

模拟电子技术课程设计报告

姓名 林宇航

学号 201906060308

指导教师 贾立新

专业班级 自动化 1901

学 院 信息工程学院

提交日期 2021 年 6 月 7 日

一、设计题目

使用一片四运放芯片 LM324 组成电路框图如图 1 所示。实现下述功能：

- (1) 设计三角波发生器产生如图 2 所示的信号 v_2 ， v_2 波形，峰-峰值为 4V， $f=2000\text{Hz}$ ；
- (2) 使用低频信号发生器产生 $v_1=0.1\sin 1000\pi t$ (V) 的正弦波信号，通过加法器实现输出电压 $v_3=10v_1+v_2$ ，
- (3) v_3 经选频滤波器滤除 v_2 频率分量，选出 500Hz 正弦信号，要求正弦信号峰-峰值等于 9V，用示波器观测无明显失真。
- (4) 电源只能采用 +12V 单电源。要求预留 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 的测试端口。

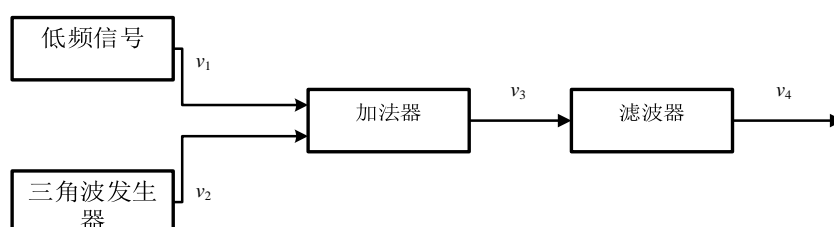


图 1

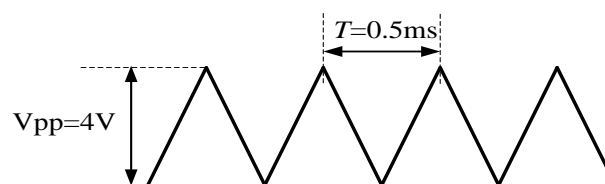


图 2

二、单元电路设计

1. 三角波发生器电路

(1) 电路设计与参数计算

三角波发生器电路原理图如图 3 所示。该电路由电压比较器和积分电路两部分组成，运放 U1A 组成同相迟滞比较器，设其上、下门限电压分别为 V_{T-} 和 V_{T+} 。运放 U1B 构成积分器。 v_{10} 是低电平 v_{oL} 约为 0V、高电平 v_{oH} 约为 11V (运放在 12V 单电源供电时的最大输出电压) 的方波。 v_{10} 经过积分电路以后得到三角波 v_2 。 v_{10} 和 v_2 的对应关系如图 4、5 所示。运放采用单电源供电，U1A 反相输入端和同相输入端加 V_{REF} 的偏置，调节 V_{REF} ，可以调节三角波上升沿和下降沿的斜率，为了使三角波左右称， V_{REF} 应设为 $(V_{oH} - V_{oL})/2 \approx 5.5V$ 。

