

浙江大学实验报告

课程名称： 电路与电子技术实验 I 指导老师： 姚纓英 成绩： _____
实验名称： 集成运算放大器基础知识 实验类型： 电学实验

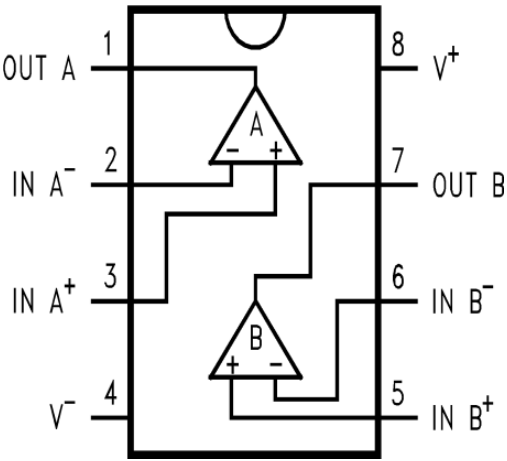
实验 3 频率特性曲线的测量

实验基础知识

本次实验需要使用到集成运放 LM358。其引脚分布如右图所示。其主要参数如下图所示。

在实验中，主要使用 8 和 4 给运放供电，1、2、3 脚对应的运放是实际使用的运放。

本次实验中，8 接+15V，4 接-15V，由直流稳压源供电。方法为：设定 CH1 和 CH2 的电压值为 15V，限流 1~2A，将 CH1 和 CH2 进行串联耦合（SER）。以 CH2 的“+”输出端为地，则 CH2 “-”输出端输出-15V，CH1 “+”输出端输出+15V，用来给运放供电。



LM358主要参数:

V_{IO} : 3mV
 I_{IO} : 2nA
 I_{IB} : -20nA
 $V_{CC} = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

CMRR: 80dB
 V_{ICR} : 0 ~ $V_{CC}-1.5\text{ V}$
 V_{OH} : $V_{CC}-1.5\text{ V}$
 A_{VD} : 100V/mV

Wide Supply Ranges
- Single Supply: 3 V to 32 V
(26 V for LM2904)
- Dual Supplies: $\pm 1.5\text{ V}$ to $\pm 16\text{ V}$
($\pm 13\text{ V}$ for LM2904)

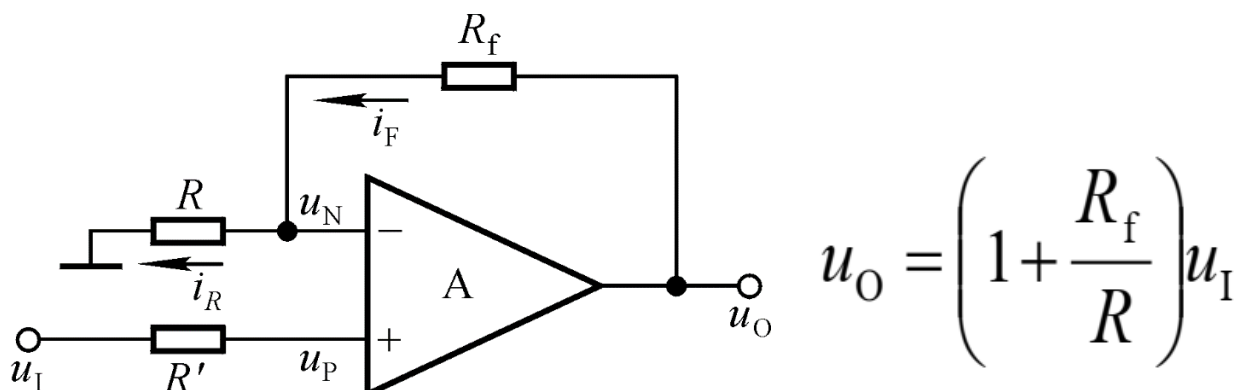
PARAMETER		TEST CONDITIONS	TYP	UNIT
SR	Slew rate at unity gain	$R_L = 1\text{ M}\Omega$, $C_L = 30\text{ pF}$, $V_I = \pm 10\text{ V}$ (see Figure 11)	0.3	V/ μs
B_1	Unity-gain bandwidth	$R_L = 1\text{ M}\Omega$, $C_L = 20\text{ pF}$ (see Figure 11)	0.7	MHz

实验任务

- 设计并实现放大倍数为 3 的同相比例放大电路；观察电压传输特性曲线（含饱和段）；该电路的功能受限于哪些因素？
- 设计并实现反相加法器 $v_o = -(2v_{s1} + 10v_{s2})$ ；该电路对 v_{s1} 和 v_{s2} 以及频率有限制条件吗？要求两个信号分别为直流或交流。
- 设计并实现一个反相积分电路；该电路有限制条件吗？

任务一：设计并实现放大倍数为 3 的同相比例放大电路

1. 实验原理



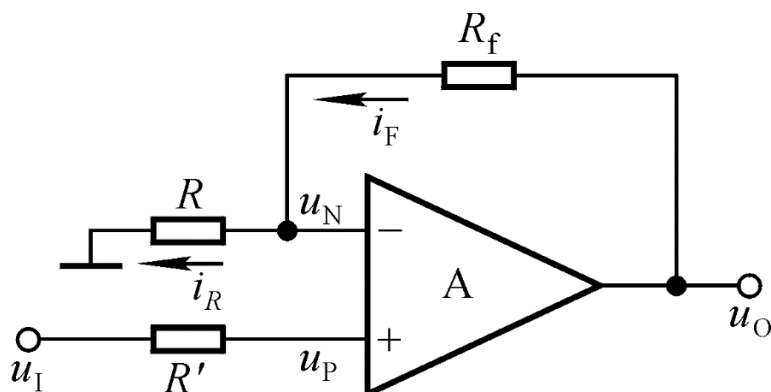
考虑输入失调电压 V_{IO} 和输入失调电流 I_{IO} 时，计算可知，当 $R_1 = R_2$ 时，偏置电流 I_{IB} 引起的失调电压最小。因此，在负反馈放大电路中， R_2 称为平衡补偿电阻，其值应为 $R_1 // R_f$ 。

$$\begin{aligned} V_{Id} &= I_{BN} R_2 - I_{BP} R_1 - V_{IO} = -V_{IO} - (I_{BP} R_1 - I_{BN} R_2) \\ &= -V_{IO} - \left[\left(I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2} \right) R_1 - \left(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2} \right) R_2 \right] \\ &= -V_{IO} - \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right] \\ V_{OO} &= A_{od} \cdot V_{Id} = -A_{od} V_{IO} - A_{od} \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right] \end{aligned}$$

因此，我们引入平衡补偿电阻 $R' = R_1 // R_f$ 。

要实现放大倍数为 3，则有 $R_f / R = 2$ 。在设计电路时，考虑到电阻箱的实际情况，选择 $R = 10k\Omega$ ， $R_f = 20k\Omega$ ， R' 直接用 $20k\Omega$ 和 $10k\Omega$ 并联得到。

2. 实验方案



- 1) 根据上图连接电路。其中， u_I 根据情况由信号发生器或直流稳压源提供。 $R = 10k\Omega$ ， $R_f = 20k\Omega$ ， R' 直接用 $20k\Omega$ 和 $10k\Omega$ 并联得到。示波器 CH1 接在输入端，直接在示波器显示输入的信号；CH2 接在输出端。示波器和信号源共地连接。

