

实验报告

课程名称: 模拟电子技术实验 实验名称: 实验六: 集成运放的线性和非线性应用

专业-班级: 自动化7班 学号: 220320726 姓名: 彭尚品

实验日期: 2024年6月12日 评分: _____

教师评语:

助教签字: _____

教师签字: _____

日期: _____

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：_____

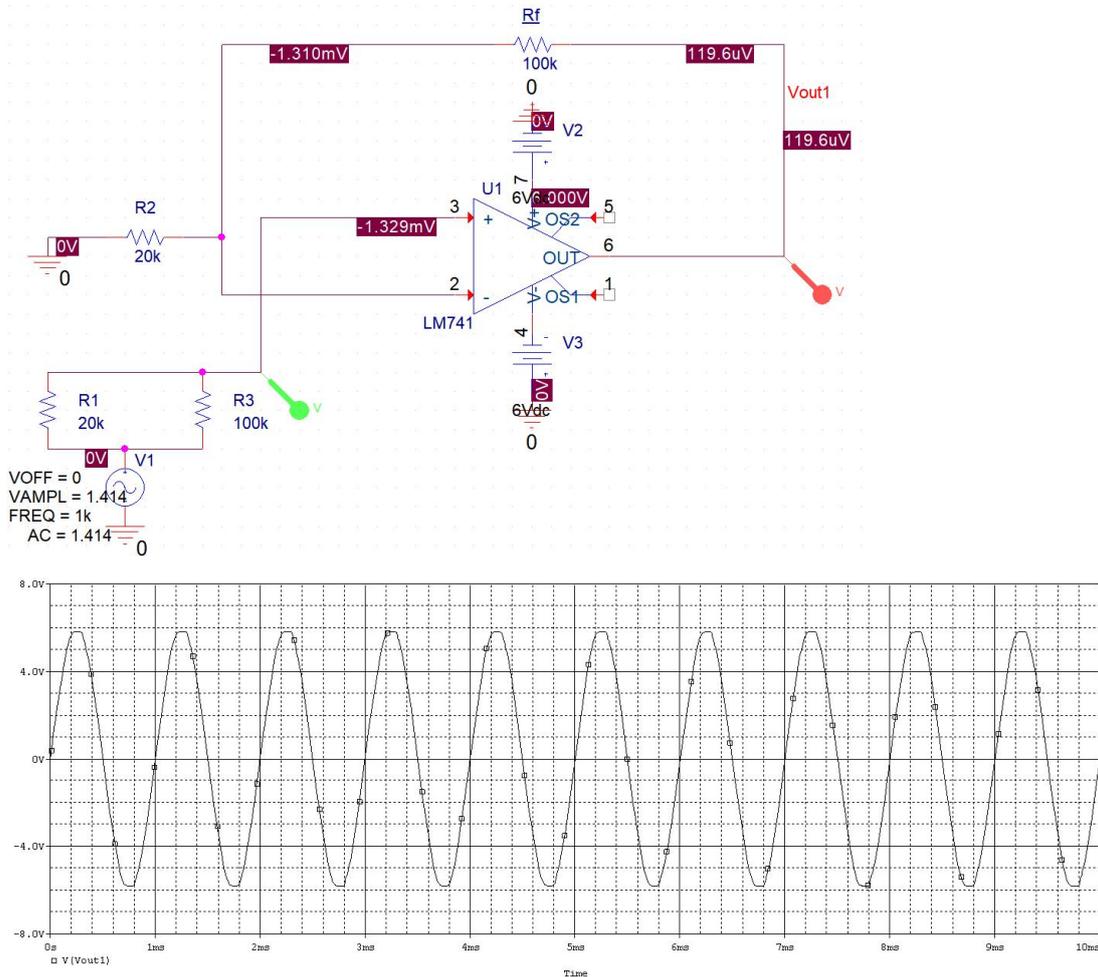
注意：所有的波形都必须拍照保存，用于课堂检查和课后分析。

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

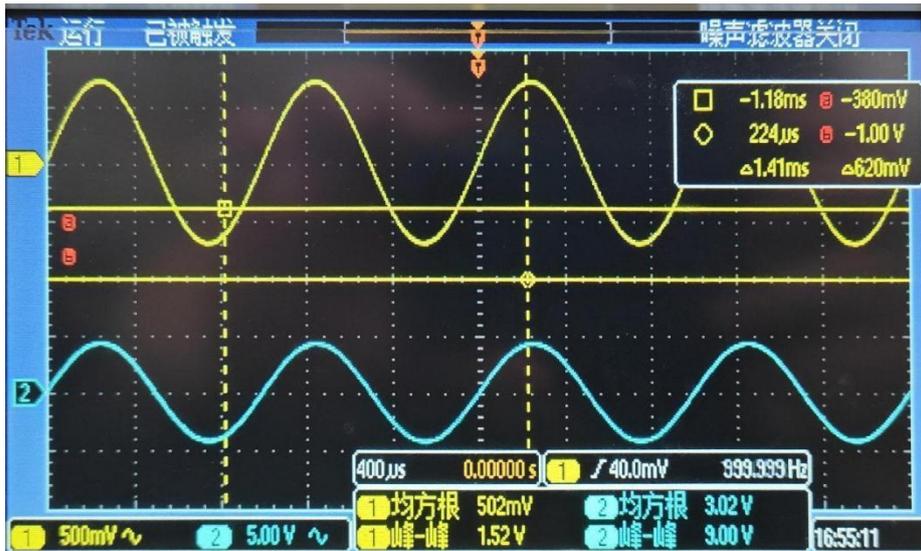
输入电压有效值	0.5V	1V	2V
理论计算值 U_o	3.0V	6.0V	12.0V
实测值 U_o	3.02V	5.99V	10.7V
误差	0.02V	0.01V	1.3V

