

# 模电实验报告 8：波形发生电路实验

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

## 1 实验目的

1. 学习使用运放组成方波发生器、三角波发生器和锯齿波发生器。

## 2 实验仪器

示波器、信号发生器、交流毫伏表、数字万用表。

## 3 预习内容

1. 复习关于用运放组成的方波发生器、三角波发生器、锯齿波发生器和正弦波发生器的基础知识。
2. 定性绘制本实验所用电路的输出波形，估算输出波形的周期。

## 4 实验内容

### 4.1 方波发生器

方波发生器电路如图 (1)，其工作原理可试述如下。设电路通电瞬时，电容上的电压为零，电路

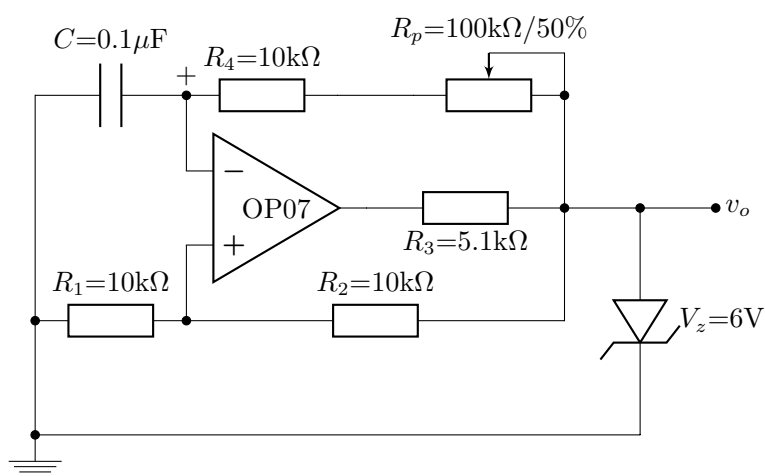


图 1: 方波发生器电路图

输出为  $V_z$ ，这时运放正向输入端电压为

$$V_{P1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_z = FV_z \quad (1)$$

运放输出电流经  $R_3$ 、 $R_P$ 、 $R_4$  向电容  $C$  充电。运放反向输入端  $V_N$  随时间延续电压升高，当  $V_N = V_{P1}$  时，电路输出翻转， $V_o$  由  $V_z$  变为  $-V_z$ ， $V_P$  由  $V_{P1} = FV_z$  变为  $V_{P2} = -FV_z$ 。这时由“地”向电容反向充电， $V_N$  随时间延续电压下降，当  $V_N = V_{P2}$  时，电路输出翻转， $V_o$  由  $-V_z$  变为  $V_z$ ， $V_P$  由  $V_{P2} = -FV_z$  变为  $V_{P1} = FV_z$ 。周而复始，电路输出方波。在稳态，输出为  $V_z$  的时间可用以下方法推导。在起始时刻，电容上的电压为  $V_C(0) = -FV_z$ ，电容充电的终了电压为  $V_z$ ，这里“电容充电的终了电压”指“若输出电压  $V_o$  不翻转，电容充电的终了电压”，所以电容上的电压为

$$V_C(t) = V_z + (-FV_z - V_z)e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

其中， $R = R_P + R_4$ 。当电容上的电压达到  $FV_z$  时，电路翻转，记电容充电的时间为  $\tau$ ，则

$$\begin{aligned} FV_z &= V_z + (-FV_z - V_z)e^{-\frac{\tau}{RC}} \\ \tau &= RC \ln \frac{1 + F}{1 - F} \end{aligned}$$

输出方波的周期为  $2\tau$ 。所以，输出方波的周期为

$$T = 2(R_P + R_4)C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (3)$$

所以，在实验中通过改变  $R_P$  就可以改变电路输出方波的周期。

通常，由于运放最大输出电流小于稳压二极管的最大稳压电流  $I_{zmax}$ ，为使运放能正常工作，必须有限流电阻  $R_3$ 。若电路不起振，可适当减小  $R_3$  的阻值。观察  $V_C$ 、 $V_o$  的波形，并与理论分析的结果相比较。

#### 实验内容：

1. 分别测量  $R_4 + R_P = 20\text{k}\Omega$ 、 $40\text{k}\Omega$ 、 $60\text{k}\Omega$ 、 $80\text{k}\Omega$ 、 $100\text{k}\Omega$  时电路输出波形的峰峰值和周期，记录波形，并与理论分析的结果相比较。

## 4.2 占空比可调的矩形波发生器

电路如图 (2)。与方波发生器相比，给  $C$  正向充电和反向充电使用了不同的路径，从而使得高电平持续时间和低电平持续时间不同。当输出为高电平  $V_z$  时，运放输出的电流经  $R_{PP}$ 、 $D_1$ 、 $R_4$  向电容充电，类同于对方波发生器的分析，忽略二极管的开启电压，容易得到输出高电平持续的时间

$$\tau_1 = (R_{PP} + R_4)C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (4)$$

类似地可以求得输出低电平持续的时间

$$\tau_2 = (R_{PN} + R_4)C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (5)$$

