

课程名称：模拟电子技术实验 指导老师：张伟 成绩：

实验名称：信号发生电路实验 实验类型：模电实验 同组学生姓名：褚玘铖

一、实验目的和要求（必填） 二、实验内容和原理（必填）

三、主要仪器设备（必填） 四、操作方法和实验步骤

五、实验数据记录和处理 六、实验结果与分析（必填）

七、讨论、心得

## 实验2 信号发生电路实验

### 1. 实验目的

- 学会按照需求设计 RC 正弦波震荡电路，简单矩形波发生电路、方波-三角波发生电路。
- 掌握 RC 正弦波振荡电路的构成及工作原理；
- 学习用集成运算放大器构成的 RC 正弦波振荡电路的设计与调试方法；
- 研究 RC 正弦波振荡电路的起振条件和稳幅特性。
- 学习用集成运算放大器（或电压比较器）构成矩形波发生器的设计与调试方法；
- 熟悉矩形波发生器的一些主要性能指标及其测量方法。
- 学习用两个集成运算放大器或集成电压比较器构成的三角波-方波发生电路的设计方法与调试方法；
- 了解集成运算放大器的波形变换及非线性应用。

### 2. 实验准备

- 阅读 PSpice 软件的使用说明。
- 阅读三个信号发生电路的设计讲义。
- 设计并绘制好三个电路的 Pspice 原理图。

### 3. 实验内容

#### 3.1. RC 正弦波振荡电路

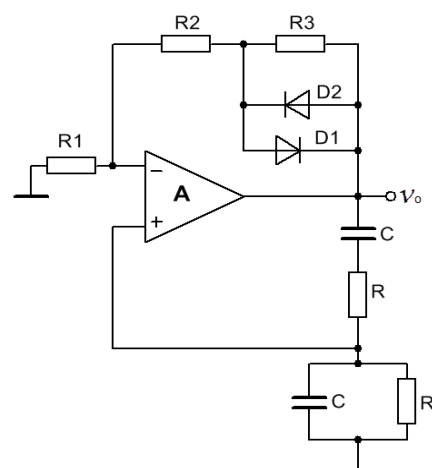
- 设计一个振荡频率为 1.54KHz 的振荡电路，说明 R、C、R1、R2、R3、D1、D2 及运放的选取原则，确定参数。
- 用 Cadence OrCAD 仿真软件对此电路进行仿真分析，并观测各点的电压和电流波形，电流波形包括运放的输出电流和二极管的电流。计算所产生正弦波的失真度。
- 用 Cadence OrCAD 仿真软件研究输出正弦波的幅值大小受哪些参数影响。
- 用 Cadence OrCAD 仿真软件仿真当  $f_{BW} >> 3f_0$  条件不满足时会产生什么现象。

#### 3.2. 简单矩形波发生电路

- 按上课仿真电路的参数仿真
- 理论计算该矩形波发生电路产生的方波、近似三角波的幅值和周期。
- 用 Cadence OrCAD 仿真软件对此电路进行仿真分析，并观测各点的电压和电流波形。并计算近似三角波的线性度。

#### 3.3. 方波-三角波发生电路

- 要求：输出频率 1kHz-10kHz；三角波  $V_{om} = \pm 8V$ 。稳压管采用 6.2V/1W。R 采用可变电阻。



**3.3.2.** 按设计要求，说明各元件及运放的选取原则、并确定各元件的参数。

**3.3.3.** 用 Cadence OrCAD 仿真软件对此电路进行仿真分析，并观测各点的电压和电流波形，电流波形包括运放的输出电流和稳压管的电流。并测量方波的上升时间和下降时间。

#### 4. 实验内容与步骤

##### 4.1. RC 正弦波振荡电路

###### 4.1.1. 实验原理及设计过程

###### 4.1.1.1. 确定参数

RC 串并联桥式正弦振荡器又称文氏电桥振荡器，由 RC 串并联选频网络和同相放大电路组成，一个典型的桥式正弦波振荡电路如右图所示。RC 串并联选频网络将输出电压  $V_o$  反馈到集成运放的同相输入端，形成正反馈。根据产生振荡的相位条件，可得电路的

振荡频率  $f_o$  为：
$$\frac{1}{2\pi RC}$$

电路在起振时须满足： $\frac{R_f}{R_1} > 2$

式中， $R_f = R_2 + (R_3 // R_d)$ ， $R_d$  为二极管正向导通时的等效电阻。当电

路达到稳定振荡时，其幅值平衡条件为： $\frac{R_f}{R_1} = 2$

为了使选频网络的选频特性尽量不受集成运算放大器的输入和输出电阻影响，通常应按下列关系来初选电阻  $R$  的值。

$$R_i \gg R \gg R_o$$

式中  $R_i$  为集成运算放大器同相端的输入电阻，一般为几百千欧以上； $R_o$  为集成运算放大器的输出电阻，一般在几百欧以下。因此  $R$  的取值一般在 10K 到几十 K 之间。

###### 4.1.1.2. 确定 $R_1$ 和 $R_f = R_2 + (R_3 // R_d)$ ， $R_d$ 为二极管正向导通时的等效电阻

由  $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} > 3$ ，可知  $R_f > 2R_1$ ，同时为了满足直流平衡条件  $R = R_1 // R_f$ ，于是导出  $R_1 = \left(\frac{3.1}{2.1} \sim \frac{3.5}{2.5}\right) R$

###### 4.1.1.3. 稳幅方案

稳幅电路由二极管  $D_1$ 、 $D_2$  与电阻  $R_{f2}$  并联构成。当电路起振时，电路  $\dot{V}_o$  输出幅度较小，二极管  $D_1$ 、 $D_2$  接近开路，由  $D_1$ 、 $D_2$  和  $R_{f2}$  组成的并联支路的等效电阻近似为  $R_{f2}$  的阻值，这使

$\dot{A}_v = \left(1 + \frac{(R_{f1} + R_{f2})}{R_3}\right)$  较大，可满足  $\dot{A}_v > 3$  的起振条件；当电路起振后，电路  $\dot{V}_o$  输出幅度增大，使

二极管  $D_1$  或  $D_2$  导通，此时，由  $D_1$ 、 $D_2$  和  $R_{f2}$  组成的并联支路的等效电阻减小，即在如图 8-5-3 所示的二极管正向伏安特性曲线中，在  $Q_1$  点处，PN 结的等效动态电阻为  $r_{D1} = \left.\frac{dv_D}{di_D}\right|_{Q_1}$ ；而在  $Q_2$  点处，PN

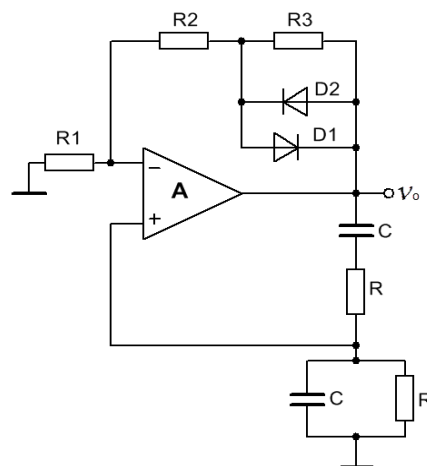
结的等效动态电阻为  $r_{D2} = \left.\frac{dv_D}{di_D}\right|_{Q_2}$ 。显然， $r_{D1} > r_{D2}$ ，二极管等效动态电阻呈非线性特性。其稳幅过程

为：当输出电压  $\dot{V}_o$  幅值增加时，使二极管正向导通时的动态电阻  $r_D$  减少，导致放大器的闭环增益

$\dot{A}_v = \left(1 + \frac{R_{f1} + (R_{f2} // r_D)}{R_3}\right)$  的减小，从而抑制了输出幅度  $\dot{V}_o$  增大；反之，当  $\dot{V}_o$  下降时，二极管动态

电阻  $r_D$  自动减增大，使  $\dot{V}_o$  回升，最终以维持输出幅值恒定。

###### 4.1.1.4. 设计过程



选  $R=10\text{k}\Omega$ ， $C=1/2\pi Rf_0=0.0103\mu\text{F}\approx 0.01\mu\text{F}$ ；根据  $R_f/R_1>2$ ，取  $R_f=2.1R_1$ 。这样既能保证起振，又不至于引起严重的波形失真。此外，为了减小运放输入失调电流及其温漂的影响，还应尽量满足  $R=R_1//R_f$ ，

即：  $R=(2.1/3.1)R_1$ ；  $R_1=(3.1/2.1)R\approx 15\text{k}\Omega$ （ $10\text{k}\Omega+5.1\text{k}\Omega$ ）；  $R_f=30\text{k}\Omega$

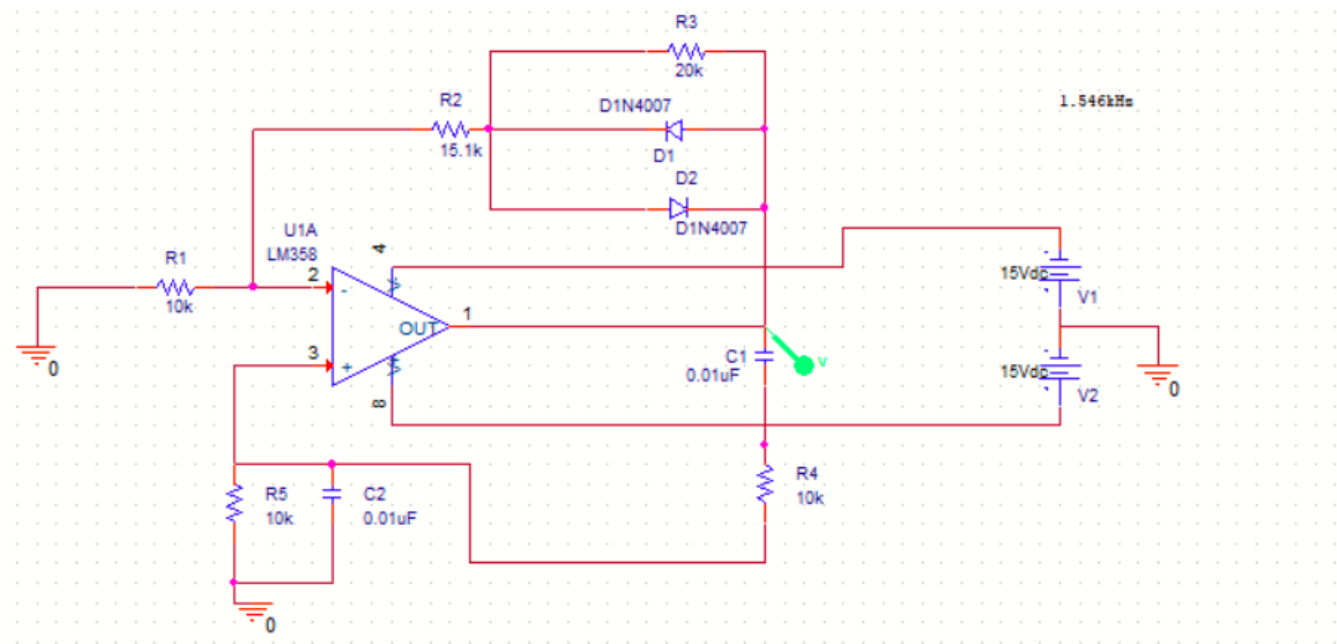
根据

$$R_f=R_2+(R_3//R_d)=R_2+R_3/2,$$

取  $R_3=10\text{k}\Omega$ ，得

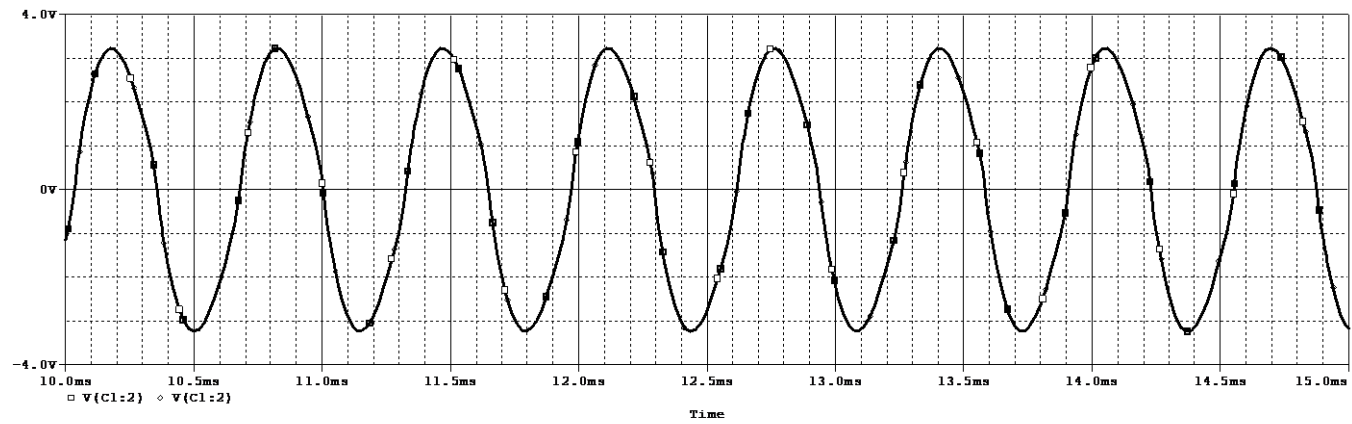
$$R_2=R_f-R_3/2=15.1\text{k}\Omega$$
（ $10\text{k}\Omega+5.1\text{k}\Omega$ ）。