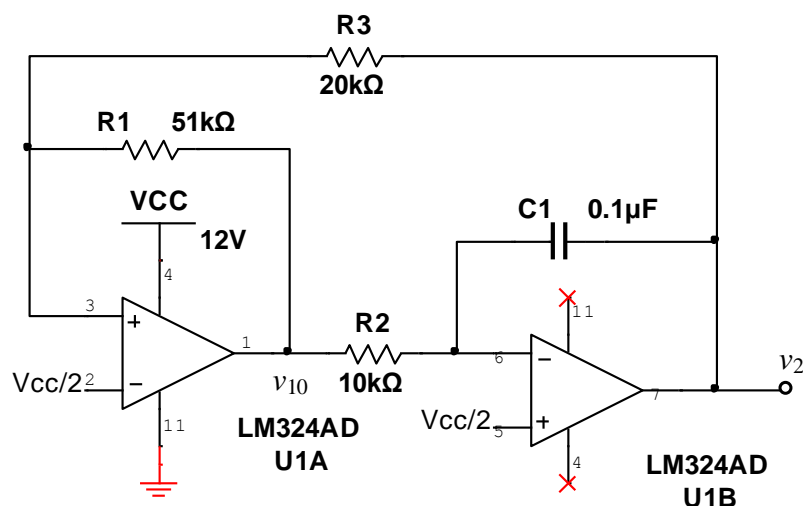


图 3

三角波发生器电路如图 3，在 v_{10} 处输出方波，在 v_2 处输出三角波，如图 4。

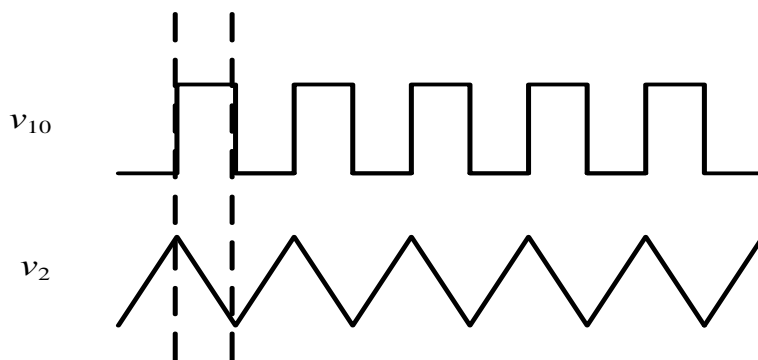


图 4

当 v_{10} 为 0V， v_2 增加到使 U1A 的同相输入端电压等于+6V 时的值为 V_{T+} 。

当 v_{10} 输出低电平 V_{oL} (约 0V)时，积分电路处于放电状态，电容 C1 的放电电流 $i_1 = (V_{REF} - V_{oL})/R_3$ ，方向从右至左， v_2 随时间增加， v_2 增加到使运放 U1A 的同相输入端电位 v_i' 等于反相器输入端电位 V_{REF} 时的值即为 V_{T+} 。忽略运放 U1A 的输入电流，则计算 V_{T+} 的等效电路如图 5 所示，由图 5 可得

$$\frac{V_{T+} - 0V}{R_1 + R_2} \times R_2 = 5.5V$$

$$V_{T+} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times 5.5V$$

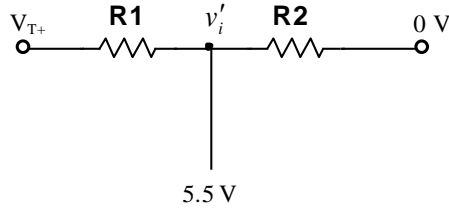


图 5

当 v_{10} 输出高电平 V_{oH} (约 11V)时, 积分电路处于充电状态, 电容 C1 的充电电流 $i_1 = (V_{oH} - V_{REF}) / R_3$, 方向从右至左, v_2 随时间减小, v_2 减小到使运放 A1 的同相输入端电位 v'_i 等于反相器输入端电位 V_{REF} 时的值即为 V_{T+} 。忽略运放 A1 的输入电流, 则计算 V_{T+} 的等效电路如图 6 所示, 由图 6 可得

$$\frac{V_{T-} - 11V}{R_1 + R_2} \times R_2 + 11V = 5.5V$$

$$V_{T+} = 11V - (1 + \frac{R_1}{R_2}) \times 5.5V$$

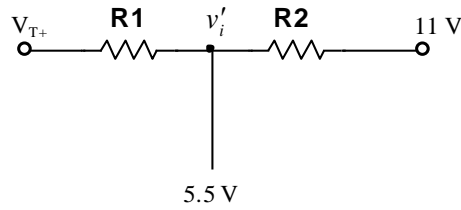


图 6

$$\text{三角波 } v_2 \text{ 的峰峰值 } V_{pp} = V_{T+} - V_{T-} = \frac{R_1}{R_2} \times 11V$$

三角波的周期为积分电路充电和放电时间之和:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{CV_{pp}}{i_1} + \frac{CV_{pp}}{i_2} = \left(\frac{R_3}{10.5-6} + \frac{R_3}{6} \right) \times CV_{pp} = \frac{49}{12} \times \frac{CR_1R_3}{R_2}$$

取 $C = 0.1\mu F$, $R_1 = 20k\Omega$ 根据上两式得到:

$$R_3 = \frac{3R_2}{16fC3R_1} = 2.46k\Omega \quad R_2 = 52.5k\Omega$$

考虑到元器件的参数误差, 三角波的幅值和频率与设计值之间会有一定的误差, 可将 R1 和 R3 分别用固定电阻和电位器串联代替。

(2) 电路仿真

仿真电路如图 8, 仿真结果如图 9

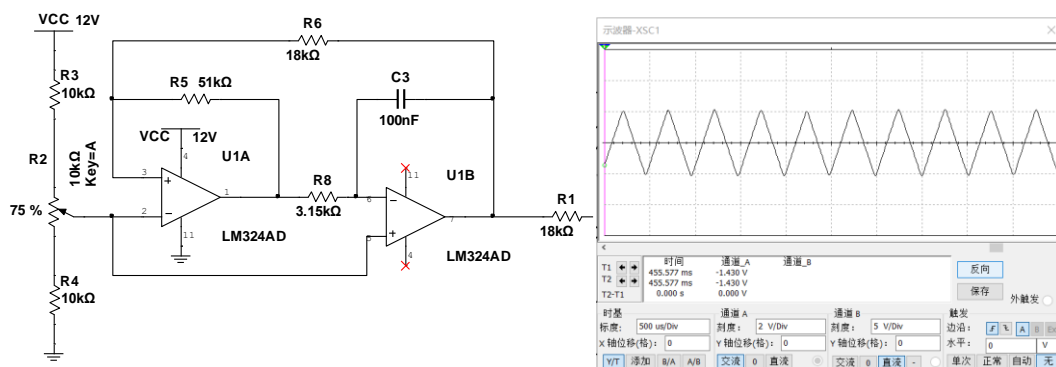


图 7

图 8

由仿真结果可知，三角波峰峰值达到 4V，频率达到 2kHz，非常符合设计要求。

2.2 加法器电路

(1) 电路设计与参数计算

反向加法器电路如图 10 根据题目要求， $v_3 = 10v_1 + v_2$ ，其电阻选取如下： $R_{11} = 10k\Omega$ ， $R_9 = 1k\Omega$ ， $R_{10} = 10k\Omega$ 。同时由于三角波有直流分量，不滤除加法电路无法正常工作，所以要选取合适的电容滤除，电容电阻串联可以看成是一个高通滤波器，它的截止频率的计算为 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ ， v_1 频率 500Hz， v_2 频率 2kHz，经计算得 C_4 取 10uF， C_5 取 0.33uF。

