

# 实验五 波形发生电路

## 实验报告

姓名： 赵文亮

学号： 2016011452

班级： 自64

桌号： 229—6

日期： 2018年5月25日

## 目录

1	实验目的.....	1
2	实验内容.....	1
2.1	实验必做.....	1
2.1.1	正弦波发生电路.....	1
2.1.2	方波——三角波发生电路.....	2
2.2	实验选做.....	2
3	预习要求.....	2
3.1	正弦振荡电路.....	2
3.2	方波——三角波发生电路.....	7
3.3	选做任务.....	11
4	数据表格.....	14
4.1	必做实验.....	14
4.1.1	正弦波发生电路.....	14
4.1.2	方波——三角波振荡电路.....	15
4.2	选做实验.....	16
5	硬件实验.....	17
5.1	必做实验.....	17
5.1.1	正弦波发生电路.....	17
5.1.2	方波——三角波振荡电路.....	22
5.2	选做实验.....	24
6	思考题.....	25
7	实验中遇到的问题和解决方法.....	26

## 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 实验内容

### 2.1 实验必做

#### 2.1.1 正弦波发生电路

1. 实验参考电路如图 1所示。设计电路参数，使输出电压 $u_o$ 的频率为400Hz。

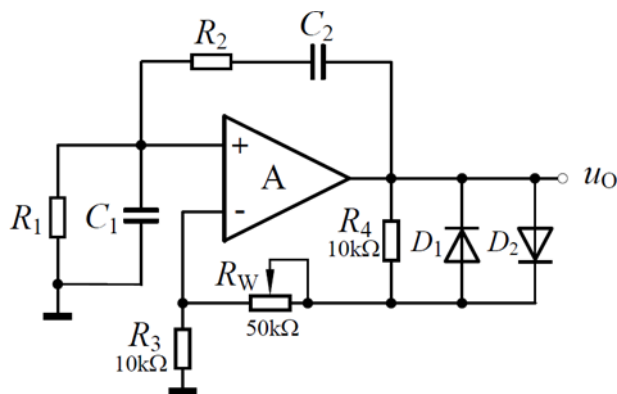


图 1 正弦波发生电路

2. 缓慢调节电位器 $R_W$ ，观察电路输出波形的变化，完成以下测试：
  - (a)  $R_W$ 为 $0\Omega$ 时的 $u_o$ 的波形；
  - (b) 调整 $R_W$ 使电路刚好起振，记录 $u_o$ 的幅值、频率及 $R_W$ 的阻值；
  - (c) 调整 $R_W$ 使输出为不失真的正弦波且幅值最大，记录 $u_o$ 幅值、频率及 $R_W$ 的阻值

- (d) 调整 $R_W$ 使输出为5V/400Hz的正弦波电压，记录 $R_W$ 的阻值；
- (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。

## 2.1.2 方波——三角波发生电路

1. 实验参考电路如图 2所示。测量图 2电路 $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ 波形的幅值、周期及 $u_{o2}$  波形的上升和下降时间。

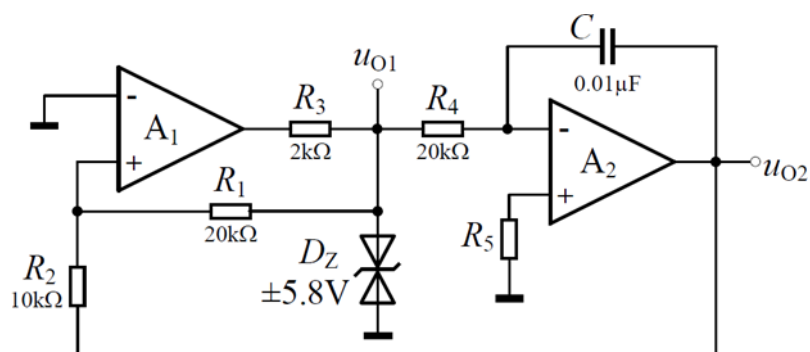


图 2 方波——三角波发生电路

2. 测试滞回比较器的电压传输特性
- 单独测试图 2电路中A1组成的滞回比较器电路，在输入端（即R2下端）输入合适的测试信号，用示波器X-Y模式观测电压传输特性曲线并记录阈值电压和 $u_{o1}$ 的峰-峰值。

## 2.2 实验选做

修改图 2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%，记录 $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ 的幅值、周期。

## 3 预习要求

### 3.1 正弦振荡电路

#### 理论计算

电路如图 1 所示。本实验中使用了RC桥式正弦波振荡电路。令 $R_1 = R_2 =$

$R, C_1 = C_2 = C$ ，则有

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

当 $f = f_0$ 时 $|\dot{F}|$ 最大。其中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

考虑到元件盒的实际情况，选取 $R = 39\text{k}\Omega, C = 10\text{nF}$ ，此时有

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \times 39\text{k} \times 10\text{n}} \text{Hz} = 408\text{Hz} \approx 400\text{Hz}$$

为了满足震荡条件，要求 $|\dot{A}|$ 略大于3。而

$$\dot{A} = \frac{R_3 + R_4 + R_W}{R_3}$$

令 $|\dot{A}| = 3$ 解得

$$R_W = 2R_3 - R_4 = 10\text{k}\Omega$$

即 $R_W$ 略大于 $10\text{k}\Omega$ 。

## 仿真测量

仿真电路如图 3 所示。

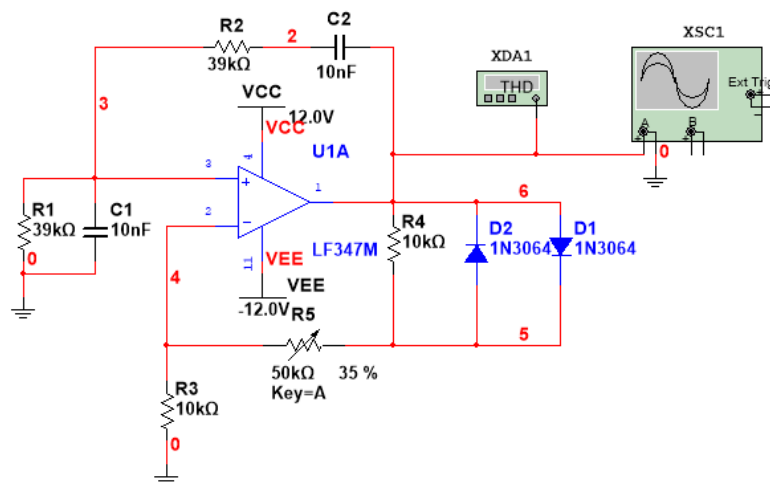


图 3 正弦振荡仿真电路

(a)  $R_W = 0\Omega$ 时

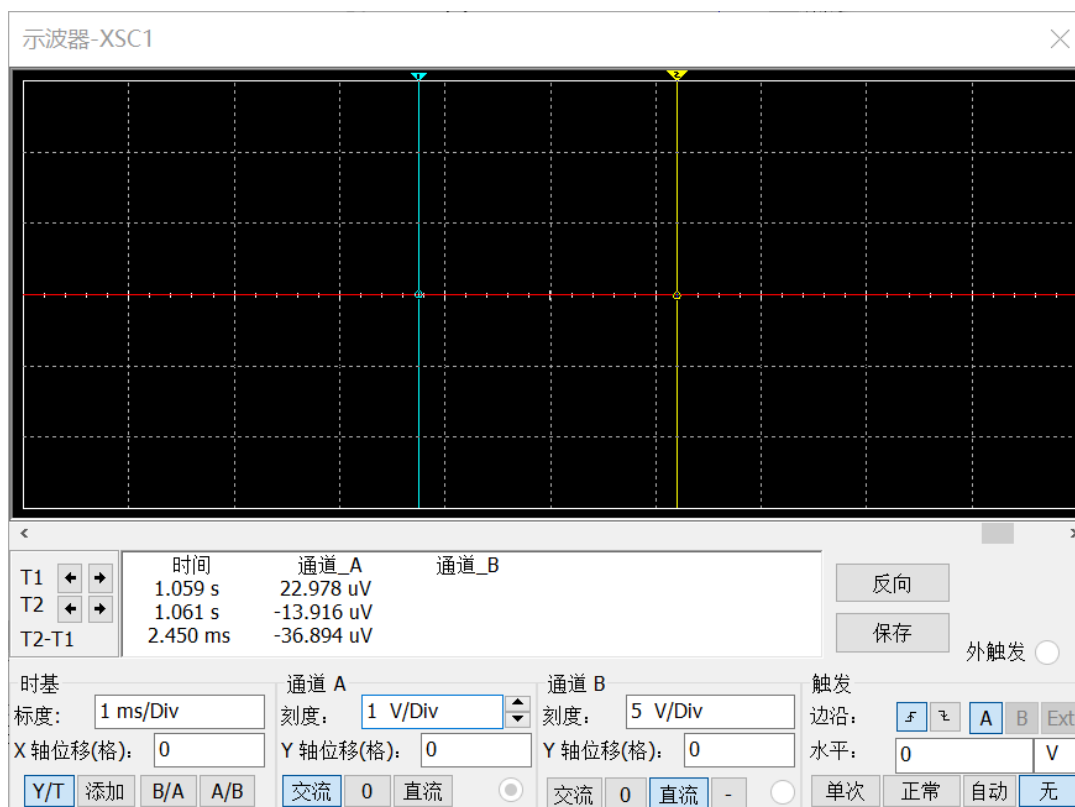


图 4  $R_W = 0\Omega$ 时波形

可见没有起振。

(b) 刚好起振时

调节电位器，使得电路刚好起振，图 5为刚刚起振时的波形，此时电位器阻值为10.1kΩ。图 6 为测量幅值和频率的波形，可得 $|u_o|_{\max} = 1.272V$ ，周期

$T = 2.450\text{ms}$ , 频率  $f = \frac{1}{T} = 408.16\text{Hz} \approx 400\text{Hz}$ 。

