

# 浙江大学实验报告

专业:

姓名

学号:

日期:

地点:

课程名称: 电路与模拟电子技术实验 指导老师: 张治沁 成绩: \_\_\_\_\_

实验名称: 基本运算电路设计 实验类型: 模拟电子电路实验

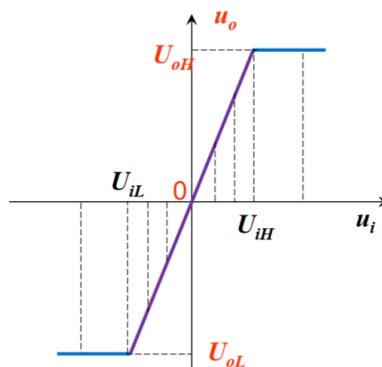
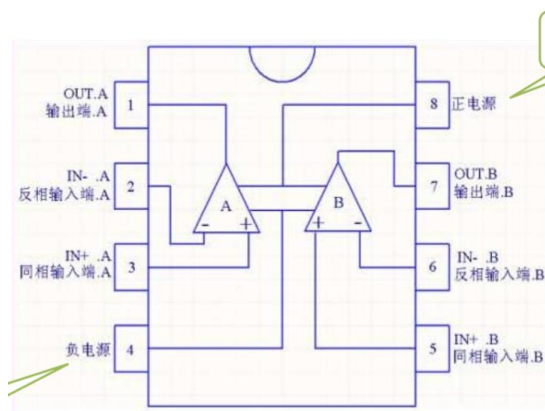
## 一、实验目的和要求

1. 掌握集成运放组成的比例、加法和积分等基本运算电路的设计。
2. 掌握基本运算电路的调试和测量方法。
3. 学习集成运算放大器的实际应用。

## 二、实验内容和原理

### (1) 实验原理:

- ① 集成运算放大电路: 集成运算放大电路(简称集成运放)是一种高增益的直流放大器, 它有二个输入端。根据输入电路的不同, 有同相输入、反相输入和差动输入三种方式。在实际运用中都必须用外接负反馈网络构成闭环以实现各种模拟运算。
- ② LM358 型集成放大器的简介:



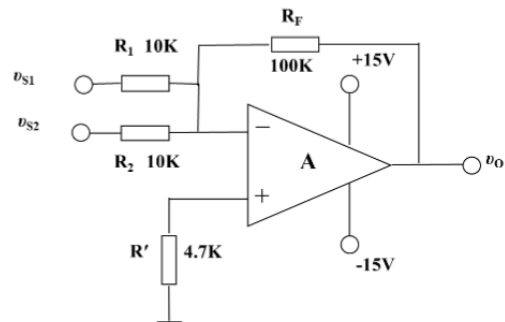
左图为 LM358 的结构示意图, 8 号端口和 4 号端口分别为集成放大电路正常工作时, 正电源和负电源输入的位置, 1 号与 7 号端口为 LM358 的输出端, 3 号与 5 号端口为同向输入端, 输入电压与输出电压相位相同, 2 号和 6 号端口为反向输入端, 输入电压与输出电压相位相反。

右图为 LM358 的电压传输特性, 它描述的是运放输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_A - U_B$  的关系, 如图所示, 可将其分为一个线性区和两个饱和区。若运放工作在线性放大区, 即  $|U_o| < U_{OH}$  时, 输出与输入电压呈线性放大关系,  $U_o = A(U_A - U_B)$ ; 若运放工作在饱和区, 即当输入电压差增大到使  $|U_o|$  达到  $U_{OH}$  时, 输出变保持在  $\pm U_{OH}$ , 故饱和区分为正饱和区和负饱和区。由于集成运放电路的  $A$  很大, 而输出电压为有限值, 因此通常线性区域很窄。

- ③ 集成运算放大器实现两个信号的反向加法运算:

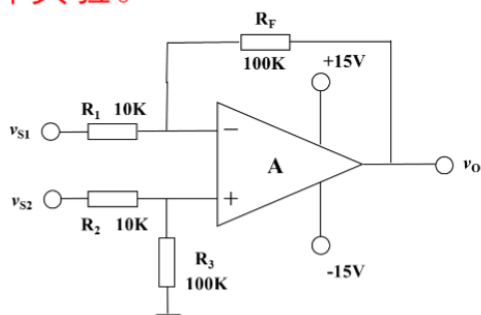
$$v_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} v_{s1} + \frac{R_F}{R_2} v_{s2}\right)$$

$$R' = R_1 // R_2 // R_F$$



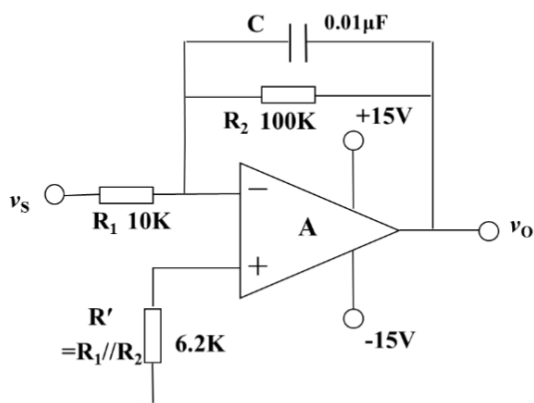
实验的电路图如右图所示，对电路进行分析， $V_O = -(V_{S1} \times R_F/R_1 + V_{S2} \times R_F/R_2)$ ，因此当  $R_F = 10R_1$  及  $=10R_2$  时，放大倍数为 10 倍且运放电路处于反向放大状态。电路中的  $R' = R_1 // R_2 // R_F$ ，其在电路起消除电路中偏置电路电流的影响的作用。

#### ④ 减法器（差分放大电路）：



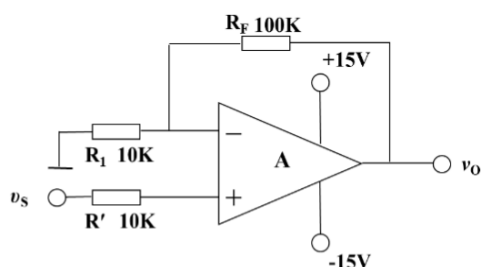
如左图所示为运放电路为减法器的电路图，对电路进行分析，可得， $V_O = (V_{S2} \times R_F/R_2 - R_F \times V_{S1}/R_1)$  因此，当  $R_F = 10R_1$  及  $10R_2$  时，运放电路为放大倍数为 10 倍的减法运算电路。而为了消除输入偏置电流以及输入共模部分的影响，要求  $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_F$ 。

#### ⑤ 用积分电路将方波转化为三角波：



用积分电路将方波转化为三角波的电路图如左图所示，电路中电阻  $R_2$  的接入是为了抑制由  $I_{IO}$ 、 $V_{IO}$  所造成的积分漂移，从而稳定运放的输出零点。在  $t \ll \tau_2$  ( $\tau_2 = R_2 C$ ) 的条件下， $v_s$  为常数，则  $v_o$  与  $t$  将近似成线性关系。因此，当  $v_s$  为方波信号并满足  $T_P \ll \tau_2$  时 ( $T_P$  为方波半个周期时间)，则  $v_o$  将转变为三角波，且方波的周期越小，三角波的线性度越好，但三角波的幅度将随之减小。

#### ⑥ 同相比例运算电路：



同相比例运算电路是由集成运放组成的同相放大电路，其输出与输入成比例关系，但输出信号的大小受集成运放的最大输出电压幅度的限制，因此输出与输入只在一定范围内是保持线性关系的。

同相比例运算电路如左图所示，可见，同相比例运算电路与反向加法运算电路一致，其特点是输入电阻比较大，电阻  $R'$  的接入同样是为了消除平均偏置电流的影响，因

此  $R' = R_1 // R_F$ 。

## (2) 实验内容:

- ① 检查 LM358 型集成运算放大器是否正常
- ② 实现反相加法运算电路
- ③ 实现减法运算电路
- ④ 用积分电路将方波转换为三角波
- ⑤ 同相比例运算电路的电压传输特性曲线
- ⑥ 用 Multisim 仿真各电路

