

电子技术实验

实验报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 实验四：波形发生电路

姓名	刘祖炎
学号	2019010485
院系	自动化系
教师	赵晓燕
时间	2021 年 5 月 21 日

目录

1	实验目的	1
2	预习报告	1
2.1	正弦波发生电路	1
2.1.1	理论计算	1
2.1.2	仿真结果	2
2.2	方波—三角波发生电路	7
2.2.1	理论计算	7
2.2.2	仿真结果	7
2.3	矩形波—锯齿波发生电路	11
2.3.1	理论计算	11
2.3.2	仿真测量	12
2.4	数据记录表格	15
2.4.1	正弦波发生电路	15
2.4.2	方波—三角波发生电路	15
2.4.3	滞回比较器电压传输特性	16
2.4.4	矩形波—锯齿波发生电路	16

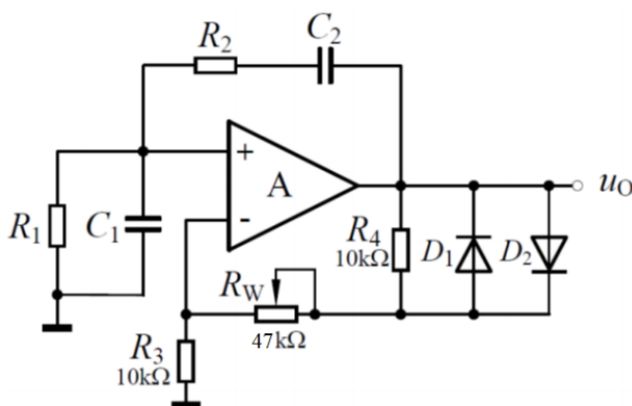
1. 实验目的

- 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。
- 学习滞回比较器的组成及电压传输特性的测试方法。
- 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

图 1: 正弦波发生电路



2.1.1 理论计算

该电路为 RC 桥式振荡电路。设 $C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R$, 则:

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

$f = f_0$ 时, $|\dot{F}|$ 最大。

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

取 $C = 10nF$, 由于 $f = 400Hz$, 故:

$$R = \frac{1}{2\pi C f_0} \approx 39.79k\Omega$$

满足振荡条件, 则 $|\dot{A}| \geq 3$, 即:

$$|\dot{A}| = \frac{R_3 + R_4 + R_W}{R_3} \geq 3$$

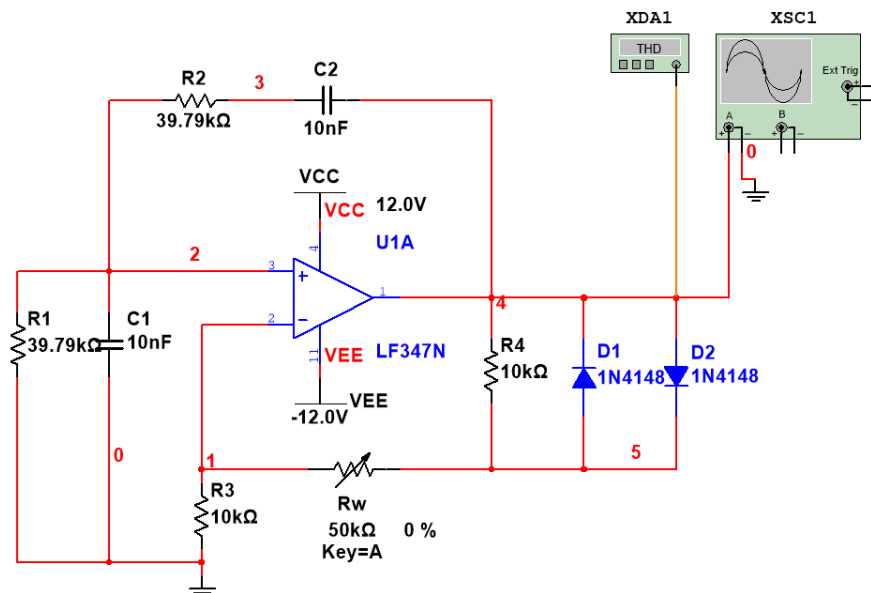
令 $|\dot{A}| = 3$, 解得 $R_W = 2R_3 - R_4 = 10k\Omega$ 。

