

Lab7 集成运放电路

课程名称：电路与电子技术实验I

日期：2023.12.25

地点：东3-406

指导教师：姚纓英

实验目的

- 1. 学习集成运放芯片的使用方法以及输入输出电路。
- 2. 学会使用运放电路连接加减法电路，积分电路等运算电路。
- 3. 学习选择适当电路参数。

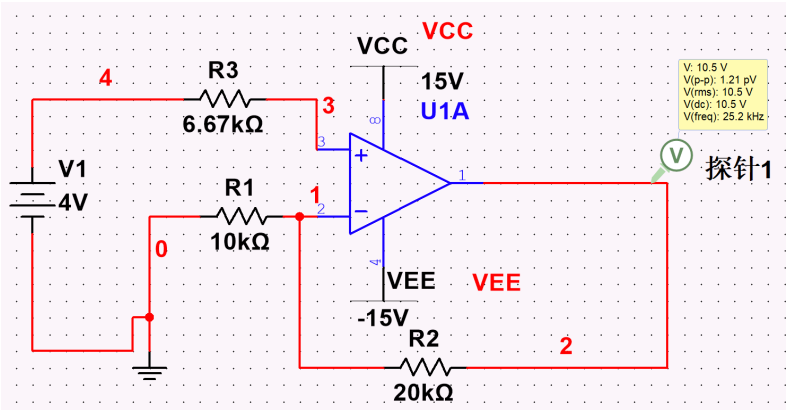
实验仪器

- 1. 运放芯片LM358.
- 2. 直流稳压源。
- 3. 导线，实验箱内电阻。

Part1: 实现同相比例运算

实验方法

- 1. 先将运放器作为电压跟随器使用，检查芯片的完好性。
- 2. 连接电路为下图。



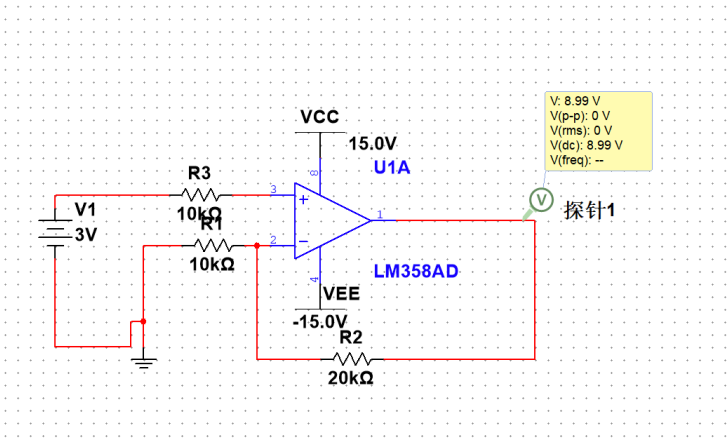
理论计算

由于1，3脚在负反馈过程中有虚短和虚短的性质，因此，输入电压与输出电压的关系有：

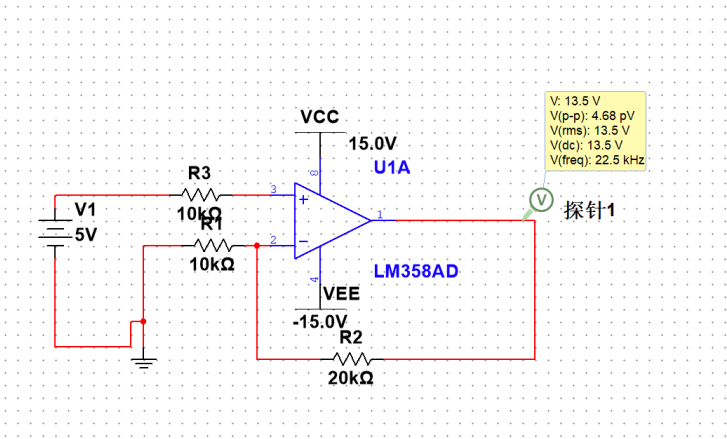
$$\dot{A}_f = \frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{20k}{10k} = 3$$