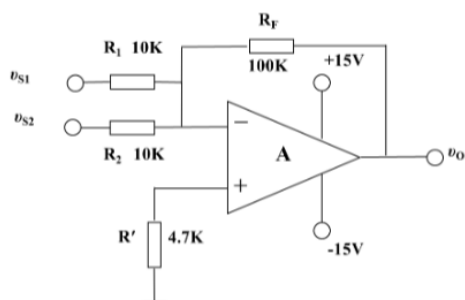
## 三、实验仪器

Rigol\_MSO4054 数字示波器、模电实验箱 (LM358 型集成运算放大器、 $100\text{K}\Omega$ 、 $10\text{K}\Omega$ 、 $4.7\text{K}\Omega$ 、 $6.2\text{K}\Omega$  电阻、 $0.01\mu\text{F}$  电容)、信号源。

## 四、操作方法和实验步骤

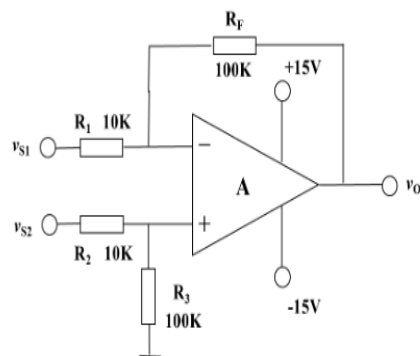
### 1. 两个信号的反向加法运算

- (1) 按右图所示电路图连接电路, 电阻  $R_1$  和电阻  $R_2$  选择  $10\text{K}\Omega$ , 电阻  $R_F$  选择  $100\text{K}\Omega$ ,  $R'$  选择  $4.7\text{K}\Omega$ , 接至 LM358 的电源为  $15\text{V}$  与  $-15\text{V}$ 。
- (2)  $V_{S1}$  选择幅值为  $0.2\text{V}$  的三角波输入,  $V_{S2}$  选择幅值为  $0.5\text{V}$  的单极性方波输入, 调整  $V_{S1}$  与  $V_{S2}$  输入的相位使三角波由正向最大变到负向最大时, 方波波形处于最大。
- (3) 用示波器观测  $V_O$  的输出波形。



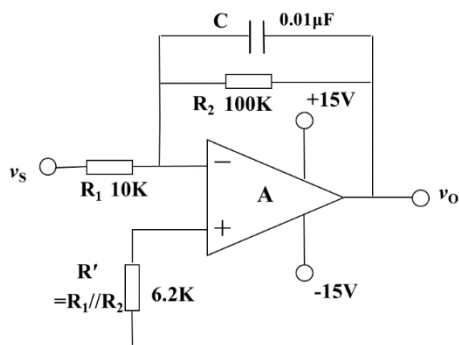
### 2. 减法器电路

- (1) 按右图所示电路图连接电路, 电阻  $R_1$  和电阻  $R_2$  选择  $10\text{K}\Omega$ , 电阻  $R_F$  选择  $100\text{K}\Omega$ ,  $R'$  选择  $4.7\text{K}\Omega$ , 接至 LM358 的电源为  $15\text{V}$  与  $-15\text{V}$ 。
- (2)  $V_{S1}$  与  $V_{S2}$  选择频率相同的正弦波输入, 注意信号频率应保持在运算电路的中频段内, 同时,  $V_{S1}$  与  $V_{S2}$  的相位应该相同,  $V_{S1}$  和  $V_{S2}$  的幅值不能相同, 且  $V_{S1}$  与  $V_{S2}$  的相位应保证集成运放不会进入饱和区, 记录  $V_{S1}$  与  $V_{S2}$  的有效值。
- (3) 用示波器观测  $V_O$  的输出波形, 并记录  $V_O$  的有效值。