随着  $V_o$  的增加， $D_1$  或  $D_2$  导通， $R_3$  逐渐被二极管短接， $(R_3//R_d)$ 自动减小，  $A_v$  自动下降到  $|A_vF_v|=1$ ，使得输出  $V_o$  稳定在某值上。

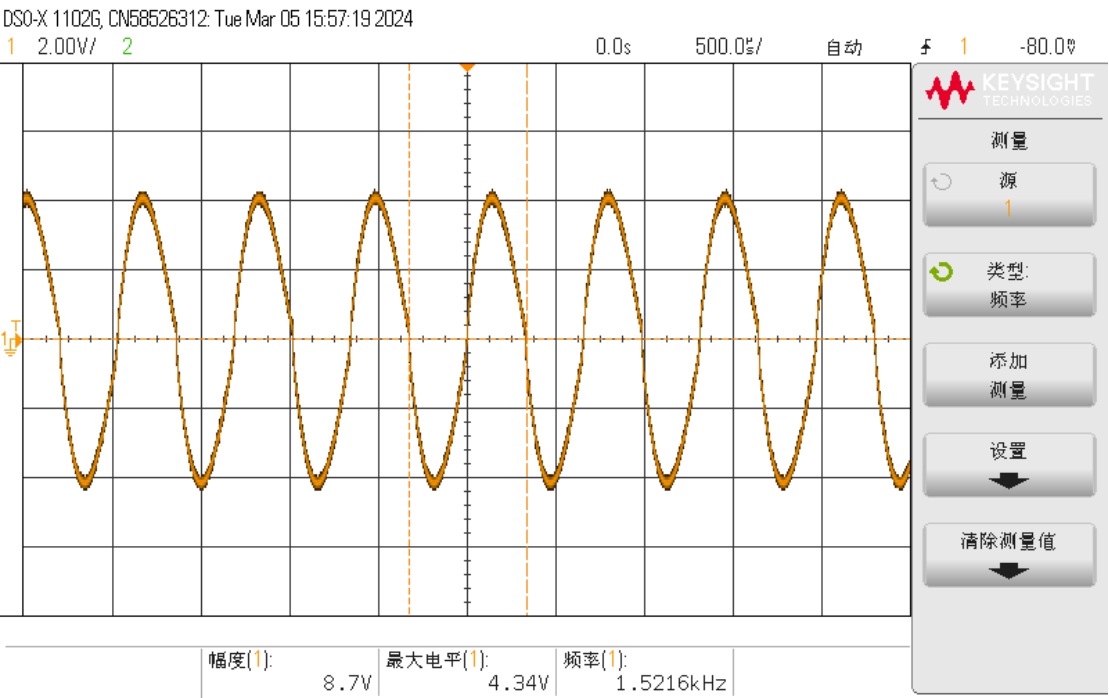


4.1.2. 仿真分析及对应的接线测量结果

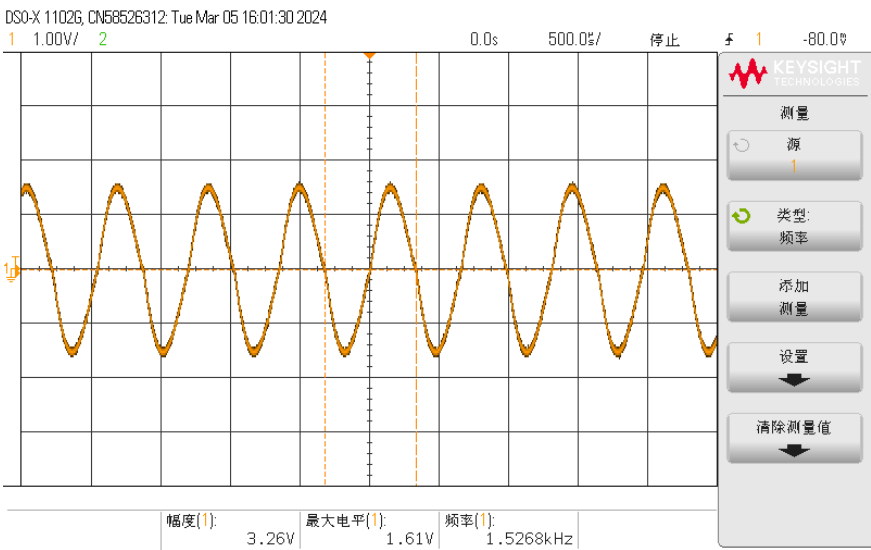
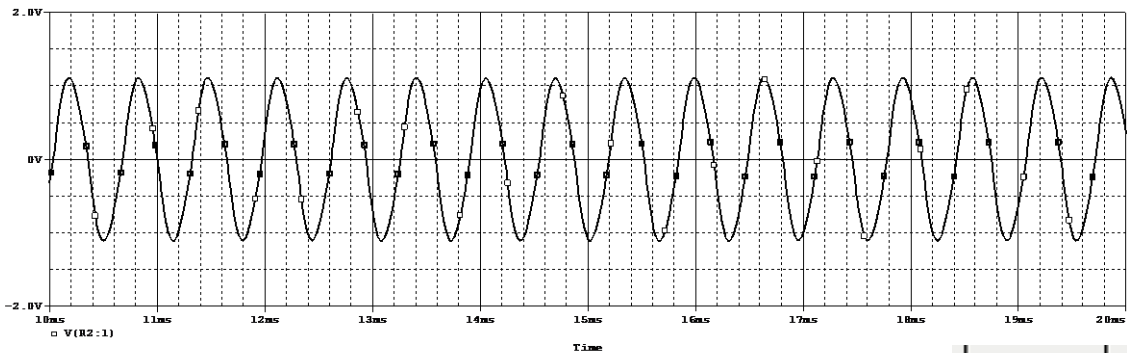
$V_o$ : 输出电压



Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	8.2454m
CURSOR 1,2	V(U1A:OUT)	3.2301

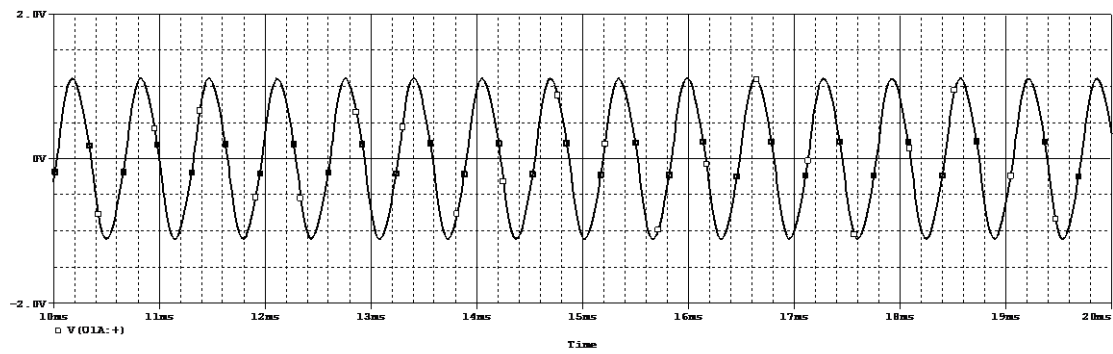


V2:



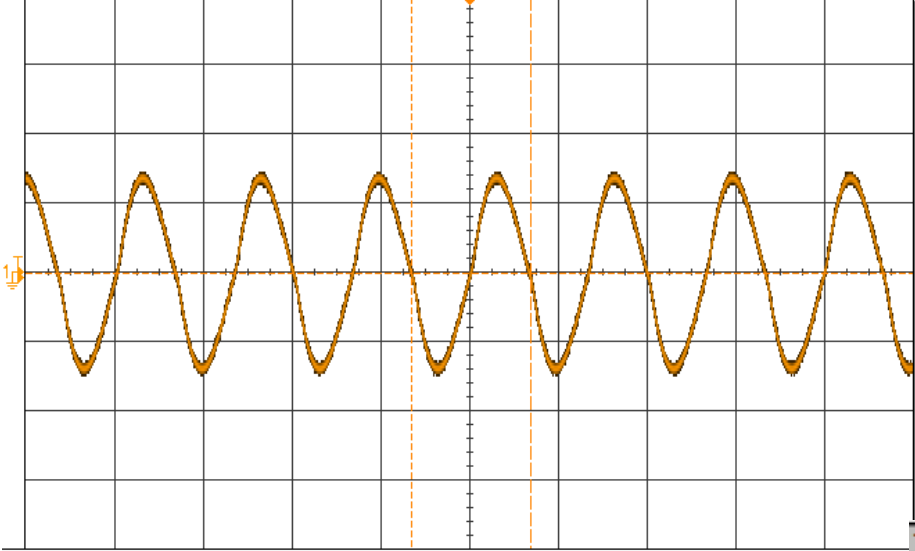
Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	8.2454m
CURSOR 1,2	V(U1A:-)	1.1085

V3:



DSO-X 1102G, CN58526312 Tue Mar 05 16:02:56 2024

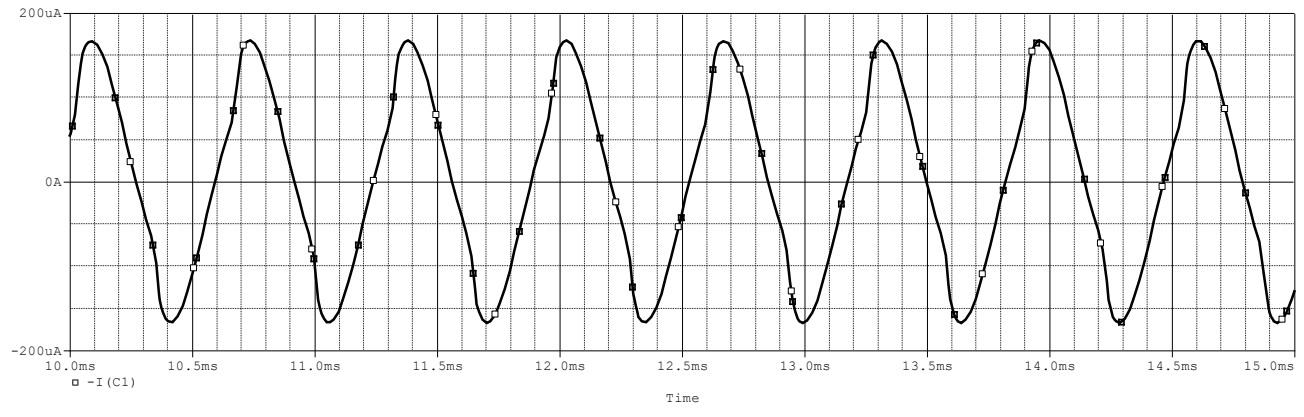
1 1.00V/ 2 0.0s 500.0%/ 自动 f 1 -87.5%



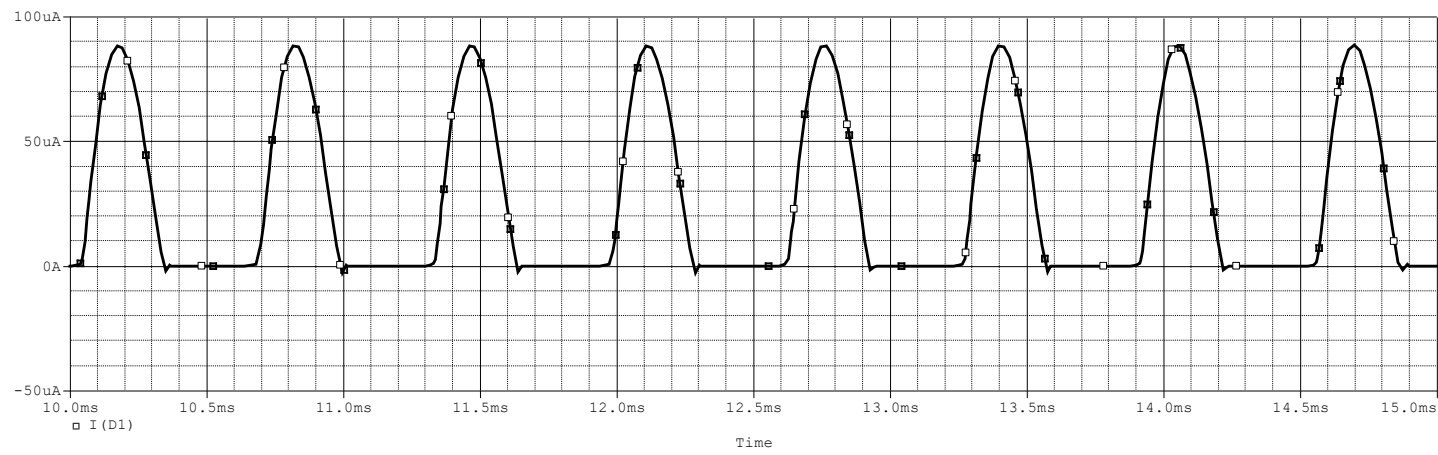
幅度(1): 2.93V    最大电平(1): 1.45V    频率(1): 1.5002kHz