即: R_W 略大于 $10k\Omega$ 。

2.1.2 仿真结果

按照实验讲义搭建仿真电路如图2所示。其中，相应的测量仪器 (示波器、失真分析仪) 已正确连入电路中。

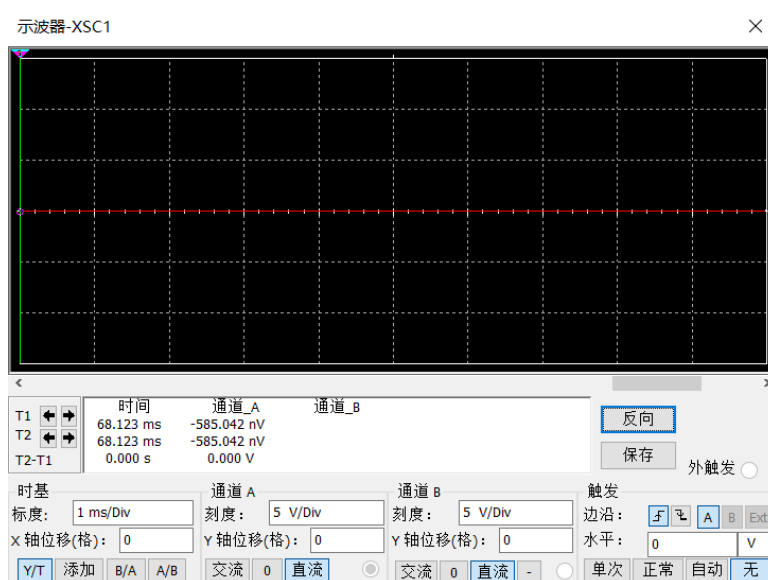
图 2: 正弦波发生电路仿真电路图



- $R_W = 0$

设置 $R_W = 0$ ，示波器测量结果如图3所示。

图 3: $R_W = 0$ 时输出电压波形图

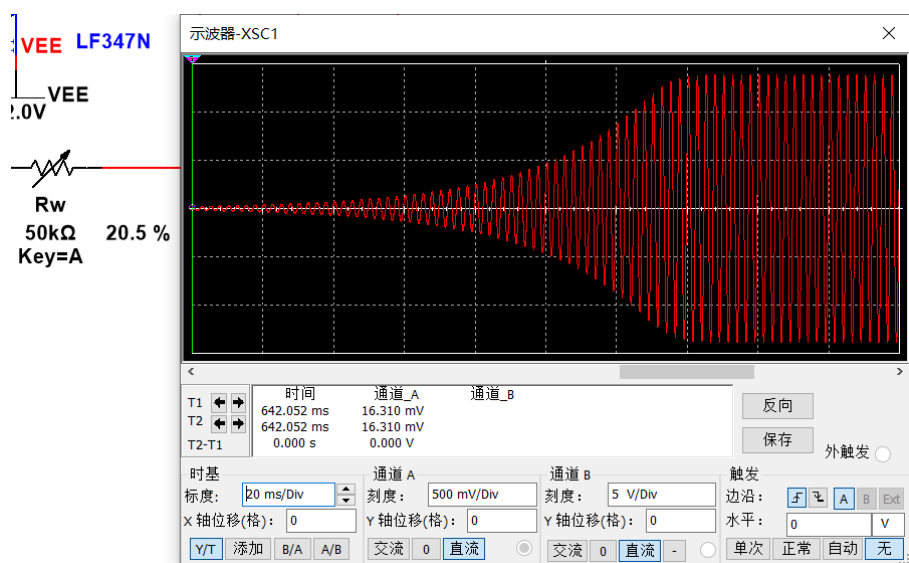


输出电压 $u_o = -585.042\text{nV}$ ，可见电路处于稳定负反馈，没有起振。

- 电路刚好起振

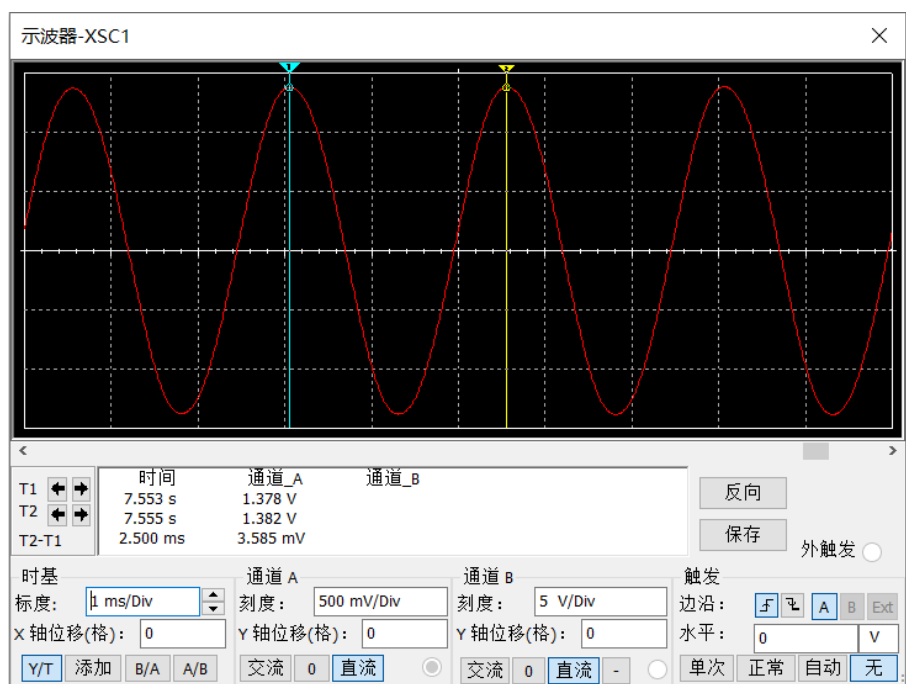
以 0.1% 步长增大 R_W 的值，观察到电路刚好起振时记录 R_W 的值，刚好起振时示波器测量结果如图4所示。

图 4: 电路刚好起振时输出电压波形图 (1)



此时 $R_W = 50k\Omega \times 20.5\% = 10.25k\Omega$ 。测量输出电压 u_o 、频率 f 如图5所示。

图 5: 电路刚好起振时输出电压波形图 (2)



波形幅值 $u_{pp} = 1.378 + 1.382 = 2.860V$

周期 $T = 2.500ms$ ，频率 $f = 1/T = 400.00Hz$ 。

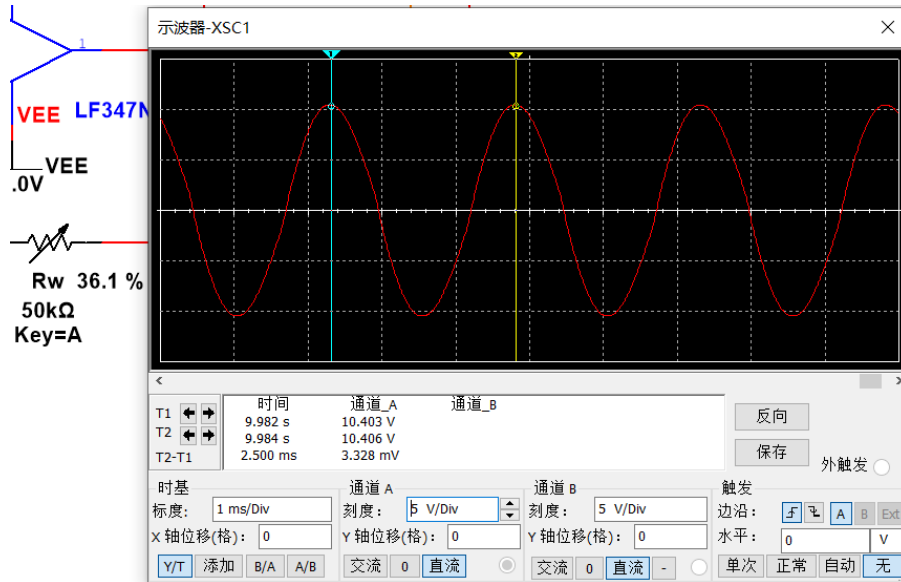
- 输出正弦波不失真且幅值最大

继续增大 R_W 的值，观察失真分析仪的示数至电路刚好不失真时停止，此时失真分析仪示数如图6所示。测量输出电压 u_o 、频率 f 如图7所示。

图 6: 失真分析仪测量结果



图 7: 输出正弦波不失真且幅值最大时输出电压波形图



失真分析仪测量结果为 3.323%，满足要求。此时 $R_W = 50k\Omega \times 36.1\% = 18.05k\Omega$ 。

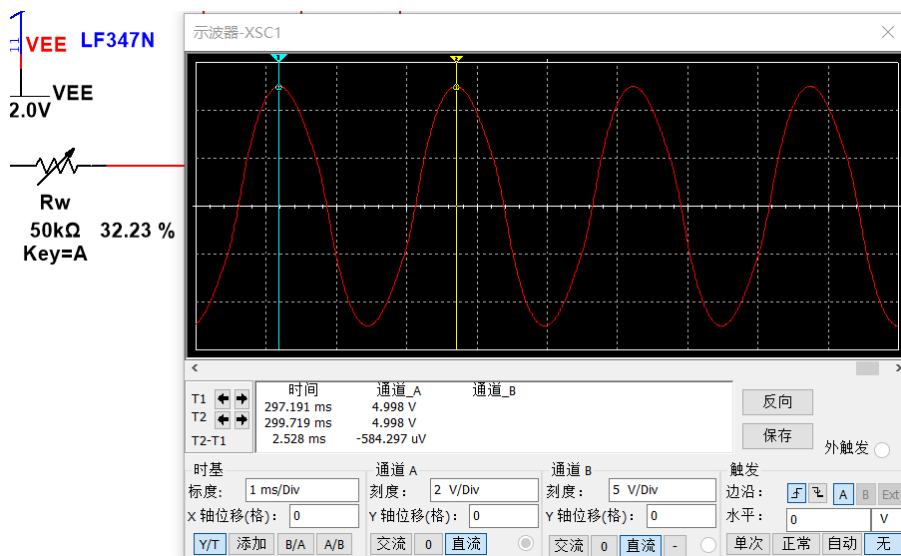
波形幅值 $u_{pp} = 10.403 + 10.406 = 20.809V$

