

浙江大学实验报告

专业： 生物医学工程
姓名： _____
学号： _____
日期： 2025.5.13
地点： 东三-211

课程名称： 电路与电子技术实验 II 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： 基础实验 同组学生姓名： _____

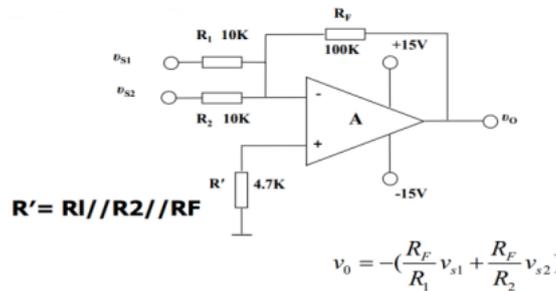
一、实验目的和要求

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. 实现反相加法运算电路

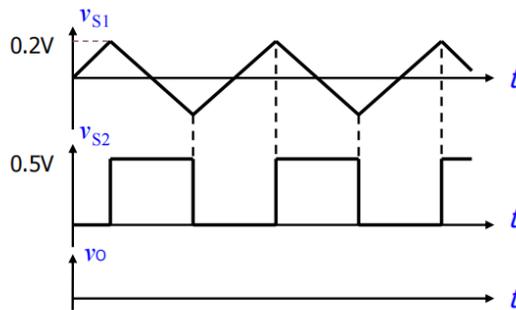
实验电路原理图如下：



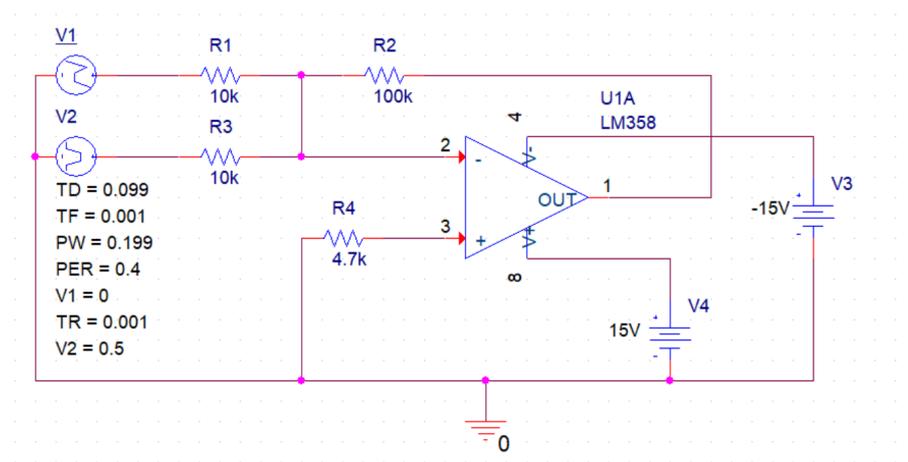
电阻 R' 是为了消除偏置电流的反相加法运算电路影响，要求 $R' = R_1 // R_2 // R_f$ 。

仿真要求如下：

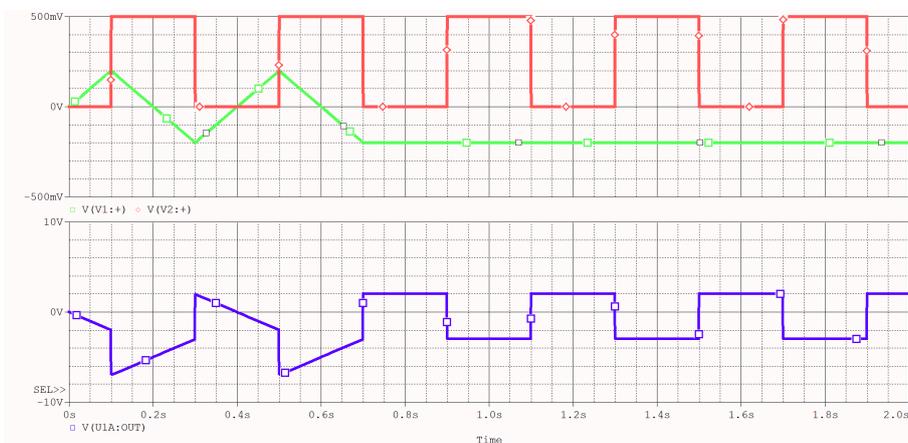
- ① 设计一个放大倍数为 10 倍的反相加法电路： $v_o = -10(v_{s1} + v_{s2})$
- ② 画出以下输入时的输出波形，并进行仿真（三角波可用 VPWL，方波可用 VPWL 或 VPULSE）。



仿真电路图如下：

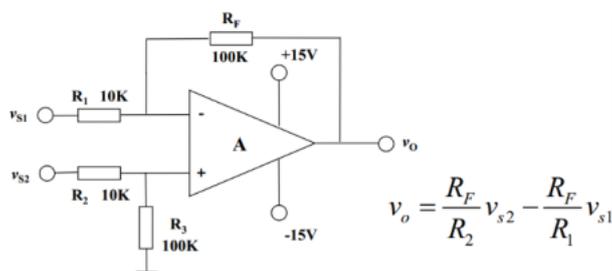


仿真波形图如下：



2. 实现减法运算电路

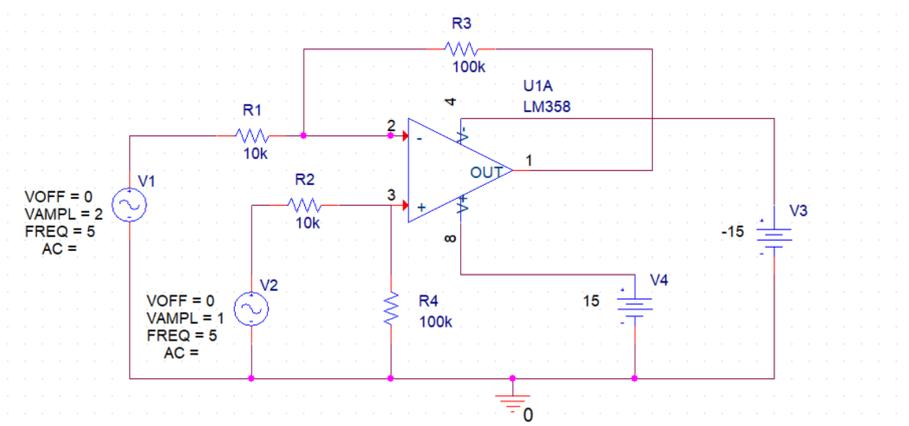
减法器电路，为了消除输入偏置电流以及输入共模成分的影响，要求 $R_1 = R_2$ 、 $R_F = R_3$ 。电路原理图如下：



