

实验五 波形发生电路

实验报告

姓名：屈晨迪

班级：自 71

学号：2017010928

桌号：10

日期：2019.5.24

1 实验目的

- (1) 掌握由集成运放组成的正弦波振荡电路的原理与参数选择方法；
- (2) 学习滞回比较器的组成及电压传输特性的测试方法；
- (3) 掌握由集成运放组成的矩形波-三角波发生电路的原理与参数选择方法

2 预习报告

2.1 正弦波发生电路

(1) 理论计算

如图 1 所示，该电路为 RC 桥式正弦波振荡电路。

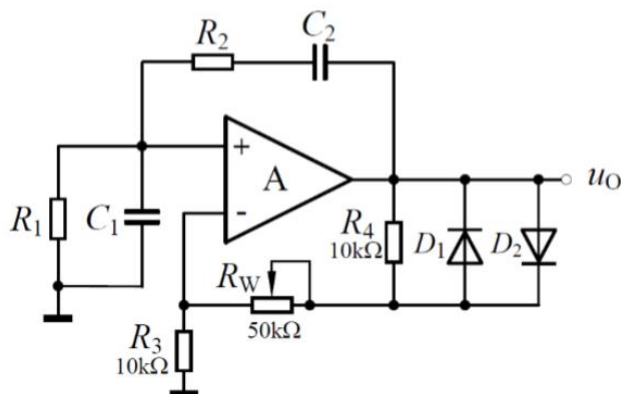


图1 正弦波发生电路

$$\text{令 } R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$$

$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

其中 $\omega = 2\pi f, f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ，当 $f = f_0$ 时， $|\dot{F}|$ 最大，等于 $\frac{1}{3}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 400\text{Hz}, RC = \frac{1}{800\pi} \approx 3.98 \times 10^{-4}$$

选取电阻 $R=39\text{k}\Omega$ ， $C=0.01\mu\text{F}$ ，则 $f_0 = \frac{1}{2\pi \times 39 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} \approx 408\text{Hz}$

起振条件要求 $|AF|$ 略大于 1，即 $|A|$ 略大于 3

$$A_u = 1 + \frac{R_w + R_4 // r_d}{R_3} \approx 1 + \frac{R_w + R_4}{R_3} > 3$$

即 $R_w \approx 10\text{k}\Omega$ 时刚好起振。

(2) 仿真测量

仿真电路如图 2

缓慢调节电位器 R_5 ，观察波形变化

(a) R_w 为0时，波形如图3，可见输出稳定在0V，没有起振；

(b) 调节 $R_w = 10.1k\Omega$ 时，观察到电路刚好起振，波形如图4，此时 $u_{o\max} = 1.269V$ ，频率 $f \approx 412Hz$