周期 $T = 2.500ms$ ，频率 $f = 1/T = 400.00Hz$ 。

- 输出为 $5V(V_p)/400Hz$ 的正弦波电压

利用探针测量输出电压 u_o ，调节 R_W 直至 u_o 的峰峰值为 5V，示波器测量结果如图8所示。

图 8: 输出为 $5V(V_p)/400Hz$ 的正弦波电压时输出电压波形图



此时 $R_W = 50k\Omega \times 32.23\% = 16.12k\Omega$ ，周期 $T = 2.528ms$ ，频率 $f = 1/T = 395.57Hz$ 。

• 断开二极管

断开二极管后，按照相同方法调节电路刚好起振，起振时波形如图9所示，失真分析仪示数如图10所示。

图 9: 电路刚好起振时输出电压波形图 (断开二极管)

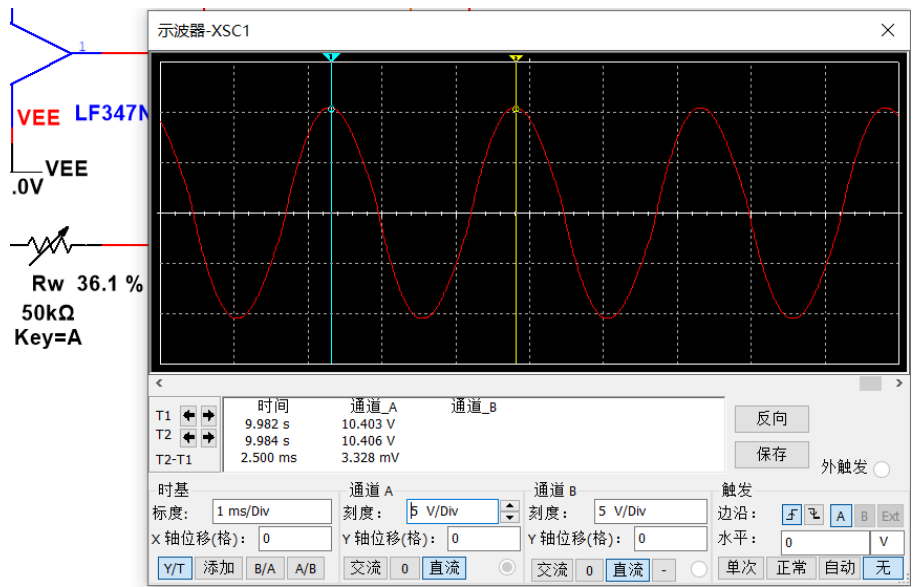


图 10: 失真分析仪测量结果



此时 $R_W = 50k\Omega \times 23.5\% = 11.75k\Omega$ ，周期 $T = 2.528ms$ 。观察到电路已经发生失真，失真分析仪测量结果为 4.809%。

持续增大 R_W ，电路波形如图11、12所示。

图 11: 断开二极管后输出电压波形图 ($R_W = 20k\Omega$)

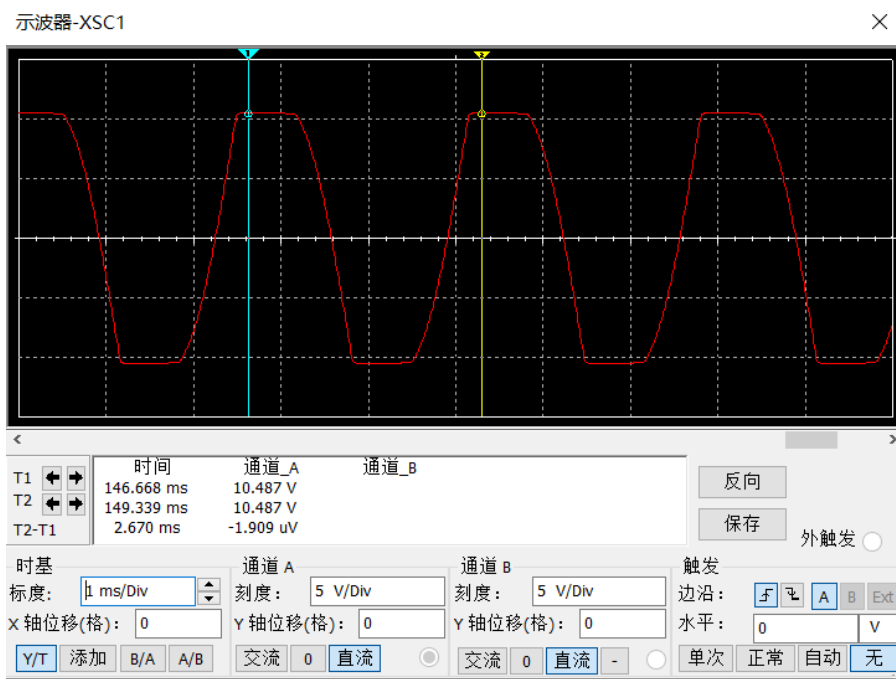
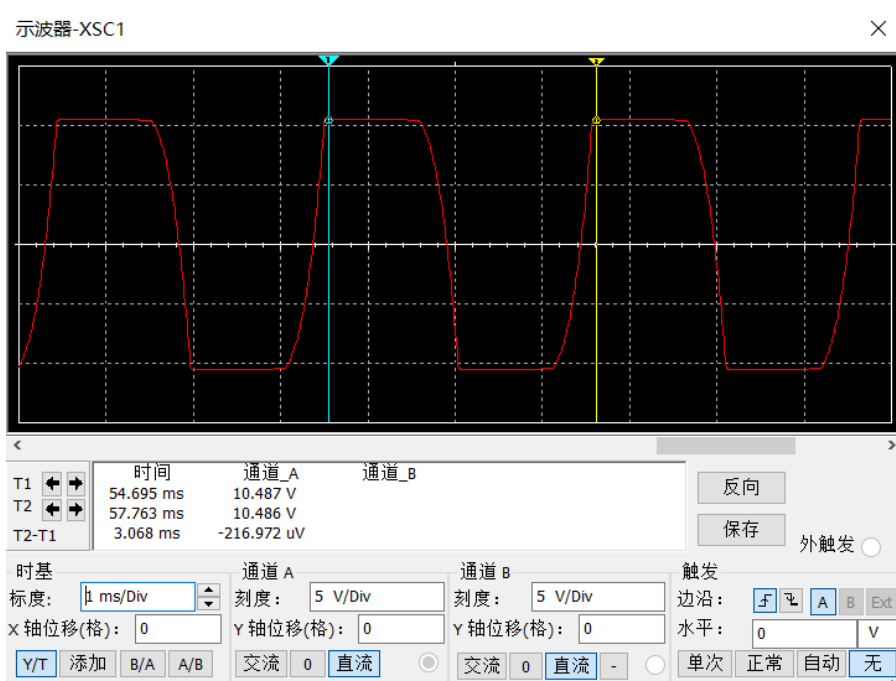