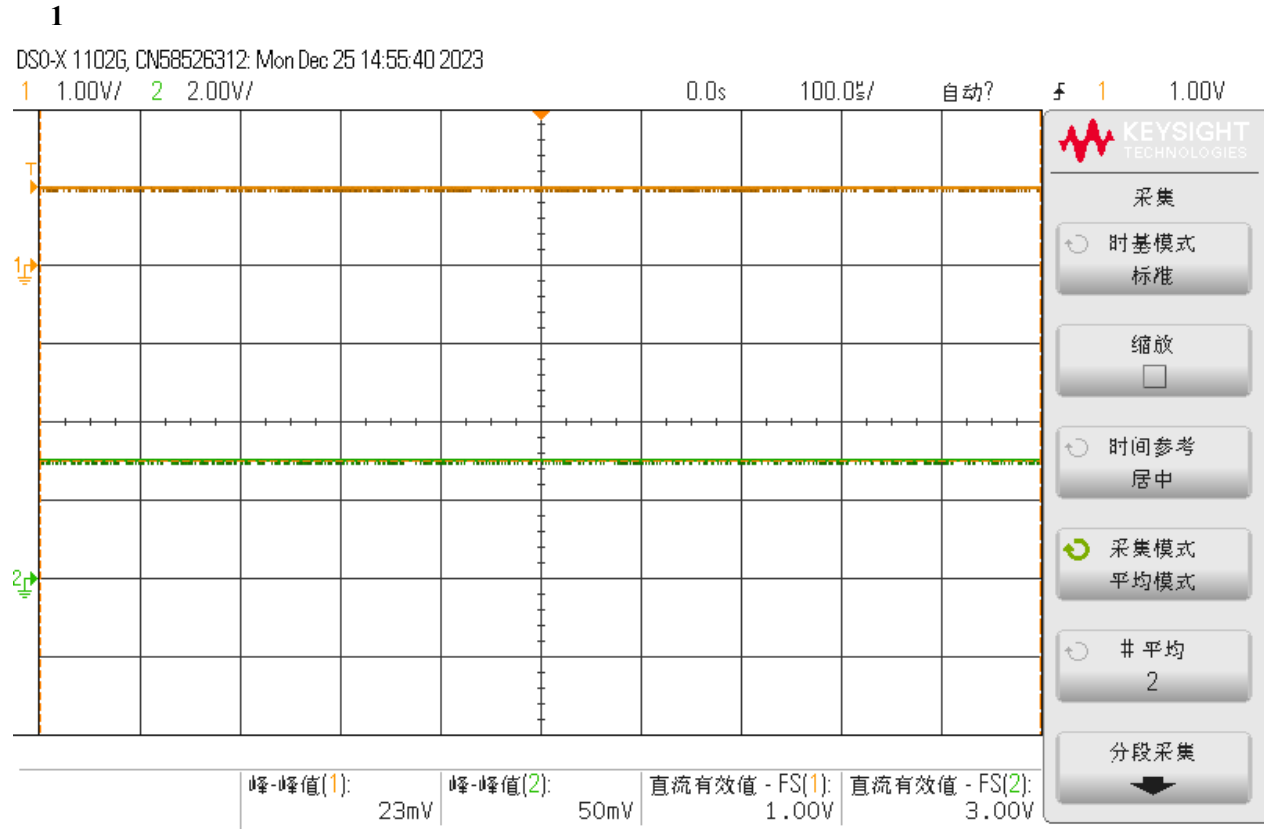
- 2) 先断开电源和电路的连接，用万用表检查电源输出是否符合要求（即 4 接-15V，8 接 15V）。确认无误后再将电源接入电路，并启动电源。此时运放开始工作。
- 3) 依次输入信号 v_s ，记录示波器上观测的波形及其有效值、峰值等数据。

3. 数据记录

表 1 同相比例运算电路测试

输入信号 v_s/V			输出电压 v_o/V			放大倍数
序号	有效值	波形	有效值	峰峰值	波形	有效值
1	1	直流输入	3	/	直流	3
2	-0.5	直流输入	1.7	/	直流	3.4
3	0	接地	18.5m	28m	直流	/
4	0.5	正弦输入 1kHz	1.52	4.7	正弦无失真	3.04
5	1.2	正弦输入 1kHz	3.65	11.7	正弦无失真	3.04

注：有效值均为正，直流时看不出正反相



3

DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 14:58:20 2023

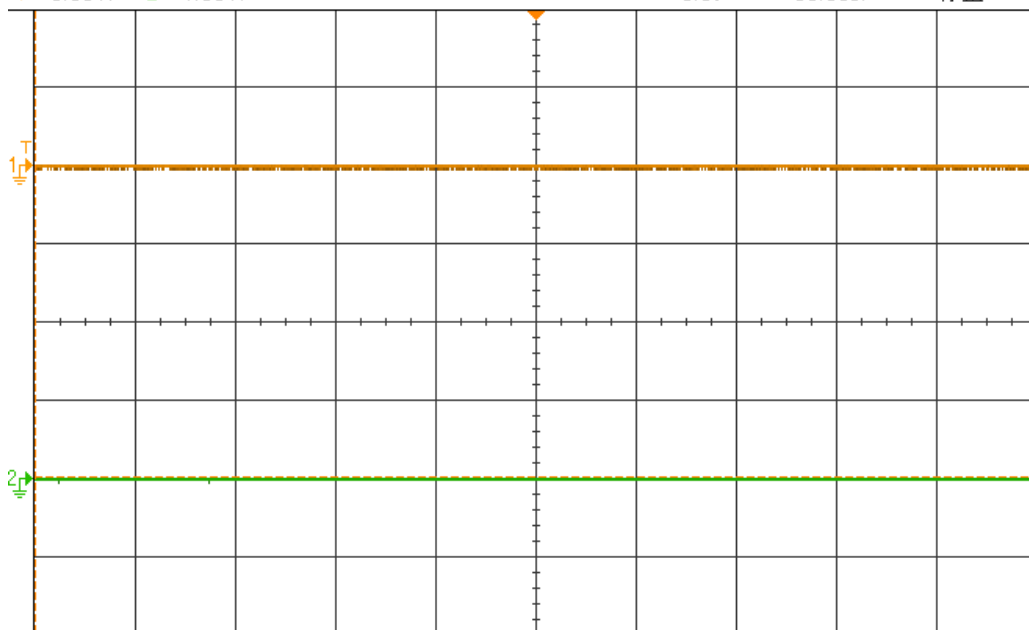
1 5.00V/ 2 1.00V/

0.0s

50.00%/

停止

f 1 -3.00V



峰-峰值(1):

150mV

峰-峰值(2):

28mV

直流有效值 - FS(1):

31.3mV

直流有效值 - FS(2):

18.5mV



采集

 时基模式
标准

缩放


 时间参考
居中

 采集模式
平均模式

 # 平均
2

分段采集



4

DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 14:37:34 2023

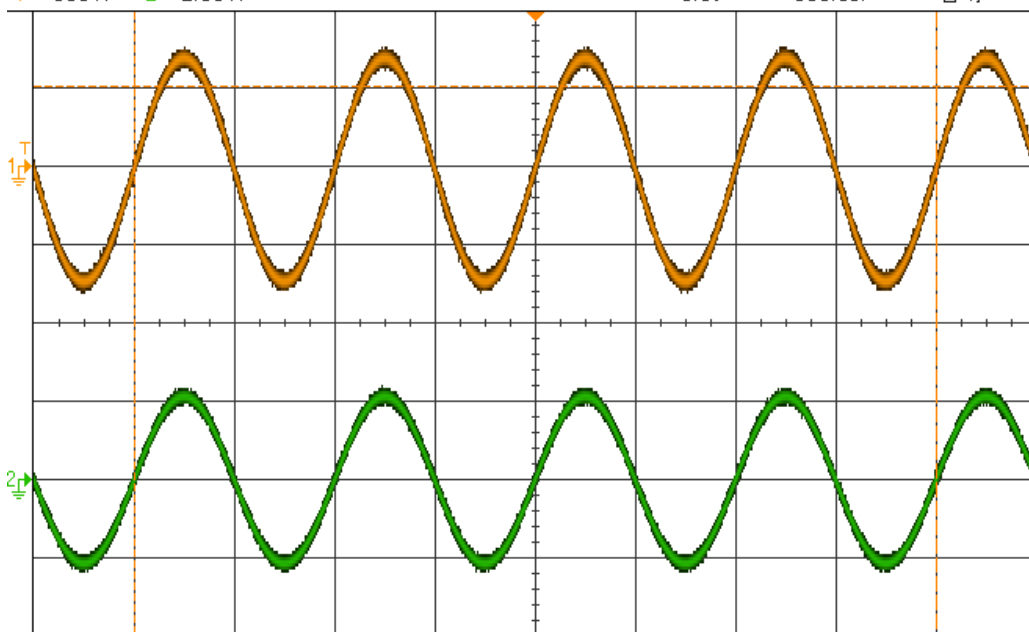
1 500V/ 2 2.00V/

0.0s

500.0%/

自动

f 1 0.0V



峰-峰值(1):