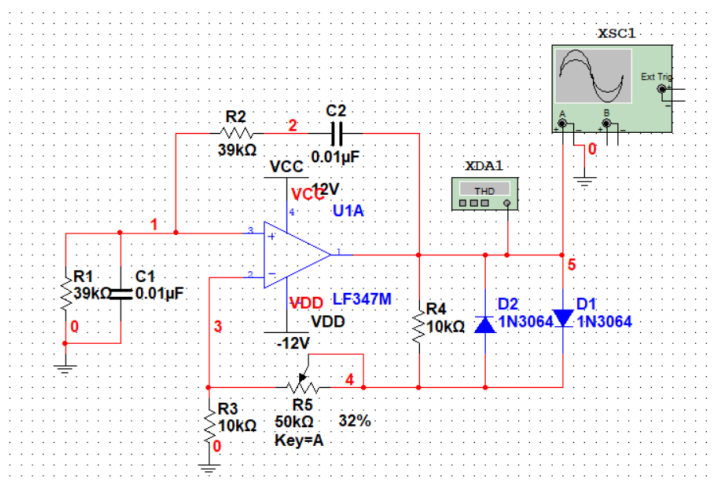


图2 正弦振荡电路仿真

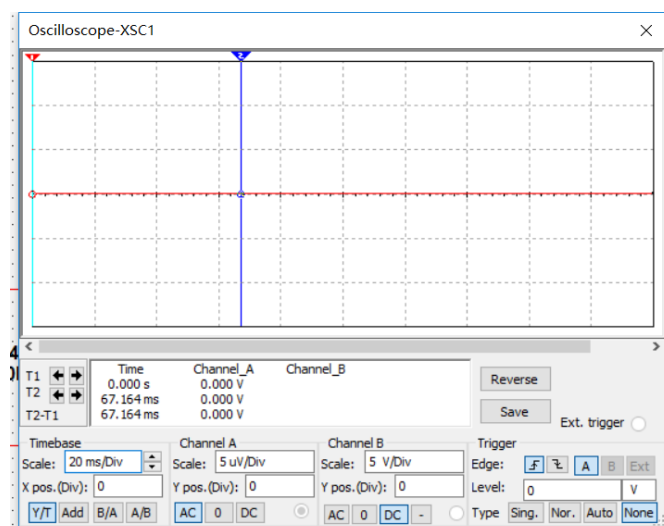


图3 $R_w = 0V$ 波形

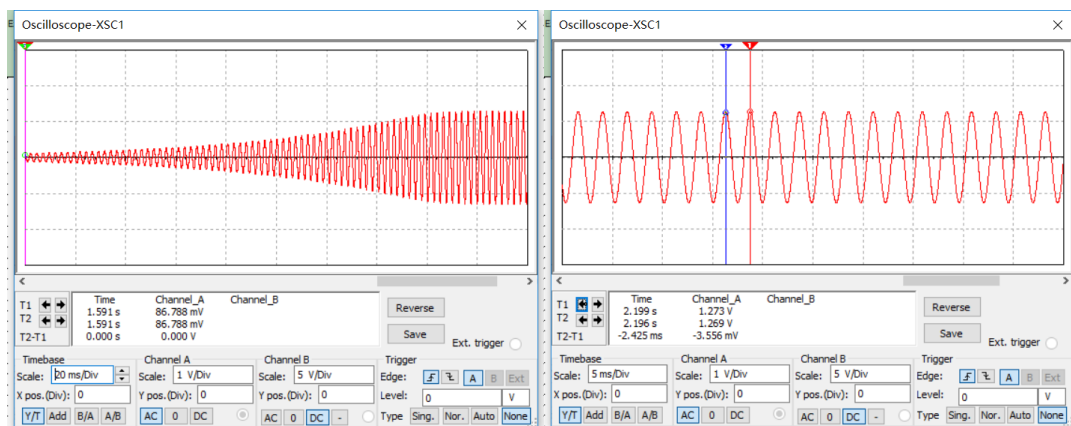


图4 刚好起振波形

(c) 调整 R_w 使输出为不失真的正弦波且幅值最大，如图 5，此时 $R_w = 18k\Omega$ ， $u_{omax} = 10.37V$ ，频率 $f \approx 406.5Hz$