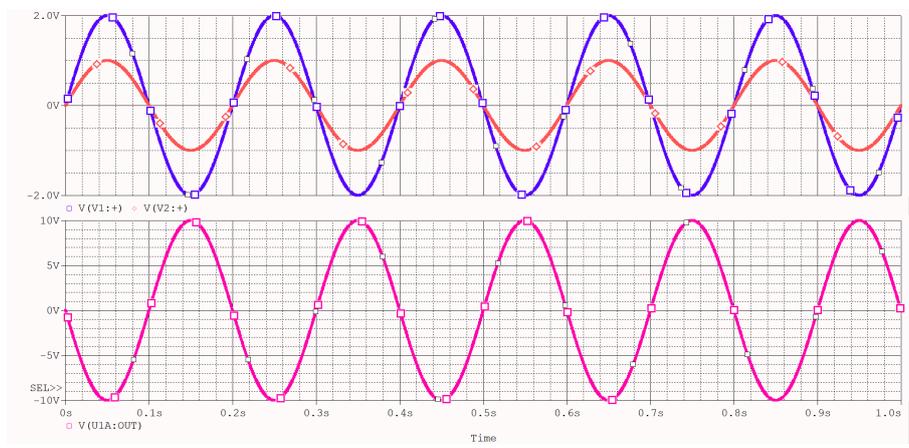
仿真设计要求如下：

- ①设计一个放大倍数为 10 倍的减法运算电路： $v_o = 10(v_{s1} - v_{s2})$
- ②对所设计的电路进行仿真（信号源采用同相位正弦波）。

仿真电路图如下：

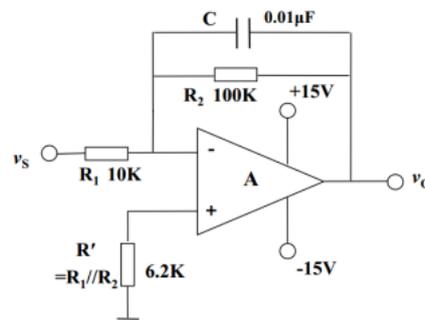


仿真波形图如下：



3. 用积分电路将方波转换为三角波输出

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，若 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 $T_p \ll \tau_2$ (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，三角波的线性越好，但三角波的幅度将随之减小。



