

# 实验报告

课程名称: 模拟电子技术实验 实验名称: 实验七: 波形发生电路

专业-班级: 自动化7班 学号: 220320726 姓名: 彭尚品

实验日期: 2024 年 6 月 19 日 评分: \_\_\_\_\_

教师评语:

助教签字: \_\_\_\_\_

教师签字: \_\_\_\_\_

日期: \_\_\_\_\_

# 实验预习

## 实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：\_\_\_\_\_ 原始数据审核：\_\_\_\_\_

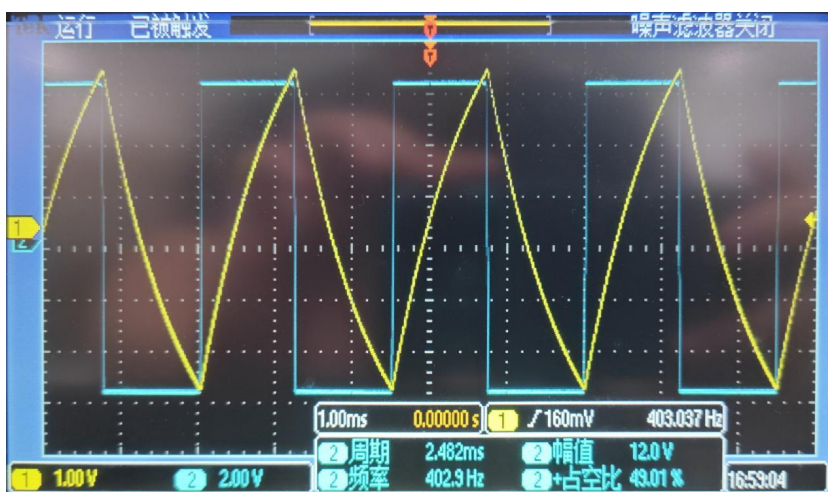
（包括预习时，计算的理论数据；需要完成预习报告中的仿真部分，可另附一预习仿真报告作为预习报告）

### 1、方波发生电路

分别求出  $R_f=10k\Omega$ ，以及  $R_f=100k\Omega$  的  $u_o$  的周期时间。  $T_1=0.0022s$   $T_2=0.022s$

用示波器观测反相端  $u_c$  和输出电压  $u_o$  的波形，分别测出  $R_f=10k\Omega$ ，以及  $R_f=100k\Omega$  的  $u_o$  的频率、周期时间、幅值、占空比，并记录  $R_f=10k\Omega$  时的输出波形。

