

课程名称: 模拟电子电路实验

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: 顾豪阳 学 号: 06220143

实 验 室: \_\_\_\_\_ 实验组别: \_\_\_\_\_

同组人员: 实验时间: 2022 年 4 月 7 日

评定成绩: 审阅教师:

## 一、 实验目的

1. 了解运放的基本特性，以运放构成的反相比例放大电路为例，研究比例放大电路的基本性能；
2. 掌握运放的最大输出电压和最大输出电流的测量及分析；
3. 掌握放大电路交、直流特性的测量方法
4. 掌握放大电路传输特性的概念及测量方法。

## 二、 实验要求

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。

## 三、 实验原理（主要写用到的的理论知识点，不要长篇大论）

### 1、实际运放与理想运放

运算放大器是性能非常好的器件，在很多场合把一些性能都进行理想化处理，如开环增益为无穷大、输入阻抗无穷大、输出阻抗为零等等。在运放器件选择合理、电路各项参数设计合理的情况下，有些参数当成理想化处理所造成的误差也会在工程允许的范围，在很多应用场合可以把运放的有些参数按理想情况处理。实际这些参数不可能达到理想值，所以在实验中要注意实际参数对电路的影响。

### 2、反相比例放大电路

反相比例放大电路如图所示， $R_1$  为输入电阻， $R_F$  为反馈电阻，确保运放构成的电路工作在线性状态。 $V_{CC}$  为运放工作的正电源， $V_{EE}$  为运放工作的负电源，一般情况下运放都是在正负双电源情况下工作。同相端到地接的电阻也叫平衡电阻  $R_P$ ，其阻值一般选  $R_1$  和  $R_F$  的并联值， $R_L$  为负载电阻，反馈电阻  $R_F$  值一般为几千欧至几百千欧，太大容易产生较大的噪声及漂移。 $R_1$  的取值应远大于信号源  $U_i$  的内阻，也要远小于运放的输入电阻。

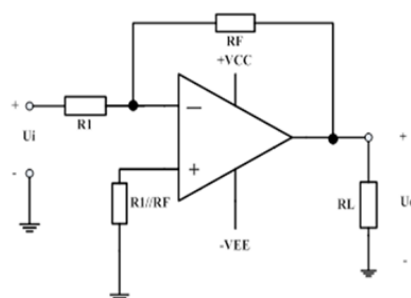


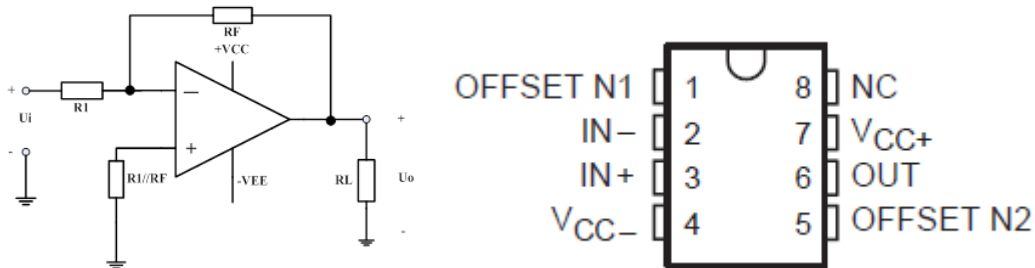
图 1.1 反相比例运算电路

如果把运放当成理想器件，利用“虚短”和“虚断”特性分析可知，电路的放大倍数为  $A_u = -R_F/R_1$ ，输入电阻  $R_i = R_1$ ，输出电阻  $R_0 = 0$ 。若  $R_F = R_1$ ，则为倒相器，可作为信号的极性转换电路。

## 四、 实验内容

### 1. 实验内容一（见 mooc 在线实验 1）：

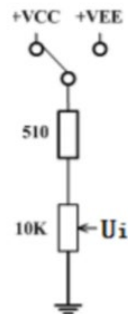
反相输入比例运算电路各项参数测量实验（预习时，查阅  $\mu A741$  运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义）。



#### （1）直流特性测量：

图 1.1 中电源电压  $\pm 15V$ ， $R_1 = 10k\Omega$ ， $R_F = 100k\Omega$ ， $R_L = 100k\Omega$ ， $R_P = 10k\Omega/100k\Omega$ 。按图连接电路，输入直流信号  $U_i$  分别为  $-2V$ 、 $-0.5V$ 、 $0.5V$ 、 $2V$ ，用万用表测量对应不同  $U_i$  时的  $U_o$  值，列表计算  $A_u$  并和理论值相比较。其中  $U_i$  通过电阻分压电路产生。

实际搭接电路中，可以选择选用  $510\Omega$  电阻配合  $10k\Omega$  电位器（103）构成分压电路，或者使用函数发生器 DC 波形输出，电路图如下：



易派测量结果如图：

首先调节  $V_{CC+}$  和  $V_{CC-}$  的值分别为  $+15$  和  $-15$ 。



当输入电压为 0.5V:



当输入电压为-0.5V:



当输入电压为 2V:



当输入电压为-2V:



数据记录如下表格

直流特性测量记录表			
U <sub>i</sub> /V	U <sub>o</sub> /V	A <sub>u</sub>	
		测量值	理论值
-2	14.30	-7.15	-10
-0.5	4.94	-9.88	-10
0.5	-4.94	-9.88	-10
2	-12.93	-6.47	-10

### 实验结果分析:

当输入  $\pm 0.5\text{V}$  时, 误差允许的范围内, 可以认为符合运放的放大性质, 即  $\mu\text{A}741$  工作在线性放大区, 放大倍数为 10; 当输入  $2\text{V}$  时运放工作在非线性区, 此时输出电压的大小取决于运放的最大输出电压  $V_{\text{omax}}$ 。

(注:  $V_{\text{omax}} = V_{\text{cc}} - (1 \sim 2)\text{V}$ )。

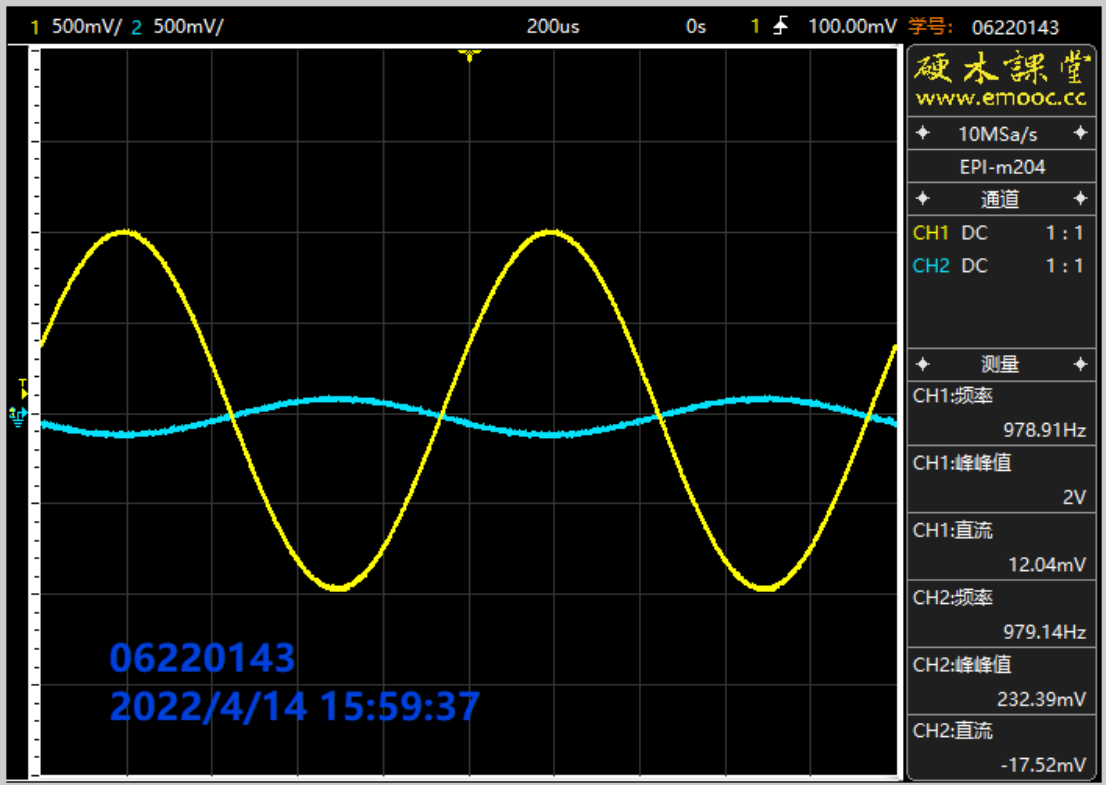
### (2) 交流特性测量:

设定输入信号频率为  $1\text{kHz}$  的正弦波, 调整不同的信号幅度, 用双踪示波器观察并记录输入输出波形, 在输出不失真的情况下测量交流电压增益, 并和理论值相比较。注意此时不需要接电阻分压电路。

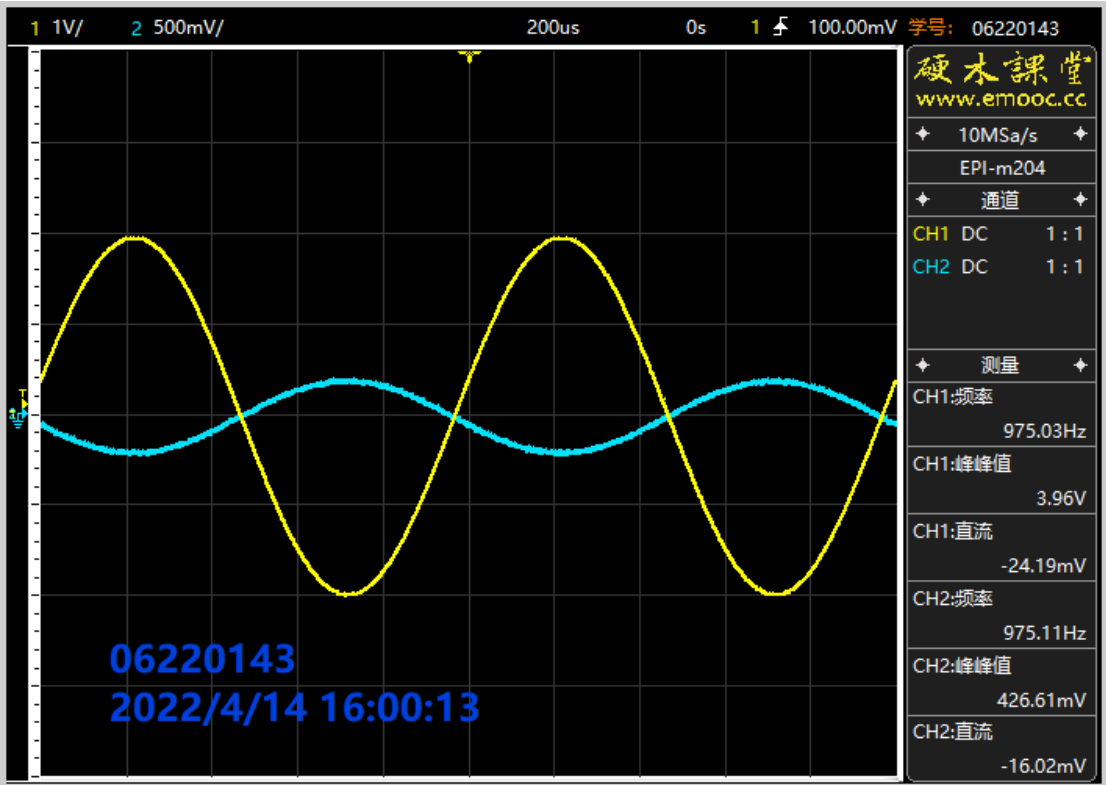
交流特性测量记录表				
U <sub>i</sub>	U <sub>o</sub>		增益	
峰峰值 (mV <sub>pp</sub> )	峰峰值 (V <sub>pp</sub> )	波形	A <sub>u</sub>	误差 (%)
200	2.00	见下图①	10	0
400	3.96	见下图②	9.9	1
4000	27.25	见下图③	6.8	32
2570	25.04	见下图④	9.7	3

		(请测量记录 最大不失真输出 波形)		
--	--	--------------------------	--	--

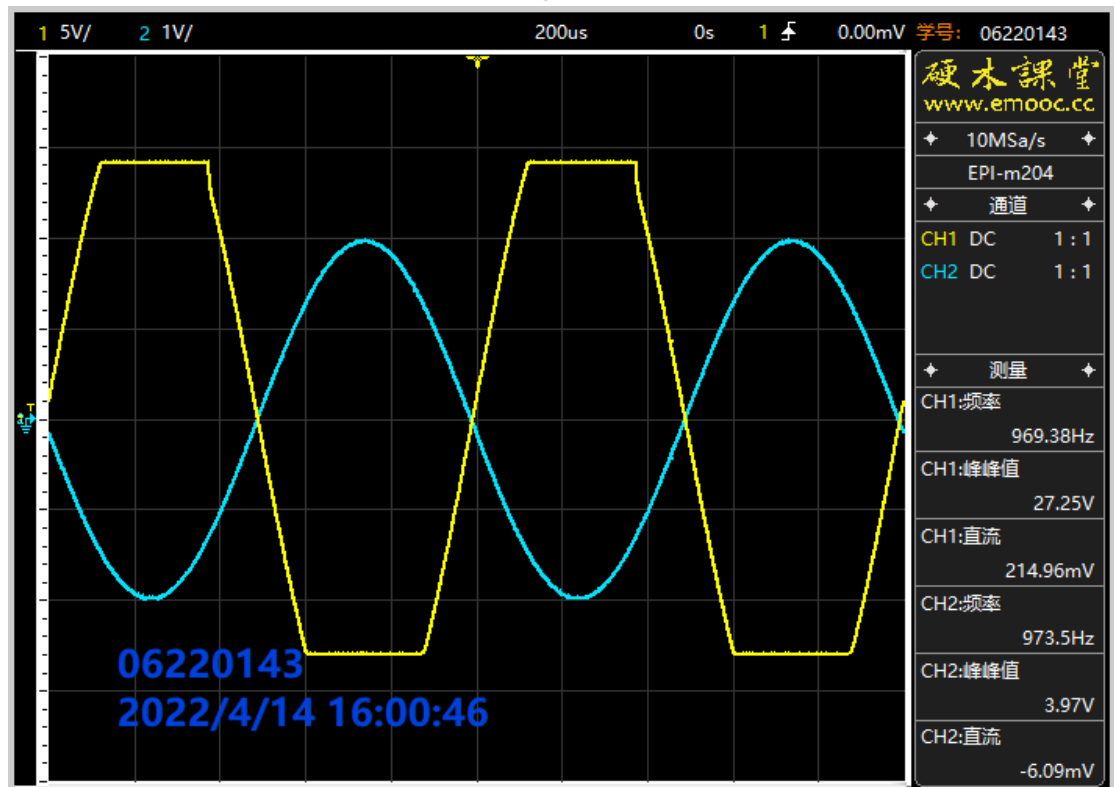
表格 1



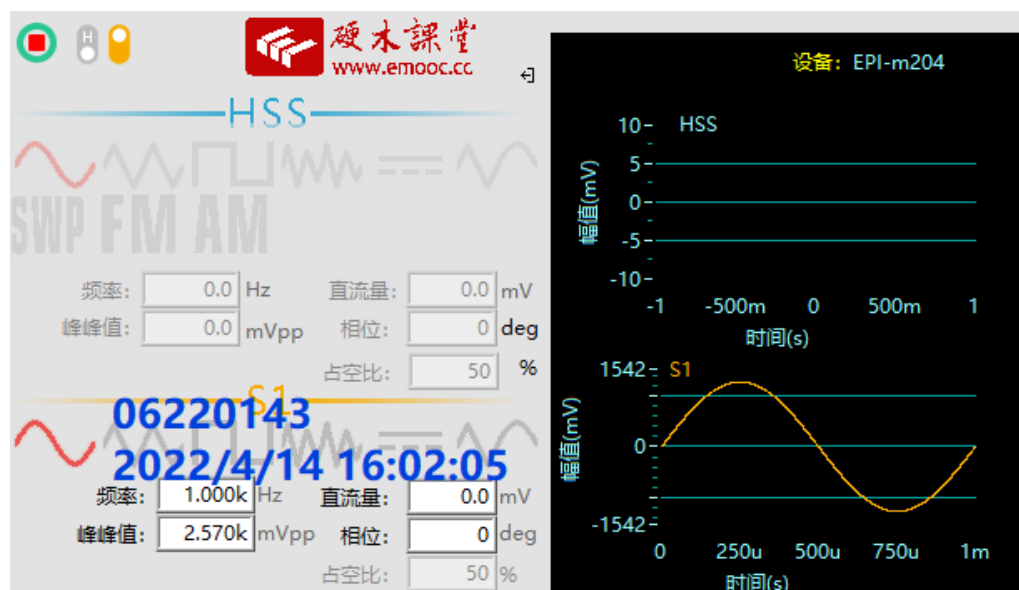
图①

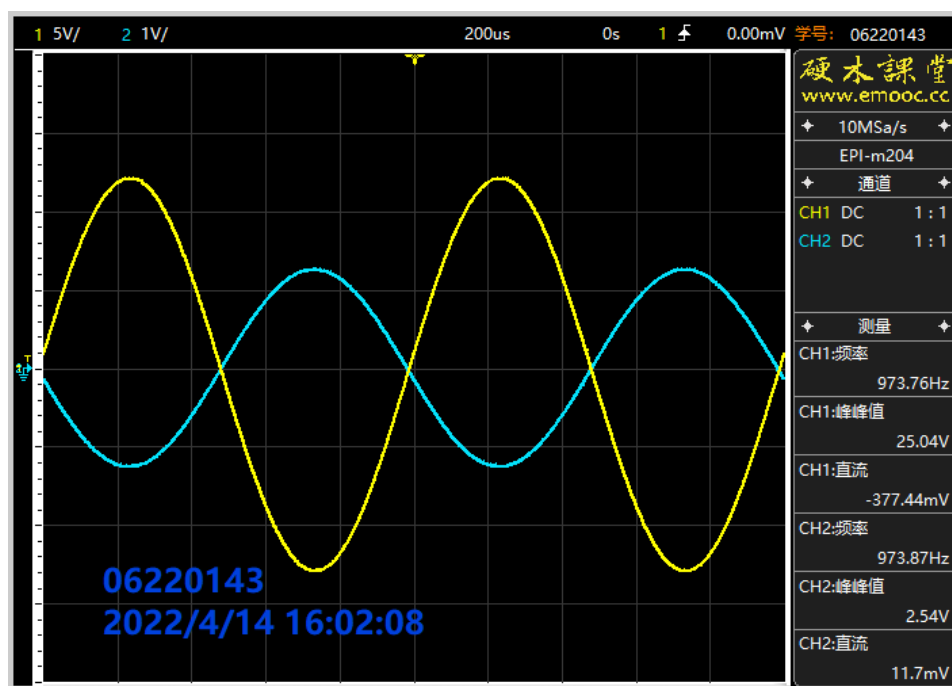


图②



图③





图④

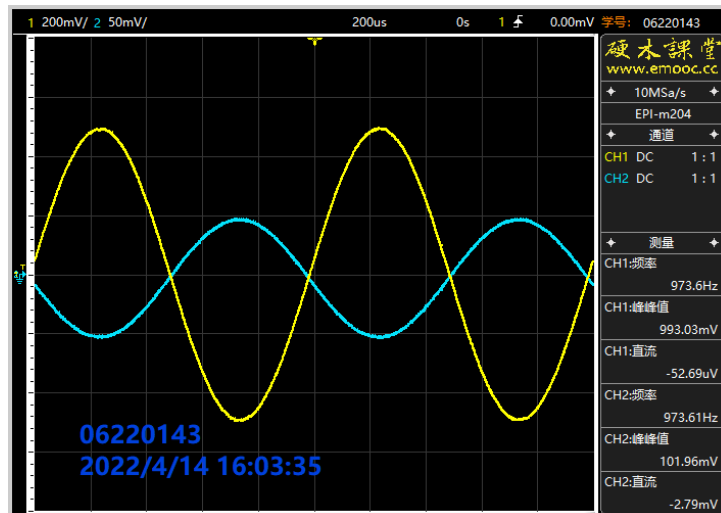
### 实验结果分析:

输入 200mV 和 400mV 时, 运放工作在线性区,  $A_u$  测量值与理论值之间的误差小于 5%, 可近似相等; 输入 4V 时, 运放工作在非线性区, 峰值受运放最大输出电压限制; 通过不断调试, 可以看出输入峰峰值小于约 2.57V 时, 放大电路工作在线性区, 输出曲线的峰峰值约为 25.04V; 超过 2.57V 时输出电压几乎不变

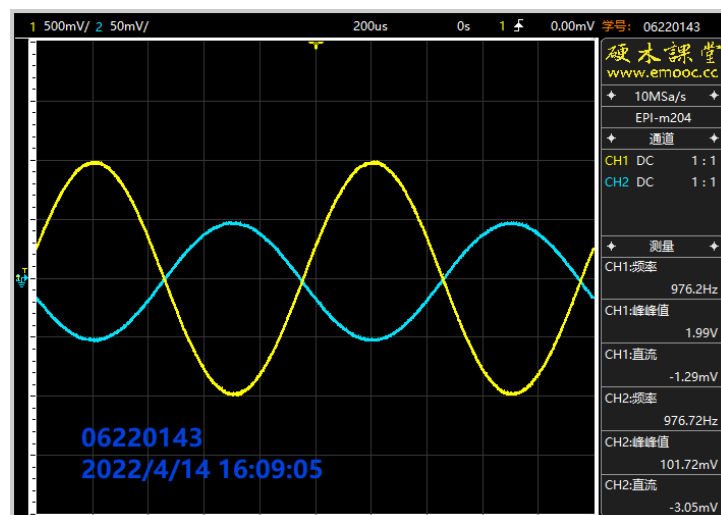
### (3) 增益改变的测量:

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	993	9.9	10	1%
10	200	100	1990	19.9	20	0.5%
20	100	100	492	4.9	5	2%

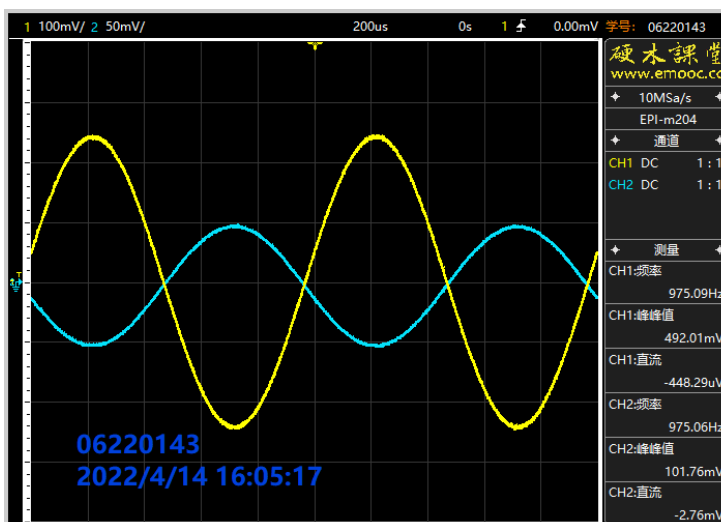




$$R_1=10\text{k}\Omega, R_f=100\text{k}\Omega$$



$$R_1=10\text{k}\Omega, R_f=200\text{k}\Omega$$



$$R_1=20\text{k}\Omega, R_f=100\text{k}\Omega$$

实验结果分析：

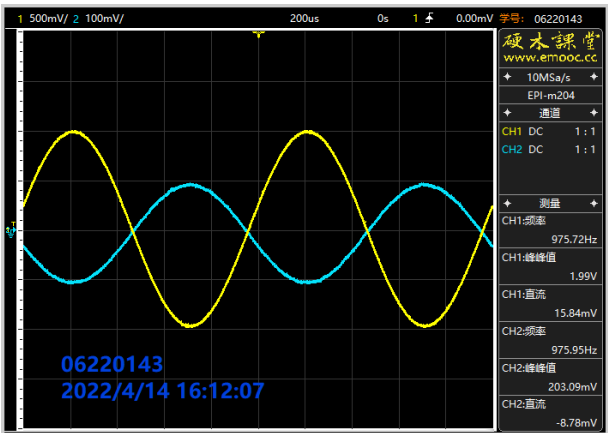
我们可以通过适当调节反馈电阻或输入电阻的大小来实现增益的改变。

(4) 运放特性测量——最大输出电压：

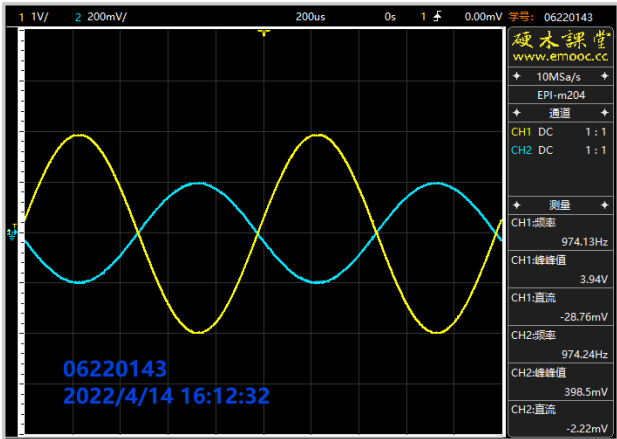
电源电压改为 $\pm 12V$ ，重复实验(2)，并对实验结果进行分析比较，表格自拟。

交流特性测量记录表				
Ui	Uo		增益	
峰峰值 (mV <sub>pp</sub> )	峰峰值 (V <sub>pp</sub> )	波形	Au	误差 (%)
200	1.99	见下图①	9.95	0.5
400	3.94	见下图②	9.85	1.5
4000	21.14	见下图③	5.29	47.1
2000	19.66	见下图④ (请测量记录 最大不失真输出 波形)	9.83	1.7

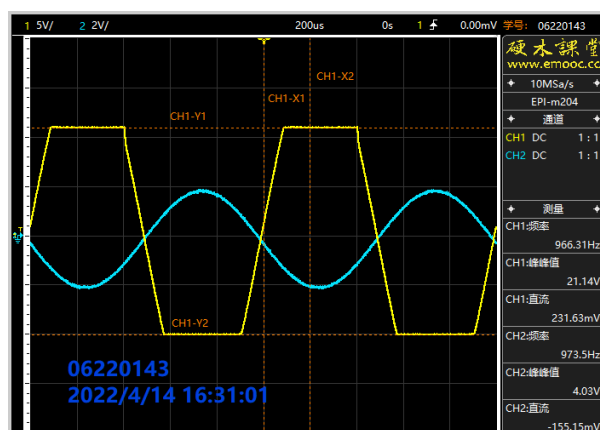
表格 2



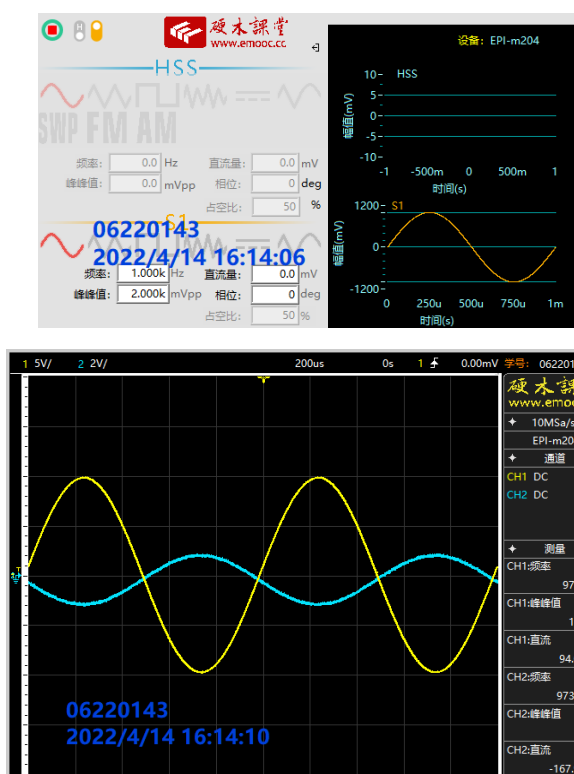
图①



图②



图③



图④

### 实验结果分析:

根据上述实验数据可知, 最大输出电压为 10.6V, 最大输出电压受到电源电压的影响, 当调节输入电压约为 2V 时, 输出波形恰好被削平, 此是输出电压即为最大输出电压。

对比实验 (2)、(4), 发现误差允许范围内, 线性区工作特性一致, 都是放大十倍, 而电源电压只改变输出的最大电压。

### (5) 运放特性测量——最大输出电流:

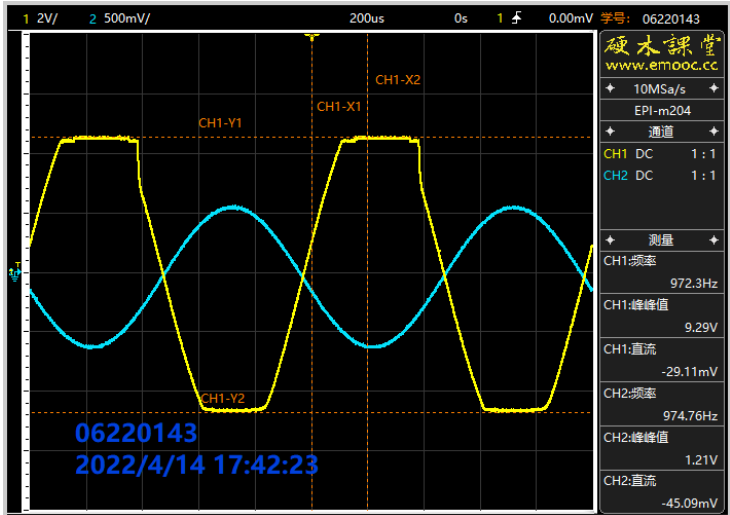
重新加负载 (减小负载电阻  $R_L$ ), 使  $R_L = 220 \Omega$ , 测量最大不失真输出电压, 并和  $R_L = 100 k \Omega$  数据进行比较, 分析数据不同的原因。

最大输出电流测量记录表

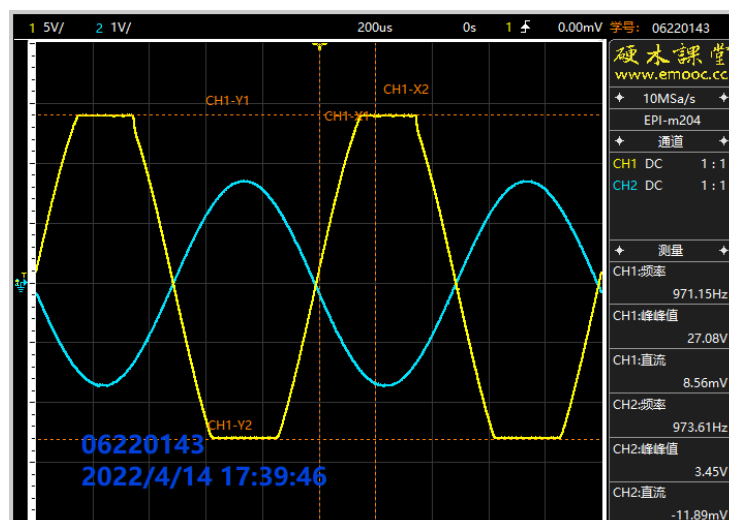
RL=220 Ω			
U <sub>i</sub>		U <sub>o</sub>	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (Vpp)	最大值 (V)	电流 (mA)
800	7.99	3.89	17.68
1000	9.29	4.52	20.5
1100	9.31	4.54	20.6
1200	9.30	4.54	20.6

最大输出电流测量记录表			
RL=100k Ω			
U <sub>i</sub>		U <sub>o</sub>	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (Vpp)	最大值 (V)	电流 (mA)
2500	24.19	11.45	11.45
3000	27.06	14.04	14.04
3500	27.08	14.04	14.04

(取电路工作在非线性区时的图像)



RL=220 Ω  
U<sub>i</sub> = 1200mV



$R_L = 100k\ \Omega$

$U_i = 3500mV$

### 实验结果分析

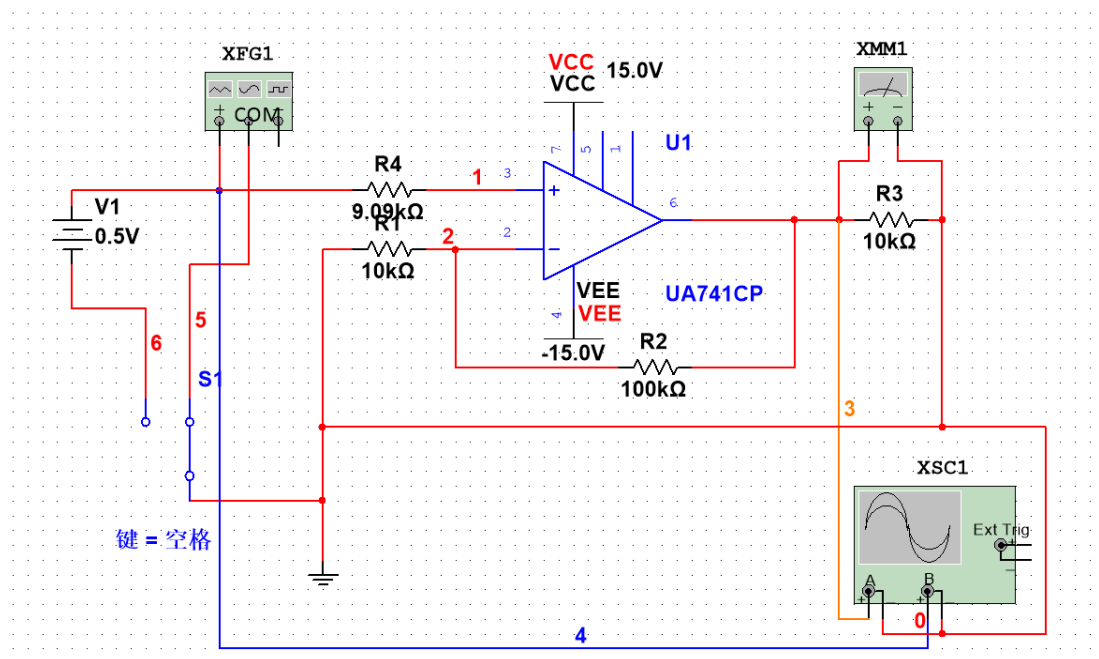
$R_L = 100k\ \Omega$  时，当电路工作在非线性区时，输出电压最大值为 14.04V， $R_L = 220\ \Omega$  时，当电路工作在非线性区时，输出电压最大值为 4.54V。当  $R_L = 220\ \Omega$  时，可以求得最大输出电流约为 20mA，和 UA741 数据手册上给出的典型值吻合，而当负载为  $100k\ \Omega$  时，输出电流却和理论值有很大差别。

原因分析：运放工作时不仅会受到最大输出电流的影响，还会受到最大输出电压的影响，由于负载较大，最大输出电流比较小，因此当输入电流很大时，首先影响运放的是最大输出电压，输出电流并没有达到最大输出电流的值

(6) 设计一个同相输入比例运算电路，要求其放大倍数为 11。完成同相比例放大电路的设计及仿真。测量同相比例放大电路的交、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。

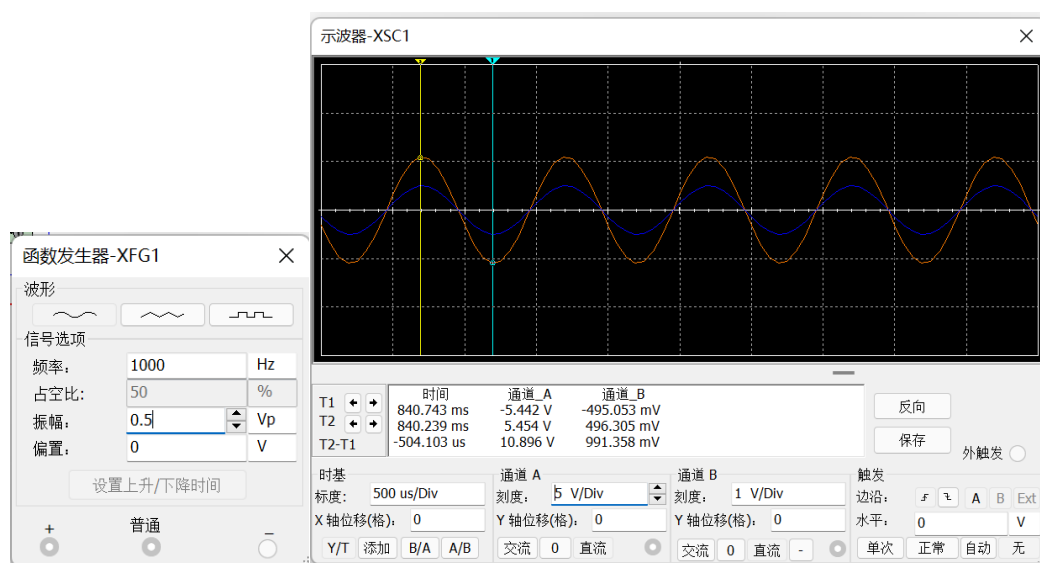
计算公式： $U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$ ，令电源电压  $V_{CC} = +15V$ ， $V_{EE} = -15V$ ， $R = 10k\ \Omega$ ， $R_F = 100k\ \Omega$ ， $R_L = 10k\ \Omega$ ， $R' = 10k // 100k\ \Omega$ ，放大倍数为 11。

同相输入比例运算电路仿真图：



测得的仿真数据如下：

调整信号发生器参数如下，得到仿真波形为（红色输出蓝色输入）：



将开关 S1 调至 0.5V 直流输入，万用表输出结果如下：



由此可得，仿真数据符合题目要求

**直流特性测量数据：**

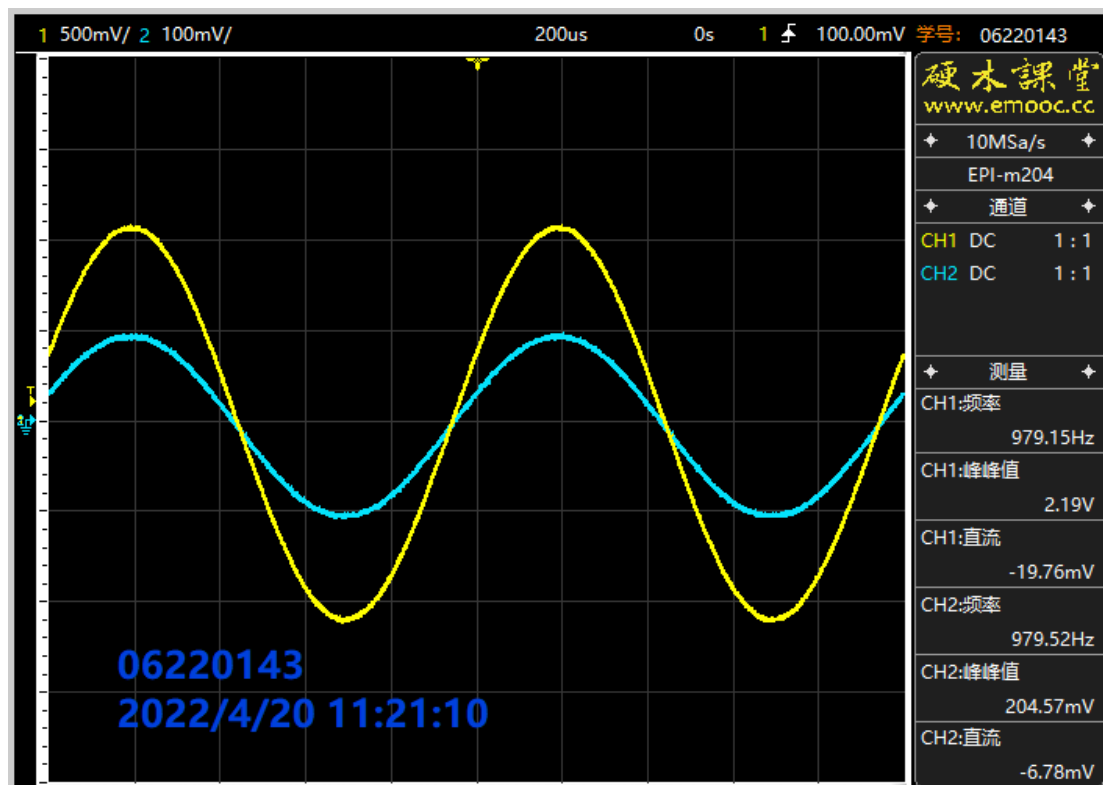
对照仿真图连接电路，取输入直流信号  $U_i$  分别为  $-2V$ 、 $-0.5V$ 、 $0.5V$ 、 $2V$ ，用电压表测量对应不同  $U_i$  时的  $U_o$  值，列表计算  $A_u$  并和理论值相比较。

