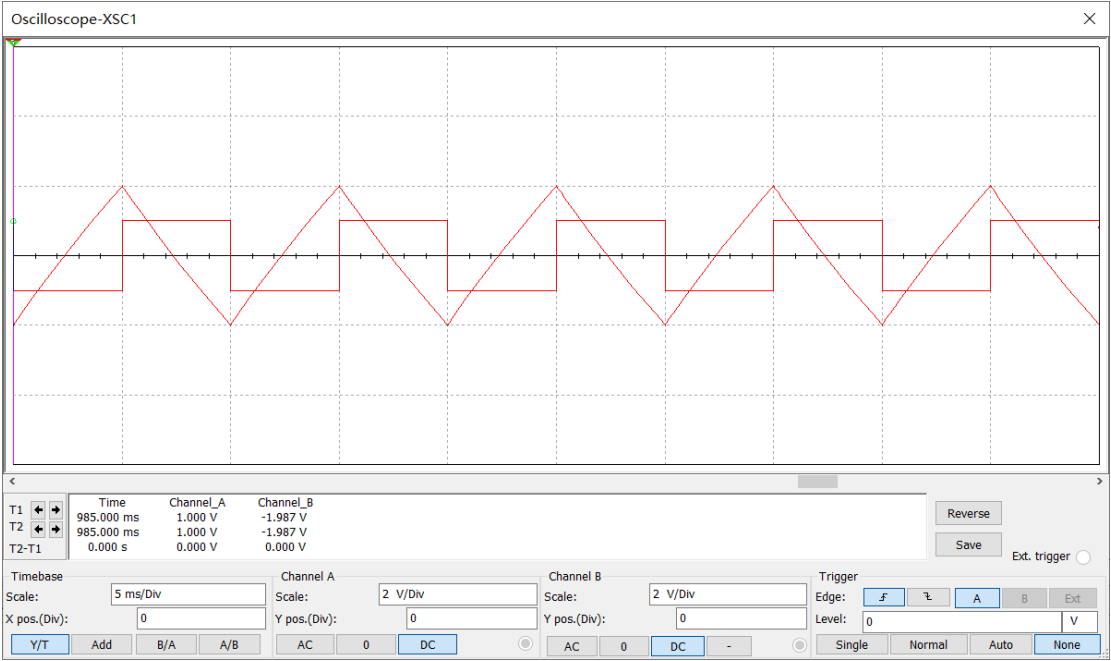


图 64

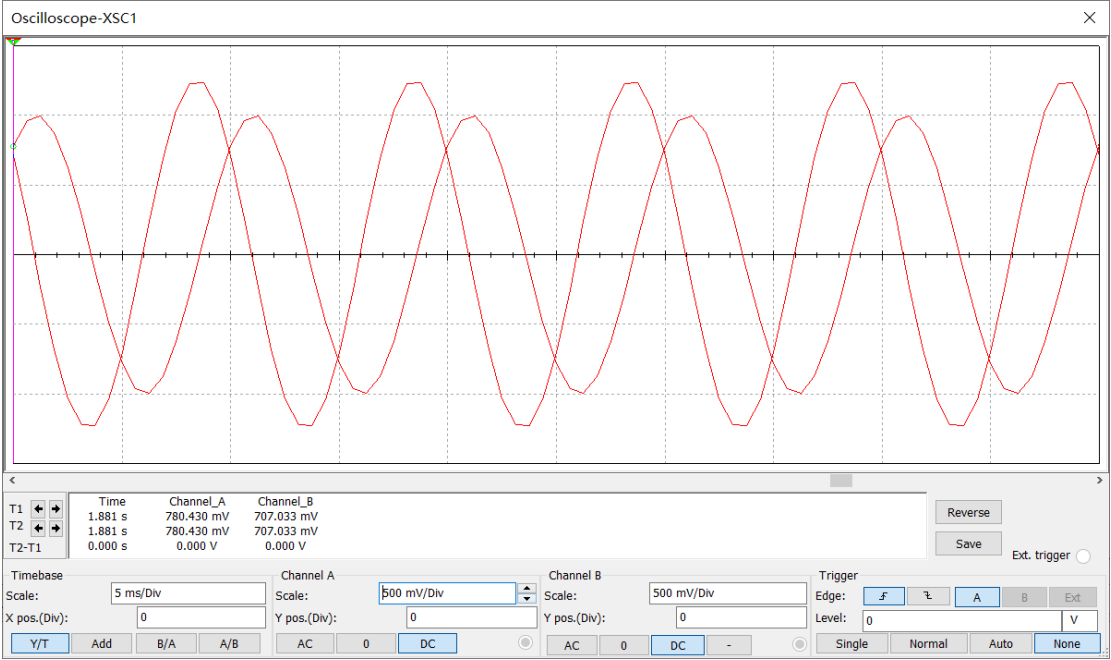


图 65

请自拟积分电路性能测量与研究记录表

输入波形	改变占空比				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp 50%	频率=100Hz 幅度=1Vpp 70%	频率=100Hz 幅度=1Vpp 40%	频率=100Hz 幅度=2Vpp 80%	频率 =200Hz 幅度=2Vpp 20%
$U_i$	见图 66	见图 67	见图 68	见图 69	见图 70
$U_o$	见图 66	见图 67	见图 68	见图 69	见图 70
输入波形	改变输出幅度				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp 50%	频率=100Hz 幅度=2Vpp 50%	频率=100Hz 幅度=4Vpp 50%	频率=100Hz 幅度=0.5Vpp 50%	频率 =200Hz 幅度 =0.25Vpp 50%
$U_i$	见图 66	见图 71	见图 72	见图 73	见图 74
$U_o$	见图 66	见图 71	见图 72	见图 73	见图 74
输入波形	改变输入频率				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp 50%	频率=200Hz 幅度=1Vpp 50%	频率=400Hz 幅度=1Vpp 50%	频率=50Hz 幅度=2Vpp 50%	频率=25Hz 幅度=2Vpp 50%
$U_i$	见图 66	见图 75	见图 76	见图 77	见图 78
$U_o$	见图 66	见图 75	见图 76	见图 77	见图 78