1.57V

峰-峰值(2):

4.7V

直流有效值 - ... (2):

1.52V

直流有效值 - ... (1):

507mV



自动定标

 取消
自动定标

快速调试


 通道
打开通道

 采集模式
标准模式

5

DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 14:37:58 2023

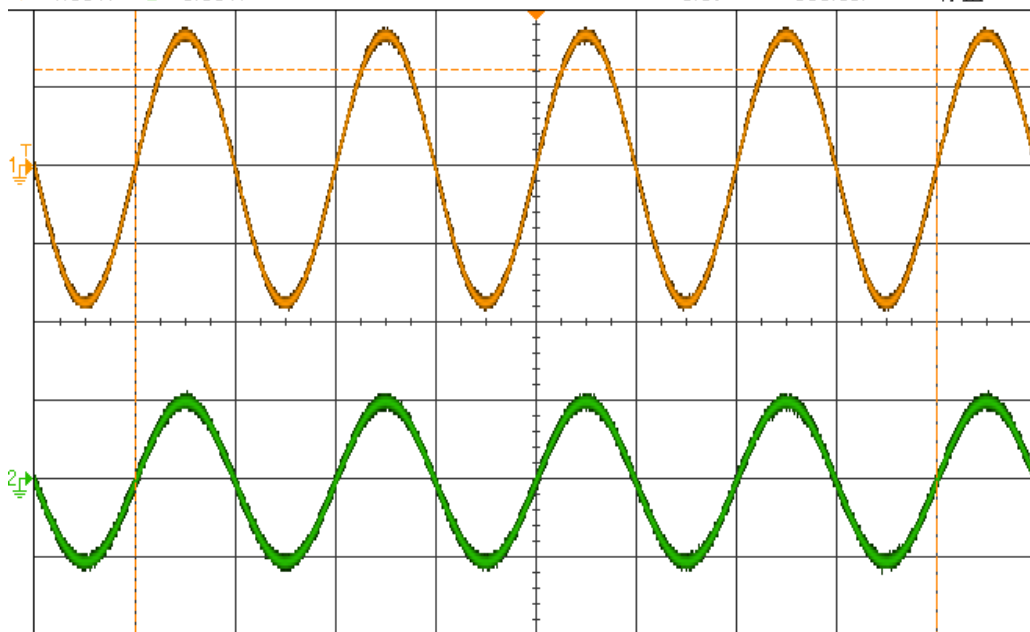
1 1.00V/ 2 5.00V/

0.0s

500.0%/

停止

f 1 -40.0%



峰-峰值(1): 3.62V 峰-峰值(2): 11.7V 直流有效值 - ... (2): 3.65V 直流有效值 - ... (1): 1.218V

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

自动定标

取消 自动定标

快速调试

通道 打开通道

采集模式 标准模式

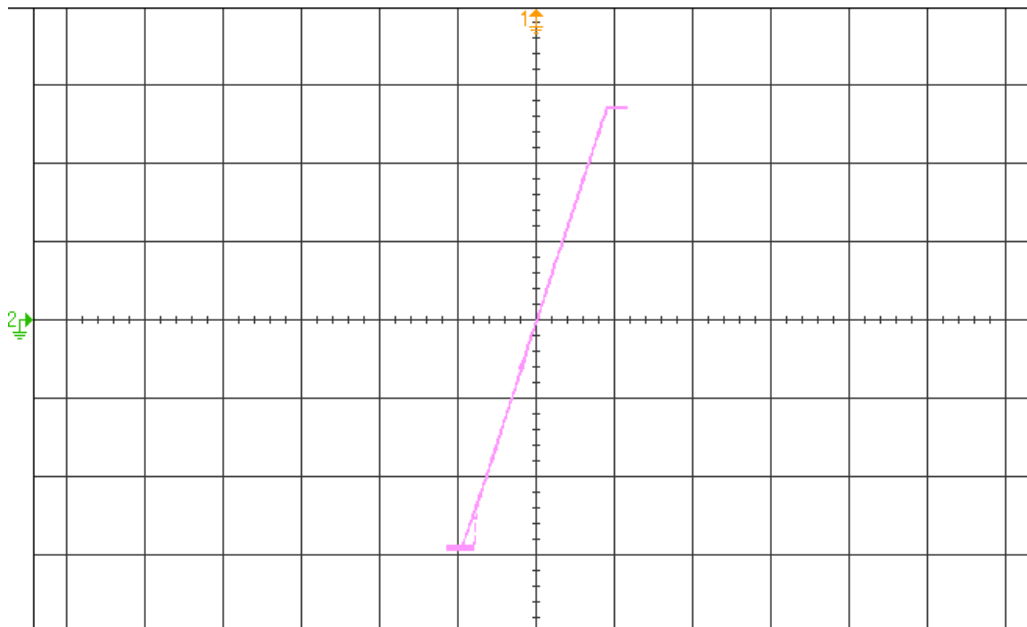
补充：电压传输特性（输入正弦 4Vrms）

DSO-X 1102G, CN58526312: Fri Dec 29 14:07:06 2023

1 5.00V/ 2 5.00V/

500.0%/

XY



相移(1→2): -2° 直流有效值 - FS(1): 4.1V 直流有效值 - FS(2): 11.2V

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

测量

源 2

类型: 直流有效值 - FS

添加 测量

设置

清除测量值

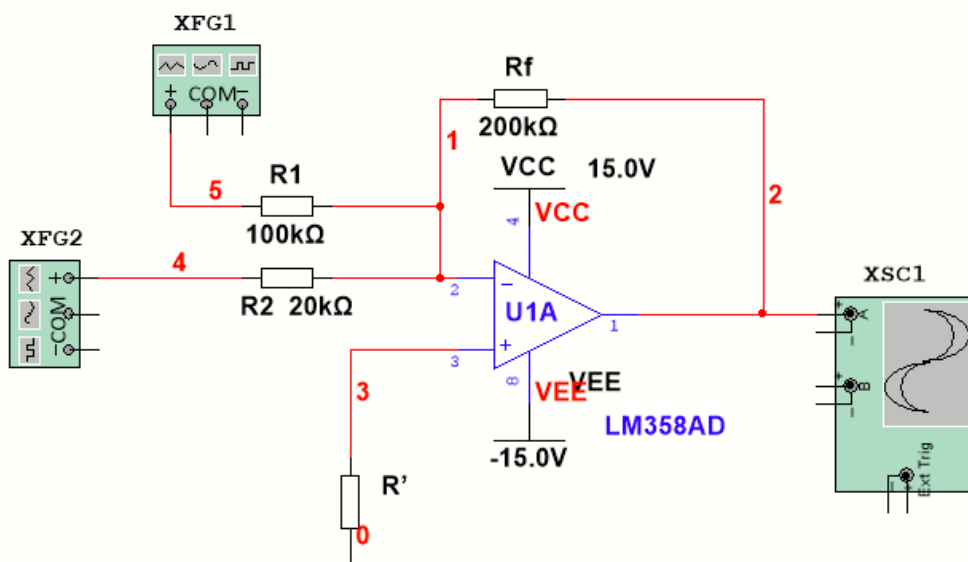
在电压可调范围内，当输入正弦的 $V_{rms} > 3.1V$ 时，两端能够出现水平段。

4. 数据处理与分析

分析输入和输出电压的有效值，可以看到电压放大倍数约为 3 倍，能够实现所要求的功能。

任务二：设计并实现反相加法器 $v_o=-(2v_{s1}+10v_{s2})$

1. 实验原理



与同相比值电路相比，反相加法器有两个信号源，要实现 $v_o=-(2v_{s1}+10v_{s2})$ ，需要合理配置 R_1 、 R_2 、 R_f 和平衡电阻 R' 。与同相比值电路类似，可以计算出，该电路满足