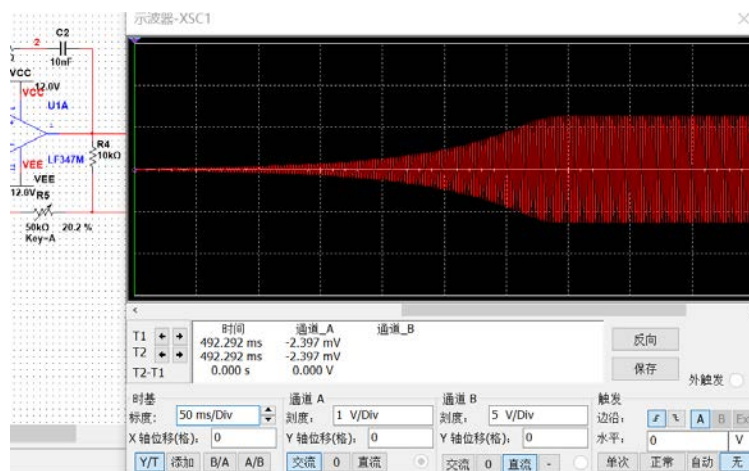


图 5 电路恰好起振波形

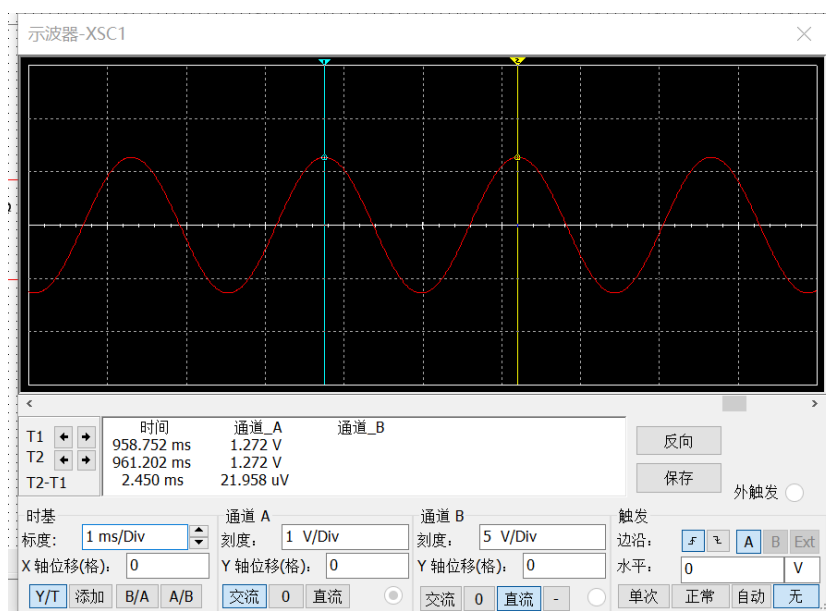


图 6 恰好起振时幅值测量

(c) 恰好不失真时

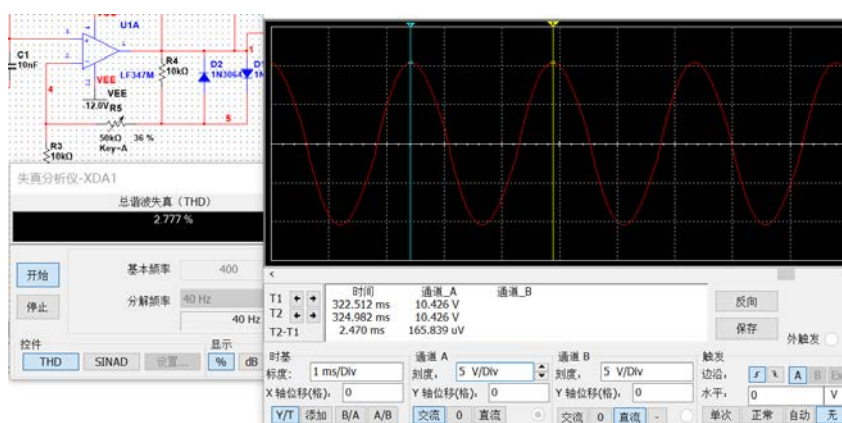


图 7 输出不失真且幅值最大时波形

波形如图 7 所示, 此时 $R_W = 18\text{k}\Omega$ , 可得 $|u_o|_{\max} = 10.426\text{V}$ , 周期 $T = 2.470\text{ms}$ , 频率 $f = \frac{1}{T} = 404.86\text{Hz} \approx 400\text{Hz}$ 。

(d) 输出为 $5\text{V}/400\text{Hz}$ 的正弦波

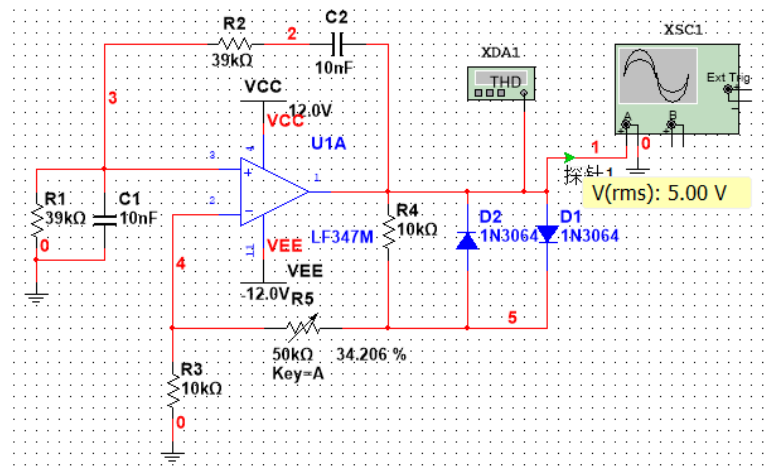


图 8 调节 $R_W$ 使输出为 $5\text{V}/400\text{Hz}$ 的正弦波

从原理可以知道, 输出正弦波的频率与 $R_W$ 的取值无关, 于是只需要调节使得输出正弦波的有效值等于 $5\text{V}$ 。使用探针进行辅助调节, 如图 8 所示。此时 $R_W = 17.103\text{k}\Omega$ 。

(e) 断开二极管时

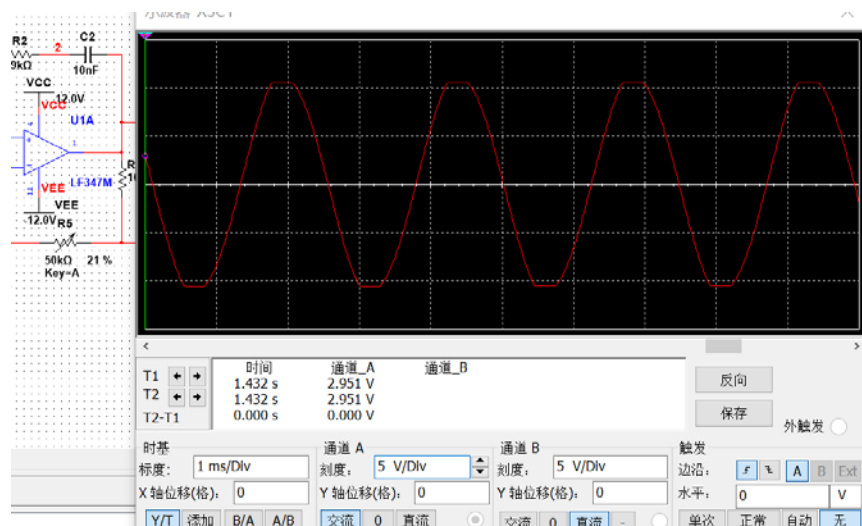


图 9 断开二极管恰好起振波形

断开二极管, 调节电位器, 恰好起振时的波形如图 9 所示, 可见波形已经失真; 继续增大 $R_W$ 阻值, 发现失真越来越明显 (如图 10)。



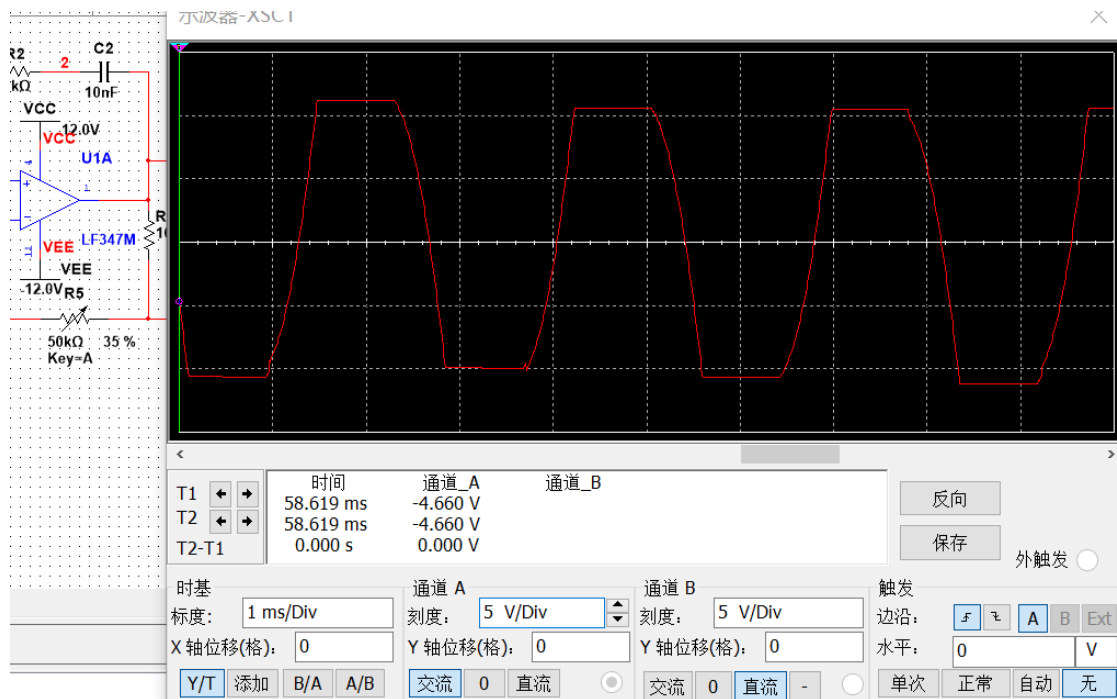


图 10 断开二极管 $R_W$ 较大时波形

### 3.2 方波——三角波发生电路

测量图 2 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。

电路图如下，首先分析原理。可见电路左边是一个滞回比较器，右面是一个积分器。假设滞回比较器的输出 $u_{o1}$ 为 $U_Z$ ，则电容 $C$ 会放电，积分器的输出 $u_{o2}$ 会线性下降，直到 $u_{o2} = -U_T$ ，则滞回比较器翻转，输出为 $-U_Z$ ，类似地完成下一个过程。其中

$$U_T = U_Z \cdot \frac{R_2}{R_1} = 5.8 \cdot \frac{10k}{20k} V = 2.9V$$

方波和三角波的周期为

$$T = \frac{4R_4CU_T}{U_Z} = \frac{4 \times 20k \times 0.01\mu \times 2.9}{5.8} s = 400\mu s$$