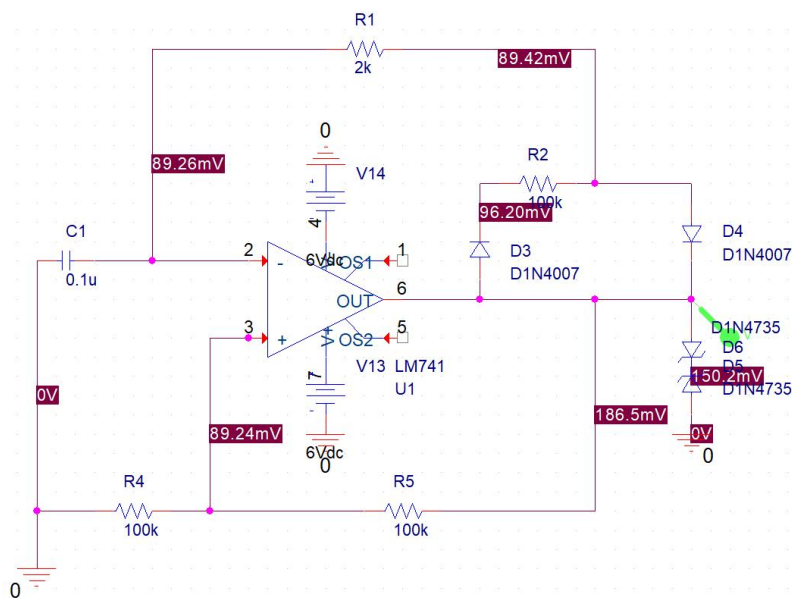
$R_f=10k\Omega$  时



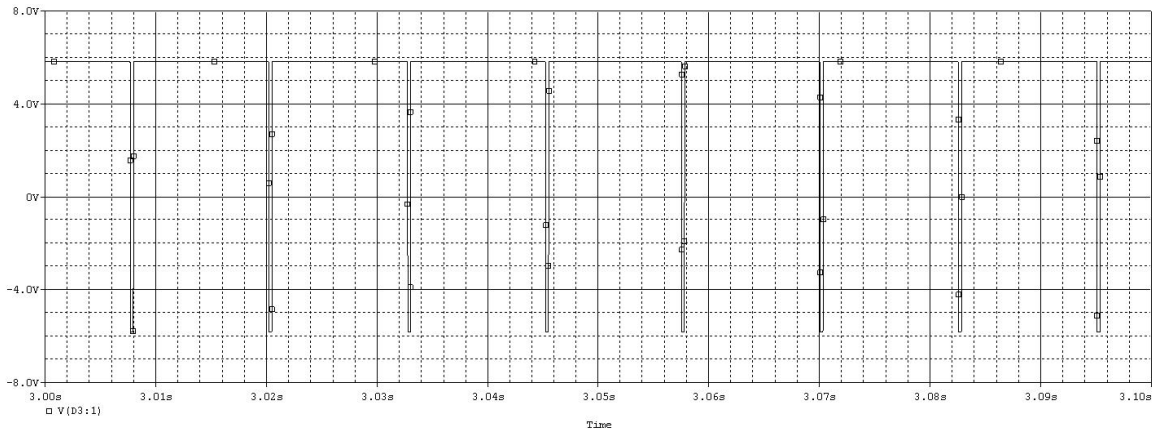
### 2、占空比可调的矩形波发生电路。

仿真电路图和仿真输出波形图（电位器  $R_w$  动端 b 点与 a 点电阻为 0）

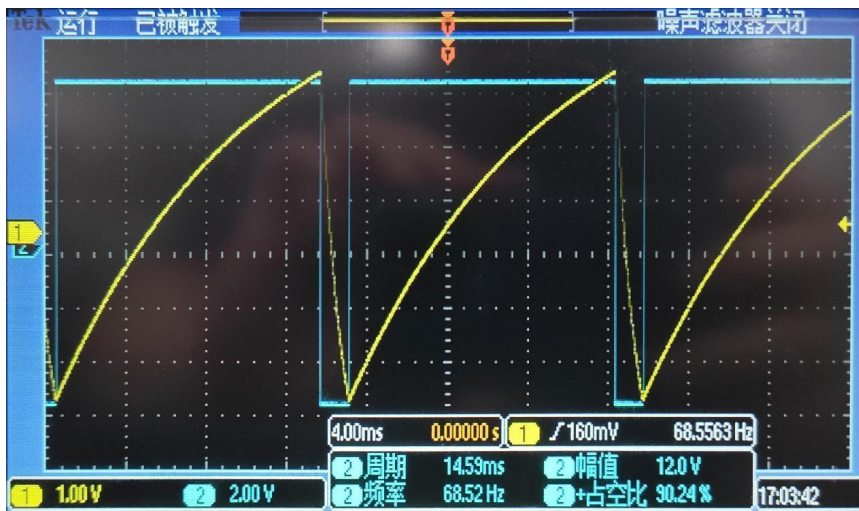