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	8.8914m
CURSOR 1,2	V(R5:2)	1.1086

I<sub>o</sub>:

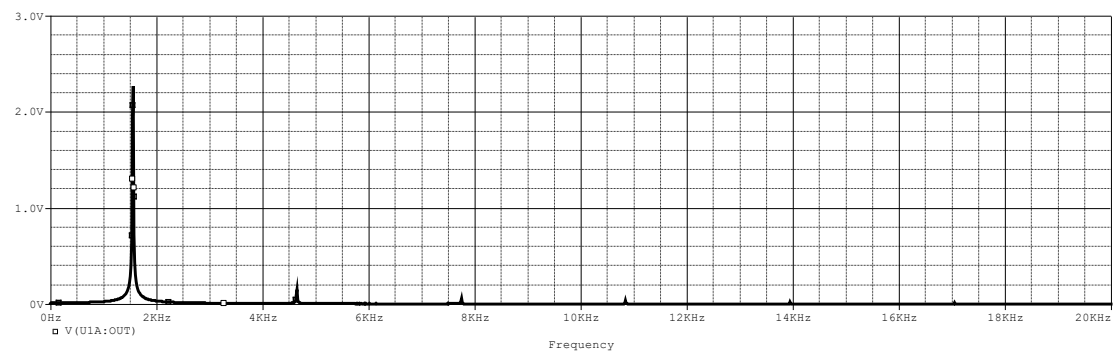


$I_{D1}$ :



$f$ :FFT 后得到 1.56kHz

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	1.5556K



	频率/kHz	幅度/mV
基波分量	1.56	2271.8
三次谐波	4.65	153.94
五次谐波	7.75	62.372
七次谐波	10.847	37.342
失真度	7.5%	

4.1.3. 理论值、仿真值、实测值的比较（）

	仿真值	实测值	相对误差
$V_o$	6.26V	8.7V	34.4%
$V_2$	2.22V	3.26V	45.0%
$V_3$	2.22V	2.93V	30.6%
$I_o$	166uA	/	/

实验名称：\_\_\_\_信号发生电路\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_严旭铨\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_3220101731\_\_\_\_

$I_{D1}$	88uA	/	/
$f$	1.56kHz	1.52kHz	2.56%

分析：

在做理论分析时，我们采用的计算模型都有一定的近似量，包括虚短虚断等理想化条件，同时一些器件的参数在仿真软件中的数据我们不清楚，而是直接采用了我们平时使用的值，此时会使得理论计算和仿真值之间存在误差。在实际测量和仿真之间同样存在类似问题，一些元器件可能存在老化，并且实验中的电压电流数值相对较小，在数据计算和处理过程中也可能产生较大误差。

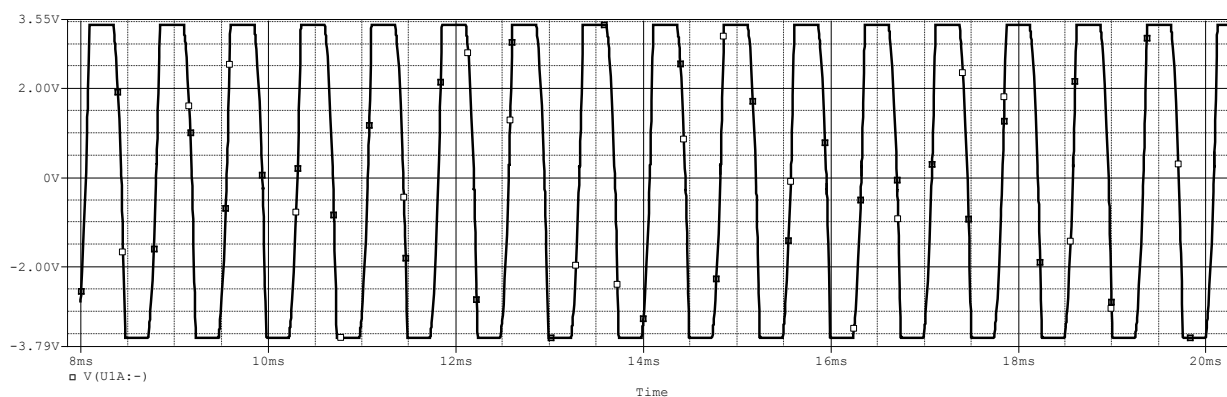
实际在设计电源的过程中，还要考虑手头现有的器件，例如一些数值的电阻和电容可能没有。总之需要在实际使用的过程中调整元件参数。

#### 4.1.4. 正弦波幅值大小受参数的影响

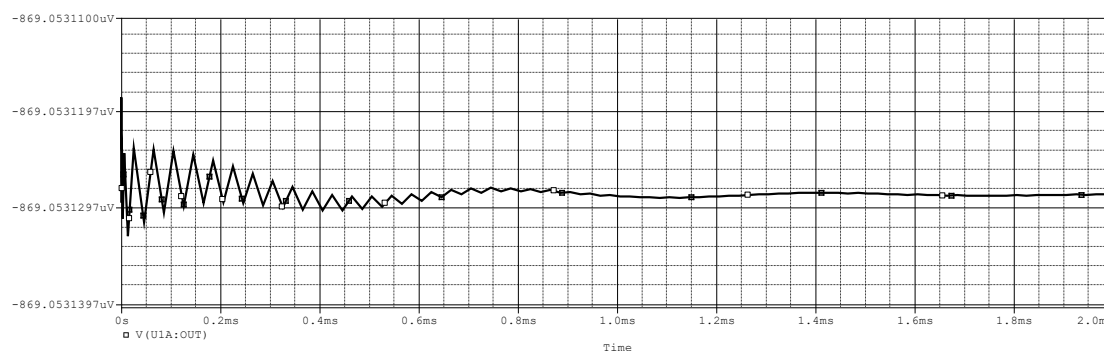
不妨改变 R1 (=15kΩ) 的阻值。

R1 = 5kΩ

此时明显失真，幅值  $V_o = 7.01V$ ，超出了 LM358 芯片的最大输出电压



R1 = 20kΩ

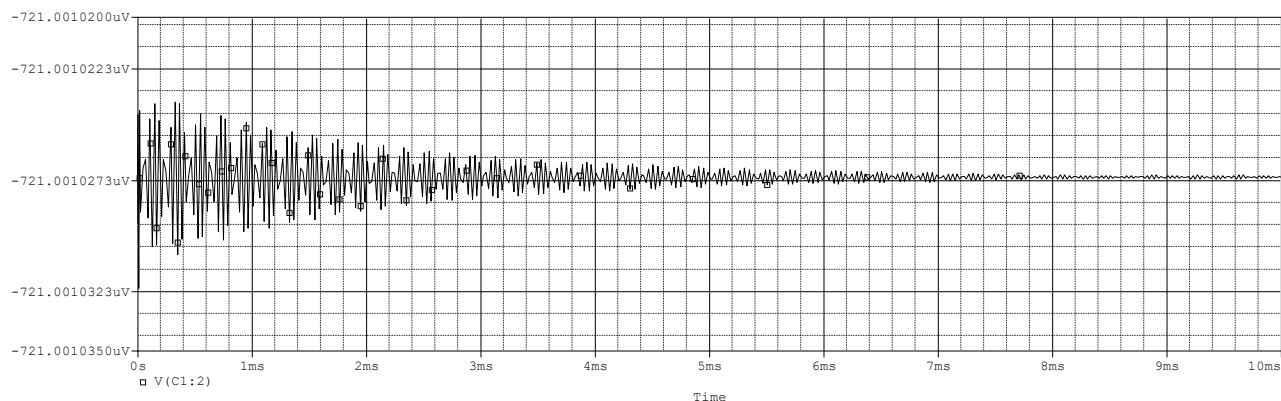


此时不满足  $\frac{R_f}{R_1} > 2$ ，无法正常起振

#### 4.1.5. 当 $A \cdot f_{BW} > 3f_o$ 条件不满足时

调节  $C1 = C2 = 0.0001\mu F$ ，此时无法正常起振。

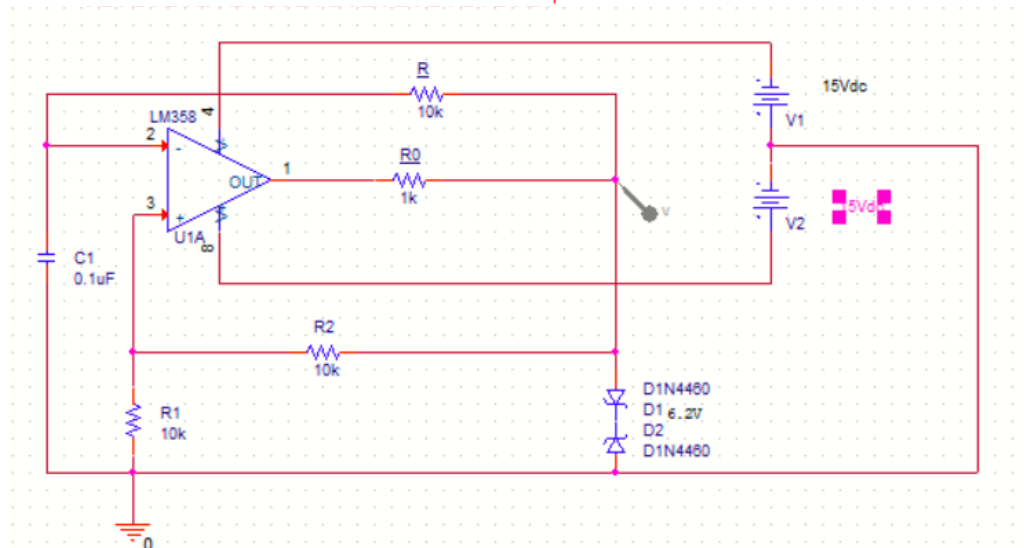
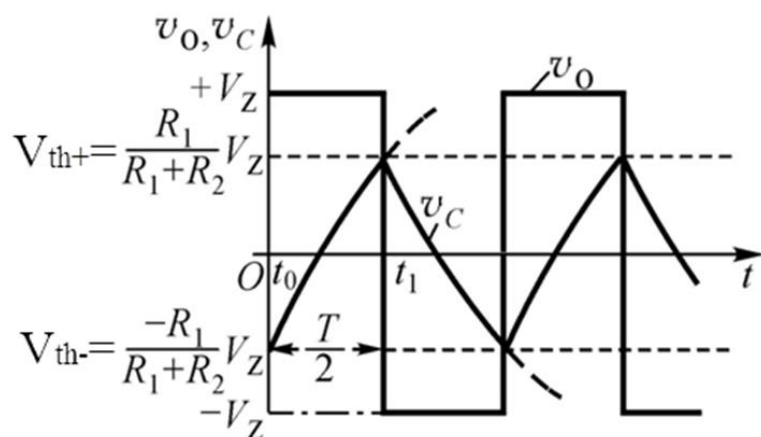
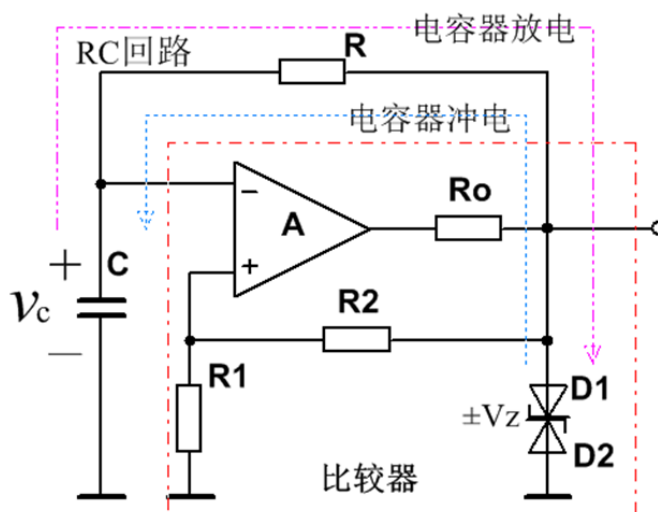