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）：

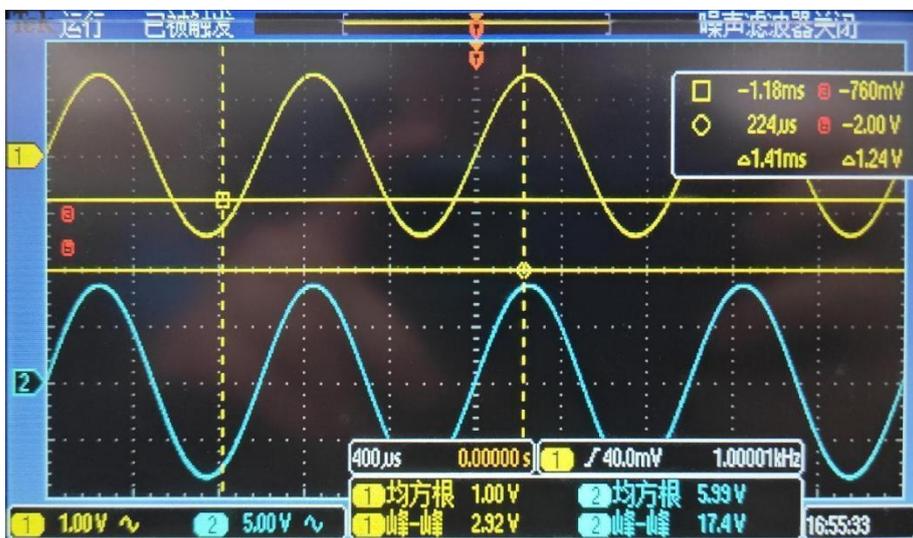


用示波器观察上述三种情况下 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。

输入电压有效值 0.5V



输入电压有效值 1V



输入电压有效值 2V



结论：同比例放大电路中，输出电压与输入电压同相位，通过参数的选择使得电路的电压放大倍数是 6 倍，但当输入电压过大的时候输出波形会失真，输入电压越大，失真现象越严重。