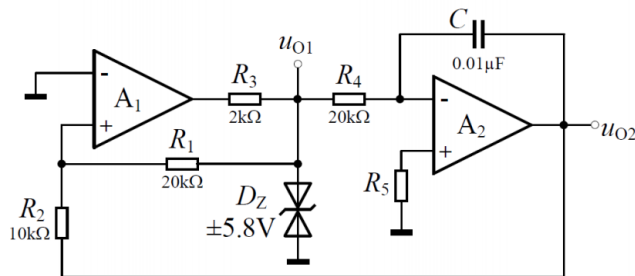
图 12: 断开二极管后输出电压波形图 ($R_W = 30k\Omega$)



观察到随 R_W 阻值增大, 失真更明显, 且周期逐渐增大, 频率逐渐减小。其中, 周期依次为 $2.528ms$ 、 $2.670ms$ 、 $3.068ms$, 频率依次为 $395.57Hz$ 、 $374.53Hz$ 、 $325.95Hz$ 。

2.2 方波—三角波发生电路

图 13: 方波—三角波发生电路



2.2.1 理论计算

电路由滞回比较器和积分器构成。其原理为：当滞回比较器输出 $u_{o1} = U_Z$ 时，电容 C 放电，积分器输出 u_{o2} 下降，直至 $u_{o2} = -U_T$ 时，滞回比较器翻转，输出 $u_{o1} = -U_Z$ ，并类似地完成下一过程。由于 $U_Z = \pm 5.8V$ ，故：

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

方波、三角波的周期为：

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

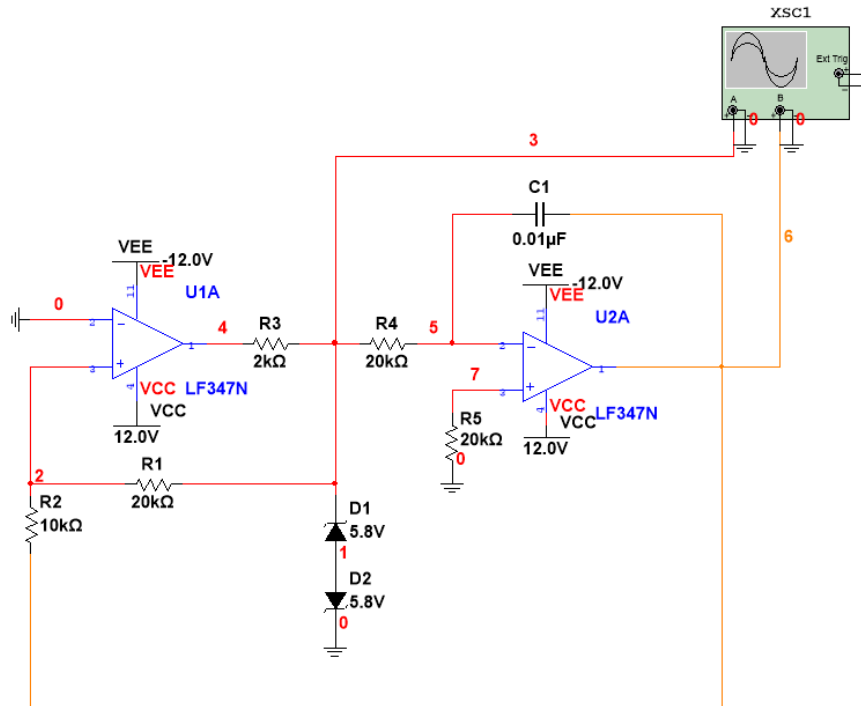
因此频率 $f = 1/T = 2500Hz$ 。 u_{o1} 的幅值为 $U_Z = 5.8V$ ，峰峰值 $u_{pp} = 11.6V$ ， u_{o2} 的幅值为 $U_T = 2.9V$ ，峰峰值 $u_{pp} = 5.8V$ 。

2.2.2 仿真结果

• 方波—三角波发生电路仿真测量

按照实验讲义搭建仿真电路如图14所示。其中，相应的测量仪器 (示波器) 已正确连入电路中。

图 14: 方波—三角波发生电路仿真电路图



示波器测量结果如图15、16所示。

图 15: 方波—三角波发生电路仿真波形图 (矩形波)