直流特性测量记录表			
$U_i/V$	$U_o/V$	$A_u$	
		测量值	理论值
-2	-13.14	6.57	11
-0.5	-5.43	10.86	11
0.5	5.63	11.26	11
2	14.40	7.20	11

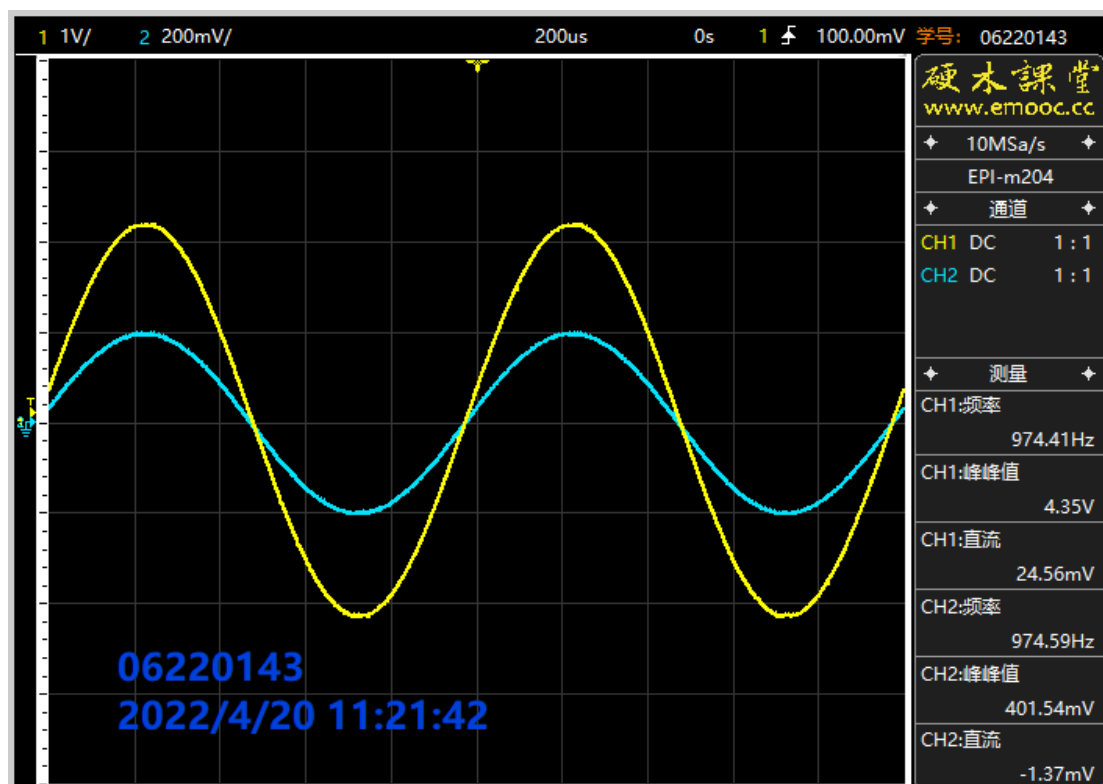
**交流特性测量数据：**

设定输入信号频率为  $1kHz$  的正弦波，调整不同的信号幅度，用双踪示波器观察并记录输入输出波形，在输出不失真的情况下测量交流电压增益，并和理论值相比较。

交流特性测量记录表				
$U_i$	$U_o$		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (Vpp)	波形	$A_u$	误差 (%)
200	2.19	见下图①	10.95	0.45
400	4.35	见下图②	10.88	1.09
4000	27.08	见下图③	6.77	38.45
2250	24.07	见下图④ (请测量记录最大不失真输出波形)	10.69	2.81

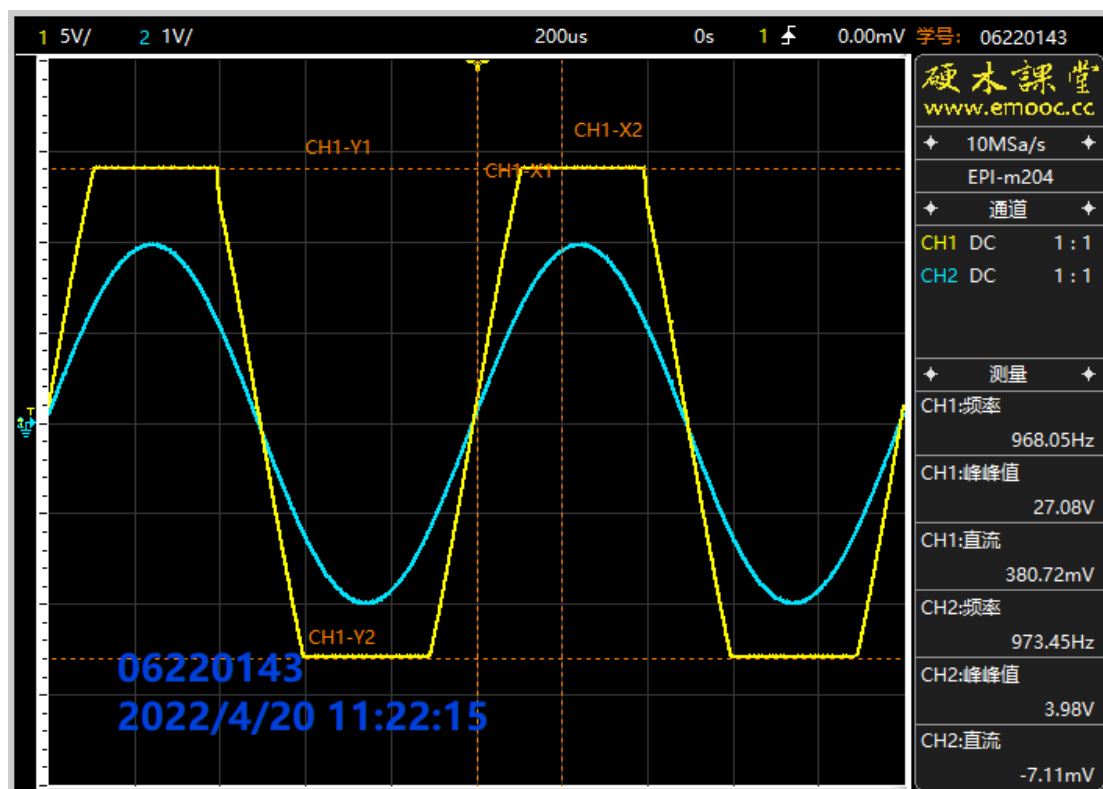


图①

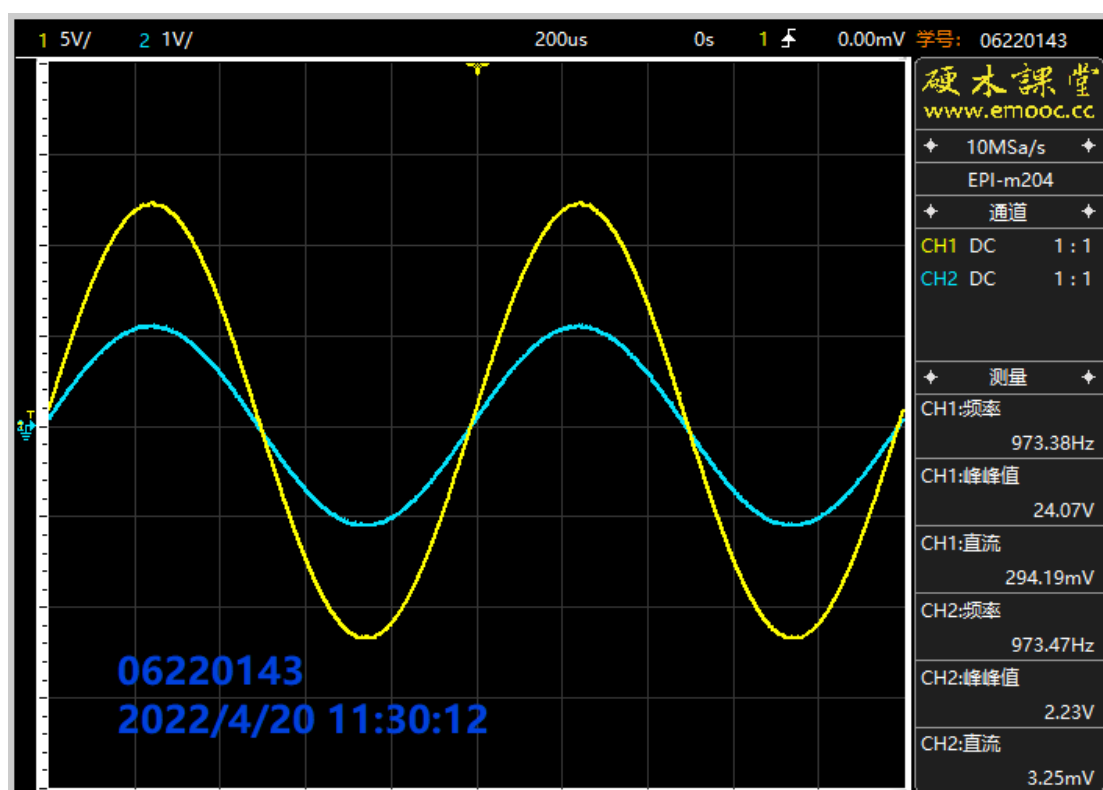


图②





图③

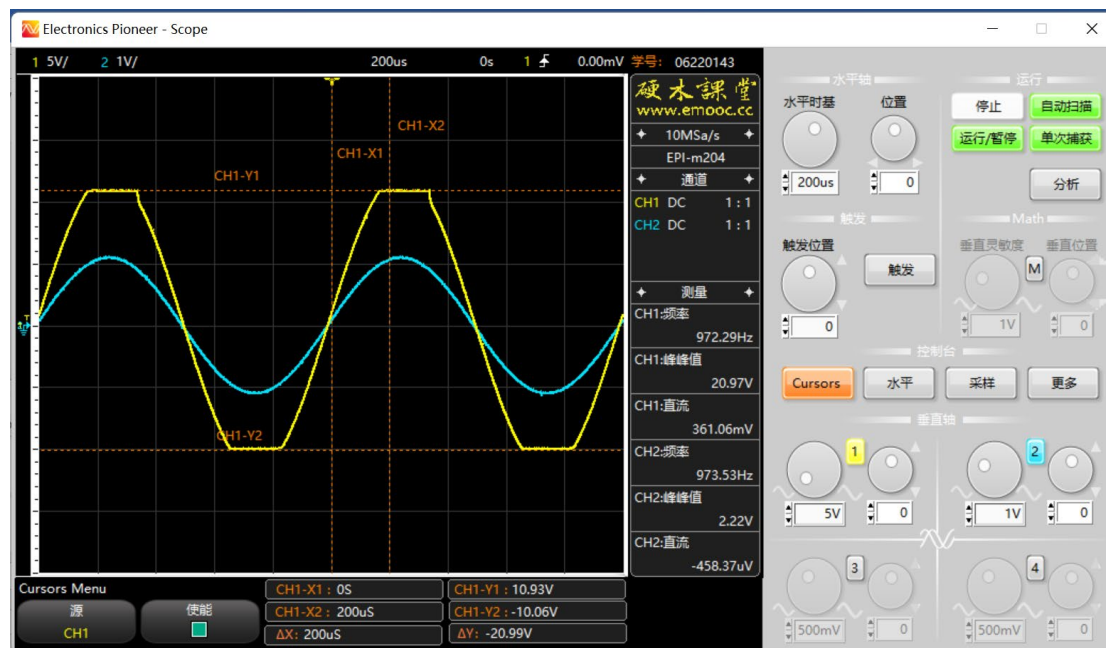


图④

分析同相比例运算电路的直交流特性，放大比例为 11 倍，当输入波形峰峰值大约为 2.25V 时，恰好输出最大不失真波形，得到与反向比例运算电路类似的结论。

### 运放的最大输出电压：

不改变负载，慢慢提高输入电压  $U_i$ ，直到输出信号  $U_o$  的波形开始失真，测量此时  $U_o$  的值。测量得在电源供电为  $\pm 12V$  时，运放最大输出电压  $V_{om}=10.93V$ ；

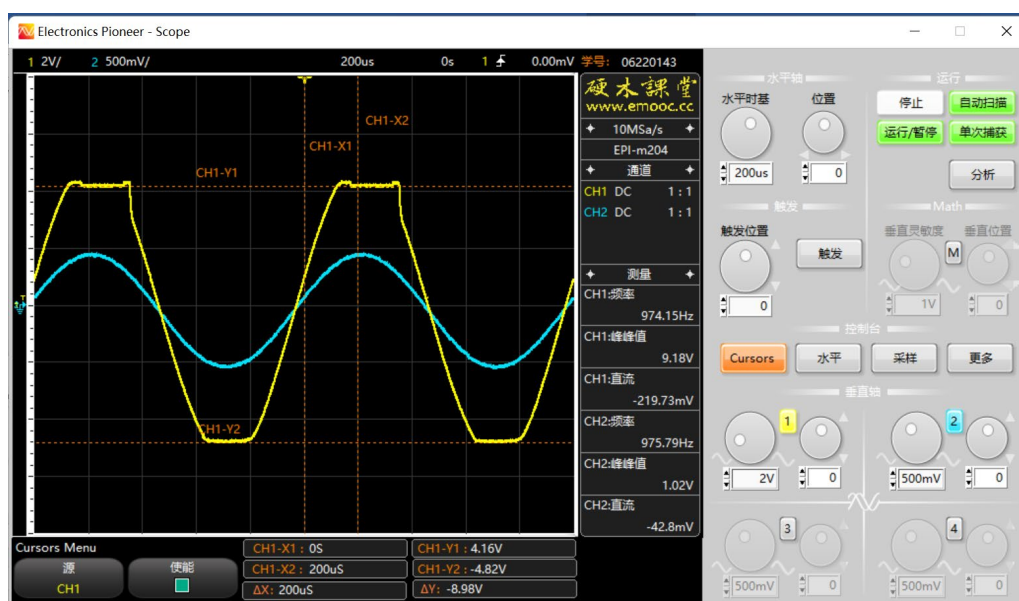


### 运放的最大输出电流：

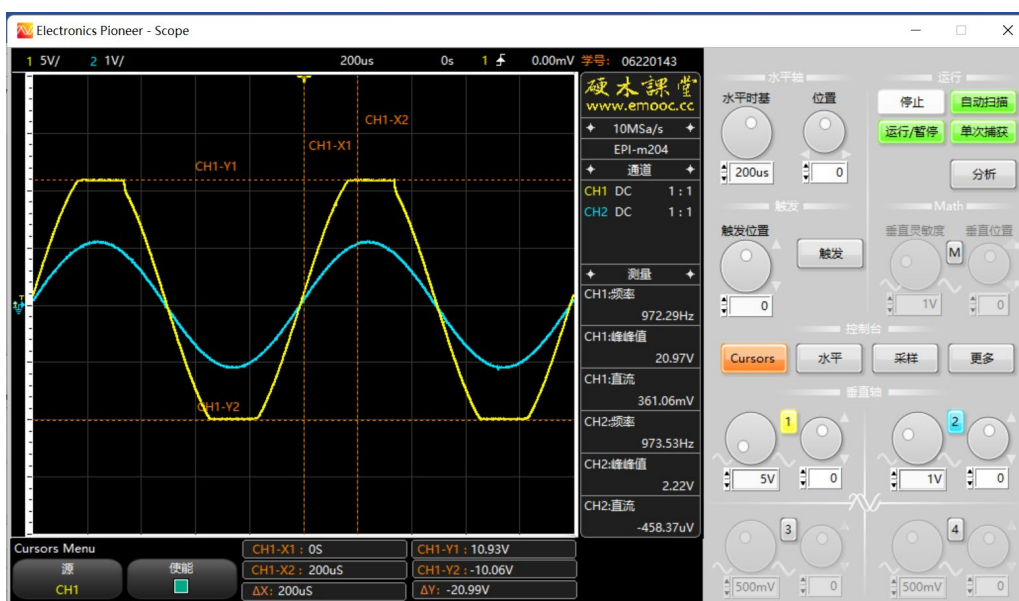
重新加负载（减小负载电阻  $R_L$ ），使  $R_L=220\Omega$ ，测量最大不失真输出电压，计算出最大输出电流的值。测量得：运放最大输出电流  $I_{pp}=42.55mA$ ；整理如下：

运放特性测量——最大输出电压、电流记录表		
负载 $R_L / \Omega$	输出电压 $V_{omax}/V$	输出电流 $I_{ppo}/mA$
220	4.16	19.0
10k	10.93	1.09

$$R_L=220\Omega$$



$RL=10k\Omega$



### 实验数据分析:

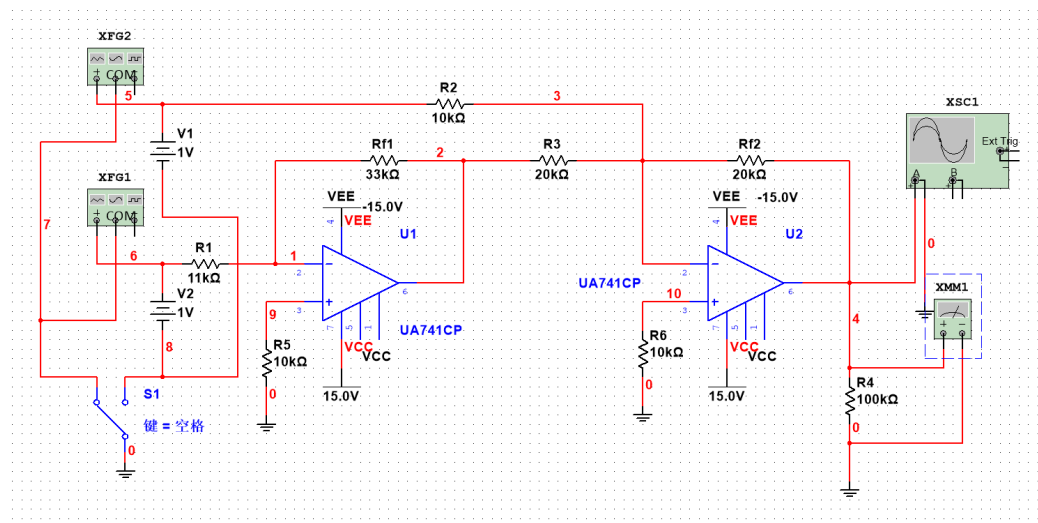
$RL=100k\Omega$  时, 当电路工作在非线性区时, 输出电压最大值为 10.93V,  $RL=220\Omega$  时, 当电路工作在非线性区时, 输出电压最大值为 4.16V。当  $RL=220\Omega$  时, 可以求得最大输出电流约为 19mA, 和 UA741 数据手册上给出的典型值吻合, 而当负载为  $100k\Omega$  时, 输出电流却和理论值有很大差别。