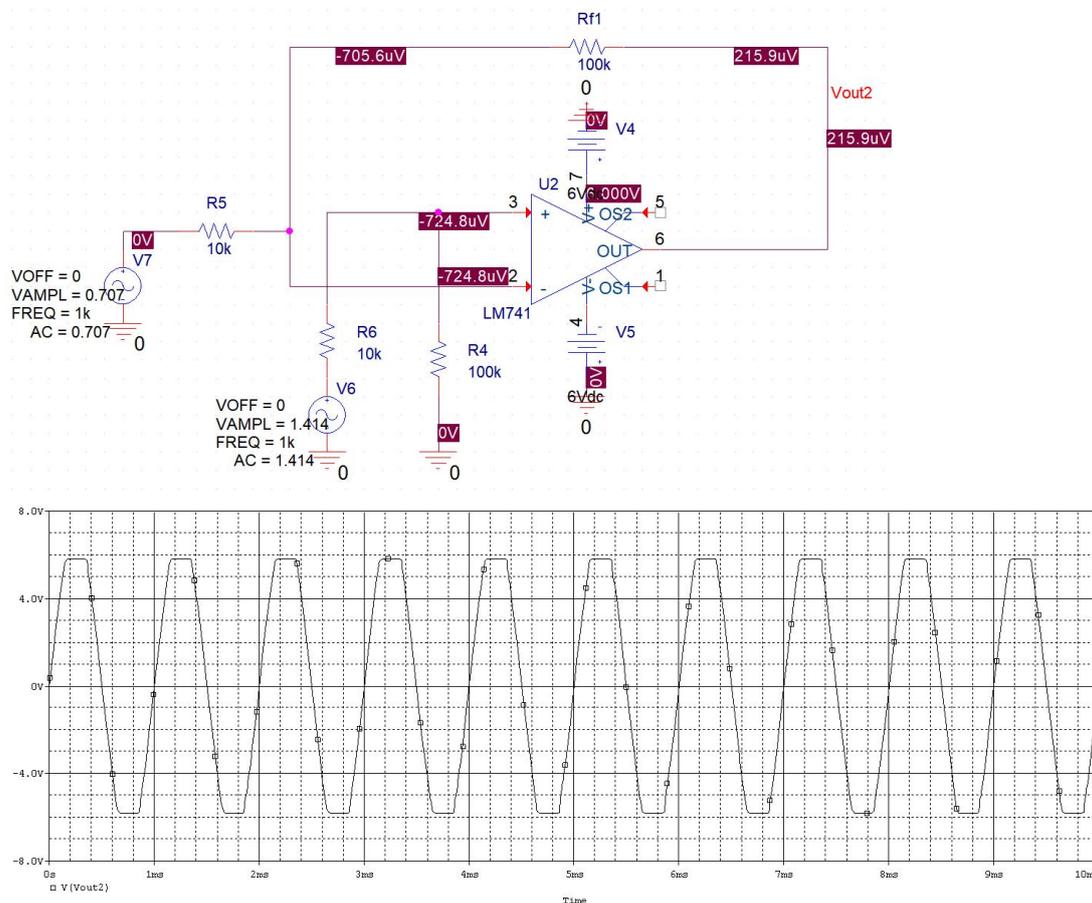
2、减法器电路

$$u_o = 10(u_{i2} - u_{i1}) \quad R_f = 100k\Omega$$

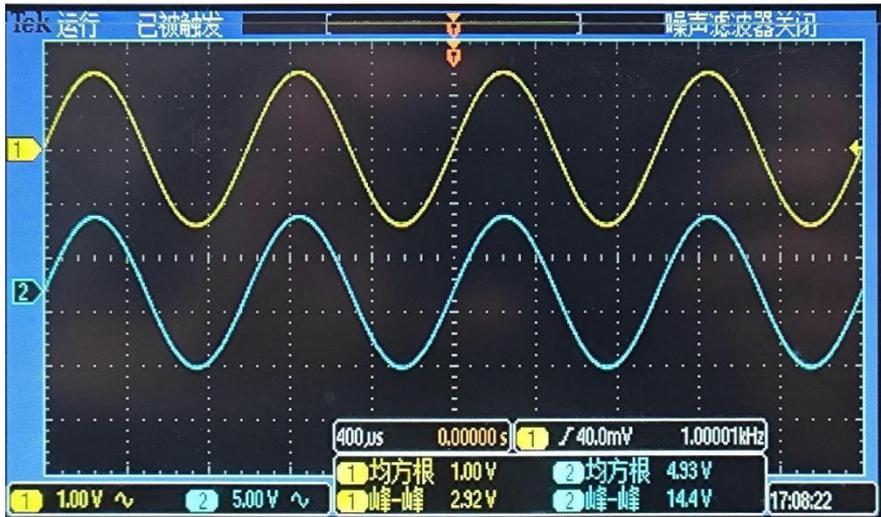
表 6-3 减法运算电路

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	0.07V
0.5V	1V	10.3V	11.2V	0.9V

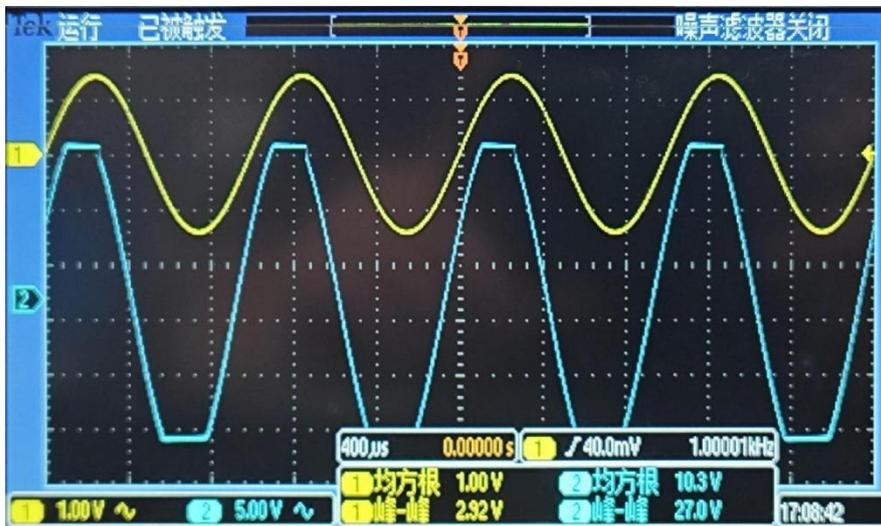
仿真预习 (同相位)：仿真电路图 ($U_{i1}=0.5V$, $U_{i2}=1V$)：仿真波形图 ($U_{i1}=0.5V$, $U_{i2}=1V$)：



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 。
同相位



相位 90°

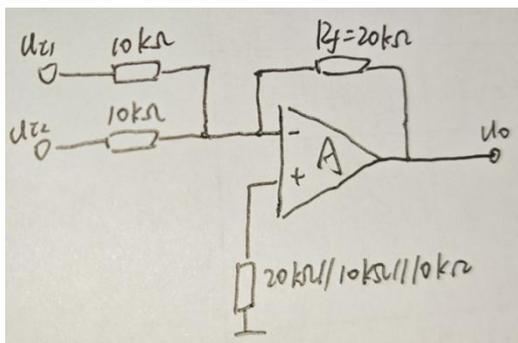


3、加法器电路

$$u_o = -2(u_{i1} + u_{i2}) \quad R_f = 20k\Omega$$

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	4.97V	5V	0.03V
2V	1V	5.95V	6V	0.05V