输出的周期为

$$T = \tau_1 + \tau_2 = (R_P + 2R_4)C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (6)$$

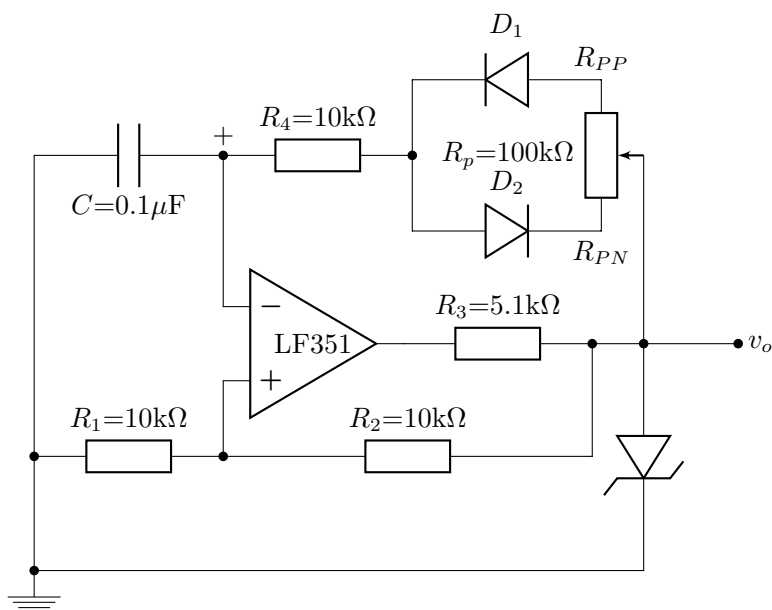


图 2: 占空比可调的矩形波发生器电路图

占空比

$$\eta = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{R_{PP} + R_4}{R_{PN} + R_4} \quad (7)$$

实验内容:

1. 调整  $R_P$ , 分别测量  $R_4 + R_{PP} = 20\text{k}\Omega$ 、 $40\text{k}\Omega$ 、 $60\text{k}\Omega$ 、 $80\text{k}\Omega$ 、 $100\text{k}\Omega$  时电路输出波形的幅值、周期和占空比, 并与理论分析的结果相比较。
2. 将占空比调为 1, 测量二极管导通时的电压降, 计及二极管导通时的电压降, 推导图 (2) 所示电路周期, 并与测量结果相比较。

### 4.3 三角波发生器

电路如图 (3)。它由一个过零比较器和一个积分器组成。其工作原理可试述如下。设电路通电瞬时,  $t=0$ , 电容上的电压为零, 积分器输出  $V_o=0$ , 过零比较器输出为  $V_{o1}=V_z$ , 这时运放 AR1 正向输入端电压为

$$V_{P1} = \frac{R_P}{R_1 + R_P}(V_z - V_o) = \frac{R_P}{R_1 + R_P}V_z + \frac{R_1}{R_1 + R_P}V_o > 0 \quad (8)$$

运放 AR1 输出保持为高电平。积分器输出线性地下降。当  $V_{P1}$  等于零时刻  $\tau$ , 过零比较器翻转,  $V_{o1}=-V_z$ , 记此时刻的积分器输出电压值为  $V_{oN}$ ,

$$\frac{R_P}{R_1 + R_P}V_z = -\frac{R_1}{R_1 + R_P}V_{oN}$$

由上式可解得

$$V_{oN} = -\frac{R_P}{R_1}V_z \quad (9)$$

不难得到三角波的周期  $4\tau$ 。

$$V_{oN} = -\frac{1}{R_3C} \int_0^\tau V_z dt = -\frac{V_z}{R_3C}\tau \quad (10)$$