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

结合实验箱实际情况，选用 $R_f = 200k\Omega$ ， $R_1 = 100k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ 。

对于平衡电阻，同样有：

$$R' = R_1 // R_2 // R_f = 15.38k\Omega$$

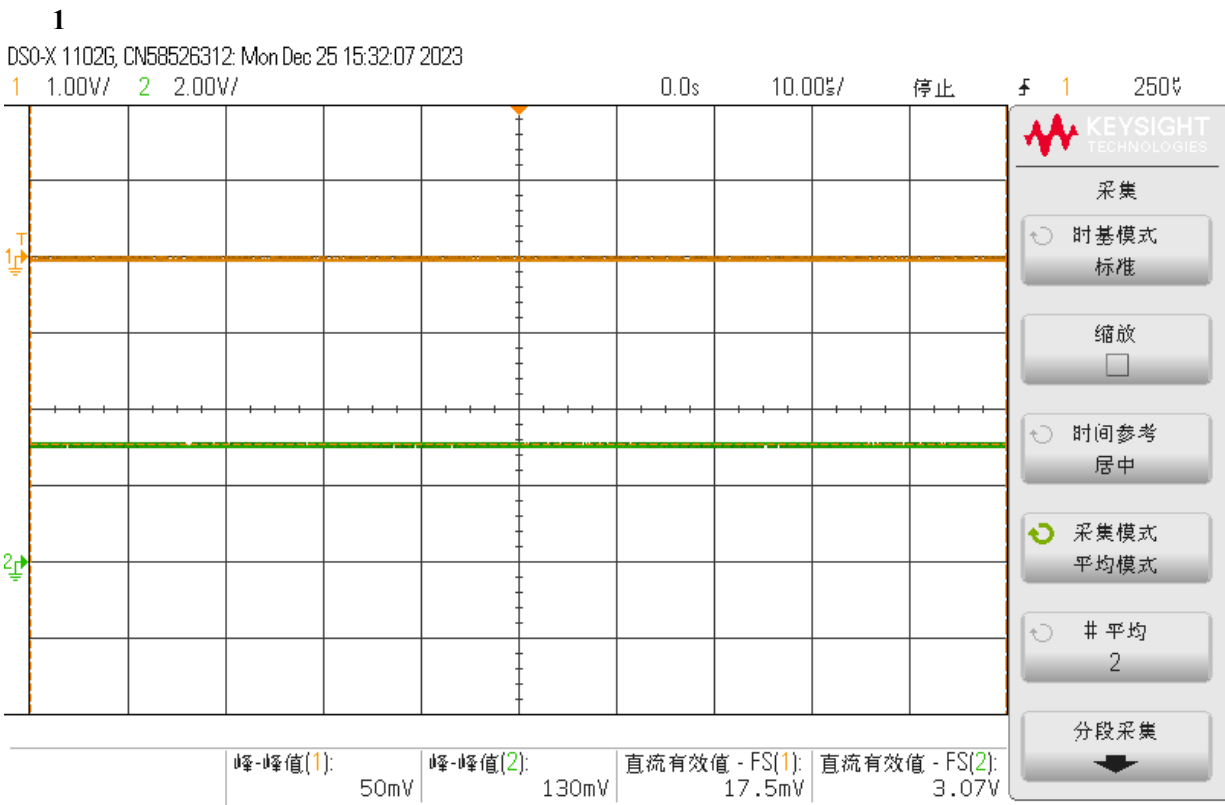
2. 实验方案

- 1) 根据上图连接电路。其中，两个输入信号源根据情况由示波器或直流稳压源提供。 $R_f = 200k\Omega$ ， $R_1 = 100k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ ， R' 直接用 $200k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 和 $20k\Omega$ 并联得到。示波器 CH1 接在输出端。示波器和信号源共地连接。
- 2) 先断开电源和电路的连接，用万用表检查电源输出是否符合要求（即 4 接 -15V，8 接 15V）。确认无误后再将电源接入电路，并启动电源。此时运放开始工作。
- 3) 依次输入各组信号 v_{s1} ， v_{s2} ，记录示波器上观测的波形及其有效值、峰值等数据。
- 4)

3. 数据记录

表 2 反相加法器测试

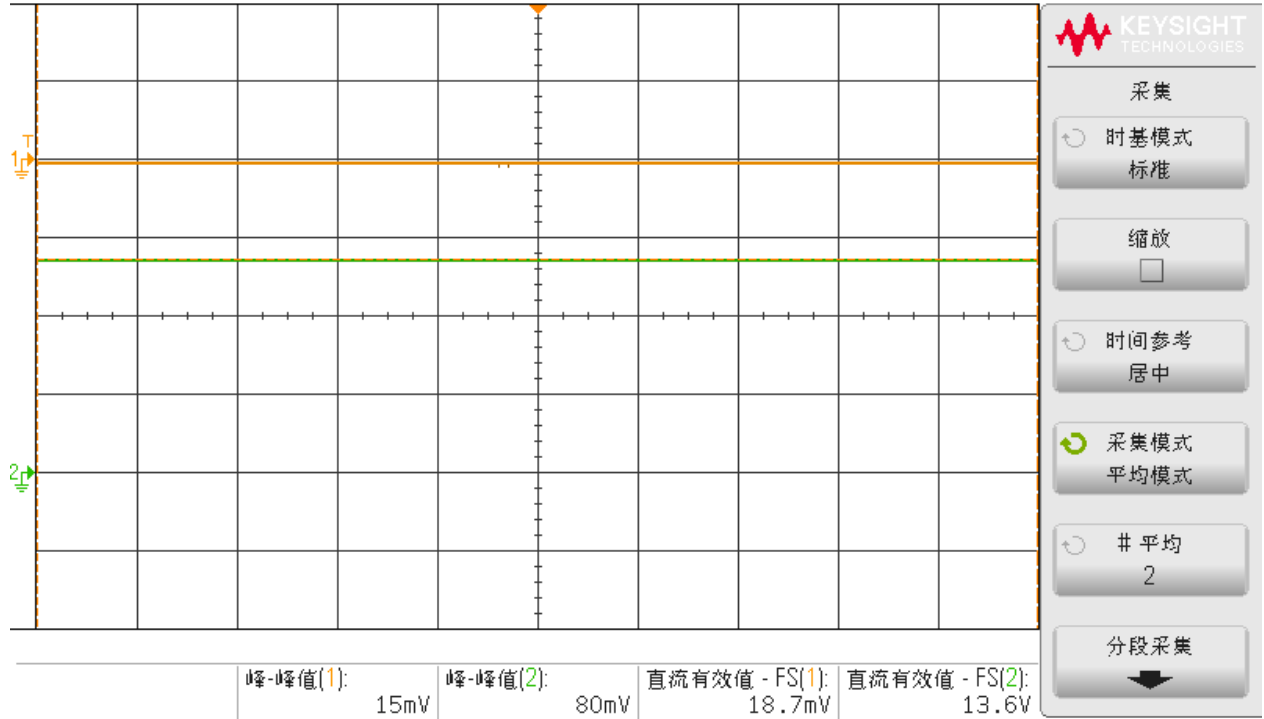
输入信号 vs1/V			输入信号 vs2/V		输出电压 vo/V			理论（有效） 值
序号	有效 值	波形	有效 值	波形	有效 值	峰峰 值	波形	
1	1	直流输入	-0.5	直流输入	3.07	/	直流	3
2	+0.5	直流输入	-1.5	直流输入	13.6	/	直流	14
3	1	直流输入	0.5	直流输入	7.1	/	直流	-7
4	0.6	正弦输入 1kHz	0.2	正弦输入 3kHz 同相	2.27	8.7	正弦叠加 6kHz	-2.33
5	1.2	正弦输入 1kHz	0	接地	2.45	7.4	正弦无失真	-2.4