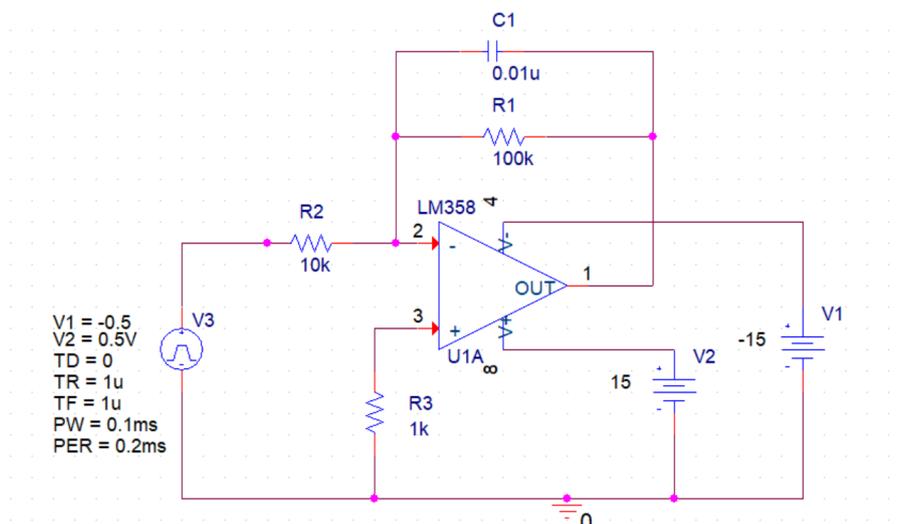
仿真要求如下：

① 根据电路参数求出 τ_2 ，确定三种情况下的方波信号频率：

- I. $T_p \ll \tau_2$
- II. $T_p \approx \tau_2$
- III. $T_p \gg \tau_2$

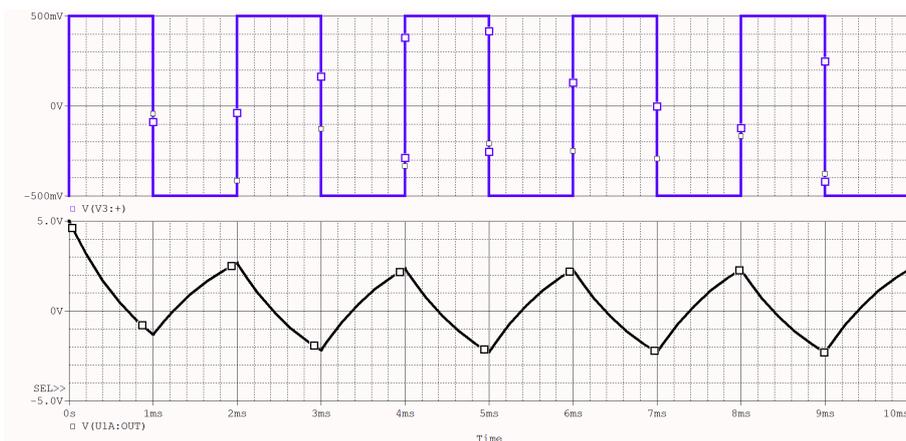
②分别选择上述三种不同频率的方波作为信号源，对电路进行仿真，记录输出电压波形。

仿真电路图如下：

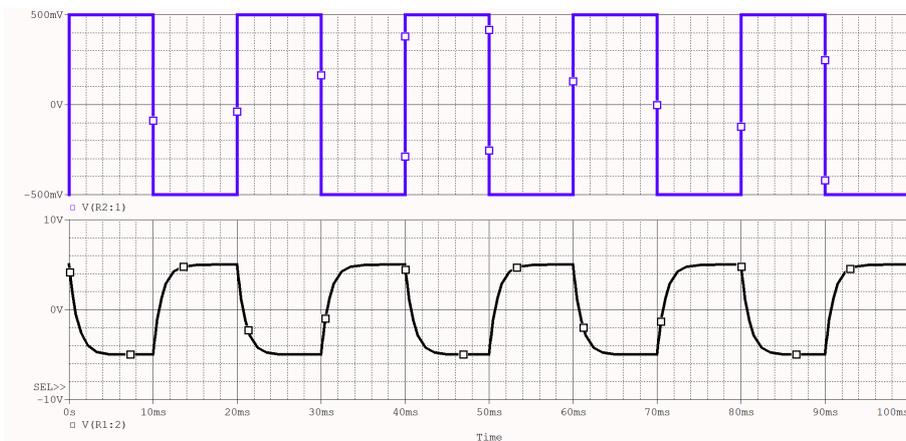


仿真波形图如下：

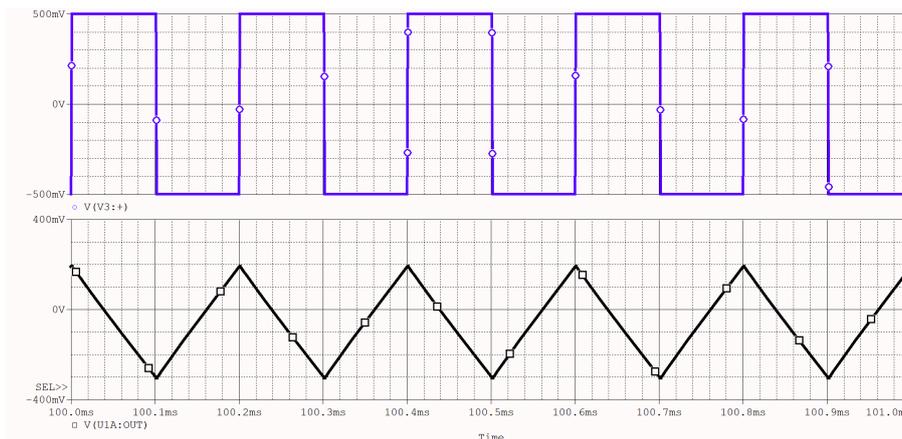
$T_p = 1ms$ ，即 $f = 500Hz$ 时



$T_p = 10ms$ ，即 $f = 50Hz$ 时

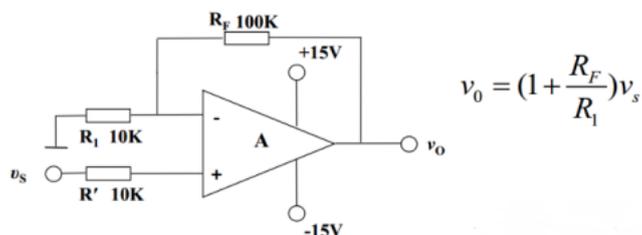


$T_p = 0.1\text{ms}$ ，即 $f = 5\text{kHz}$ 时



4. 同相比例运算电路的电压传输特性曲线

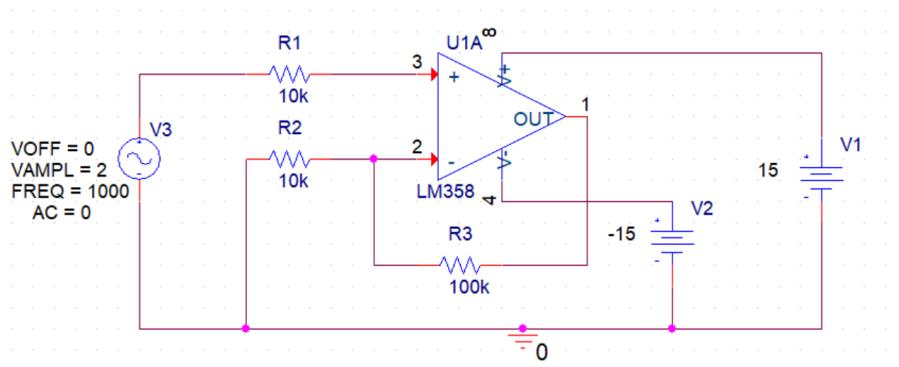
同相比例运算电路同反相加法运算电路，其特点是输入电阻比较大，电阻 R' 的接入同样是为了消除平均偏置电流的影响，故要求 $R' = R_1 // R_F$ 。



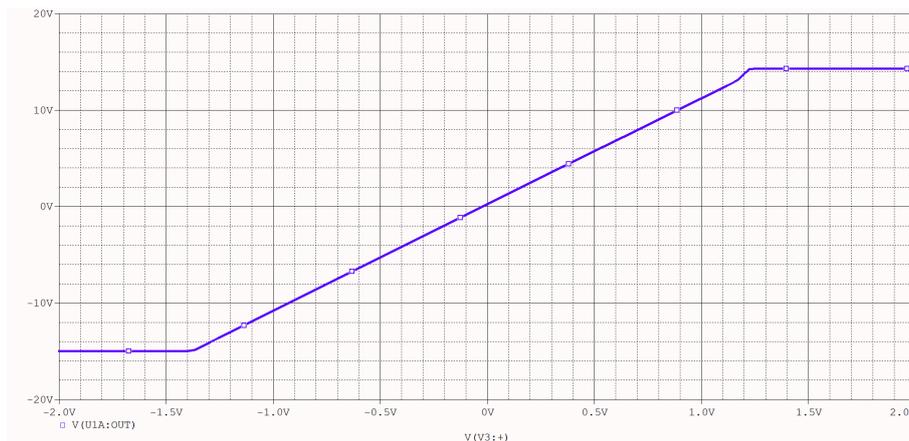
电压传输特性曲线是表征输入与输出之间的关系曲线，即 $v_o = f(v_s)$ 。