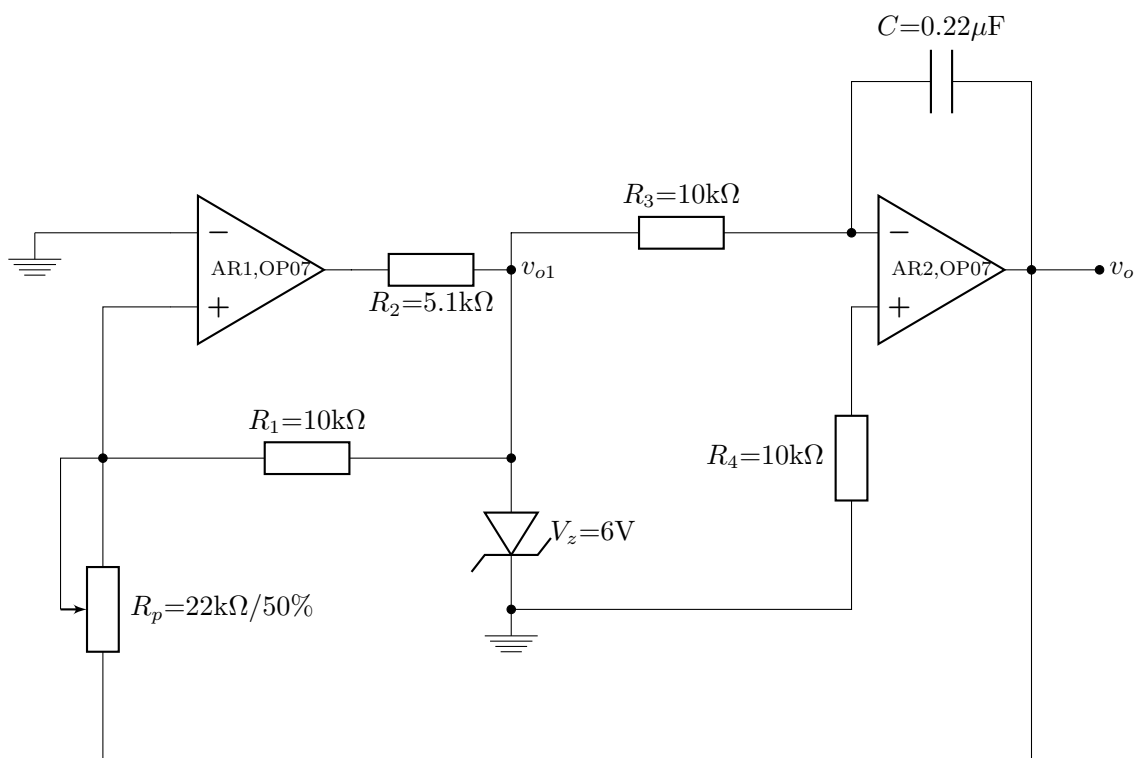


图 3: 锯齿波发生器电路图

将 (9) 式代入 (10) 式可得到三角波的周期  $T$

$$T = \frac{4R_3R_PC}{R_1} \quad (11)$$

还可以得到三角波的幅值为

$$V_{om} = \frac{R_P}{R_1}V_z \quad (12)$$

实验内容:

1. 取  $R_P = 10\text{k}\Omega$ , 观察电路输出波形  $V_o$ 、 $V_{o1}$ , 测量输出波形的周期和幅值。
2. 要求改变三角波的周期, 可调整哪个元件, 实验并测量记录之。

#### 4.4 锯齿波发生器

电路如图 (4)。与图 (3) 三角波发生器相比, 不同之处是: 给  $C$  正向充电和反向充电使用了不同的路径, 从而使得输出  $V_{o1}$  上升持续时间和下降持续时间不同。电容反向充电电流经过  $C$ 、 $R_4$ 、 $R_{PN}$ 、 $D_2$ , 类似于对三角波周期的推导, 忽略二极管的开启电压, 容易得到锯齿波的下降时间为

