

实验预习

实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：_____ 原始数据审核：_____

（预习时，需计算理论数据，并且使用仿真软件进行仿真，完成预习报告中的仿真部分，可另附一预习仿真报告作为预习报告）

注意：所有的波形都必须拍照保存，用于课堂检查和课后分析。

以下所有公式推导都是手打的，绝无复制粘贴。

1、同相比例放大电路

表 6-2 同相比例放大电路测试数据表格

输入电压有效值	0.5V	1V	2V
理论计算值 U_o	3V	6V	12V（未考虑±15V 供电限制） 11.45V（考虑±15V 供电限制）
实测值 U_o	3.009V	6.03V	10.91V
误差	0.3%	0.5%	-4.7%

（说明： U_o 与 U_i 的关系： $U_o = (1 + \frac{R_F}{R})U_i = 6U_i$ ；

输入电压有效值 2V 时，若不考虑输出电压限制则输出 U_o 为 12V；若考虑 15V 供电限制：

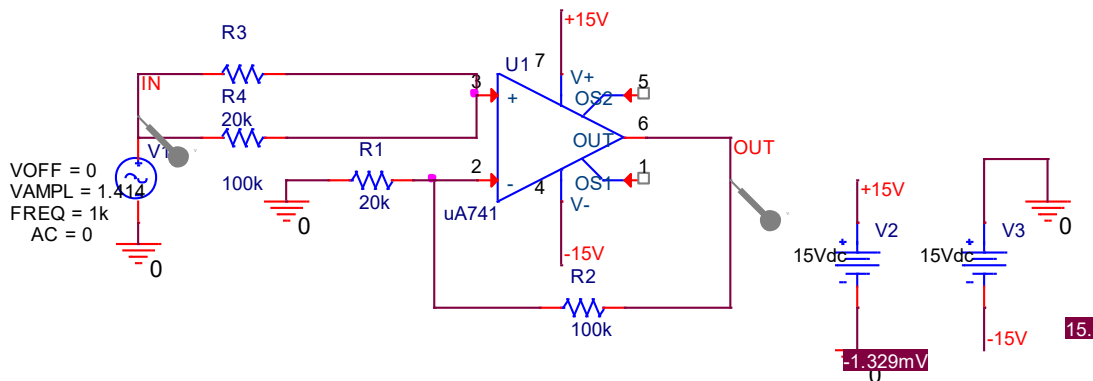
令 $12\sqrt{2} \sin \theta = 15$ ，解得 $\theta = \arcsin(0.884) = 1.084 \text{ rad}$

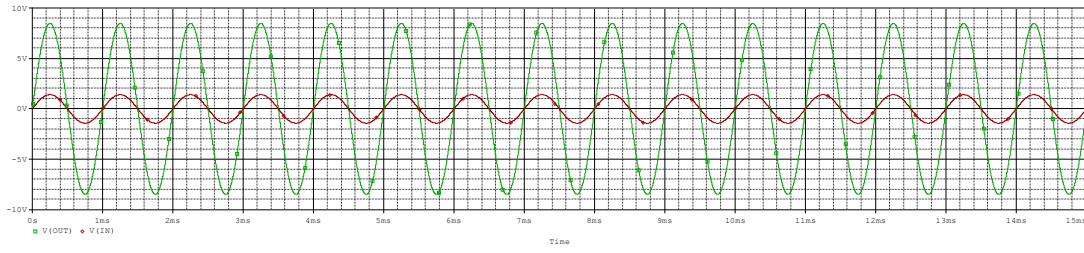
$$\text{则有效值 } V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times 4 \times \left(\int_0^{1.084} (12\sqrt{2} \sin x)^2 dx + \int_{1.084}^{\pi/2} 15^2 dx \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times 4 \times \left[288 \left(\frac{1}{2} x - \frac{\sin 2x}{4} \right) \Big|_0^{1.084} + \int_{1.084}^{\pi/2} 15^2 dx \right]}$$

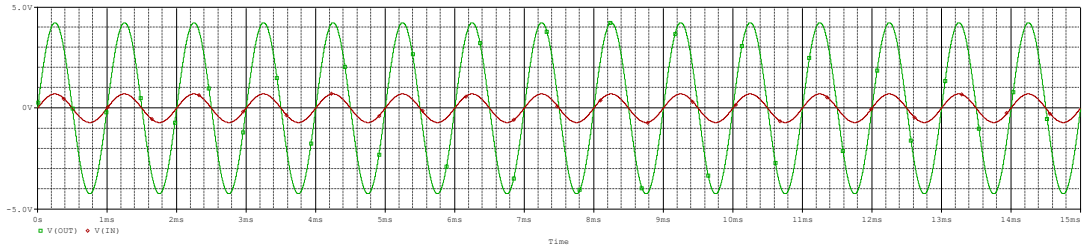
$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times 4 \times [144 \times 1.084 - 72 \sin(1.084 \times 2) + 225(\pi/2 - 1.084)]} = 11.45 \text{ V}$$

仿真预习：仿真电路图（交流输入电压有效值 1V）：仿真波形图（交流输入电压有效值 1V）：

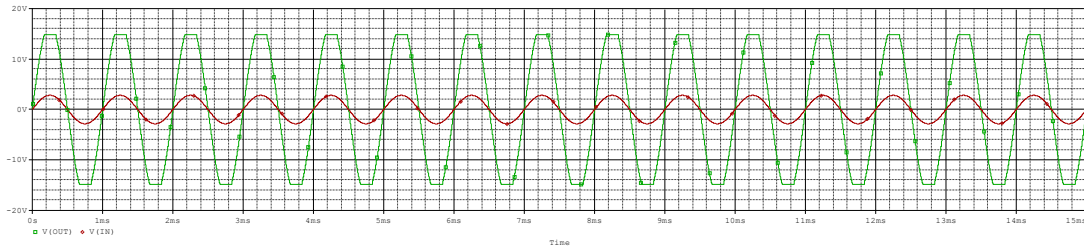




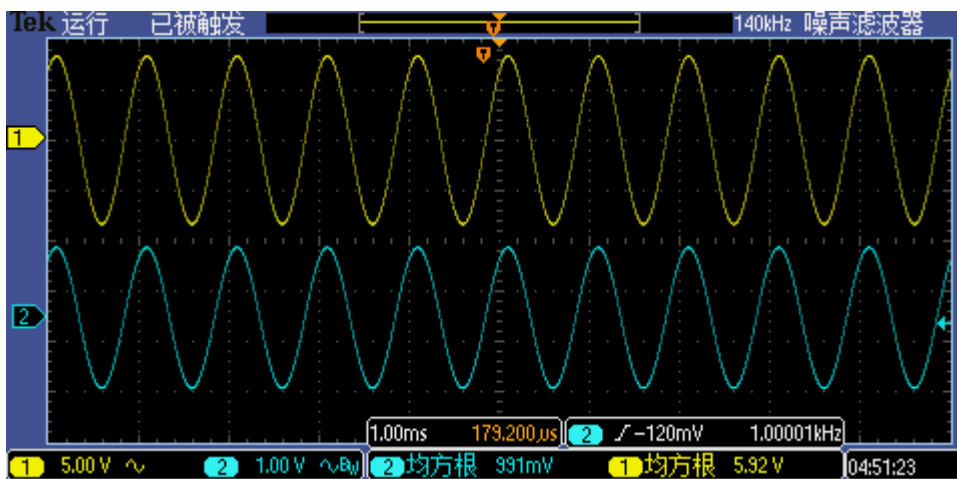
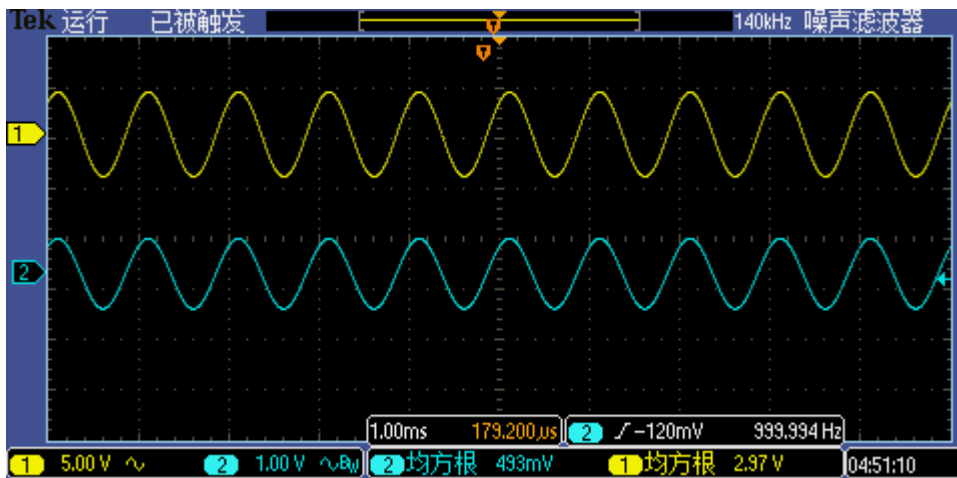
有效值 0.5V:

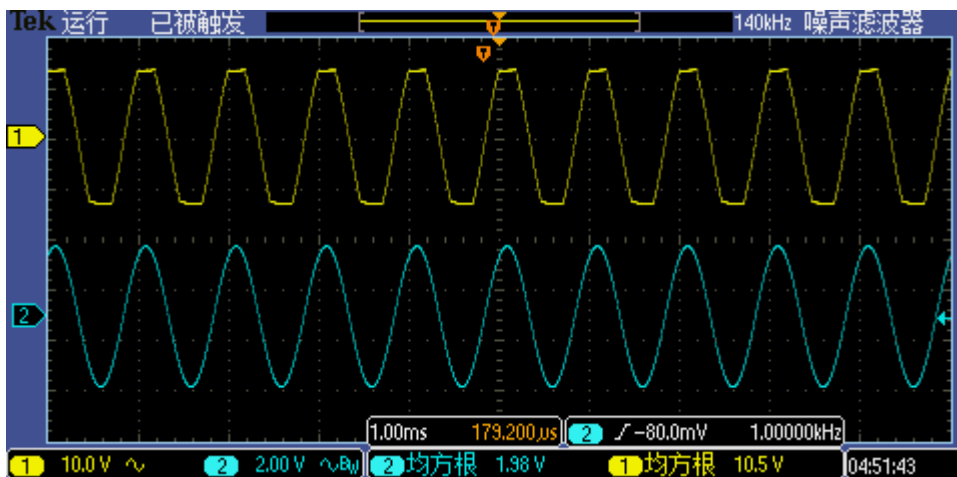


有效值 2V:



用示波器观察上述三种情况下 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。



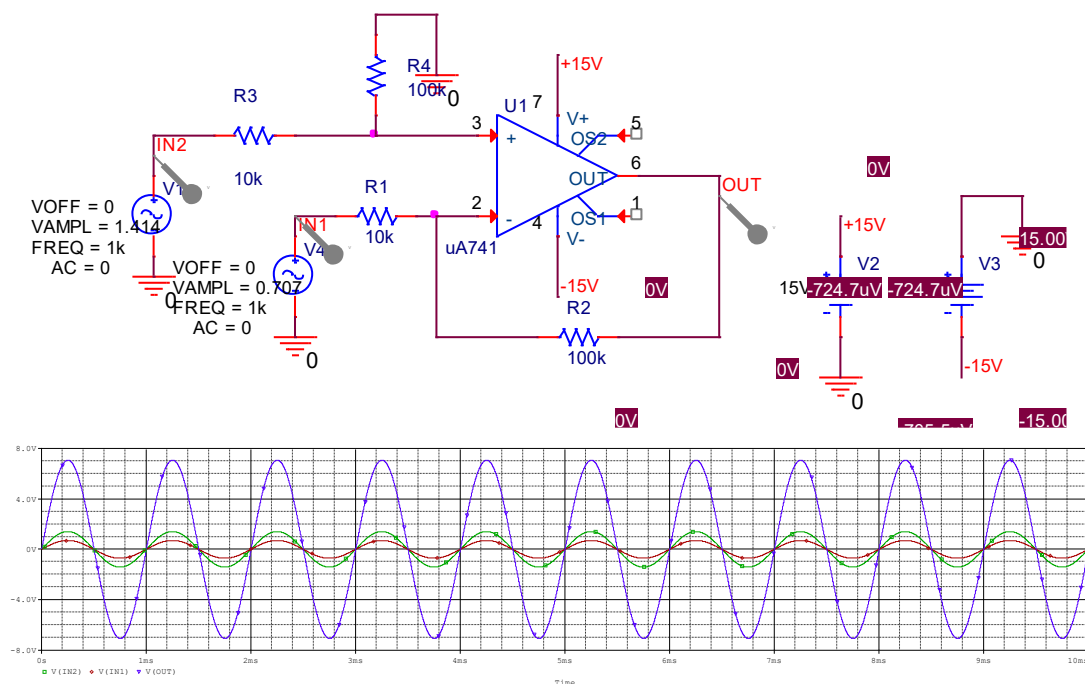


2、减法器电路

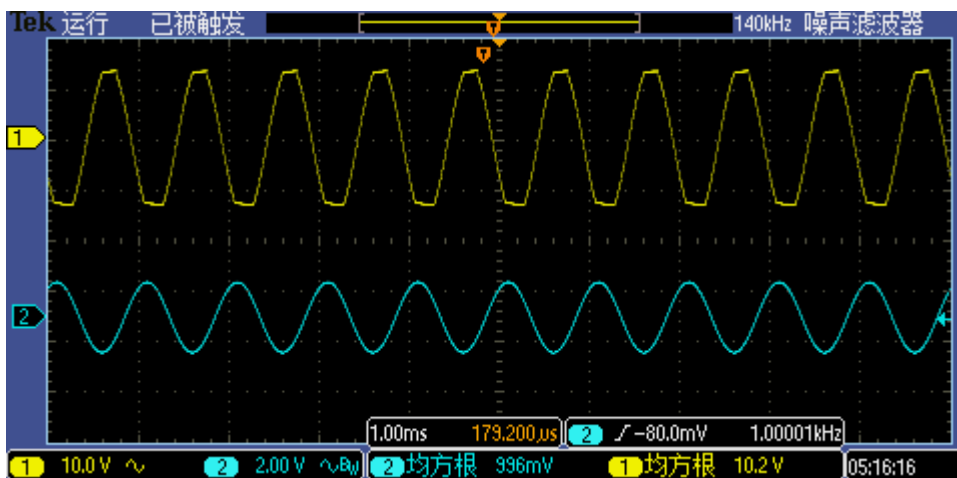
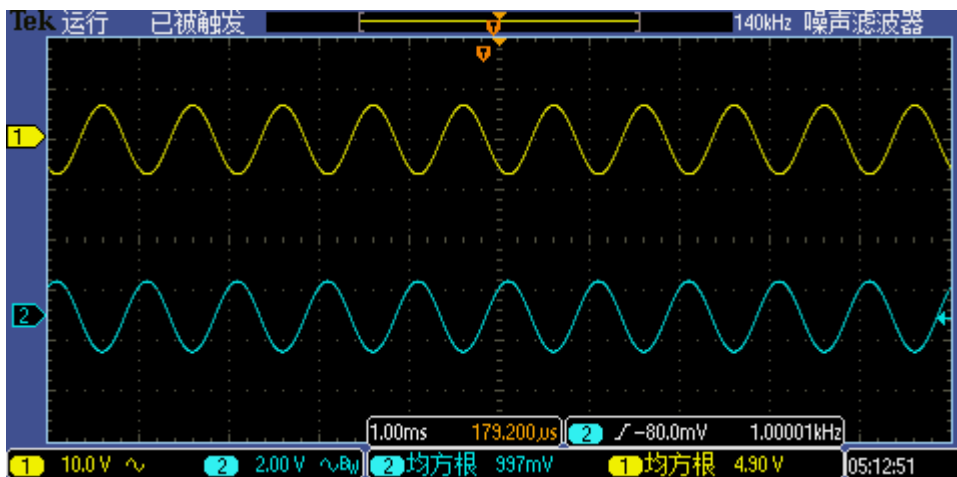
表 6-3 减法运算电路