## 4.2. 简单矩形波发生电路

### 4.2.1. 实验原理及设计过程

简单矩形波发生电路如图所示，由反相输入的滞回比较器和 RC 电路组成。RC 回路既作为延迟环节，又作为反馈网络，通过 RC 充、放电实现输出状态的自动转换。其输出电压和电容器 C 上的电压波形图如下右图所示。波形图中的  $V_{th-}$  和  $V_{th+}$  分别为滞回比较器负门限电压和正门限电压。





取  $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R = 15\text{k}\Omega$ 。仿真采用 D1N4460 型号稳压管，稳压值为  $6.2\text{V}$ 。实际实验中采用  $5.1\text{V}$  的稳压管。

$$V_z = 5.1\text{V} + 0.7\text{V} = 5.8\text{V}$$

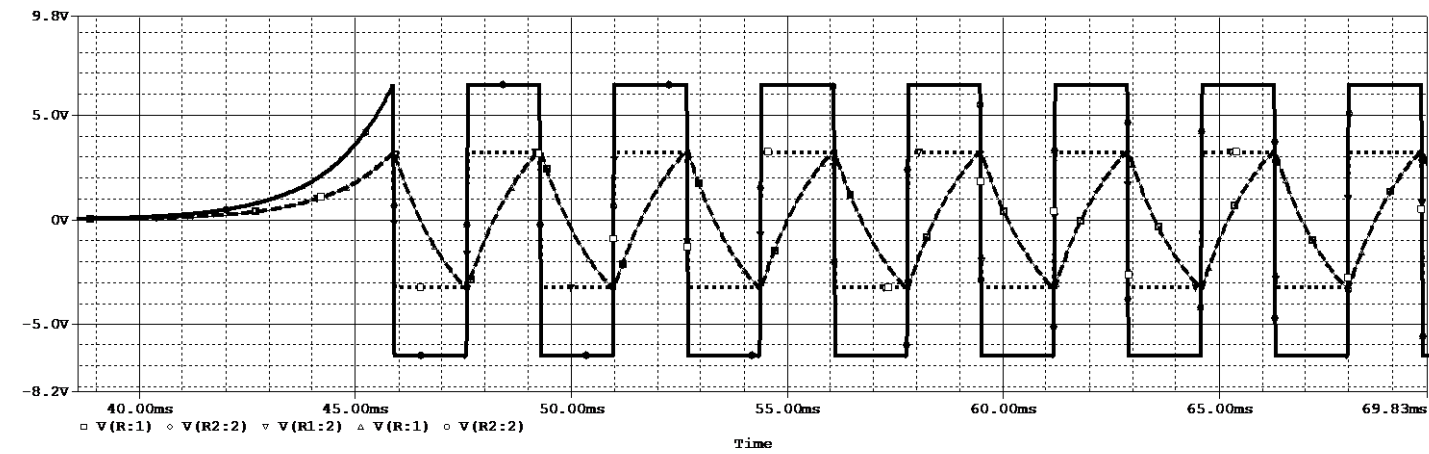
$$V_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_z = 2.9\text{V}$$

$$T = 2RC\ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

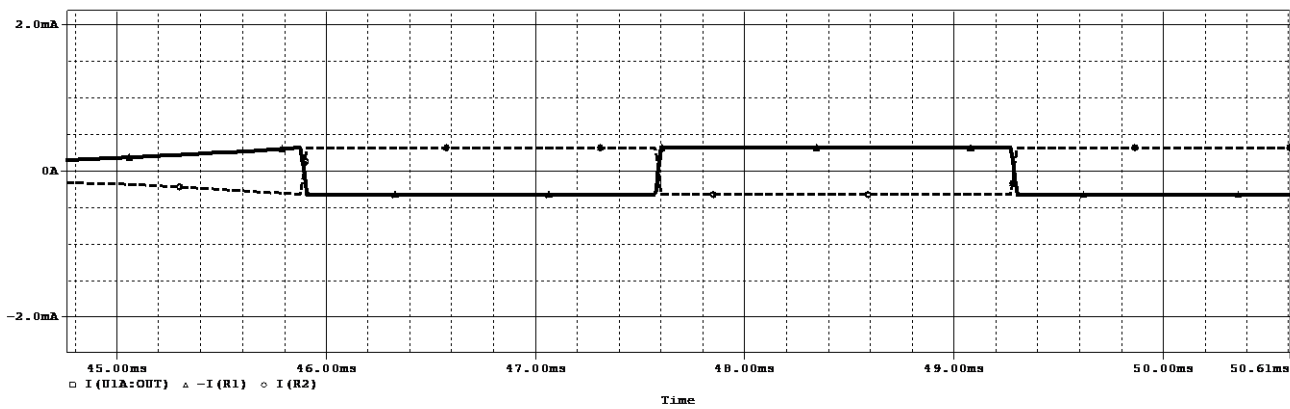
$$f = \frac{1}{T} \approx 300\text{Hz}$$

4.2.2 仿真及实验结果

Vo Vp VN 波形

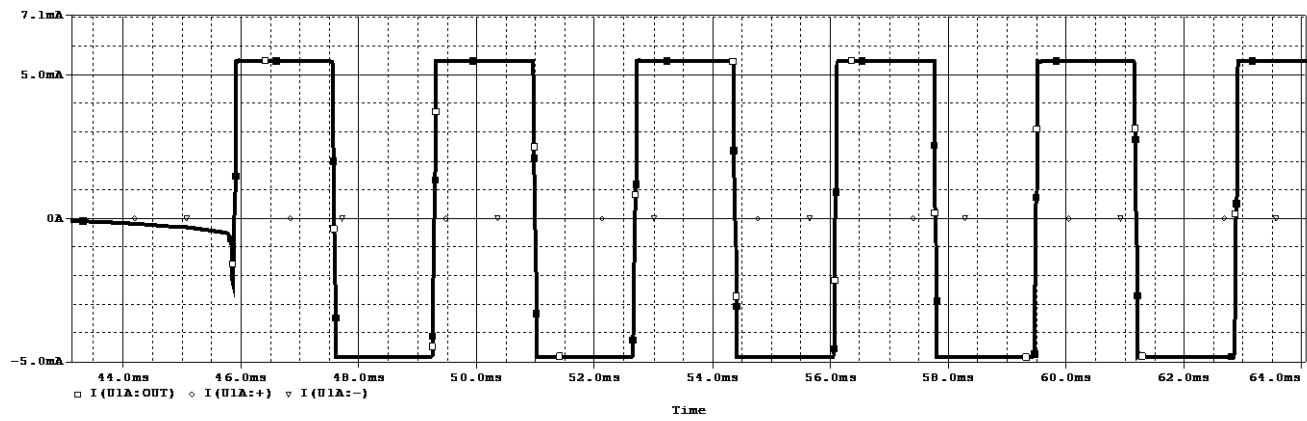


$$I(R_2) = 325.173\mu\text{A}$$



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	46.528m	47.018m	-490.115u
CURSOR 1	-I(R1)	-325.082u	-325.181u	98.486n
CURSOR 2	I(R2)	325.173u	325.272u	-98.486n

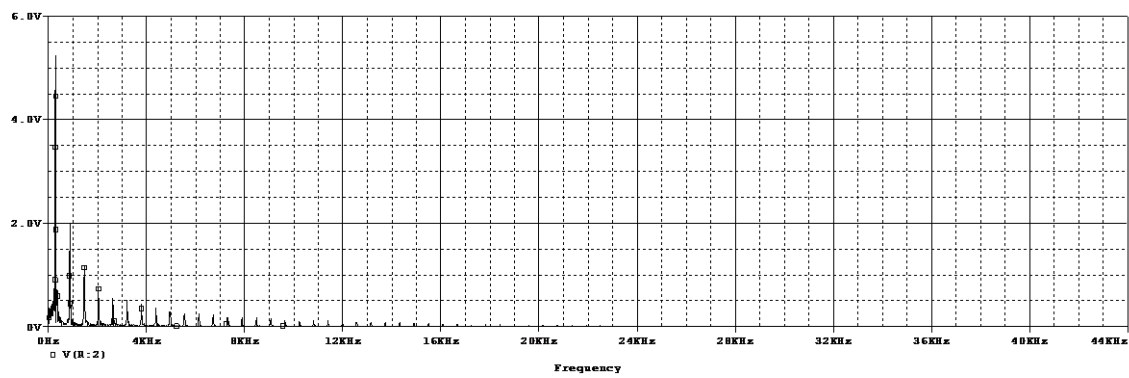
$I_o = 5.4917\text{mA}$



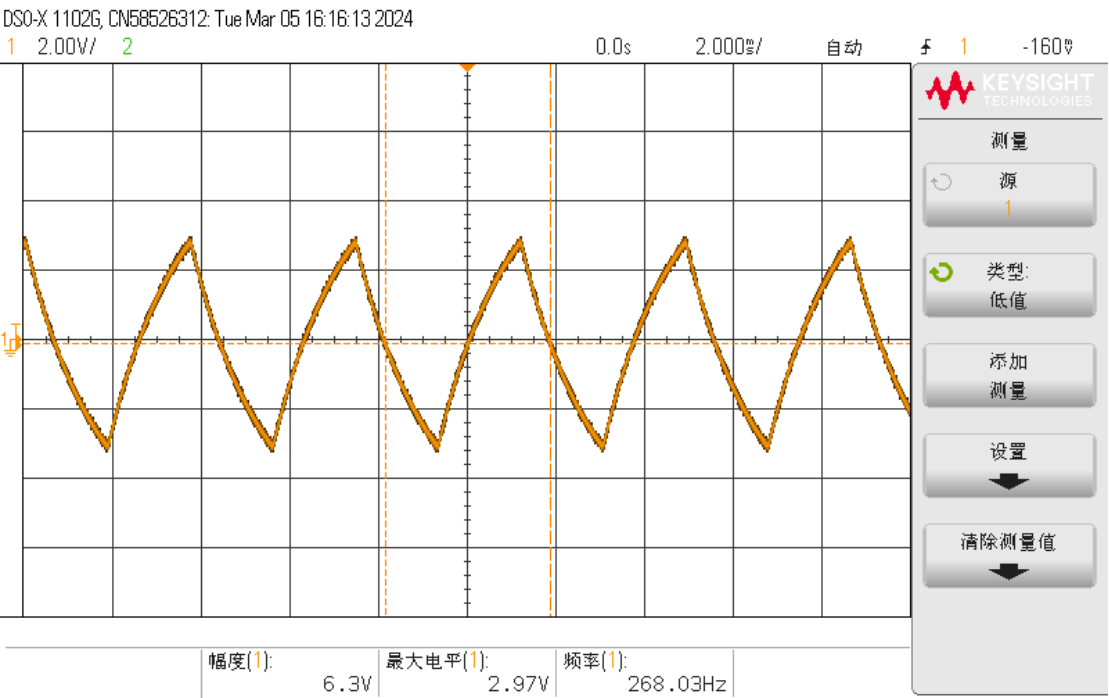
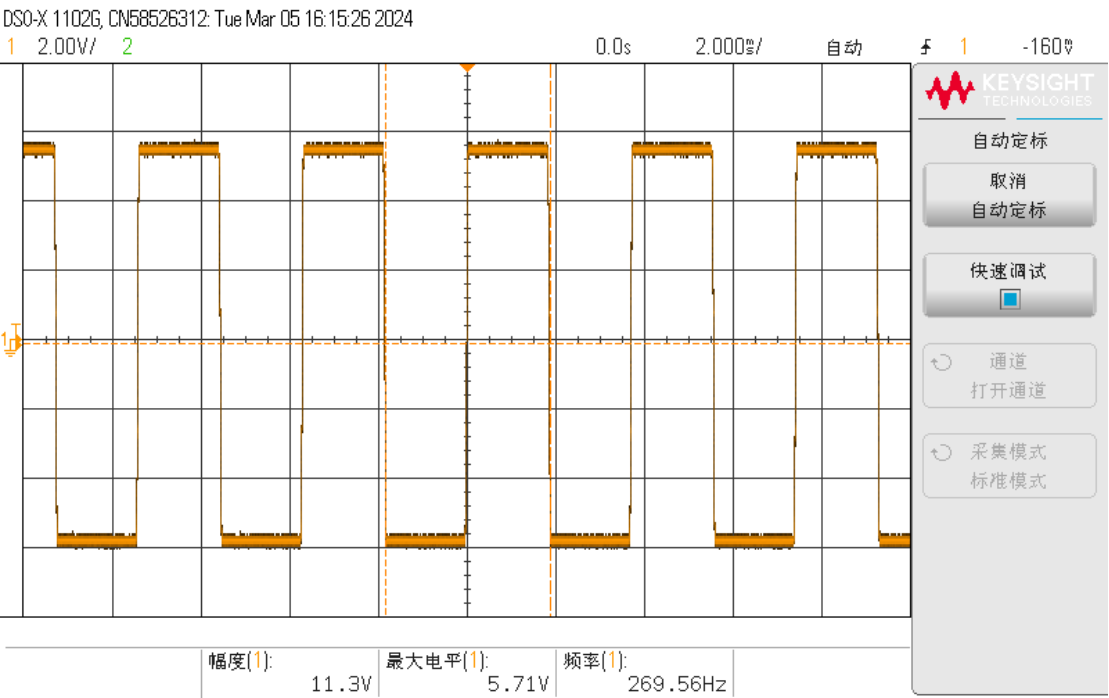
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	52.678m	56.082m	-3.4036m
CURSOR 1,2	V(R:1)	3.2997	3.3055	-5.8098m
	V(R1:2)	2.2289	1.9906	238.263m
	V(R:1)	3.2997	3.3055	-5.8098m
	V(R2:2)	4.4569	3.9804	476.526m