频率 $f = 2500Hz$ 。 $u_{o1}$ 的幅值为 $U_Z = 5.8V$ ， $u_{o2}$ 的幅值为 $U_T = 2.9V$ 。

仿真电路如图 11所示。

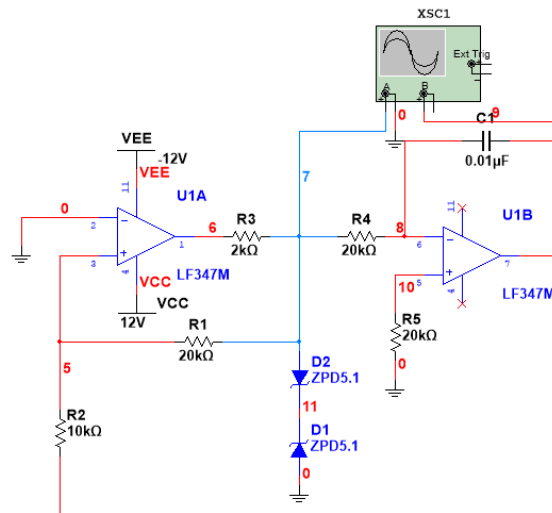


图 11 方波——三角波发生电路仿真

仿真波形如图 12所示。

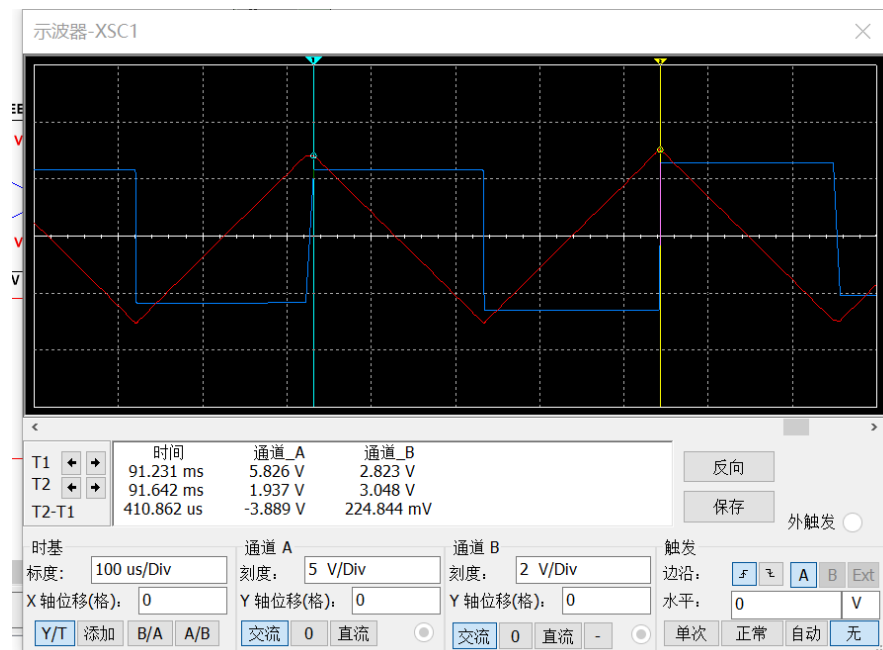


图 12 方波——三角波发生电路仿真波形

可见 $u_{01}$ 的幅值为5.826V,  $u_{02}$ 的幅值为2.823V, 周期为 $T = 410.862\mu\text{s}$ 。

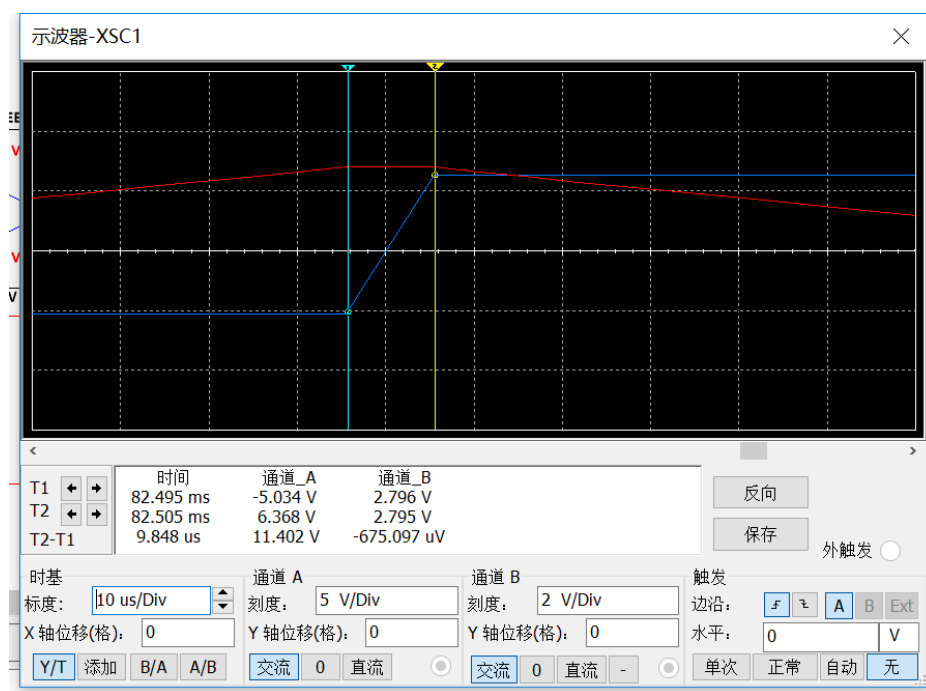


图 13 方波上升时间测量

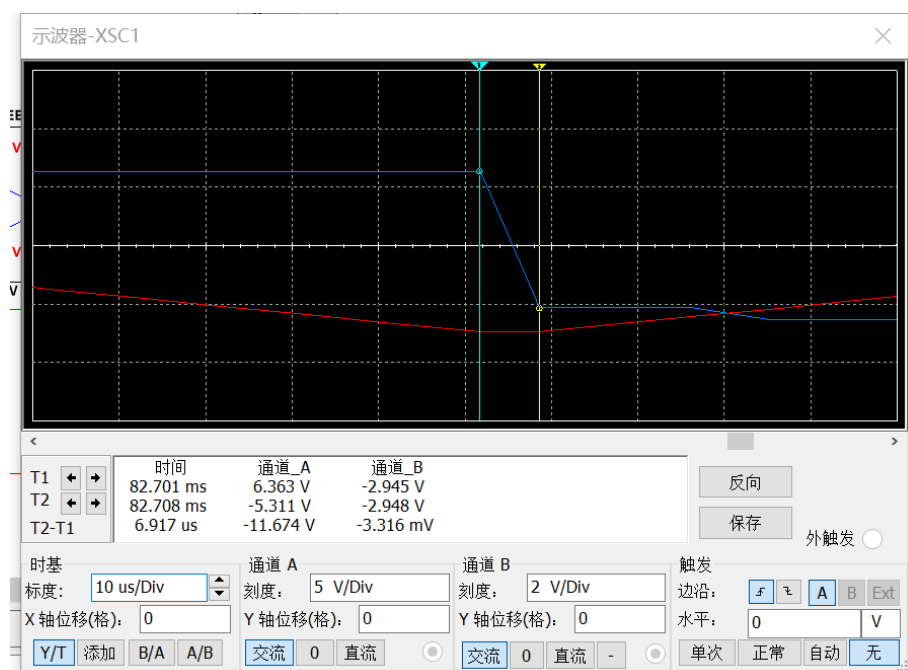


图 14 方波下降时间测量

可知上升时间为 $9.848\mu\text{s}$ ，下降时间为 $6.917\mu\text{s}$ 。

### 测试滞回比较器的电压传输特性

测试电路如图 15 所示。

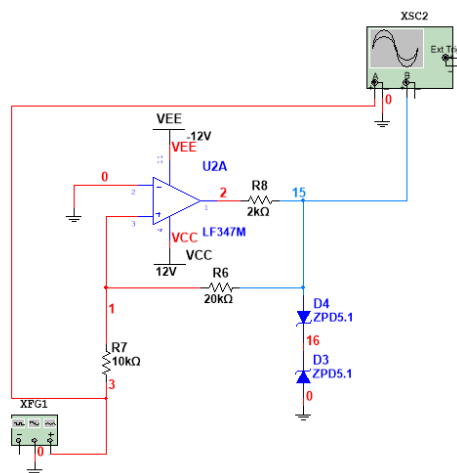


图 15 测试滞回比较器电压传输特性仿真电路

其中函数信号发生器产生了幅值为10V的三角波扫描电压。使用示波器的X/Y模式，测得滞回比较器的电压传输特性如图 16所示。从中读出阈值电压  $U_{T+} = 3.007V$ ,  $U_{T-} = -3.007$ 。从图 17中读出 $u_{o1}$ 峰峰值为11.700V。