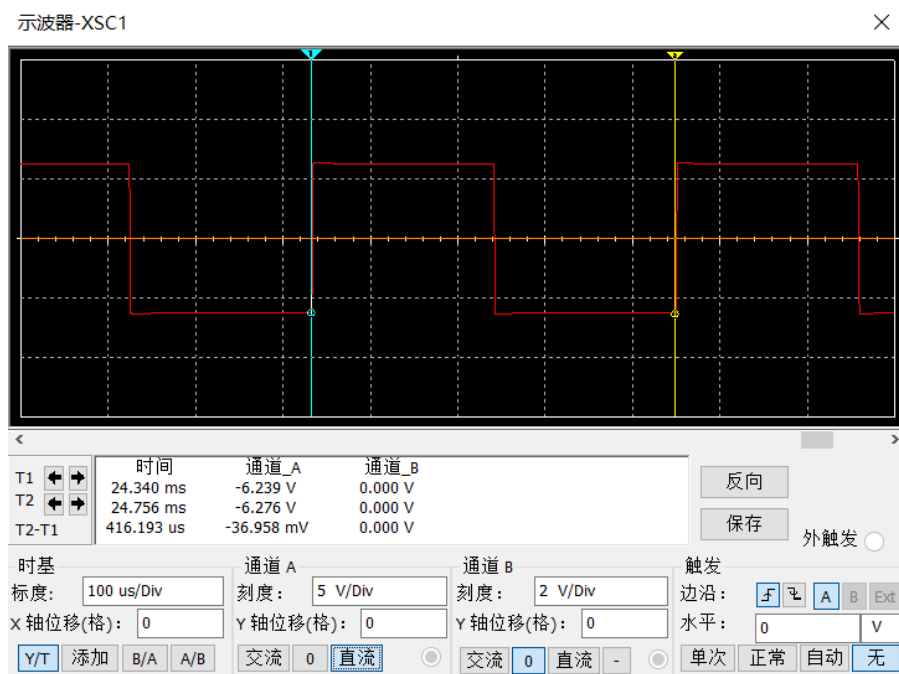
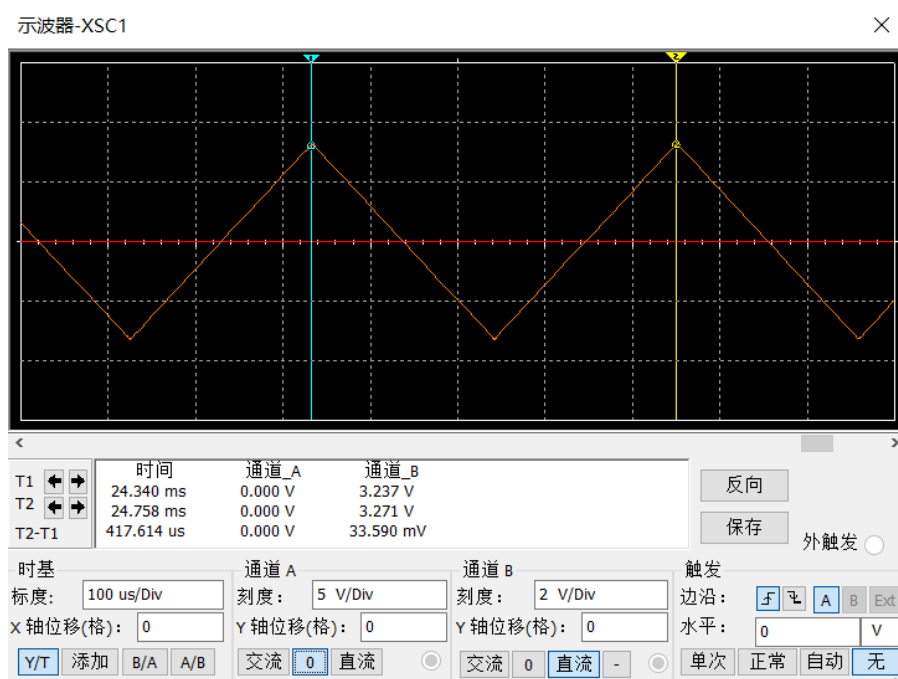


图 16: 方波—三角波发生电路仿真波形图 (三角波)



根据测量结果，方波周期为 $T = 416.193\mu s$ ，频率 $f = 1/T = 2402.73Hz$ ；三角波周期为 $T = 417.614\mu s$ ，频率 $f = 1/T = 2394.56Hz$ 。

方波幅值 $u_{pp} = 6.239 + 6.276 = 12.515V$

三角波幅值 $u_{pp} = 3.237 + 3.271 = 6.508V$

测量方波上升时间、下降时间如图17、18所示。

图 17: 方波上升时间测量波形图

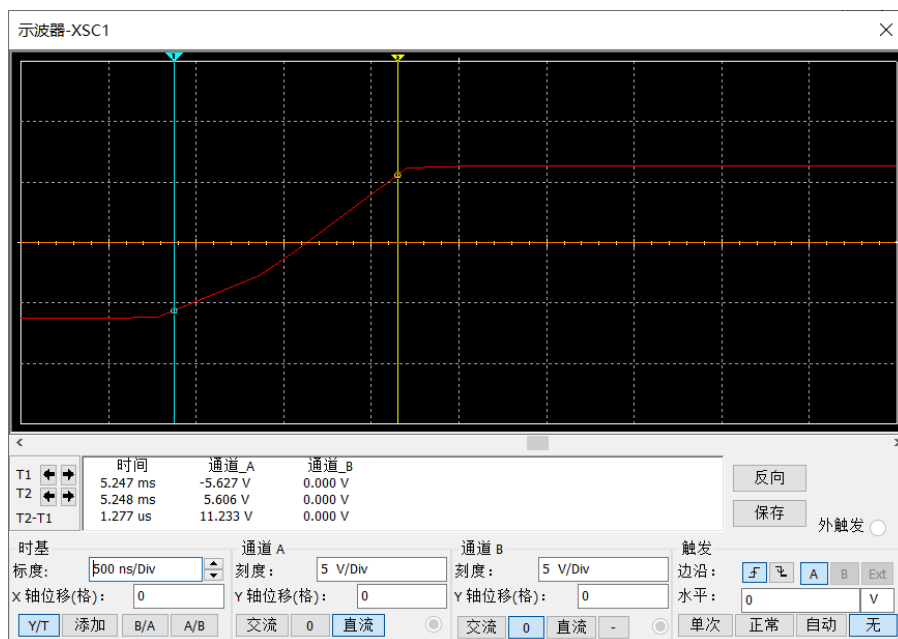
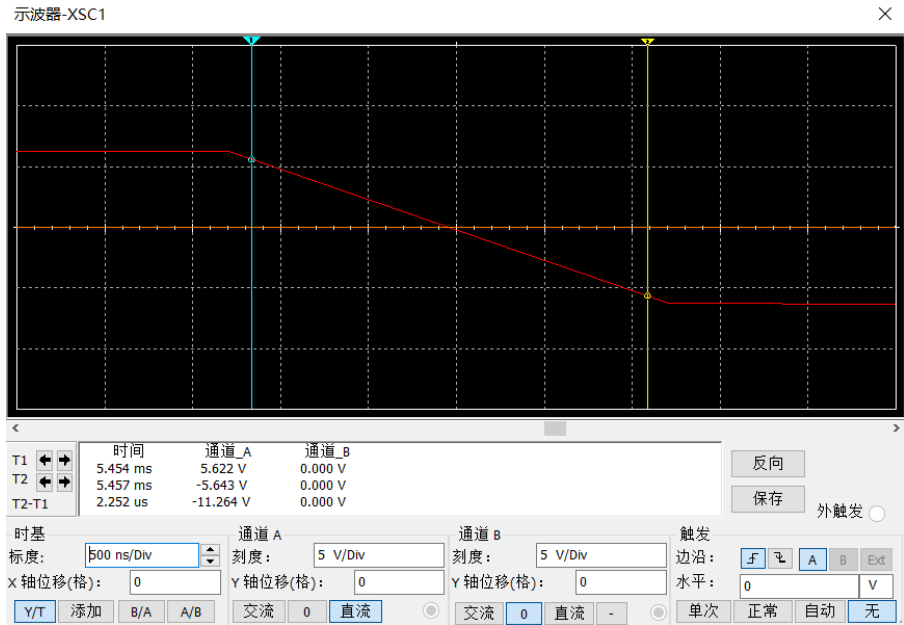


图 18: 方波下降时间测量波形图



根据测量结果，上升时间 $t_{up} = 1.277\mu s$ ，下降时间 $t_{down} = 2.252\mu s$ 。

- 滞回比较器仿真测量

单独测量滞回比较器电路，通过函数发生器输入频率为 $1kHz$ 、幅值为 $10V$ 的三角波信号，正确连入示波器，利用 B/A 模式测量滞回比较器的电压传输特性。仿真电路如图19所示，示波器测量波形如图20、21所示。