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。

仿真电路图如下：



仿真得到的电压传输特性曲线如下：



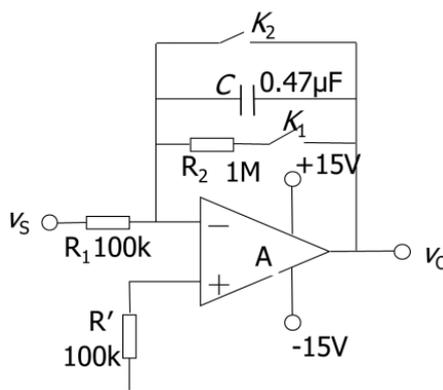
5. 查看积分电路的输出轨迹

积分电路如前图所示，在进行积分运算之前，将图中 K_1 闭合，通过电阻 R_2 的负反馈作用，进行运放零输出检查，在完成零输出检查后，须将 K_1 打开，以免因 R_2 的接入而造成积分误差。

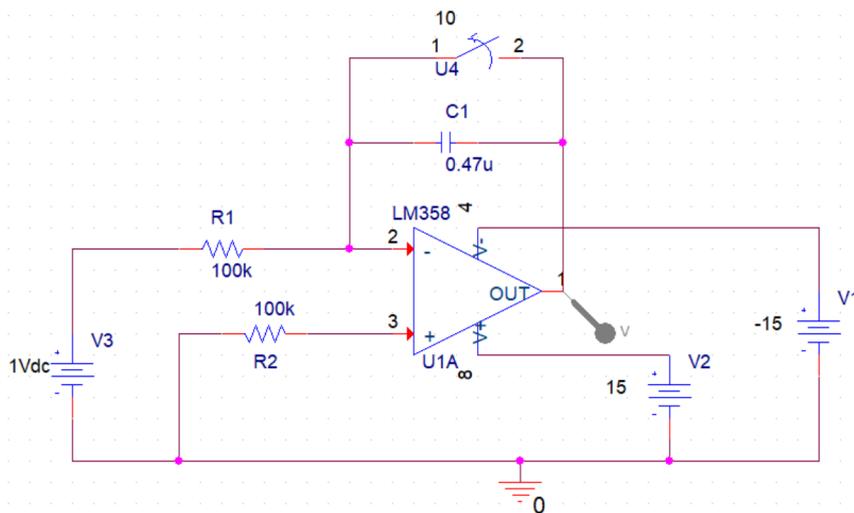
K_2 的设置一方面为积分电容放电提供通路，将其闭合即可实现积分电容初始电压 $v_c(0) = 0$ 。另一方面，可控制积分起始点，即在加入信号 v_s 后，只要 K_2 一打开，电容就将被恒流充电，电路也就开始进行积分运算。

$$v_0 = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_s dt$$

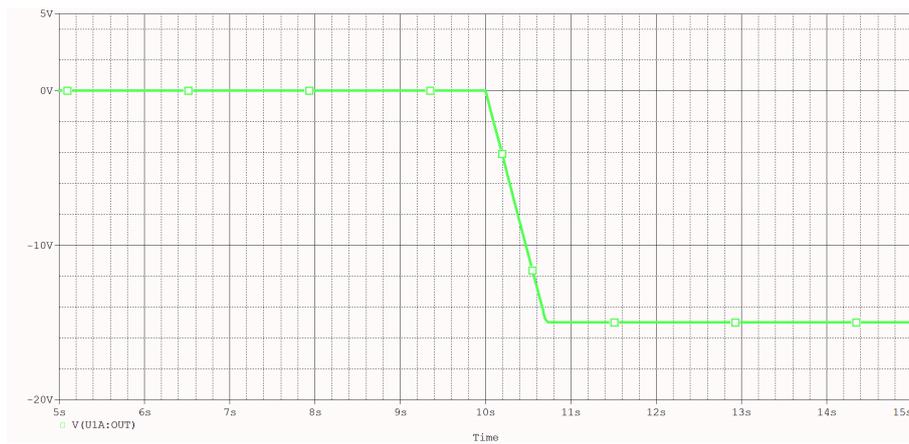
$$= -\frac{v_s t}{R_1 C}$$



仿真电路图如下：



仿真得到的积分路径输出轨迹如下：



三、主要仪器设备

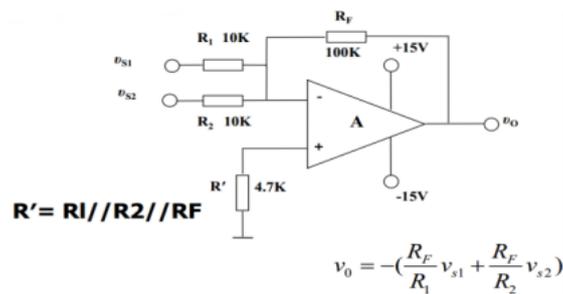
HY3003D-3 型可调式直流稳压稳流电源

示波器、信号发生器、万用表

实验箱 LM358 运放模块

四、操作方法和实验步骤

1. 实现反相加法运算电路



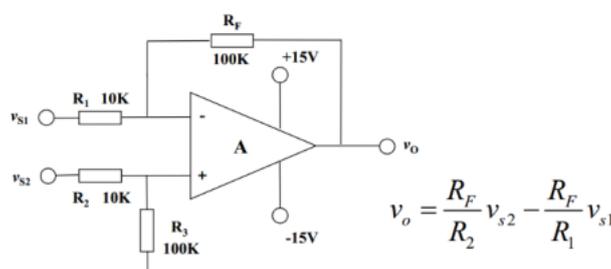
(1) 按设计的运算电路进行连接。

(2) 静态测试：将输入接地，测试直流输出电压。保证零输入时电路为零输出。

(3) 调出 0.2V 三角波和 0.5V 方波，送示波器验证。

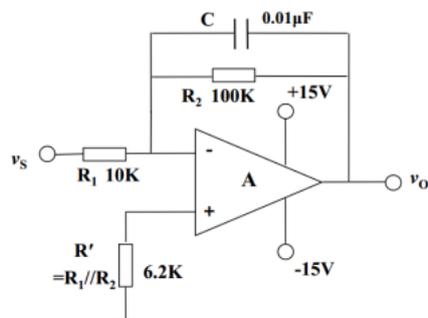
(4) v_{s1} 输入 0.2V 三角波， v_{s2} 输入 0.5V 方波，用示波器双踪观察输入和输出波形，确认电路功能正确。记录示波器波形（坐标对齐，注明幅值）。