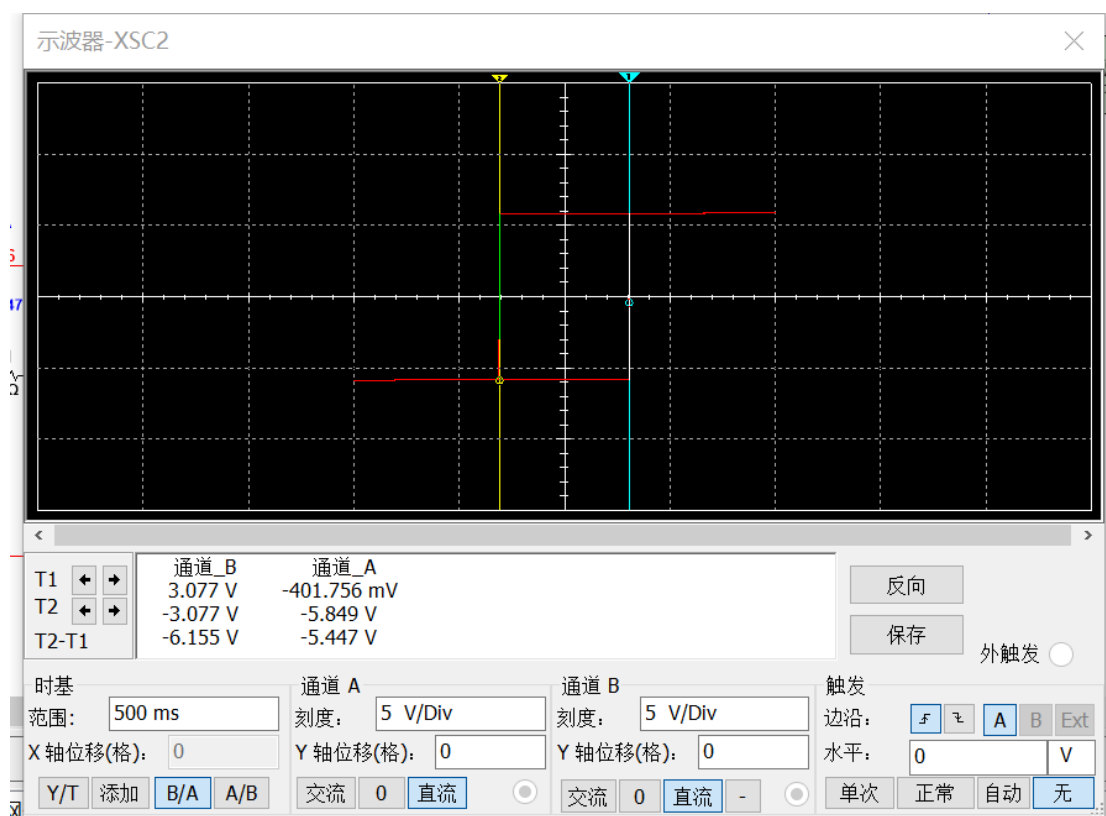


图 16 滞回比较器电压传输特性阈值电压测量

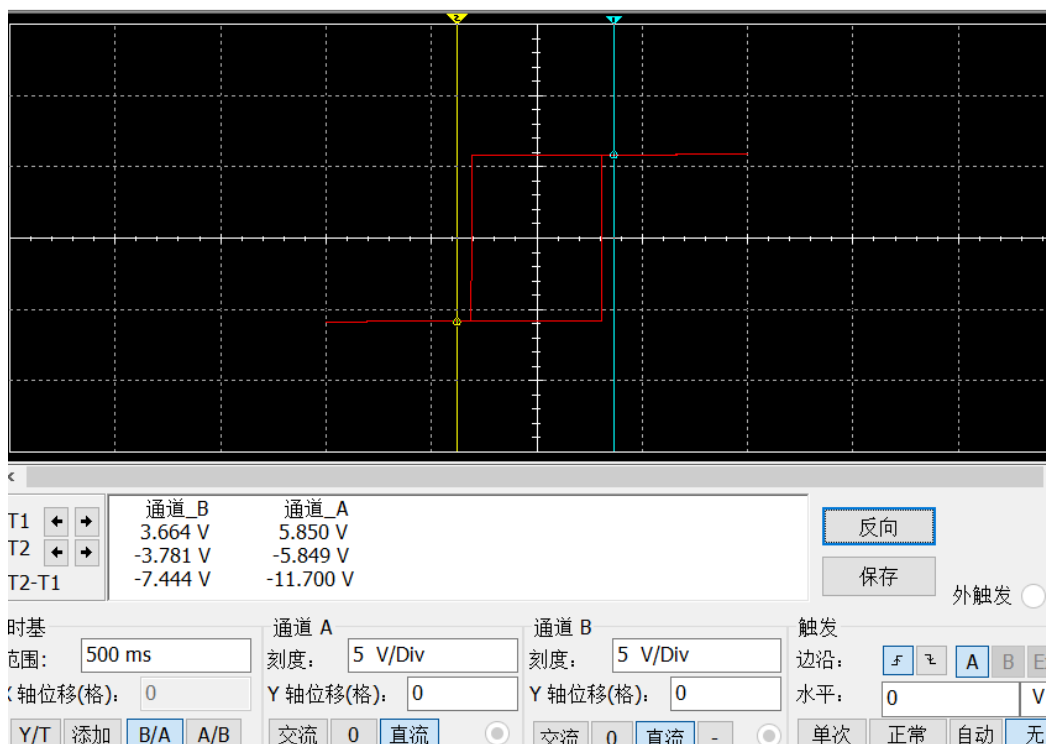


图 17 滞回比较器电压传输特性输出电压峰峰值测量

### 3.3 选做任务

矩形波——锯齿波发生电路的仿真电路如图 18 所示。

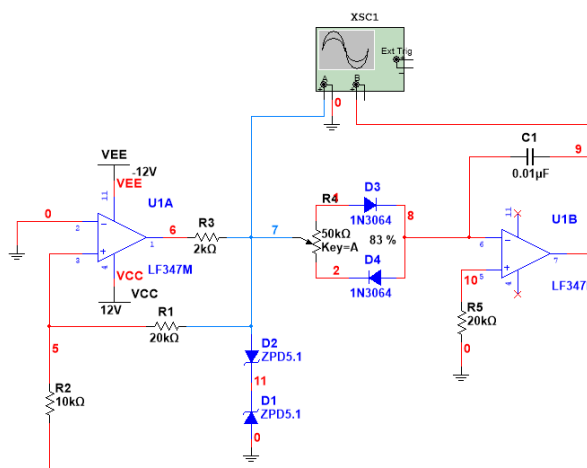


图 18 矩形波——锯齿波发生电路

只需改变充放电时积分回路的电阻值，这里使用滑动变阻器和二极管来实现。测量锯齿波的正程和逆程时间如图 19和图 20所示。

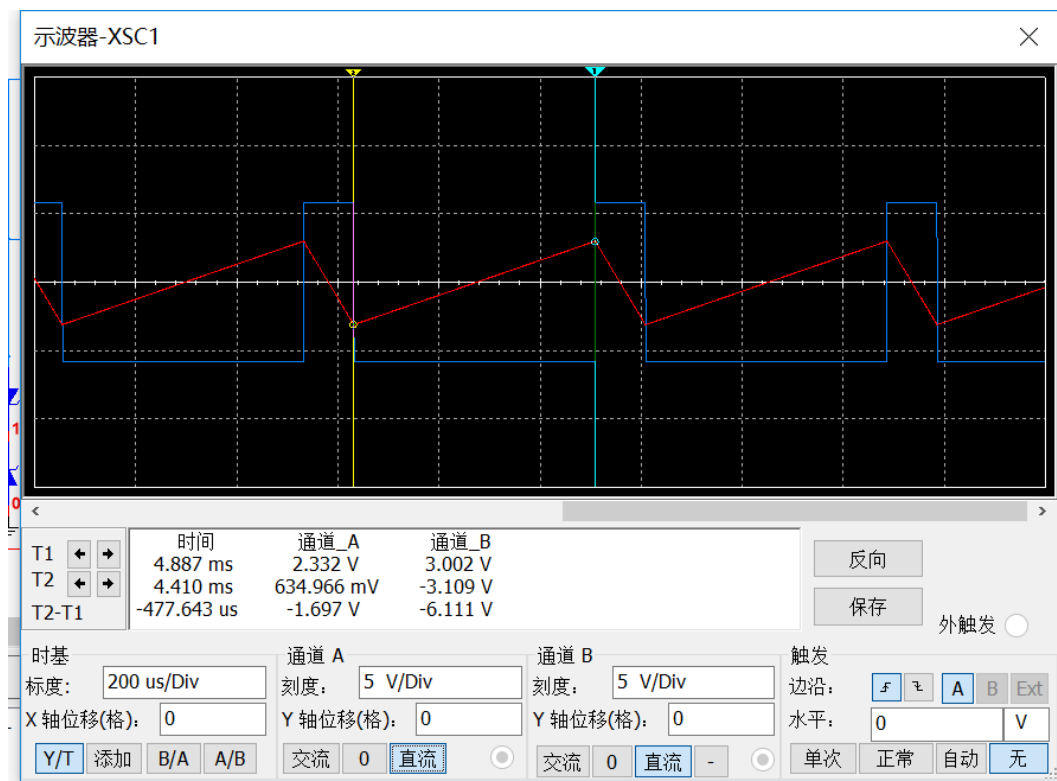


图 19 矩形波——锯齿波发生电路正程测量

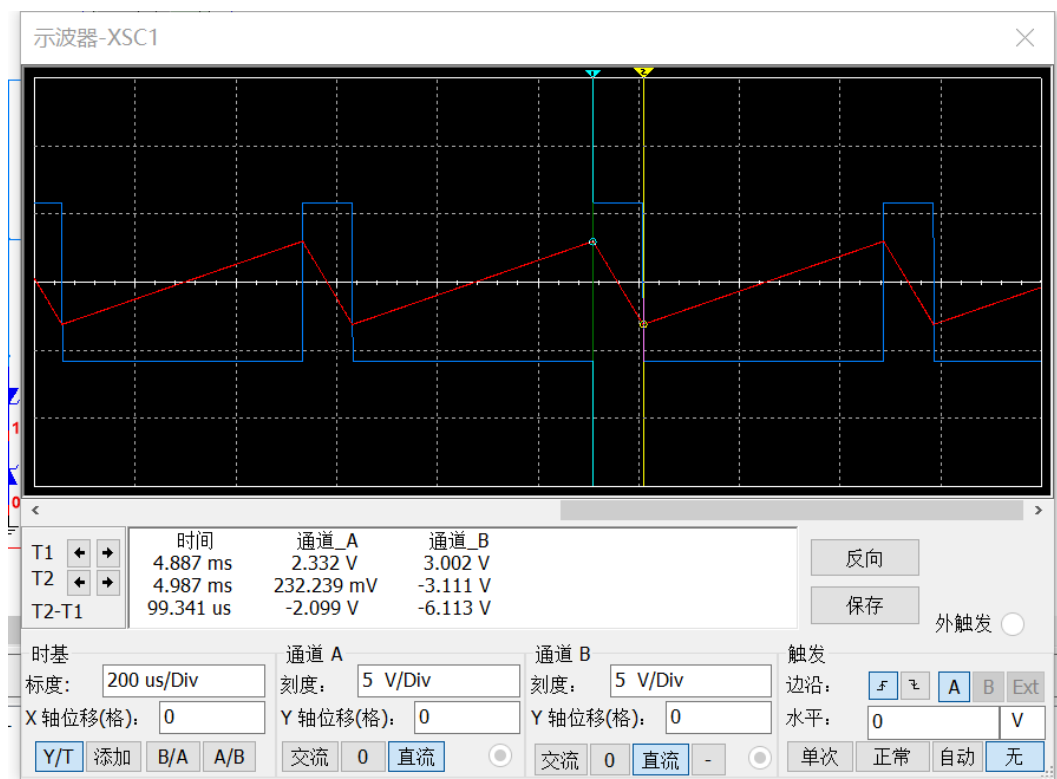


图 20 矩形波——锯齿波发生电路逆程测量

可知

$$\frac{T_f}{T_r} = \frac{99.341}{477.643} = 20.8\% \approx 20\%$$

测量周期如图 21所示，可知 $T = 576.775\mu\text{s}$ 。

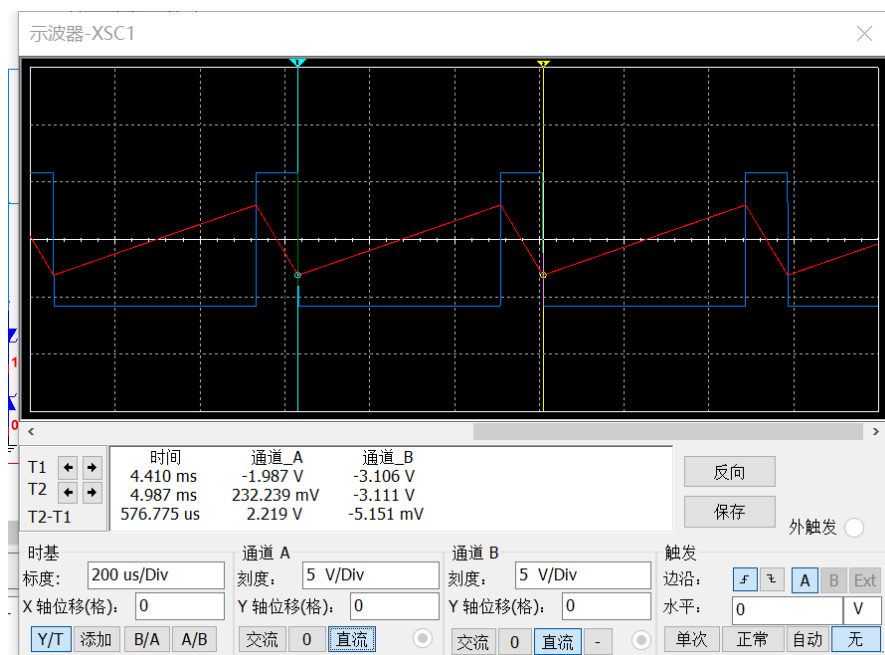


图 21 测量矩形波和锯齿波周期

测量矩形波和锯齿波幅值如图 22所示。 $|u_{o1}|_{\max} = 5.831\text{V}$ ,  $|u_{o2}|_{\max} = 3.002\text{V}$ 。

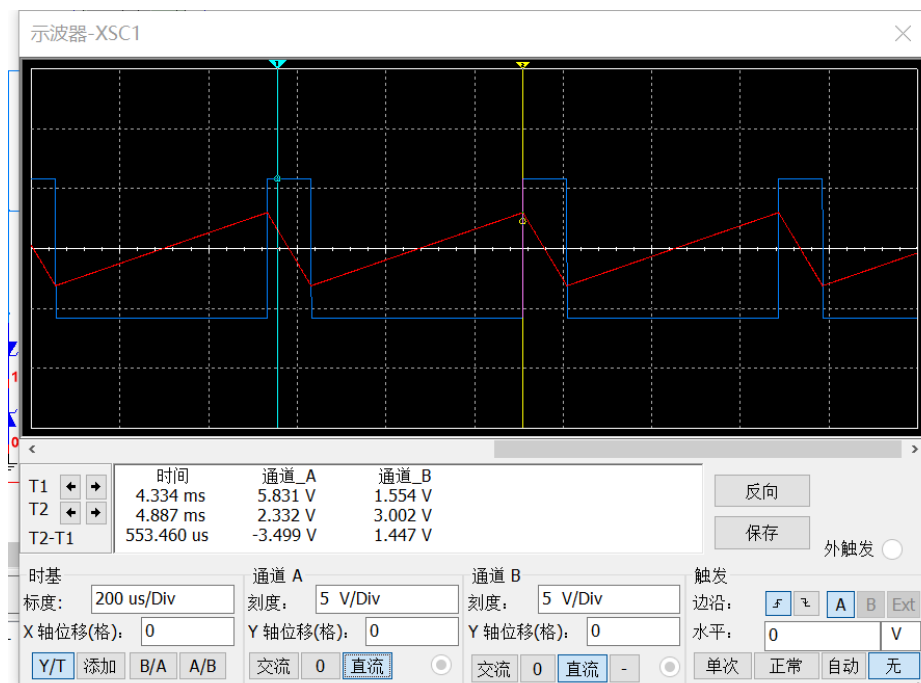


图 22 测量矩形波和锯齿波幅值

## 4 数据表格

### 4.1 必做实验

#### 4.1.1 正弦波发生电路

调节参数使频率为400Hz

	理论值	仿真值	实测值
$f/\text{Hz}$	400	408.16	

$R_W = 0$ 时

记录波形

刚好起振

	$ u_o _{\max}/\text{V}$	$f/\text{Hz}$	$R_W/\text{k}\Omega$
理论值		400	10
仿真值	1.272	408.16	10.1
实测值			

不失真且幅值最大

	$ u_o _{\max}/\text{V}$	$f/\text{Hz}$	$R_W/\text{k}\Omega$
仿真值	10.426	404.86	18
实测值			

调整 $R_W$ 使输出为5V/400Hz正弦波