有效值 U_{i1}	有效值 U_{i2}	有效值 U_o (测量)	有效值 U_o (理论)	误差
0.5V	1V	4.93V	5V	-1.4%
0.5V	1V	10.43V	$5\sqrt{5}$ V	-6.7%

仿真预习 (同相位): 仿真电路图 ($U_{i1}=0.5V$, $U_{i2}=1V$): 仿真波形图 ($U_{i1}=0.5V$, $U_{i2}=1V$):



用示波器观察两种情况下的 u_{i2} 和 u_o 的波形，并保存波形 u_{i2} 和 u_o 。(2 通道为输入，1 通道为输出)

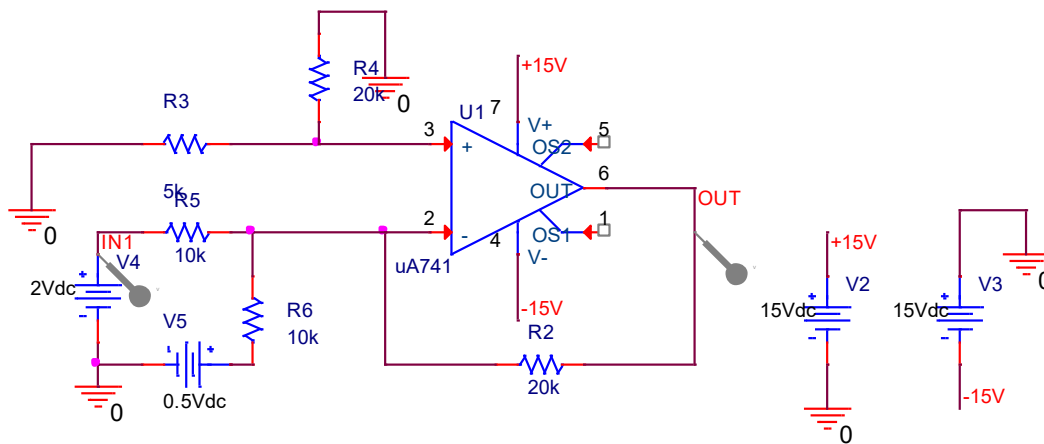


3、加法器电路

表 6-4 反相加法运算电路

直流信号源 U_{i1}/V	直流信号源 U_{i2}/V	U_o (测量) /V	U_o (理论) /V	误差
2V	0.5V	-4.9738	-5	0.524%
2V	1V	-5.965	-6	0.583%

实验电路图：

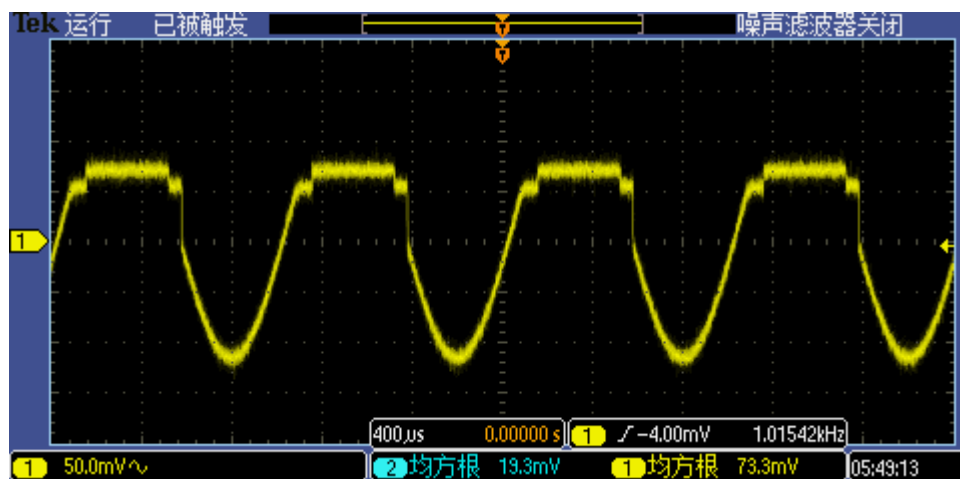
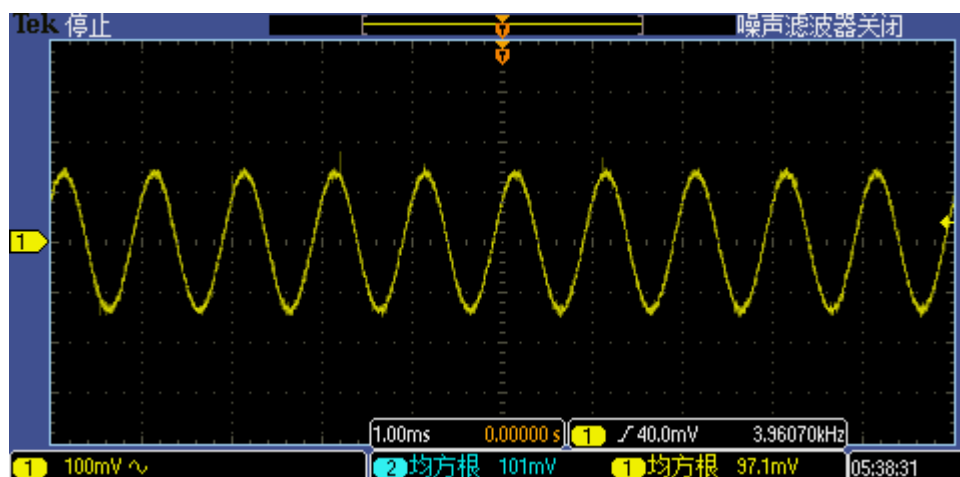


4、电压跟随器电路

表 6-5 电压跟随器电路测试数据表

测试条件	$R_1=10k\Omega$ $R_f=10k\Omega$ R_L 开路		$R_1=10k\Omega$ $R_f=10k\Omega$ $R_L=50\Omega$	
	直流分量	交流分量	直流分量	交流分量
理论计算值 U_o	1V	0.1V	1V	0.1V
实测值 U_o	1.0014V	99.65mV	0.9812V	73.13mV
误差	0.14%	-0.35%	-1.88%	-26.87%

用示波器观察两种情况下的 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。

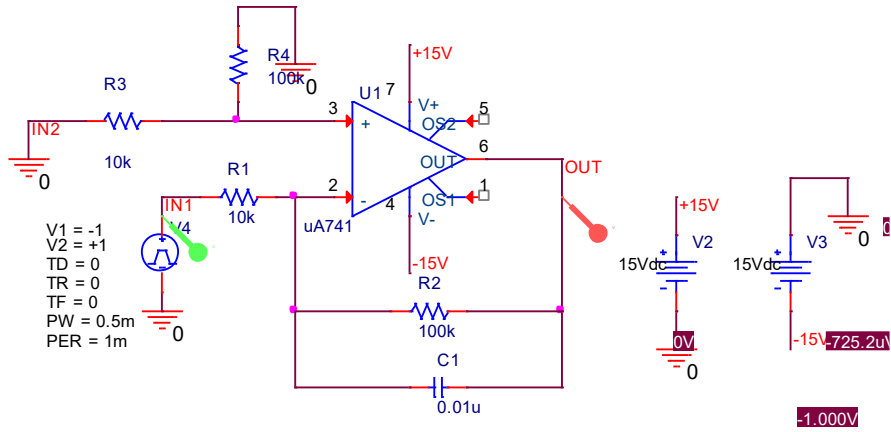


5、积分电路

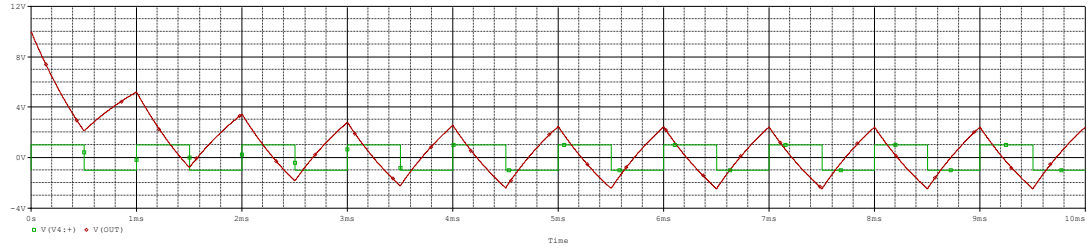
推导出 u_o 的表达式。
$$u_o = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt + u_o(t)$$