原因分析: 运放工作时不仅会受到最大输出电流的影响, 还会受到最大输出电压的影响, 由于负载较大, 最大输出电流比较小, 因此当输入电流很大时, 首先影响运放的是最大输出电压, 输出电流并没有达到最大输出电流的值。

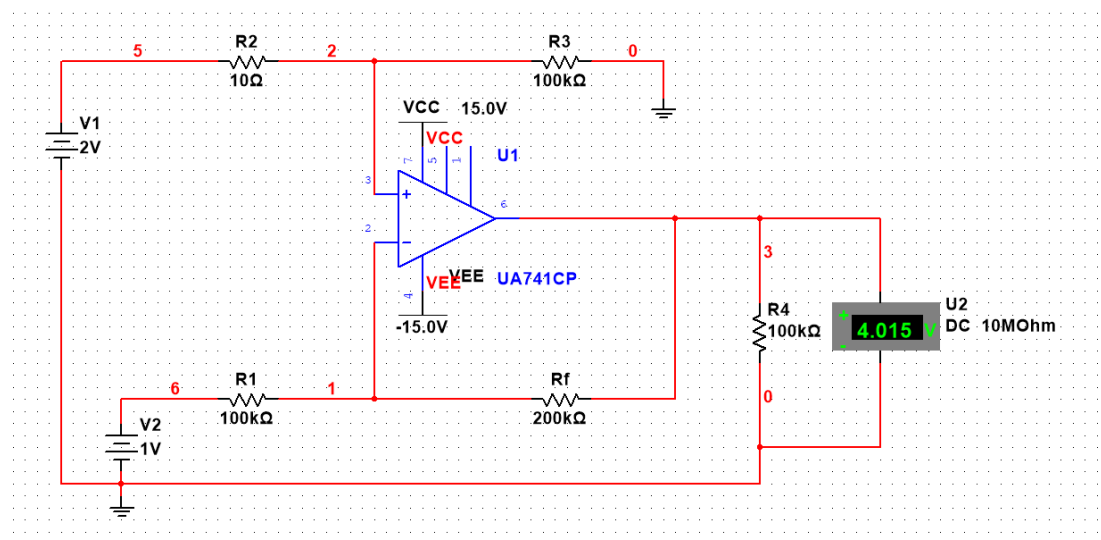
## 2. 实验内容二（见 mooc 在线实验 2）：

（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）。

利用反相电路和加法电路实现减法：



利用运放同向端和反相端实现减法：



此电路不存在虚地的现象，需要共模抑制比较好的运放，而且因为计算表达式的原因  $R_2$  和  $R_3$  相差较大，可能会存在分压和限流的影响。

不过在实际的仿真和实物电路中数据比较吻合，误差很小。

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
$U_1/V$	1	2	0.2	2	5
$U_2/V$	1	3	0.5	-2	-5
$U_o/V$ (理论值)	1	0	-0.4	10	25
$U_o/V$ (测量值)	1	0	-0.39	9.94	14.39

实验结果分析:

有明显不满足减法关系的测量结果, 原因: 以第五组为例, 理论值 25 大于实际输出 14.39V, 因为  $U_1$ 、 $U_2$  取 5V、-5V 时, 计算结果已超出运放最大输出电压, 所以只能输出  $V_{OM}$ 。

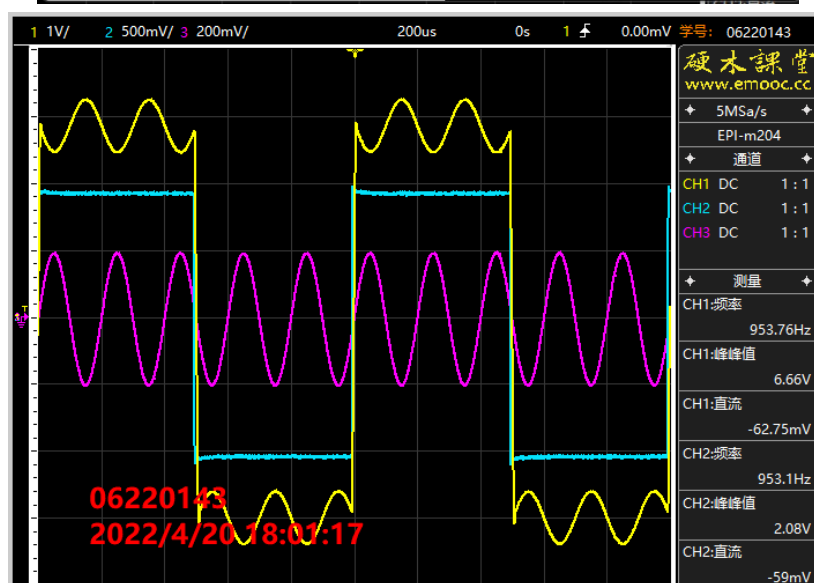
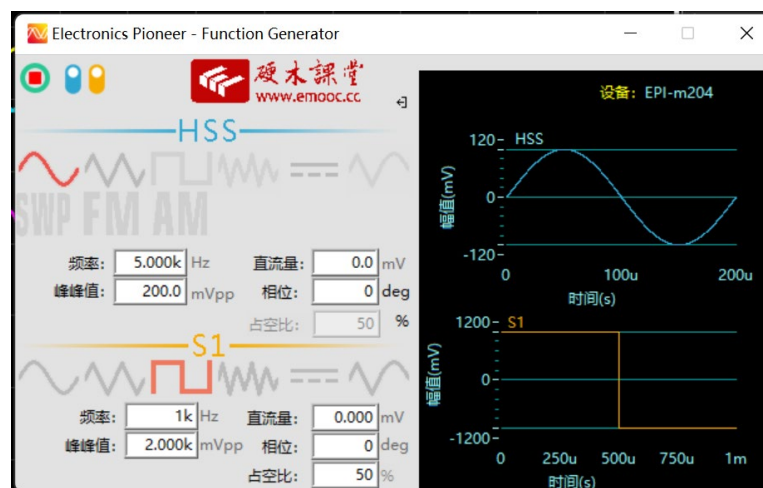
以第四组为例, 在输出不超过  $V_{OM}$ , 用负电压输入, 减法电路可以实现加法功能。

b) 交流减法功能测量:

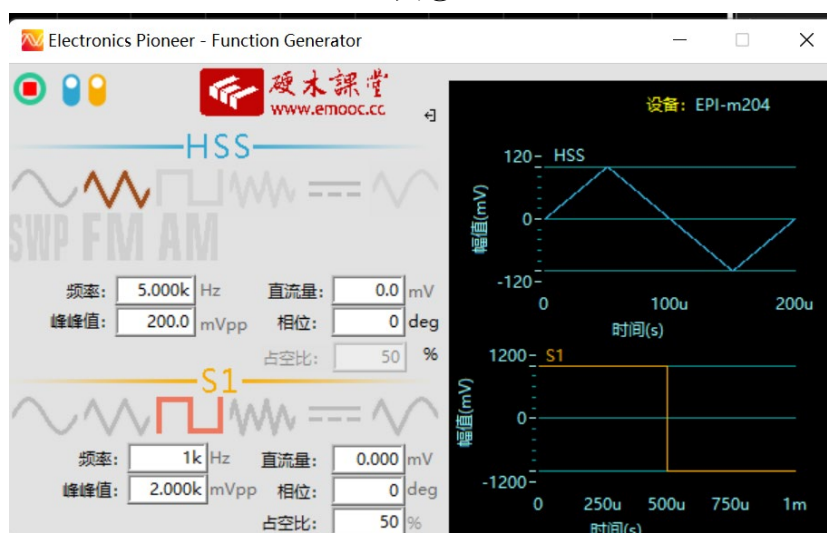
交流减法功能测量记录表

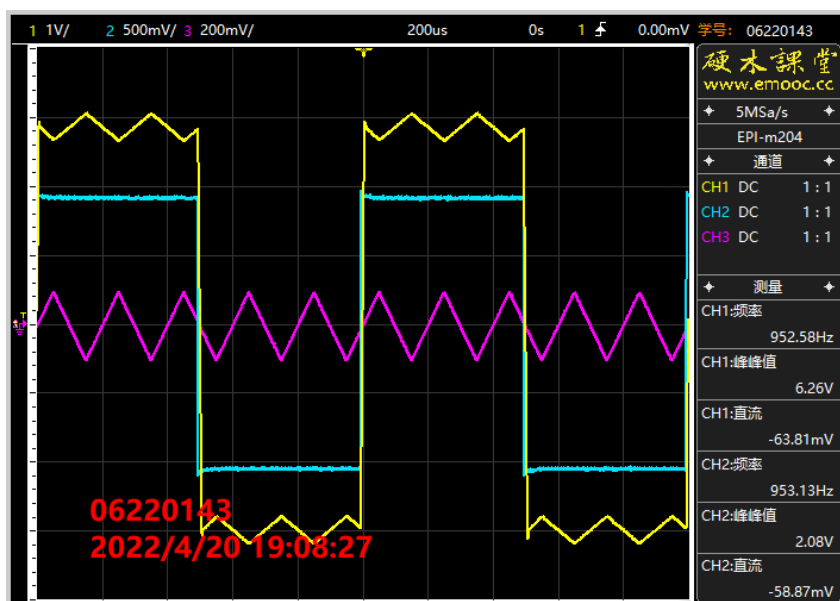
输入	第一组实验波形	误差	第二组实验波形	误差	第三组实验波形	误差	第四组实验波形	误差
$U_1$	图① (CH2)	1.4%	图② (CH2)	1.4%	图③ (CH2)	2.4%	图④ (CH2)	2.1%
$U_2$	图① (CH3)	0.6%	图② (CH3)	1.3%	图③ (CH3)	0.8%	图④ (CH3)	0.9%
$U_o$	图① (CH1)	1.9%	图② (CH1)	1.8%	图③ (CH1)	2.4%	图④ (CH1)	2.9%

图①

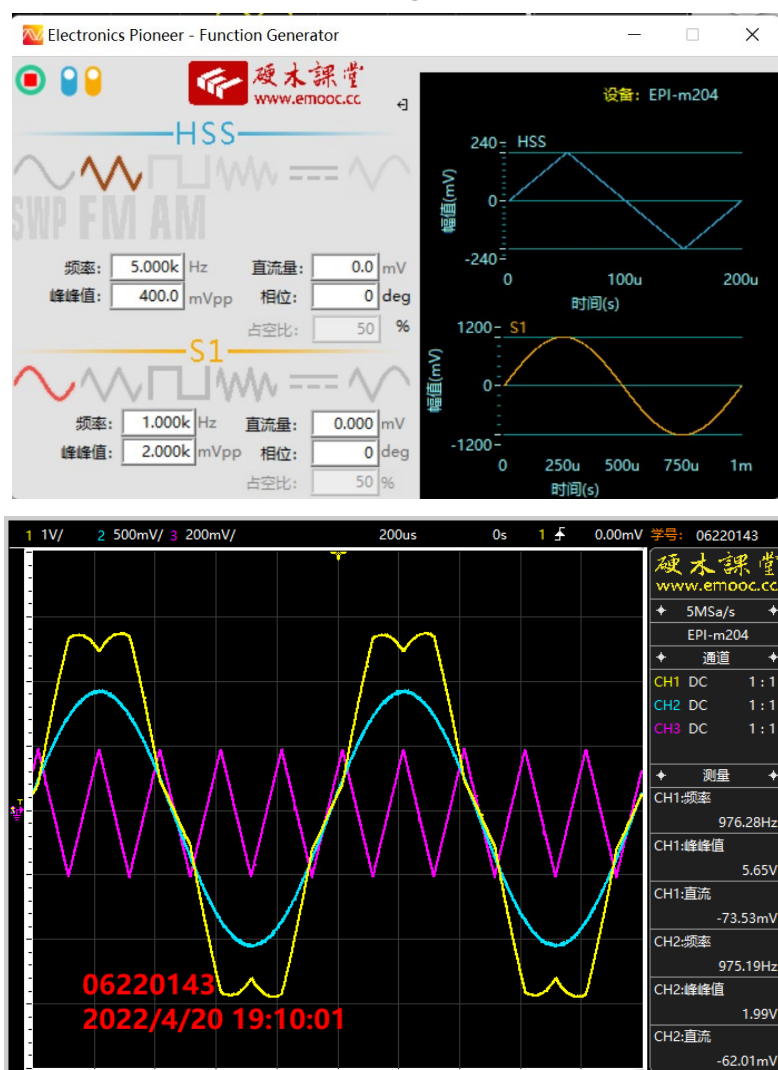


图②



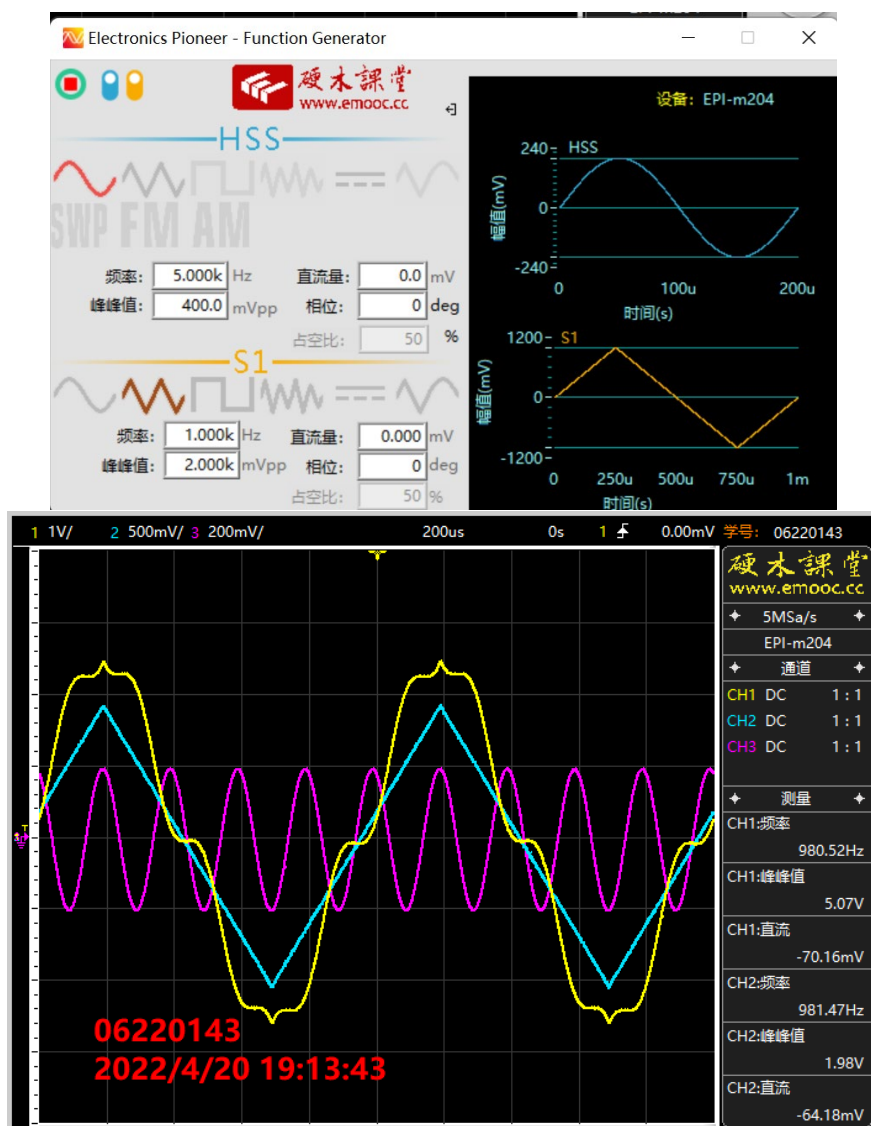


图③



图④





### 实验结果分析:

函数发生器的幅度误差将累计到合成波形的幅度误差。因此应尽量减少输入波形误差以获得准确波形;

交流波形运算也存在波形失真情况, 需合理控制输入幅度范围以保证在最大输出电压之下;

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……);

1、幅度变化对测量的影响: 改变输出波形的幅度;

2、频率变化对测量的影响: 输入波形频率不同, 造成两个波形相位差不同, 输出波形的峰峰值、频率随之改变, 以第一组和第二组测量为例, 输出波形有明显的变化。



---

3、输入电阻对测量的影响：只有改变  $R_2$  才能改变  $U_o$  的表达式，从而改变  $U_o$  的输出波形。

下面是具体的阐述：【没有来得及在实验室完成，由电脑仿真得出】

1) 输入幅度对测量的影响：

输入幅度对测量影响探究实验记录表

组别	输入	实验波形	频率	峰峰值
第一组	U1	见图 1	1kHz	2V
	U2	见图 1	5kHz	400mV
	Uo	见图 1	—	6.7V
第二组	U1	见图 2	1kHz	2V
	U2	见图 2	5kHz	600mV
	Uo	见图 2	—	7.08V
第三组	U1	见图 3	1kHz	3V
	U2	见图 3	5kHz	600mV
	Uo	见图 3	—	9.97V