实验仿真

1. 当电路输入3V时，输出8.99V≈9V。



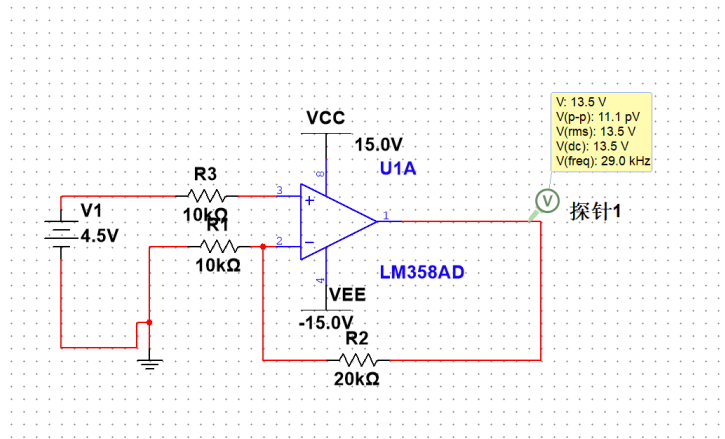
2. 当电路输入5V时，输出13.5V，不满足3倍输出。



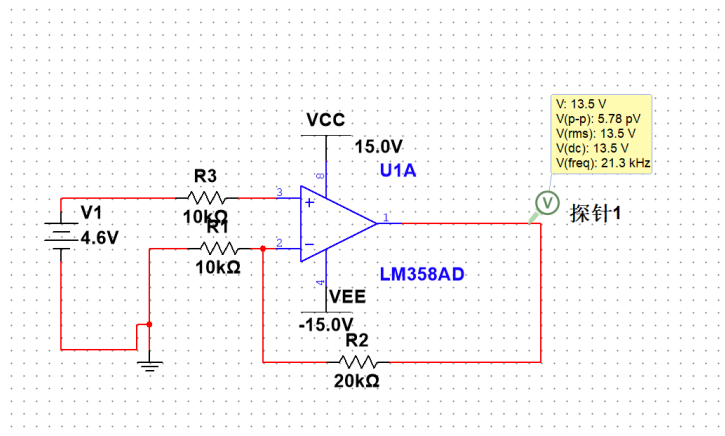
V _{OH}	High-level output voltage	R _L ≥ 2 kΩ		25°C	V _{CC} - 1.5		V _{CC} - 1.5		V
		R _L ≥ 10 kΩ		25°C					
		V _{CC} = MAX	R _L = 2 kΩ	Full range	26		26		
			R _L ≥ 10 kΩ	Full range	27	28	27	28	

可以看到，输出电压的最高值不高于V_{CC}-1.5V。

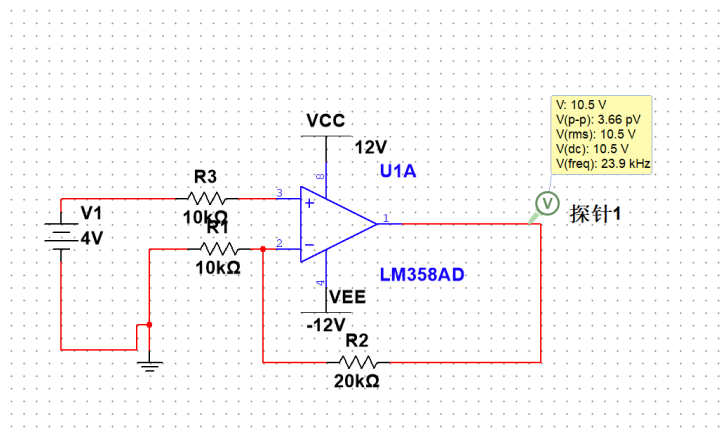
3. 当输入4.5V时仍然满足3倍的输出。



但当4.6V时，输出电压被限制在13.5V



4. 调整 V_{CC} 电压，输出电压被限制在 $V_{CC} - 1.5V = 10.5V$

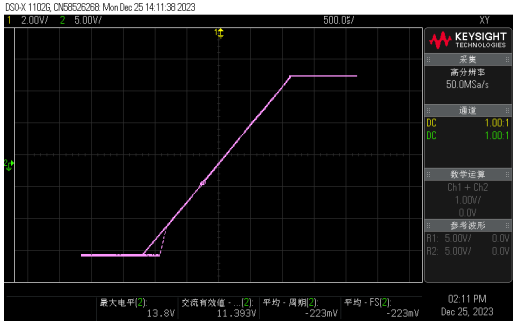


实际测量

V_{irms}/V	输入电压性质	V_{orms}/V	输出电压性质	V_o/V_i	示波器图示
1.02	正弦1kHz	3.03	正弦	2.97	
5.07	正弦1kHz	11.93	正弦, $V_{max}=14.8$	2.35	
3.26	正弦1kHz	9.721	正弦, $V_{max}=14.4, V_{min}=-14.6$	2.98	
0	(-)0.9mV(+)0mV	0	2.1mV的输出电压	/	/
1.1	DC	3.28	DC	2.98	/
5.1	DC	14	DC	2.75	/
5.3	DC	14.4	DC	2.72	/
6	DC	14.8	DC	2.47	/

3.26V的有效输出电压时，刚刚好满足正弦波两端电压均不失真。可以得到失真电压此时为14.5V左右。

通过李萨如图像（CH1: V_i , CH2: V_o ）



得到一段两端有截止电压的输入输出图像，直线部分，输出斜率约为3。

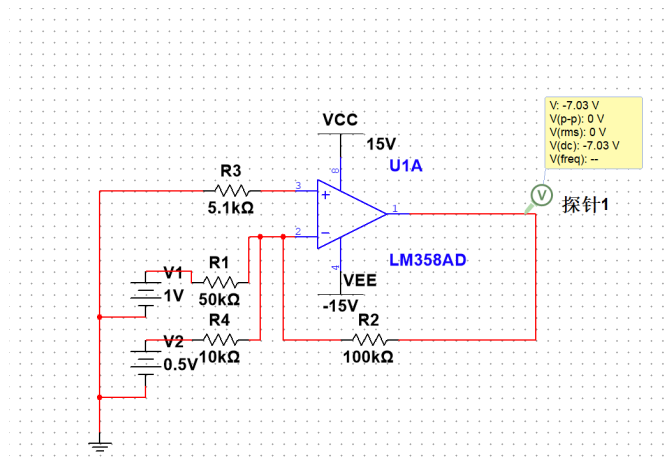
结果分析

- 输出电压有一定的限度，通过放大比例，可以倒推输入电压的限制范围。仿真中的最大输出电压为 $V_{CC}-1.5V$ ，实际上的输出电压约比这个大，但是不超过输入电压。
- 当输入电压为0，两端共地接法的时候，可以看到，输入电压并非理想的0V，也有一定的输出电压。