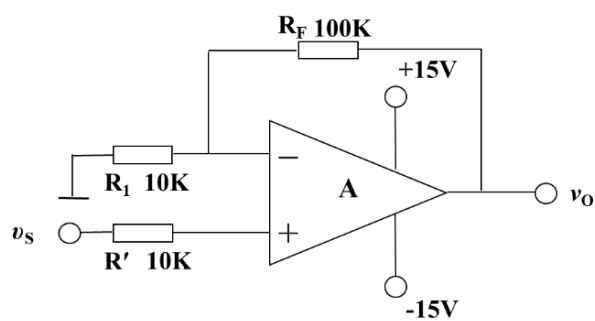
### 3. 运用积分电路将方波转化为三角波

- (1) 按右图所示电路图连接电路,  $R_1$  选择  $10\text{K}\Omega$ ,  $R_2$  选择  $100\text{K}\Omega$ ,  $R'$  选择  $6.2\text{K}\Omega$ ,  $C$  选择  $0.01\mu\text{F}$ , 接至 LM358 的电源为  $15\text{V}$  与  $-15\text{V}$ 。
- (2) 电路的时间常数  $\tau = C \times R_2 = 1\text{ms}$ , 选用周期约等于  $\tau$  的方波信号作为输入, 用示波器观测  $V_O$  的输出波形。
- (3) 改变输入方波的频率, 分别用  $T \ll \tau$  与  $T \gg \tau$  的方波信号作为输入, 用示波器观测  $V_O$  的输出波形。
- (4) 比较不同频率下输出波形的线性情况和频率的变化。



#### 4. 同相比例运算电路

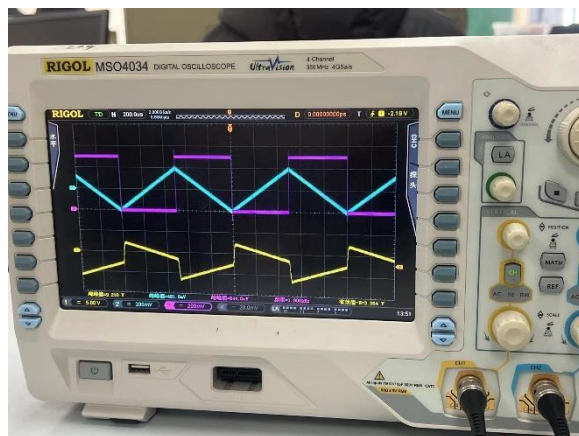
- (1) 按右图所示电路图连接电路， $R_1$  与  $R'$  选择  $10K\Omega$ ， $R_F$  选择  $100K\Omega$ ，接至 LM358 的电源为  $15V$  与  $-15V$ 。
- (2) 加入正弦波，用示波器观察输入和输出波形，验证电路功能。
- (3) 换用直流输入，示波器选择 XY 工作模式，适当增大输入信号，使示波器显示整个电压传输特性曲线（即包含线性放大区和饱和区）



### 五、实验数据记录与处理、实验结果分析

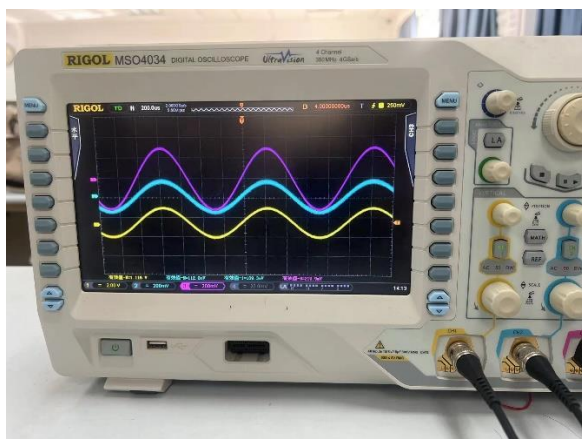
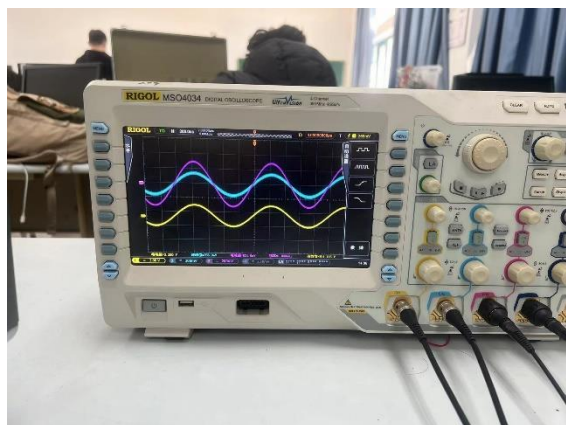
（因本次实验的实验结果主要为波形图，因此实验数据的记录与实验结果的分析放在一起进行）