仿真预习：仿真电路图（电容 $0.01\mu F$ ）：

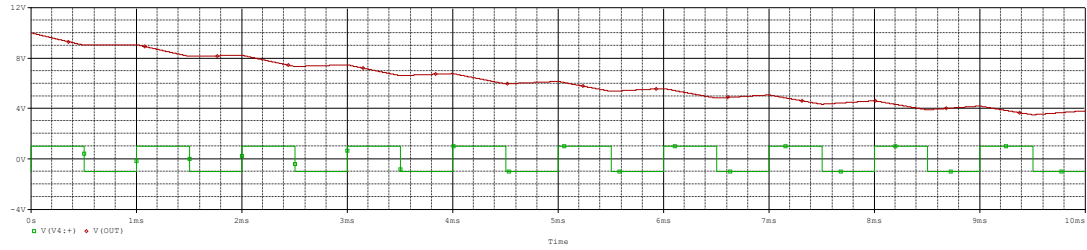
仿真波形图（电容 $0.01\mu F$ ）：



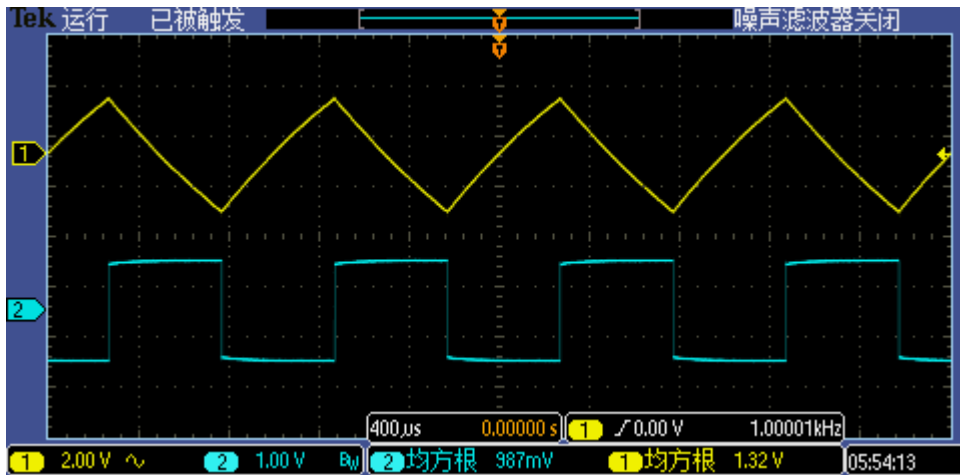
(0.01 μ F 时)

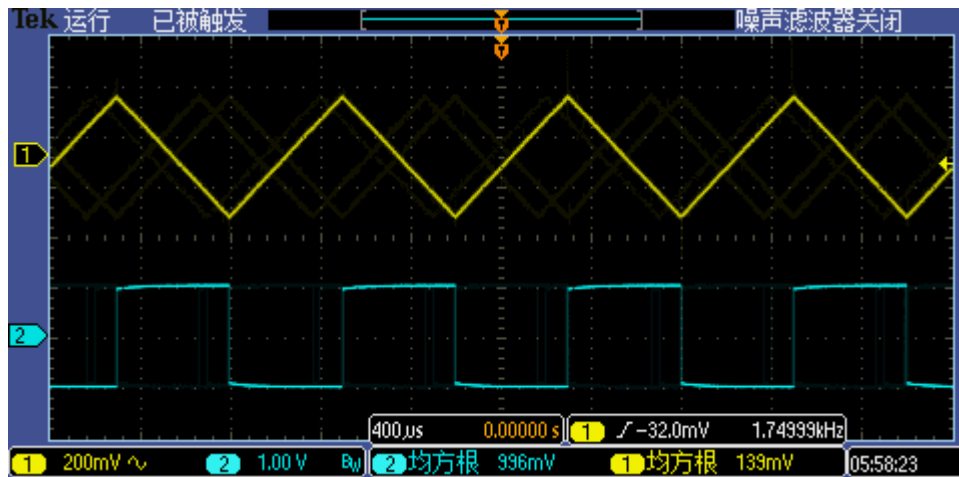


(0.1 μ F 时)



用示波器观察两种情况下 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。



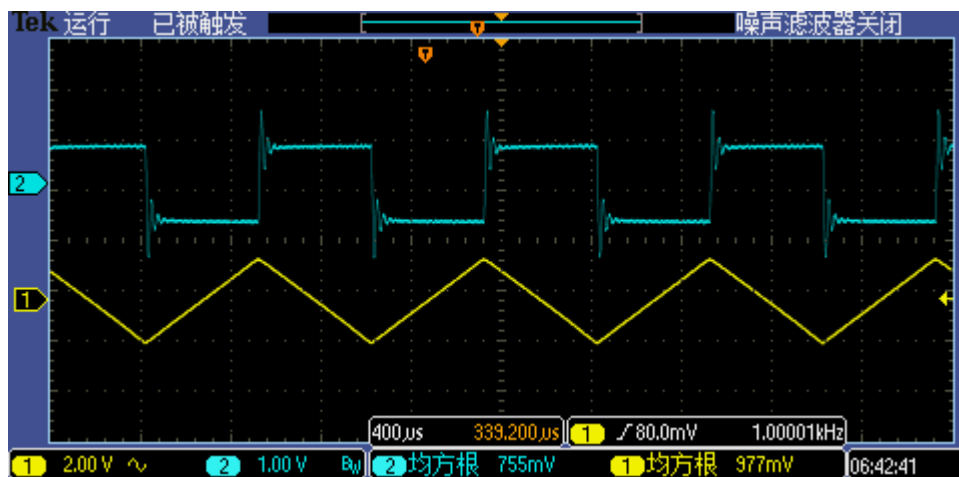


6、微分电路

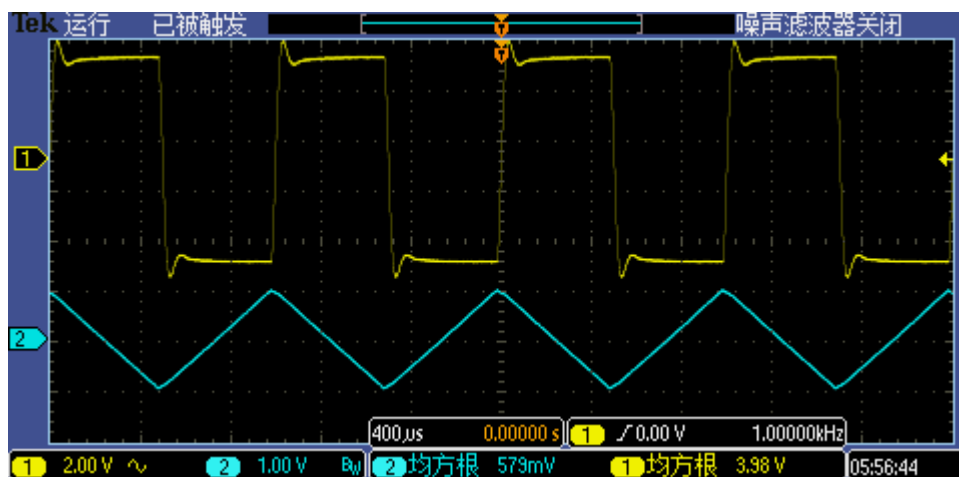
推导出 u_o 的表达式 $u_o = -R_f C \frac{du_i}{dt}$

用示波器观察两种情况下 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。

0.01µF: (1 通道为输入, 2 通道为输出)