	理论值	仿真值	实测值
$R_W/\text{k}\Omega$		17.103	

断开二极管

记录波形



### 4.1.2 方波——三角波振荡电路

$u_{o1}$  测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o1} _{\max}/V$	5.8	5.826	
$T/\mu s$	400	410.862	

	仿真值	实测值
上升时间 $t_r$	9.848 $\mu s$	
下降时间 $t_f$	6.917 $\mu s$	

$u_{o2}$  测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o2} _{\max}/V$	2.9	2.823	
$T/\mu s$	400	410.862	

滞回比较器电压传输特性

	理论值	仿真值	实测值
$U_{T+}/V$	2.9	3.007	
$U_{T-}/V$	-2.9	-3.007	
$u_{o1pp}/V$	11.6	11.700	

## 4.2 选做实验

$u_{o1}$  测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o1} _{\max}/V$	5.8	5.831	
$T/\mu s$		576.775	

$u_{o2}$  测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o2} _{\max}/V$	2.9	3.002	
$T/\mu s$		576.775	

	仿真值	实测值
上升时间 $T_r$	477.643	
下降时间 $T_f$	99.341	

5 硬件实验

5.1 必做实验

5.1.1 正弦波发生电路

调节参数使频率为400Hz

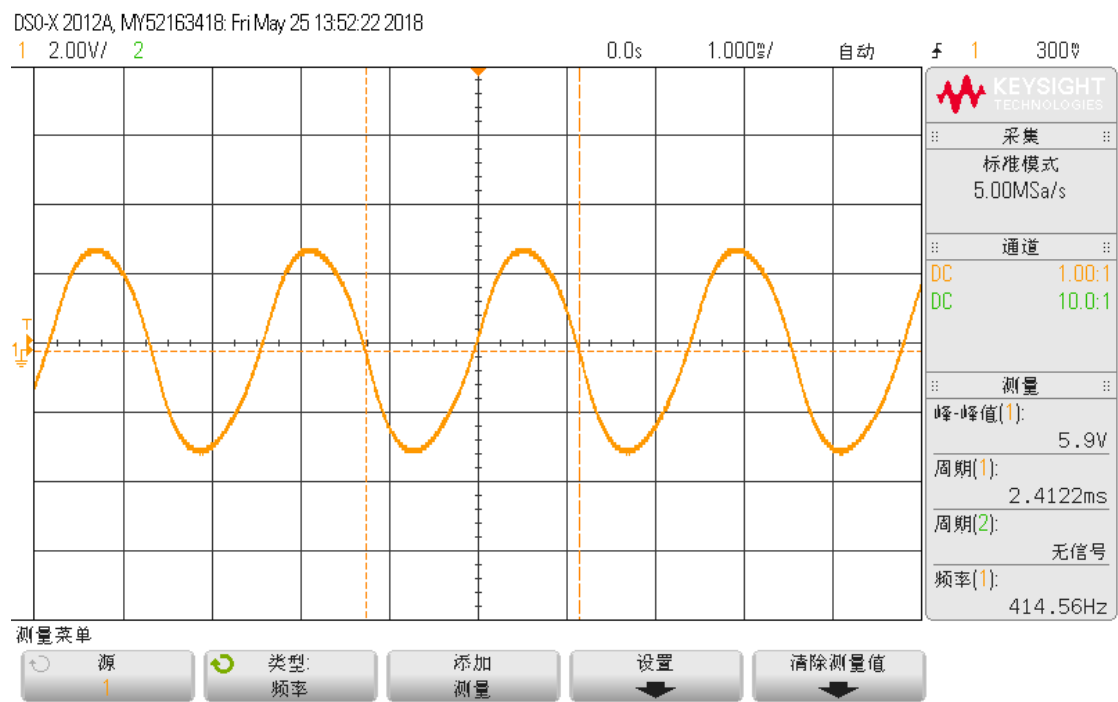


图 23 调节参数使频率为400Hz波形截图

图 23是实测的波形，结果记录于表 1所示。

表 1 正弦波发生电路频率记录

	理论值	仿真值	实测值
$f/\text{Hz}$	400	408.16	414.56

可见实测值和理论值与仿真值比较接近。实验中参数的选择与理论推导和仿真中相同。其中微小的偏差可能来自于元件参数的误差。

$R_w = 0$ 时

记录输出波形，如图 24 所示。可见电路没有起振。事实上，此时电路的  $|\dot{A}\dot{F}| < 1$ ，则输出经历反馈和放大电路后会衰减，所以示波器上看到输出几乎为零。