2

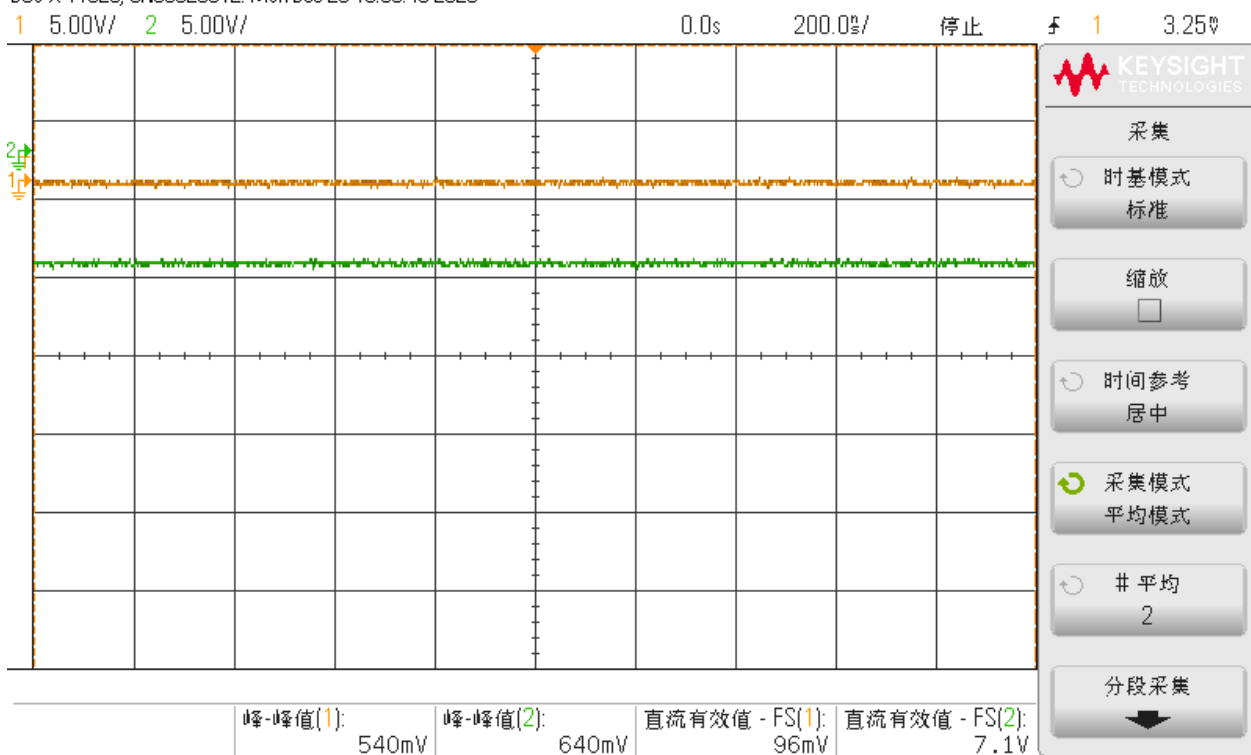
DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 15:34:26 2023

1 500%/ 2 5.00V/ 0.0s 200.0%/ 停止 f 1 -500%



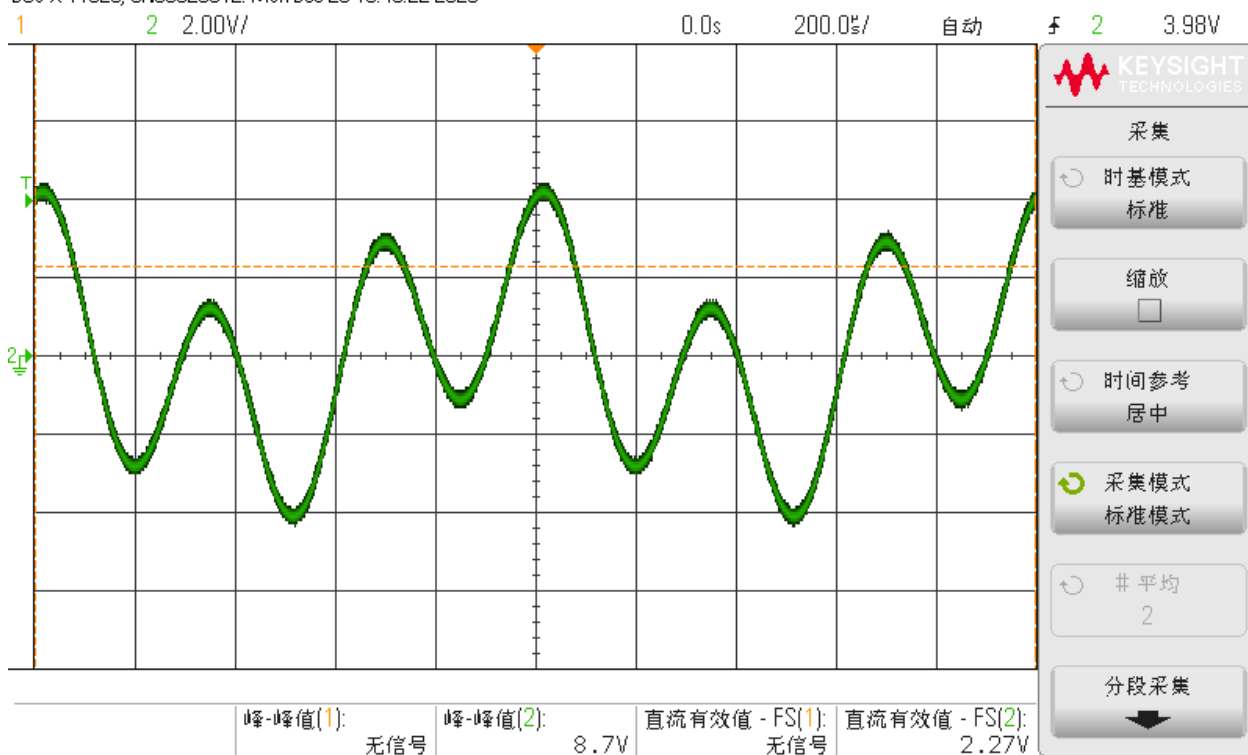
3

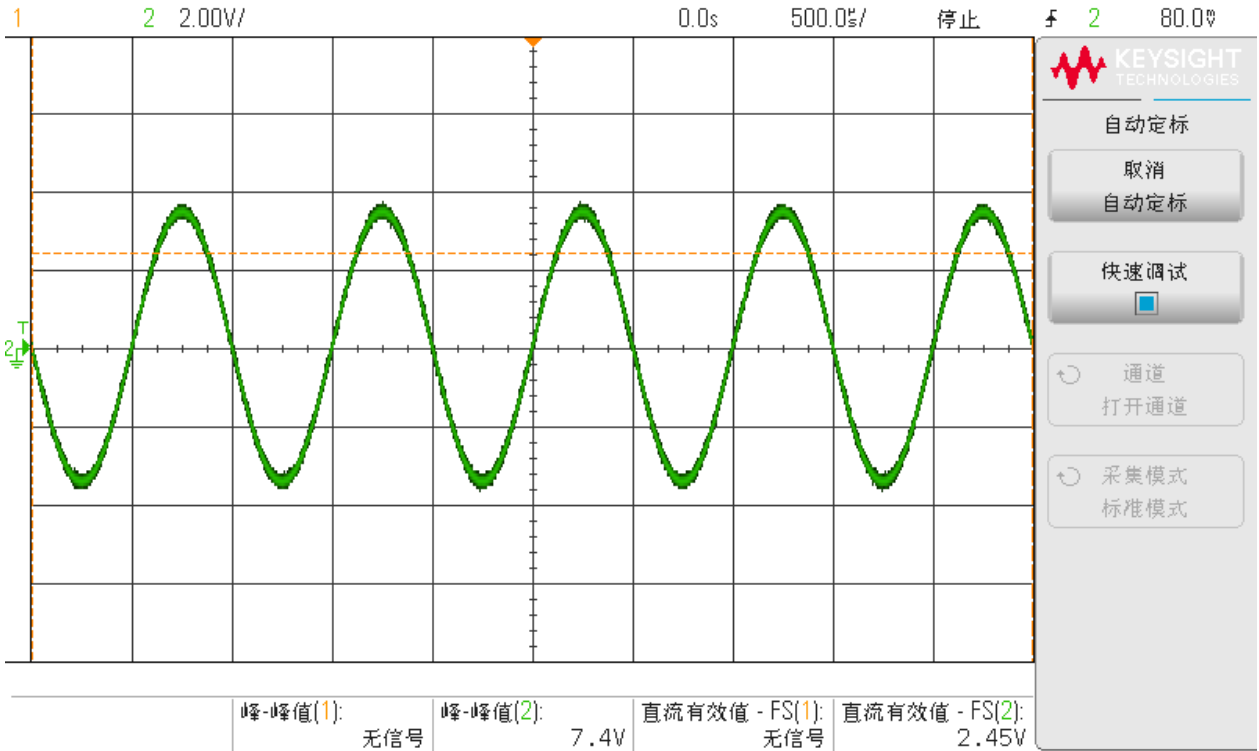
DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 15:35:49 2023