2. 实现减法运算电路



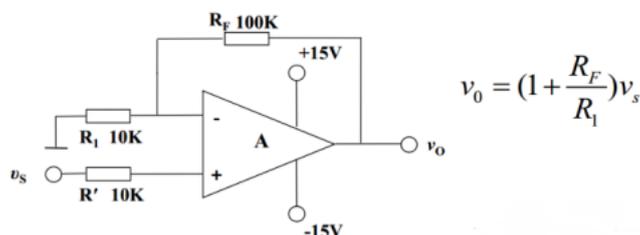
- (1) 按设计的运算电路进行连接。
- (2) 静态测试：输入接地，保证零输入时为零输出。
- (3) V_{s1} 和 V_{s2} 输入正弦波（频率和幅值），用示波器观察输入和输出波形，确认电路功能正确。
- (4) 用示波器测量输入和输出信号幅值，记到表格中。

3. 用积分电路将方波转换为三角波输出



- (1) 连接积分电路，加入方波信号。
- (2) 选择频率，使 $T_P \ll \tau_2$ ，用示波器观察输出和输入波形，记录线性情况和幅度。
- (3) 改变方波频率，使 $T_P \approx \tau_2$ ，观察并记录输出波形的线性情况和幅度的变化。
- (4) 改变方波频率，使 $T_P \gg \tau_2$ ，观察并记录输出波形的线性情况和幅度的变化。

4. 同相比例运算电路的电压传输特性曲线

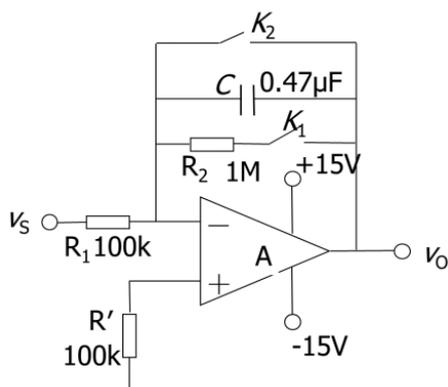


- (1) 连接同相比例运算电路。
- (2) 静态测试：输入接地，保证零输入时为零输出。
- (3) 加入正弦波，用示波器观察输入和输出波形，验证电路功能。
- (4) 用示波器测出电压传输特性：示波器选择XY显示模式，选择适合的按钮设置。
- (5) 适当增大输入信号，使示波器显示整个电压传输特性曲线（即包含线性放大区和饱和区）。

5. 查看积分电路的输出轨迹

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_s dt$$

$$= -\frac{v_s t}{R_1 C}$$



- (1)接入电阻 R_2 ，检查零输入时电路零输出。
- (2)断开 R_2 ，加入 1V 直流输入（15V 通过电位器分压）；合上 K_2 ，将电容 C 放电。
- (3)将示波器按钮置于适当位置：
 - I. Y 轴输入耦合选用“DC”；
 - II. 将光迹移至屏幕上方；
 - III. X 轴扫描速率足够大；
 - IV. 触发方式采用“边沿、自动”。
- (4)最后将 K_2 打开，即可看到光点随时间的移动轨迹。
- (5)画图记录光点随时间的移动轨迹。