图 19: 滞回比较器电路仿真电路图

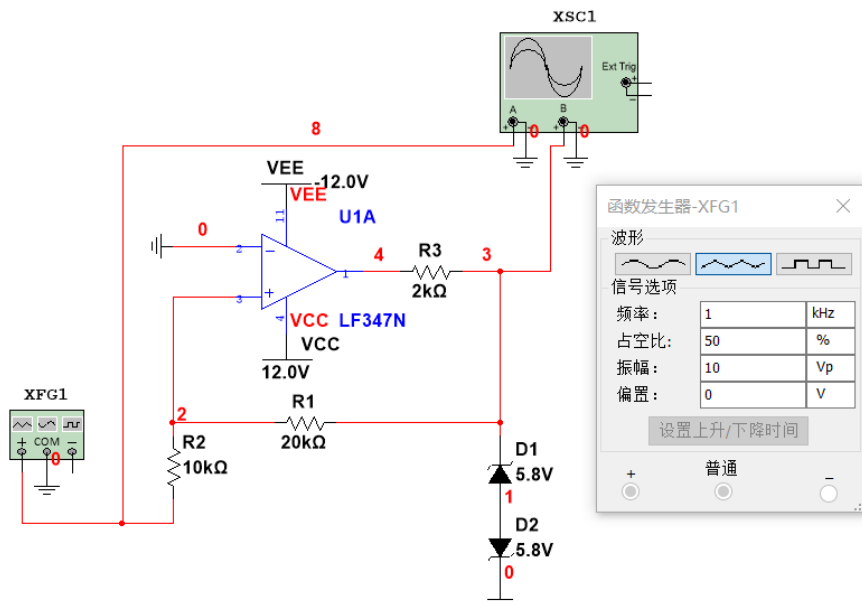


图 20: 滞回比较器电压传输特性仿真波形图 (峰峰值)

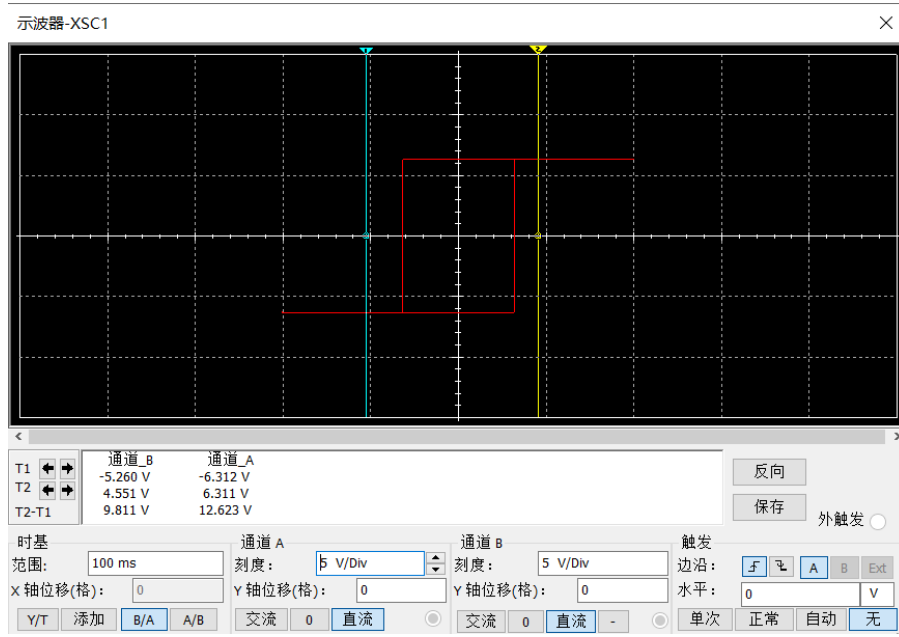
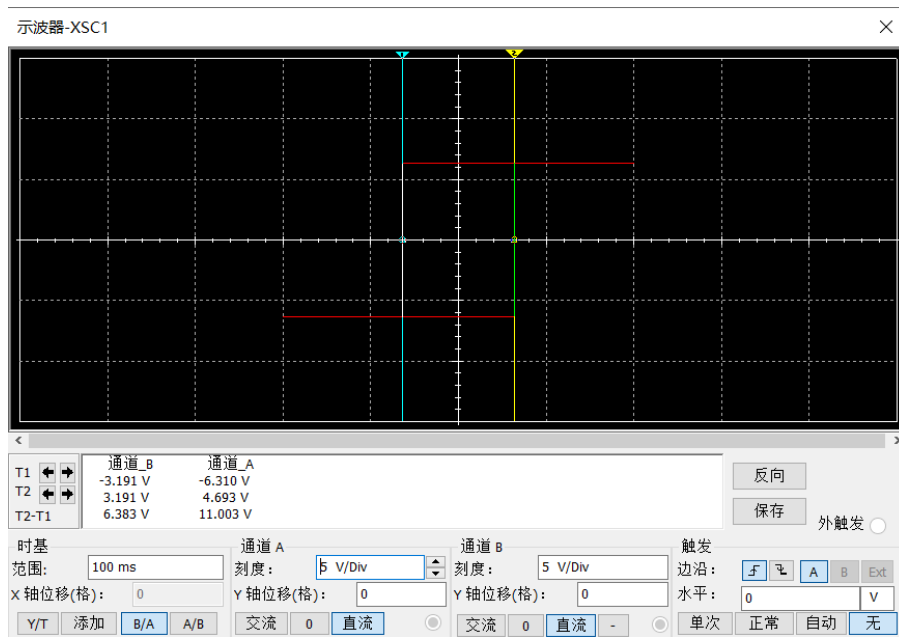


图 21: 滞回比较器电压传输特性仿真波形图 (阈值电压)



根据测量结果, 阈值电压 $U_{T+} = 3.191V$, $U_{T-} = -3.191V$ 。输出幅值 $|u_{o1}| = 6.312 + 6.311 = 12.623V$ 。

2.3 矩形波—锯齿波发生电路

2.3.1 理论计算

需要利用电位器改变正程、逆程的时间之比。应保证充电、放电两段对应阻值之比为 5 : 1, 输出 u_{o2} 阈值为 $\pm 2.9V$ 。

计算充电时间:

$$t = \frac{2u_{o2}R_{4+}C_1}{u_{o1+}} \approx 83.33\mu s$$

计算放电时间:

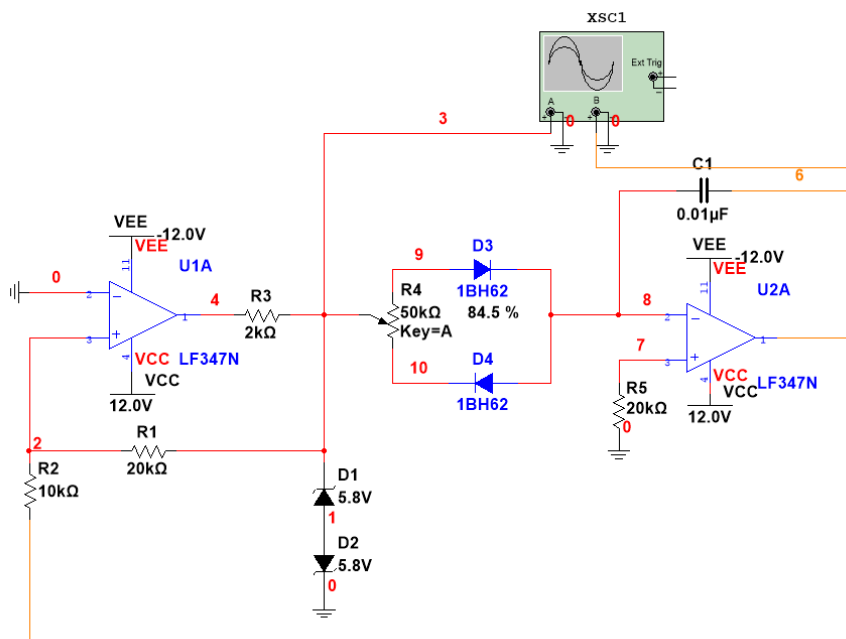
$$t = \frac{2u_{o2}R_4 - C_1}{u_{o1-}} \approx 416.67\mu s$$

周期 $T = 500\mu s$

2.3.2 仿真测量

根据设计原理，搭建仿真电路图如图22所示。其中，示波器已经正确连入电路。

图 22: 矩形波—锯齿波发生电路仿真电路图



调节三端变阻器 R_4 的值, 并通过示波器测量逆程时间与正程时间的比值, 直至 $(T_2/T_1)\% = 20\%$, 此时, 测得 $R_4 = 50k\Omega \times 84.5\% = 42.25k\Omega$ 。示波器波形如图23、24所示。

图 23: 锯齿波正程时间测量波形图

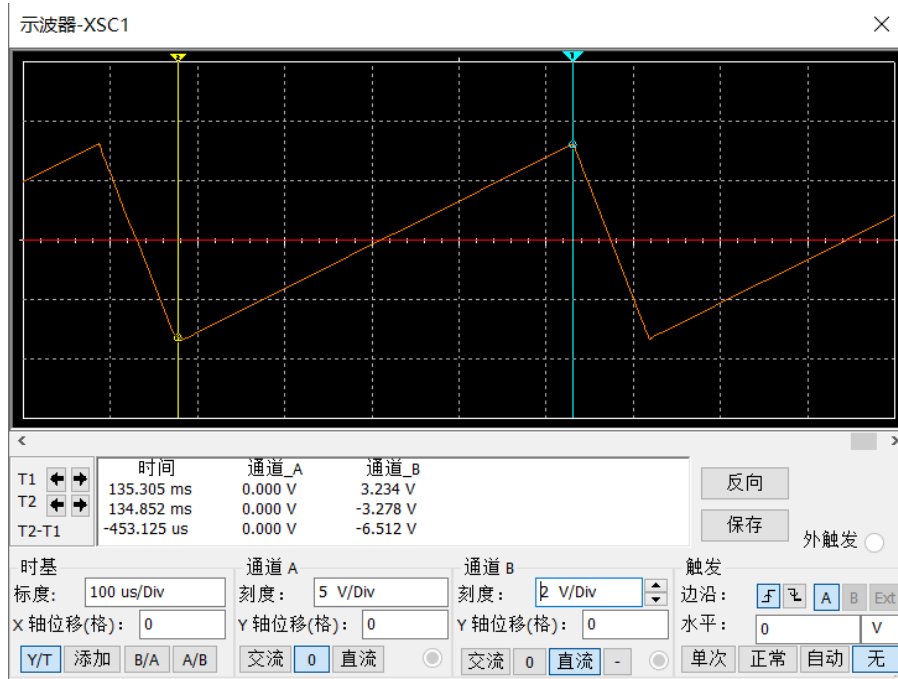
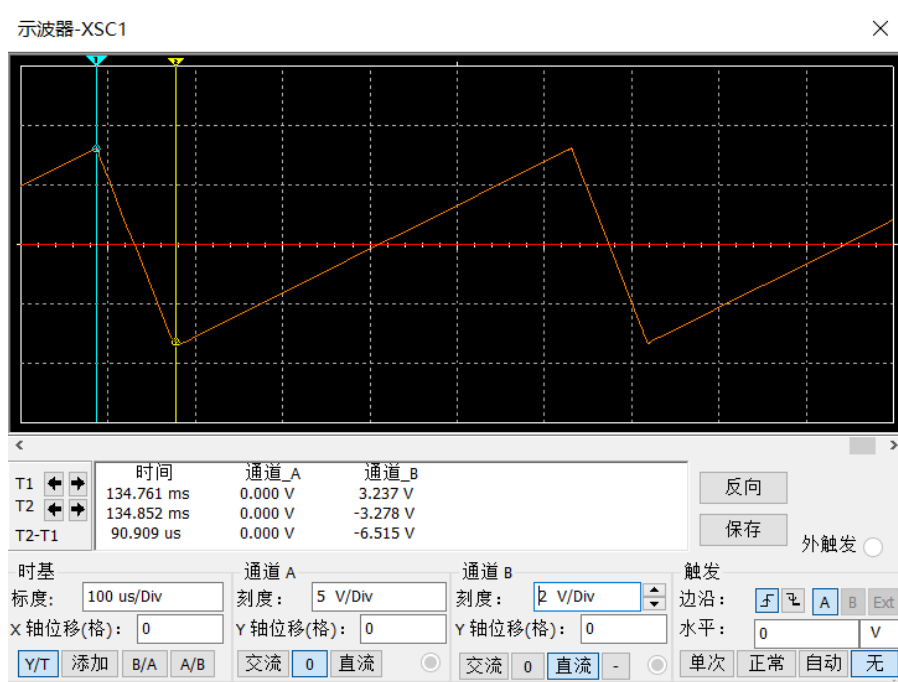