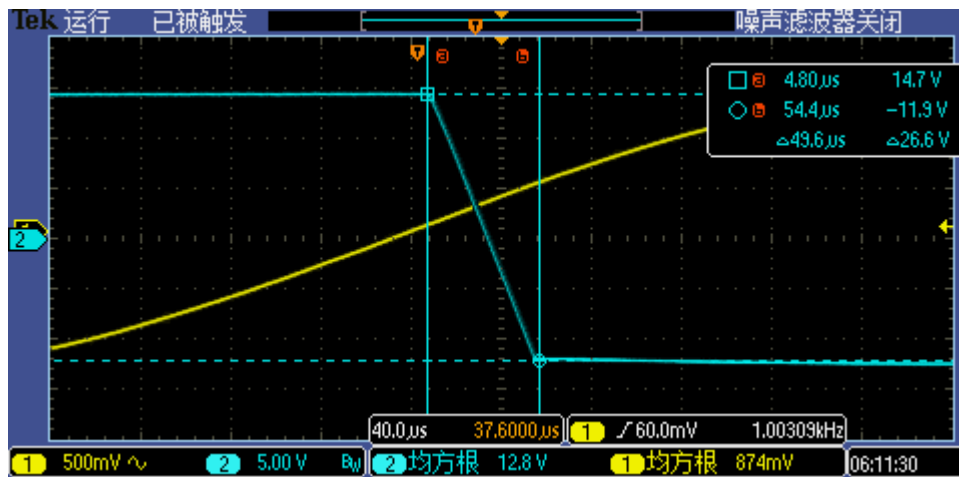
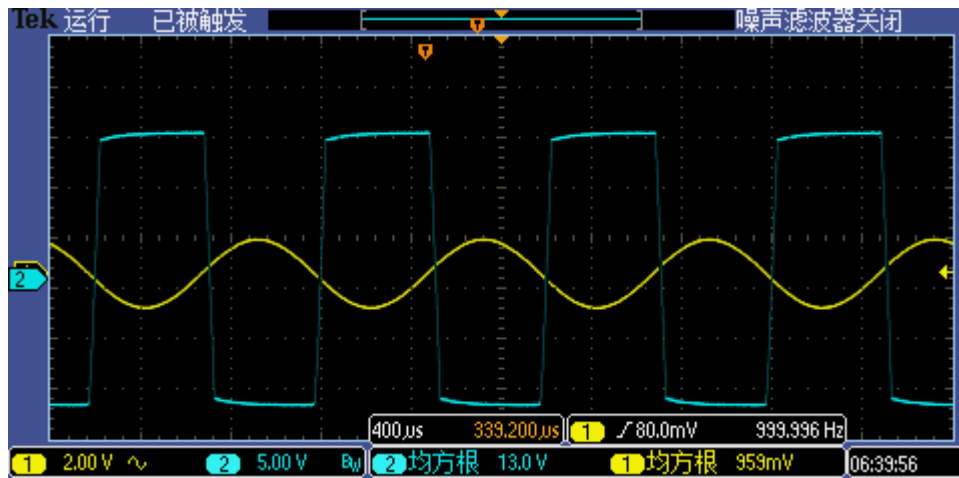


0.1µF: (2 通道为输入, 1 通道为输出)

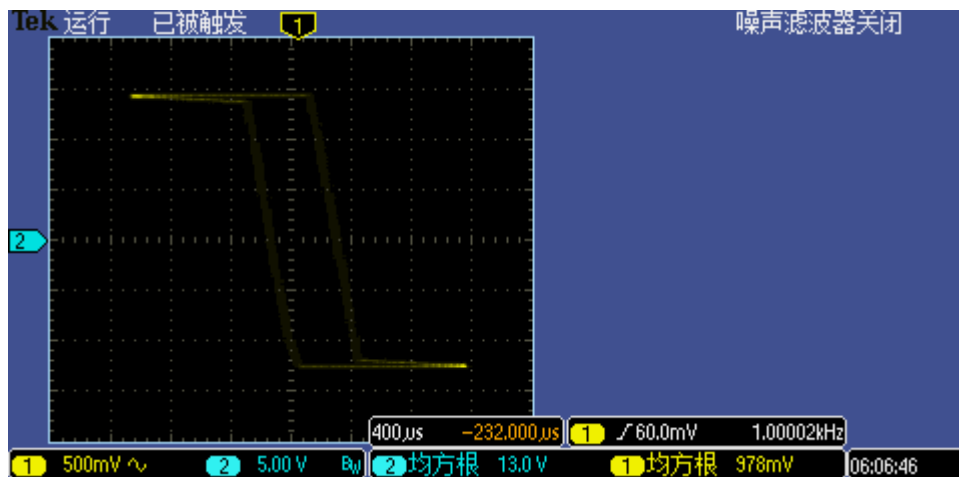


7、电压过零比较器电路

用示波器观察 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。



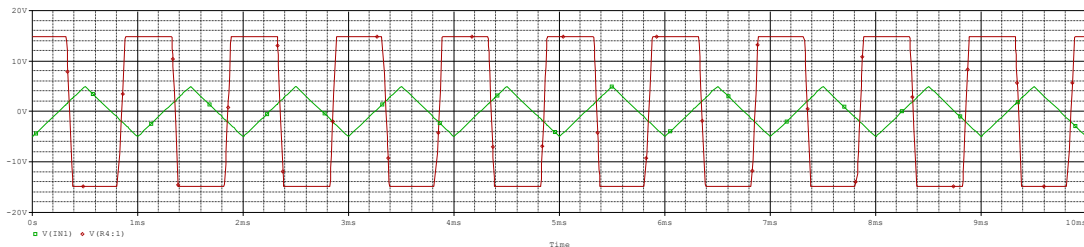
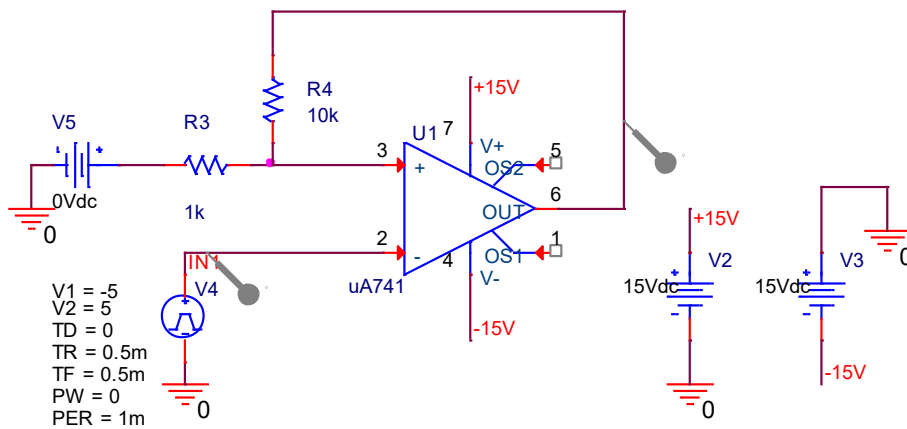
利用示波器 X-Y 方式测量并保存电压传输特性曲线。



8、滞回比较器电路

仿真预习：仿真电路图 ($U=0V$):

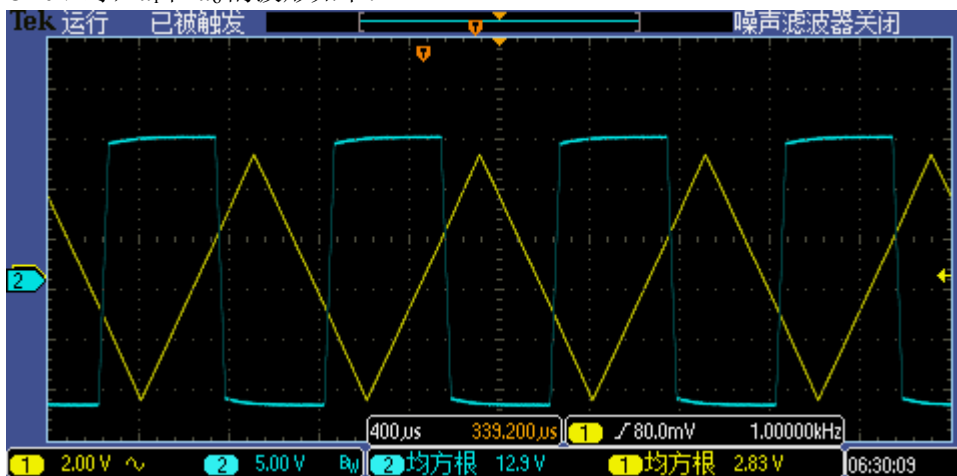
仿真波形图 ($U=0V$):