实验波形图：

图 1 第一组实验波形图

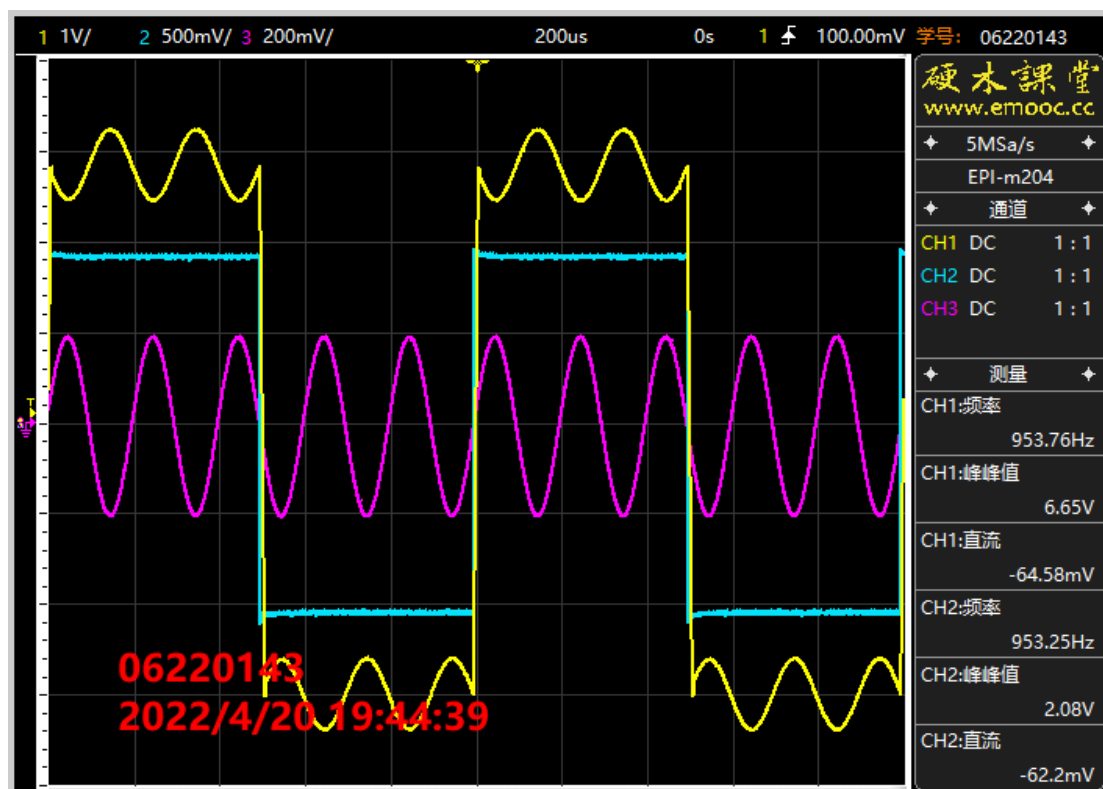


图 2 第二组实验波形图

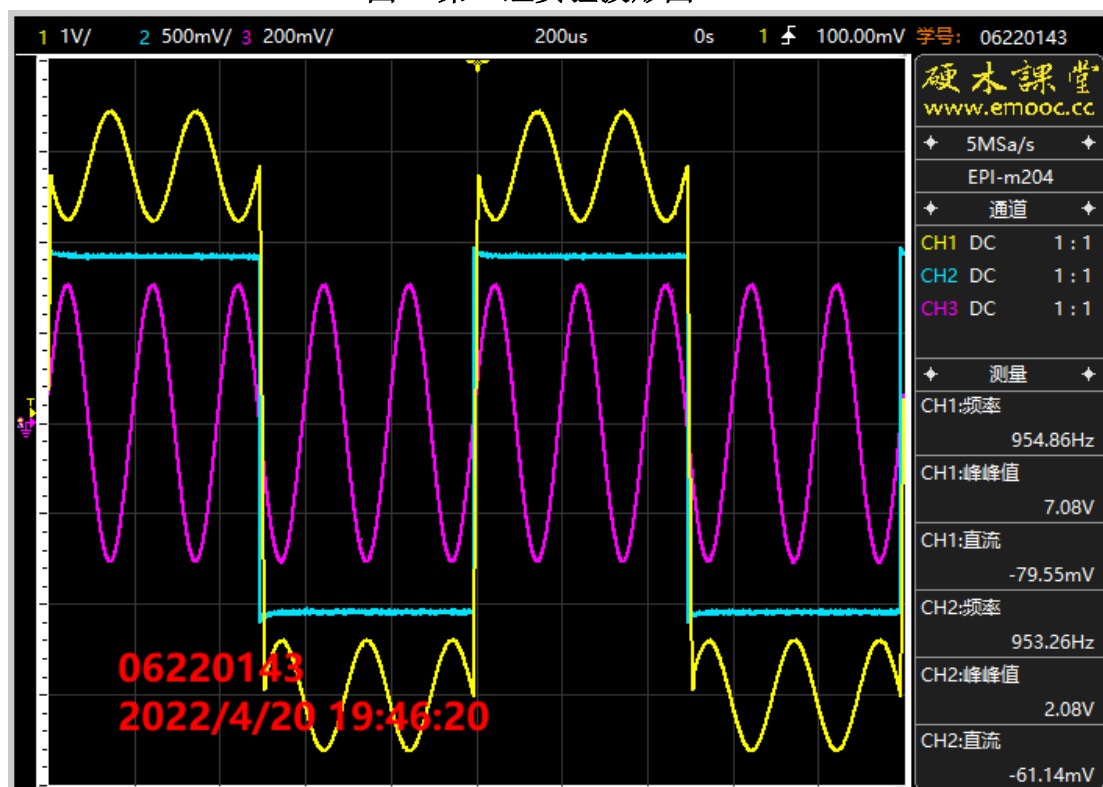
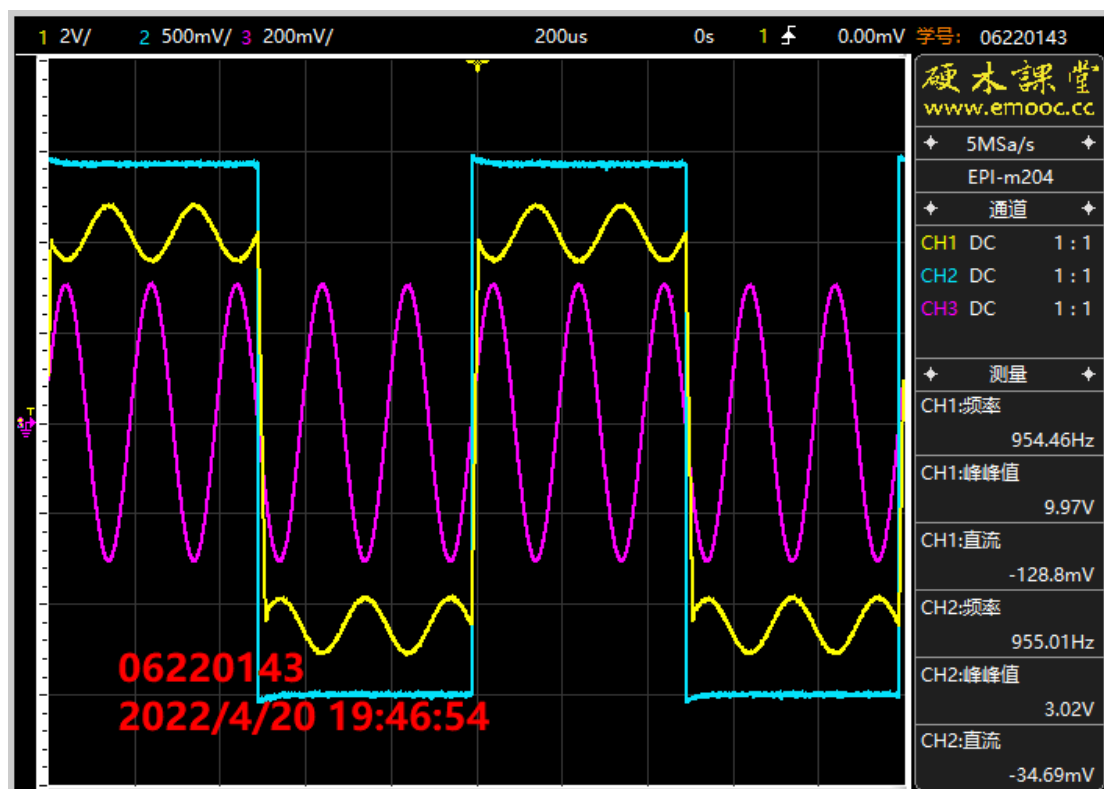


图 3 第三组实验波形图



### 实验结果分析:

本实验探究了输入信号幅度对于输出信号的影响,实验中控制了输入信号的频率不变。第二组相对于第一组改变了  $U_2$  的幅度,第三组相对于第二组改变了  $U_1$  的幅度,从而使得第三组相对于第一组  $U_1$ 、 $U_2$  幅度均发生了改变。

观察实验数据和实验图像可知,两个不同输入信号的幅度改变均对输出信号的幅度大小有影响。 $U_1$  主要改变的是  $U_o$  高低电平的大小,  $U_2$  主要改变的是  $U_o$  在高低电平附近振动的振幅大小。若同时改变  $U_1$  和  $U_2$ ,则两者均发生改变,且成正比关系。

### 频率对测量的影响:

频率对测量影响探究实验记录表

组别	输入	实验波形	频率	峰峰值
第一组	$U_1$	见图 1-1	1kHz	2V
	$U_2$	见图 1-2	5kHz	400mV
	$U_o$	见图 1-3	—	6.8V
第二组	$U_1$	见图 4-1	1kHz	2V
	$U_2$	见图 4-2	10kHz	400mV
	$U_o$	见图 4-3	—	6.88V
第三组	$U_1$	见图 5-1	2kHz	2V

U2	见图 5-2	10kHz	400mV
Uo	见图 5-3	—	6.99V

实验波形图：

图 4 第二组实验波形图

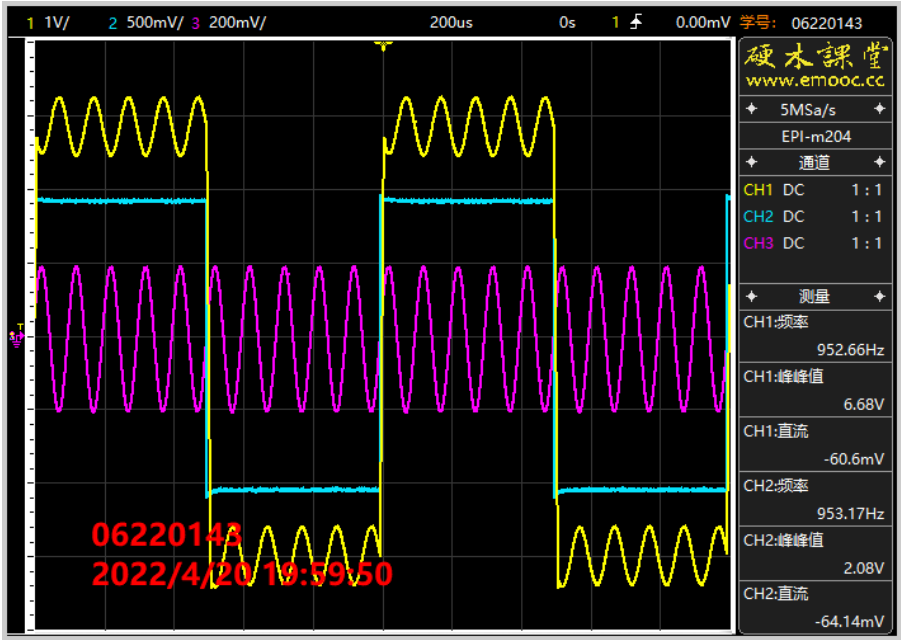
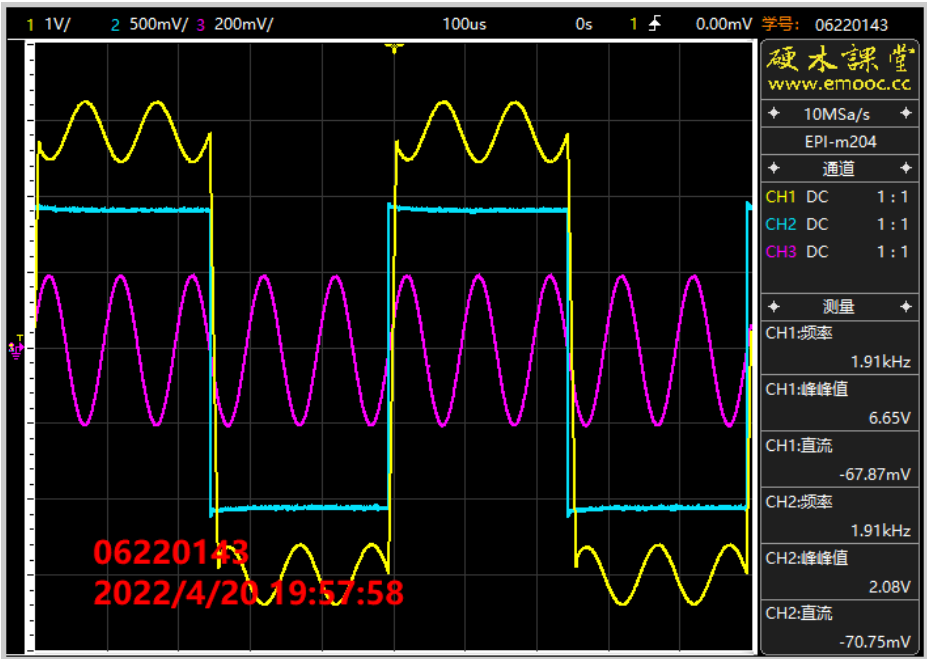


图 5 第三组实验波形图



实验结果分析：

本实验探究了输入信号频率对于输出信号的影响，实验中控制了输入信号的幅度不变。第二组相对于第一组改变了 U2 的频率，第三组相对于第二组改变了 U1 的频率，从而使得第三组相对于第一组 U1、U2 频率均发生了改变。

观察实验数据和实验图像可知，两个不同输入信号的频率改变均对输出信号有影响。U1 主要改变的是 Uo 间断点出现的频率，即改变 Uo 总体波形的频率；U2 主要改变的是 Uo 在高低电平附近振动的频率大小。若同时改变 U1 和 U2，则两者均发生改变，且成正比关系。

（这里 R1 对应 U2 输入端，R2 对应 U1 输入端，和前面原理图一样）  
输入电阻对测量的影响：

组别	输入	实验波形	R1/k $\Omega$	R2/k $\Omega$	频率	峰峰值
第一组	U1	见图 1	100	2	1kHz	2V
	U2	见图 1			5kHz	400mV
	Uo	见图 1			—	6.8V
第二组	U1	见图 2	100	1	1kHz	2V
	U2	见图 2			5kHz	400mV
	Uo	见图 2			—	4.4V
第三组	U1	见图 3	200	2	1kHz	2V
	U2	见图 3			5kHz	400mV
	Uo	见图 3			—	4.4V

实验波形图：

图 1 第一组实验波形图

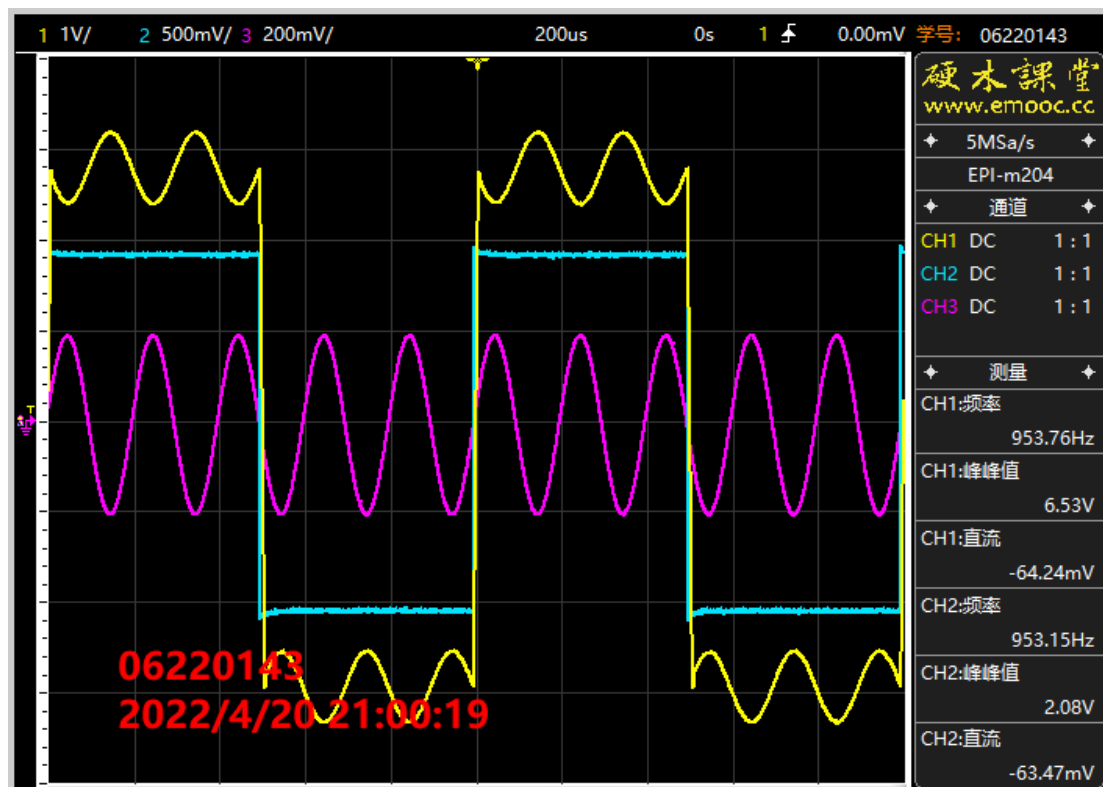


图 2 第二组实验波形图

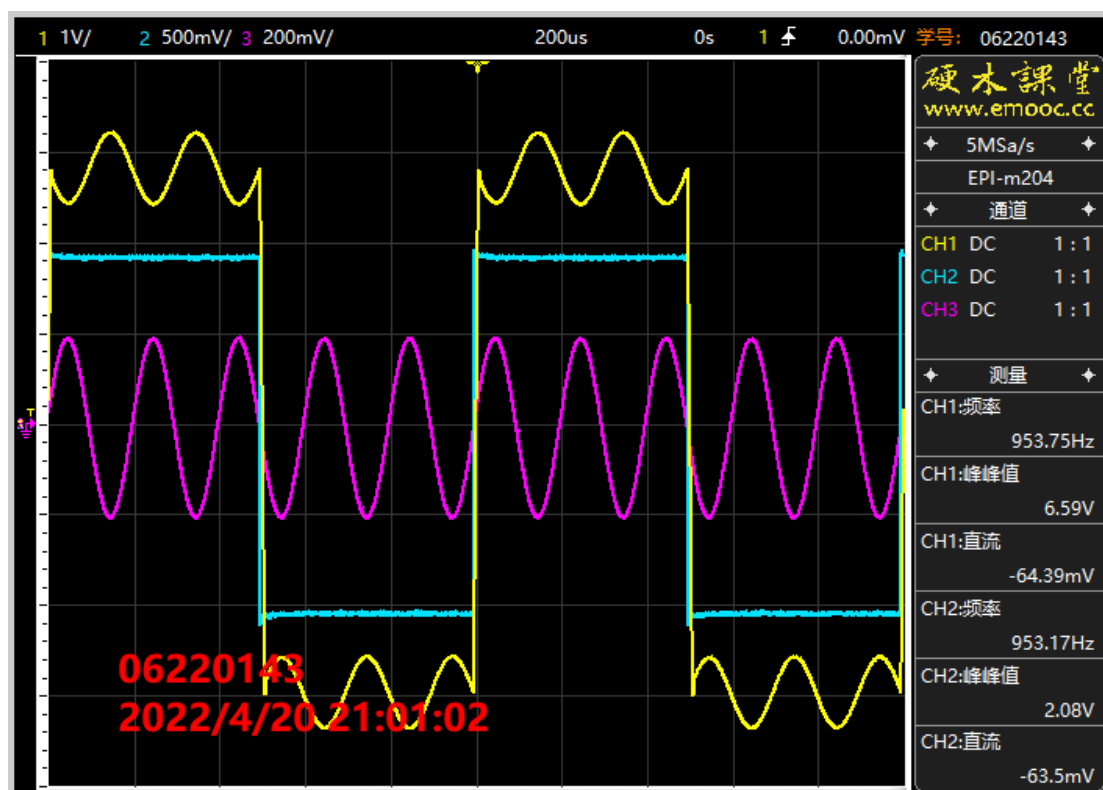
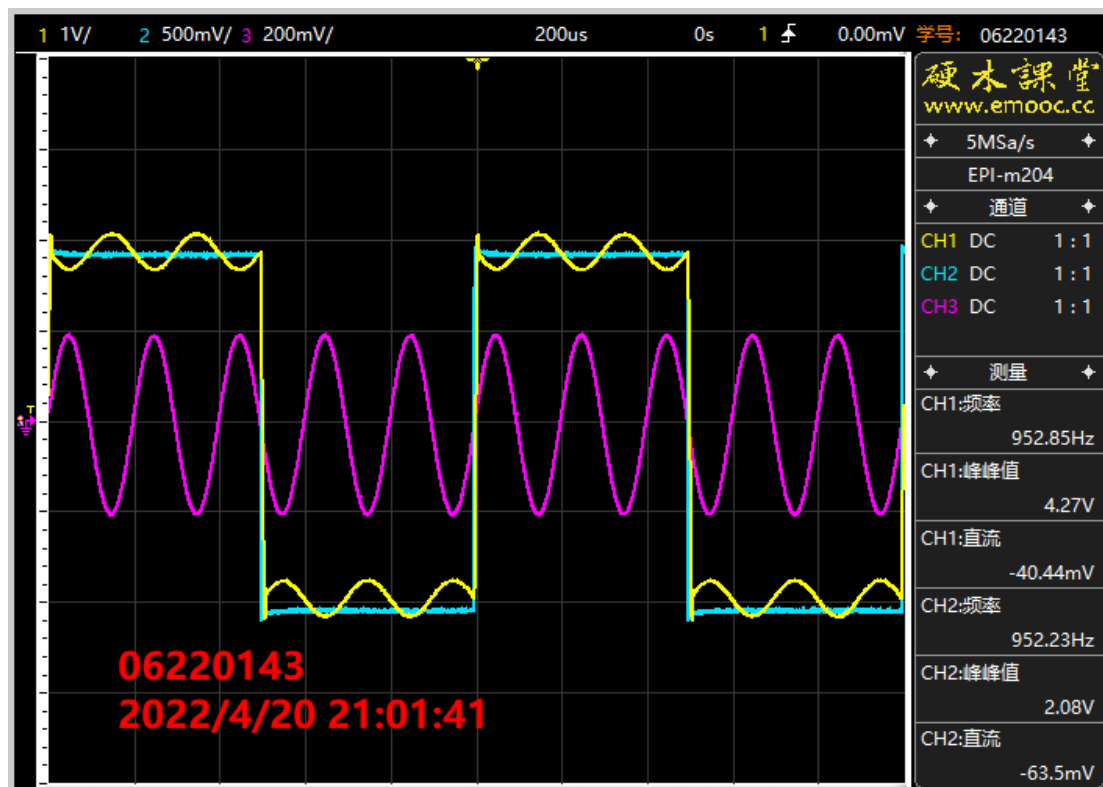