4

DSO-X 1102G, CN58526312: Mon Dec 25 15:48:22 2023



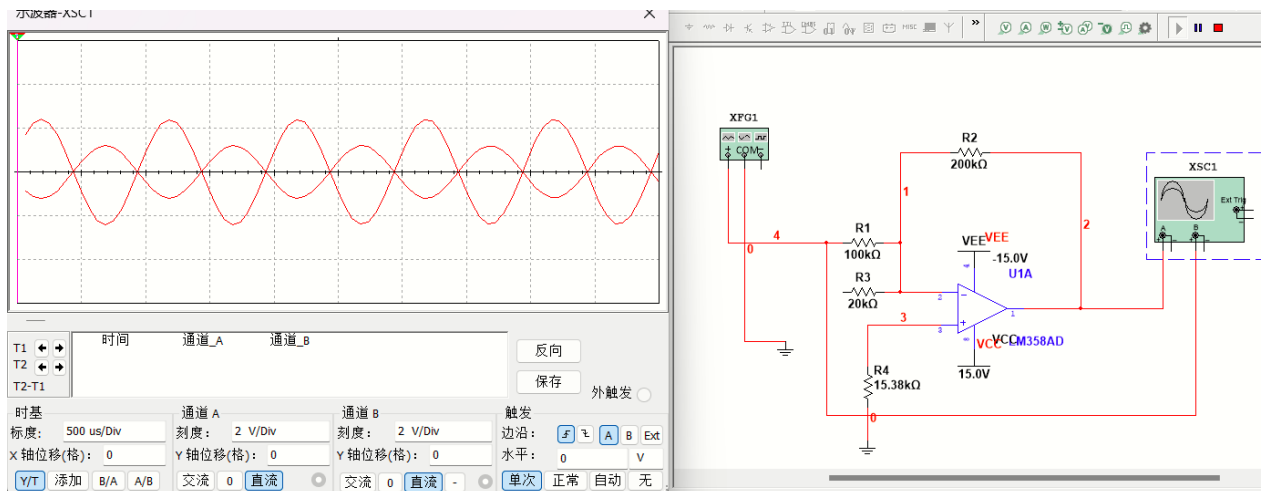


4. 数据处理与分析

对第 1 组和第 2 组，均为直流输入，输出有效值和理论值对应的很好。

对第 3 组，理论计算得到的理论值为负，因为是直流输入，在示波器实际测量时只显示绝对值

对于第 5 组，在测量时因为信号线不够，没有把输入的信号一起呈现在示波器上，计算出来的理论值是负的，但是示波器读取的有效值为正数。通过仿真把输入和输出信号都放在一起看，可以发现，输出信号和输入信号之间存在 90° 的相位差，这也说明实际上输出的是反相放大的信号。

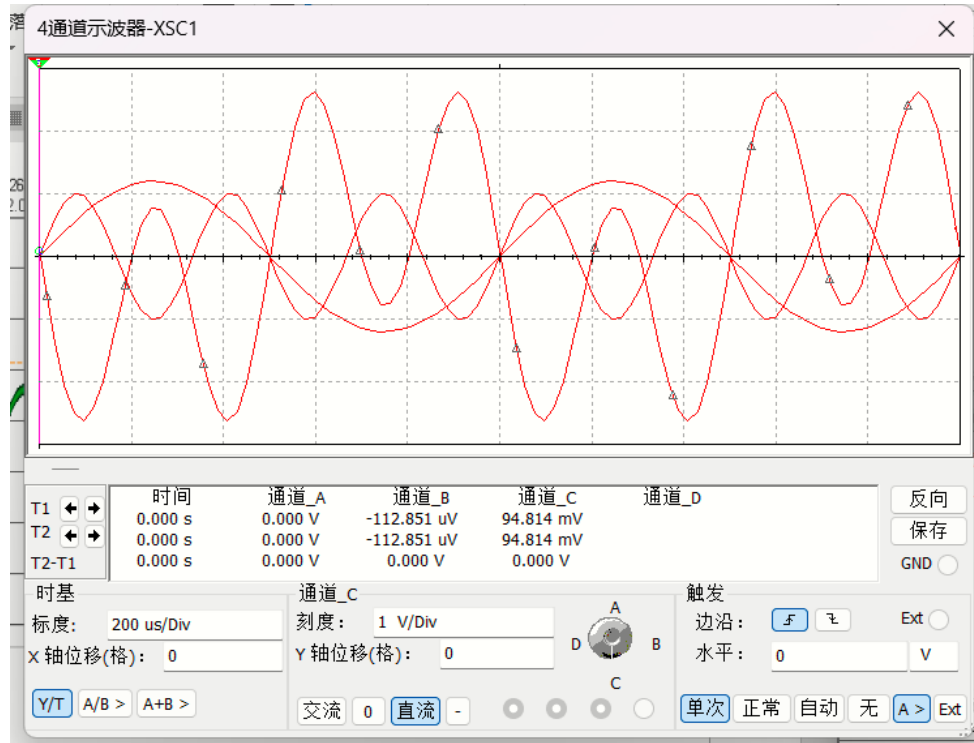


对于第 4 组， $vs1$ 和 $vs2$ 都是正弦交流信号，其理论值的计算不能仅通过简单的线性运算进行。如果按照线性的计算，那么计算得到的理论值为 $-3.2V$ 。此时的理论有效值应该为矢量叠加的模，也即

$$v = -\sqrt{4(vs_1)^2 + 100(vs_2)^2}$$

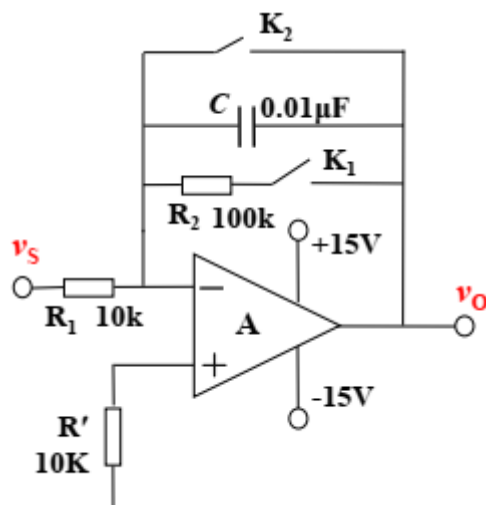
数据代入上式可以得到此时的理论值为-2.33V，与实际测量值基本相符。但是符号没有办法确定。

受限于实验器材限制，无法直接在示波器上同时显示这三个波形。利用 Multisim 仿真，采用四通道示波器进行仿真可以验证。观察可以发现，反相线性放大的波形的频率为 $2 \times 3 = 6 \text{ kHz}$ ，“-”也没有问题。



任务三：设计并实现一个反相积分电路

1. 实验原理



$$v_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} v_s(\xi) d\xi + v_o(t_1)$$

$$v_o(t) = \frac{1}{R_1 C \omega} V_{sm} \cos(\omega t)$$

CR_1 与信号频率 ω 有关

$$R_1 C \geq \frac{V_{sm}}{\omega V_{omax}}$$

本实验按照上图所示参数即可实现反相积分运算。**K2**一方面为积分电容放电提供通路，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 **K2** 一打开，