Part2：实现两个信号的反相加法运算

实验方法

- 连接电路如下图。满足 $V_o = -2V_1 - 10V_2$ 。



2. 调整输入电压，观察输出电压。

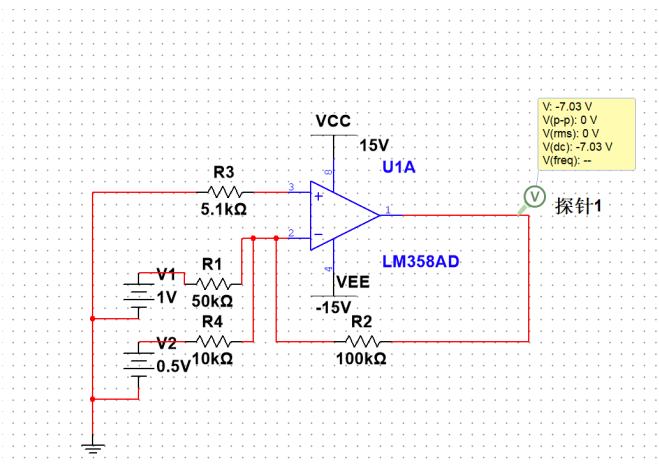
理论计算

对于反向加法器，根据虚短虚断的性质，计算如下

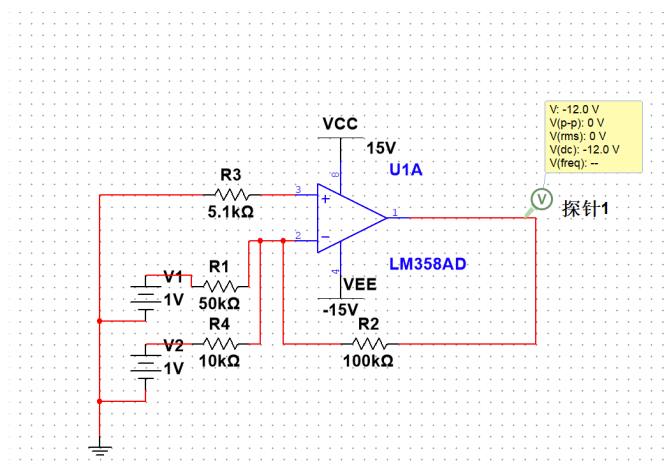
$$V_o = -\left(\frac{R_2}{R_{11}}V_1 + \frac{R_2}{R_{12}}V_2\right) = -\left(\frac{100k}{50k}V_1 + \frac{100k}{10k}V_2\right) = -2V_1 - 10V_2$$

实验仿真

1. 功能验证，当输入 $V_1 = 1V$, $V_2 = 0.5V$ 时，输出 $-7.03V \approx -2 \times 1 - 10 \times 0.5 = -7V$

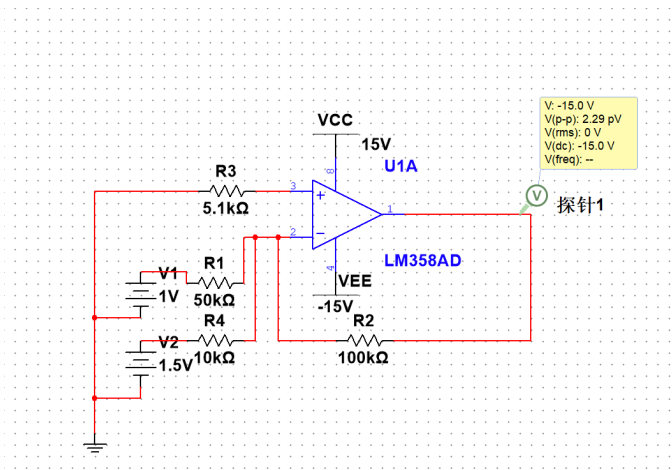


当输入 $V_1 = 1V$, $V_2 = 1V$ 时，输出 $-12V \approx -2 \times 1 - 10 \times 1 = -12V$



2. 超出输出限制。

$-1 \times 2 - 1.5 \times 10 = -17V < -15V$ ，输出15V。



实际测量

V ₁ /V	输入波性质	V _{2rms} /V	输入波性质	V _o	示波器图示
1V _{rms}	sin 1kHz	0.5V _{rms}	1kHz	7.112V _{rms}	
1V _{rms}	sin 1kHz	1V _{rms}	1kHz	V _{max} =14.5V,V _{min} =-15.1V	
3.5V _{pp}	sin 1kHz	2V _{pp}	1kHz	V _{max} =14.3V,V _{min} =-14.3V	
6V _{pp}	sin 1kHz	0.4V _{pp}	3kHz	两个正弦波叠加	

后用示波器进行检验，使用 Math 叠加[sin 1kHz, 12Vpp]和[sin 3kHz, 4Vpp]。可知，满足输出 $V_o = -2V_1 - 10V_2$ 。