五、实验数据记录和处理

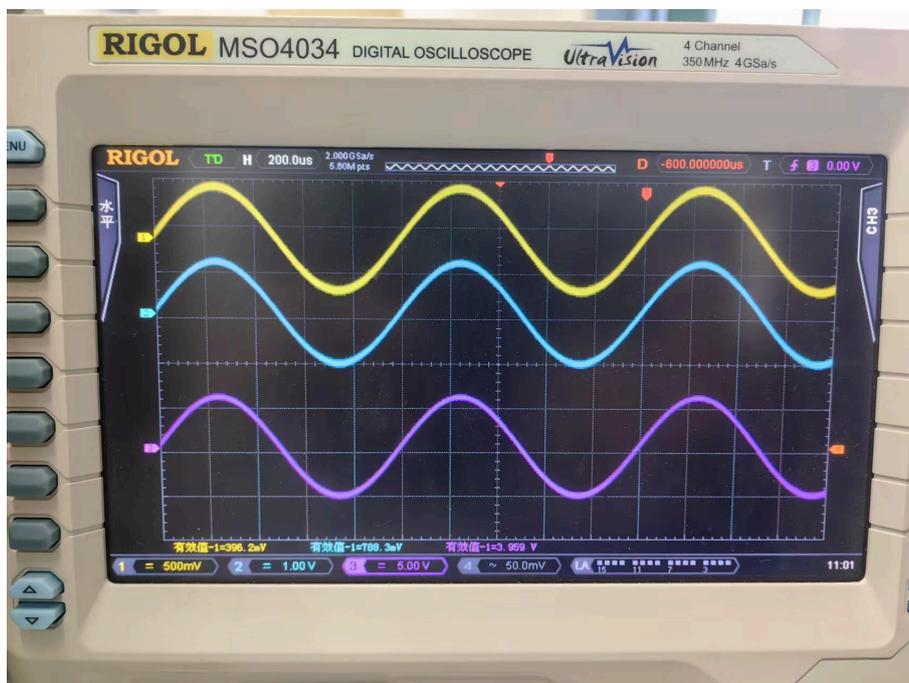
1. 实现反相加法运算电路

使用信号发生器作为输入，频道 1 输入 0.2V 三角波，频道 2 输入 0.5V 方波，示波器显示如下：



2. 实现减法运算电路

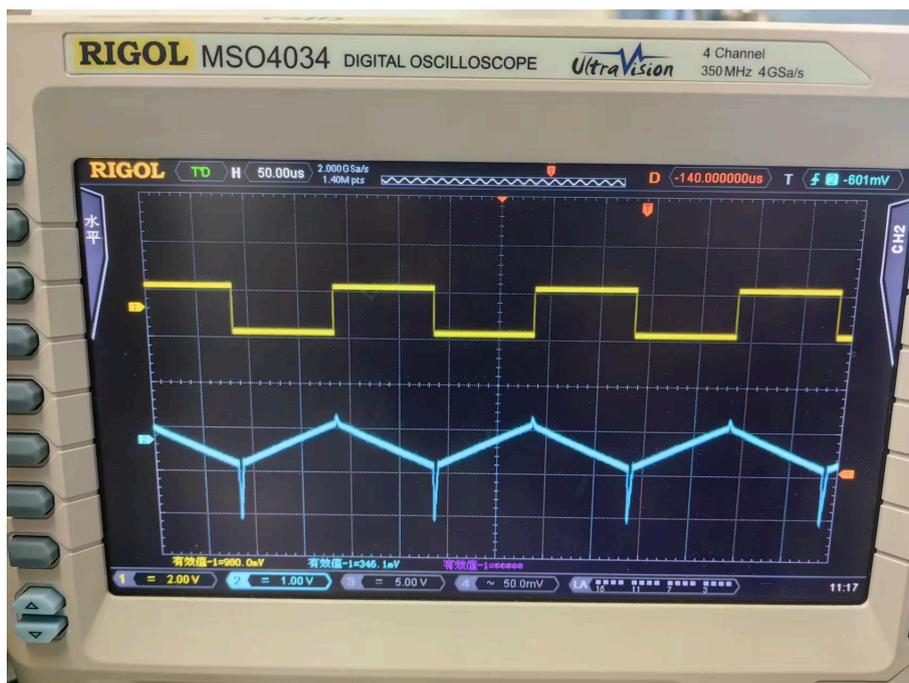
频道 1 输入有效值 0.4V，频率 1kHz 的正弦波，频道 2 输入有效值 0.8V，频率 1kHz 的正弦波，示波器显示如下：



输入信号 v_{s1} (V)		输入信号 v_{s2} (V)		输出电压 v_o (V)	
有效值	波形	有效值	波形	有效值	波形
0.3962	1kHz 正弦波	0.7883	1kHz 正弦波	3.959	1kHz 正弦波

3. 用积分电路将方波转换为三角波输出

用信号发生器输出赋值为 1V 的方波，改变方波的周期 方波周期为 0.2ms 时，示波器显示如下：



方波周期为 2ms 时，示波器显示如下：



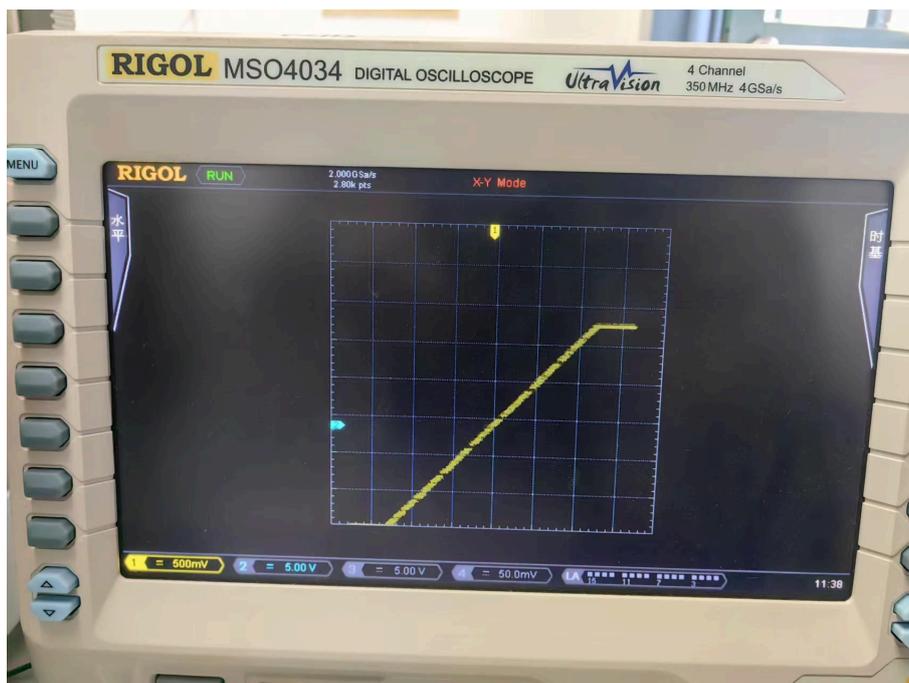
方波周期为 20ms 时，示波器显示如下：



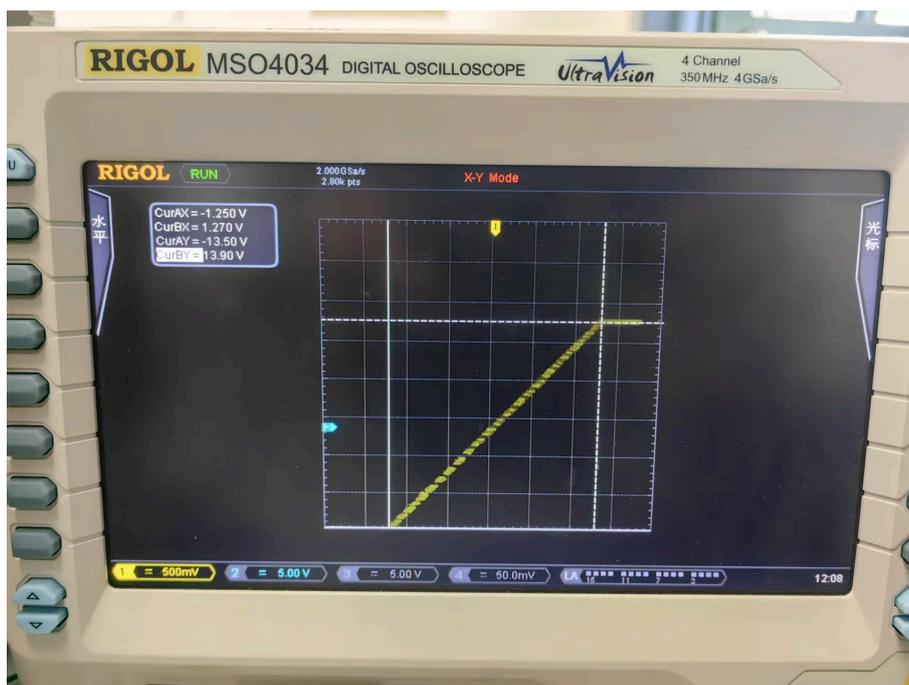
v_s 周期	v_s 幅度值	v_o 线性情况	v_o 有效值
0.2ms	1V	很好	346.1mV
2ms	1V	较差	2.677V
20ms	1V	畸变	8.778V