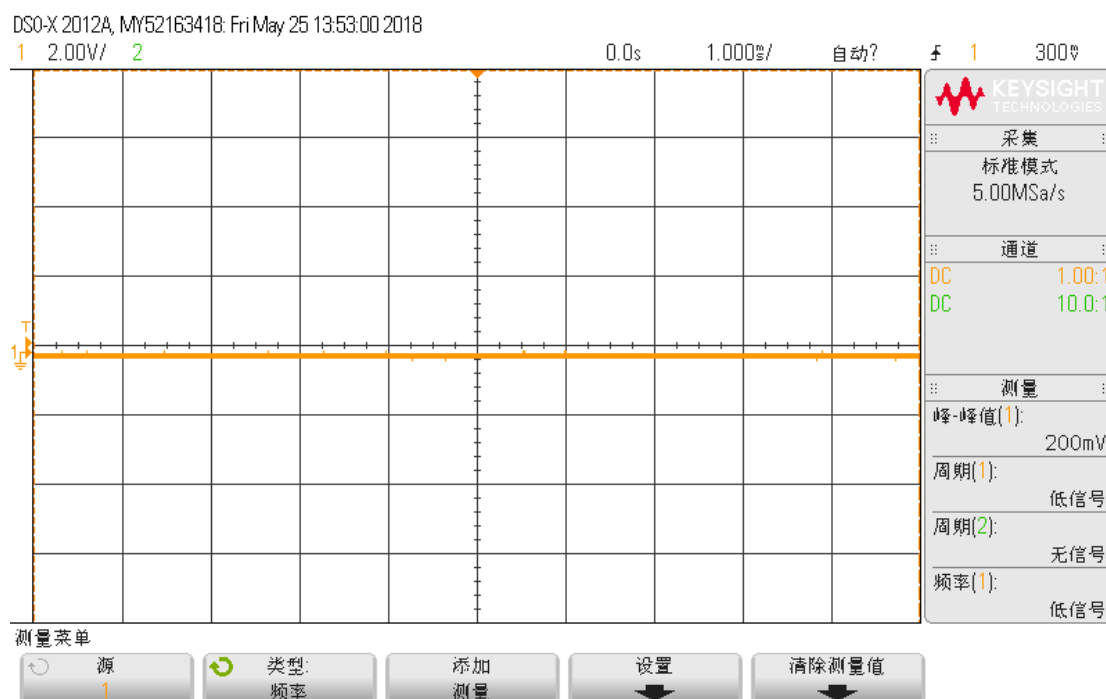


图 24  $R_w = 0$ 时实验波形

刚好起振

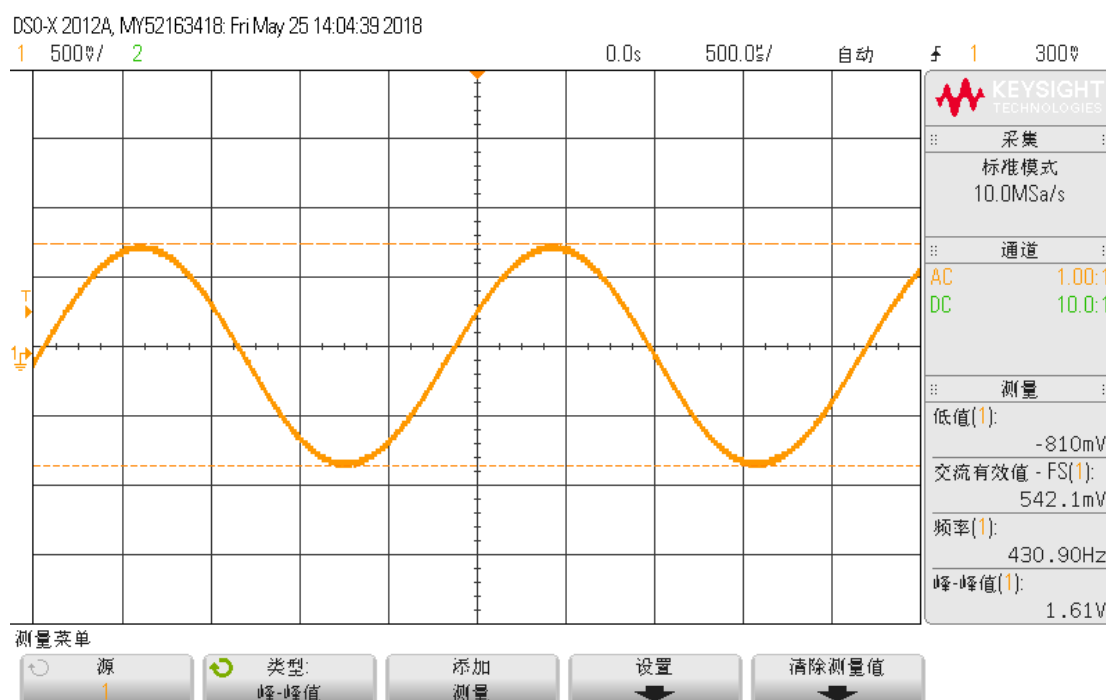


图 25 刚好起振时实验波形

缓慢调节电位器，至电路恰好起振，得到了图 25所示的波形。测量数据如表 2所示。需要指出的是，在预习中得到的关于电压的理论值和仿真值我都取的是幅值，而实验中老师要求我们测量峰峰值。所以在数据处理中，我将理论值和仿真值都换算成峰峰值，以便与实测值比较，本实验中后面的部分也涉及到这个问题，故不再赘述。

从实验数据中可以看出，实测值的峰峰值比仿真值要小。事实上，电路起振后能够产生稳定的波形离不开二极管的稳幅作用，而这属于非线性环节。由于仿真中采用的二极管模型和硬件实验中使用的二极管不尽相同，所以输出电压的峰峰值会有差异。

另一方面可以看到实测的频率比理论和仿真相比都较高。实验中发现，在产生振荡后， $R_w$ 越大，测得输出频率就越小。按照理论，输出的频率应该只与选频网络有关。分析原因，可能是因为在改变 $R_w$ 后，运放的两个输入端的平衡性变化，从而一定程度上影响到了选频网络的特性。开始起振时 $R_w$ 的取值与理论值和仿真值十分接近。

表 2 刚好起振时数据记录表

	$ u_o _{pp}/V$	$f/Hz$	$R_w/k\Omega$
理论值		400	10
仿真值	2.524	408.16	10.1
实测值	1.61	430.90	10.45

### 不失真且幅值最大

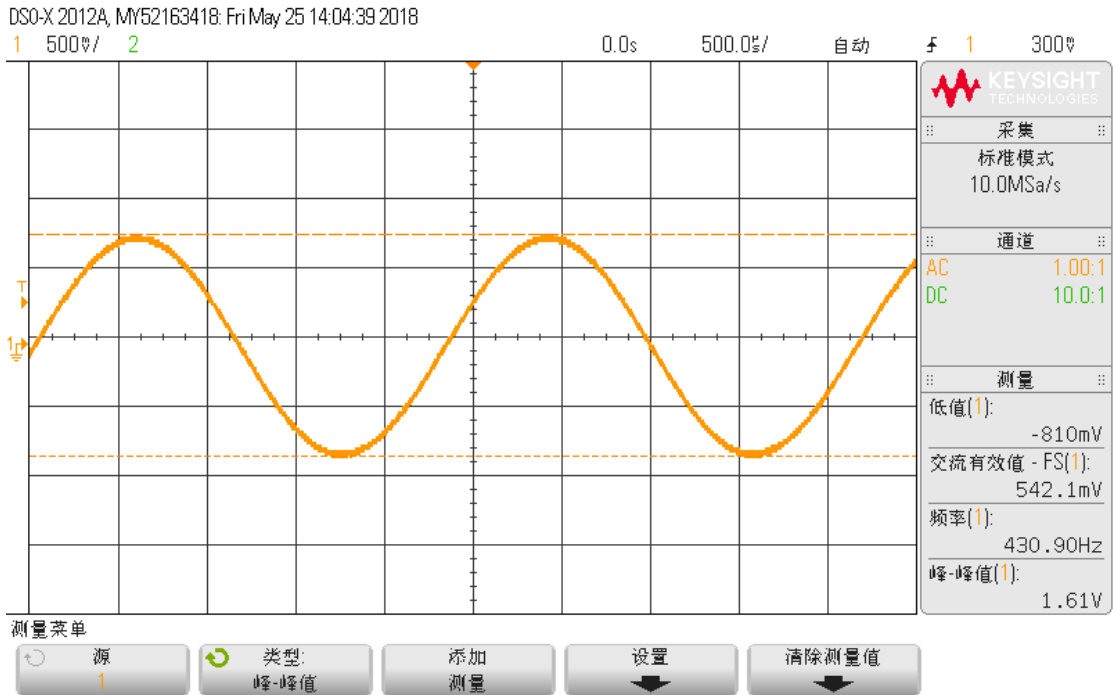


图 26 不失真且幅值最大时实验波形

波形如图 26所示，相关测量数据记录在表 3中。调节 $R_w$ 使得输出恰好不

失真且幅值最大，此时 $R_W = 18.39\text{k}\Omega$ ，与仿真值接近。此时实测的峰峰值也与仿真值十分接近，说明仿真中使用的运放模型与实际运放的最大输出电压比较接近。另一方面，和前面的分析类似，此时实测的频率比刚起振时的频率小。

表 3 不失真且幅值最大时数据记录表

	$ u_o _{pp}/\text{V}$	$f/\text{Hz}$	$R_W/\text{k}\Omega$
仿真值	20.852	404.86	18
实测值	20.7	396.95	18.39