仿真电路图：



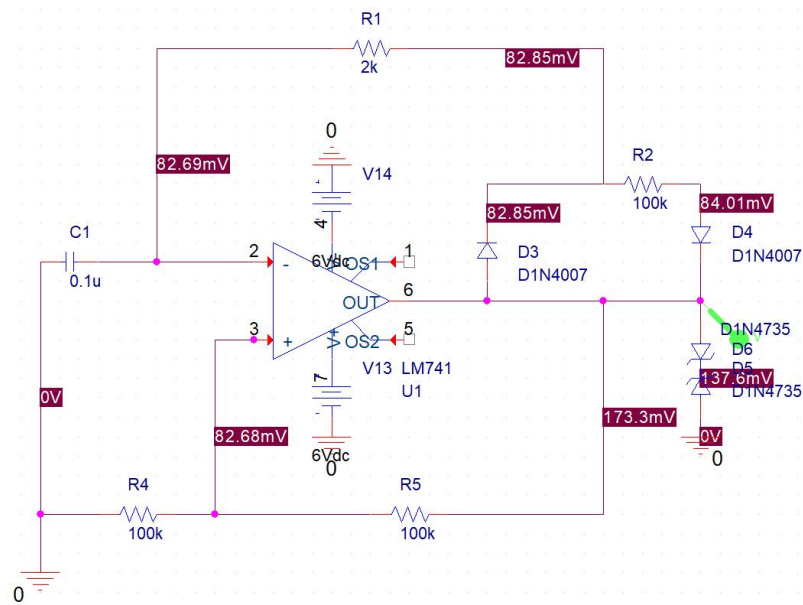
仿真输出波形图：



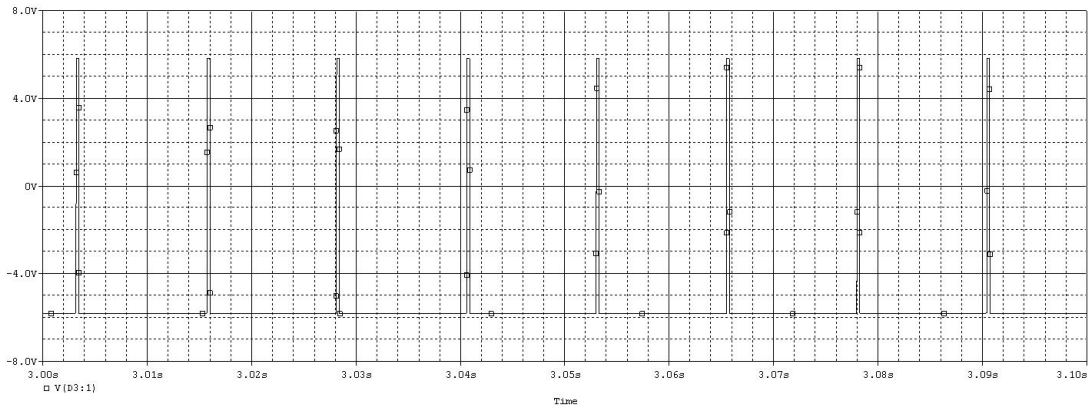
$R_{ab}=0$



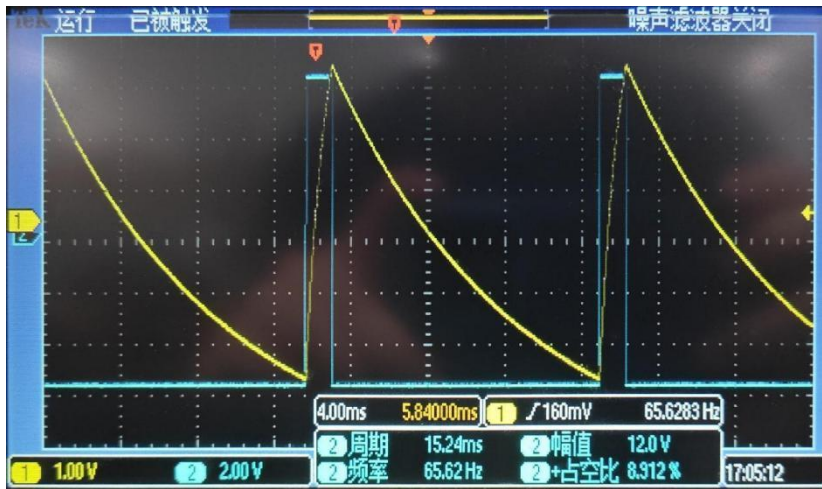
仿真电路图和仿真输出波形图（电位器  $R_w$  动端 b 点与 c 点电阻为 0）  
仿真电路图：