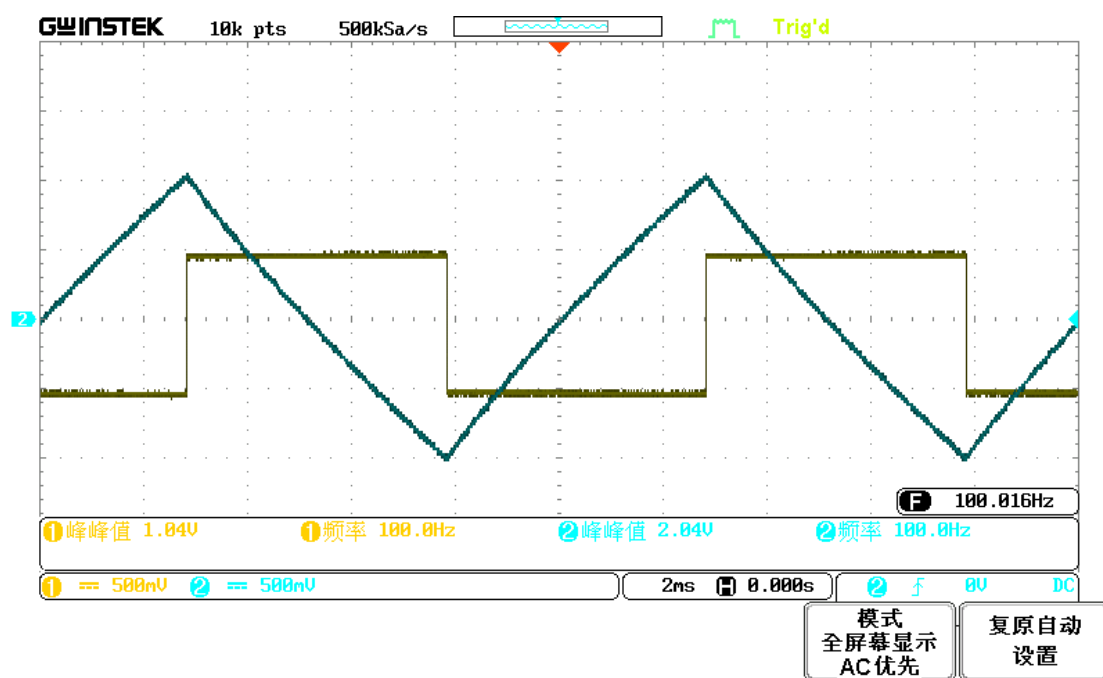


图 66

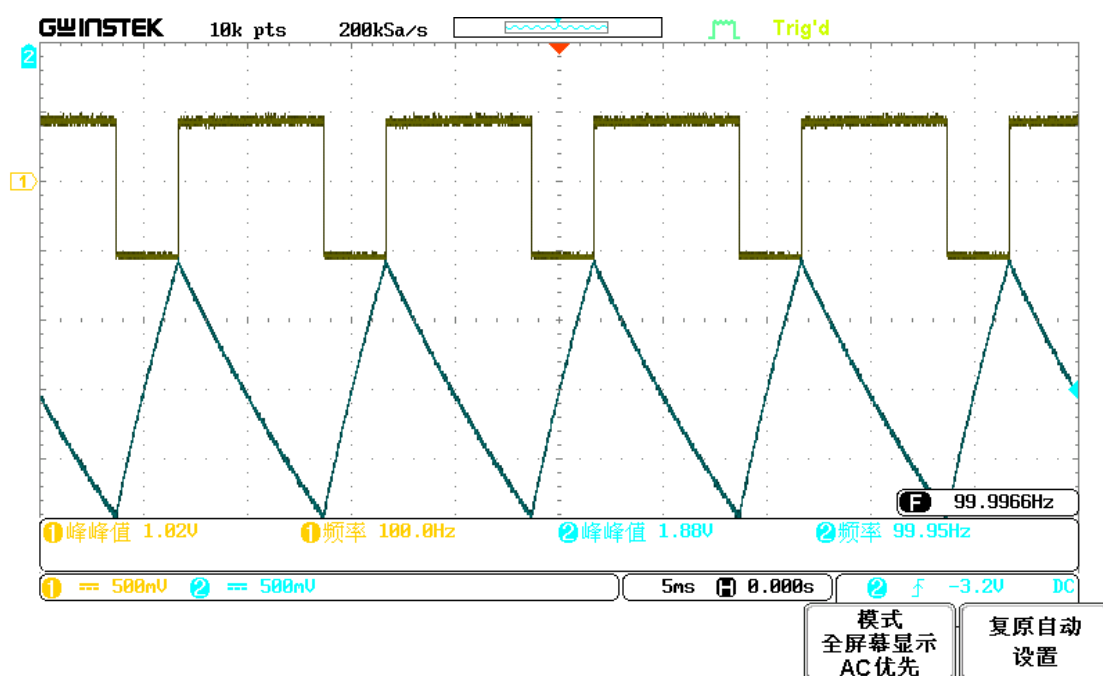


图 67

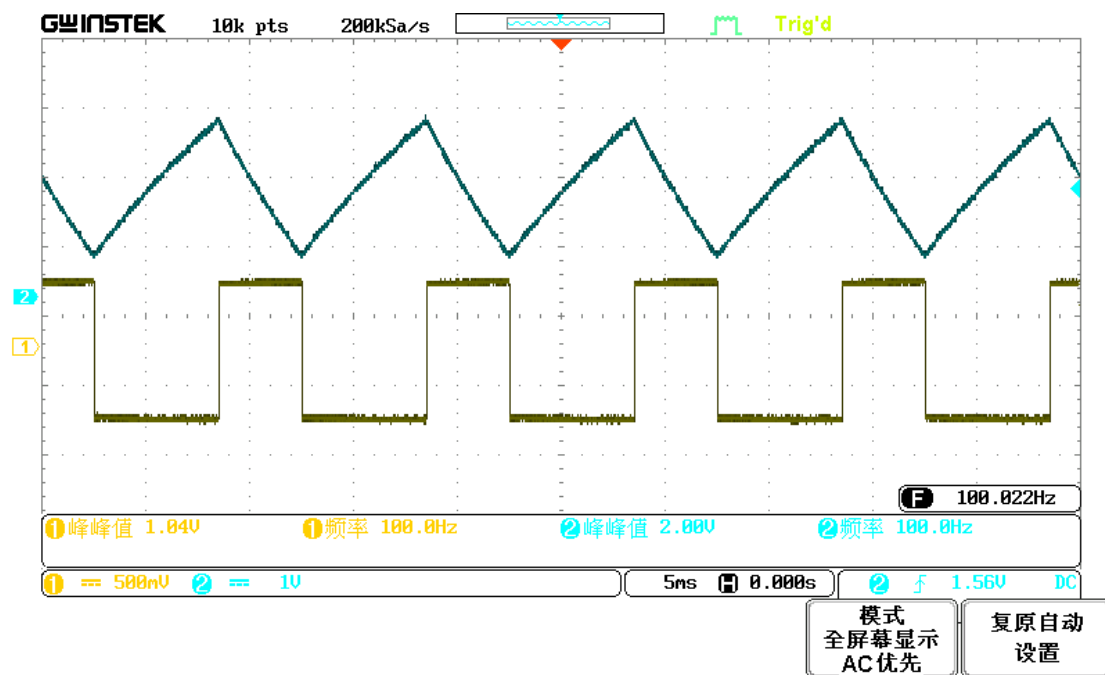


图 68

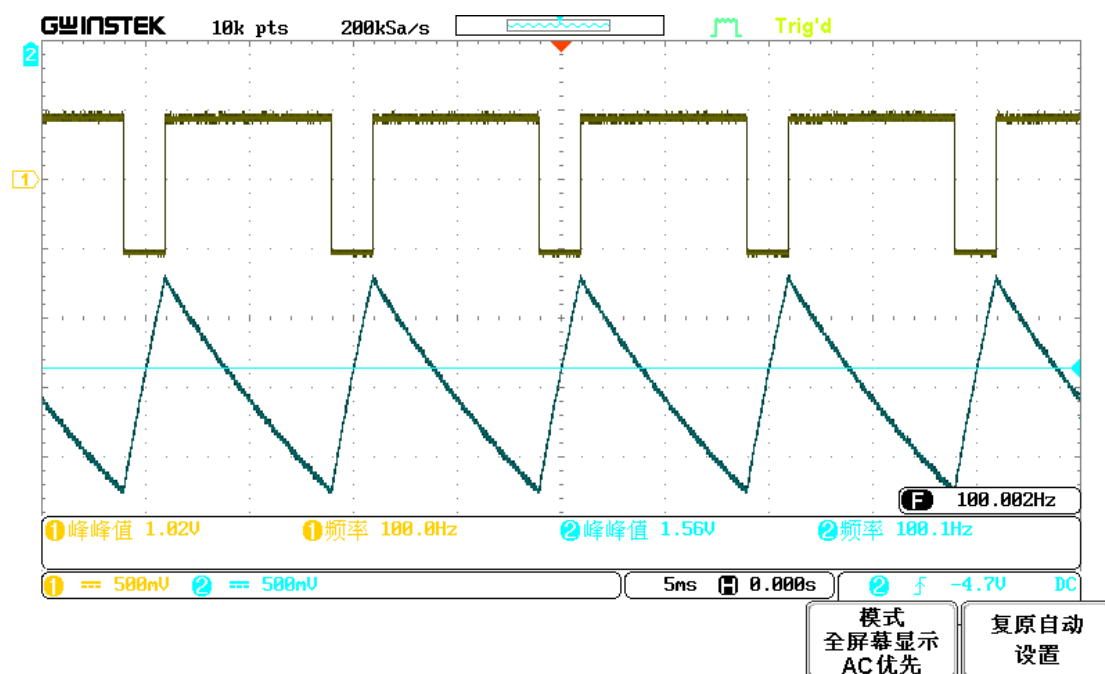