#### 1. 反向加法运算电路



上图所示为反向加法电路的输入输出波形图，蓝色波形为  $V_{S1}$  三角波输入，紫色波形为  $V_{S2}$  方波输入，黄色波形为输出波形，从输入输出波形中可以看出，当  $V_{S1} + V_{S2}$  为正向时，输出波形  $V_O$  为负，从而实现了反向输出。同时，每时每刻的  $V_O$  也基本符合  $10(V_{S1} + V_{S2})$ ，符合放大倍数为 10 倍的加法电路要求。

#### 2. 减法器电路



上图所示为减法器电路的输入输出波形图，蓝色波形为  $V_{S1}$  的正弦波输入，紫色波形为  $V_{S2}$  的正弦波输入，黄色波形为输出波形。从图中可以看出  $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$ 、 $V_O$  的相位相同，而由示波器测量出的有效值可



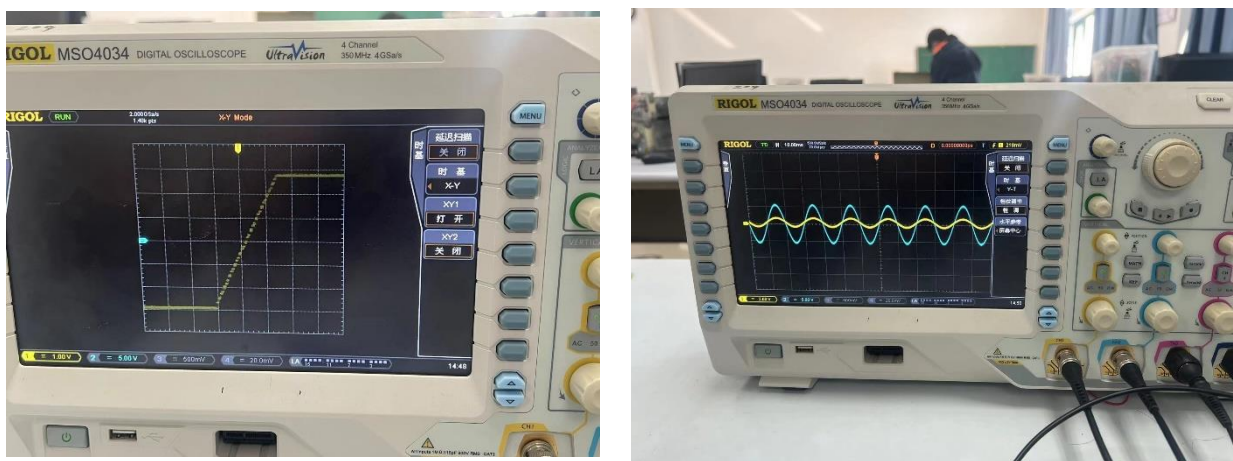
知,  $V_{S1}$  的有效值为 219.9mV,  $V_{S2}$  的有效值为 109.3mV, 输出  $V_O$  的有效值为 1.116V。可见,  $V_O = 10 (V_{S1} - V_{S2})$ , 符合放大倍数为 10 倍的减法器电路要求。

### 3. 利用积分电路将方波转化为三角波



输入方波的周期为  $T$ , 上图所示从左至右分别为  $T \gg \tau$ 、 $T \approx \tau$ 、 $T \ll \tau$  时的输入输出的波形图。从图中可以看出, 当  $T \gg \tau$  时, 输出波形的线性程度较差, 当  $T \approx \tau$  时, 输出已基本为三角波, 而当  $T \ll \tau$  时, 输出波形的线性度理应进一步增加, 但实际的波形图线性度却不是很好, 这可能是因为实际的方波输入并非理想的方波, 在阶跃点的上升和下降有一个很短的过程, 在周期较小的情况下, 这一过程无法忽略, 而且, 输出信号也会受到小信号的影响而不太平整。从数据上进行分析, 输入的幅值为 300mV, 当  $T \gg \tau$  时, 输出的幅值为 2.77V; 当  $T \approx \tau$  时, 输出的幅值为 548.2mV; 当  $T \ll \tau$  时, 输出的幅值为 150mV。可见, 随着输入方波周期的不断减小, 输出波形的幅度也不断减小。