仿真输出波形图：



$R_{bc}=0$



### 3、三角波发生电路。

① 分析图 5 的电路工作原理，回答下面问题：

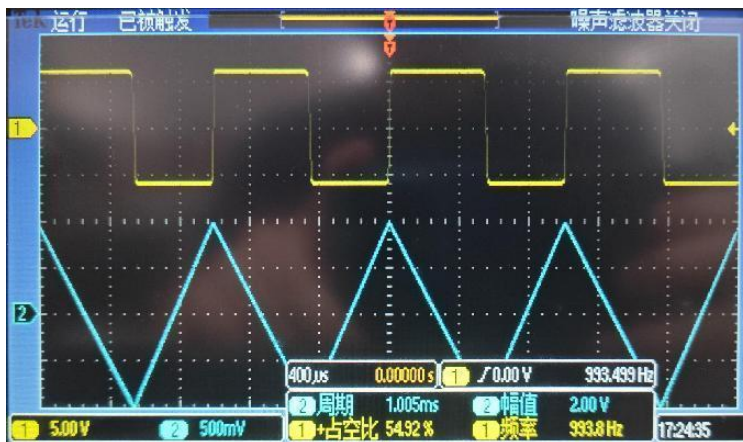
(1) 运放  $A_1$  和  $A_2$  是否工作在线性范围内？

运放  $A_1$  开环，不工作在线性范围内， $A_2$  引入负反馈，工作在线性范围内

(2) 要求  $V_o$  的幅值为  $\pm 1V$ ，周期时间为 1ms，理论计算出  $R_1$  和  $R_4$  的电阻值各为多少？

$R_1=16.13k\Omega$      $R_4=154.99k\Omega$

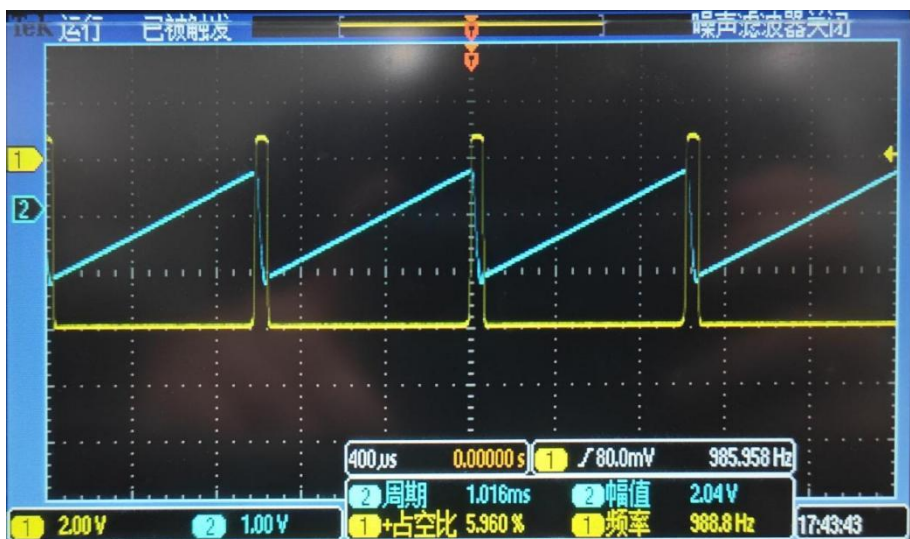
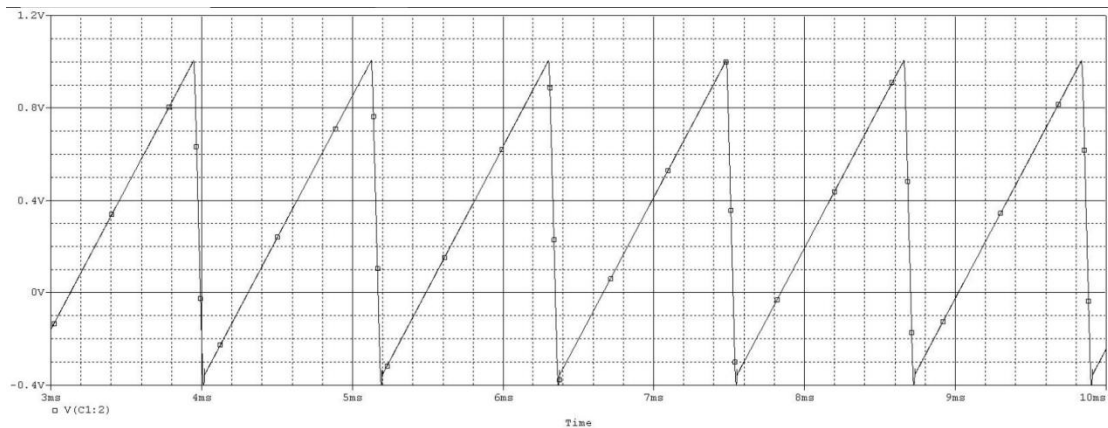
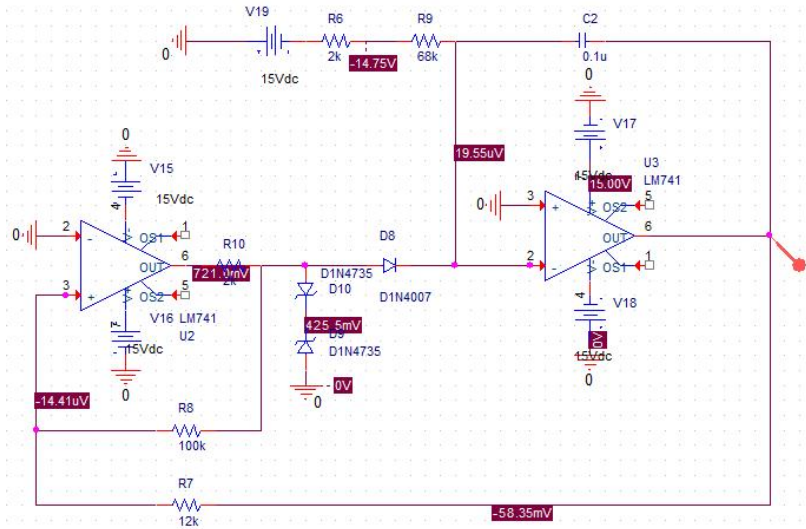
(3) 用示波器观测  $u_{o1}$  和  $u_o$  的波形，并在同一个时序下，画出两电压波形。要求测出  $u_{o1}$  的频率、占空比以及  $u_o$  的周期、幅值。