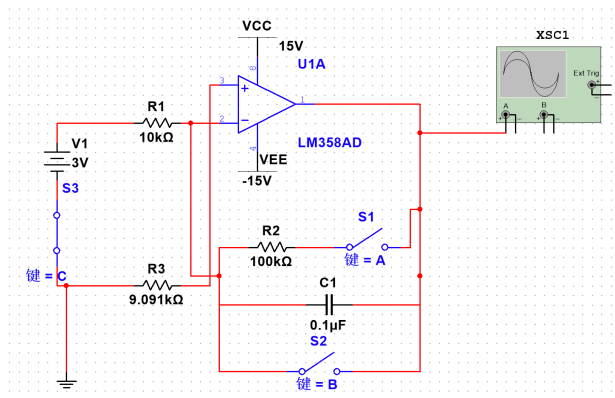
结果分析

输出电压有一定的范围，同上，不超过V_{CC}，因此可以倒推回去输入电压的范围。

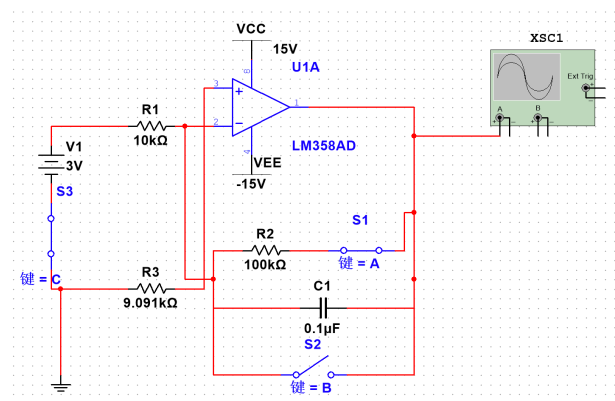
Part3：实现积分运算与波形变换

实验方法

1. 连接积分电路为下图。



2. 保持S1，S3打开，闭合S2，使电容放电。后打开S2，闭合S3，观察此时的波形变化。
3. 闭合S1，将电路连接成负反馈电路，从而实现波形变换电路。



4. S3打开，闭合S2，使电容放电。后打开S2，闭合S3，观察此时的波形变化。

理论计算

积分器原理计算，根据虚短虚断的原则

$$i_C = i_i = v_s / R_1$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{C} \int i_C dt + v_o(0) = -\frac{1}{RC} \int v_s dt + v_o(0)$$

∴ 输入直流电源时，由于*i*不变，理论上应该输出一条直线。

波形转换器，联入并联在电容两端的电阻，进行负反馈平衡，减小失调电压与失调电流对电路造成的影响，避免积分漂移。

$$V_i = IR + V_{OS} - I_{b+}R_r$$

$$I = \frac{V_i}{R} - \frac{V_{OS}}{R} + I_{b+} \frac{R_r}{R}$$

$$V_o = V_{OS} - I_{b+}R_r - V_C$$

$$V_o = -\frac{1}{C} \int (I - I_{b-}) dt + V_{OS} - I_{b+}R_r$$

$$= -\frac{1}{RC} \int V_i dt + \frac{1}{RC} \int V_{OS} dt + \frac{1}{C} \int (I_{b-} - \frac{R_r}{R} I_{b+}) dt + V_{OS} - I_{b+}R_r$$

∴ 蓝色部分表示失调电压与失调电流对积分电路的影响，随着时间累积使得积分曲线发生偏移。

加入电阻后对波形转换器电路进行理论计算：

$$\because v_i/R_1 = -v_o/R_2 - C \frac{dv_o}{dt}$$

$$v_o = -\frac{R_2 v_i}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{R_2 C}})$$

$$\tau = R_2 C$$

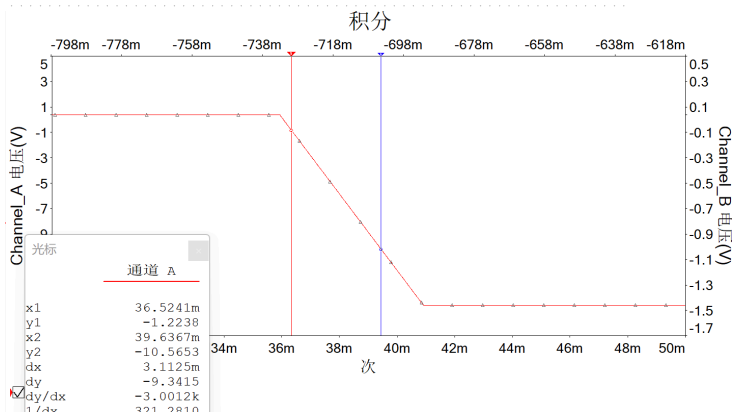
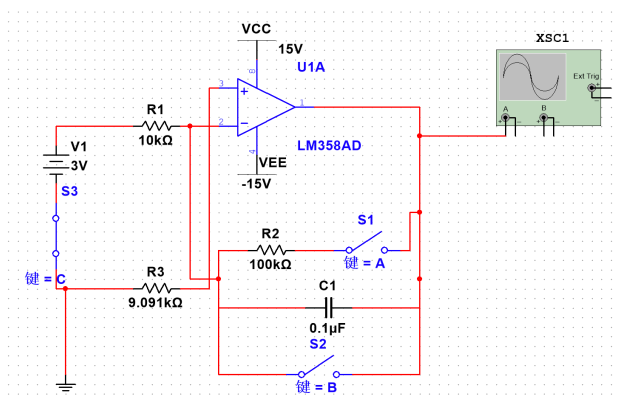
$$\text{当方波频率很大, 即 } T \ll \tau \text{ 时, } V_{opp} = \frac{V_{ip} T / 2}{R_1 C}$$