(2) 电路仿真

仿真电路如图 9，结果如图 10，11，12

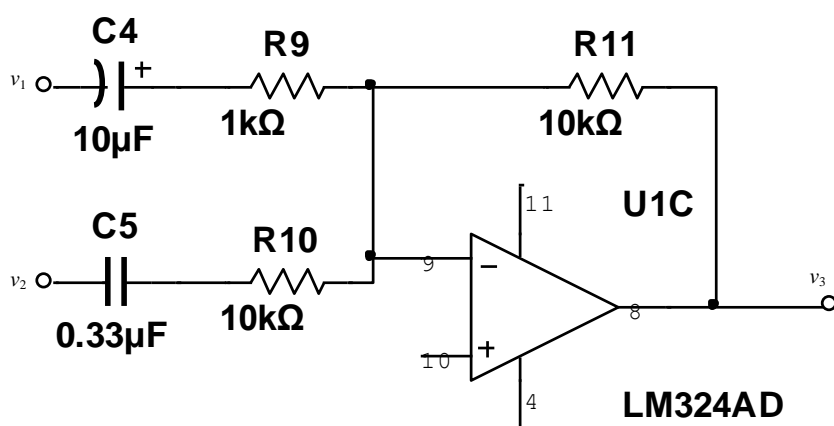


图 9

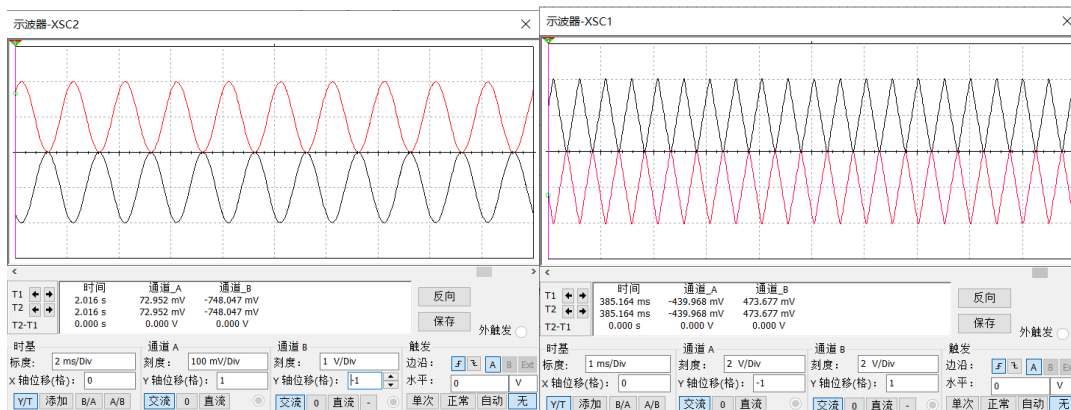


图 10 单正弦波输入的输出结果（红色为输入

图 11 单三角波输入的输出结果

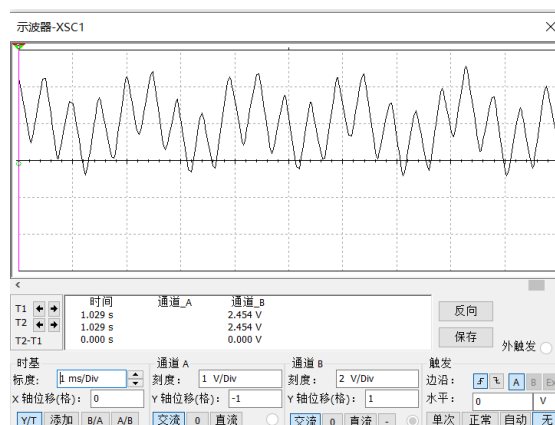


图 12 正弦波与三角波叠加波形图

2.3 滤波器电路设计

(1) 电路设计与参数计算

滤波器电路如图 12，采用低通滤波器，截止频率选 500Hz，为了使正弦信号的峰峰值达到 9 伏，增益选为 4.5。 Q 选 0.707。

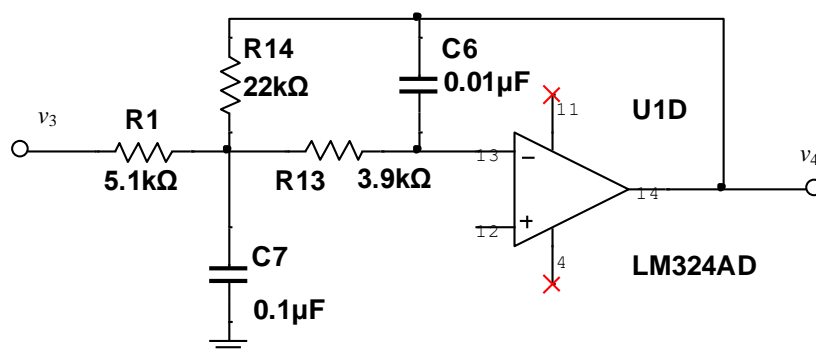


图 13 低通滤波器原理图

选 $C_6 = 0.01\mu F$

$$R_0 = \frac{1}{2\pi f_H C_5} = \frac{1}{2\pi * 500 * 0.01 * 10^{-6}} = 31.8k\Omega$$