调整 $R_W$ 使输出为5V/400Hz正弦波

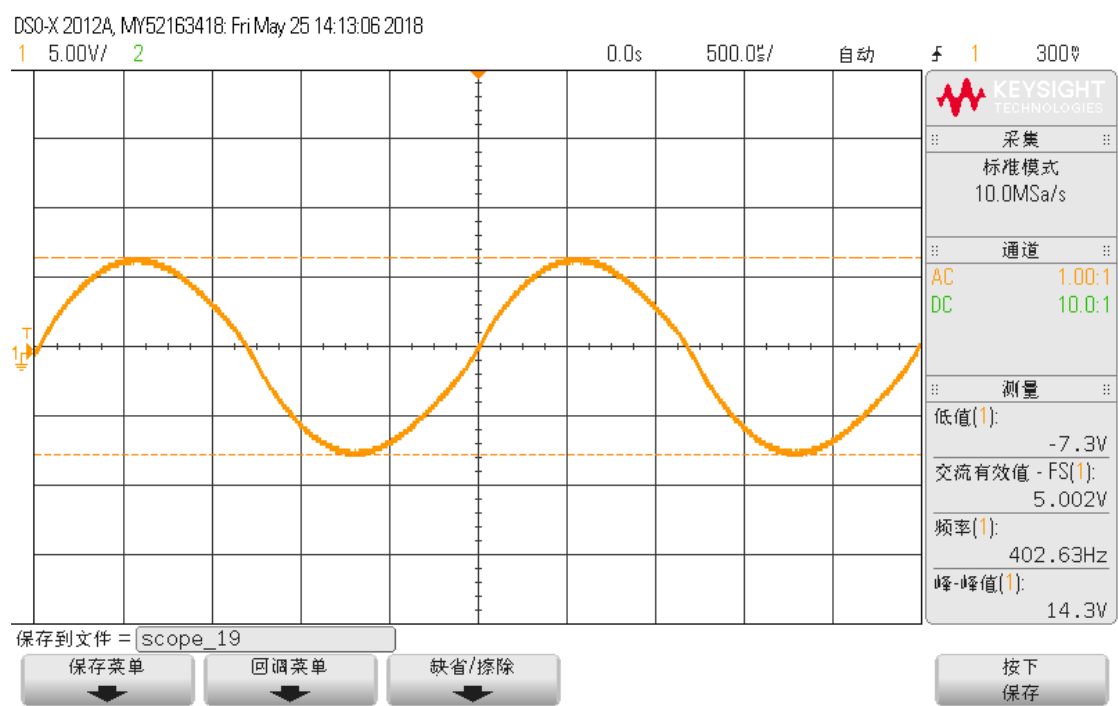


图 27 5V正弦波时实验波形

仔细调节 $R_W$ ，使得输出为5V正弦波，如图 27所示。此时 $R_W = 17.39\text{k}\Omega$ ，从表 4可知该数值与仿真值十分接近。

表 4 5V正弦波数据记录表

	理论值	仿真值	实测值
$R_W/\text{k}\Omega$		17.103	17.39

断开二极管

将输出端的二极管断开，首先调节 $R_W$ 使得电路恰好起振，得到图 28所示

波形。可见电路刚刚起振就有所失真，峰峰值已经达到了21.5V。

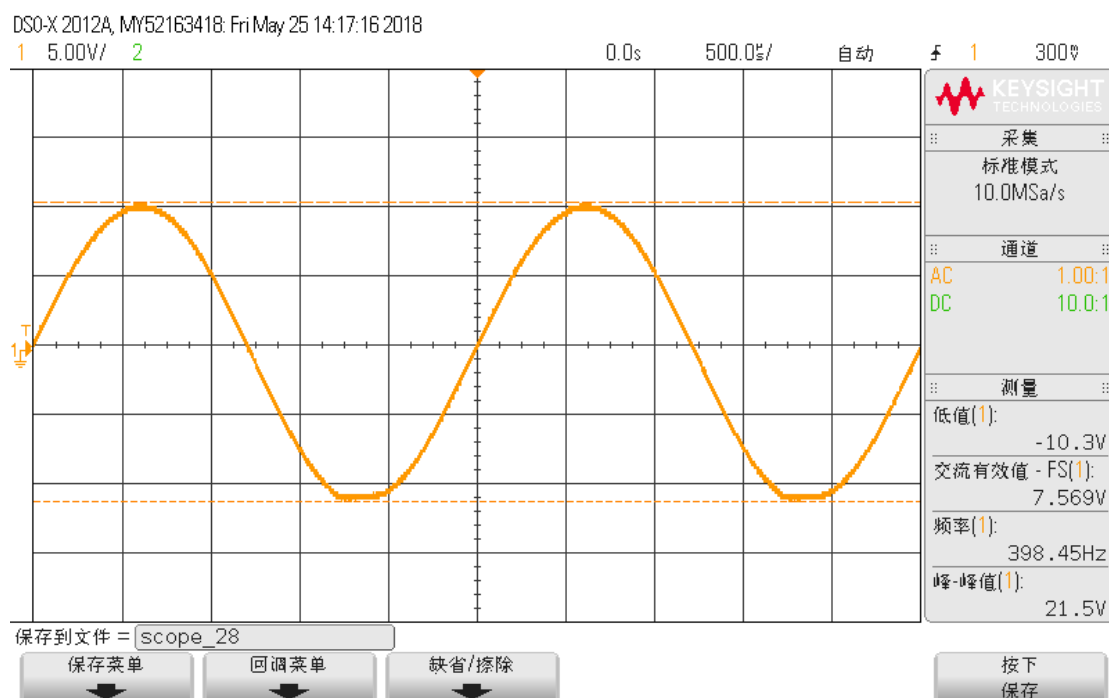


图 28 断开二极管刚好起振

进一步地，调节 $R_W = 10.45k\Omega$ ，即断开二极管之前刚刚起振时的 $R_W$ 取值，如图 29，发现此时失真已经十分严重。

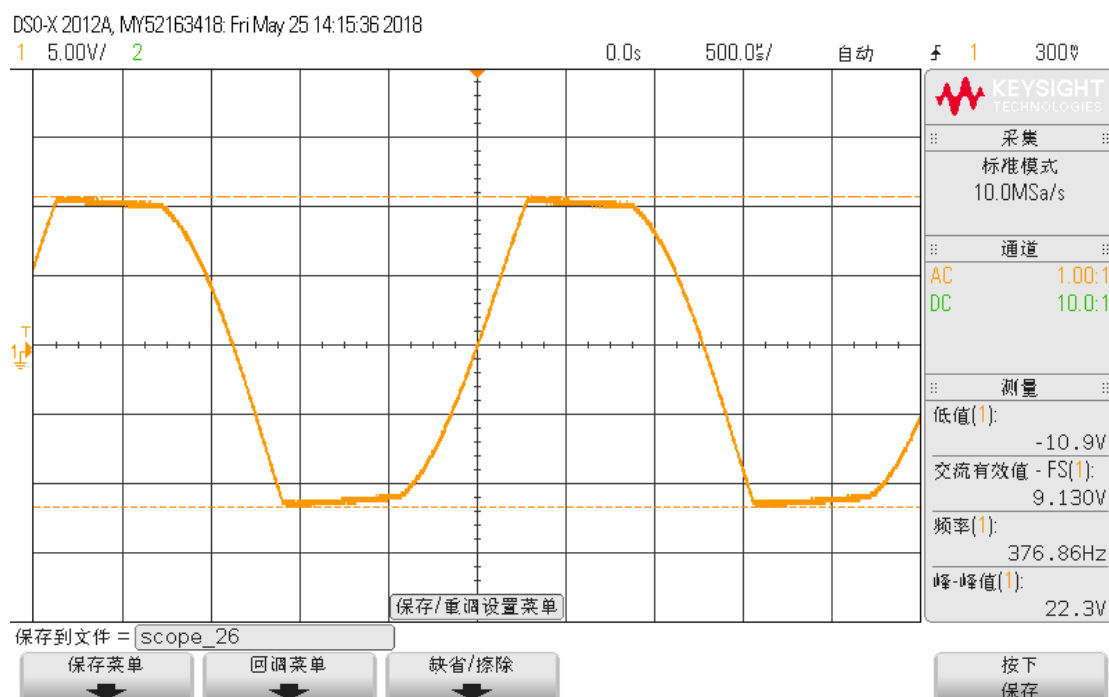


图 29 断开二极管调节 $R_W = 10.45k\Omega$

### 5.1.2 方波——三角波振荡电路

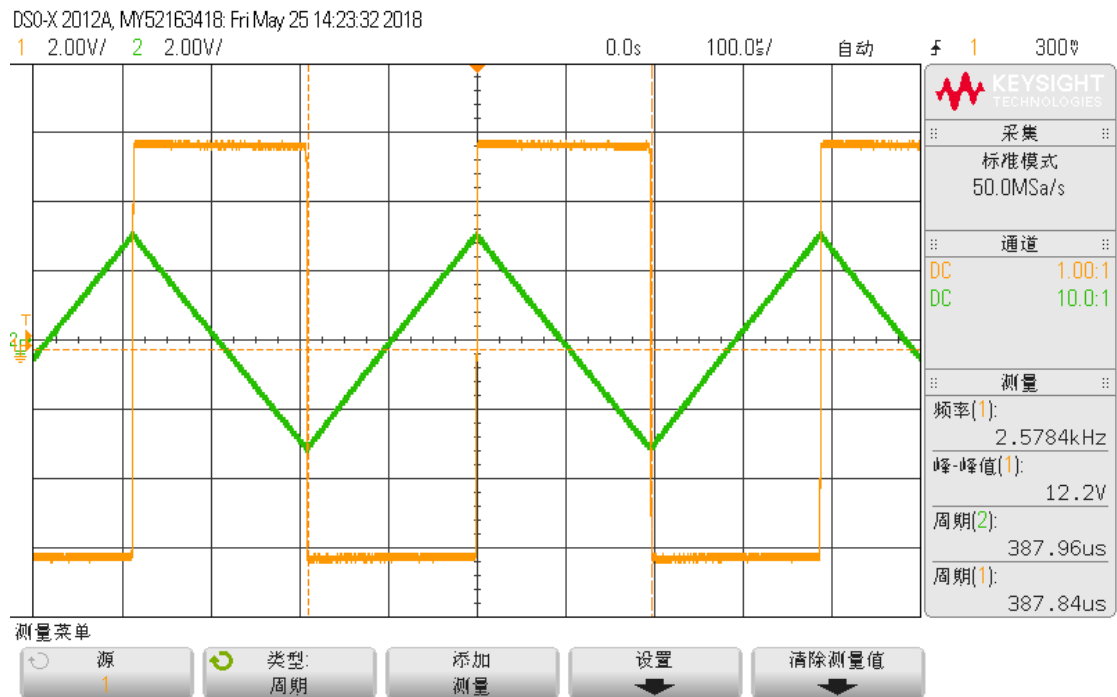


图 30 方波——三角波振荡电路实验波形

实验波形如所示。可见波形比较完美。测量 $u_{o1}$ 的峰峰值和周期的结果如图30所示，方波相关的测量数据如表 5和表 6所示。可见实测的峰峰值与理论和仿真比较接近，而周期偏小。这可能是由于实际元件参数存在些许误差。