$$\text{当输入正弦波时, } v_o = \frac{1}{RC\omega} V_{im} \cos \omega t$$

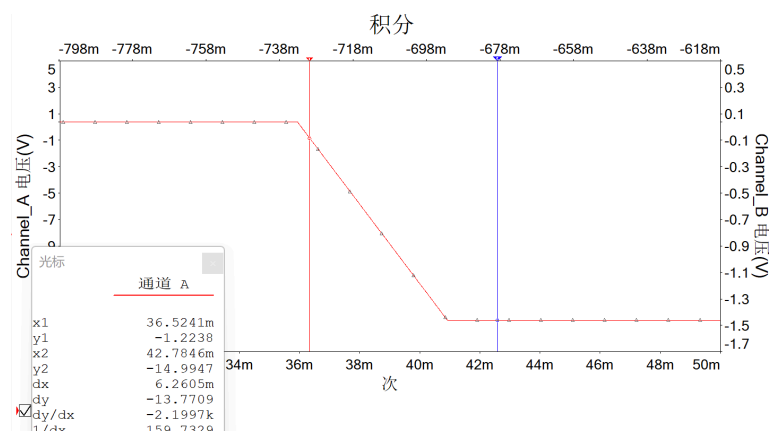
可以得知, 加上电阻以后, 具体的波形将与 $R_2 C$ 的值相关。

实验仿真

1. 积分运算电路仿真



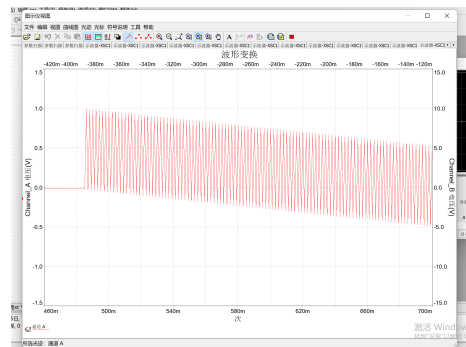
根据理论计算, 直线的斜率应为 $k = -\frac{V_s}{R_1 C} = -3.0 \times 10^3$, 右图计算得

$$k = \frac{-10.5653 - (-1.2238)}{39.6367 - 36.5241} \times 10^3 = -2.9 \times 10^3$$


发现，当输出电压达到截止电压约为15V时，变为直线。

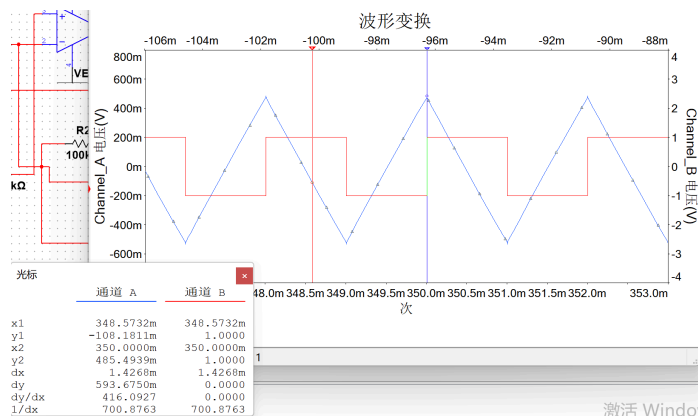
2. 波形转换器

当未联入负反馈上的电阻时，输入方波信号，可以看到，虽然方波信号被积分为三角波，输出电压的平均值呈一条直线缓慢下降，证明失调电压与失调电流对结果的影响。

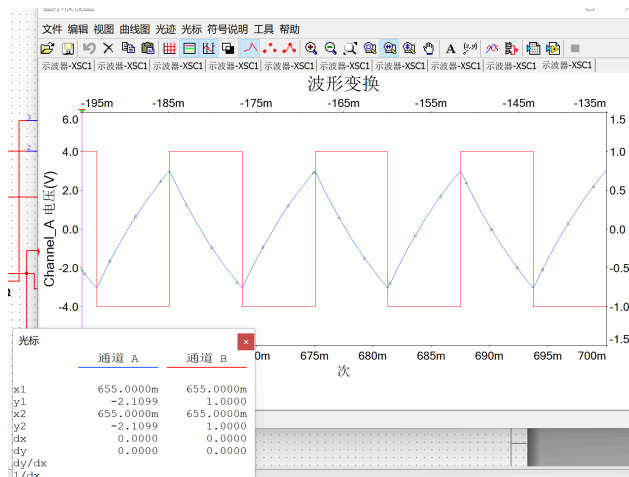


联入负反馈上的电阻以后，根据理论计算， $\tau = R_f C = 0.01s$, $f_0 = 100Hz$, $V_{opp} = 1V$

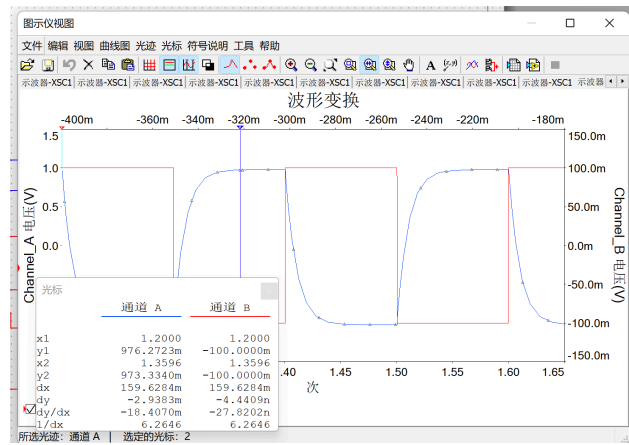
- 情况一：当输入频率 $F = 500Hz \gg f_0$ ，输出三角波 $V_{pp} \approx 1V$ 。