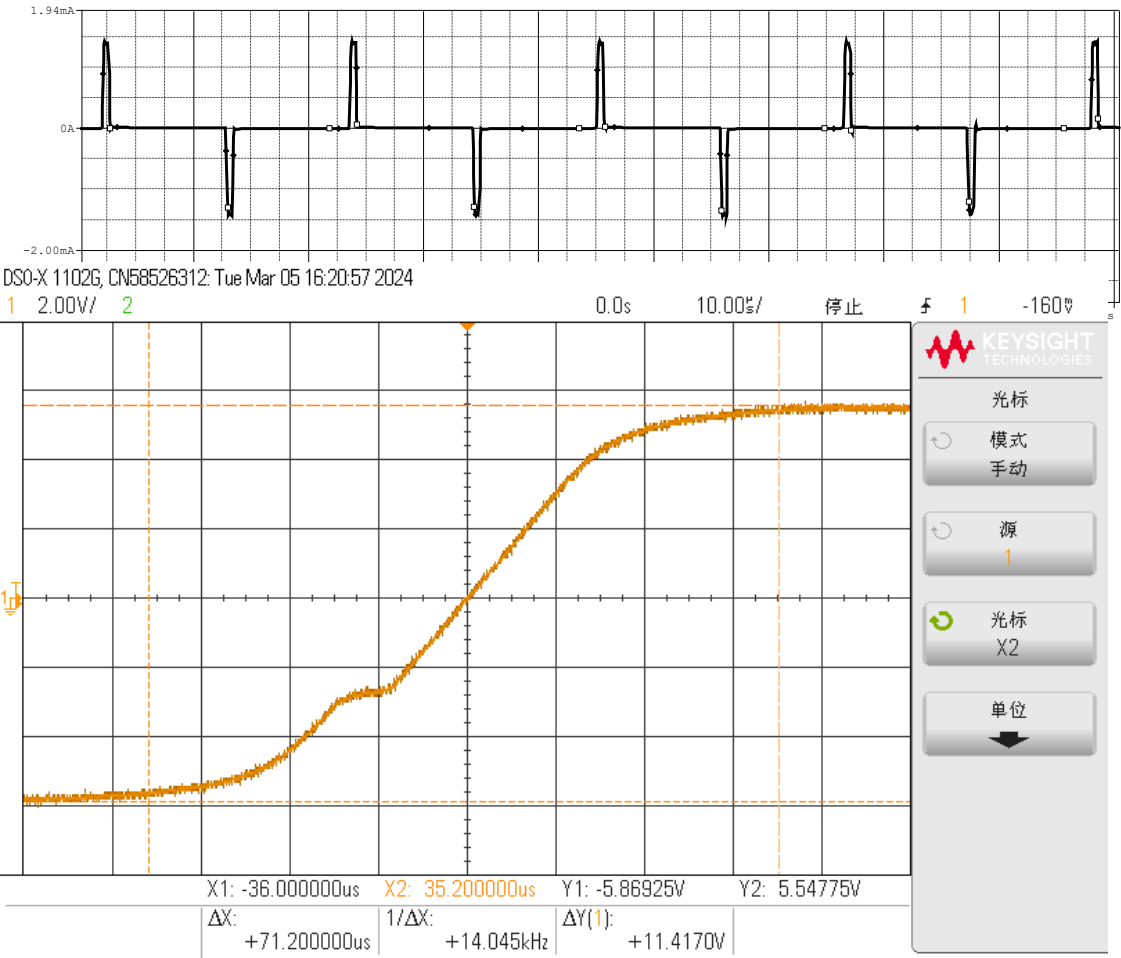
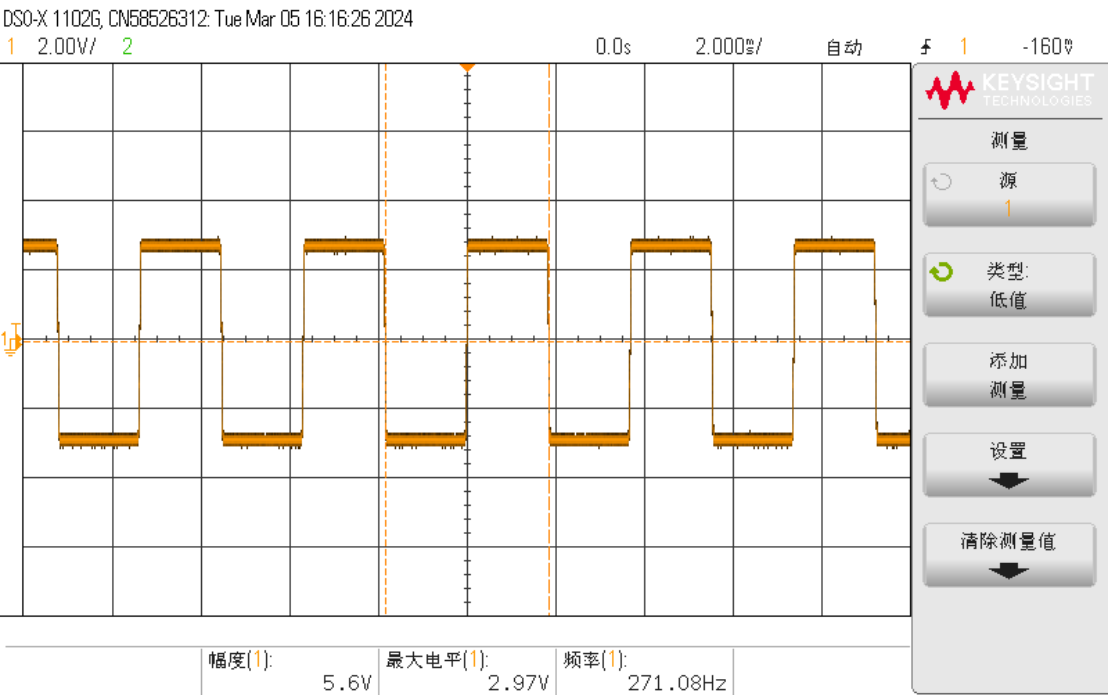
Trace Color	Trace Name	Y1	
	X Values	46.954m	30.
CURSOR 1,2	I(U1A:OUT)	5.4917m	178
	I(U1A:+)	-91.148n	-44
	I(U1A:-)	10.325p	-44

$f = 300\text{kHz}$

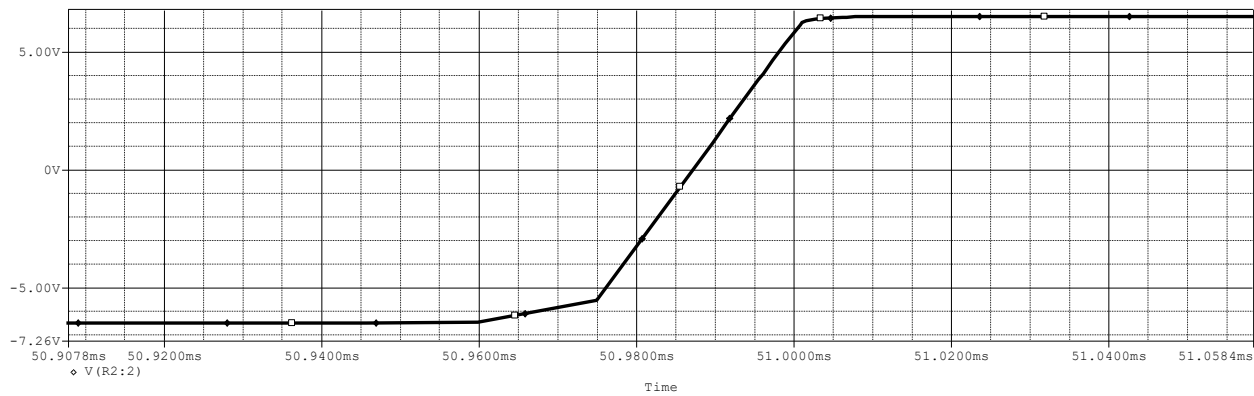


Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	300.000 0.
CURSOR 1,2	V(R:2)	5.2542 6.





上升时间为 71.2us



上升时间为 45.122us

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	50.960m	51.005m	-45.122u
CURSOR 1,2	V(R2:2)	-6.4724	6.4321	-12.905

	理论值	仿真值	测量值	仿真值与理论值的 相对误差/%
Vo/V	5.8	6.53	5.71	1.5
VN/V	2.95	3.34	2.97	0.6
Vp/V	2.95	3.26	2.97	0.6
f/kHz	300	300	269.56	10.1

因为仿真时用的稳压管和实际实验时候不一样，因此仿真波形仅供参考，其数据意义不大。

可以看到，三个波形的峰值与测量值均很接近，但是频率相差较大。猜想是实际采用的电容值大于 0.1uF，导致周期大于理论周期，频率小于理论频率。

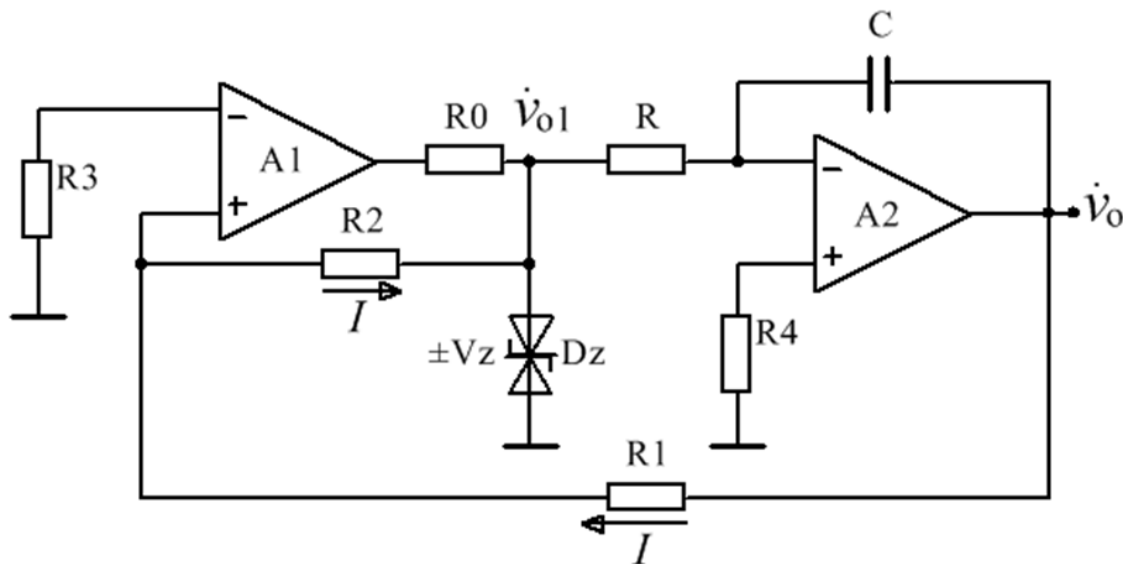
### 4.3. 简单矩形波发生电路

#### 4.3.1. 设计要求

根据实验板的元件参数，设计一方波—三角波发生电路，并计算此方波和三角波的幅值和振荡频率，稳压管采用 6.2V/1W。

要求：输出频率 1kHz-10kHz；三角波  $V_{om} = \pm 8V$

#### 4.3.2. 实验原理



在如图所示三角波发生电路中，当电路合上电源的瞬间，设  $v_{o1} = V_{OL} = -V_Z$ （为稳压管  $D_Z$  的负稳压值），积分器将向正方向积分， $v_o$  线性上升。当  $v_o$  上升至门限电压  $V_{TH} = +\frac{R_1}{R_2}V_Z$  时  $v_{o1}$  翻转为高电平， $v_{o1} = V_{OH} = +V_Z$ （为稳压管  $D_Z$  的正稳压值）。此时，积分器又向负方向积分， $v_o$  线性下降。当  $v_o$  下降到至门限电压  $V_{TL} = -\frac{R_1}{R_2}V_Z$  时， $v_{o1}$  又翻转到  $V_{OL}$ ，如此周而复始，在输出端  $v_{o1}$  将得到方波，而由  $v_o$  得到线性良好的三角波。其波形如图 8-7-3 所示。