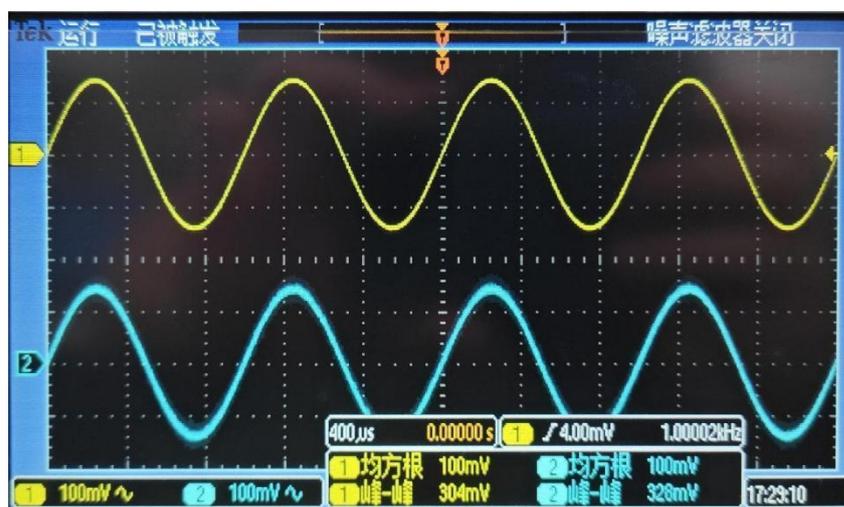
4、电压跟随器电路

表 6-5 电压跟随器电路测试数据表

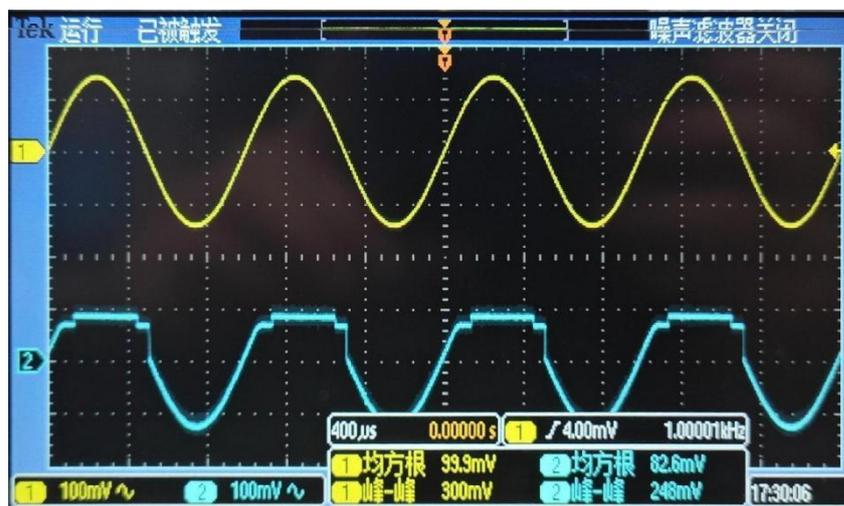
测试条件	$R_1=10k\ \Omega$ $R_f=10k\ \Omega$ R_L 开路		$R_1=10k\ \Omega$ $R_f=10k\ \Omega$ $R_L=50\ \Omega$	
	直流分量	交流分量	直流分量	交流分量
理论计算值 U_o	1V	100mV	1V	100mV
实测值 U_o	1.00273V	99.829mV	0.98253V	76.512mV
误差	0.00273V	0.171mV		

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 。

R_L 开路



$R_L=50\ \Omega$



结论：电压跟随器的输出电压跟随输入电压，有相同的有效值和相位，但是当负载过大 (R_L 很小) 的时候，电压跟随器难以驱动负载，输出波形失真。说明电压跟随器的带负载能力是有限的。