### 4. 同相比例运算电路



右图为输入为正弦波时输入输出的波形图, 可见输入与输出的正弦波相位相同, 说明输入与输出呈线性关系, 也证明了该电路有同相放大或缩小的功能。左图为电压传输特性曲线, 从图中可见当输入电压在一定范围内时, 输出与输入呈线性关系, 集成放大器工作在线性放大区, 当输入电压大于或小于某一值时, 输出电压保持不变, 集成放大器工作在饱和区。

## 七、讨论、心得

通过本次实验, 我了解了集成运算放大器 LM358 的基本结构以及对应的电压传输特性曲线, 知道了集成运算放大电路的各种运算功能 (如反向加法运算, 减法器运算, 同相比例运算等), 了解了其工作原

理，也知道了对应电路的设计方法。同时，我还知道了如何利用积分电路将方波转化为三角波，也了解了不同周期的输入方波对于输出波形的影响，对于示波器和信号源的使用也更加熟悉。

## 思考题

### 1. 什么是集成运算放大器的电压传输特性曲线？输入方式的改变将如何影响电压传输特性曲线？

集成运算放大器的电压传输特性曲线描述了集成运算放大器输出电压和输入电压（即同相输入端与反相输入端电压的差值）之间的关系，这个曲线主要分为两个部分：线性放大区和饱和区。

集成运算放大电路主要有三种输入方式：差动输入、同相输入和反向输入，差动输入可以有效抑制零漂，得到稳定的输出，反相输入和同相输入则是在输出端得到与输入端相位相反或与输出端相位相同的放大信号。

### 2. 集成运算放大器的输入输出成线性关系，输出电压将会无限增大，这话对吗？为什么？

这句话是不正确的。原因：当集成运算放大器工作在线性放大区时，输出电压随输入电压的增大而增大，而当输入电压增大到某一值后，即集成运算放大器进入饱和区，输出电压将保持恒定。

### 3. 实验中信号的频率不一样是否对实验的结果有影响？

在将方波转化为三角波的实验中，输出的信号受输入方波频率的影响。在运算放大电路中，由于电抗元器件(电容、电感等)及半导体极间电容的存在，当输入信号的频率过低或过高时，不但放大倍数会变小，而且还会产生超前或滞后相移，说明放大倍数是信号频率的函数。因此输入信号的频率如果过大或过小，则会对实验结果产生影响。

### 4. 基本运算电路，没有输出信号，输出端电压接近饱和，为什么？怎样处理？

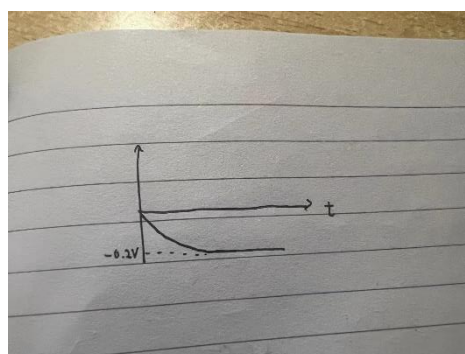
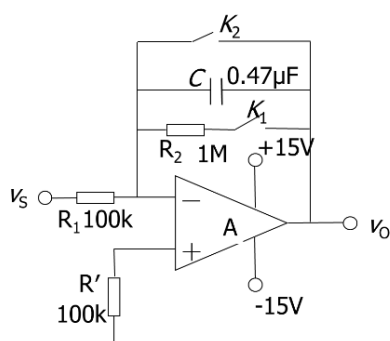
原因：① 运放的放大倍数过高，直接导致电压饱和

② 集成运算放大器已经损坏

方法：① 可以加入深度负反馈达到控制增益的效果

② 更换元器件

### 5. 在积分运算电路中，当选择 $V_s=0.2V$ 时，若用示波器观察 $V_o$ 的变化轨迹，并假定扫速开关置于“ $1s/div$ ”，Y轴灵敏度开关置于“ $2V/div$ ”，光点一开始位于屏幕左上角，当开关 $K_2$ 由闭合转为打开后，电容即被充电。试分析并画出 $V_o$ 随时间变化的轨迹。若采用电解电容时，电解电容的正负极该如何接？