图 69

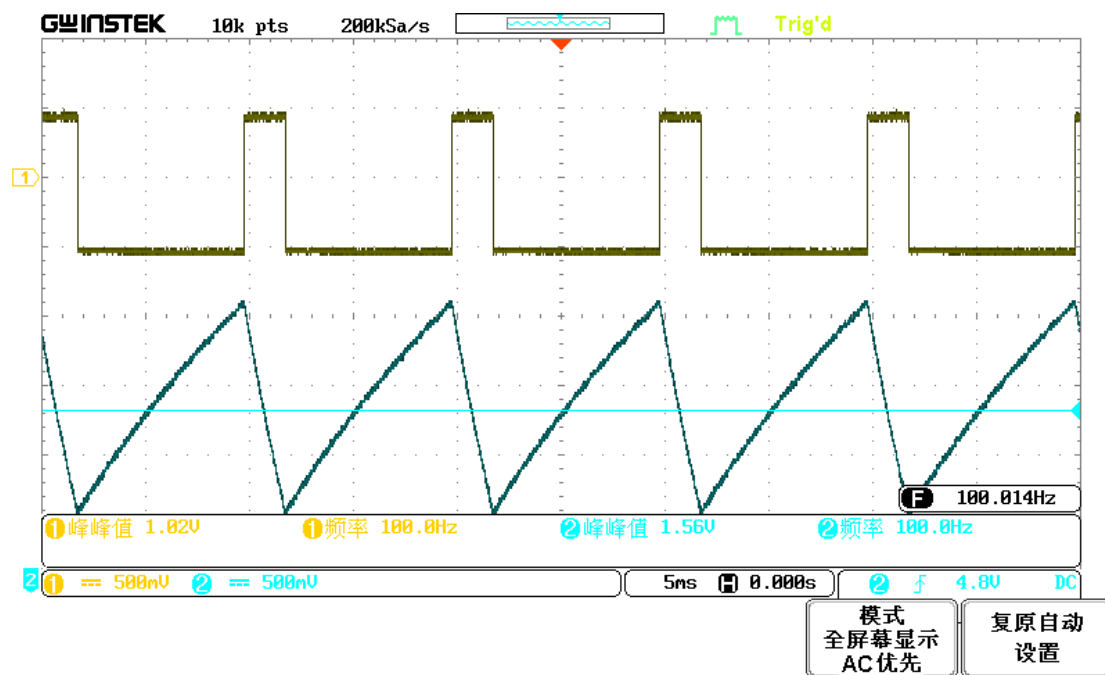


图 70

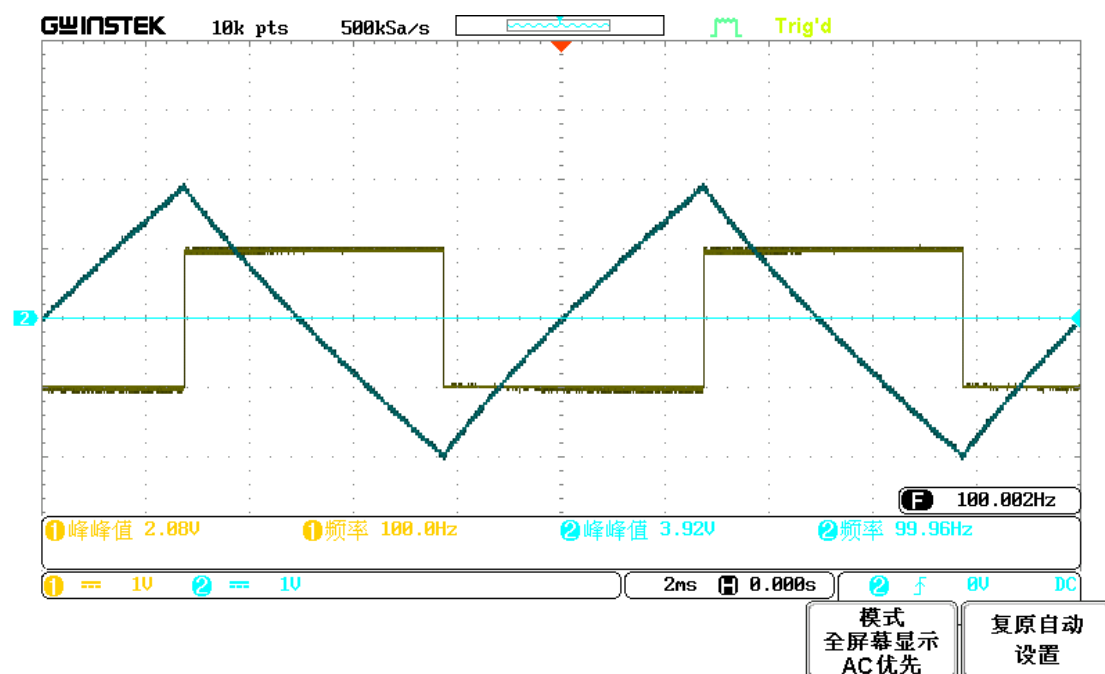


图 71

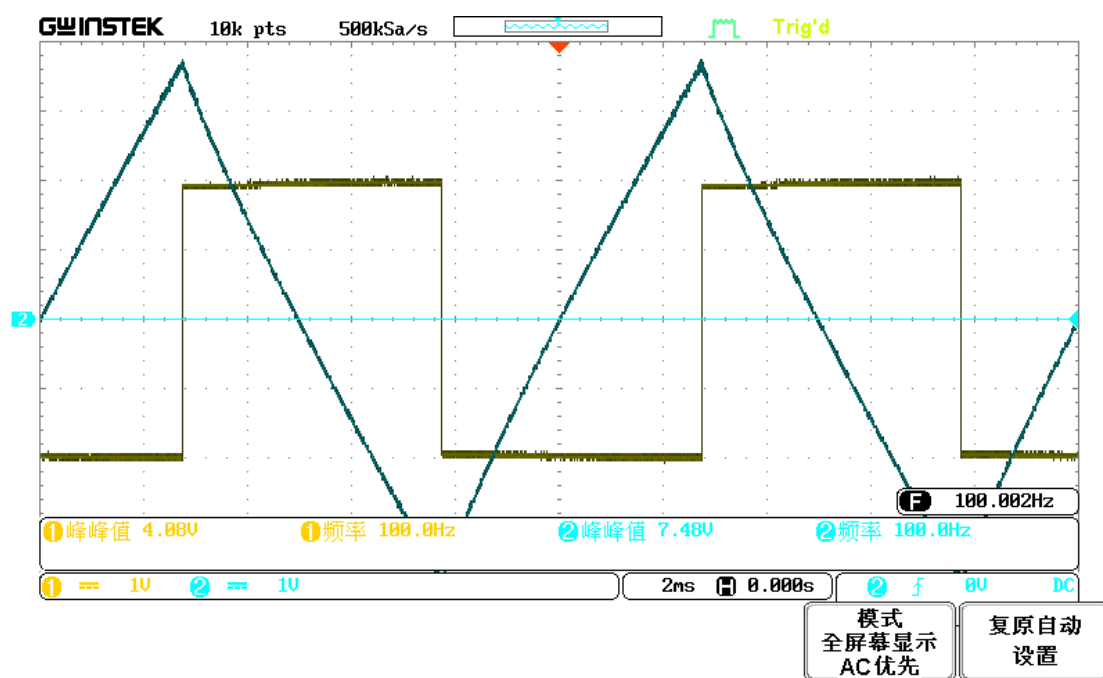


图 72

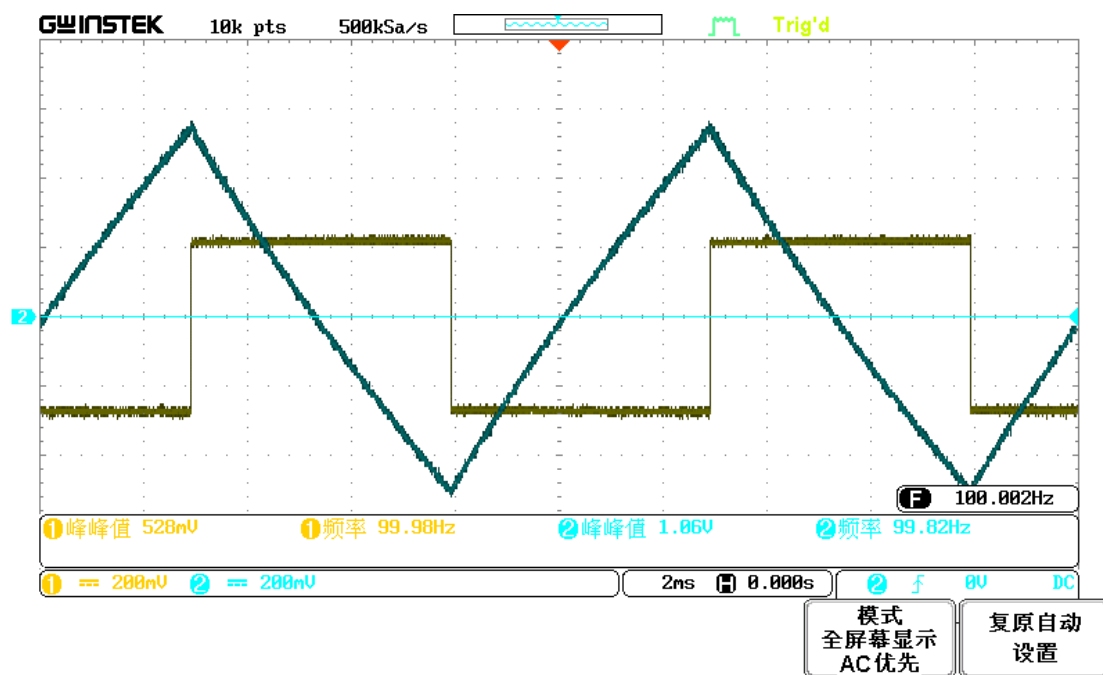