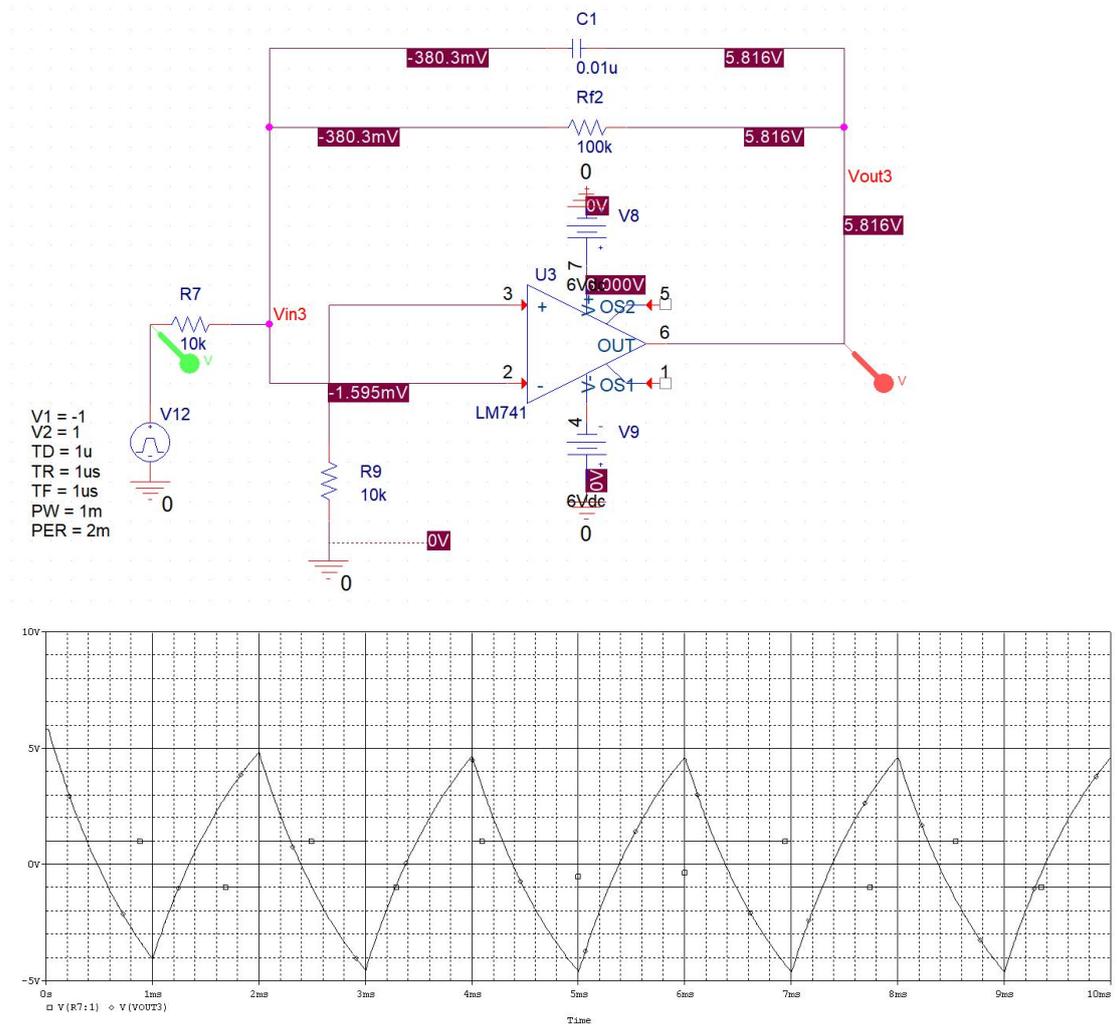
5、积分电路

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i(t) dt$$

推导出 u_o 的表达式。

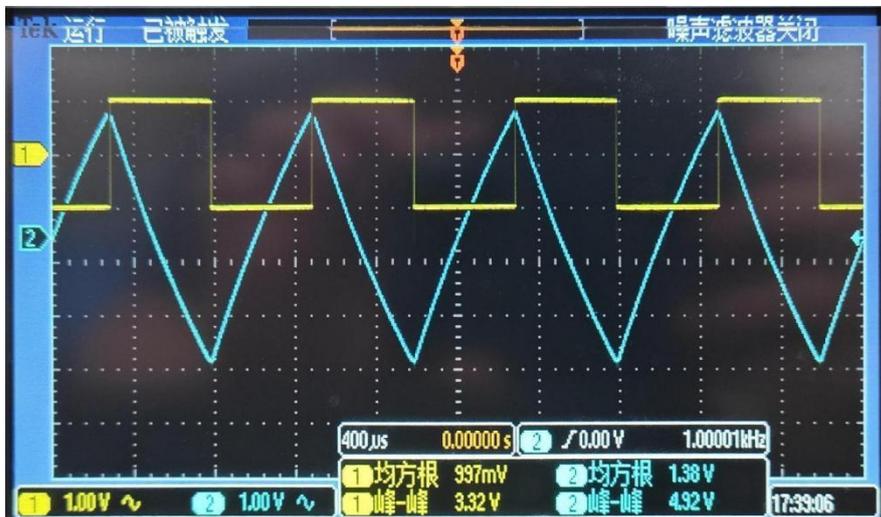
仿真预习：仿真电路图（电容 $0.01\mu\text{F}$ ）：

仿真波形图（电容 $0.01\mu\text{F}$ ）：

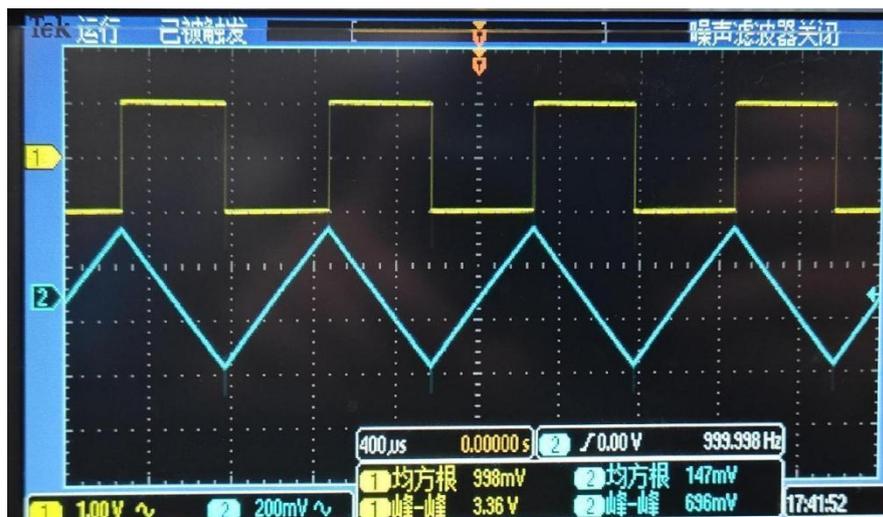


用示波器观察两种情况下 u_i 和 u_o 的波形，并保存波形 u_i 和 u_o 。

$C=0.01\mu\text{F}$



C=0.1μF



结论：当 C 从 0.01μF 换成 0.1μF 的时候，输出电压的峰值变小了，输出电压的充电速率和放电速率都减慢了。说明时间常数 τ 随着 C 的变大而变大。

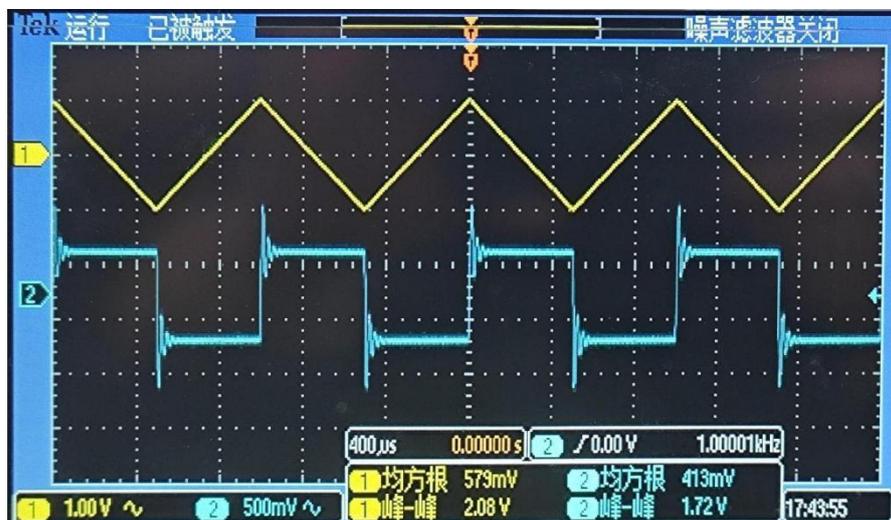
6、微分电路