4. 同相比例运算电路的电压传输特性曲线

示波器显示的电压传输特性曲线如下：



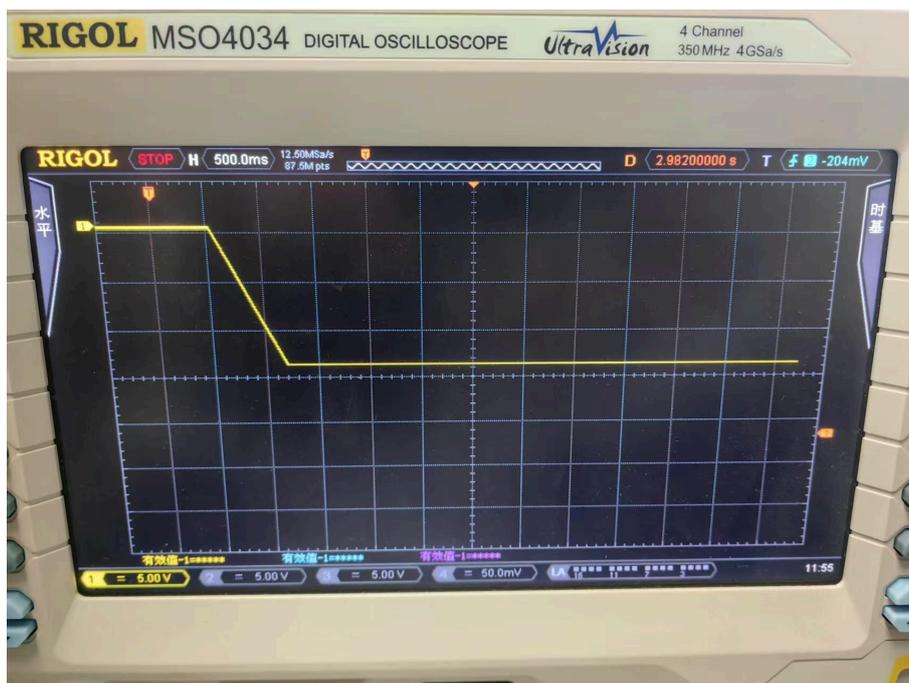
光标测量得：



其斜率为 $27.4/2.52=10.87$ ，与理论得到的 11 倍非常相近。

5. 查看积分电路的输出轨迹

示波器显示的积分电路输出轨迹如下：



光标测量得：



其输出的电压斜率为 $14.3/-0.69=-20.72\text{V/s}$ ，与理论得到的 $-\frac{1}{R_1C} = -21.27$ 非常相近。

六、实验结果与分析

1. 实现反相加法运算电路

实验结果符合理论计算和仿真结果，实现了两个信号的反相加法运算。

2. 实现减法运算电路

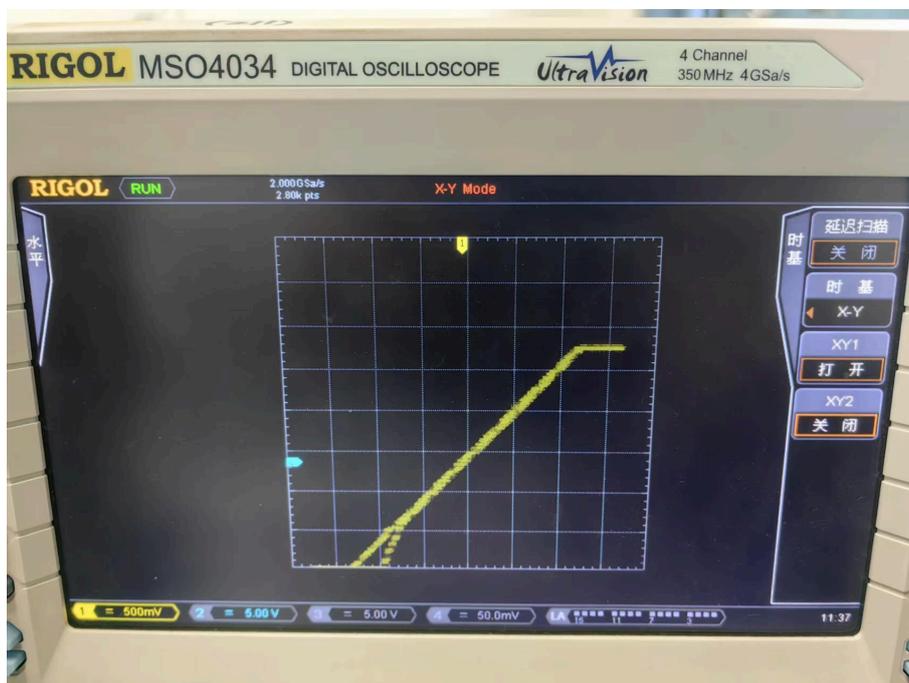
实验结果符合理论计算和仿真结果，实现了两个信号的减法放大运算。从示波器波形可以看出，被减数是信号 v_{s2} ，减数是信号 v_{s1}

3. 用积分电路将方波转换为三角波输出

实验中理论的 RC 回路时间常数为 1ms，选取周期为 0.2ms，2ms 和 20ms 的方波输入信号，可以发现 $T_P \ll \tau_2$ 时线性最好， T_P 越大线性越差，但输出信号幅度在增加。另外需要指出的是，当 T_P 越小时，达到稳定前需要的周期数越多。

4. 同相比例运算电路的电压传输特性曲线

在示波器 XY 模式下可以观察到符合理论的电压传输曲线，需要注意的是输入信号的频率不能取太高，否则会导致曲线的拐角处失真。我一开始调的是 1kHz，结果曲线在拐角处失真，如下图所示。