图 3 第三组实验波形图



### 实验结果分析:

本实验探究了输入电阻对于输出信号的影响,实验中控制了输入信号的幅度和频率不变。第二组相对于第一组改变了  $R_1$  的大小,第三组相对于第一组改变了  $R_2$  的大小,从而使得第三组相对于第二组  $R_1$ 、 $R_2$  大小均发生了改变。

在第一组实验中,  $U_o$  表达式为  $U_o=3U_1-2U_2$ 。由于改变了输入电阻,故  $U_o$  表达式也发生了相应的改变。第二组实验中,  $U_o$  的表达式为  $U_o=2U_1-U_2$ ; 第三组实验中,  $U_o$  的表达式为  $U_o=2U_1-U_2$ 。

可以发现,在  $R_1$  和  $R_2$  两个输入电阻中,输出信号  $U_o$  只和  $R_1$  有关而与  $R_2$  无关。这主要是因为我们在减法电路中取  $R_3$  为无穷大,从而使得最终的  $U_o$  表达式中不含  $R_2$ ,只含  $R_1$  和  $R_F$ ,故只有改变  $R_1$  才能改变  $U_o$  的表达式,从而改变  $U_o$  的输出波形。

### 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。

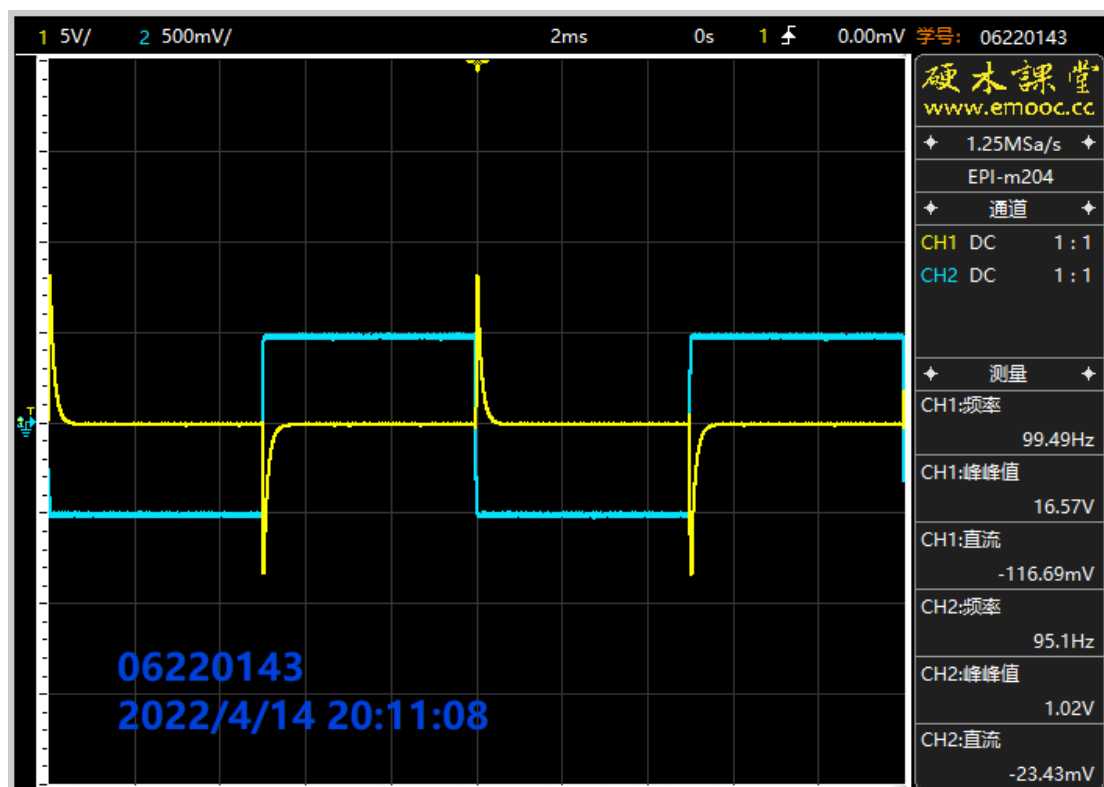
a) **实验结果分析:** (提示: **微分电路性能测量:** 在微分电路的输入端加上不同的信号波形, 利用双踪示波器观察输入和输出的波形, 记录波形及参数, 分析波形之间的关系。

b) **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。

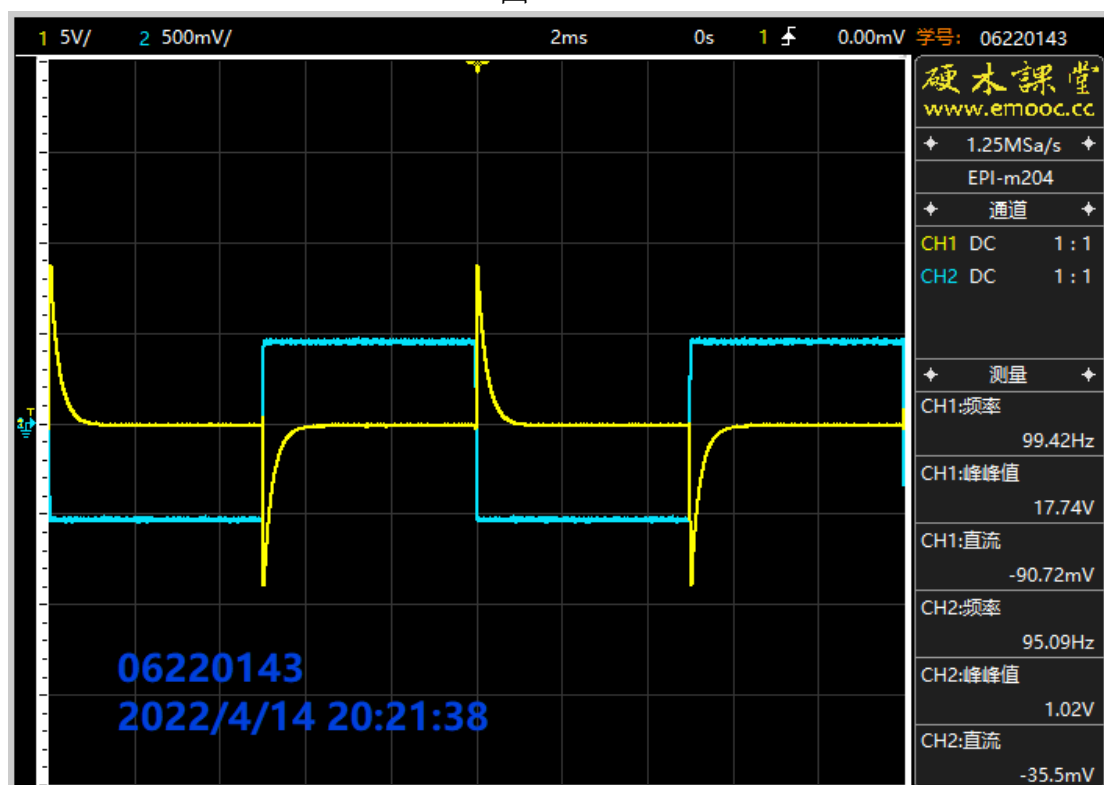
输入波形	方波				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_o$	见图一 (CH1)	见图二 (CH1)	见图三	见图四	见图五
$U_i$	见图一 (CH2)	见图二 (CH2)	见图三	见图四	见图五
输入波形	三角波				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_o$	见图六	见图七	见图八	见图九	见图十
$U_i$	见图六	见图七	见图八	见图九	见图十
输入波形	正弦波				
输入波形 参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_o$	见图十一	见图十二	见图十三	见图十四	见图十五
$U_i$	见图十一	见图十二	见图十三	见图十四	见图十五