图 73

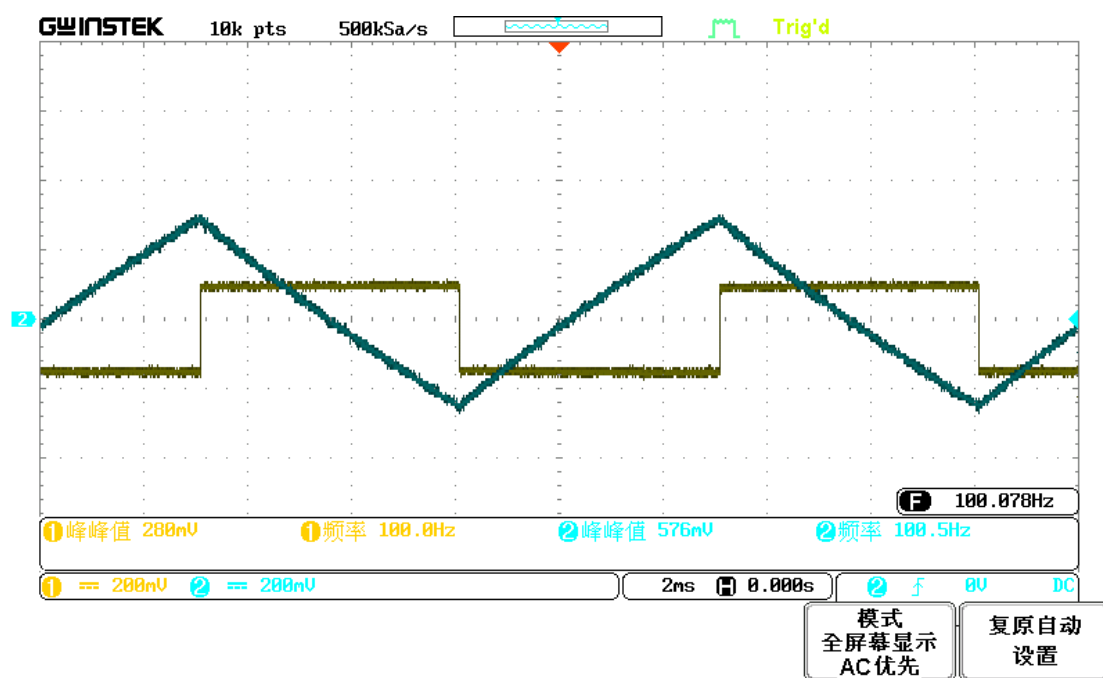


图 74

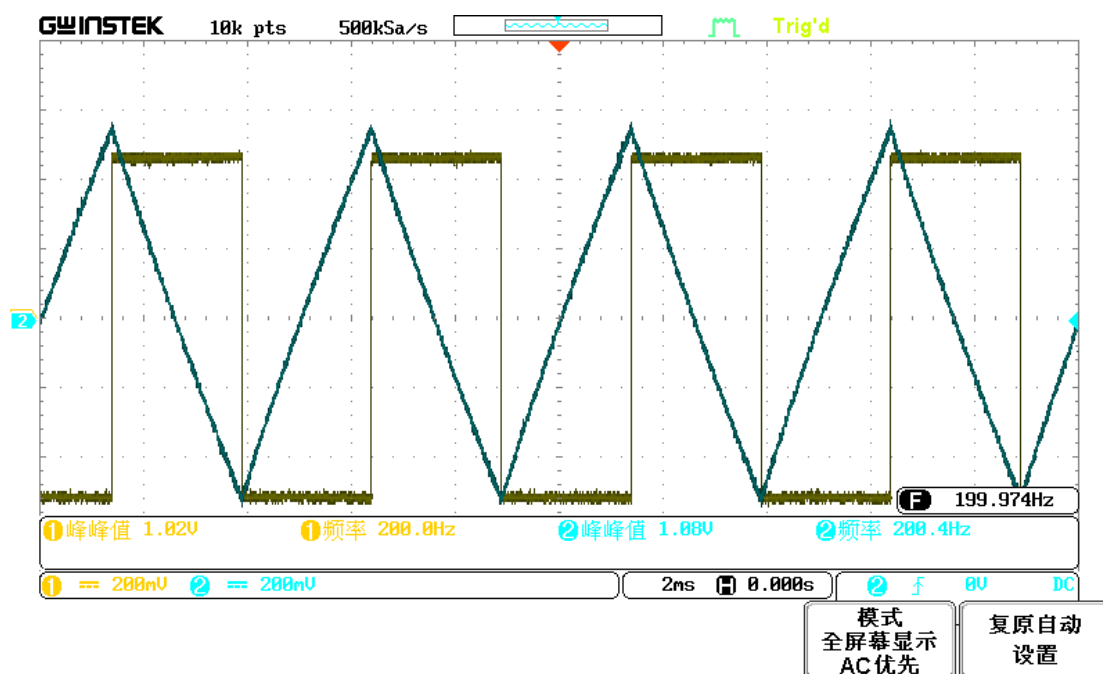


图 75



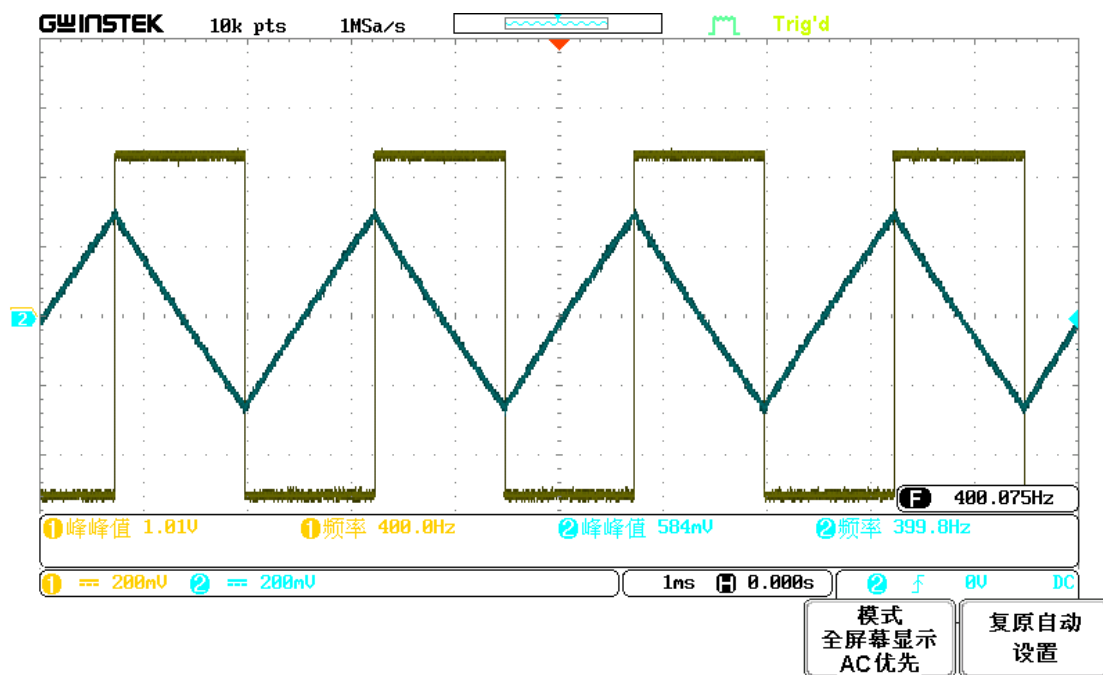


图 76

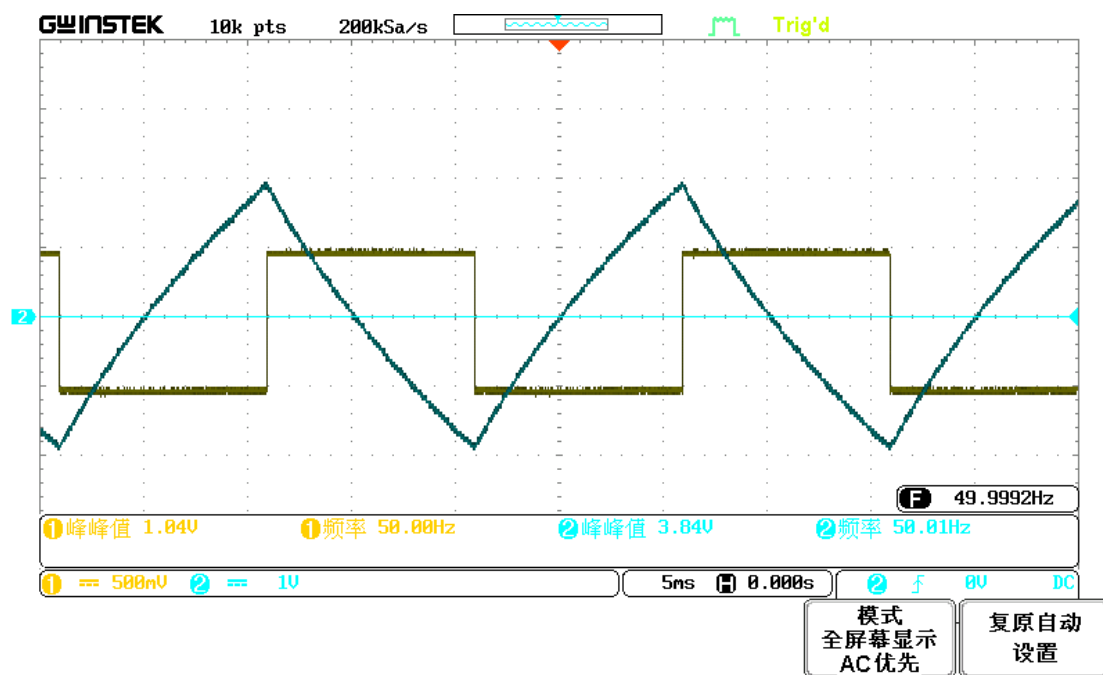