$$u_o(t) = -R_f C \frac{du_i(t)}{dt}$$

推导出 u_o 的表达式

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 。

C=0.01μF



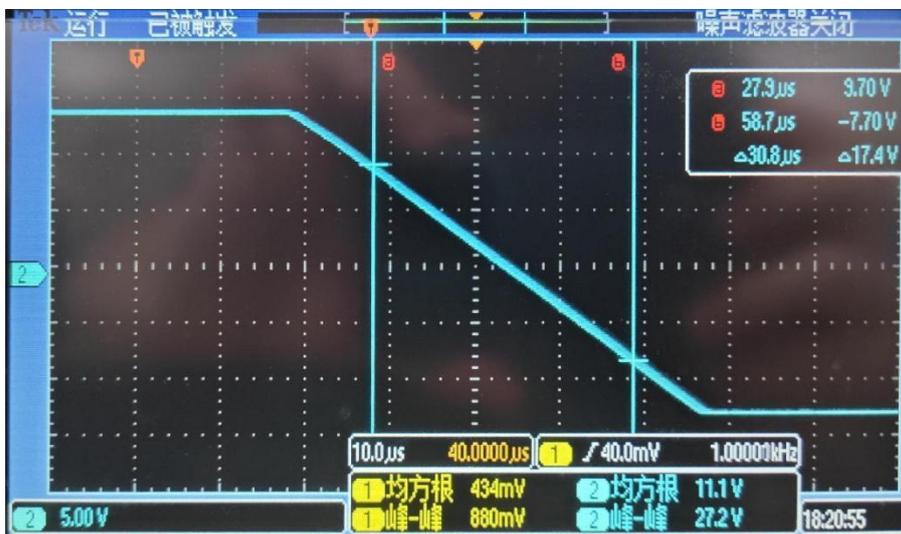
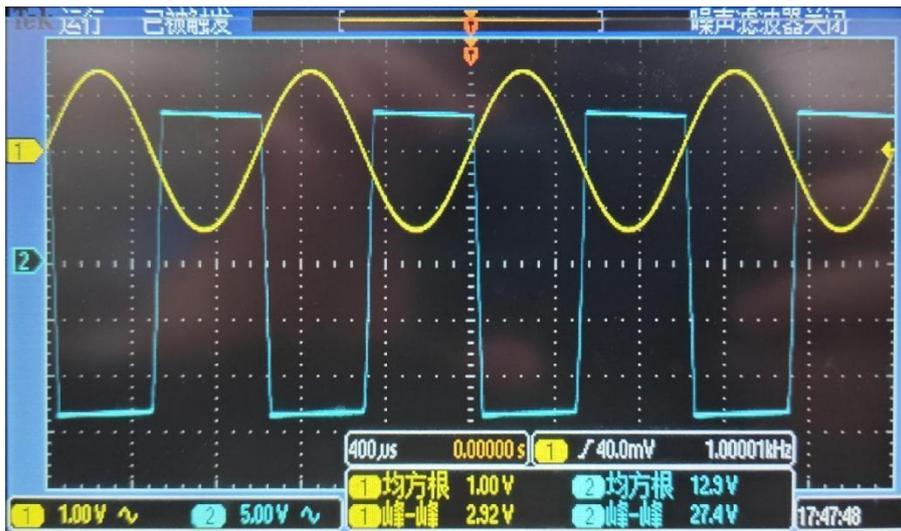
C=0.1μF



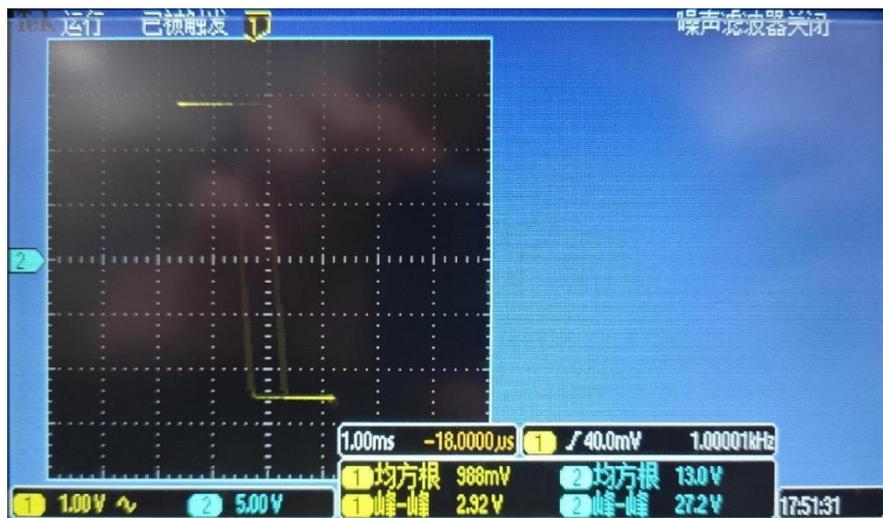
结论：当 C 从 $0.01\mu\text{F}$ 换成 $0.1\mu\text{F}$ 的时候，输出电压的峰值提高，充放电速率上升。

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。



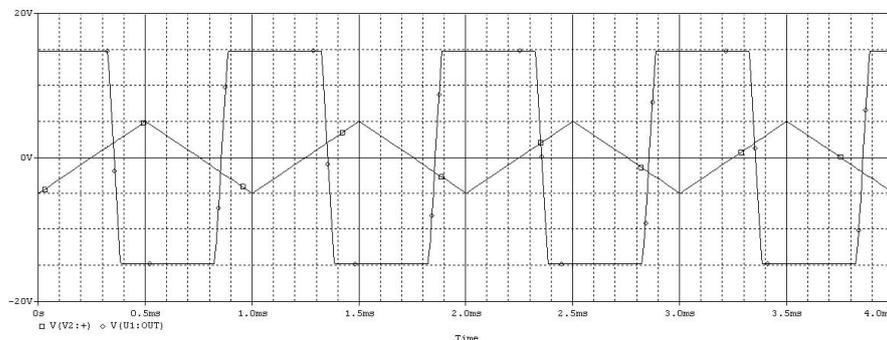
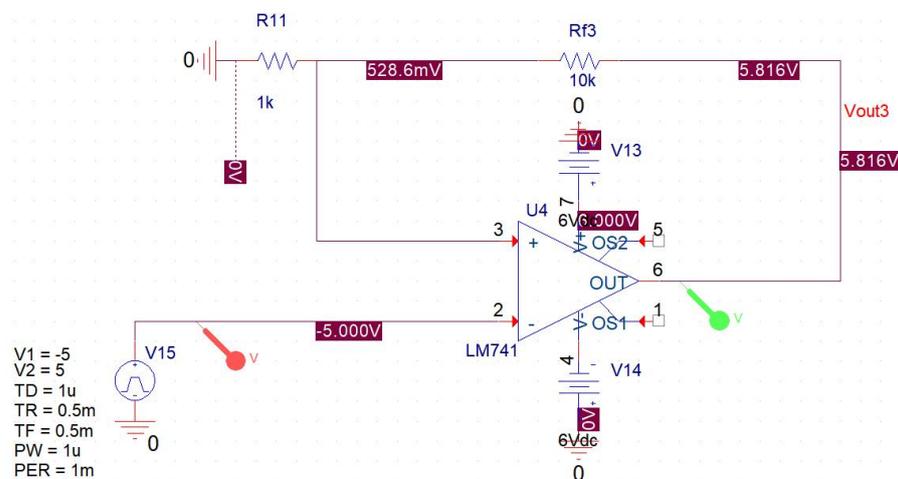
问：在输入电压过零处展开，观察输出波形的变化斜率，时间等参数，并思考输出波形翻转斜率和运放的哪个参数有关？