电容将被恒流充电，电路也就开始进行积分运算。

2. 实验方案

- 1) 按电路图连接好电路。
- 2) K1 闭合，通过电阻 R2 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 K1 打开，以免因 R2 的接入而造成积分误差。
- 3) 依次输入各信号。
- 4) 示波器观察积分过程。具体做法是先将光点移至屏幕左上角作为坐标原点，Y 轴输入耦合选用“DC”，扫速开关和 Y 轴灵敏度开关均置于适当位置，触发方式采用“NORM”。此时若将 K2 打开，即可看到光点随时间的移动轨迹。即 v_o 与时间 t 的关系。

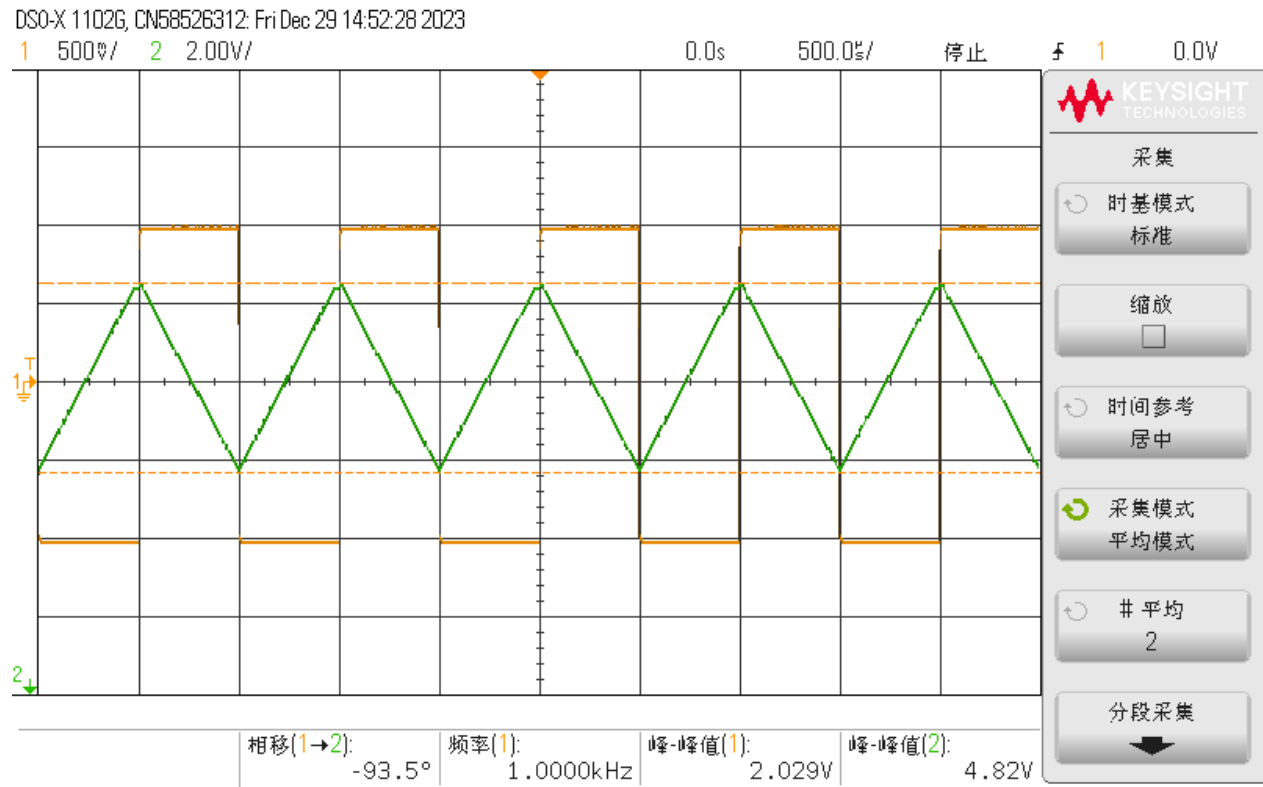
3. 数据记录

表 3 反相积分电路

V_s	V_o	V_o
波形	波形	峰峰值/V
直流 2V	线性下降	14.22
方波 2V _p , 1kHz	三角波-90° 相位	4.82
正弦波 2V _p , 1kHz	正弦-90° 相位	3.14