图 77

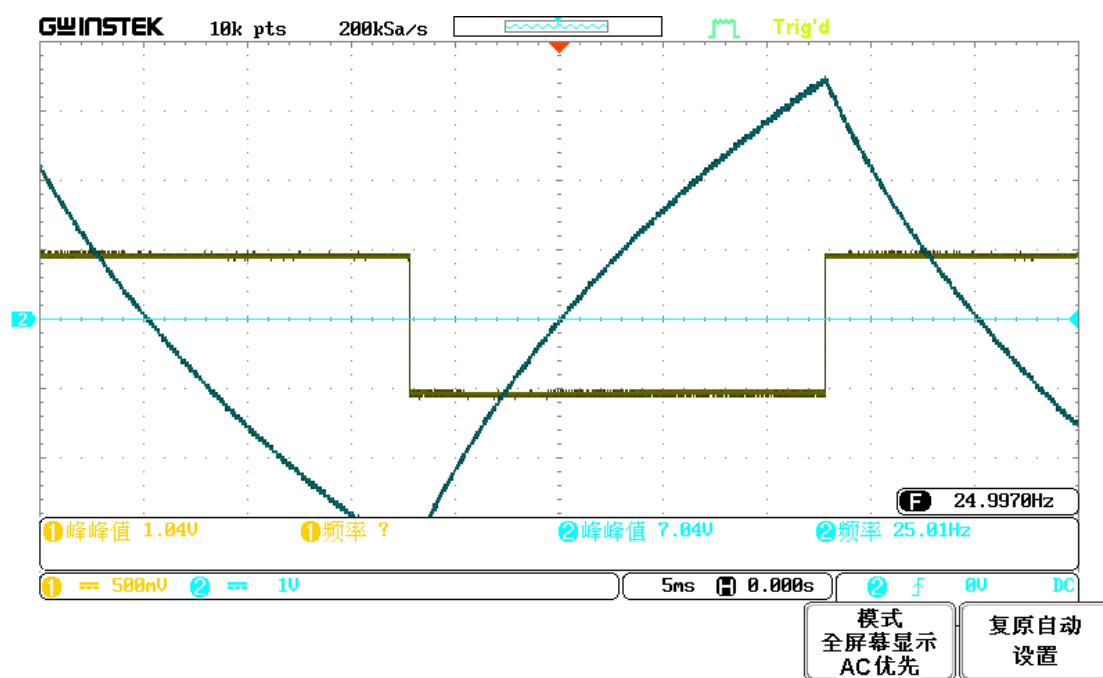


图 78

#### 实验结果分析：

- 当占空比改变，不再是百分之五十的时候，输出三角波的不对称。
- 当输入波形的峰峰值改变时输出三角波的斜率发生变化，当输入波形的频率发生改变时，输出三角波幅度发生改变。