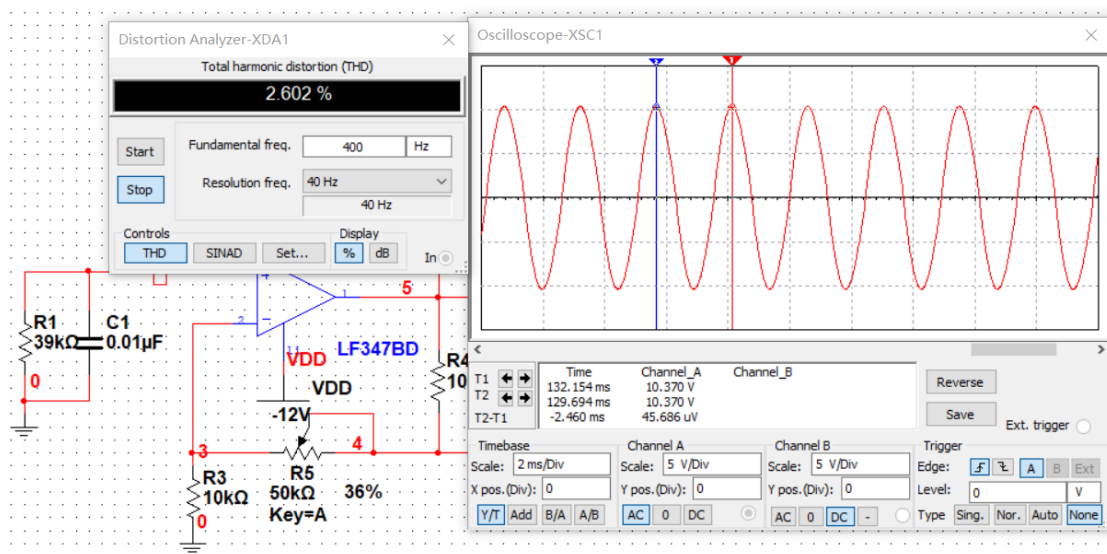


图 5 恰好不失真波形

(d) 调整 R_w 使输出为 5V/400Hz 的正弦波电压，此时 $R_w = 16.1k\Omega$

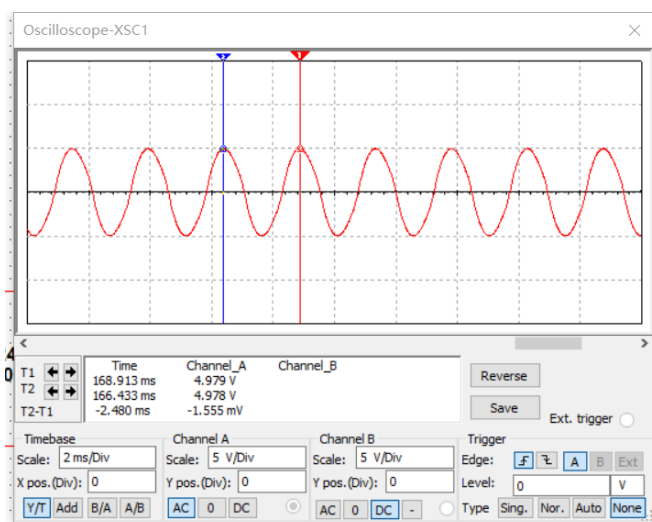


图 6 输出 5V/400Hz 的正弦波电压

(e) 将两个二极管断开，观察 R_w 从小到大变化时输出波形的变化情况

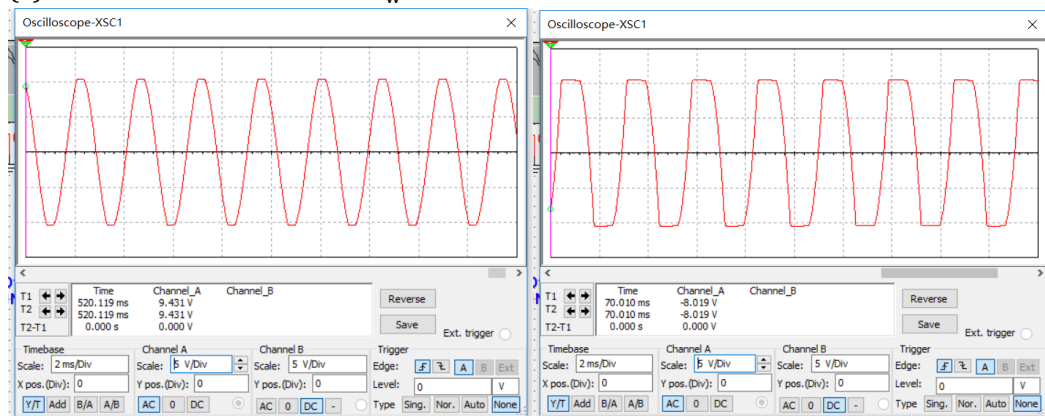


图 7 断开二极管波形

如图 7，断开二极管后，输出波形出现失真，且随着 R_w 变大，失真程度也越来越大。

2.2 方波—三角波发生电路

(1) 理论计算

方波—三角波发生电路如图 8

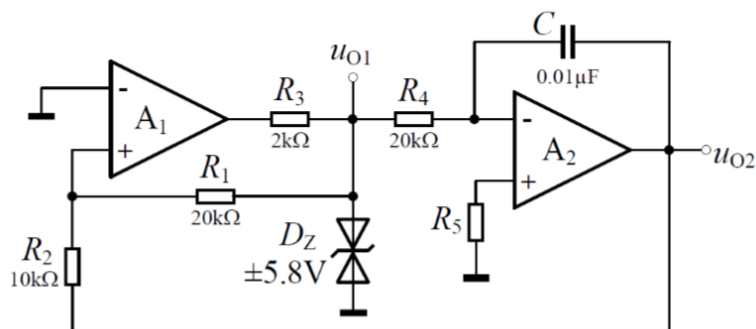


图 8 方波-三角波发生电路

已知 $\pm U_Z = \pm 5.8V$ ，即 u_{O1} 幅值为 $5.8V$ ， $\pm U_T = \pm \frac{R_2}{R_1} U_Z = \pm 2.9V$ ，得 u_{O2} 幅值为 $2.9V$

下面计算周期

$$U_T = -\frac{1}{R_4 C}(-U_Z) \frac{T}{2} - U_T$$

$$T = \frac{4R_2 R_4 C}{R_1} = 4 \times 10^{-4} s, f = \frac{1}{T} = 2500 Hz$$

(2) 仿真测量

仿真电路图如图 9

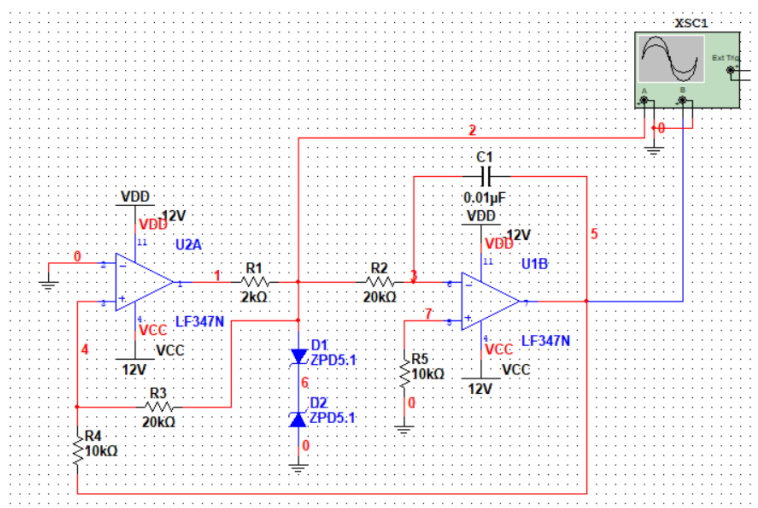


图 9 正弦-三角波仿真电路

① 输出波形如图 10，测得 u_{O1} 幅值为 $5.84V$ ， u_{O2} 幅值为 $3.053V$ ，周期 $T = 415\mu s$ ， u_{O1} 的上升时间 $7.463\mu s$ ，下降时间 $7.09\mu s$ 。