左图为积分电路的电路图，右图为  $V_o$  随时间变化的轨迹， $K_2$  打开前电容  $C$  未积累电荷，当  $K_2$  打开后，电容逐渐被充电，电压会逐渐变大，但是由于输出电压相位与输入电压相反，因此波形首先会向负半轴走，因此轨迹如右图所示。电解电容的正极应接至左侧，电解电容的负极应接至右侧。

**6. 为防止出现自激振荡和饱和失真，应用什么仪器监视输出电压波形**

防止自激振荡可以用示波器监测零输入时的输出波形是否接近 0，防止饱和失真可以用示波器监测输入与输出波形，通过比较输入输出波形来判断是否出现失真。

**7. 在基本运算电路中，当输入信号为正弦波、方波或直流信号等不同形式时，应分别选择什么仪器来测量其幅度**

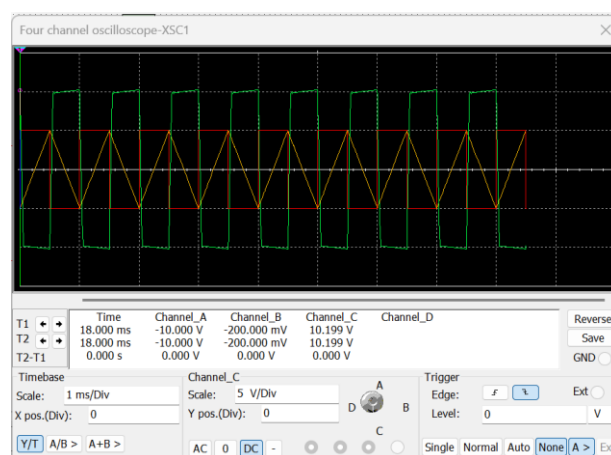
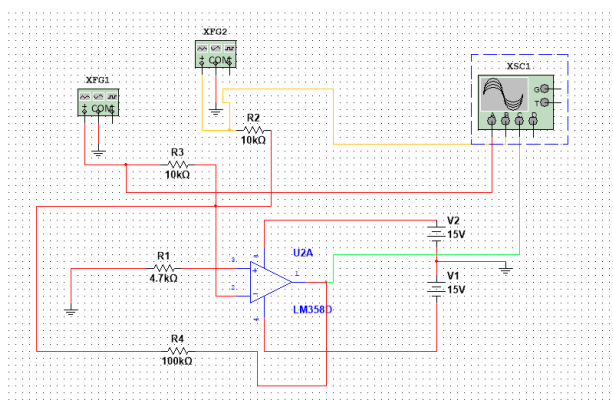
三种信号都可采用示波器的“measure”功能测量其幅度，万用表也可测量直流信号的幅值，也可在频率允许范围内测量交流信号有效值。

**8. 实验中，若测得运放静态输出电压为+14V（或不为 0），其根本原因是什么？应如何进一步调试**

静态输出电压不为 0，很可能是缺少负反馈，应检查负反馈电阻是否正确接入电路；应重新检查电路，重新接线，直至零输入时得到零输出。

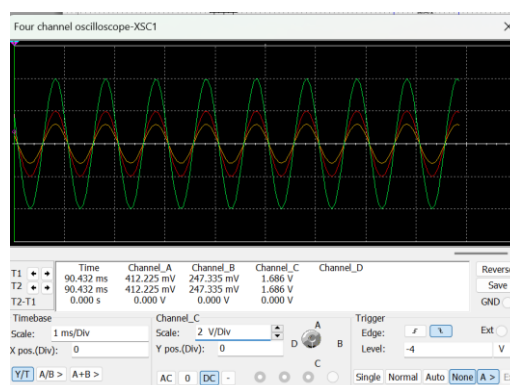
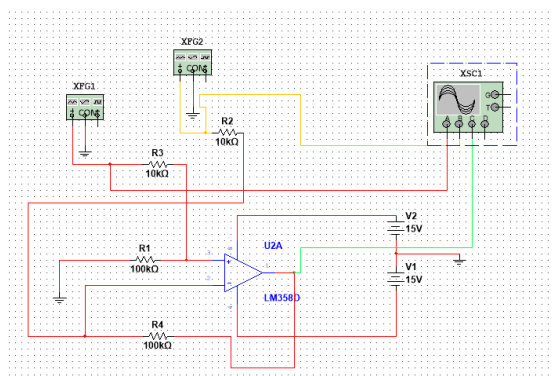
仿真：