- 当输出三角波的峰峰值电压理论值大于电源电压时，输出波形上下部会失真。
- 当输入频率过小时，波形发生失真，电路近似实现反向比例放大功能。这是因为  $f \ll f_c$ 。  

$$f_c = 1/2\pi RC$$

**注意：电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 1、2、3 单元的作业中。**

## 五、 实验总结

在本次实验中，我们进行了比例放大电路，减法电路，微分电路和积分电路的实验。了解了运算放大器的应用，同时使得模电课内知识更加巩固。比如：比例电路有同相比例和反向比例，同相比例输入电阻无穷大，但反向比例电路共模信号小。微分电路对高频噪声特别敏感，设计时要注意；输入为正弦波时，输出相位会变化，输出的相位会滞后 90 度；利用运放同相端和反相端实现减法等一些知识。同时，为了实现要求的具体功能，我们要在设计微分和积分电路时要注意选择电阻和电容值。在本次实验中，示波器的使用是更加重要的，经过本次实验，对示波器的使用经验得到了进一步的丰富。

## 六、 实验建议（欢迎大家提出宝贵意见）

希望实验室要求我们做更多较为有趣的实验，增加做实验的趣味性。

## 七、 参考文献

- [1] 运算放大器 UA741datasheet
- [2] 模拟电子电路基础