### 4、锯齿波发生电路

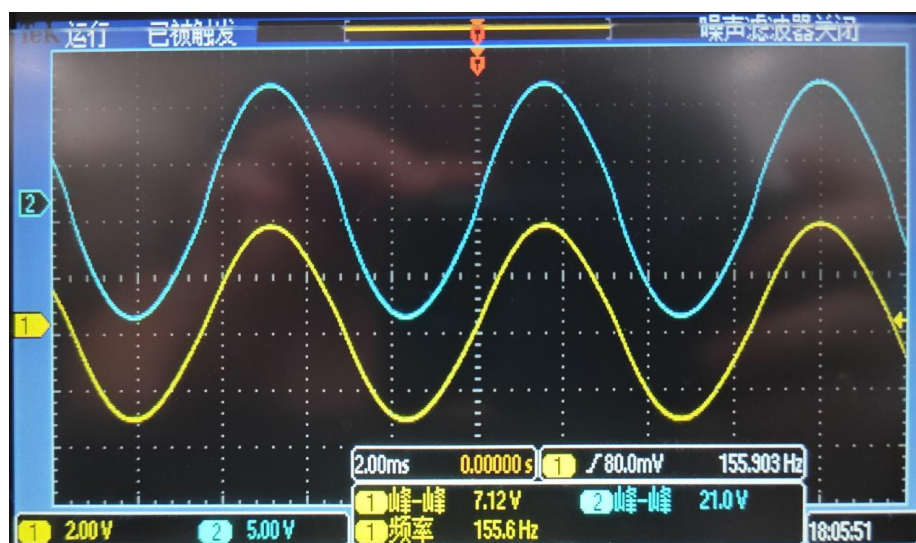
① 分析图 6 的锯齿波发生电路的工作原理，回答下面问题：

- (1) 电容 C 的充电回路和放电回路各是什么？充电和放电的时间常数是否相同？  
充电回路是 R1、R2 这条路，放电回路是 R4、R5 这条路，导致充电和放电的时间常数不相同
- (2) 将电阻  $R_4$  所接的电源为 -15V，为获得  $u_o$  的峰峰值为 2V（即  $\pm 1V$ ），周期时间为 1ms 的锯齿波，仿真估算出  $R_4$  和  $R_1$  的大小： $R_1 = \underline{12k\Omega}$   $R_4 = \underline{68k\Omega}$
- (3) 取上述估算的  $R_4$  和  $R_1$  的电阻，仿真电路图和仿真输出波形图如下：