1 方波积分

变成三角波

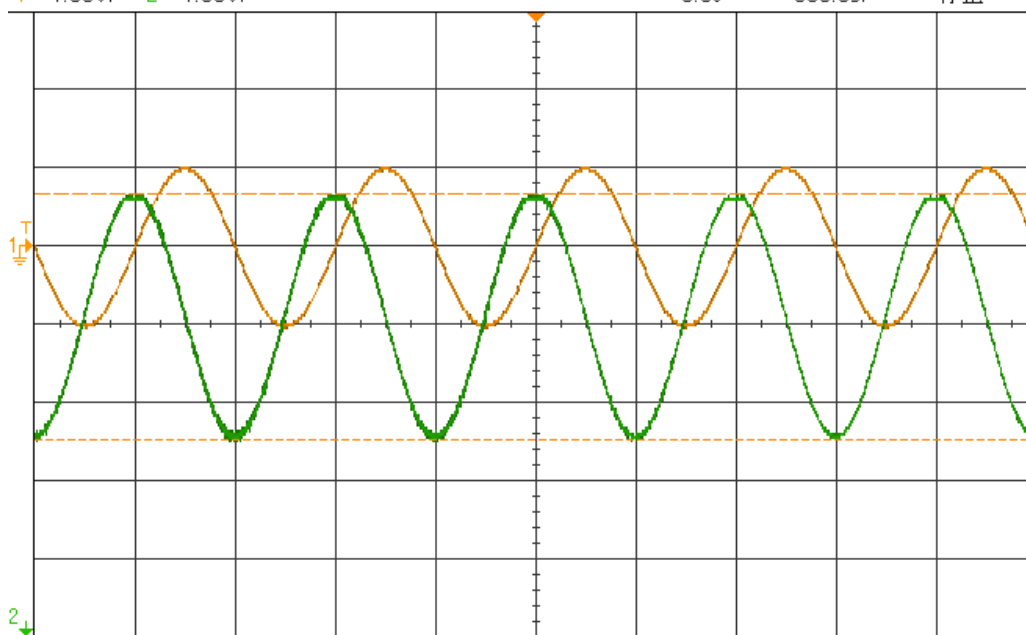


2 正弦积分

相移-90°

DSO-X 1102G, CN58526312, Fri Dec 29 14:48:31 2023

1 1.00V/ 2 1.00V/ 0.0s 500.0%/ 停止 f 1 0.0V



相移(1→2): -90.0° 频率(1): 1.0000kHz 峰-峰值(1): 2.03V 峰-峰值(2): 3.14V

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

测量

源 2

类型: 峰-峰值

添加测量

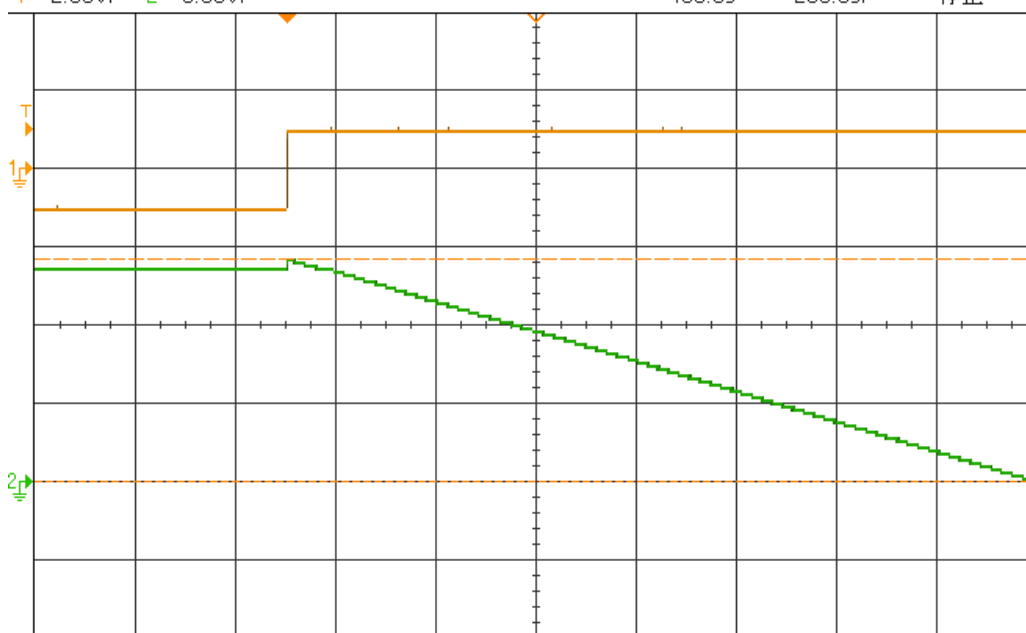
设置

清除测量值

3 直流积分

DSO-X 1102G, CN58526312, Fri Dec 29 15:17:04 2023

1 2.00V/ 2 5.00V/ 496.0% 200.0%/ 停止 f 1 1.00V



相移(1→2): 无边沿 频率(1): 无边沿 峰-峰值(1): 2.04V 峰-峰值(2): 14.22V

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

采集

时基模式 标准

缩放

时间参考 居中

采集模式 平均模式

平均 2

分段采集

实验思考题

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？

集成运放的输出电压 U_o 与输入电压即同相输入端与反相输入端之间的电位差 $U_P - U_N$ 之间的关系曲线称为 **电压传输特性**，即： $U_o = f(U_P - U_N)$ 。集成运放有线性放大区域(称为线性区)和饱和区域(称为非线性区)两部分。在线性区，曲线的斜率为电压放大倍数;在非线性区，输出电压只有两种可能的情况， $+U_{om}$ 或 $-U_{om}$ 。

当差模输入电压 v_{Id} 在 $-V_{im} \sim +V_{im}$ 范围内变化时， v_o 与 v_i 之间近似为线性关系，其斜率为差模电压放大倍数 A_{vd} 。超出这个范围后，集成运放进入饱和状态，最大输出电压分别为 V_{om}^+ 、 V_{om}^- 。

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。集成运放需要工作在线性放大区，当输入电压幅值过大时会进入饱和区，此时输出的最大电压为 V_{om}^+ 、 V_{om}^- ，其具体数值和电源电压 V_{CC} 和 V_{EE} 有关。

3. 运放闭环传输特性和开环传输特性有什么区别？

开环传输特性是指在运放的反馈回路未连接时测得的输入信号与输出信号的传输比例关系。

闭环传输特性是指在运放的反馈回路连接后测得的输入信号与输出信号的传输比例关系。

开环传输特性中的运放可能由于开环增益过大而导致不稳定，容易受到噪声和干扰的影响。

闭环传输特性通过反馈回路的作用，可以提高运放的稳定性，减小对噪声和干扰的敏感度。

开环传输特性中的运放通常具有很高的带宽，但在实际应用中可能会受到稳定性和干扰的限制。

闭环传输特性中的运放的带宽通常较小，但可以通过合适的反馈网络设计来满足特定的应用需求。

4. 闭环时，运放输入输出成线性关系，输出电压会无限增大吗？为什么？

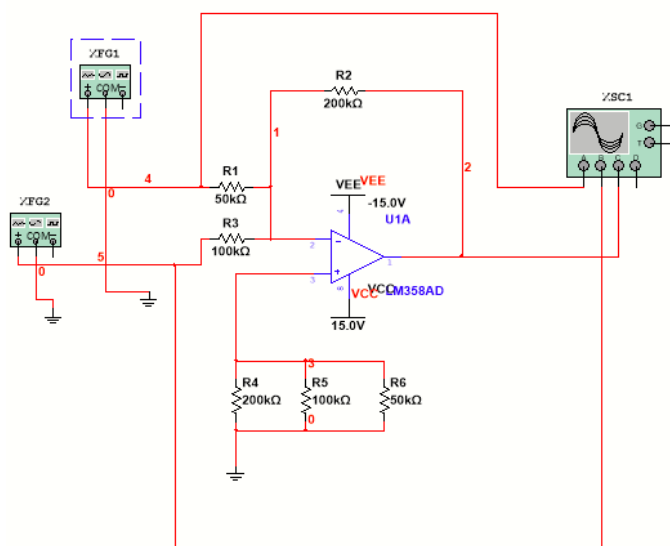
不会，理由同 2

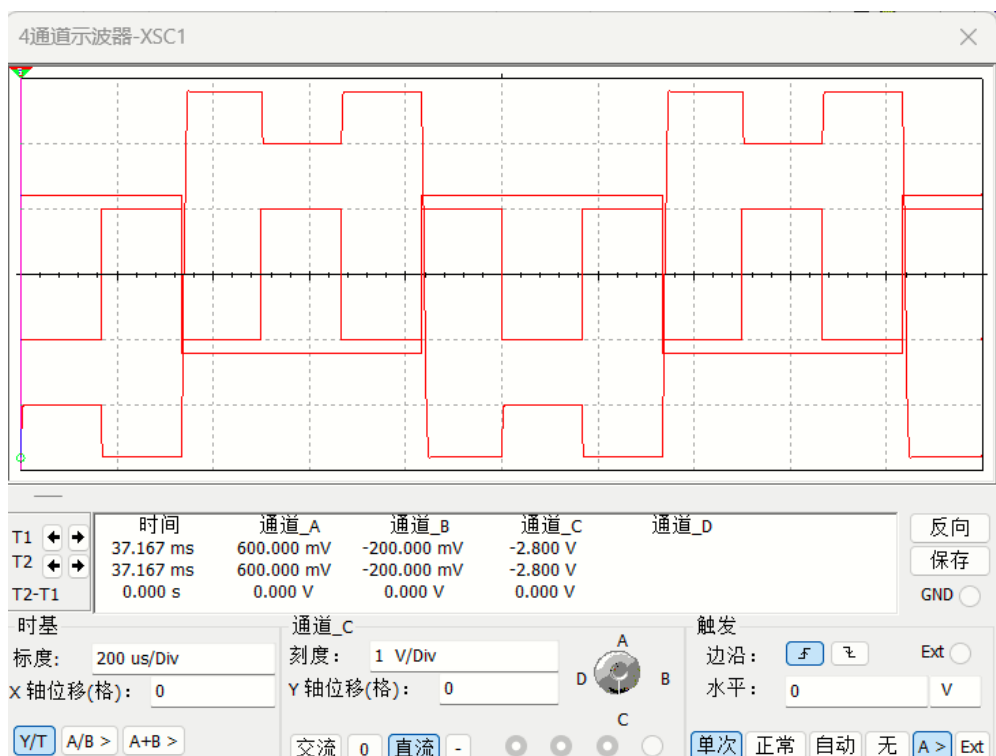
5. 在运算电路中为什么要接平衡电阻？其阻值如何确定？

为了消除输入偏置电流 I_B 对集成运放输出失调电压 V_{OO} 的影响。 R' 阻值为反向输出端外接电阻的组值。

实验拓展

1. 放大电路 $v_o = -2(2v_{s1} + v_{s2})$





$v_o = -2 \times (2 \times 0.6 - 0.2) = -2.8$, 满足要求。

实验心得

在做运放实验时，一定要检查运放电源极性是否接对，否则容易烧毁。如果用实验室稳压源供电，可以用 CH1 和 CH2 串联模式，以 CH2 的+输出端为地，则 CH2 的-输出端输出电压为-15V，CH1+输出端输出电压为+15V。同时要注意调节限流值，限流不能太小，可以放在 1A~2A 左右。在安装运放的时候一定要小心，实验室电学实验箱插运放的孔可能也有一定问题，我第一次检查导线连接应该正确无误但是接上去之后就烧掉一个。但是我换另一个座，平移过去却是没有问题的。

在计算交流信号有效值输出时，如果输入的交流信号不止一个，那么在计算输出的有效值时不能直接带入线性的公式，而是应该用向量模去算，也就是各项平方和开根号。表达式最前面的正负通过相位体现。