分析图 8-7-2 所示的三角波发生电路可知：

$$\text{输出方波电压幅值为： } V_{om} = |\pm V_Z| \quad (1)$$

$$\text{三角波输出电压幅值为： } V_{om1} = \left| \pm \frac{R_1}{R_2} V_Z \right| \quad (2)$$

$$\text{方波和三角波的振荡周期为： } T = T_1 + T_2 = 2RC \frac{R_1}{R_2} + 2RC \frac{R_1}{R_2} = 4RC \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

式中  $T_1 = 2RC \frac{R_1}{R_2}$  为电容  $C$  放电时间； $T_2 = 2RC \frac{R_1}{R_2}$  为电容  $C$  充电时间。

$$\text{即方波和三角波的振荡频率为： } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4RC} \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

调节电路中的电阻  $R$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  阻值和电容器  $C$  容量，都可以改变振荡频率。通常采用调节  $R_1$  和  $R_2$  的

阻值，改变三角波的幅值，使  $V_{om1}$  满足设计要求；改变  $R$  和  $C$  的大小，以满足  $f$  的要求。

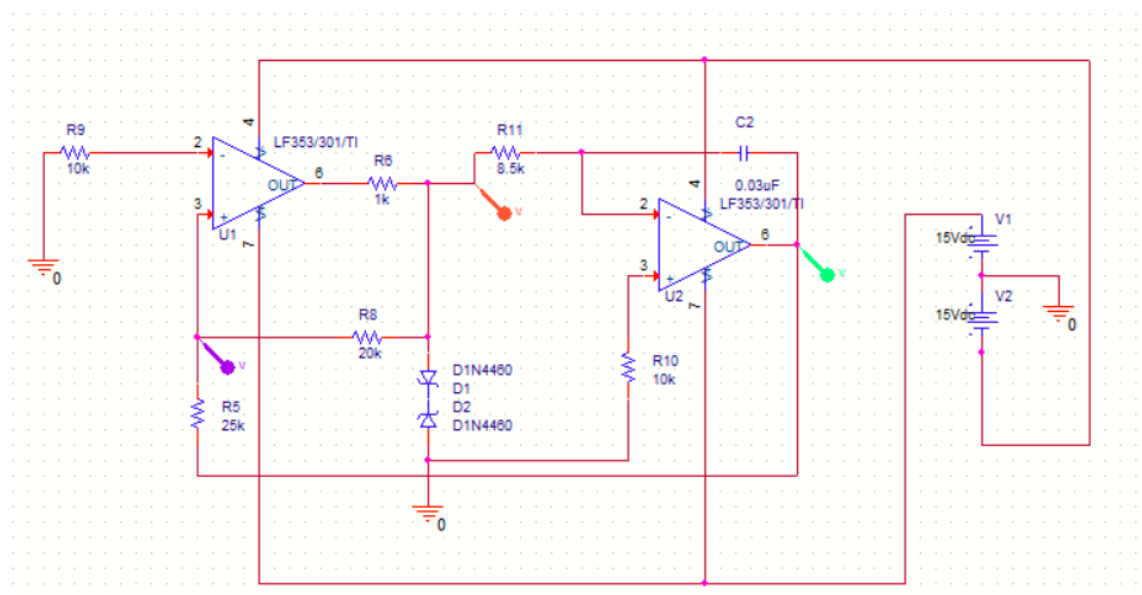
$R_1$  和  $R_2$  的作用是提供一个随输出方波电压而变化的基准电压，并由此决定三角波的输出幅度。所以  $R_1$  和  $R_2$  的阻值应根据三角波输出幅度的要求来确定。例如，已知  $V_Z=6V$ ，若要求三角波的峰值为  $V_{om1}=4V$ ，

则： $R_1 = \frac{V_{om1}}{V_Z} \times R_2 = \frac{2}{3} R_2$ 。若取  $R_1=10k\Omega$ ，则  $R_2=15k\Omega$ 。当要求三角波的幅值可以调节时， $R_1$  和  $R_2$  则

可以用电位器来代替。

$R$  和  $C$  的值应根据方波和三角波发生器的振荡频率  $f_0$  来确定。当分压电阻  $R_1$  和  $R_2$  的阻值确定后，先选择电容  $C$  的值，然后确定  $R$  的阻值。

### 4.3.3. 设计过程



考虑到电学实验箱上实际有的元器件，在该电路图上取  $R_5 = 25k\Omega$ ， $R_8 = 20k\Omega$ ， $R_6 = 1k\Omega$ ， $R_{11}$  在实验中取  $10k\Omega$  的电位器， $R_9 = 10k$ （这个可以不要）， $R_{10} = 10k$ （这个也可以不要），电容  $C_2$  取  $0.03\mu F$ （3 个  $0.01$  并联）。

理论计算可以得到，实际实验取  $5.1V$  的稳压管，得到

$$V_Z = 5.1V + 0.7V = 5.8V$$

$$V_{th} = V_{om1} = \frac{R_5}{R_8} \times V_Z = 7.25V$$

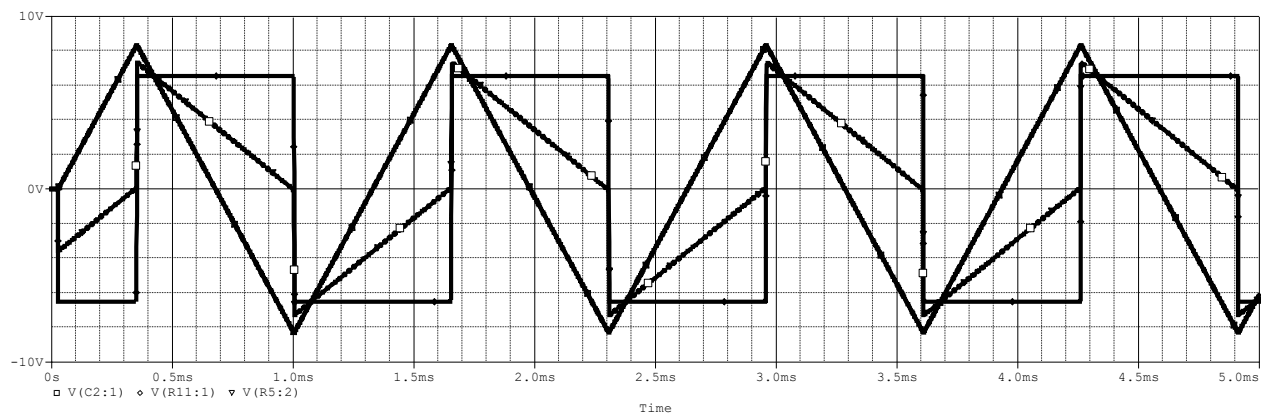
$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_8}{4R_{11}R_5C}$$

之后调节  $R_{11}$ ，直到得到的三角波幅度为  $\pm 8V$ ，此时的  $f$  应该在  $1kHz \sim 10kHz$  之间。

如果要调节频率，调节  $R_{11}$  即可。



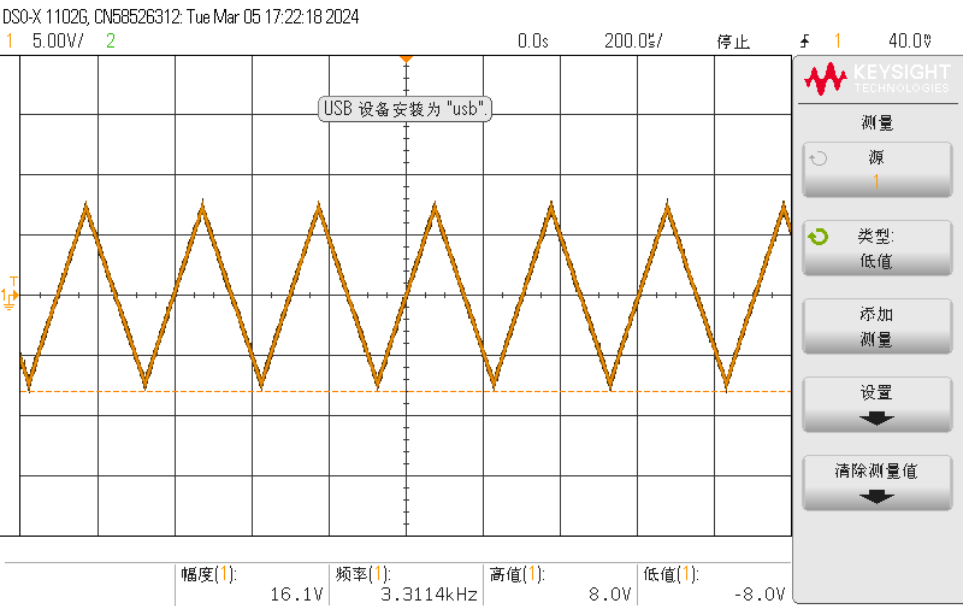
4.3.4. 仿真及实验结果



	Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
		X Values	353.907u	1.6570m	-1.3031m
	CURSOR 1,2	V(C2:1)	8.3252	8.3235	1.6975m
		V(R11:1)	6.5240	6.5248	-735.324u
		V(R5:2)	7.3111	7.3088	2.3723m