$$\tau_2 = \frac{2(R_{PN} + R_4)R_1C}{R_2} \quad (13)$$

电容正向充电电流经过  $C$ 、 $R_4$ 、 $R_{PP}$ 、 $D_1$ , 忽略二极管的开启电压, 容易得到锯齿波的上升时间为

$$\tau_1 = \frac{2(R_{PP} + R_4)R_1C}{R_2} \quad (14)$$

锯齿波的周期为

$$T = \tau_1 + \tau_2 = \frac{2(R_P + 2R_4)R_1C}{R_2} \quad (15)$$

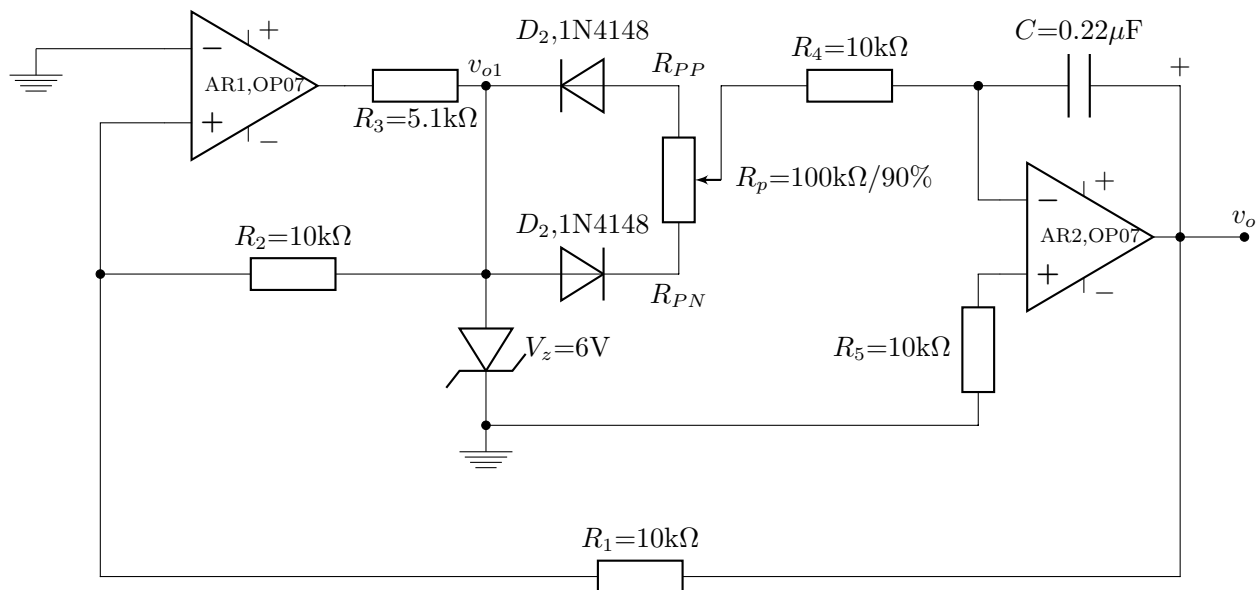


图 4: 三角波发生器电路图

类似于对三角波幅值的推导，容易得到锯齿波的幅值为

$$V_{om} = \frac{R_1}{R_2} V_z \quad (16)$$

实验内容：

1. 观察电路的输出波形，测量输出波形的上升时间  $\tau_1$  和下降时间  $\tau_2$ 。
2. 取  $R_{PP}$  分别为  $10k\Omega$ 、 $30k\Omega$ 、 $50k\Omega$ 、 $70k\Omega$ 、 $90k\Omega$ ，测量输出波形  $V_o$  的  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  的变化，并与理论估算值比较。
3. 将  $D_1$ 、 $D_2$  反接输出波形  $V_o$  将发生什么变化？
4. 要求改变输出波形的周期，宜改变哪一个元件的元件值？测量记录之。

#### 4.5 正弦波发生器

电路如图 (5)。该电路有一条正反馈支路， $R_4$ 、 $C_1$ 、 $R_3$ 、 $C_2$ 。反馈系数为

$$F = \frac{V_F}{V_o} = \frac{R_3 C_1 s}{R_3 R_4 C_1 C_2 s^2 + (R_3 C_2 + R_4 C_1 + R_3 C_1) s + 1} \quad (17)$$

若取  $R_3 = R_4 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ ，则对于  $\omega_o = \frac{1}{RC}$ ，有  $F = \frac{1}{3}$ 。还有一条负反馈支路， $D_1$ 、 $D_2$ 、 $R_2$ 、 $R_P$ 、 $R_1$ 。该支路与运放组成了同相输入放大器，放大倍数为

$$A_{VF} = 1 + \frac{R_P + R_{eq}}{R_1} \quad (18)$$

其中， $R_{eq}$  为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $R_2$  的等效电阻。

振荡器起振的条件是：幅值条件： $|\dot{A}_{VF} F| > 1$ ；相位条件： $\sum \varphi = 2k\pi$ ， $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。对于  $\omega_o$  正反馈支路的相移为 0，所以只要  $A_{VF} > 3$ ，电路就能起振。

对于正弦波振荡器，起振后的平衡条件是：幅值条件： $|\dot{A}_{VF} F| = 1$ ；相位条件： $\sum \varphi = 2k\pi$ ， $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。因此，电路一定要有自动调节的能力。在本电路中，在起振的瞬间，输出正弦波的幅值较小，其

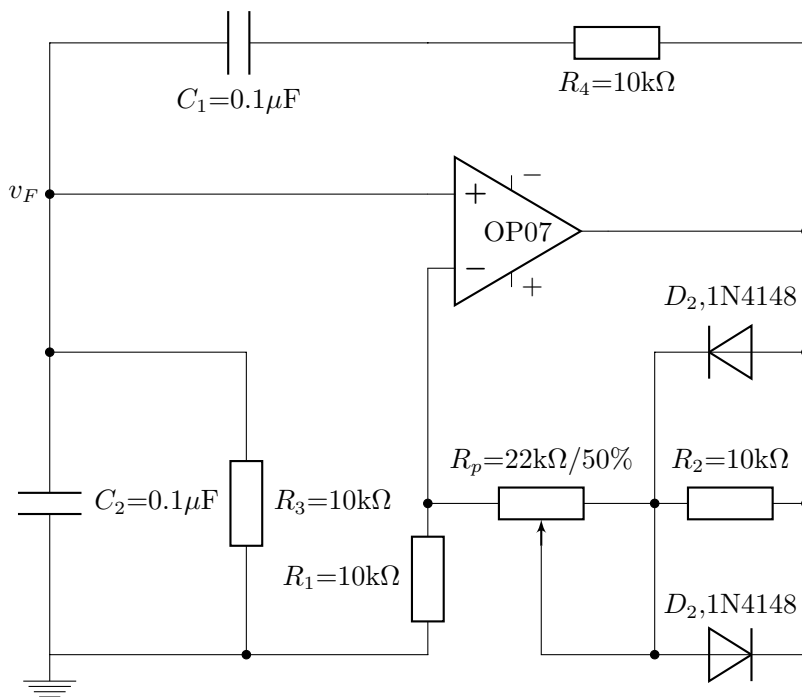


图 5: 正弦波发生器电路图

在电阻  $R_2$  上的分压  $V_{R2}$  小于二极管的开启电压  $V_{Dth}$ , 二极管不起作用,  $R_{eq}=R_2$ , 假设  $R_P=15\text{k}\Omega$ , 由 (18) 式可知, 这时同相放大器的放大倍数为 3.5 倍, 大于 3 倍, 输出电压波形的幅值不断增大。随着输出电压波形的幅值不断增大, 当  $V_{R2}=V_{Dth}$  时, 二极管导通,  $R_{eq}$  减小, 最终平衡于  $A_{VF}=3$ , 电路输出稳定的正弦波。