答：输出波形翻转斜率与运放的增益带宽积有关。

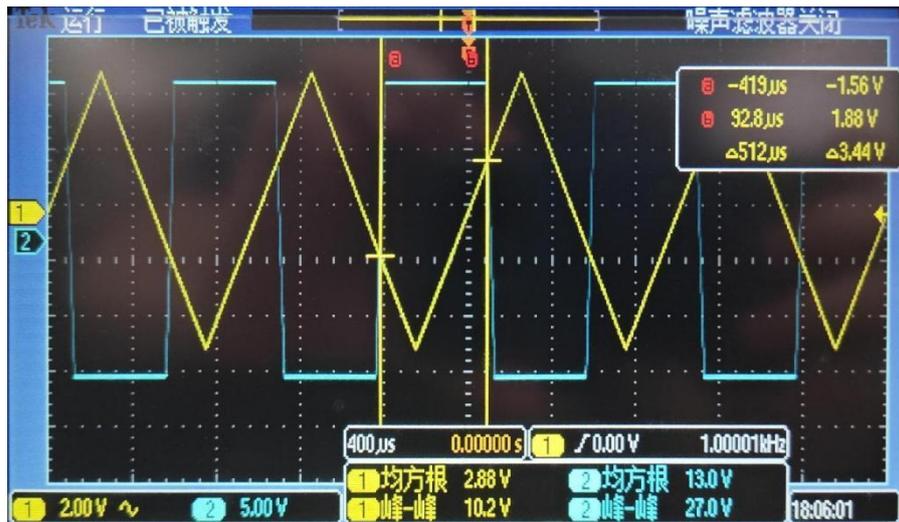
8、滞回比较器电路

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	测量值				计算值
	T/us	T _H /us	u _{i+} /V	u _{i-} /V	D=T _H /T
-3	1010	216	-4.40	-1.04	21.39%
-1	976	392	-2.72	0.720	40.16%
0	960	512	-1.56	1.56	53.33%
2	1010	672	0.08	3.44	66.53%
3.5	1030	824	1.68	4.88	80.00%

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

表 6-1 实验仪器和器件表

	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; 5.1 kΩ×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）

集成运算放大器是具有高开环电压放大倍数的多级直接耦合放大器。它具有体积小、功耗低、可靠性高等优点，广泛应用于信号的运算、处理和测量以及波形的发生等方面。

从工作原理上，集成运算放大器可分为线性应用和非线性应用两个方面。在线性工作区内，其输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的线性放大的关系为

$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-) = A_{uo}u_i$$

由于集成运算放大器的放大倍数 A_{uo} 高达 $10^4 \sim 10^7$ ，若使 u_o 为有限值，必须引入深度负反馈，使线性区加宽，构成集成运算放大器的线性运算电路。

在工程应用情况下，将集成运放视为理想运放，就是将集成运放的各项技术指标理想化，满足下列条件的运算放大器称为理想运放，即

- (1) 开环电压放大倍数 $A_{uo} = \infty$
- (2) 输入阻抗 $r_i = \infty$
- (3) 输出阻抗 $r_o = 0$
- (4) 带宽 $f_{BW} = \infty$
- (5) 失调与漂移均为零

本实验中使用的集成运算放大器为通用集成运放 LM741 或者 $\mu A741$ ，其引脚及引脚功能如图 6-1 所示。2 脚为运放的反相输入端，3 脚为运放的同相输入端，6 脚为运放的输出端，7 脚为正电源引脚，4 脚为负电源引脚。1 脚和 5 脚为输出调零端，8 脚为空脚。

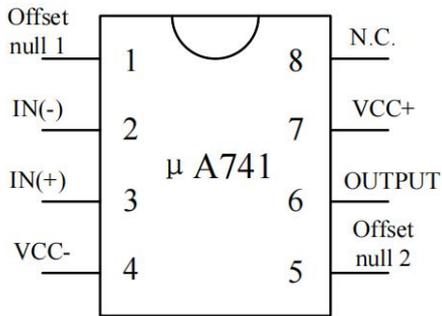


图 6-1 $\mu A741$ 的引脚排列及引脚功能

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

分析电路的工作原理,理论计算数据填入表 6-2。

- ① 选择元器件,按图 6-11 接线,接通直流 $\pm 15V$ 工作电源。
- 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。

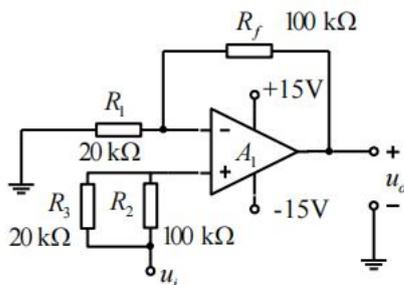


图 6-11 同相比例放大电路

2. 减法器电路

结合实验室现有的器件,按照以下的关系式设计一个减法器,即 $u_o = 10(u_2 - u_1)$

实验步骤如下:

- ① 实验电路经过老师检查才能接线。接通直流 $\pm 15V$ 电源。

画出实验电路图:

- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 用示波器观察输入电压 u_2 和 u_o 的波形,并记录波形。
- ⑤ 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