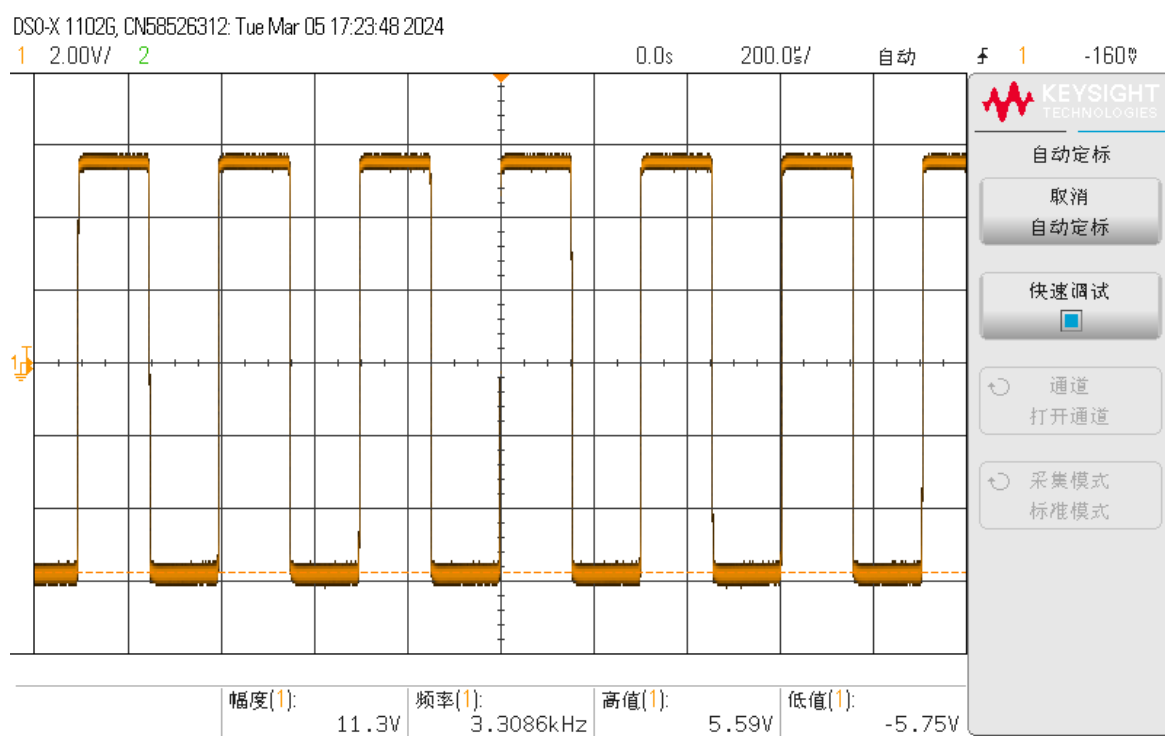
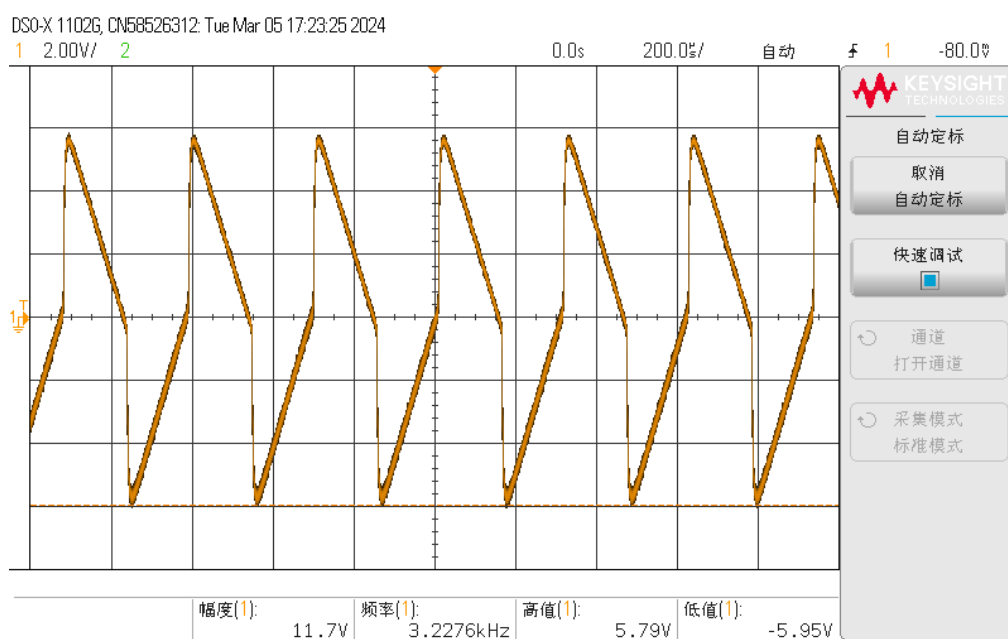
R11 在实验中为 10k 的电位器。在 R11 取 8.5K 的情况下，得到的三角波  $V_{om} = 8.32V$ ， $f = 770Hz < 1kHz$ 。在实际的测量中，调节电位器到适当位置可以达到  $V_{om} = 8V$ ，同时得到 3.31kHz 的三角波。再次调节 R11 到  $0.5k\Omega$ ，可以得到的  $V_{om} < 8V$ ， $f = 11.63kHz > 10kHz$ ，因此可以满足输出  $1kHz \sim 10kHz$  的波形，也可以满足输出  $V_{om} = 8V$  的三角波。

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	163.650u	249.710u	-86.060u
CURSOR 1,2	V(C2:1)	6.2163	6.2233	-7.0033m
	V(R11:1)	-608.897m	42.490m	-651.387m
	V(R5:2)	2.4245	2.7895	-364.994m



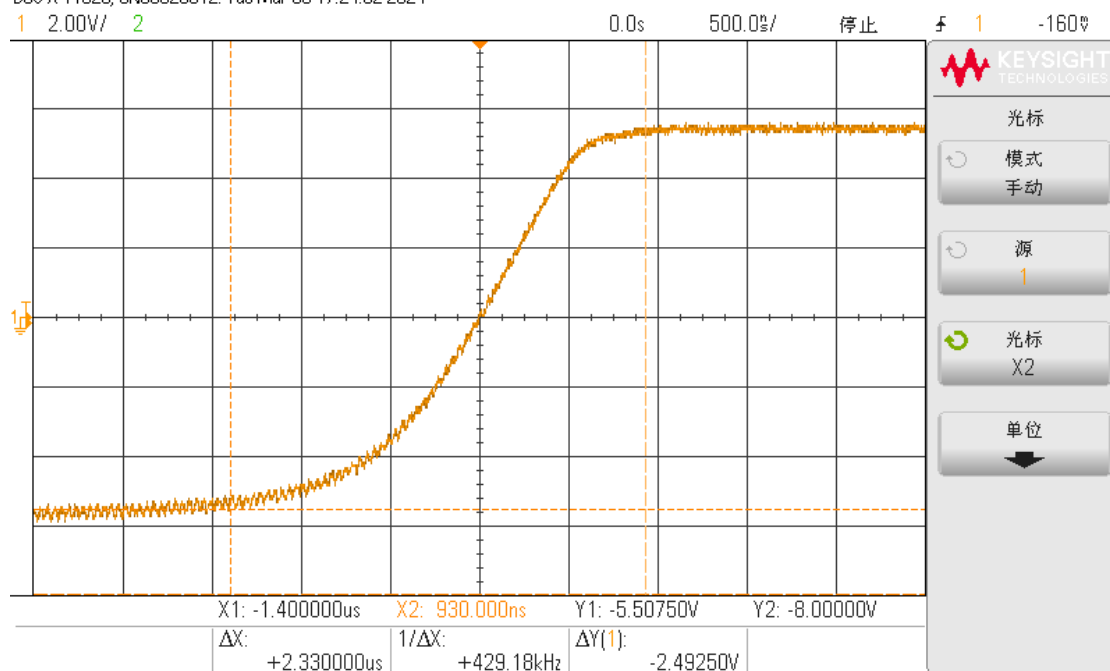
实验名称： 信号发生电路 姓名： 严旭铨 学号： 3220101731

实际可以达到 $\pm 8V$

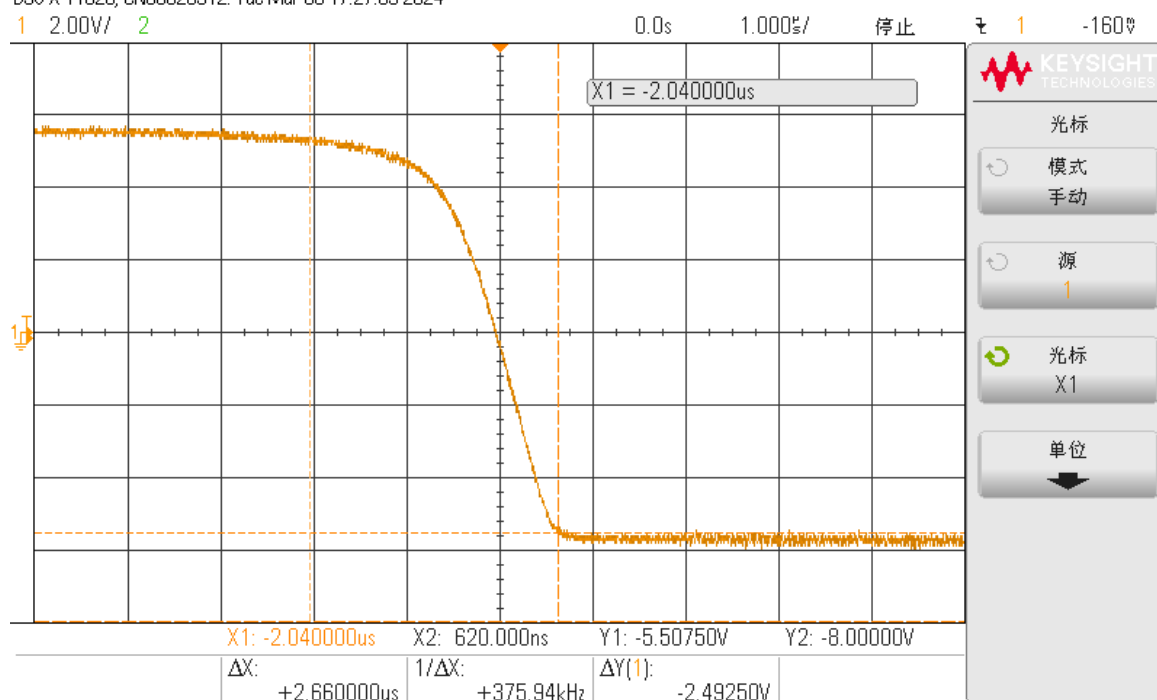


实验名称： 信号发生电路 姓名： 严旭铨 学号： 3220101731

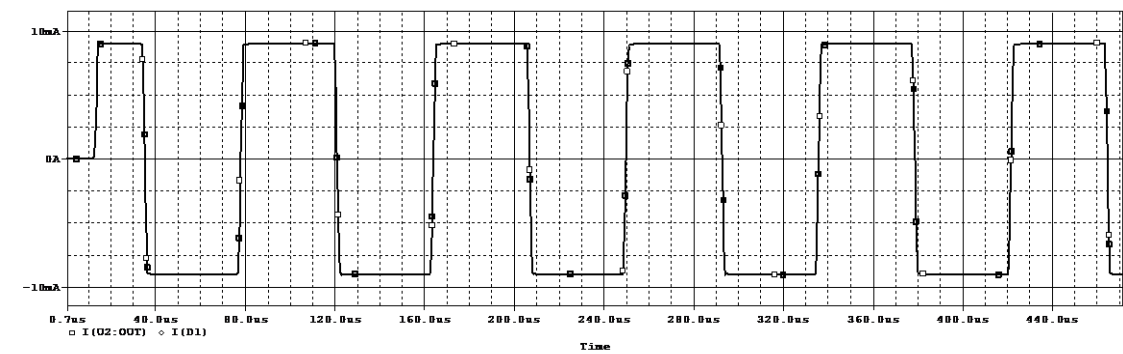
DSO-X 1102G, CN58526312: Tue Mar 05 17:24:52 2024



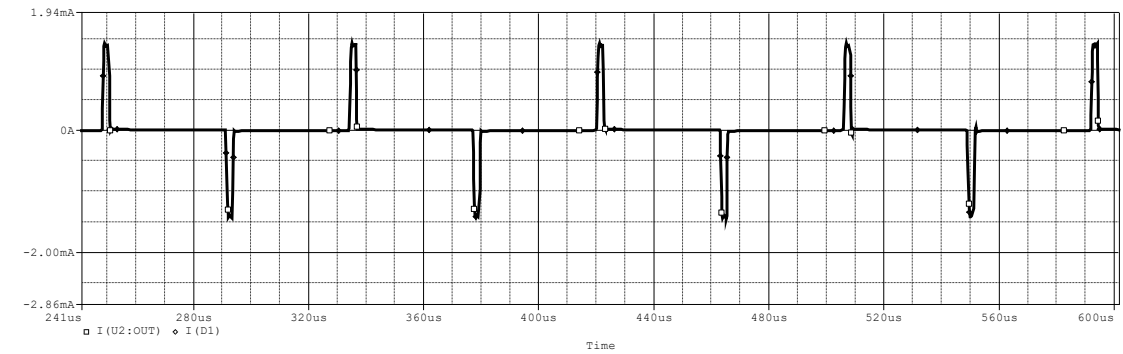
DSO-X 1102G, CN58526312: Tue Mar 05 17:27:03 2024



输出电流 9mA



稳压管电流  
峰值 1.42mA



	仿真值	测量值
Vo/V	8.32	16.1
VN/V	6.52	11.7
Vp/V	7.31	11.3
f/kHz	0.8	3.31
上升时间/us	/	2.33
下降时间/us	/	3.58