正弦波的幅值的估算。在稳态, 负反馈支路的电流在  $R_1$  上的压降为输出电压的三分之一

$$\frac{V_o - V_{Dth}}{R_P + R_1} R_1 = \frac{1}{3} V_o$$

从中可解出输出正弦波的幅值

$$V_o = \frac{3R_1}{2R_1 - R_P} V_{Dth}$$

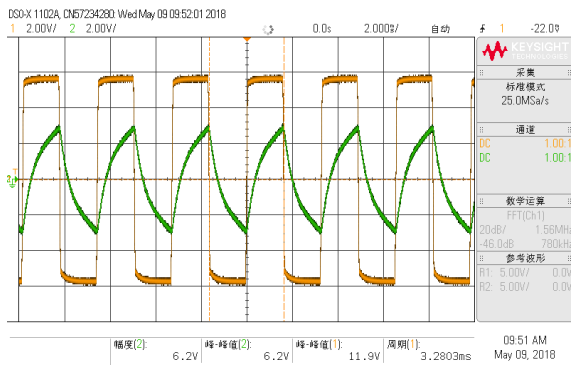
由于二极管在一个周期内, 在导通、截止之间不断变化, 所以输出的“正弦波”的质量并不好, 电路非线性造成的谐波失真较大。有多种实现从  $|\dot{A}_{VF}| > 1$  到  $|\dot{A}_{VF}| = 1$  的电路, 有的电路可使输出正弦波的谐波失真较小。

#### 实验内容:

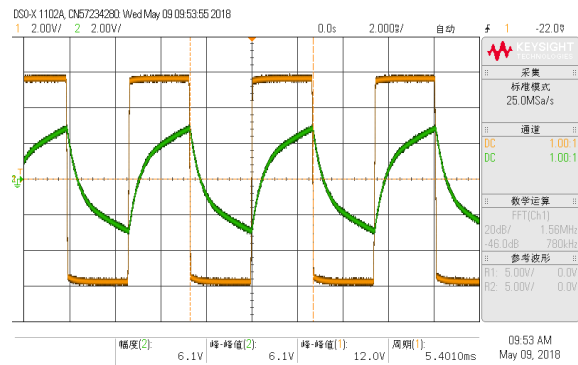
1. 调整  $R_P$ , 使电路起振, 且使输出波形的幅值为 5V, 这时的  $R_P$  的阻值为多少?
2. 再把  $R_P$  调到最大, 观察输出波形  $V_o$ 。

表 1: 方波发生器数据

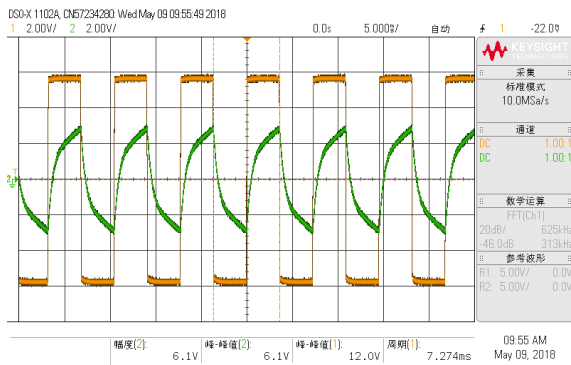
$R_P/k\Omega$	峰峰值 $V_{PP}/V$	周期测量值 $T/ms$	周期理论值 $T/ms$	周期误差
10.057	11.9	3.2803	4.407	-25.56%
30.0218	12	5.401	8.794	-38.58%
50.0151	12	7.274	13.187	-44.83%
70.156	12	9.061	17.612	-48.55%
90.06	11	10.784	21.985	-50.94%