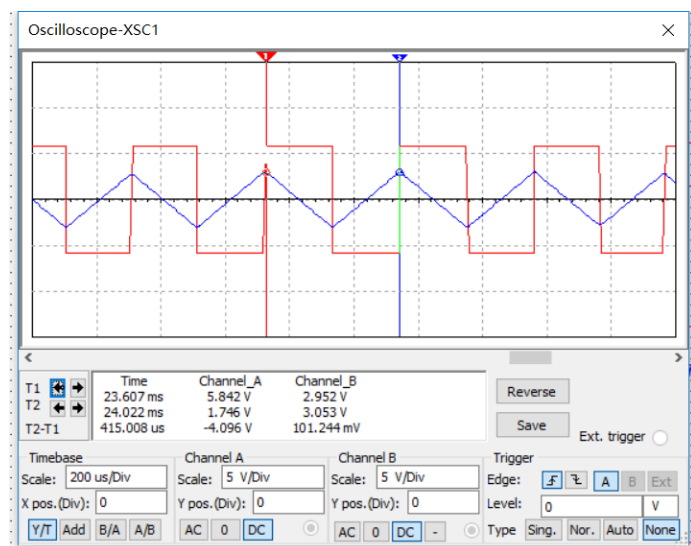


图 10 正弦-三角波输出波形

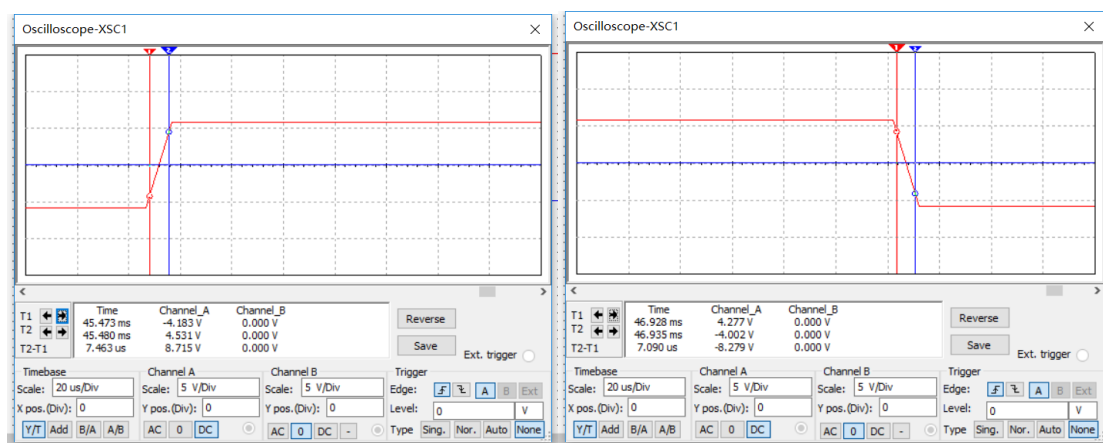


图 11 测量上升下降时间

② 测试滞回比较电路的电压传输特性，使用示波器 X-Y 模式观察波形，如图 12 所示，测量阈值电压分别为-3.078V 和 2.985V，峰-峰值为 11.702V。

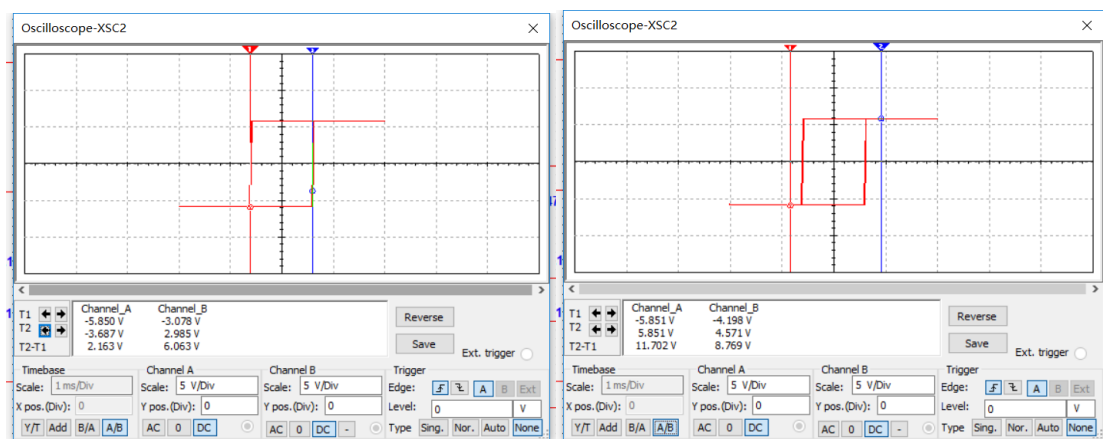


图 12 滞回比较器电压特性

2.3 选做任务

(1) 理论计算

修改方波-三角波发生电路，使之成为矩形波-锯齿波发生电路，要求锯齿波的逆程

（电压下降）时间大约是正程时间的 20%，即占空比约为 $\frac{1}{6}$

$$T_1 = \frac{2R_2}{R_1} \tau_{\text{充}} = \frac{2R_2}{R_1} (R_4 + R_{w\text{上}}) C$$

$$T = \frac{2R_2}{R_1} (2R_4 + R_w) C$$

$$q = \frac{T_1}{T} = \frac{R_4 + R_{w\text{上}}}{2R_4 + R_w} = \frac{1}{6}$$

令 $R_4 = 10k\Omega$ ，则取 $R_w = 100k\Omega$ ， $R_{w\text{上}} = 10k\Omega$ ，此时 $T = 1.2 \times 10^{-3}s = 1.2ms$ ，下降时间 $T_1 = 2 \times 10^{-4}s$ ，上升时间 $T_2 = 1 \times 10^{-3}s = 1ms$

(2) 仿真测量

仿真电路图如图 13 所示

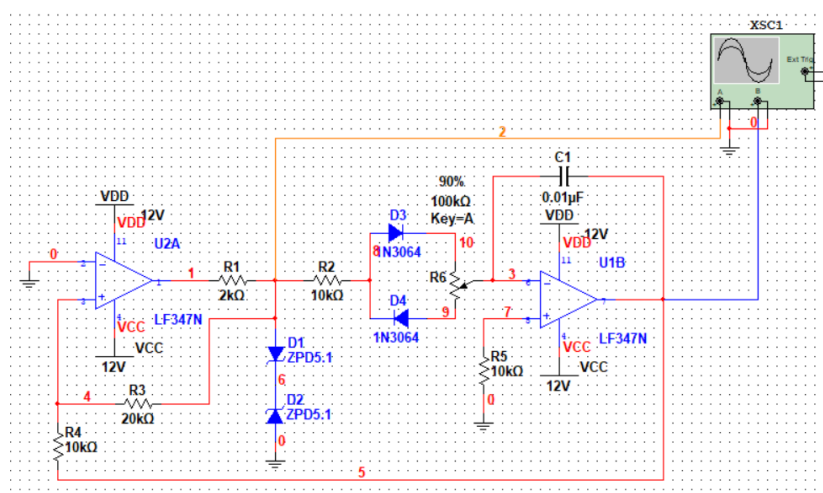


图 13 矩形波-锯齿波仿真电路

仿真波形如下图 14 所示，测得矩形波幅值约为 5.84V，锯齿波幅值约为 2.96V，周期约为 1.321ms.