- 情况二：当输入频率 $F = 80Hz \approx f_0$ ，输出三角波 $V_{pp} \approx 1V$ 。输出波形的直线形不好，此时 $1 - e^{-\frac{t}{R_2 C}}$ 无法 $\approx \frac{t}{R_2 C}$ ，输出曲线为指数型。

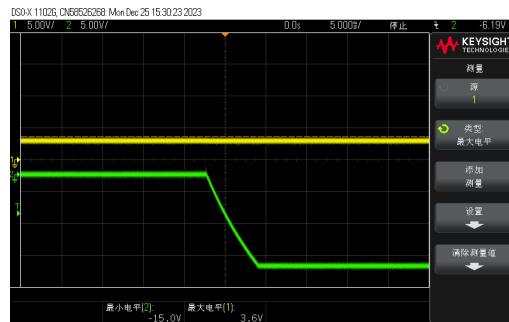


- 情况二：当输入频率 $F = 5Hz \ll f_0$ ，输出三角波 $V_{pp} \approx 1V$ 。输出波形的直线形不好，此时 $1 - e^{-\frac{t}{R_2 C}}$ 无法 $\approx \frac{t}{R_2 C}$ ，输出曲线为一阶电路达到稳定状态时的图像。此时输出电压 $V_{om} = -\frac{R_f}{R_1} V_i = -1V$ 。理论与仿真结果相似。

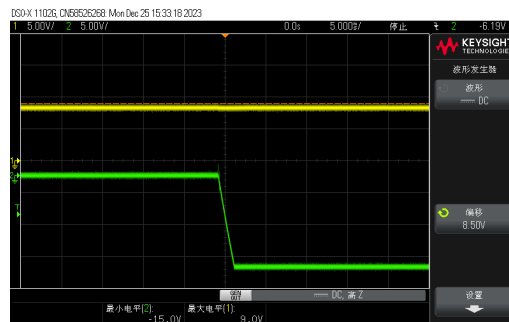


实际测量

1. 输入直流电压，利用示波器 Single 模式，捕捉瞬间变化。
3.6V时，输出波形为绿色图所示。

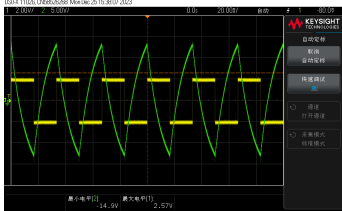
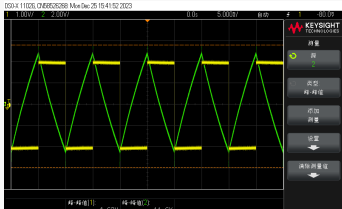
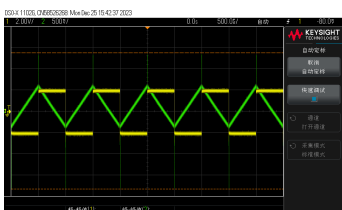


9V时，输出波形以更快的速度到饱和电压。



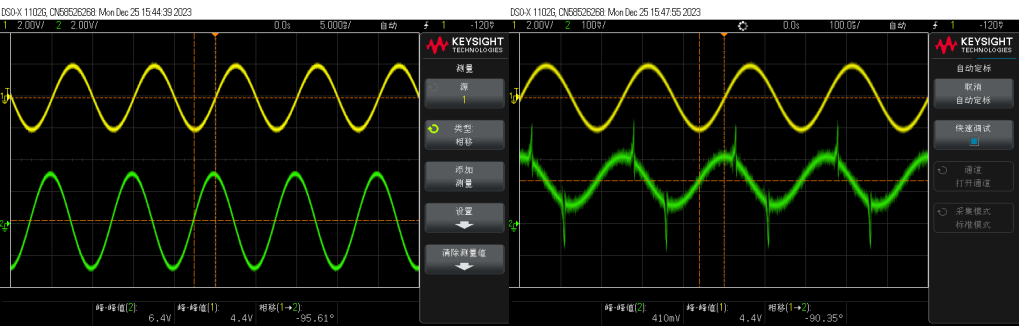
2. 输入方波

$$C = 0.1\mu F, R_f = 100k\Omega, \tau = R_f C = 0.01S, f = 1/\tau = 100Hz$$

V_{ipp}/V	f/Hz	输入频率特征	V_{opp}	输出图样
4vpp	30Hz	$f \ll f_0$	/	
4vpp	100Hz	$f \approx f_0$	11.6V	
4vpp	100kHz	$f \gg f_0$	3.2V	