反向加法运算电路：

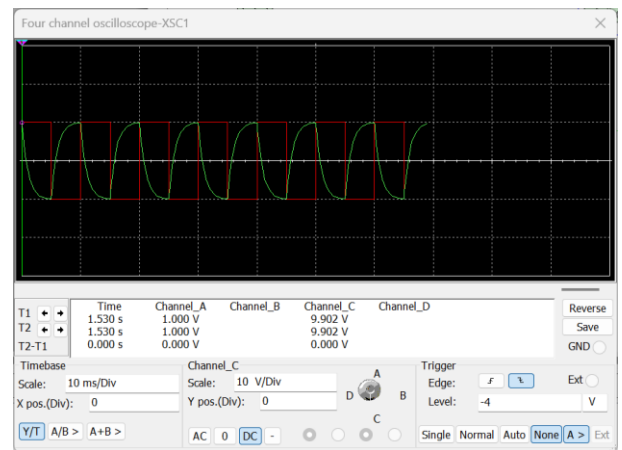
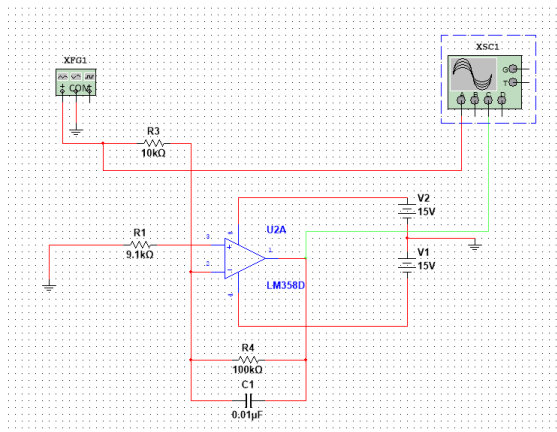


（因仿真中信号发生器无法调相位，因此仿真中的输出波形与实际的输出波形有区别）

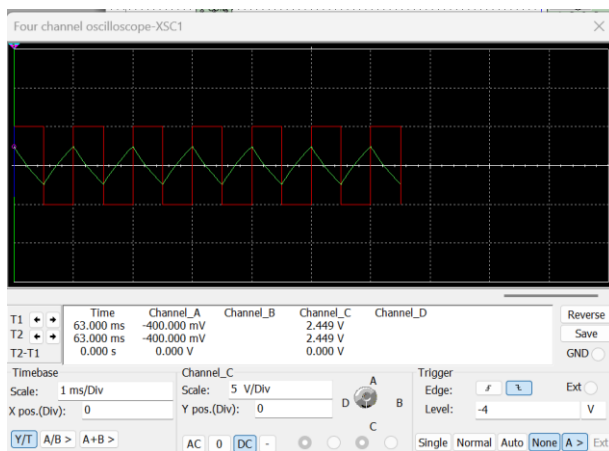
减法器电路：



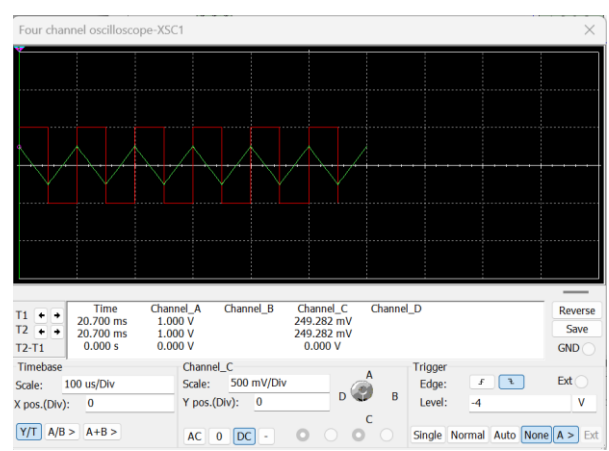
将方波转化为三角波：



( $T \gg \tau$ )



( $T \approx \tau$ )



( $T \ll \tau$ )

#### 4. 同相比例运算电路