锯齿波上升时间（正程）约为 1.129ms，下降时间（逆程）约为 226.98us，两者之比

$$\frac{226.98}{1129} \approx 20.1\%$$

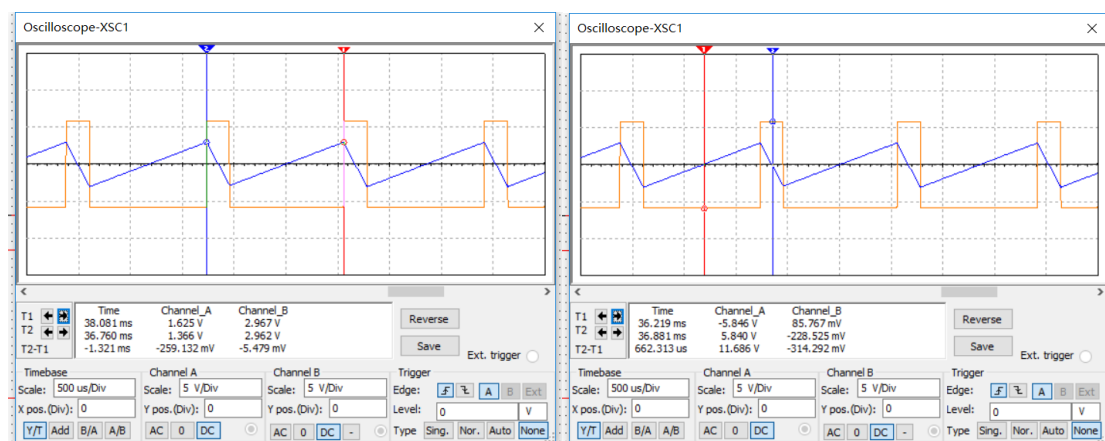


图 14 矩形-锯齿波测量波形

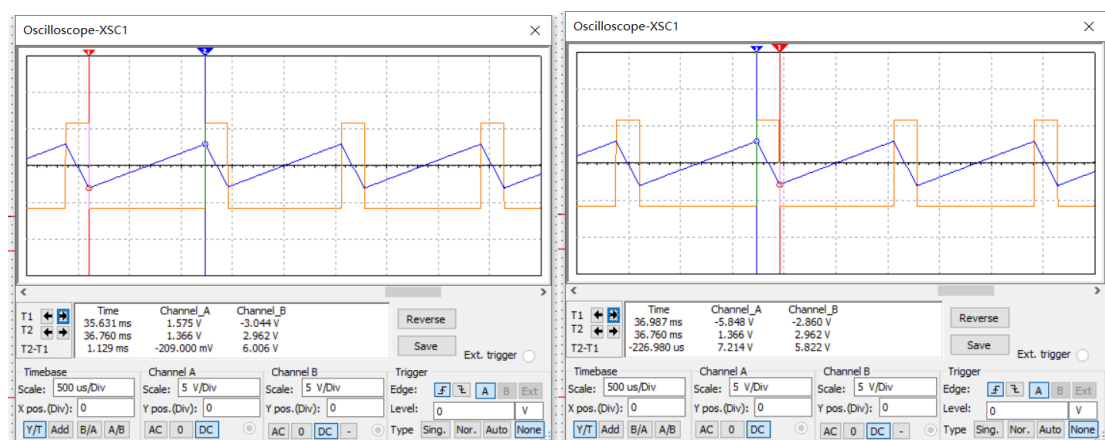


图 15 测量上升下降时间

3 实验数据分析

3.1 正弦波发生电路

(1) 调节电路，使输出电压的频率约为 400Hz

(2) 缓慢调节 R_w 的阻值，观察输出波形的变化

① $R_w = 0\Omega$ 时，从示波器看到，电路没有输出；

② 从 0Ω 开始缓慢调大 R_w ，起初电路一直没有输出，直到某一阻值时，电路刚好起振，波形出现跳变，如图 16 所示，记录此时 R_w 、输出信号的幅值和频率如下表，

u_o	$R_w/k\Omega$	幅值(Vpp)/V	频率/Hz
理论值	10	1.269	408
仿真值	10.1		412
实测值	10.76	1.19	447

可以看到，理论值与仿真值均较为接近，但实测值的 R_w 要偏大一些，可能是因为实际电路中其他影响放大倍数的电阻值与理论计算和仿真有偏差，另外手动调节滑动变阻器旋钮也会使测量不够精确；实际幅值较仿真值偏小，这可能受二极管的动态特性影响，但误差较小，在可接受范围之内；频率的实测值要明显偏大，从后续得到数据可以看出，随着