结合实验室现有的器件，按照以下的关系式设计一个反相加法运算电路，即

$$u_o = -2(u_1 + u_2) \quad R_f = 20\text{k}\Omega$$

实验步骤如下：

① 实验电路经过老师检查才能接线。接通直流±15V 电源。

画出实验电路图：② 输入信号是直流信号源（电路模块 ST2016），幅值见表 6-4。

③ 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 中。

4. 电压跟随器电路

分析电路的工作原理，理论计算数据填入表 6-5。

① 选择元器件，按图 6-12 接线，接通直流工作电源。

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

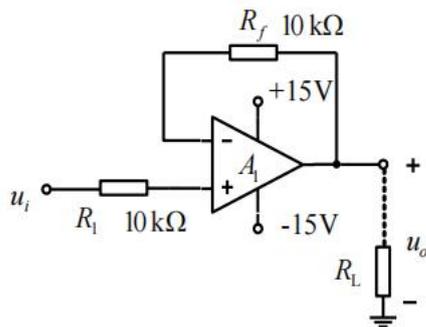


图 6-12 电压跟随器电路

5. 积分电路

实验所用的积分电路如图 6-13 所示，在积分电容上并联一个电阻，目的是为了降低电路的低频电压增益，从而消除积分电路的饱和现象。

① 按照图 6-13 的电路推导出 u_o 的表达式。

② 按上面电路图要求选择电路元件，接好电路。

③ 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 ±1V），作为电路的输入电压 u_i 。

④ 检查后，接通 ±15V 电源。

⑤ 记录输入电压和输出电压的波形。

⑥ 将电容更改为 $0.1\ \mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

6. 微分电路

实际微分电路如图 6-14 所示。由于电容 C 的容抗随输入信号的频率升高而减小，因此输出电压随频率升高而增加，为限制电路的高频增益，在输入端与电容 C 之间加入一个小

电阻。

- ① 按图 6-14 的电路，推导出 u_o 的表达式。
- ② 按上面电路图要求选择电路元件，接好电路。
- ③ 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 u_i
- ④ 检查后，接通电源。
- ⑤ 记录输入电压和输出电压的波形。
- ⑥ 将电容更改为 $0.1\mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

7. 电压过零比较器电路

过零电压比较器如图 6-15 所示。

- 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。
- 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，图 6-15 过零比较器电路图时间等参数，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。

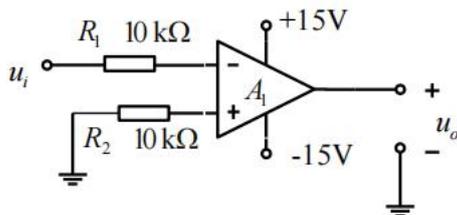


图 6-15 过零比较器电路图

8. 滞回比较器电路

滞回比较器如图 6-16 所示。

- ① 按图 6-16 接线。
- ② 输入 u_i 为三角波信号，其幅值为 $\pm 5\text{V}$ ，频率为 1kHz。
- ③ 接通直流电源 $\pm 15\text{V}$
- 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 $U=0\text{V}$ 时， u_i 和 u_o 的波形。

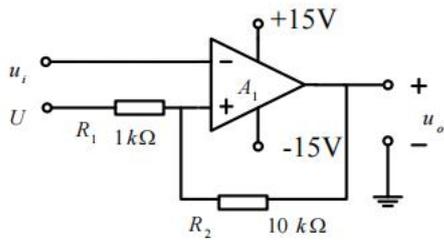


图 6-16 滞回比较器电路图

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）

实验数据分析在本报告的前面部分完成

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：

电阻和电容确实可以组成一个最基本的积分器电路，这种电路被称为无源积分器。在这种配置下，当一个阶跃电压施加到电阻的一端，另一端连接到电容，电容将开始充电，其电压将随着时间的推移按照指数规律上升，这本质上是一个积分过程。然而，无源积分器有几个缺点，使得它们在实际应用中不太理想：

信号衰减：无源积分器的输出信号会随着频率的增加而衰减，这是因为 RC 组合形成了一个低通滤波器，高频信号会被显著地衰减。

不稳定：无源积分器的增益通常为 1 或小于 1，这意味着它不能稳定地保持一个非零输入信号，而会逐渐衰减到零。

输入阻抗：无源积分器的输入阻抗相对较低，这可能会影响前级电路的输出，特别是当信号源内阻较大时。

引入运算放大器来构建有源积分器可以克服这些缺点：

高输入阻抗：运放具有非常高的输入阻抗，这减少了对信号源的影响，并且能够更好地隔离噪声。

低输出阻抗：运放提供了非常低的输出阻抗，使得输出信号更加稳定，可以驱动更重的负载。

增益控制：运放允许我们设计一个闭环系统，这样可以通过反馈回路来控制增益，实现稳定的积分功能。

2. 反比例放大器和同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：

输入电阻： $R_i=R$

输出电阻： $R_o=0$

同相比例放大器：

输入电阻： $R_i=\infty$

输出电阻： $R_o=0$

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：

电压过零比较器电路中，输出信号在交流信号过零点处的翻转斜率主要与以下因素相关：

1、运放的转换速率（Slew Rate）：运算放大器的转换速率定义了运放输出电压变化的最大速度，单位是伏特/微秒（ $V/\mu s$ ）。在过零比较器中，当输入信号快速穿越零点时，输出需要迅速翻转。转换速率越快，输出信号的翻转斜率就越陡峭。

2、运放的带宽：运放的带宽决定了它能处理的信号频率范围。如果输入信号的频率高于运放的带宽，输出信号的翻转斜率会受到影响，可能会出现延迟或失真。

3、电路中的寄生效应：任何实际电路都会存在寄生电容和寄生电阻，尤其是在运放的输入和输出端。这些寄生效应可能会影响信号的上升时间和下降时间，进而影响翻转斜率。

4、输入信号的上升时间和下降时间：输入信号本身的斜率也会影响到输出信号的翻转斜率。如果输入信号的斜率很陡，那么输出信号的翻转也会更快。

5、电路的负载：输出端的负载电阻和电容也会影响输出信号的翻转斜率。负载越大，信号翻转时的斜率可能会降低。

七、实验体会与建议

很好，提升了动手能力