可以看到，频率越大，输出的三角波的直线形更好，而频率越小，越像电容放电充电曲线。

3. 输入正弦波



f	V_{ipp}	V_{opp}	$\Delta\varphi$	A
100Hz	4.4V	6.4V	$\approx -90^\circ$	1.46
4kHz	4.4mV	0.41V	$\approx -90^\circ$	/

理论上，当输入频率为100Hz时，输出幅值增加倍数为： $A_f = \frac{1}{RC\omega} = 1.59$ ，可以看到，最终输出波形与理论值基本相似。

由于运放器GWB与SR的限制，我们可以计算频率的限制值：

$$\text{运放器的 } GWB = 0.7MHz, SR = 3V/\mu S.$$

$$\text{积分放大电路的基本放大倍数为：} 10$$

$$\therefore SR \geq 2\pi f V_{om} \therefore f_m = 238kHz$$

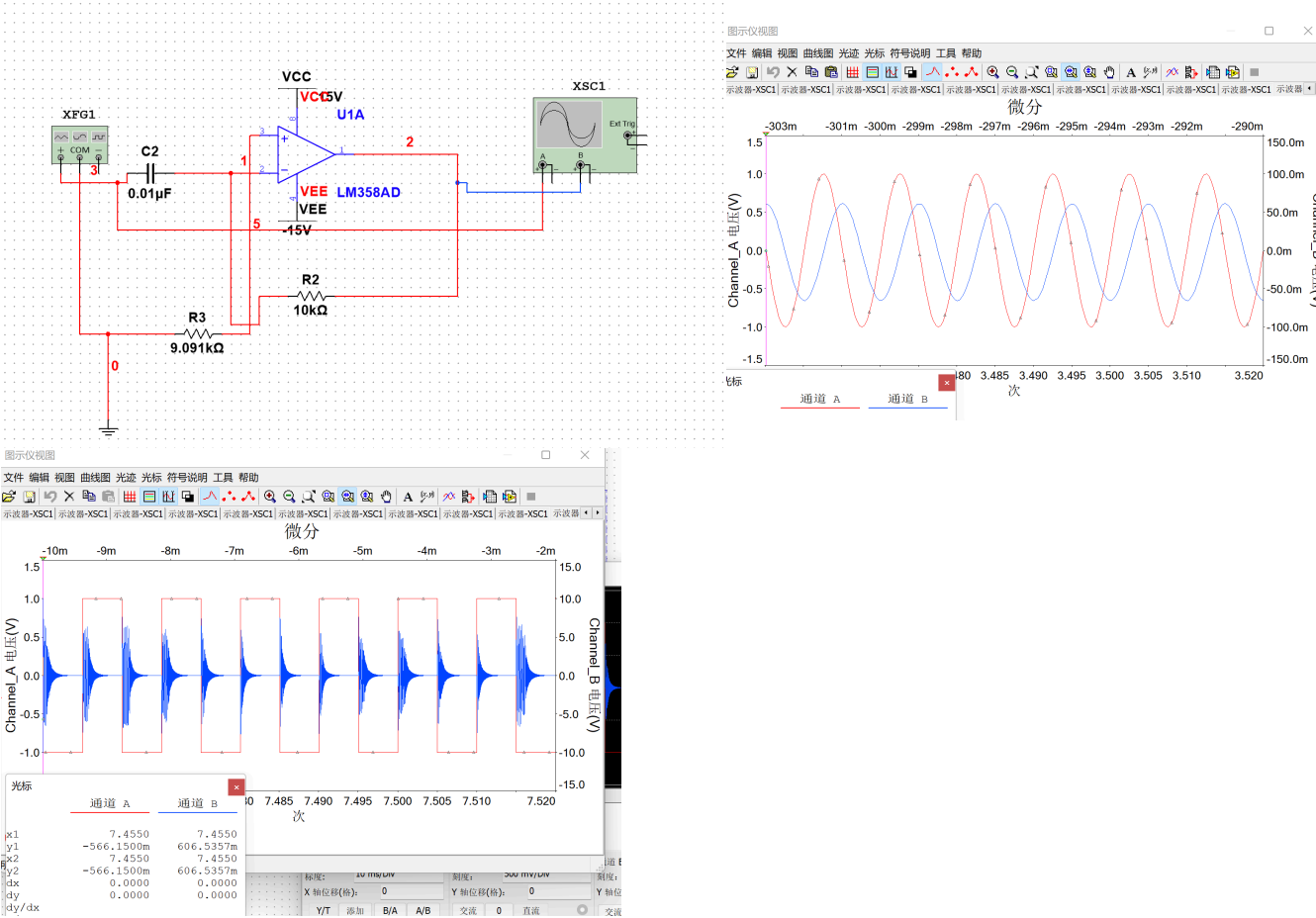
$$\therefore GWB \geq 10A \cdot f_m \therefore f_m \approx 1kHz$$