$$C_7 = 4Q^2(1 + A_0)C_5 = 4 * 0.707^2 * 5.5 * 0.01 = 0.11\mu F$$

$$R_1 = \frac{R_0}{2QA_0} = \frac{31.8}{2 * 0.707 * 4.5} = 4.99k\Omega$$

$$R_{14} = A_0 R_1 = 22.95k\Omega, \text{取标称值 } 22k\Omega$$

$$R_{13} = \frac{R_0}{2Q(1+A_0)} = \frac{31.8}{2 * 0.707 * 5.5} = 4.1k\Omega$$

(2) 电路仿真

仿真电路如图 14，仿真结果如图 15、16、17

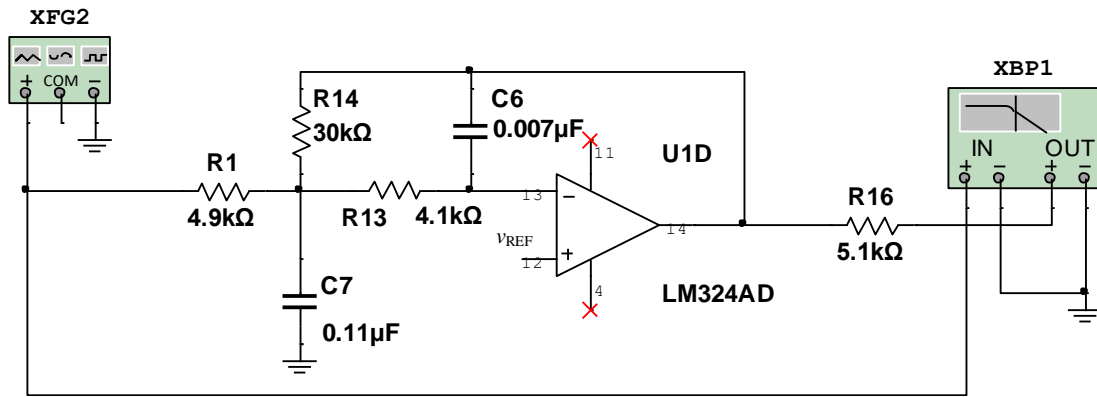


图 14 低通滤波器仿真图

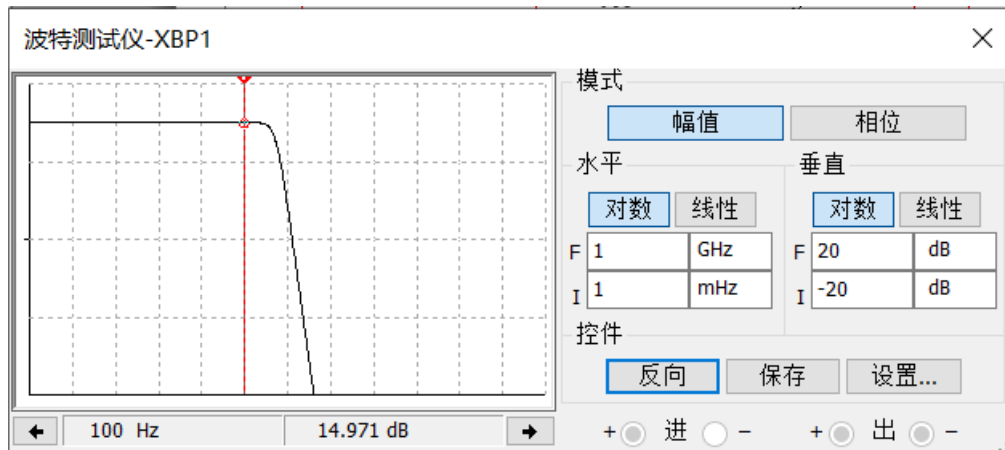