用示波器观察 $U=0V$ 时， u_i 和 u_o 的波形，并保存。

U/V	T/ μ s	TH/ μ s	u_{i+} /V	u_{i-} /V	$d=TH/T$
-3	996	272	-1.56	-4.20	27.3%
-1	1000	436	0.52	-2.04	43.6%
0	1000	516	1.40	-1.08	51.6%
2	1000	684	3.24	0.60	68.4%
3.5	1000	804	4.60	1.88	80.4%

$U=0V$ 时， u_i 和 u_o 的波形如下：



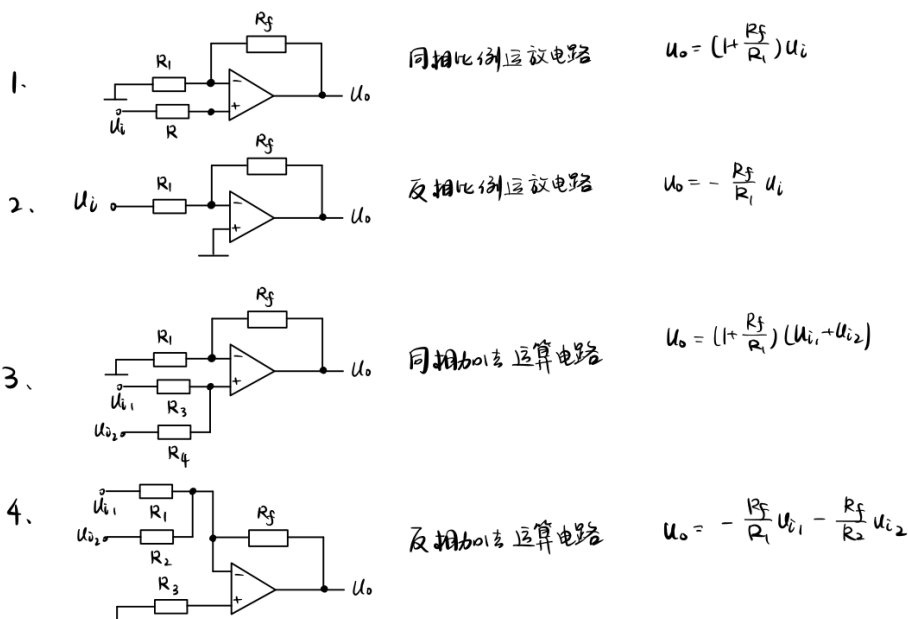
一、实验目的

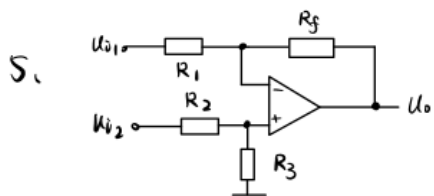
1. 掌握集成运算放大器的正确使用方法；
2. 掌握集成运算放大器的工作原理和基本特性；
3. 掌握利用运算放大器常用单元电路的设计和调试方法；
4. 掌握电压比较器电路的特点和电路的输出规律；
5. 掌握集成运算放大器非线性应用电路传输特性曲线的绘制步骤和方法。

二、实验设备及元器件

序号	名称	数量	型号
1	线性直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke 287C
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
5	交流毫伏表	1 台	SM2030A
6	电阻	若干	100Ω×1; 10kΩ×4; 20kΩ×2; 100kΩ×2; 5.1kΩ×1
7	电容	若干	0.01μF×2 0.1μF×2
8	集成运放	2 只	μA741×1 和 TL071CP×1
9	双向稳压管	1 只	2DW231 (6.2V×1)
10	直流信号源	1 块	ST2016 (-5V~+5V)
11	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
12	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

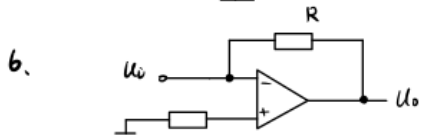
三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）





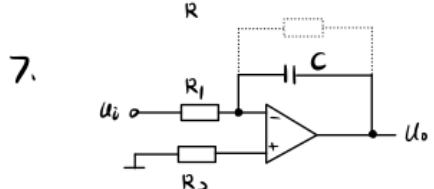
减法运算电路

$$U_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$



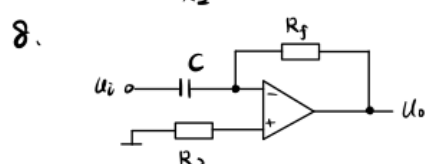
电压跟随器

$$U_o = U_i$$



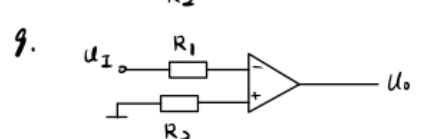
积分运算电路

$$U_o = -\frac{1}{R_1 C} \int U_i dt + U_o(t)$$



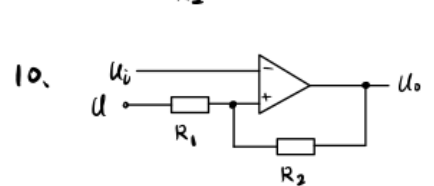
微分运算电路

$$U_o = -R_f C \frac{du_i}{dt}$$

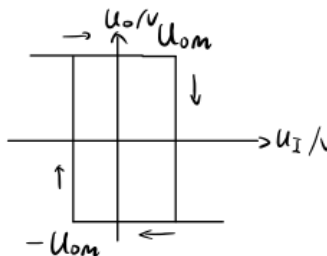


过零比较器

$$U_o = \begin{cases} -U_{om} & u_i > 0 \\ +U_{om} & u_i < 0 \end{cases}$$



滞回比较器



(减法运算电路表达式的条件: $R_1=R_2=R_f$)

四、实验过程

(叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-1”)

本次实验过程可简述。

1. 同相比例放大电路

- ① 选择元器件，接线，接通直流工作电源 $\pm 15V$ 。
- ② 输入信号是正弦波，其频率为 1kHz。有效值分别为 0.5V，1V。
- ③ 接通信号源，用交流毫伏表分别测量，当输入电压的有效值分别是 0.5V，1V，2V 时输出电压的有效值，填入表 6-2 中。
- ④ 用示波器观察 u_i 和 u_o 波形，并记录波形。
- ⑤ 分析输入 2V 时，输出波形变化的原因

2. 减法器电路

设计减法器，电路图在上面实验过程中。接通直流 $\pm 15V$ 电源，输入信号是正弦波，其频率为 1kHz，有效值如表 6-3，要求两个输入信号同相位。接通信号源，用交流毫伏表

或者 Fluke 287C 测量输出电压的有效值，填入表 6-3 中。用示波器观察输入电压 u_{i2} 和 u_o 的波形，并记录波形。重复上述操作，要求两个输入信号相位相差 90° ，记录数据及波形，并分析差异。

3. 加法器电路

设计反相加法运算电路，接通直流 $\pm 15V$ 电源，输入信号是直流信号源（电路模块 ST2016），幅值如表 6-4。接通信号源，用万用表直流电压档测量输出电压，填入表 6-4。

4. 电压跟随器电路

① 选择元器件，接线，接通直流工作电源 $\pm 15V$ 。

② 调整信号发生器的输出，使得电压跟随器输入为交直流叠加信号，具体数值为 $1V$ 直流电压叠加频率 $1kHz$ ，有效值 $0.1V$ 的正弦波（利用信号发生器的直流偏移量设定直流电压）。

③ 接通信号源，用万用表直流电压档和交流毫伏档，测试不同条件下的输出电压直流分量和交流分量的有效值。填入表 6-5 中。

④ 用示波器观察输入电压和输出电压的波形，并记录波形。

⑤ 分析负载不同（ R_L 开路和 $R_L=50\Omega$ ）时，输出电压的影响

5. 积分电路

按电路图要求选择电路元件，接好电路。调节函数信号发生器，使之输出频率为 $1kHz$ ，峰峰值为 $2V$ 的方波（幅值为 $\pm 1V$ ），作为电路的输入电压 u_i 。检查后，接通 $\pm 15V$ 电源，记录输入电压和输出电压的波形。将电容更改为 $0.1\mu F$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