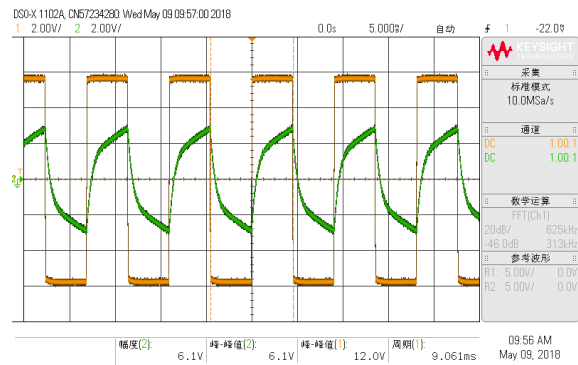
(a)  $R_P = 10.057k\Omega$



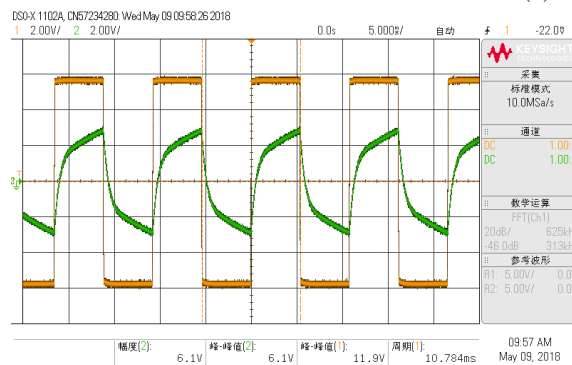
(b)  $R_P = 30.0218k\Omega$



(c)  $R_P = 50.0151k\Omega$



(d)  $R_P = 70.156k\Omega$



(e)  $R_P = 90.060k\Omega$

图 6: 方波发生器波形图

## 5 实验数据

### 5.1 方波发生器

### 5.2 矩形波发生器

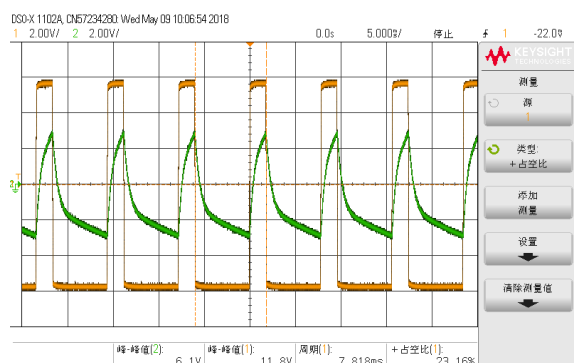
### 5.3 三角波发生器

### 5.4 锯齿波发生器

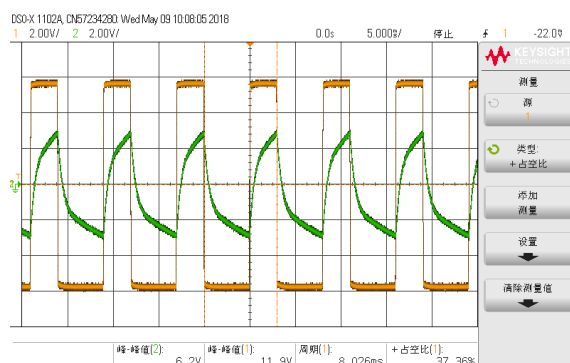
### 5.5 正弦波发生器

表 2: 矩形波发生器数据

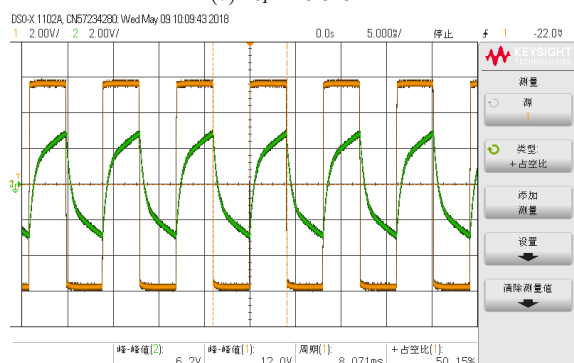
$R_P/k\Omega$	$V_{PP}/V$	T(测量值)/ms	T(理论值)/ms	T 误差	$\eta$ (测量值)	$\eta$ (理论值)	$\eta$ 误差
10.02	11.8	7.818	10.986	-28.83670126	23.16%	25.02%	-7.43%
30.042	11.9	8.026	10.986	-26.94338249	37.36%	41.7%	-10.40%
50.077	12	8.071	10.986	-26.53377025	50.15%	58.4%	-14.12%
70.026	12	8.022	10.986	-26.97979246	62.96%	75.02%	-16.07%
90.053	11.9	7.801	10.986	-28.99144366	77.34%	91.71%	-15.66%



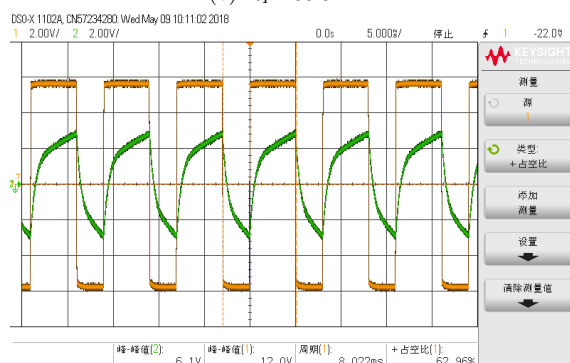
(a)  $R_P=10.020k\Omega$



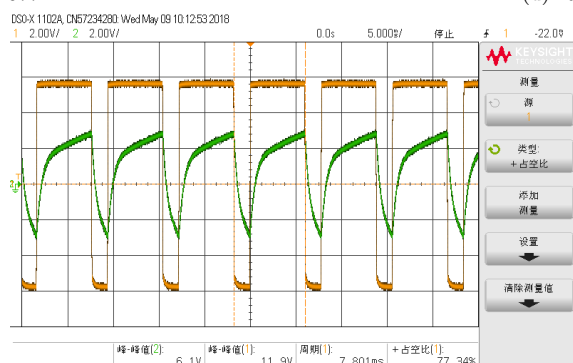
(b)  $R_P=30.042k\Omega$



(c)  $R_P=50.077k\Omega$



(d)  $R_P=70.026k\Omega$



(e)  $R_P=90.053k\Omega$

图 7: 矩形波发生器波形图

为示波器测量上升下降时间时是取了变化范围的 10% 和 90% 处对应的时间值，因此相加不等于周期。

## 2. 正弦发生器输出截断



表 3: 三角波发生器数据

$R_P/k\Omega$	峰峰值 $V_{PP}/V$	周期测量值 $T/ms$	周期理论值 $T/ms$	周期误差
10.0466	11.1	9.498	8.841	7.43%
5.026	5.55	4.872	4.423	10.15%
18.976	21.7	17.742	16.699	6.24%