图 15 100Hz 时的增益

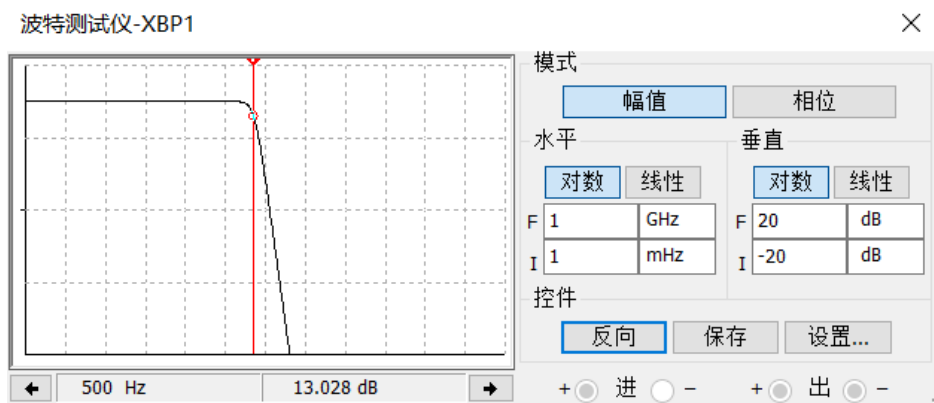


图 16 500Hz 时的增益

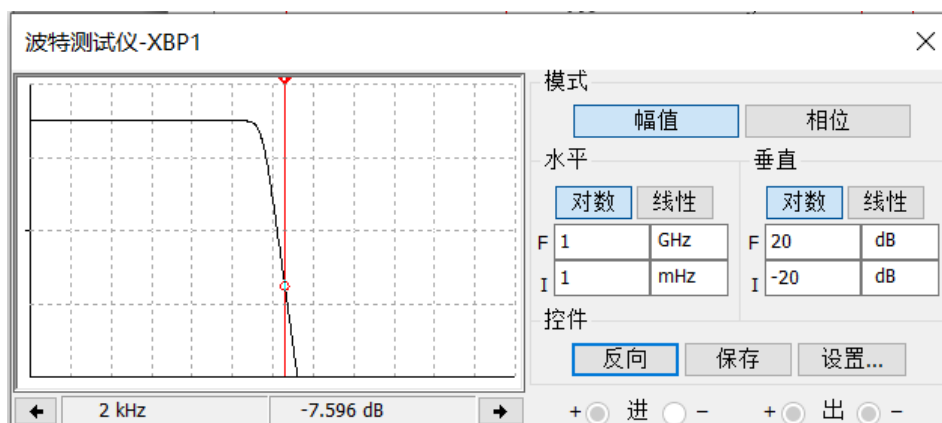


图 17 2kHz 时的增益

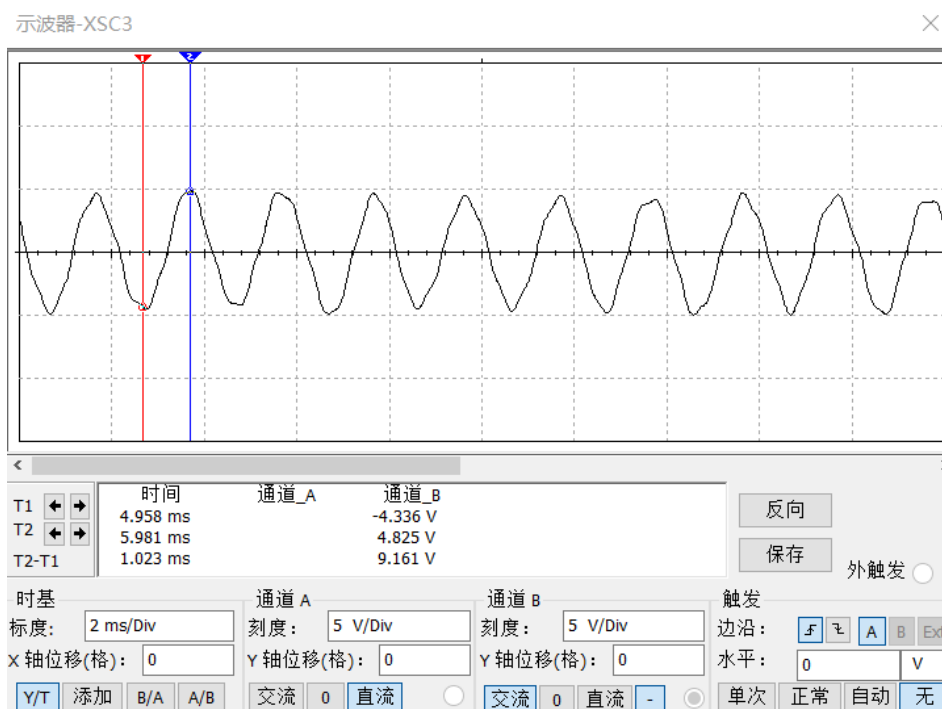


图 18 二阶低通滤波后的效果

2kHz 的增益-7.596dB, 即 0.4170, 还是太小, 不够理想, 滤波结果虽然能看出是正弦波, 但还是有一些没滤除干净。

三、实际电路连接与调试

1.测试结果记录：

(1) 三角波发生器测试结果

先调图 3 中 R1 和 R3, 使三角波峰峰值达到 4V, 再调 R2 使其频率达到 2kHz

结果如图 19, 其峰峰值 4V, 频率 2kHz, 符合设计要求。(波形中在峰值的地方有毛刺是因为芯片的响应过慢导致的)