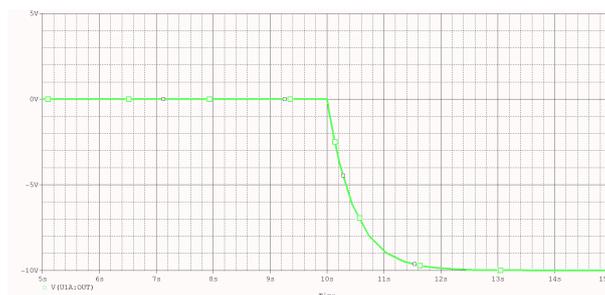


后面咨询老师后减小了频率，得到了正确的曲线。还有需要注意的是电压幅度要足够大，否则无法得到饱和区的曲线。

其输出的电压斜率为 $14.3/0.69=20.72\text{V/s}$ ，与理论得到的 $\frac{1}{R_1C} = 21.27$ 非常相近，说明所得的曲线比较符合实际。

5. 查看积分电路的输出轨迹

在仿真时，要注意 pspice 中开关默认的阻值为 $1\text{M}\Omega$ ，可能会使得积分电路的输出轨迹不理想，如下所示。



咨询老师后老师提示我需要更改开关的电阻，最终得到了理想的输出轨迹。

积分电路的轨迹符合理论公式的推导和实际积分的定义，需要注意，X轴扫描的速率要足够大，断开开关的时机也要把握好，才能得到理想的输出轨迹，并且在记录图像前要按下示波器的暂停键，防止示波器的波形被后续的曲线覆盖。

其输出的电压斜率为 $14.3/0.69=-20.72\text{V/s}$ ，与理论得到的 $\frac{1}{R_1C} = -21.27$ 非常相近，说明所得的积分电路输出轨迹比较符合实际。

七、讨论与心得

(一) 思考题

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

集成运放输入电压和输出电压之间的关系即为电压传输特性。集成运放主要有三种输入方式：差动输入，反相输入和同相输入；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是输入端电压相对于输出端电压的相位关系不同，输出端分别得到与输入反相和同相的放大信号。

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？

不对，在输入信号的幅度超过集成运放能够承受的范围之后，输出电压会逐渐饱和并停止增加，最终将不再表现为线性关系。这是由于集成运放本身的内部电路结构，以及外围反馈电路对其性能的限制所造成的。运放只有工作在线性放大区时，输入输出才成线性关系。

3. 实验中信号的频率不一样是否对实验的结果有影响？

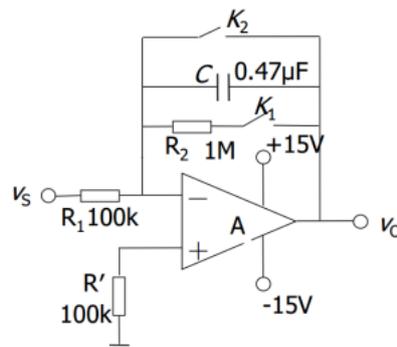
有影响，集成运放有自己的适用频率范围，若信号频率不在集成运放的频带之内，可能会发生失真等情况影响实验结果。实际上，我们在调节信号发生源的频率时也可以看到其对波形和实验结果会产生影响。

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？

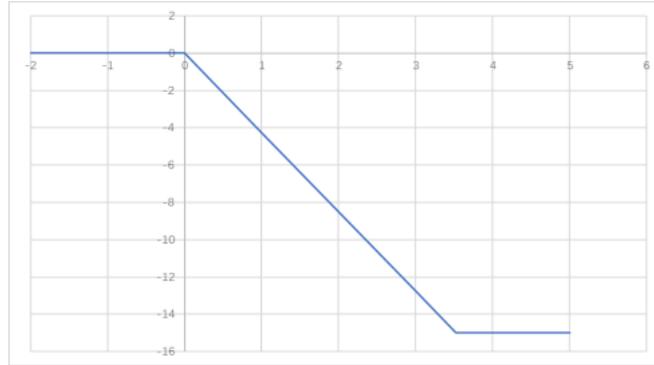
有可能是运放放大倍数过高，直接导致电压饱和，此时可以加入深度负反馈达到控制增益的效果，或降低输入信号的幅度。另一种可能是运放损坏，需要更换元器件。

5. 在积分运算电路中，当选择 $V_s=0.2\text{V}$ 时，若用示波器观察 $V_o(t)$ 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 K2 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？

题目所说电路如下，



由描述知， K_2 打开前电容 C 未积累电荷，当 K_2 被打开，电容开始被充电，电位也逐渐上升，但是因为输出电压相位与输入相反（公式已在方波转换三角波分析给出），波形首先会往负轴走，且电解电容左端为正极，右端为负极，因此移动轨迹大约为：



电解电容的正极应接在输入 v_i 端，负极接在输出 v_o 端。

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。

使用示波器监视输出波形。

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。

对于正弦波，可以选择示波器来测量其幅度。

对于方波，可以采用万用表或示波器进行幅度测量。

对于直流信号，可以采用万用表或者直流电压表等进行测量。

当然，在只有示波器时，也可以只用示波器测量以上幅度，但由于示波器内阻等精度会影响更大。

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

很可能是电路中缺少负反馈，应该检查负反馈电阻是否正确接入了电路，重新接线，直到零输入时得到零输出。也有可能是集成运放的线性区域很窄，微小的噪音和干扰就能使得运放由较大的输出，甚至直接让运放工作于饱和区。应该检查电路连接方式和元件情况，可以用示波器逐点检验电路是否出现错误，或者更换电源信号检测是否是电源信号引起的输出紊乱。

(二)心得

本次实验中我实现了理论课上所学的集成运放运算，进一步将反馈和集成运放等相关知识融会贯通。本次实验仍然集成了理论、仿真和实验三部分内容。其中仿真、理论和实验结果互相印证，化抽象为具体，让我对反相加法电路、减法电路、积分电路有了更深刻的认识。

在本次实验课前，我参照老师的课件在自己电脑的 pspice 软件中进行了仿真，基本上没有遇到太大的问题，可见我对 pspice 软件的使用和仿真已经较为熟练了。在仿真积分路径输出电路时，得到的输出路径不理想，于是我在钉钉上询问了老师，发现开关是有阻值的，我更改了参数，最终也得到了理想的积分路径输出曲线。

同时我认为经过本次实验，我对示波器的掌握更加熟练了。本次我个人实验在课上进行的比较顺利，求助老师次数较少，基本能做到独立操作示波器，也是本节课第一个完成实验的同学。