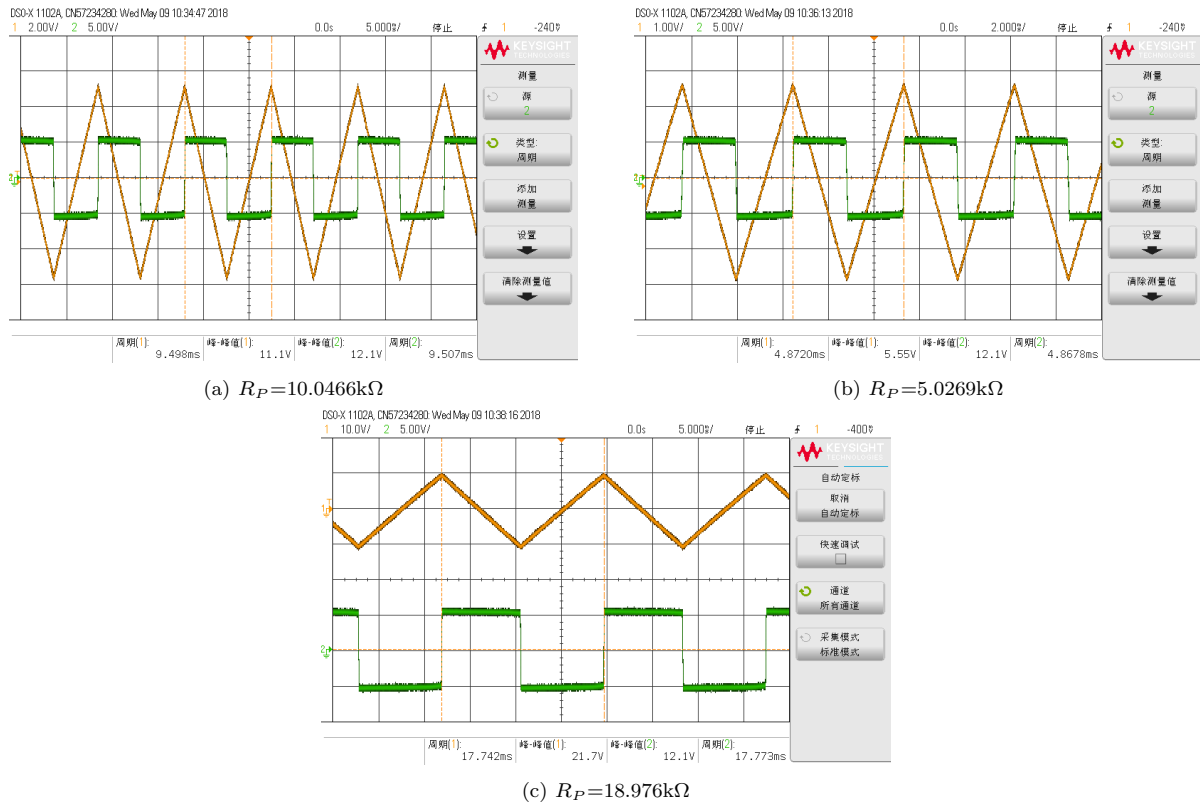


图 8: 三角波发生器波形图

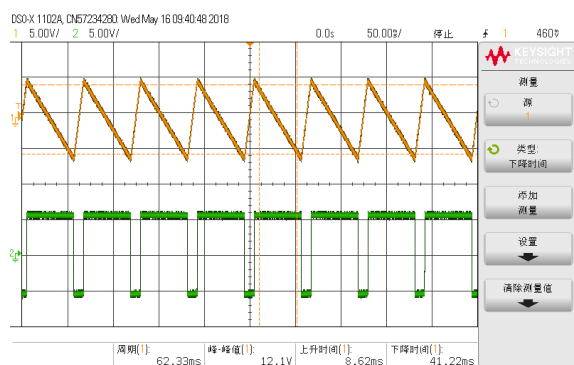
表 4: 锯齿波发生器数据:  $D_1D_2$  正接

$R_P/k\Omega$	$V_{PP}/V$	$T/ms$	上升时间 $\tau_1$	下降时间 $\tau_2$	正脉宽 $T_1/ms$	负脉宽 $T_2/ms$	占空比 $\eta$
10.00538	12.1	62.33	8.62	41.22	51.71	10.71	82.84%
30.0187	11.9	62.85	16.74	32.64	41.74	21.18	66.34%
50.03	11.9	63.06	24.86	24.48	31.4	31.58	49.85%
70.0231	11.9	62.99	33.31	16.7	20.99	41.91	33.37%
90.0472	12.1	62.47	44.17	8.42	10.5	52.03	16.80%