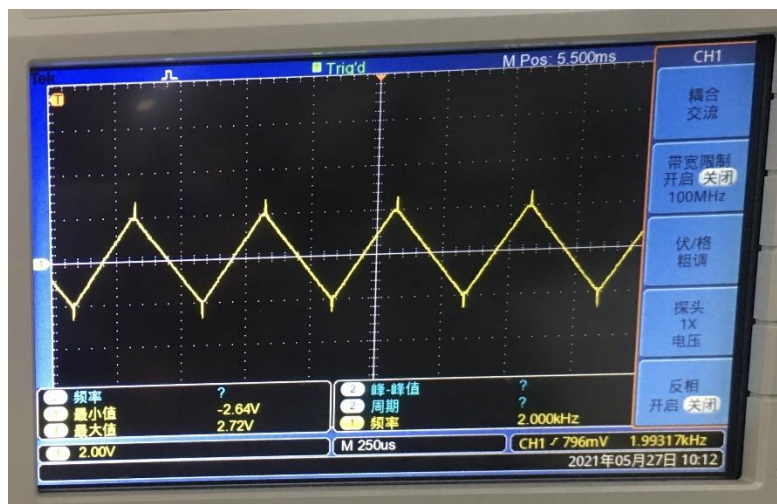


图 19

(2) 加法器测试

首先观察只加正弦波或三角波的时候, 电路有没有正常工作。

只加正弦波时, 输入峰峰值 200mV, 输出峰峰值 2.0V。

只加三角波, 输入峰峰值 4V, 输出峰峰值 4V。

可见正弦波的增益为 10, 三角波增益为 1, 符合设计要求

同时加入正弦波与三角波的波形如图 20

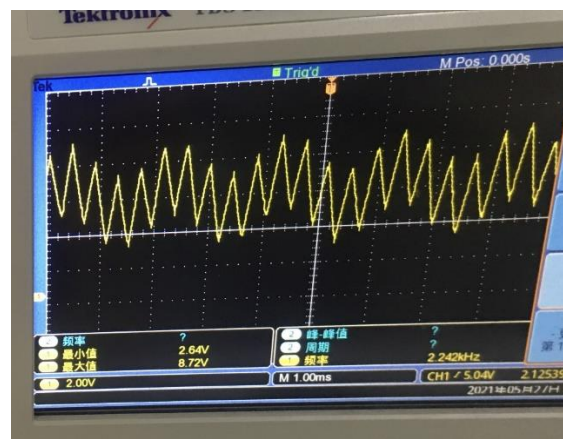


图 20

(3) 滤波器测试

断开三角波输入信号，加法器输出为含有 6V 直流偏置的正弦信号，用信号发生器产生正弦信号的频率从 100Hz 逐步增大，用示波器测量滤波器输出信号峰峰值。低通滤波器实测幅频特性如表 1 所示。

表 1 低通滤波器实际幅频特性表 ($v_{ipp}=2V$)

f/kHz	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
v_{opp}/V	8.4	8.2	8.2	7.6	6.6	5.0	4.8	4.0	3.0
f/kHz	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
v_{opp}/V	2.9	1.76	1.36	1.12	0.96	0.72	0.72	0.65	0.56

从表 1 数据可知，滤波器的实际截止频率为 400Hz 左右，分析其原因可能是因为电阻值、电容值有误差，对滤波器的频带和增益都有不同程度的影响。

将加法器的输出信号加到滤波器输出端，滤波器的输出波形如图 21 所示。

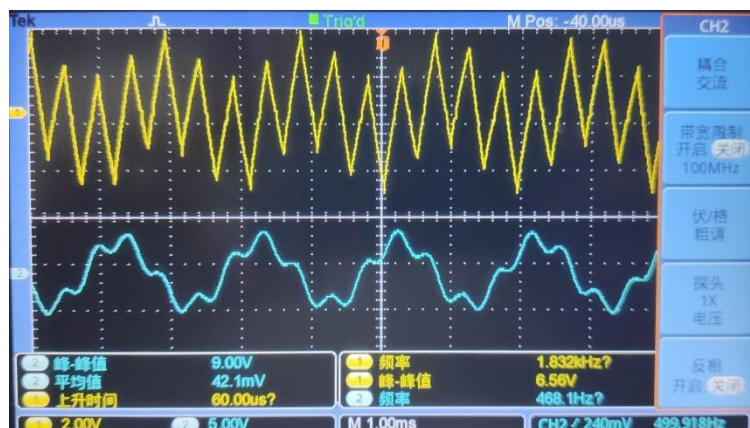


图 21

四、总结

(1) 模拟电路的设计方法

先是对自己的需求进行分析，比如产生什么波形，要滤除什么样的信号，再参考现有成熟的方案，一个模块一个模块地组合，设计出最终地原理图，然后通过仿真软件对其进行仿真，观察结果是否符合预期，最后根据仿真结果调整各个模块的参数，完成最后的设计。

(2) 运放单电源供电和双电源供电的不同之处

一般对于非降压升压芯片来说，外部供电的大小往往决定了其输出的最大值、最小值。单电源供电一般是一个正电源和地相组合，双电源供电一般是一个正电源和一个负电源组合，这就导致如果你想放大个正弦波，负半周对于单电源供电来说是达不到的，就会产生失真。所以单电源在运作时会加一个偏置电压，使波形最小值大于 0（单电源输出的最小值）。

（3）仿真对电路设计的重要作用

对于我们学习而言，仿真可以方便我们评判电路的正确性、方便调试电路不同的参数而得到不同的结果、减少在实际电路中查找问题的时间从而提高实验效率。

对于实际生活而言，就比如设计 PCB 板，让他人制作 PCB 周期相对较长，若没有仿真软件对自己画的原理图进行仿真，一点点的小错误就会拖进度，而且检测其故障原因也及其费时间，所以仿真还是很有必要的。

（4）电路调试过程中碰到故障

电路我是一部分一部分连接的，先搭好三角波发生器，调好峰峰值和频率，再搭加法电路，输出波形也挺正常，最后加上滤波电路，三角波只能说去除了一部分，效果不是很理想，但增益接近 4.5 倍，符合要求，最后决定搭一个四阶低通滤波器。