#### $u_{o1}$ 测量

表 5 方波——三角波振荡电路 $u_{o1}$ 峰峰值及周期测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o1} _{pp}/V$	11.6	11.652	12.2
$T/\mu s$	400	410.862	387.88

表 6 方波——三角波振荡电路 $u_{o1}$ 上升和下降时间测量

	仿真值	实测值
上升时间 $t_r$	9.848 $\mu s$	920ns
下降时间 $t_f$	6.917 $\mu s$	920ns

上升时间和下降时间的实测值与仿真值存在偏差是之前早就预料到的。仿真中的上升时间和下降时间很大程度上取决于仿真设置的步长，而实验中则取



决于元件的实际参数。

$u_{o2}$ 测量

表 7 方波——三角波振荡电路 $u_{o2}$ 峰峰值和周期测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o2} _{pp}/V$	5.8	5.646	6.4
$T/\mu s$	400	410.862	388.26

$u_{o2}$ 的测量数据如表 7所示。峰峰值的实测值偏大，可能是因为稳压管的实际参数与仿真中的不同；周期也有所偏差，不过与方波的周期很接近，这一点十分符合实际。

滞回比较器电压传输特性

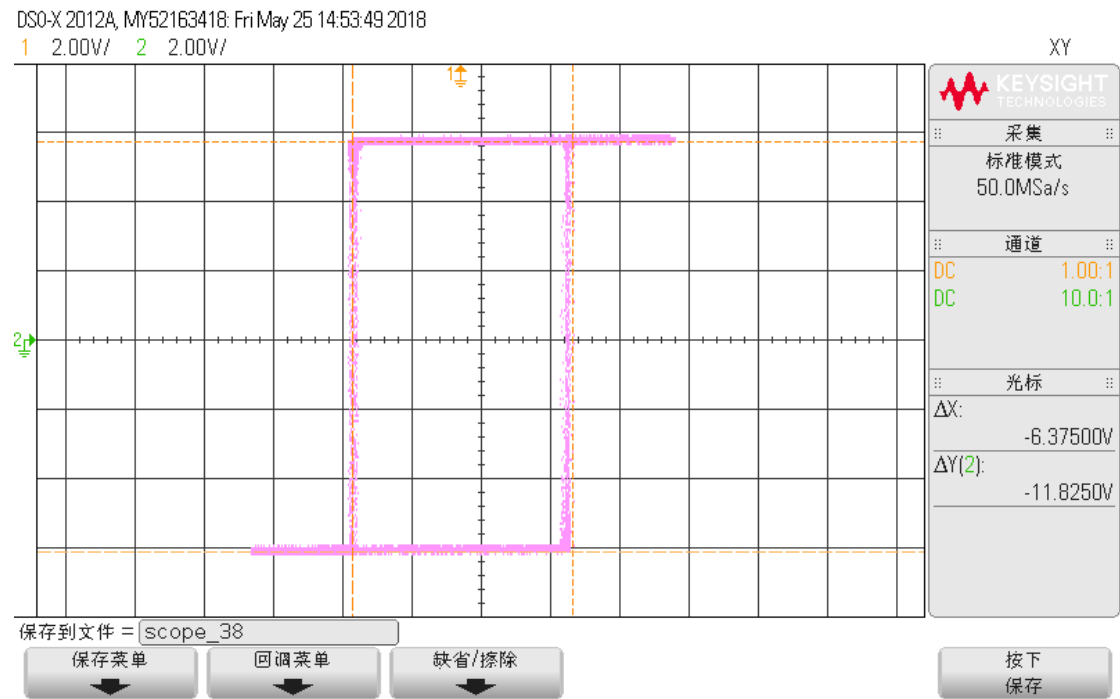


图 31 滞回比较器电压传输特性实验波形

使用示波器的XY时基模式测得滞回比较器的电压传输特性如图 31所示，测量数据如表 8所示。从中可以注意到 $U_{T+}$ 、 $U_{T-}$ 、 $u_{o1pp}$ 实测值比理论值和仿真值都偏大，这是由于实际稳压管与理论或仿真中的模型不同，这也解释了三角波峰峰值偏大的原因。

表 8 滞回比较器传输特性测量

	理论值	仿真值	实测值
$U_{T+}/V$	2.9	3.007	3.25
$U_{T-}/V$	-2.9	-3.007	-3.125
$u_{o1pp}/V$	11.6	11.700	11.825

## 5.2 选做实验

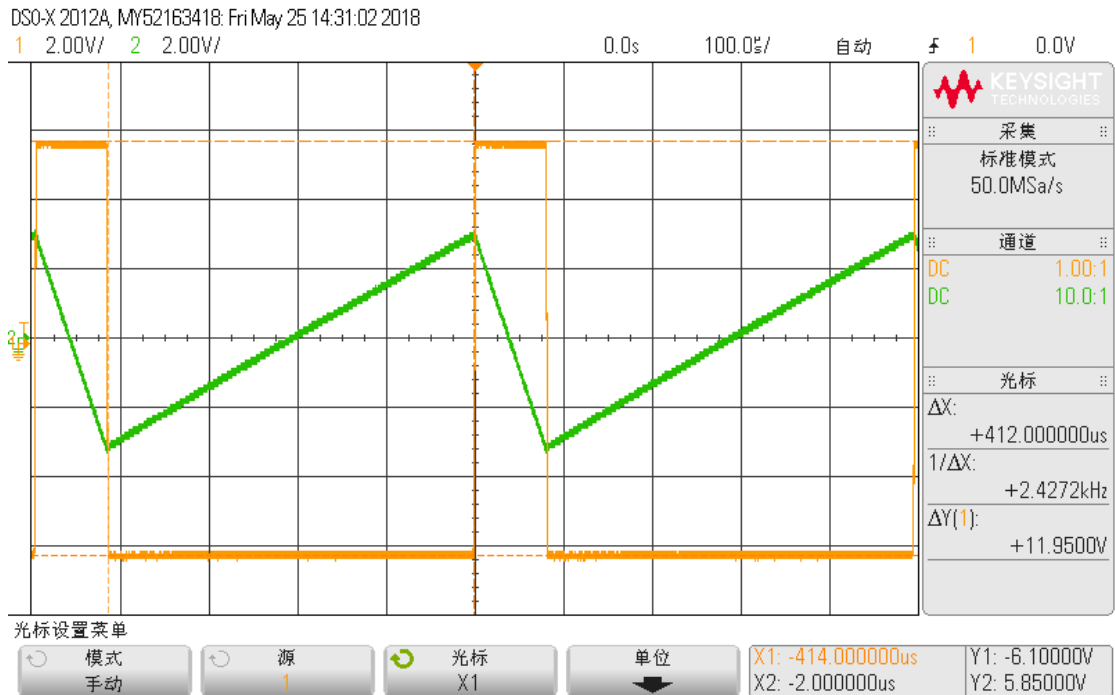


图 32 矩形波——锯齿波发生电路波形

图 32是矩形波——锯齿波的实验波形。

### $u_{o1}$ 测量

表 10中为矩形波的测量数据。这里由于实际采用的电位器与仿真中采用的不一样，测得周期差别较大（实际采用了学习机上的47kΩ电位器）。

表 9 矩形波——锯齿波发生电路 $u_{o1}$ 幅值和周期测量

	理论值	仿真值	实测值pp
$ u_{o1} _{pp}/V$	11.6	11.662	12.1
$T/\mu s$		576.775	495.56

## $u_{o2}$ 测量

表 11 为锯齿波的峰峰值和周期测量数据。锯齿波的峰峰值较大仍然是由于稳压管的稳压值比理论或仿真偏大造成的，周期与锯齿波的周期几乎相同。

表 10 矩形波——锯齿波发生电路  $u_{o2}$  幅值和周期测量

	理论值	仿真值	实测值
$ u_{o2} _{pp}/V$	5.8	6.004	6.4
$T/\mu s$		576.775	495.40

表 11 矩形波——锯齿波发生电路上升和下降时间测量

	仿真值	实测值
上升时间 $T_r$	477.643	412
下降时间 $T_f$	99.341	82

表 12 为上升时间和下降时间的测量。可见下降时间与上升时间的比值为

$$\frac{82}{412} = 19.9\%$$

满足下降时间与上升时间比值约为 20% 的条件。此时  $R_{w1} = 39.5k\Omega$ ,

$R_{w2} = 7.28k\Omega$ , 可知

$$\frac{R_{w1}}{R_{w2}} = 5.4 \approx 5$$

也比较符合理论。

## 6 思考题

图 1 电路中两个并联二极管的作用是什么？

答：二极管的作用是提供非线性环节，起到稳幅的作用。从实验结果中可以看到，有二极管的时候电路可以稳定振荡，而去掉二极管后电路一开始振荡就已经失真。

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？

答：由于示波器的存在一个采样频率，如果输入电压的频率过高，可能导致示波器的采样速率跟不上，从而不能保证波形的实时性。例如如果输入电压

的频率恰好与示波器的采样频率相等，则在示波器看来输入电压始终为同一个数值，则波形显然会有问题。实际应用时既要保证扫描速度快到可以看到连续的传输特性曲线，又不要太快以至于与示波器采样频率接近。

## 7 实验中遇到的问题和解决方法

由于预习比较充分，实验整体上比较顺利。整个过程只出现了一个问题：滞回比较器波形不正确。刚开始看到波形不正确后，我立即切换时基模式到Y-T，观察波形，果然与理论结果不符。这时我静下心来一步步检查电路，果然发现有一条线接错了。改正过来之后，得到了正确的波形。

我认为这次比较成功的原因一方面是预习工作比较充分，提前将电路搭建完毕；另一方面是实验顺序安排比较合理。我在做完必做实验的方波——三角波发生电路后立即做了选做实验而不是测电压滞回比较器，这是因为选做实验与方波——三角波发生电路仅仅相差一个模块。做完选做之后我才将电路拆开测滞回比较器的传输特性曲线。虽然中间出了一点小问题，不过我很快就将其解决了。