6. 微分电路

按电路图要求选择电路元件，接好电路。调节函数信号发生器，使之输出频率为 $1kHz$ ，峰峰值为 $2V$ 的三角波，作为电路的输入电压。检查后，接通 $\pm 15V$ 电源，记录输入电压和输出电压的波形。将电容更改为 $0.1\mu F$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

7. 过零电压比较器电路

① 按图 6-15 接线。

② 输入 u_i 为正弦波信号，其有效值为 $1V$ ，频率为 $1kHz$ 。

③ 接通直流电源 $\pm 15V$ 。

④ 用示波器观察输出电压波形，并记录输入波形、输出波形。

⑤ 在输入电压过零处展开，观察输出波形的变化斜率、时间等参数，并思考输出波形翻转斜率和运放的哪个参数有关。

⑥ 利用示波器 X-Y 方式测量并保存电压传输特性曲线。

8. 滞回比较器电路

① 按图 6-16 接线。

② 输入 u_i 为三角波信号，其幅值为 $\pm 5V$ ，频率为 $1kHz$ 。

③ 接通直流电源 $\pm 15V$ 。

④ 按照表 6-6 要求，改变直流信号源（电路模块 ST2016）输入 U 端，用示波器测量输出电压 u_o 的矩形波波形，如图 6-17 所示。

⑤ 按照表 6-6 要求，改变直流信号源输入 U 端，用示波器测量输出电压 u_o 的矩形波波形的变换，测量 T 和 T_H 的数值。

⑥ 用示波器观察输出矩形波波形的变化，测量输出电压 u_o 由负电压跃变为正电压时的 u_i 瞬时值 u_{i+} 和 u_o 由正电压跃变为负电压时 u_i 瞬时值 u_{i-} （测量跃变的起始时刻的对应输入电压值），记入表 6-6，并记录 $U=0V$ 时， u_i 和 u_o 的波形。

五、实验数据分析

（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析 and 处理，并对

实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行）

1、同相比例放大电路

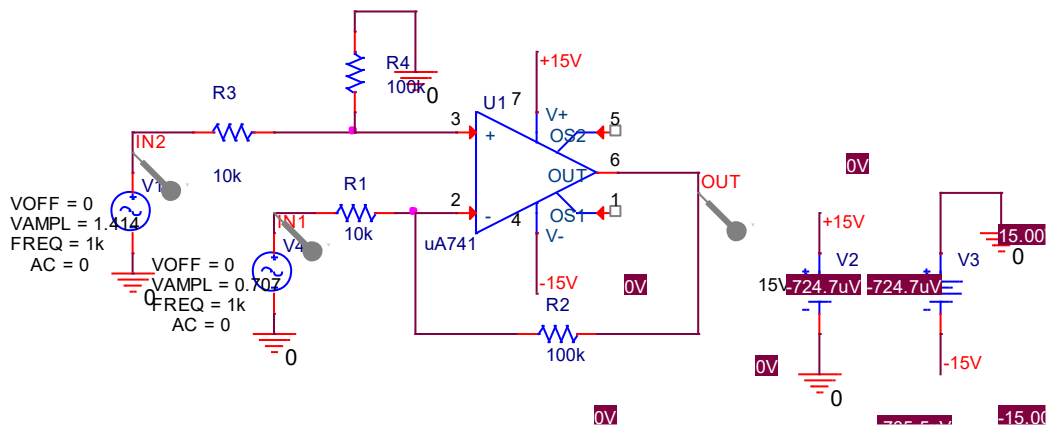
记录同一时序下的输入输出波形图，用示波器观察输入电压和输出电压的相位关系，得出实验和理论分析结论。

点击括号中链接（[同相比例放大电路](#)）查看波形图

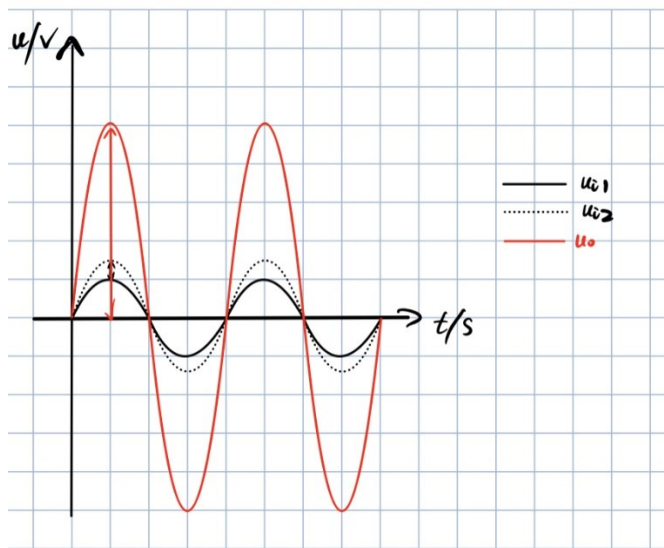
输入输出同相位，电压放大倍数表达式 $U_o = (1 + \frac{R_F}{R})U_i = 6U_i$ 。当输入电压过大时，运放进入非线性区，输出波形顶端削平。