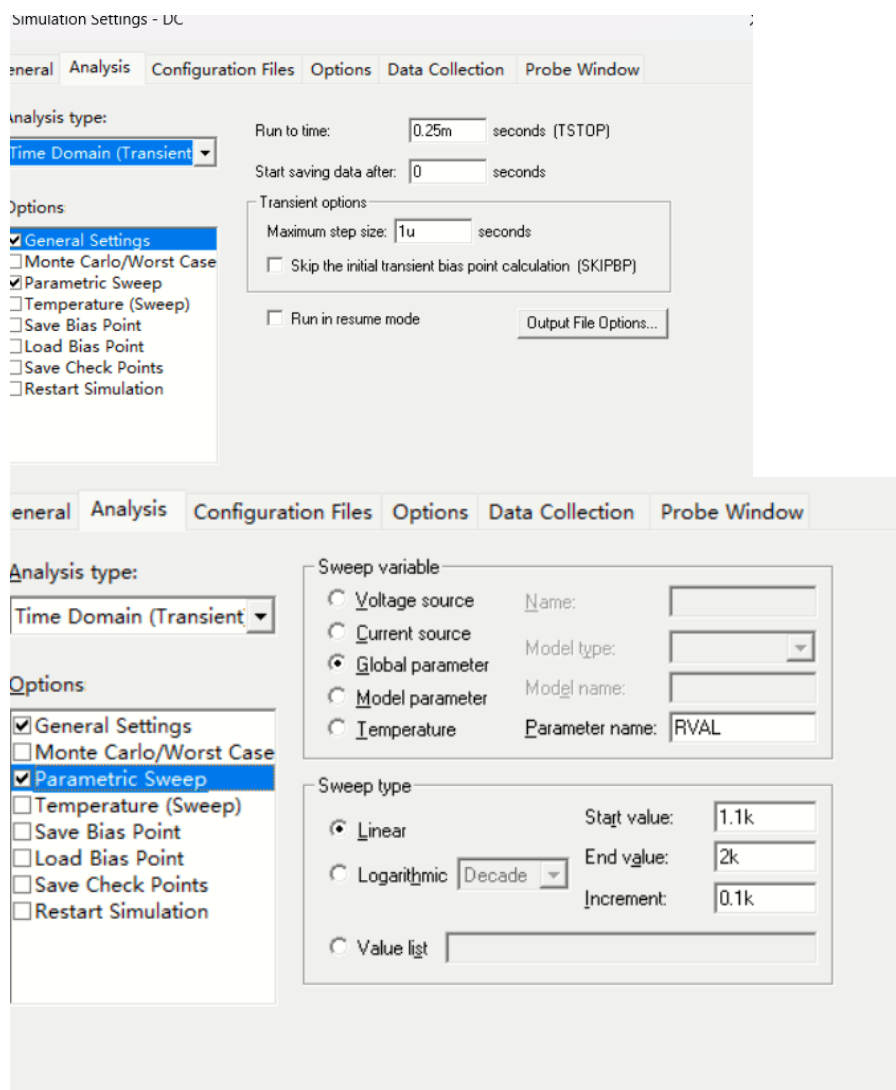
由于稳压管电压不同，仿真值和实际测量值的比较没有意义，但是最终还是实现了要求的±8V 三角波以及 1k~10kHz 的频率要求

#### 4.3.5. 探究：当频率较高时，三角波幅值的变化

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_8}{4R_{11}R_5C}$$

考虑上面的频率公式，在仿真软件中，我们更改 R11。当 R11 在 0.1k~2k 之间时，频率较高，此时我们对它进行嵌套的参数扫描。瞬态分析输出端三角波，嵌套了参数扫描，对 R11 的值进行了 100~1k，步长 0.1k 的扫描，局部放大后可以看到峰值比较清晰的变化。

由于 PSpice 软件的特性，直接扫描 R11 似乎会报错。这里借鉴了上次实验中确定静态工作点的做法，放置了一个 PARAM，双击电路原理图中的 PARAM，弹出特性编辑对话框。点击【New property...】按钮，假设定义 R11 的阻值取变量名为【RVAL】，双击 R11，对话框中 Name 下输入 RVAL，在 Value 下输入 8.5K，点击【OK】按钮，在特性编辑对话框新增了 RVAL 项。在 RVAL 处点击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中点取 Display...，修改新参数的显示方法。返回到电路图编辑窗口，双击 Rb1 的阻值 8.5K，在“Display Properties”的对话框中将其阻值改成{RVAL}，参数定义符必须键入。之后新建一个仿真文件，配置如下。

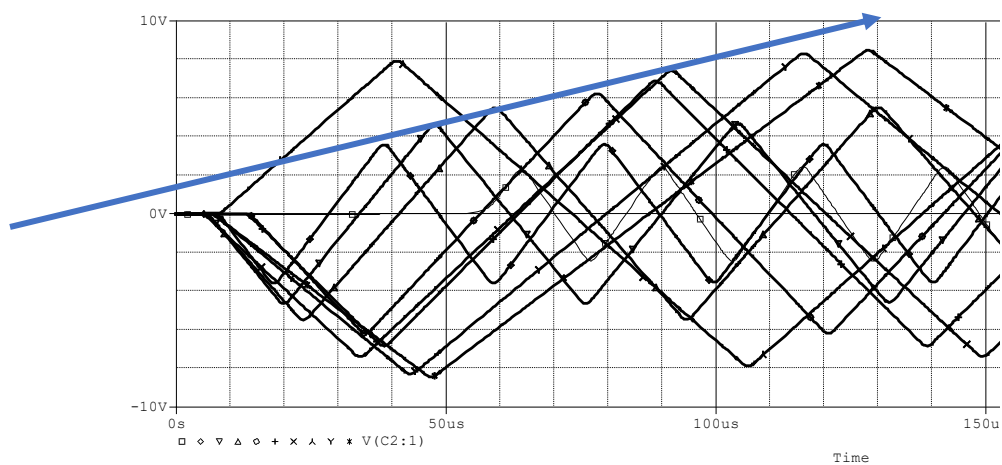


其实有点类似于指针的概念，只能间接扫描 RVAL 的值来实时改变 R11 的值。同时要注意，运行时间一定要短些，否则电脑会跑很久，光迹会非常非常密集没法用。

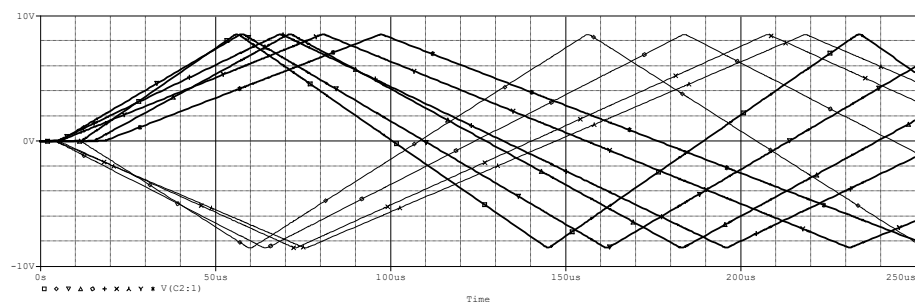
实验名称：\_\_\_\_信号发生电路\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_严旭铎\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_3220101731\_\_\_\_

最后处理后得到如下的结果

R11 取 100~1k



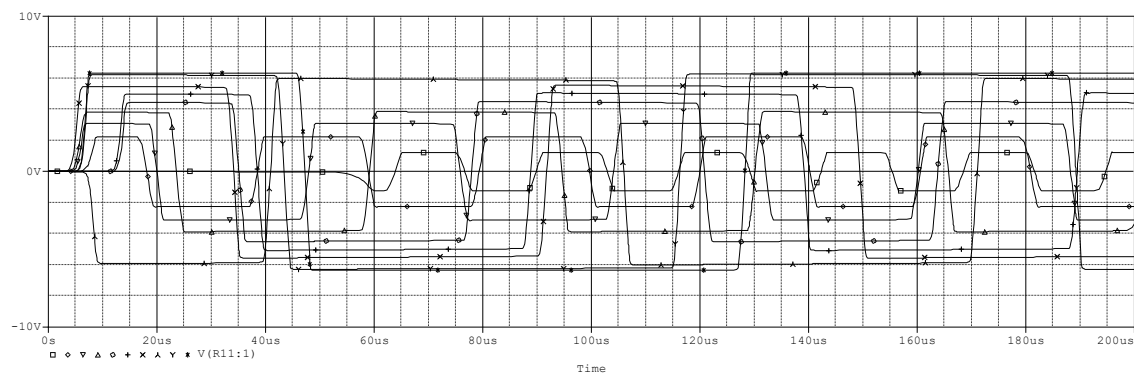
随着箭头，R11 的阻值增大，频率减小，三角波的幅值随着增大。箭头上方那个峰是 800Ω 时的光迹。1k~2k



1k~2kΩ 时，频率没有那么高，因此并不明显。

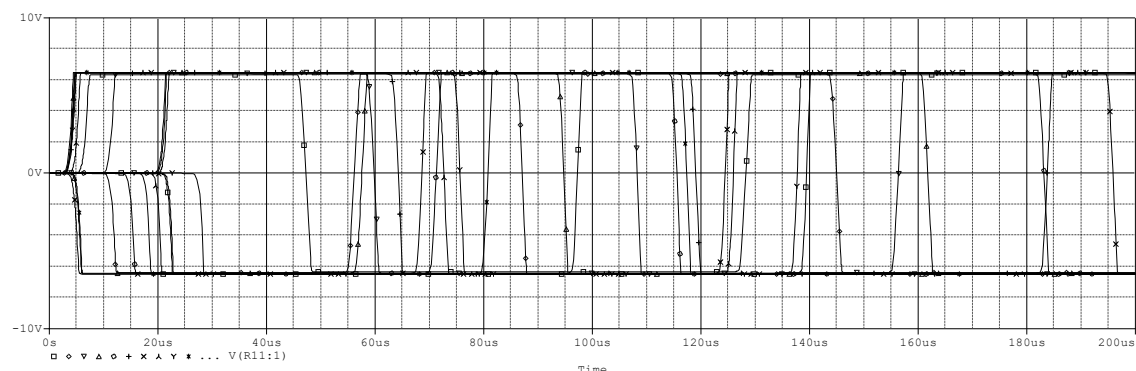
所以可以得出，当频率较高时，三角波幅值随频率增大而减小。由于三角波幅度公式  $V_{th} = V_{om1} = \frac{R_5}{R_8} \times V_Z$  中不涉及频率这个量，也不涉及 R11，因此我猜想可能是高频会影响方波的电压。因此将电压探针放到方波输出端，进行上面的扫描

0.1k~1kΩ

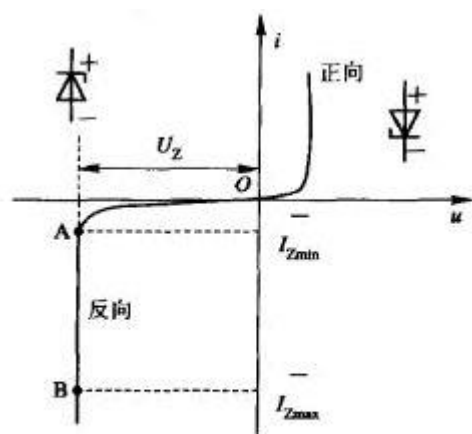


实验名称：\_\_\_\_信号发生电路\_\_\_\_ 姓名：\_\_\_\_严旭铨\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_3220101731\_\_\_\_

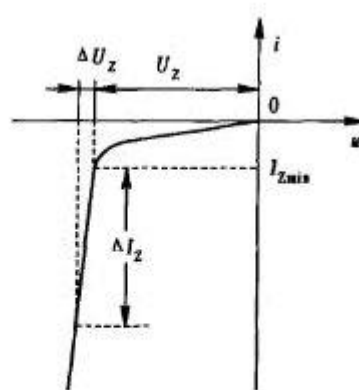
1k $\Omega$ ~3k $\Omega$



显然，我的猜想得到了初步验证。高频会影响方波输出幅度。而方波输出幅度仅与稳压管造成的压降有关，那么我进一步猜想，高频会影响稳压管。因为稳压管稳压毕竟是理想模型，当高频时，电压电流变向速度



稳压管的伏安特性及符号



稳压管动态电阻

快，可能尚未到达稳压值时，方向就改变了，导致实际上方波输出的电压是不到理论值的，因此导致三角波幅度到不了理论值，且频率越高，三角波幅度越小。

但是我现在没有办法通过仿真实验来证实我的猜想。

## 5. 实验心得体会

本次实验发现了一些仿真与实际操作不同的地方。最让我印象深刻的是最后一个探究，我运用了上次实验寻找静态工作点的思路解决了仿真上另一问题的困难，得到了初步猜想和进一步的证据。实际上，仿真也好，测量也罢，都与实际真值存在差距，我们要做的是找到问题所在，然后尽力去减小这样的误差。