所以当f=4kHz有一个明显的毛刺在图片上。而当频率再高，这个毛刺的范围会被扩大，逐渐变成三角波。

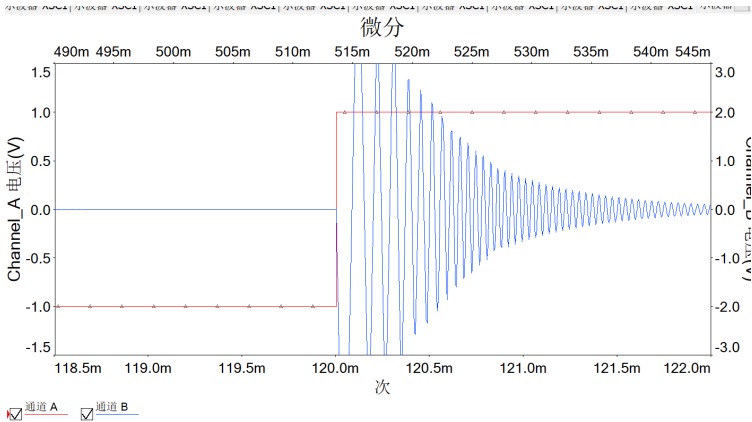
结果分析

运放电路可以将输入电压进行积分变换，变换的放大倍数与输入电阻和电容的大小有关。输入电路的频率有一定的范围，当频率过高，则输出波形会产生毛刺，而频率再过高则会变化为三角波。

Part4：微分电路



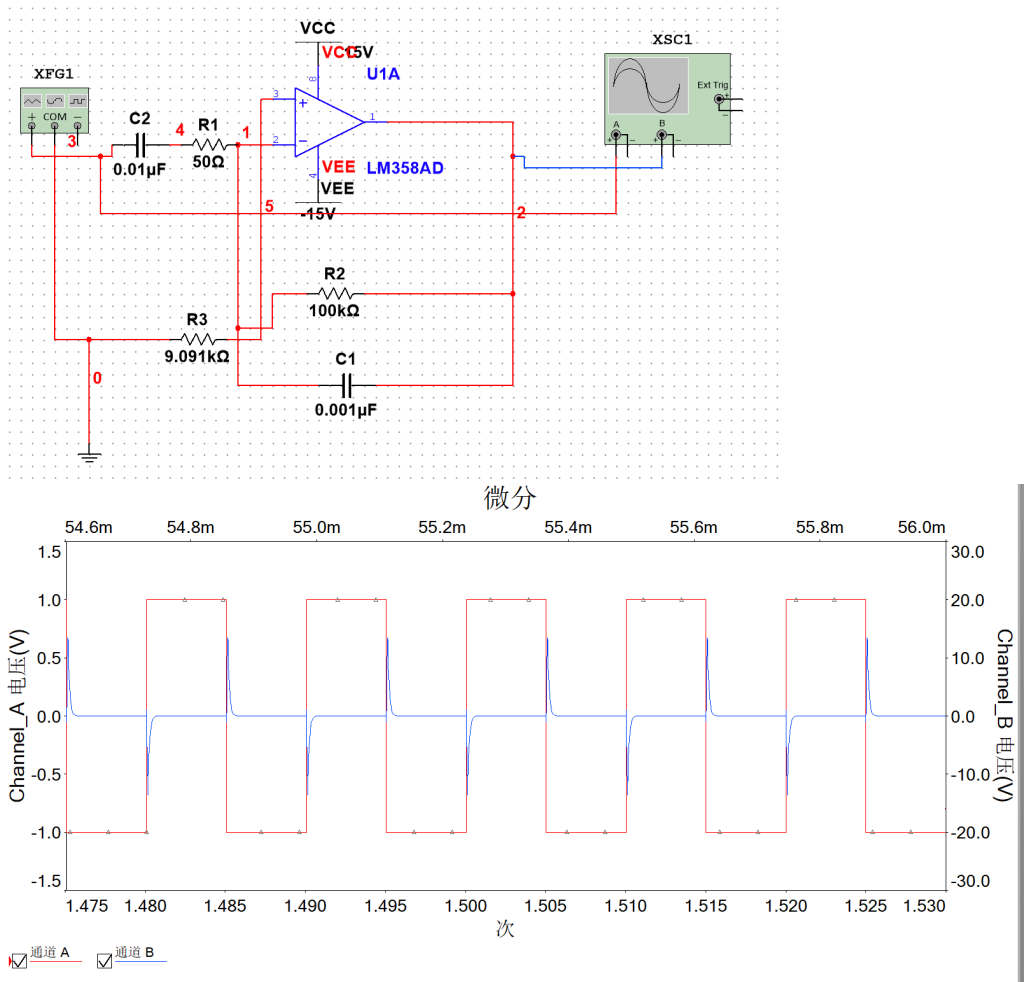
1. 采用上述基本微分电路进行仿真，发现，当输入正弦波时，输出波形为sin的反向微分，但是，激跃响应的输出波形并不理想放大输出波形后可以发现，输出的波形是一个振荡的图线。由于电路的负反馈作用，输出的幅值不断减小。



$$v_o = -i_R R = -RC \frac{dv_s}{dt}$$

理论上输出波形应该没有振荡，但是由于激励输出的频率可认为非常高，所以产生了自激振荡噪声。为了消除该噪声，采用电容，电阻进行补偿。

2. 改进后的电路如下图，当输入1kHz，1Vp的方波时，输出右下图振荡图形。



- 采用RC串联的方式，增加时间常数，使电路频带损失比原来小一些。
- C₁作为负反馈的一部分，使得负反馈的相位滞后，破坏运放自激振荡的条件。而，由于补偿的是小电容，在低频时可视为开路基本不影响电路的输出性质。