2、减法器电路

画出实验电路图：



同一时序下输入输出波形图：正弦波很难画好，尽力了。

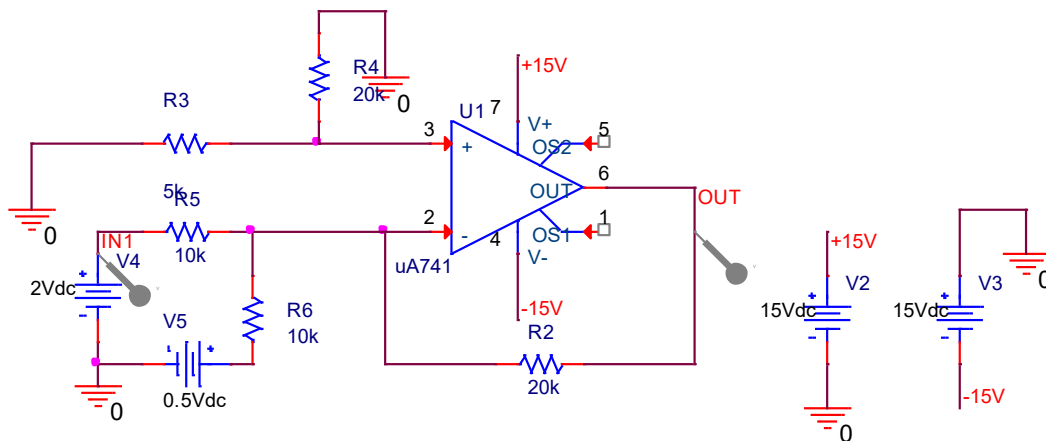


用示波器观察两种情况下的 u_{i2} 和 u_o 的波形，并保存波形 u_{i2} 和 u_o 。

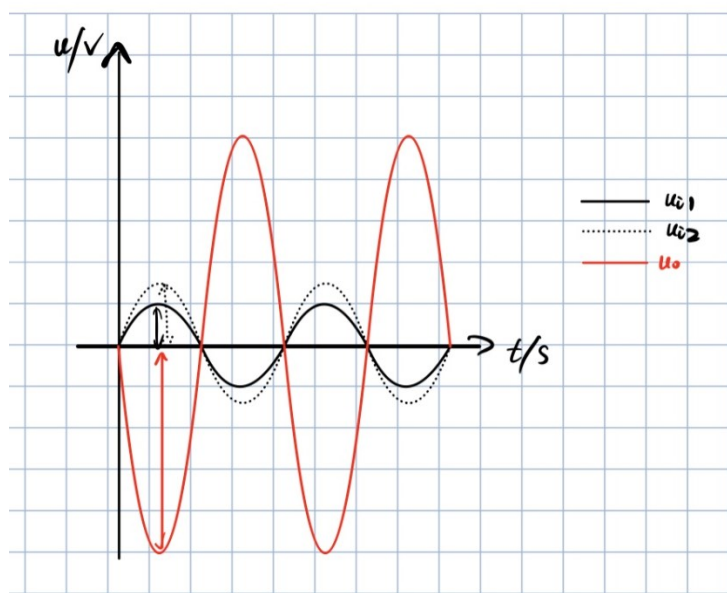
点击括号中链接（[减法器电路](#)）查看波形图

3、加法器电路

画出实验电路图：



画出同一时序下的输入输出波形图：



4、电压跟随器电路

记录同一时序下的输入输出波形图，用示波器观察输入电压和输出电压的相位关系，得出实验和理论分析结论。

点击括号中链接（[电压跟随器电路同相比例放大电路](#)）查看波形图。

结论：当带上负载后，输出电压有较大的失真，可能是由于同相端、反相端阻抗不匹配导致。

5、积分电路

记录同一时序下的输入输出电压波形图：

点击括号中链接（[积分电路同相比例放大电路](#)）查看波形图。

① 将电容更改为 $0.1\mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化。

幅值减小到原来的 1/10 左右。

6、微分电路

记录同一时序下的输入输出电压波形图：

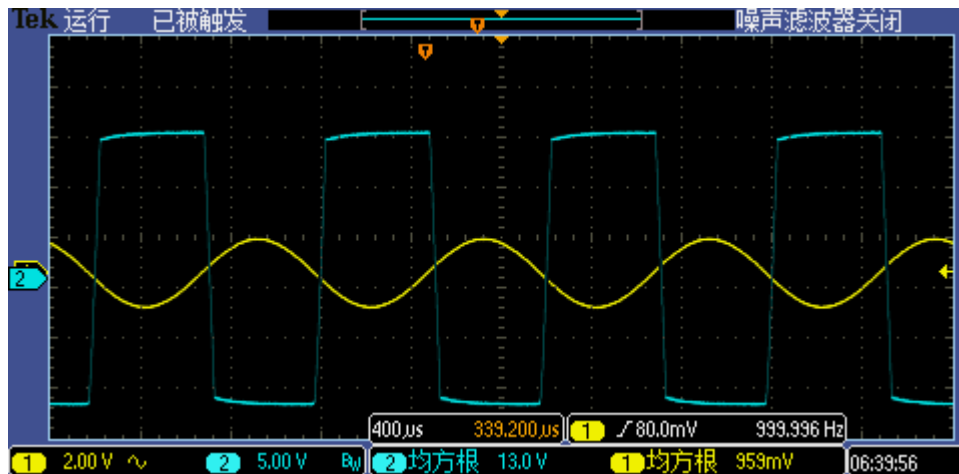
点击括号中链接（[微分电路](#)[积分电路](#)[同相比例放大电路](#)）查看波形图。

① 将电容更改为 $0.1\mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化。

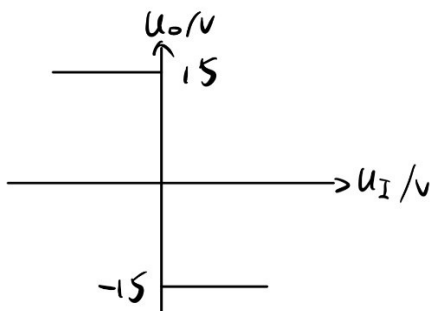
输出波形幅值明显增大。

7、电压过零比较器电路

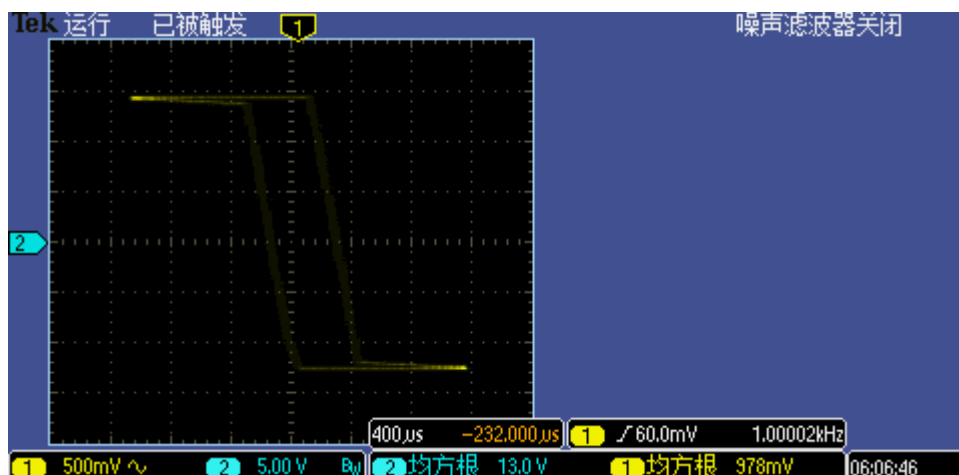
记录同一时序下的输入输出电压波形：



电压传输特性图：（手绘）



（示波器）



（图中有两条淡淡的黄线，也是此曲线的一部分。）

在输入电压过零处展开，观察输出波形的变化斜率，时间等参数，并思考输出波形翻转斜

率和运放的哪个参数有关？

斜率： $26.6\text{V}/49.6\ \mu\text{s} = 5.36 \times 10^5\ \text{V/s}$

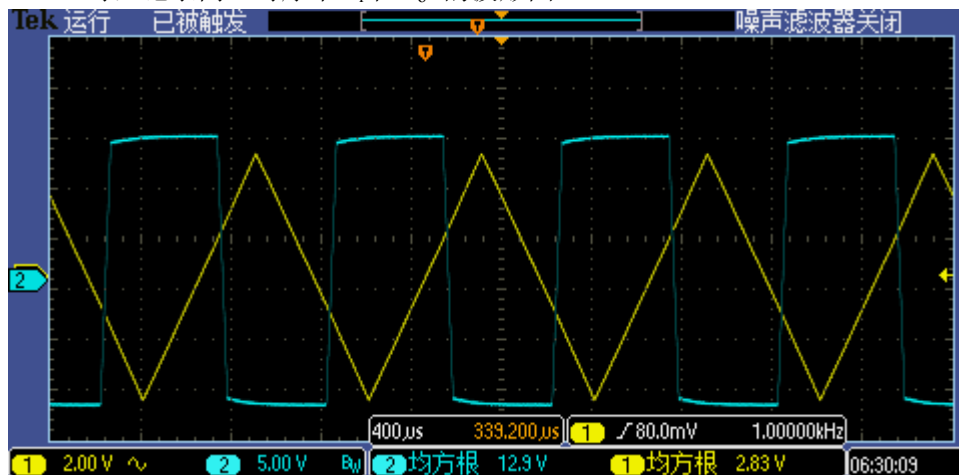
输出波形翻转斜率和运放的哪个参数有关：电压放大倍数（开环差模增益 A_{od} ）和压摆率（Slew rate, 简称 SR）

8、滞回比较器电路

表 6-6 滞回比较器的测量

U/V	测量值				计算值
	T/ μs	$T_H/\mu\text{s}$	u_{i+}/V	u_{i-}/V	$d = \frac{T_H}{T}$
-3	996	272	-1.56	-4.20	27.3%
-1	1000	436	0.52	-2.04	43.6%
0	1000	516	1.40	-1.08	51.6%
2	1000	684	3.24	0.60	68.4%
3.5	1000	804	4.60	1.88	80.4%

U=0V 时，记录同一时序下 u_i 和 u_o 的波形图



9、(*选做) 未做，所以删去。

六、问题思考

（回答指导书中的思考题）

1. 电阻、电容本身就可组成积分器，为什么还要用运算放大器。

答：电阻和电容组成的积分器容易受到负载电阻和频率的影响，而使用运放组成积分器，可以降低输出电阻【提高带负载能力、幅频特性也会更好（电压放大倍数不会因为街上负载而衰减)】，提高电路稳定性。

2. 反相比例放大器和同相比例放大器的输出电阻，输入电阻各有什么特点？试用负反馈概念解释之。

答：反相比例放大器引入**电压并联负反馈**，所以输出电阻小，输入电阻小；同相比例放大器引入**电压串联负反馈**，所以输出电阻小，输入电阻大。

3. 在电压过零比较器电路中，在输出交流信号过零处，输出信号翻转的斜率和什么有关系。

答：电压放大倍数（开环差模增益 A_{od} ）和压摆率（Slew rate，简称 SR）。

七、实验体会与建议

验证性实验可以适当减少，设计性实验可以增加。可能两三个设计性实验就能起到七八个验证性实验的作用。