五、附加题

1. 设计四阶低通滤波器

四阶低通滤波器就是两个二阶低通滤波器串联而成，总的增益是各部分增益的乘积，总的品质因数 Q 取 0.707，查表得第一段滤波器 Q 取 0.54，第二段滤波器 Q 取 1.31，各电容电阻值与二阶计算方法相同。最后得到的原理图如图 22 所示，幅频特性见图 23、24、25，滤波效果见图 26

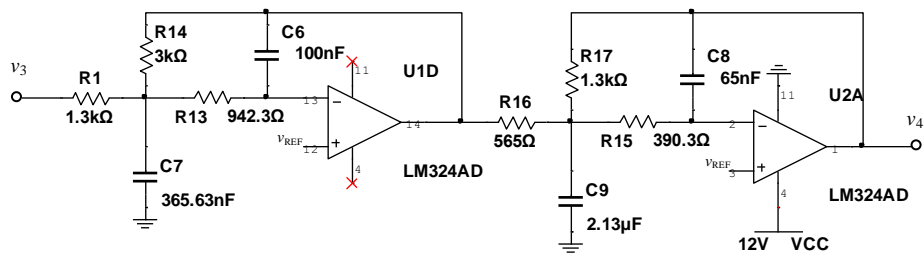


图 22 四阶低通滤波器原理图

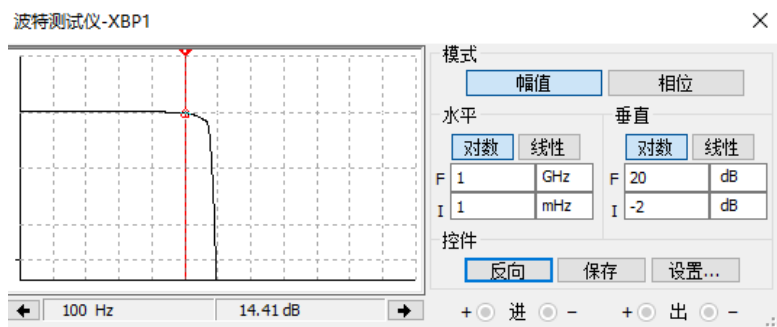


图 23 100Hz 增益

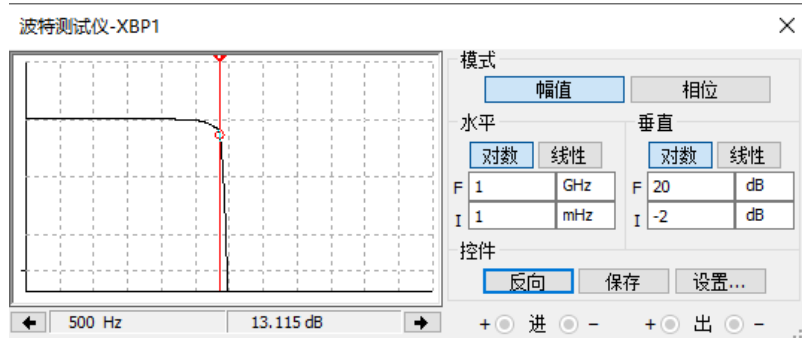


图 24 500Hz 增益

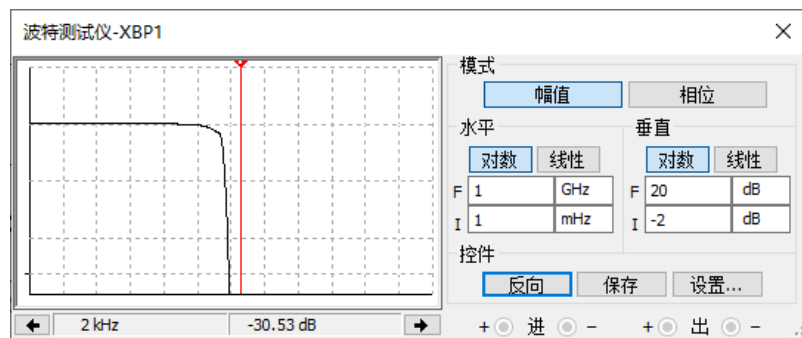


图 25 2kHz 增益

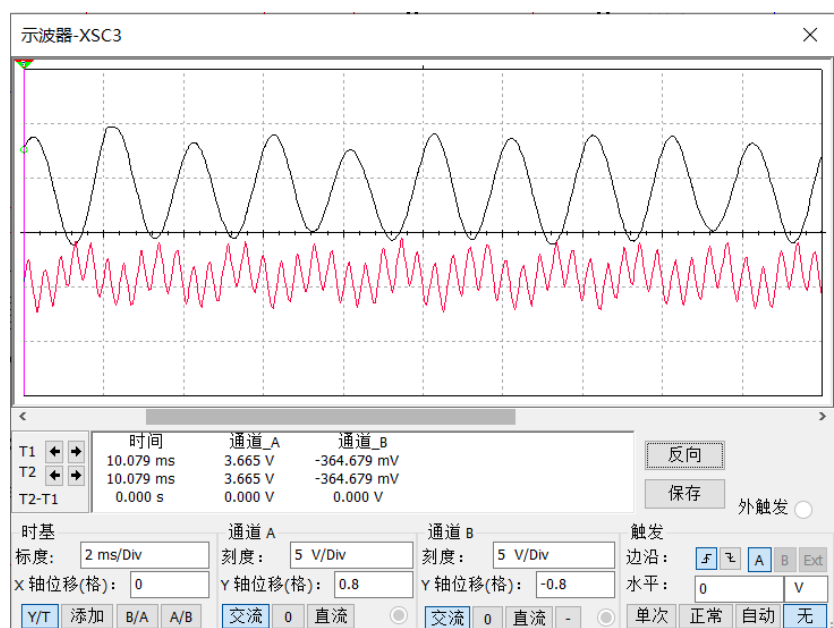