图一

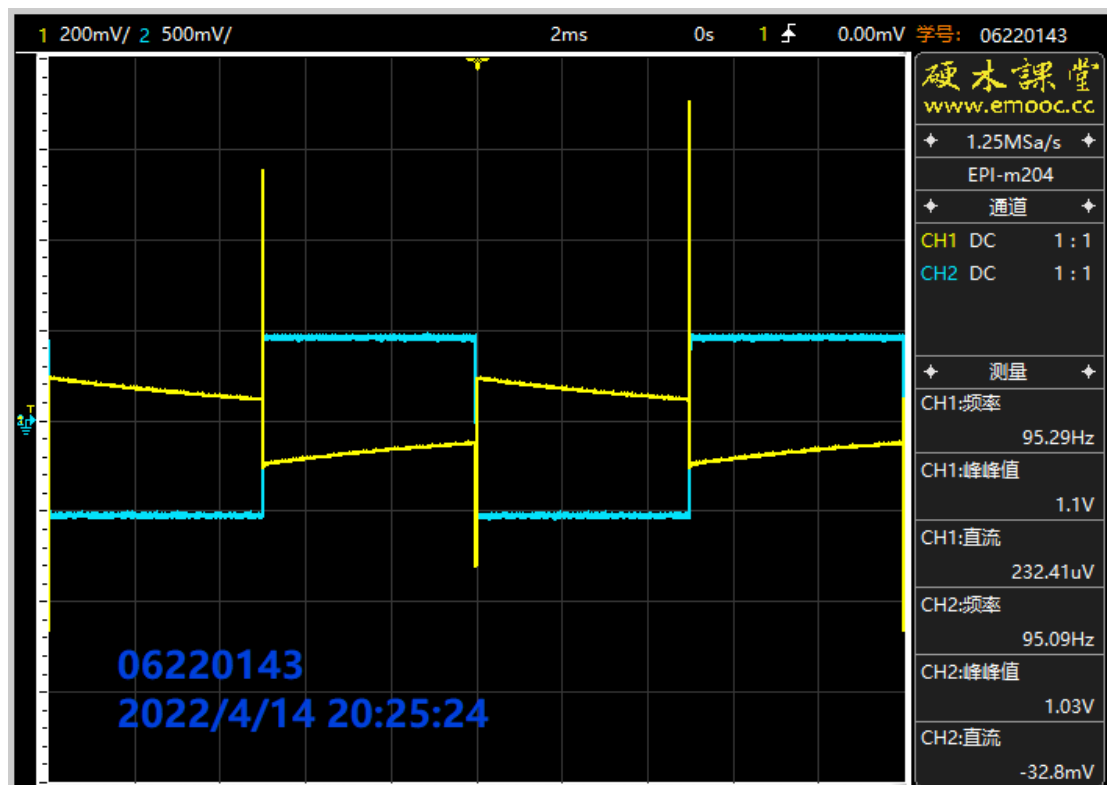




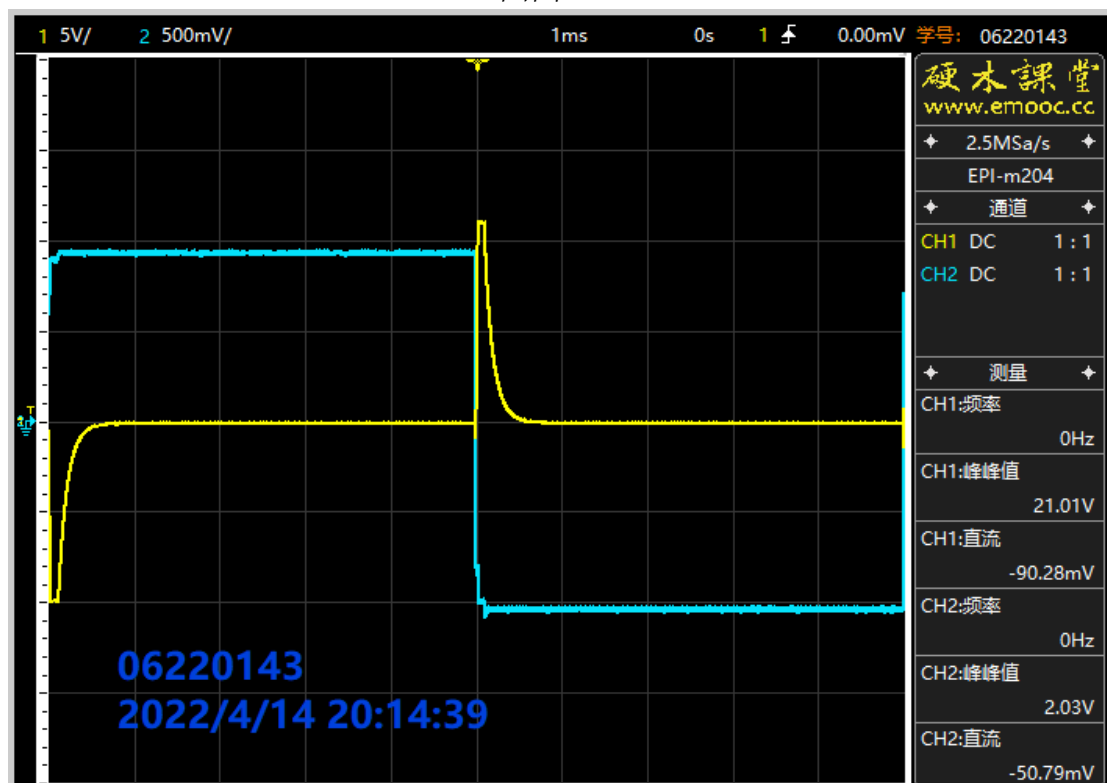
图二



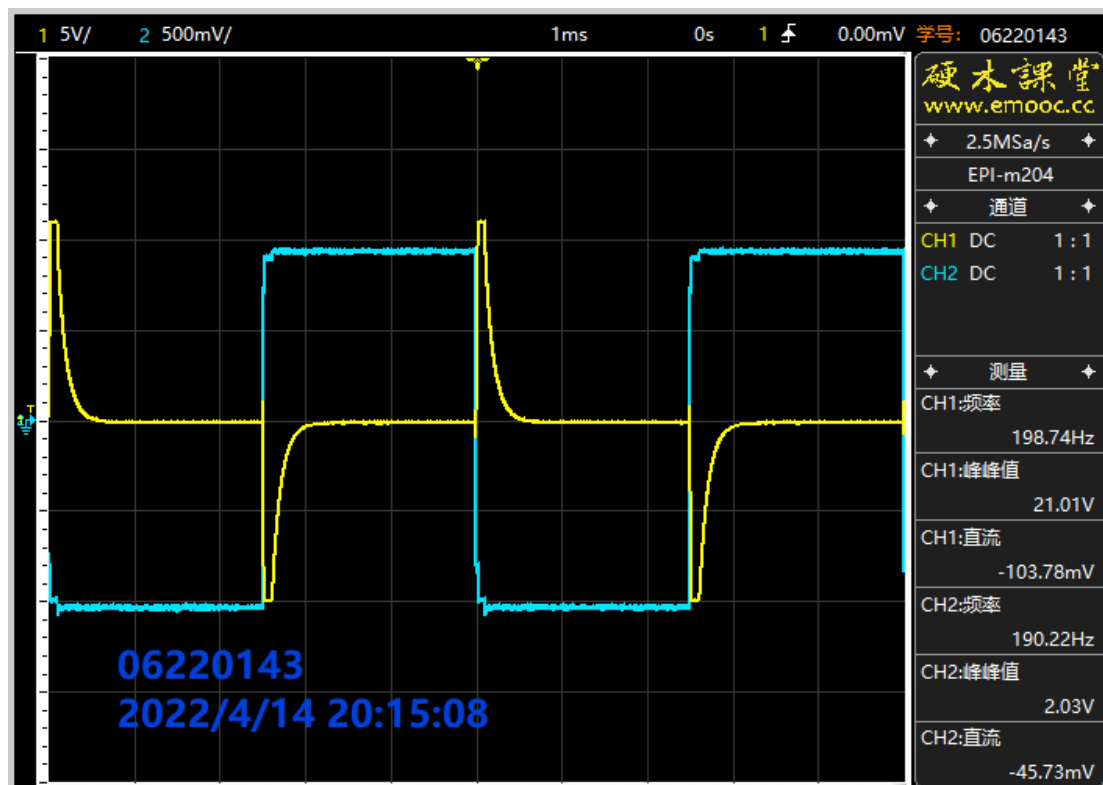
图三



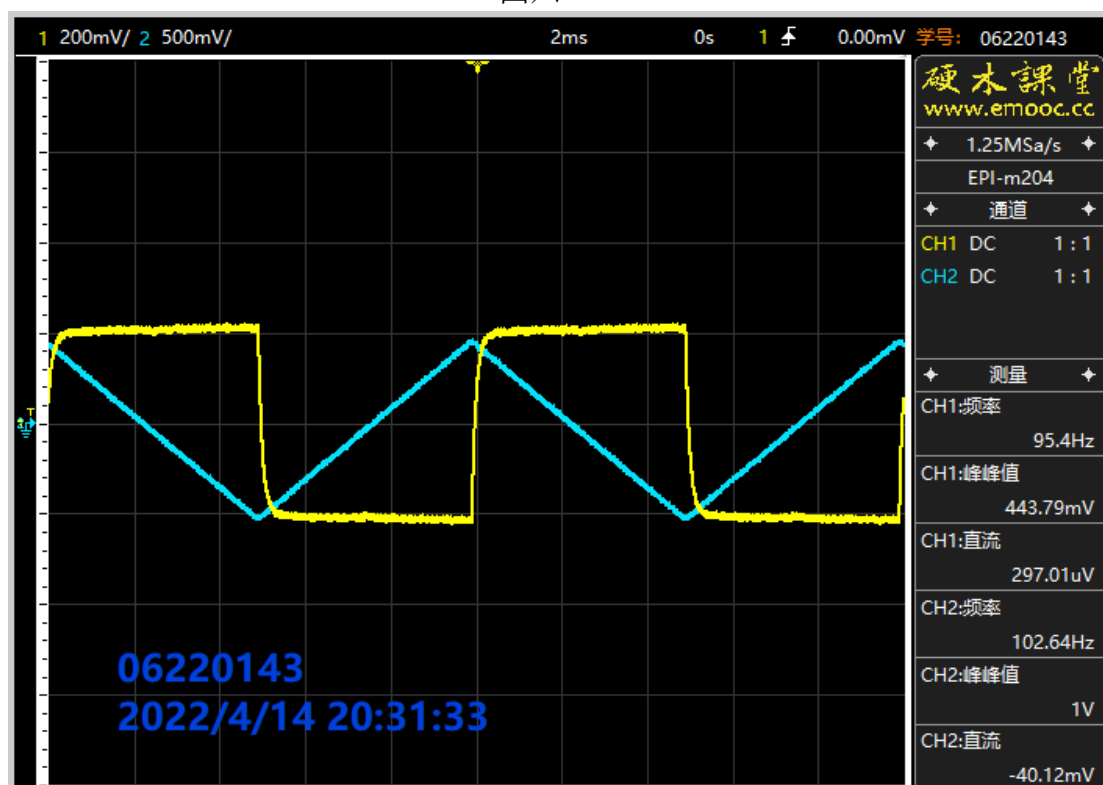
图四



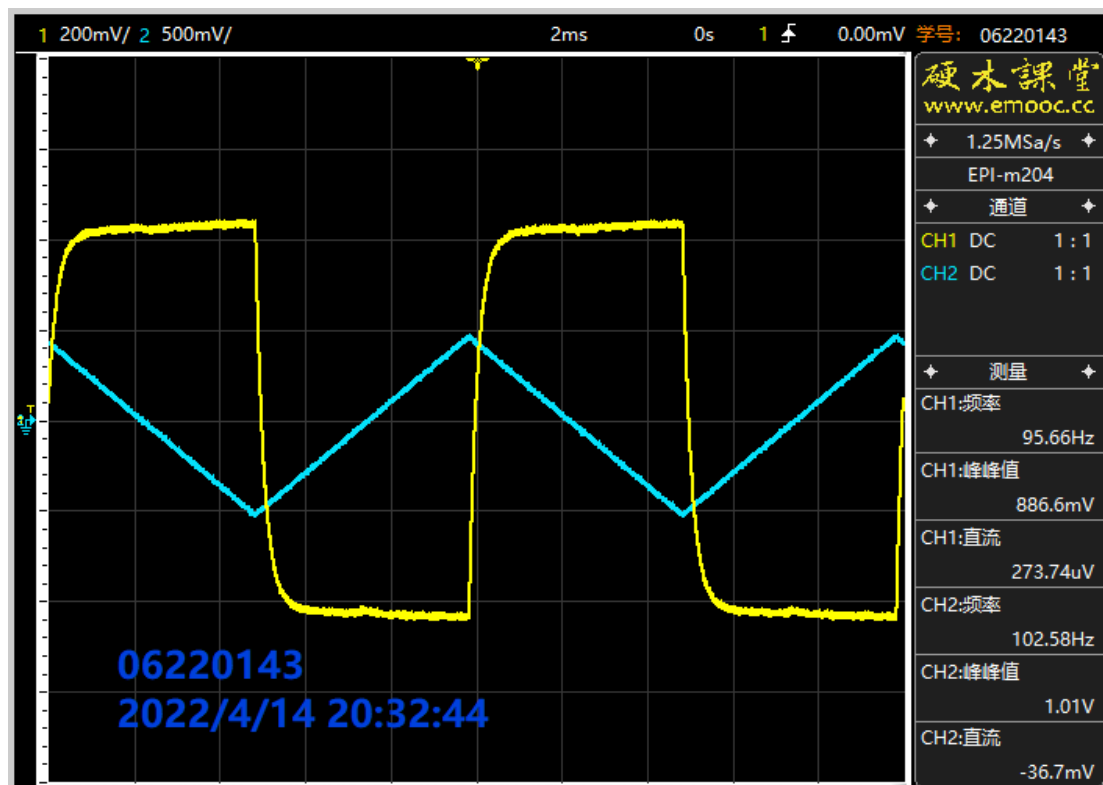
图五



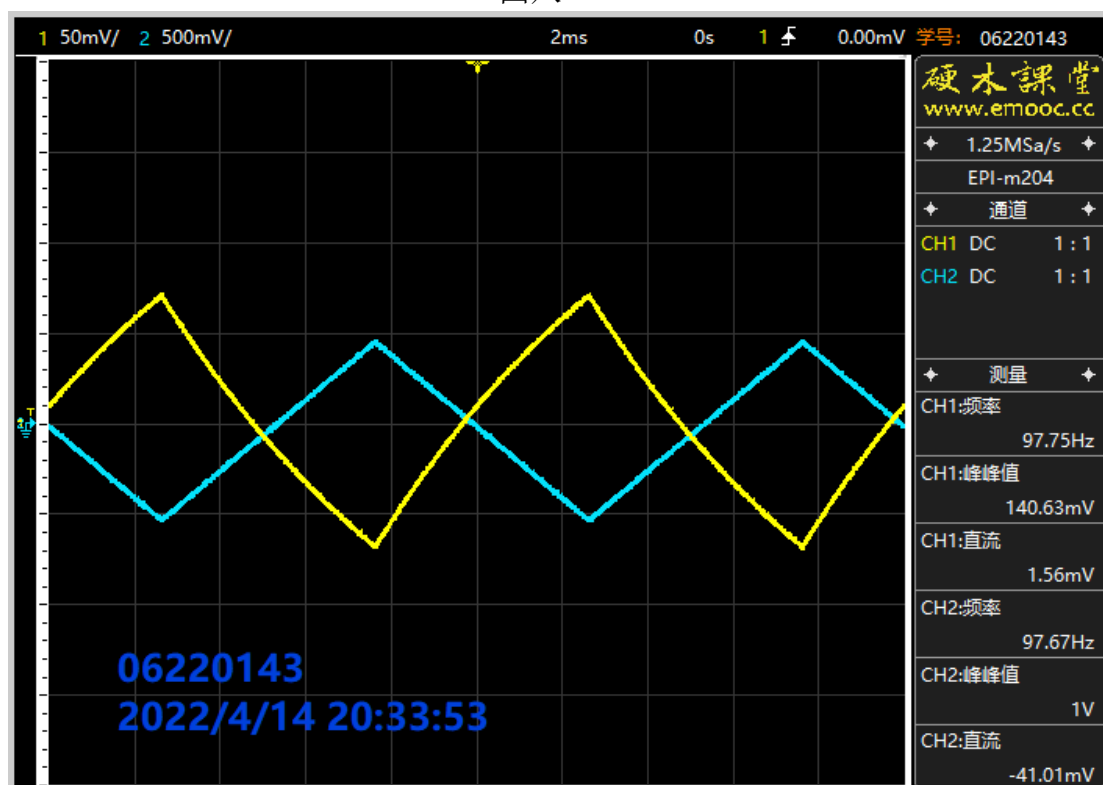
图六



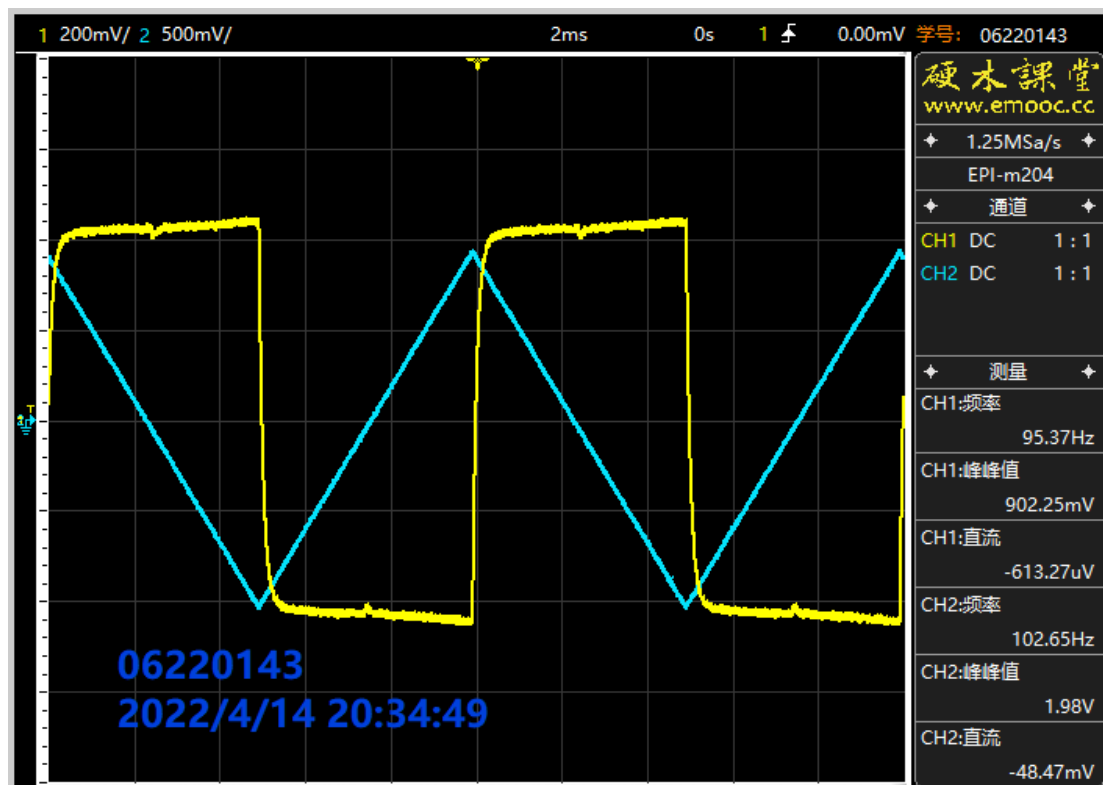
图七



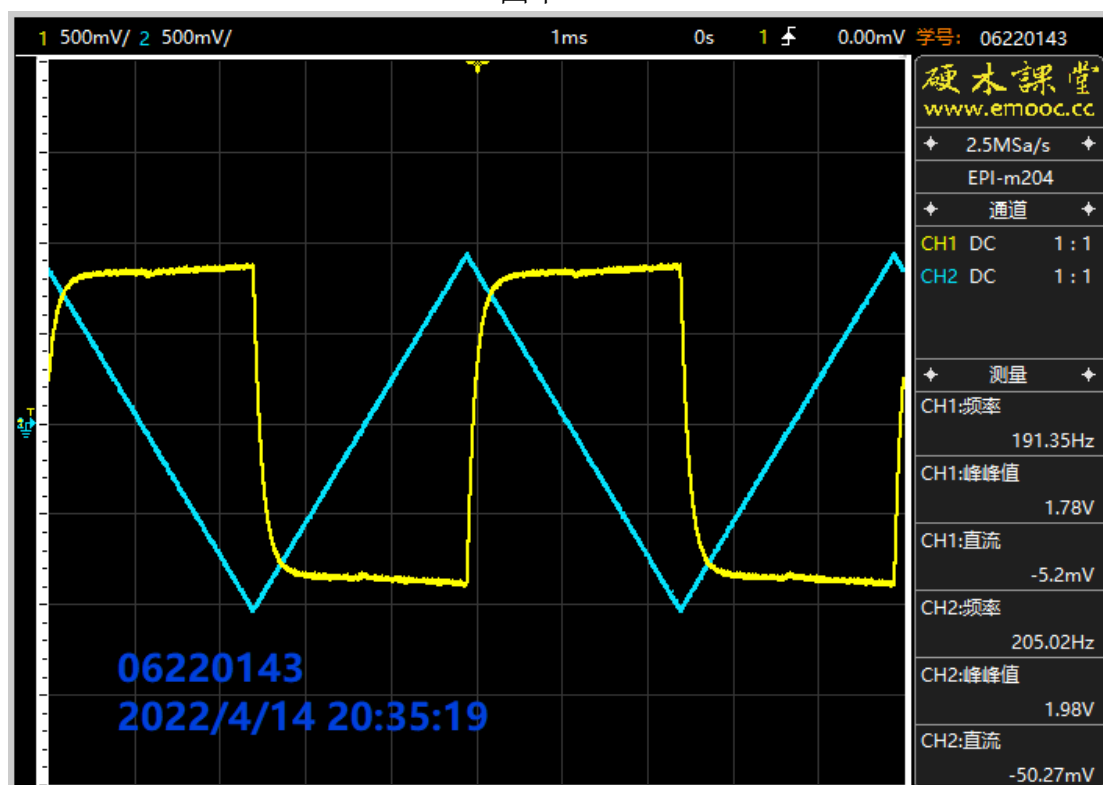
图八



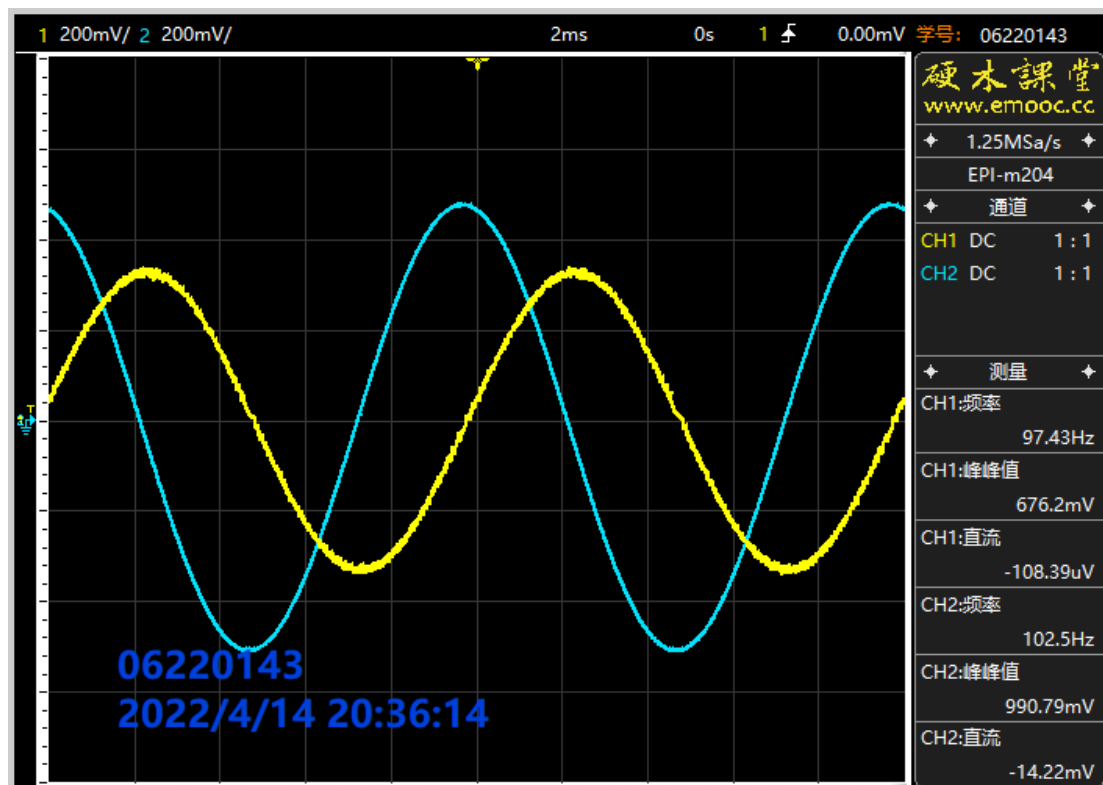
图九



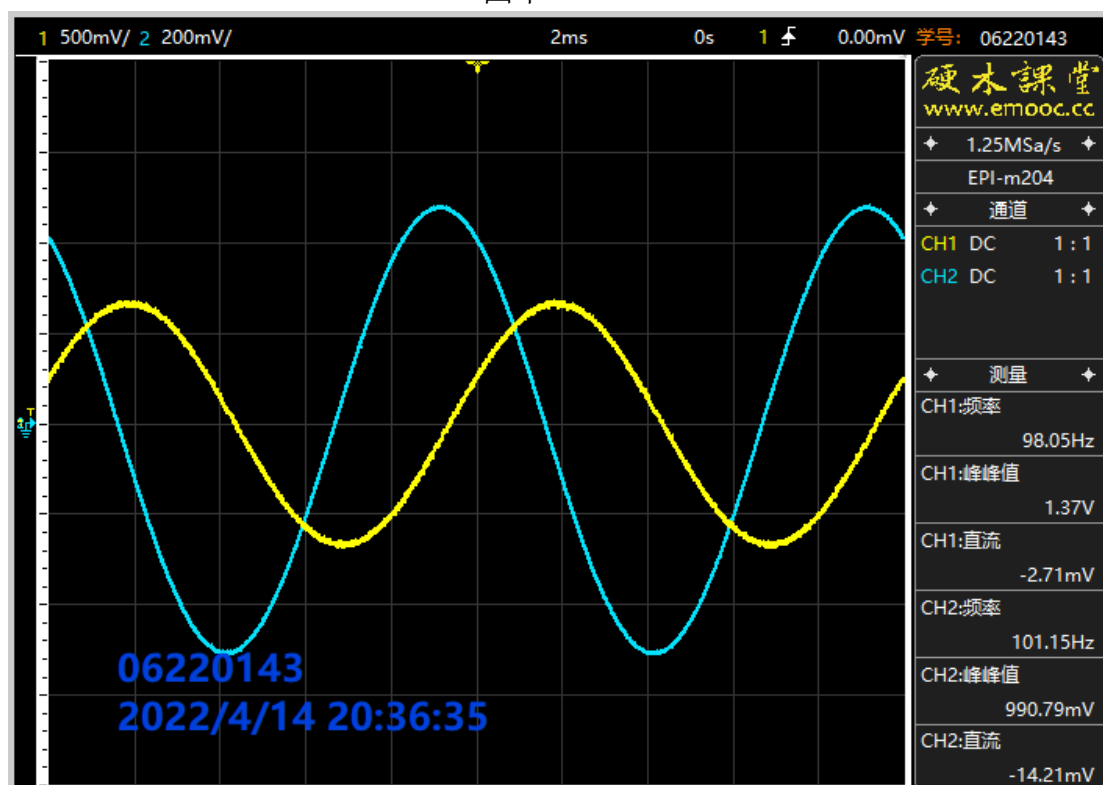
图十



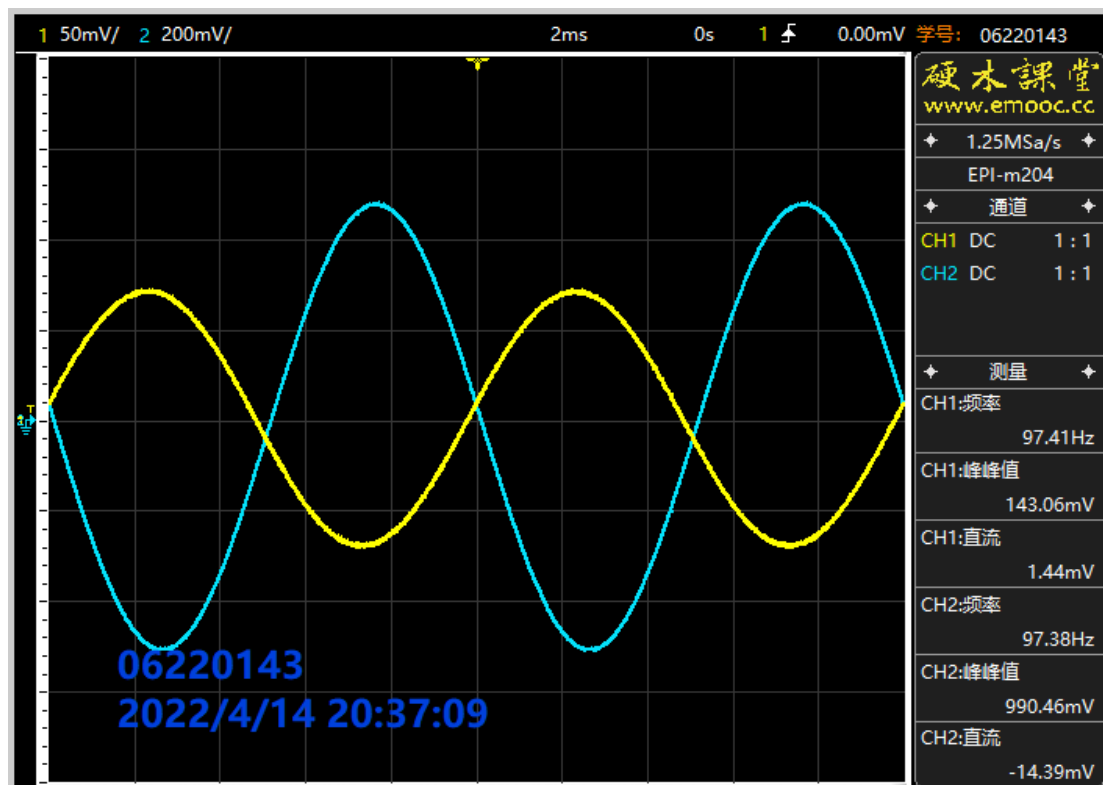
图十一



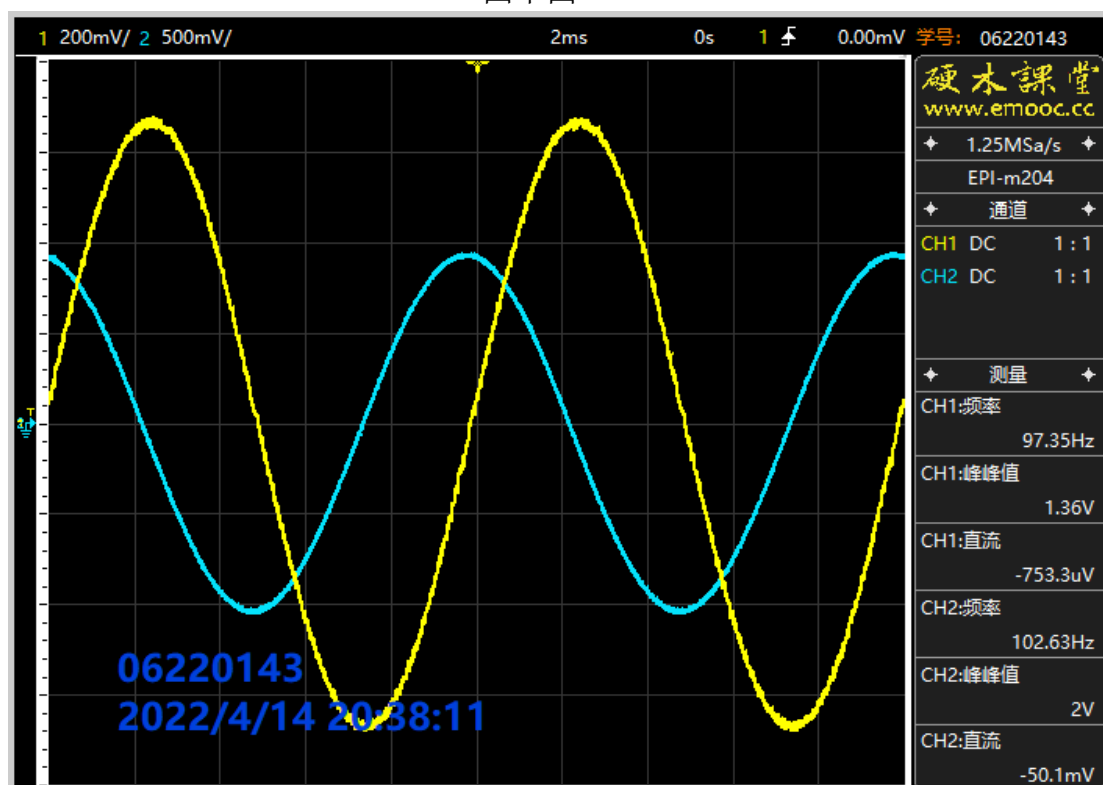
图十二



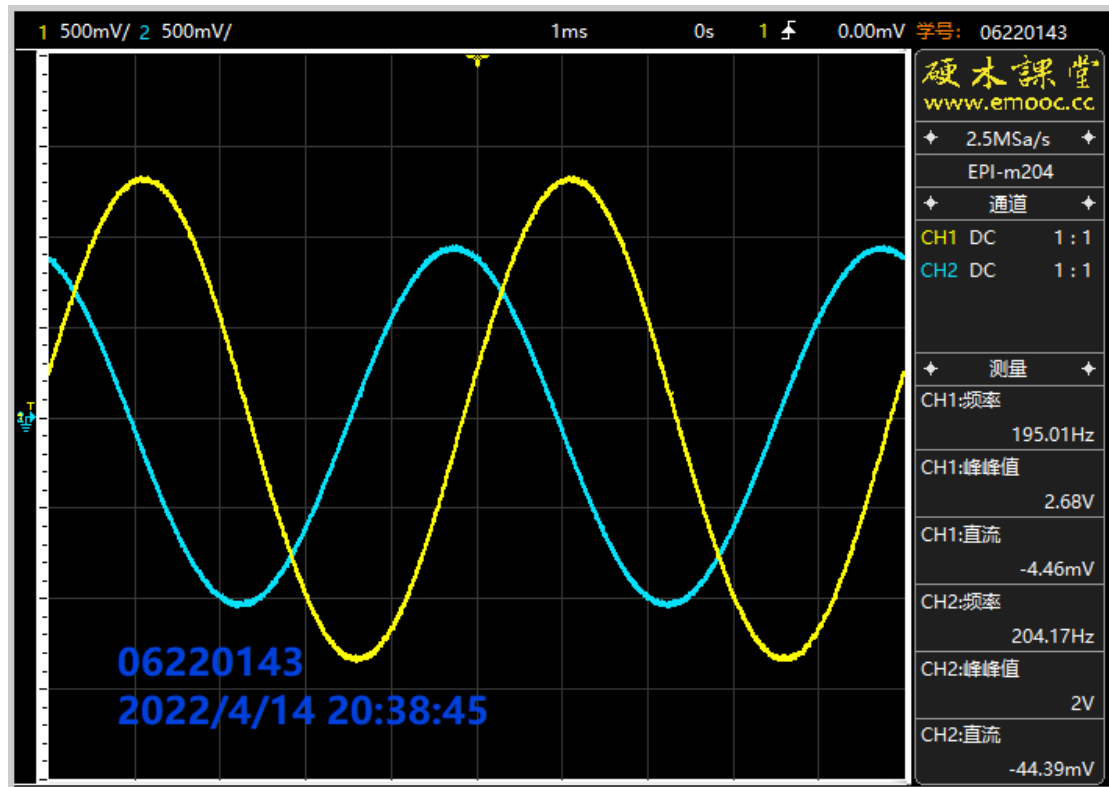
图十三



图十四



图十五

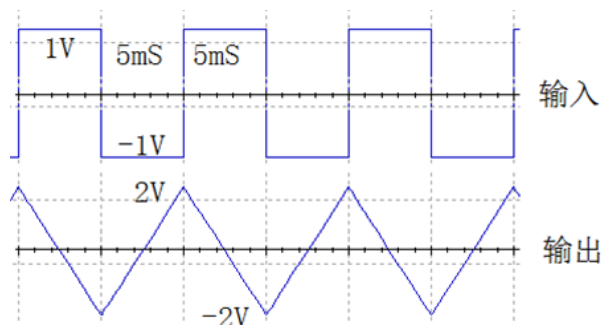


#### 实验结果分析:

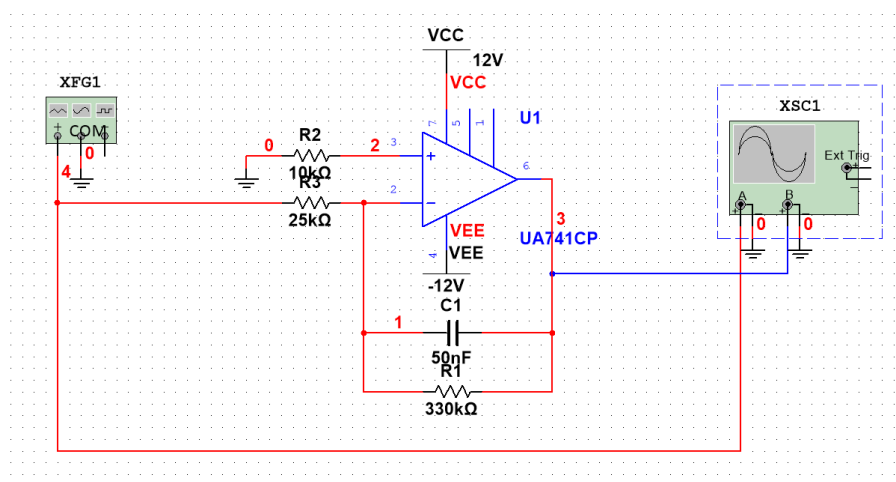
波形及参数如图, 分析波形之间的关系可以看到, 除了当  $C_2=10\text{nF}$  时, 即图二、七、十二, 幅度和波形总体上符合输出波形为输入波形的微分形式。而当  $C_2=10\text{nF}$  时, 电路的输出波形并不满足微分特性, 原因是因为此时工作频率大于特征频率, 运放近似看作反向比例放大电路, 而不是微分电路, 因此输出的波形是在原来波形的基础上进行了放大且相位差  $\pi$ 。



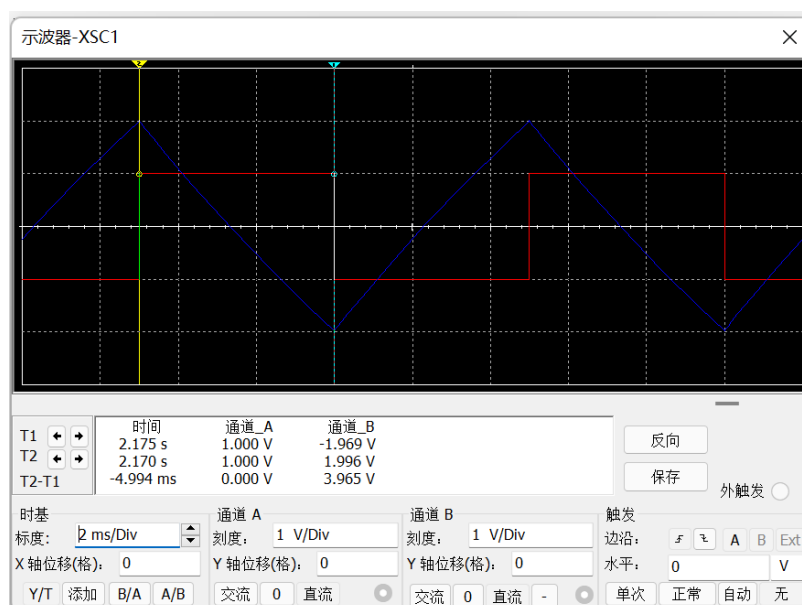
(2) **积分电路：**设计一个波形变换电路，由输入方波转换成输出三角波，波形参数如图所示。完成转换电路的设计及仿真测量；按仿真设计的电路参数完成电路的连接；如果需要得到输出三角波不同的斜率或输出幅度，如何调整参数；如果输入波形的占空比不为 0.5，输出波形会发生什么变化？其他自主测量与发现（输出波形顶部或底部被削平的原因，工作频率和积分关系……）；拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形（见在线实验第 3 单元的作业）。