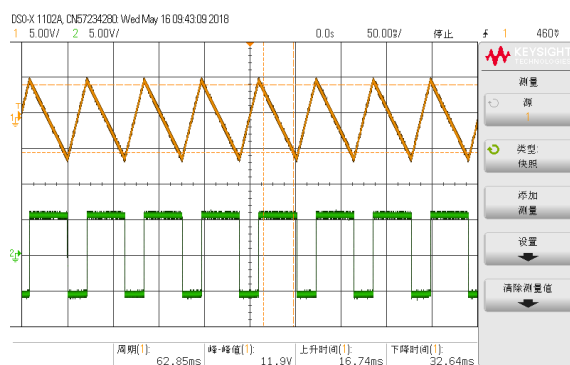
在实验过程中，其他同学将  $R_P$  调至最大时，输出信号会出现截断现象。但是我在实验过程中并没有观察到此现象。

表 5: 锯齿波发生器数据:  $D_1D_2$  反接

$R_P/k\Omega$	$V_{PP}/V$	T/ms	上升时间 $\tau_1$	下降时间 $\tau_2$	正脉宽 $T_1/ms$	负脉宽 $T_2/ms$	占空比 $\eta$
10.0796	12.1	62.55	41.5	8.53	10.75	51.8	17.19%
30.044	11.9	62.91	33.19	16.94	21.22	41.68	33.73%
50.0191	11.9	62.94	24.98	25.22	31.62	31.38	50.19%
70.003	11.9	62.77	16.58	32.61	41.93	20.97	66.66%
90.0261	12.1	62.25	8.5	41.13	51.88	10.51	83.15%



(a)  $R_P=10.00538k\Omega$

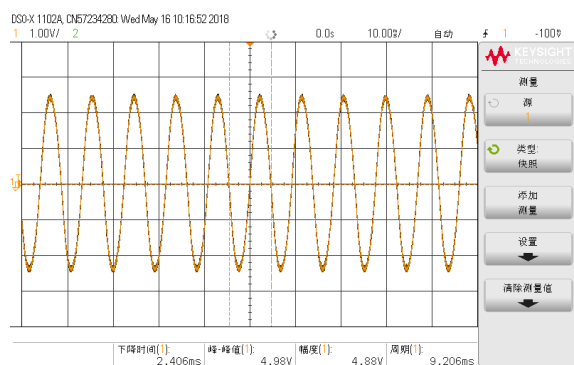


(b)  $R_P=30.0187k\Omega$

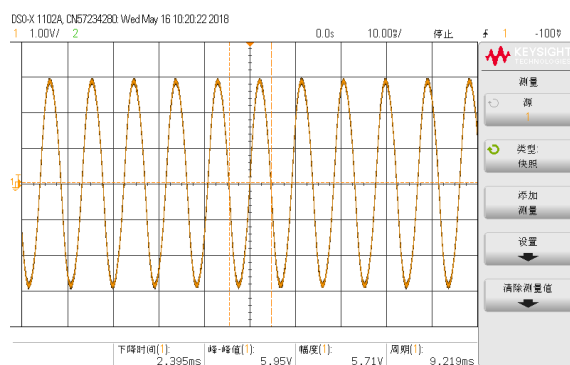
图 9: 锯齿波发生器波形图

表 6: 正弦波发生器数据

$R_{PP}/k\Omega$	$V_{PP}/V$
22.0573	5
22.852	5.95



(a)  $R_P=22.0573k\Omega$



(b)  $R_P=22.852k\Omega$

图 10: 正弦波发生器波形图

## 7 思考题

### 7.1 图 (1) 中的 $R_3$ 的阻值应如何选定?

由前文可知,  $R_3$  的作用是限流。为了使稳压管正常工作, 通过其的电流不能太大, 因此需要  $R_3$  来限流。同时, 运放的工作电压有上限, 为保护运放使其正常工作,  $R_3$  可以起到分压的作用。

## 7.2 图 (1) 所示电路中，电容 C 的容值应如何取？

由式 (3)，改变电容 C 的容值会导致周期改变。实际应用中的运放都有一定的响应频率，因此我们取的电容的容值不能太小以致理论频率高于运放的响应频率。

## 7.3 在图 (5) 中，改变 $R_P$ 时频率是否会随之变化？若电路已输出稳定的正弦波，改变 $R_4$ 这时波形发生什么变化，为什么？

改变  $R_P$  不会改变输出信号的频率。因为这是负反馈支路，只会改变放大倍数。

首先改变  $R_4$  时，破坏电路的平衡条件，输出信号变形。平衡后，查阅资料可知，输出信号的频率理论值为：

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad (19)$$

因此当  $R_4$  变大时，频率变小； $R_4$  变小时，频率变大。

## 参考文献

[1] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分). 高等教育出版社, 2006.