R_w 的阻值变大，频率越接近 400Hz，可能是 R_w 较小时会对选频网络的特性产生影响。

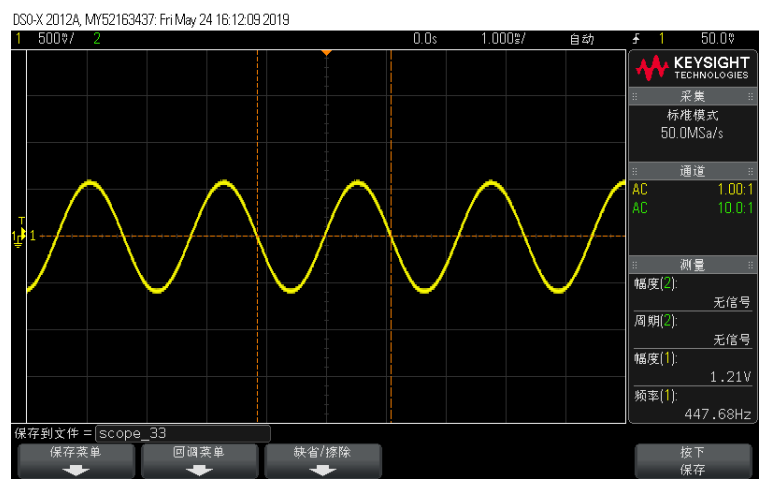


图 16 电路刚好起振

③不断调大 R_w ，直到某一时刻输出幅度最大，再调大即出现波形失真，记录此时的 R_w 、幅值和频率如下表，示波器显示波形如图 17。

u_o	$R_w/k\Omega$	幅值(Vpp)/V	频率/Hz
理论值	18.02	10.37	409
仿真值	18		406.5
实测值	18.96	10.7	420

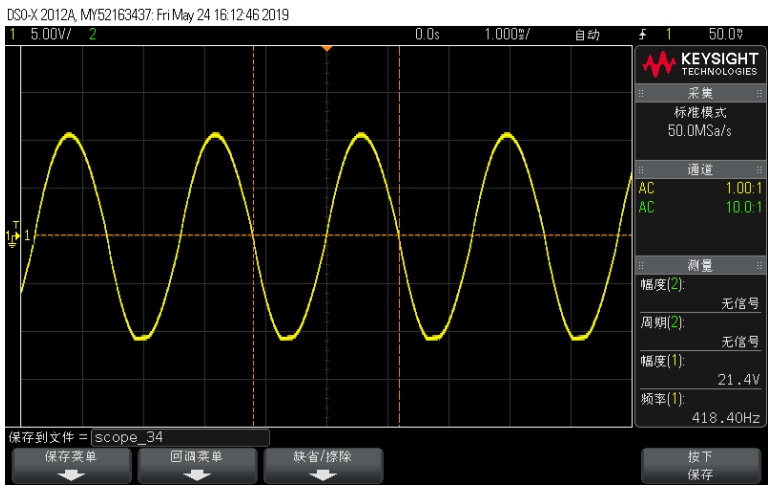


图 17 幅值最大且不失真

理论值和仿真值较为接近，而实测值的 R_w 和幅值均略微偏大，同②中的分析，是实际电路中元件（如电阻、二极管）参数和特性的不同引起的，可以看到的是，此时的频率测量值要比刚起振时较 400Hz 的偏差小，即 R_w 变大，RC 网络的选频特性变好。

④在一定范围内调节 R_w ，使输出为 5V(Vp)/400Hz 的正弦波电压

u_o	$R_w/k\Omega$	频率/Hz
仿真值	16.1	403.23
实测值	17.08	427

此时测得的 R_w 约为 17.08 千欧，与仿真值 16.1 较为接近，其误差原因与②③相似，故不再赘述。

⑤断开二极管，再次调节 R_w ，观察输出波形，可以发现 R_w 在调整至比原先刚起振时的阻值略微大一点时，输出就呈现失真，如图 18，即去掉二极管后电路失去了非线性环节，稳定性大大下降。