图 24: 锯齿波逆程时间测量波形图



测量得正程时间 $t_1 = 453.125\mu s$ ，逆程时间 $t_2 = 90.909\mu s$ ，周期 $T = 544.034\mu s$ 。比值

$$\frac{T_2}{T_1} \% = \frac{90.909}{453.125} = 20.06\%$$

幅值 $u_{pp} = 3.234 + 3.278 = 6.512V$

对矩形波进行测量，示波器波形如图25、26所示。

图 25: 锯齿波周期测量波形图

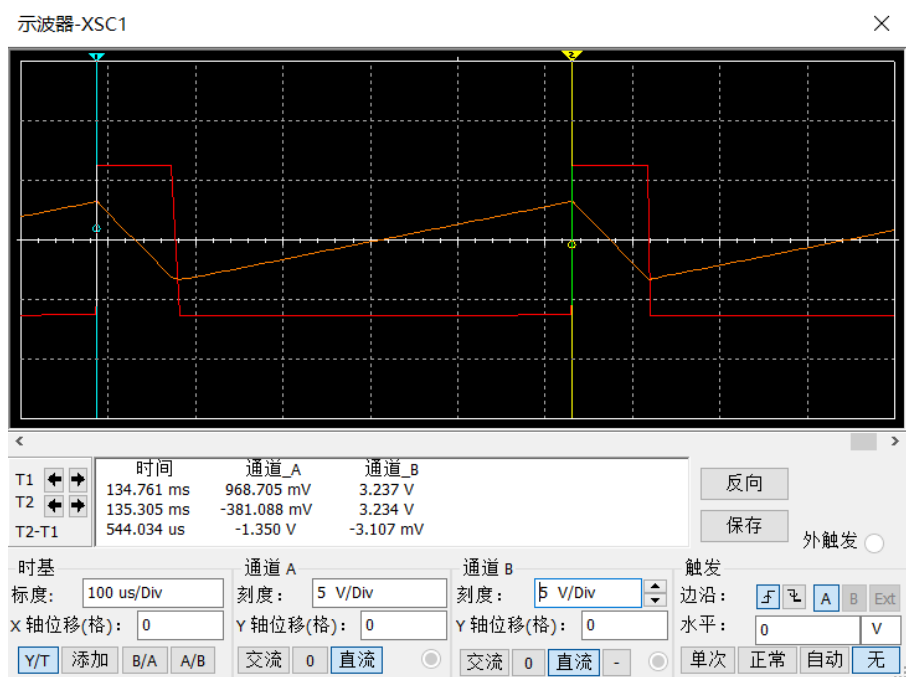
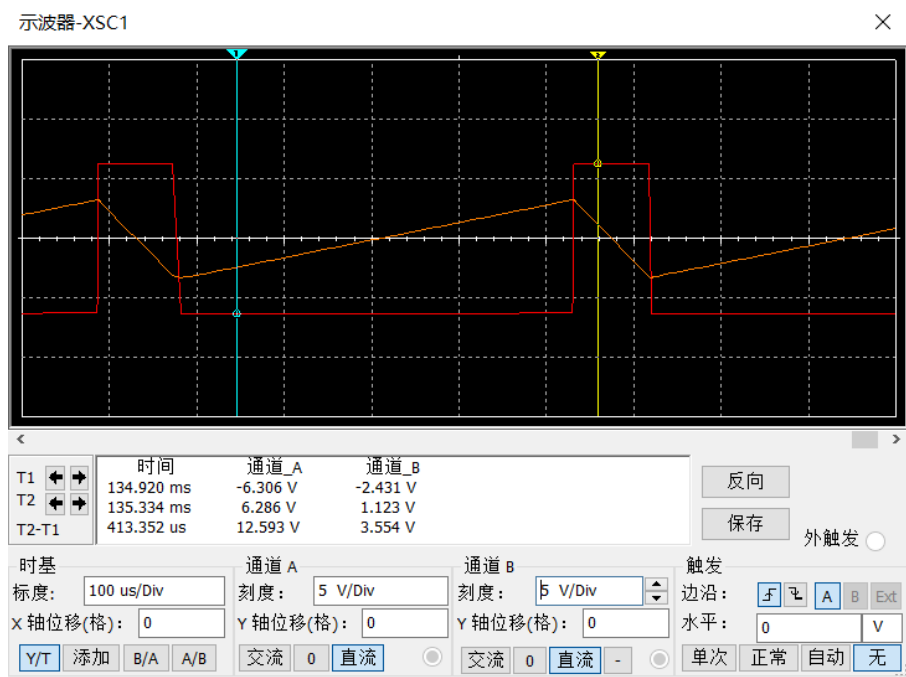


图 26: 锯齿波幅值测量波形图



矩形波周期 $T = 544.034\mu s$ ，与锯齿波周期相同。

幅值 $u_o = 6.306 + 6.286 = 12.592V$

2.4 数据记录表格

2.4.1 正弦波发生电路

表 1: 正弦波发生电路 (电路刚好起振) 数据表格

u_o	$R_W/k\Omega$	幅值 V_{pp}/V	周期 T/ms	频率 f/Hz
理论值	10.00	—	2.500	400.00
仿真值	10.25	2.860	2.500	400.00
实测值	10.90	2.01	2.437	410.37

表 2: 正弦波发生电路 (输出正弦波不失真且幅值最大) 数据表格

u_o	$R_W/k\Omega$	幅值 V_{pp}/V	周期 T/ms	频率 $/Hz$
理论值	—	—	2.500	400.00
仿真值	18.05	20.809	2.500	400.00
实测值	18.71	20.9	2.652	377.10

表 3: 正弦波发生电路 (输出为 $5V(V_p)/400Hz$ 的正弦波电压) 数据表格

$u_o = 5V(V_p)$	$R_W/k\Omega$	周期 T/ms	频率 $/Hz$
理论值	—	2.500	400.00
仿真值	16.12	2.528	395.57
实测值	16.92	2.576	388.27

10.79

2.4.2 方波—三角波发生电路

表 4: 方波—三角波发生电路 (方波) 数据表格

方波 (u_{o1})	幅值 V_{pp}/V	周期 $/\mu s$	上升时间 $/ns$	下降时间 $/ns$
理论值	11.600	400.000	—	—
仿真值	12.515	416.193	1.277	2.252
实测值	11.9	406.56	0.984	0.893

表 5: 方波—三角波发生电路 (三角波) 数据表格

三角波 (u_{o2})	幅值 V_{pp}/V	周期 $/\mu s$
理论值	5.800	400.000
仿真值	6.508	417.614
实测值	6.28	405.22

2.4.3 滞回比较器电压传输特性

表 6: 滞回比较器电压传输特性数据表格

	阈值电压 U_{T+}/V	阈值电压 U_{T-}/V	u_{o1} 幅值 V_{pp}/V
理论值	2.900	-2.900	11.600
仿真值	3.191	-3.191	12.623
实测值	2.85	-3.15	11.475

2.4.4 矩形波—锯齿波发生电路

表 7: 方波—三角波发生电路 (三角波) 数据表格

矩形波 (u_{o1})	幅值 V_{pp}/V	周期 $/\mu s$
理论值	11.600	500.000
仿真值	12.592	544.034
实测值	11.7	574.96

表 8: 方波—三角波发生电路 (三角波) 数据表格

锯齿波 (u_{o1})	幅值 V_{pp}/V	周期 $/\mu s$	逆程 $T_2/\mu s$	正程 $T_1/\mu s$	$(T_2/T_1)\%$
理论值	5.800	500.000	83.333	416.667	20.00
仿真值	6.512	544.034	90.909	453.125	20.06
实测值	6.114	544.00	96.00	478.00	20.08