图 26 滤波效果

(实验结果图由于个人原因就没有拍, 最后结果波形与正弦波非常接近, 只是增益只有 2-3 倍。)

2. 用 LM324 运放实现如图 27 所示二阶系统

LM324 采用双电源供电。Vi 加入 0.1Hz、峰峰值为 2V 的方波信号。

用示波器观测 Vo 的波形如图 29 所示, 并通过观察波形, 二阶系统瞬态参数: 峰值时间 $t_p=87.179\text{ms}$ 、超调量 $\sigma=1.572\text{V}$ 、调节时间 $t_s=880.342\text{ms}$ 。

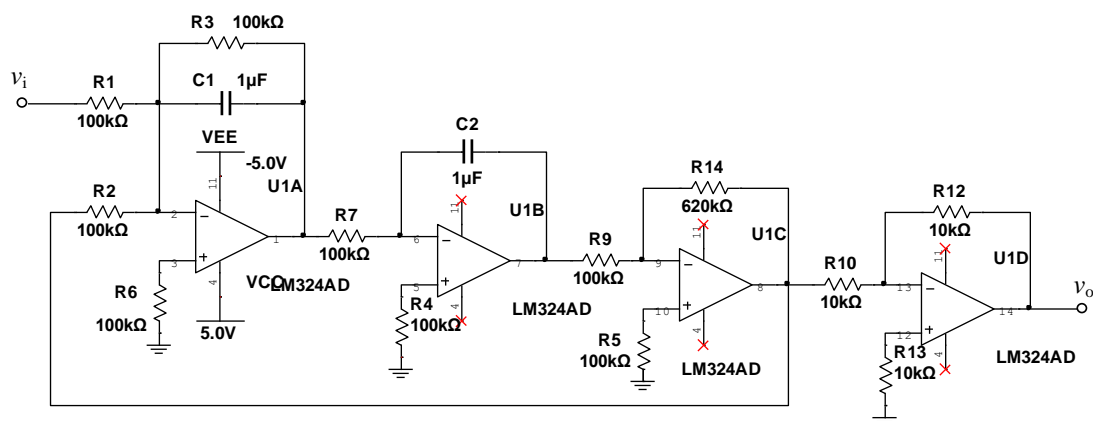


图 27 二阶系统原理图

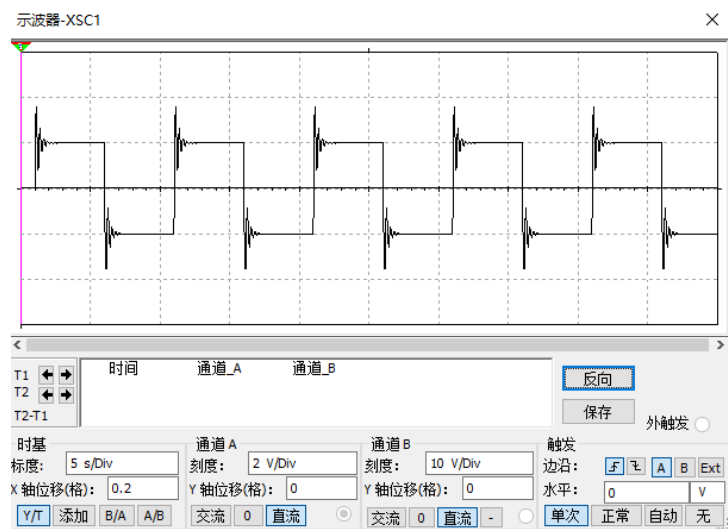


图 28 二阶系统仿真结果

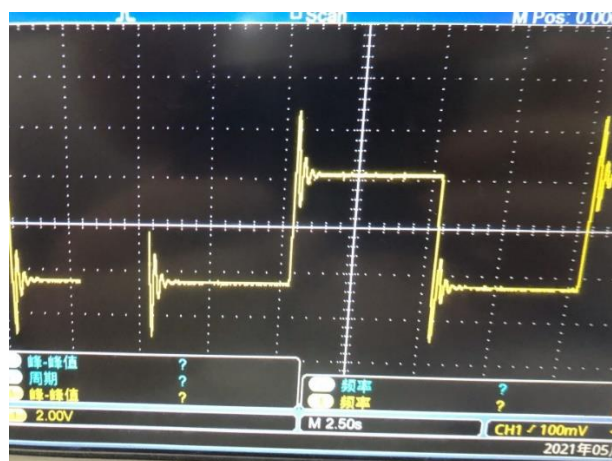


图 29 二阶系统输出波形