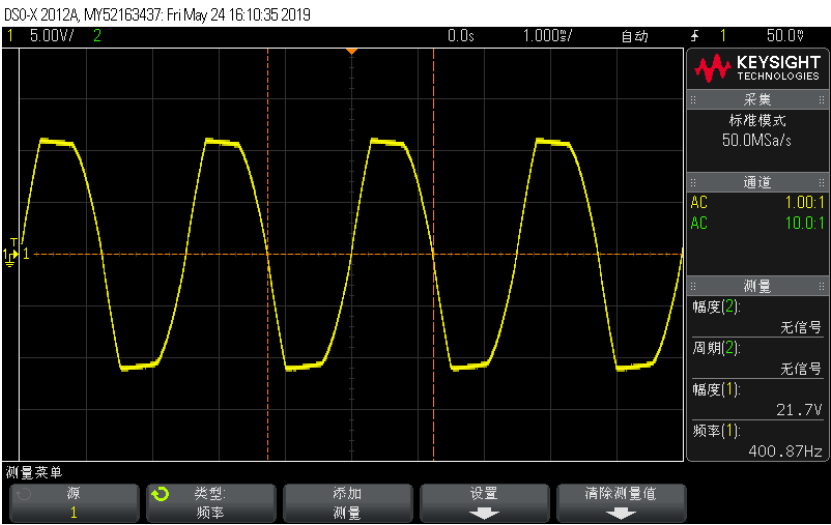


图 18 波形失真

3.2 方波-三角波发生电路

(1) 示波器显示波形如图 19 所示，可以看到方波和三角波的波形都非常完美。

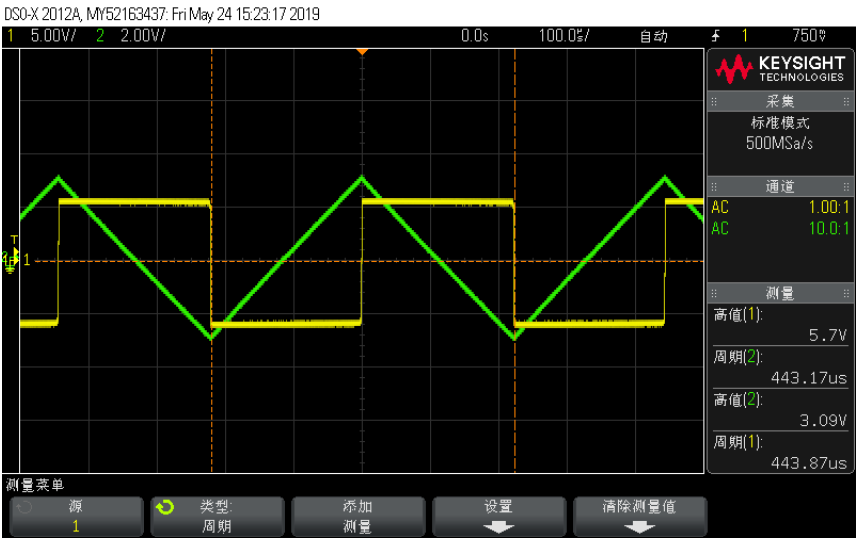


图 19 方波-三角波电路波形

使用示波器的测量功能，获得方波-三角波发生电路 u_{o1} 、 u_{o2} 波形的幅值、周期及 u_{o1} 波形的上升和下降时间，记录如下表

方波 (u_{o1})	幅值(Vpp)/V	周期/us	上升时间/ns	下降时间/ns
理论值	5.8	400		
仿真值	5.84	415	7463	7090
实测值	5.7	443	891	867

三角波 (u_{o2})	幅值(Vpp)/V	周期/us
理论值	2.9	400
仿真值	3.05	415
实测值	3.09	443

可以看到方波的实测幅值要小于理论和仿真值，可能是由于稳压管的稳压值与理想有偏差，周期偏大，考虑影响时间常数的电阻、电容值偏大，导致充放电时间变长；而对于上升和下降时间，实测值与仿真值有较大差距，这是由于仿真时测得的上升下降时间受仿真步长的参数设置影响较大，而实际测量则没有这个问题，测量上升下降时间的示波器截屏如图 20 所示。

而三角波的实测幅值与仿真、理论值都较为接近，周期偏大，但与方波的实测周期相同，这点与理论相符。



图 20 测量方波上升下降时间

(2) 从方波-三角波发生电路中取出滞回比较器部分，使用示波器的 X-Y 模式测试滞回比较电路的电压传输特性，得到的曲线如图 21，测量其阈值电压和峰值，记录如下表