请自拟积分电路性能测量与研究记录表  
电路仿真图：



波形仿真图：



积分电路性能测量与研究记录表:

输入	第一组实验 波形	第二组实验 波形	第三组实验 波形
$U_i$	图一 (CH2)	图二 (CH2)	图三 (CH2)
$U_o$	图一 (CH1)	图二 (CH1)	图三 (CH1)

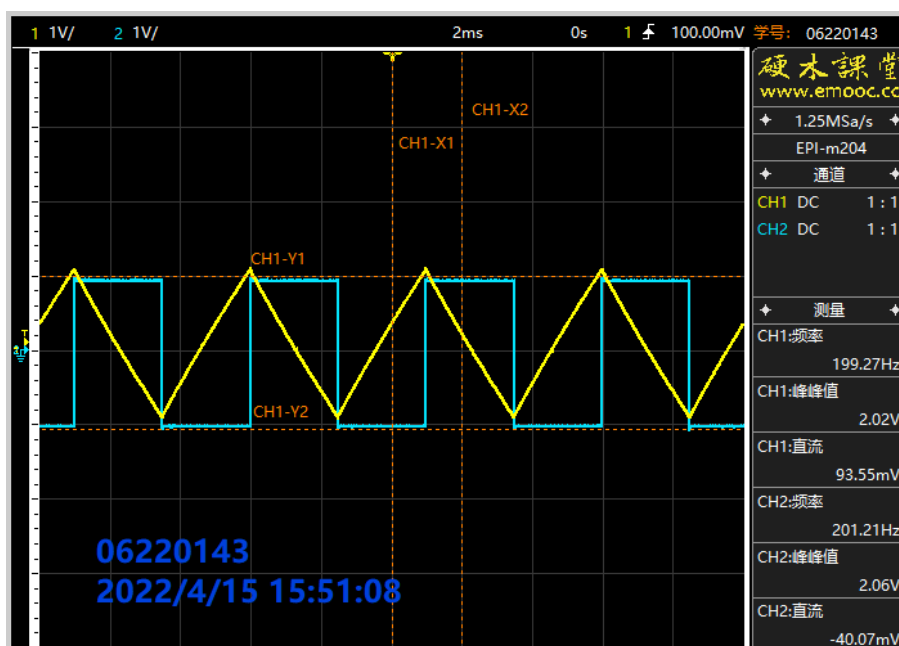
图一

输入峰峰值为 2V、频率为 100Hz、占空比为 0.5 的方波

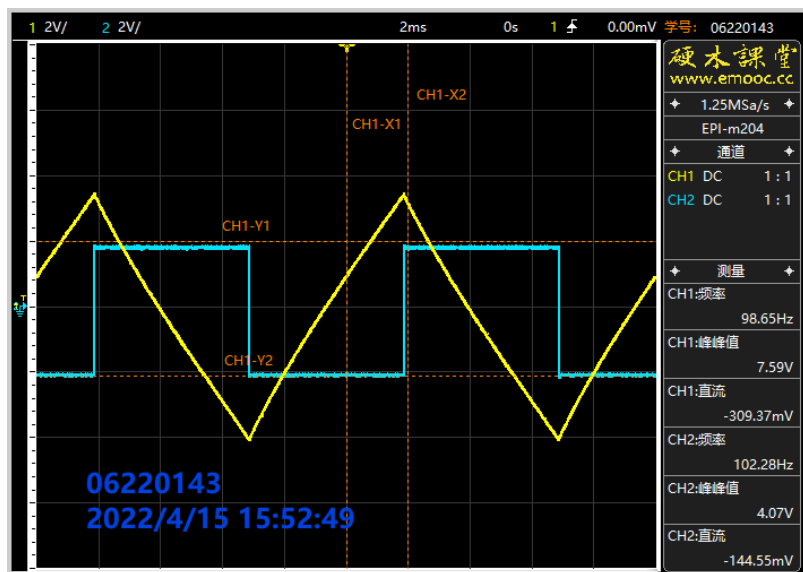


图二

输入峰峰值为 2V、频率为 200Hz、占空比为 0.5 的方波

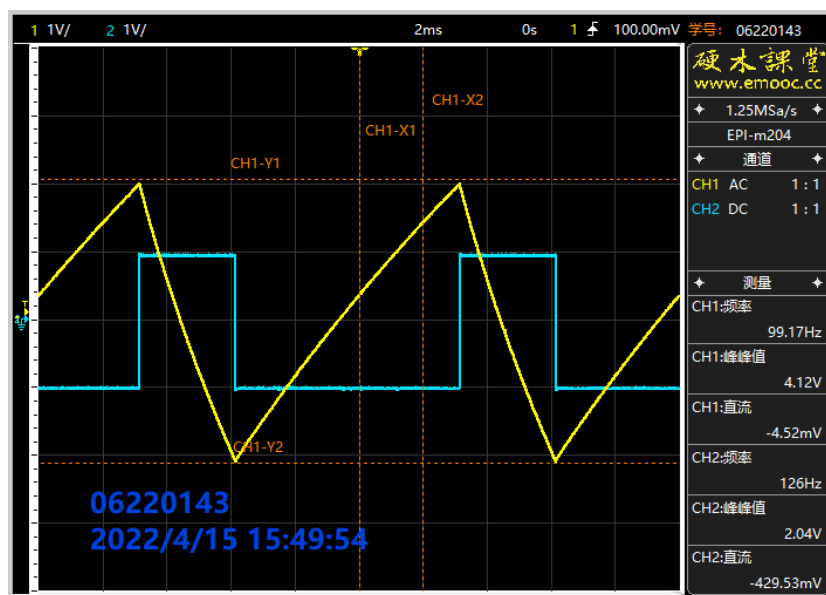


输入峰峰值为 4V、频率为 100Hz、占空比为 0.5 的方波

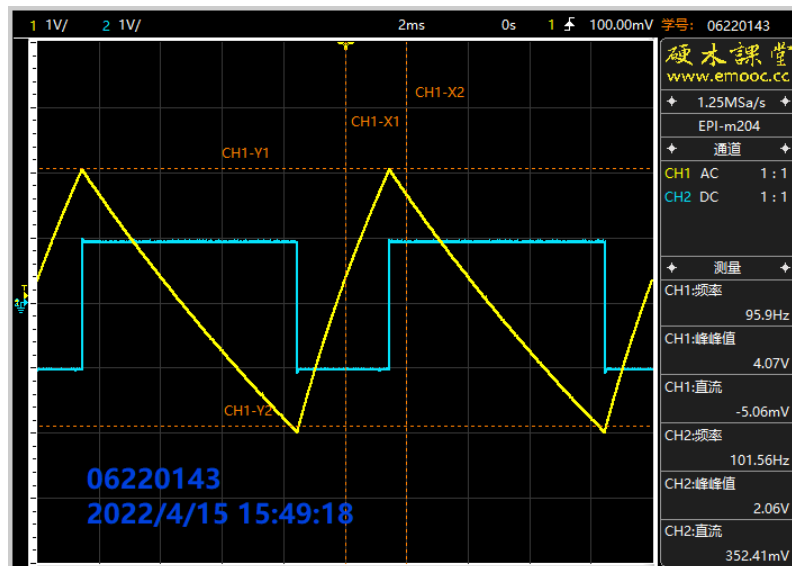


图三

输入峰峰值为 2V、频率为 100Hz、占空比为 0.3 的方波



输入峰峰值为 2V、频率为 100Hz、占空比为 0.7 的方波



### 实验结果分析:

1、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：

调整峰峰值或输入频率，比如图二；

2、如果输入波形的占空比不为 0.5，输出波形会：

变成锯齿波，比如图三；

3、输出波形顶部或底部被削平的原因：

运算结果超过 VOM；

4、工作频率和积分关系：

输入波形工作频率与输出波形频率一致，同时在相同峰峰值情况下可改变积分幅度。

### 总结:

通过反馈端并联电阻来减少输出波形漂移的情况，本次实验中多次实验无法减小，后来尝试调节平衡电阻，使运放两端的电阻相等，最终也将直流偏移的影响调节到最小

## 五、 实验总结

Multisim 仿真电路和实际电路波形的比较，认识到理想状态和现实功能的差异，为后续调试综合性较强的电路打下基础。

模电实验和其他很大的不同是，由于因素太多，因此我们只考虑主要因素影响，而尽量减小其他方面的影响。

当我们实际搭接电路的时候，需要考虑不同型号器件的限制，比如最大输出电流，最大输出电压。

由于我们利用实验箱来完成整个实验，所以我们需要特别注意实验箱的安全问题，可以先搭好电路，检查无误后再接通电源。

---