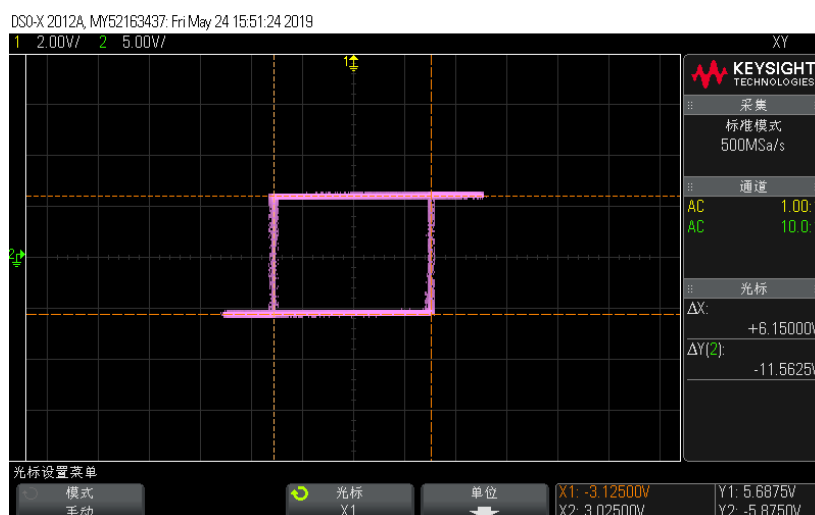


图 21 滞回比较器的电压传输特性

	阈值电压/V	u_{o1} /V
理论值	± 2.9	5.8
仿真值	2.985	5.851
	-3.078	-5.851

实测值	3.025	5.6875
	-3.125	-5.875

可以看到实测的滞回比较器阈值电压和峰值均与理论、仿真较为接近，但有略微的偏大，分析可能是稳压管的特性与理想参数和仿真模型有偏差导致。

3.3 选做内容

(1) 将方波-三角波电路修改为矩形-锯齿波发生电路，示波器输出如图 22 所示。

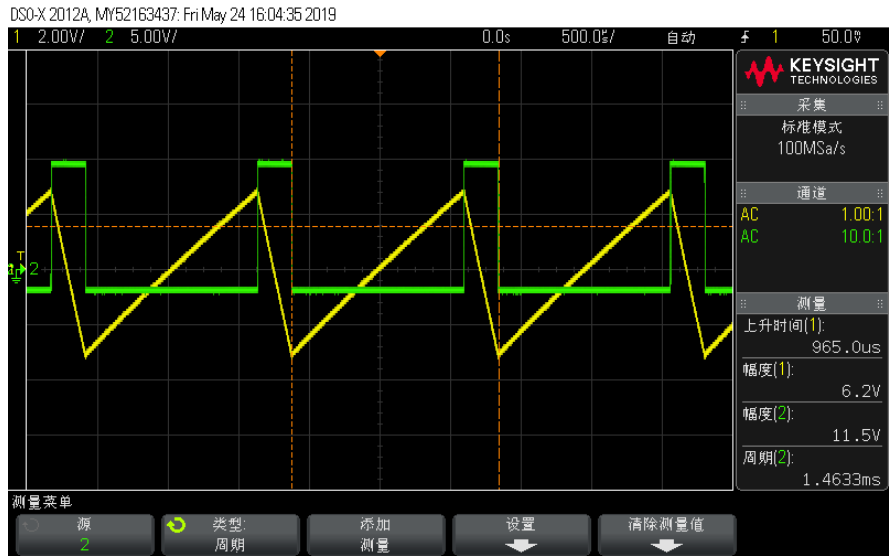


图 22 矩形-锯齿波发生电路波形

测量矩形波的幅值和周期记录如下表，幅值的实测值较仿真和理论值偏小，依旧是稳压管的稳压值偏小导致的，周期偏大，可能是由于实际电路中的各个电阻值，如滑变阻值，与理想阻值有偏差。

矩形波 (u_{o1})	幅值(Vpp)/V	周期/ms
理论值	5.8	1.2
仿真值	5.84	1.321
实测值	5.75	1.46

测量锯齿波的幅值、周期、正逆程记录如下表，幅值与理论、仿真均较为接近，周期偏大，但与矩形波相同，符合理论预期，周期偏大，相应的正逆程时间也会偏大，计算求得的比值 $\frac{T_2}{T_1} \times 100\% = 20.6\%$ 与期望的 20% 十分接近，符合要求。

锯齿波 (u_{o2})	幅值(Vpp)/V	周期/ms	正程 T_1 /us	逆程 T_2 /us	$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\%$
理论值	2.9	1.2	1000	200	20%
仿真值	2.96	1.321	1129	226.98	20.1%
实测值	3.1	1.46	1210	249.36	20.6%

4 思考题

(1) 图 1 电路中两个并联二极管的作用是什么？

正弦波发生电路中输出端两个并联的二极管是作为电路的非线性环节，提高电路的稳定性，去掉二极管之后，电路稳定性大大降低，正弦振荡极易出现失真。

(2) 在测试滞回比较器电路的电压传输特性时，输入电压的频率不能过高，为什么？

输入电压的频率过高，可能导致示波器的采样速度跟不上输入电压的变化，X-Y 模式下输出的曲线不符合预期，而若采样频率与输入电压成整数倍数关系，会始终测量得出同一个电压值，因此要将输入电压的频率调整至一个合适的值，不能过高。

5 出现的故障及原因

本次实验操作没有很大的难度，整体完成较为顺利，但在用示波器的 X-Y 模式观察滞回比较器的转移特性曲线时，一开始始终没有波形出现，换回标准模式后也观察不到合适的输出波形，我仔细检查了电路连接，并用万用表测量了各个元件的值，并未发现问题，后来发现是输入的三角波幅值过小，不能达到滞回比较器的阈值电压，增大输入电压幅值到 8V 左右，能看到较完美的方波输出，换为 X-Y 模式后转移特性曲线与预期相符。

另外，在先前测量方波幅值时，测得的电压值一直是理论值的两倍，起初以为是稳压管的问题，更换了稳压管后还是不行，后来仔细排查，发现是示波器测量端口接错了位置，没有接到稳压管之后，改正了接线后，获得了正确的结果。

最后，感谢老师和助教在本次实验过程中对我的帮助！

6 原始数据记录

4 数据记录表格

1. 正弦波发生电路

(1) 电路刚好起振

u_o	$R_w/k\Omega$	幅值(Vpp)/V	频率/Hz
理论值	10		408
仿真值	10.1	1.268	412
实测值	10.76	1.19	447

(2) 输出正弦波不失真且幅度最大

u_o	$R_w/k\Omega$	幅值(Vpp)/V	频率/Hz
理论值	18.02		408
仿真值	18	10.37	406.5
实测值	18.86	10.7	420

(3) 使输出为 5V(Vp)/400Hz 的正弦波电压

u_o	$R_w/k\Omega$	频率/Hz
仿真值	16.1	403.23
实测值	17.08	427

2. 方波-三角波发生电路

(1) 测量值方波-三角波发生电路图1、图2波形的幅值、周期及图1波形的上升和下降时间

方波 (u_{o1})	幅值(Vpp)/V	周期/us	上升时间/ns, us	下降时间/ns, us
理论值	5.8	400		
仿真值	5.84	415	8.01	7.9
实测值	5.7	443	891ns	867ns

三角波 (u_{o2})	幅值(Vpp)/V	周期/us
理论值	2.9	400
仿真值	3.05	415
实测值	3.09	443

200512 王佩芳 XY

(2) 测试滞回比较电路的电压传输特性

	阈值电压/V	u_{o1}/V
理论值	± 2.9	11.6
仿真值	2.985 -3.078	11.702
实测值	3.025 -3.125	11.56

3. 选做内容

(1) 矩形-锯齿波发生电路

矩形波 (u_{o1})	幅值(V_{pp})/V	周期/ms
理论值	5.8	1.2
仿真值	5.84	1.321
实测值	5.75	1.46

锯齿波 (u_{o2})	幅值(V_{pp})/V	周期/ms	正程 $T_1/\mu s$	逆程 $T_2/\mu s$	$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\%$
理论值	2.9	1.2	1000	200	20%
仿真值	2.96	1.321	1129	226.98	20.1%
实测值	3.1	1.46	1210	249.36	20.6%