## 5、RC 桥式正弦波振荡电路

用示波器测出  $u_o$  和  $u_f$  的波形，画在同一坐标系中，要求体现两个波形之间的相位关系（ $R_1=R_2=R=10k\Omega$ ）



### 一、实验目的

- 1、掌握利用运算放大器设计方波发生器、矩形波发生器、三角波发生器、锯齿波发生器的方法；
- 2、掌握利用运算放大器的正反馈原理设计各种波形发生电路的方法。

### 二、实验设备及元器件

表 7-1 实验仪器和器件表

| 名称             | 数量  | 型号                     |
|----------------|-----|------------------------|
| 1 线性直流稳压电源     | 1 台 | DP832A                 |
| 2 手持万用表        | 1 台 | Fluke 287C             |
| 3 示波器          | 1 台 | Tek MSO2012B           |
| 4 信号发生器        | 1 台 | Tek AFG1062 或 DG4062   |
| 5 二极管          | 2 只 | 1N4007×2               |
| 6 电阻           | 6 只 | 2kΩ×2 4.7kΩ×2 100kΩ×2  |
| 7 电位器          | 6 只 | 10kΩ×2 100kΩ×2 220kΩ×2 |
| 8 电容           | 2 只 | 0.01μF×1 0.1μF×1       |
| 9 集成运放         | 2 只 | LM741×2 或 μA741×2      |
| 10 双向稳压管       | 1 只 | 2DW231 (6.2V×1)        |
| 11 短接桥和连接导线    | 若干  | P8-1 和 50148           |
| 12 实验用 9 孔插件方板 | 1 块 | 300mm×298mm            |

### 三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

在通信、自动控制和计算机技术等领域中都广泛采用各种类型的波形发生电路，常用的波形有正弦波、矩形波（方波）、三角波和锯齿波。集成运算放大器是一种高增益的放大器，只要加入适当的反馈网络，利用正反馈原理，满足振荡的条件，就可以构成正弦波、方波、三角波和锯齿波等各种振荡电路。但由于受集成运放带宽的限制，其产生的信号频率一般都是低频范围。

#### 1、方波发生器电路

方波发生器电路如图 7-1 所示，其中  $D_z$  为双向稳压管。

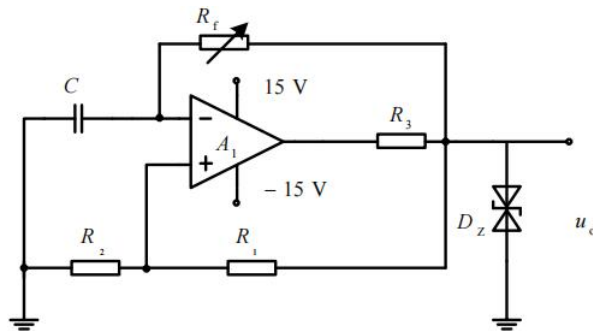


图 7-1 方波发生器电路

运算放大器作滞回比较用， $D_z$  为双向稳压管，使得输出电压的幅度被限制在  $+U_z$  或  $-U_z$ ； $R_1$  和  $R_2$  构成正反馈电路， $R_2$  上的反馈电压  $U_R$  是输出电压幅度的一部分，即

$$U_R = \pm \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_z$$

加在同相端，作为参考电压， $R_f$  和  $C$  构成负反馈电路， $u_c$  加在反向输入端， $u_c$  和  $U_R$  相比较后决定  $u_o$  的极性。

当电路工作稳定后，当  $u_o$  为  $+U_z$  时， $U_R$  也为正值；这时  $u_c < U_R$ ， $u_o$  通过  $R_f$  对电容  $C$  充电， $u_c$  增长到等于  $U_R$  时， $u_o$  由  $+U_z$  变为  $-U_z$ ， $U_R$  也变为负值。电容  $C$  开始通过  $R_f$  放电，而后反向充电。当充电到  $u_c$  等于  $-U_R$  时， $u_o$  由  $-U_z$  变为  $+U_z$ ，如此周期性循环变化，在输出端得到的是方波电压，在电容两端产生的是三角波电压。方波周期为

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

通过改变电容  $C$  的充电和放电时间常数，即可实现占空比可调的方波发生电路。

#### 2、三角波发生器电路

三角波发生器电路如图 7-2 所示。由滞回比较器和积分器闭环组合而成，积分器  $A_2$  的输出反馈给滞回比较器  $A_1$ ，作为滞回比较器的输入。

电路工作稳定后，当  $u_{o1} = +U_z$  时，运放  $A_1$  同相输入端的电压为

$$u_{+1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o$$

积分电容  $C$  充电，同时， $u_o$  按线性规律下降，同时拉动运放  $A_1$  的同相输入端电位下降，当运放  $A_1$  的同相输入端电位略低于反向端电位 ( $0V$ ) 时， $u_{o1}$  从  $+U_Z$  变成  $-U_Z$ 。当  $u_{o1} = -U_Z$  时， $A_1$  同相输入端的电压为

$$u_{+1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(-U_Z) + \frac{R_2}{R_1 + R_2}u_o$$

积分电容  $C$  开始放电， $u_o$  按线性规律上升，同时拉动运放  $A_1$  的同相输入端电位上升，当运放  $A_1$  的同相输入端略大于  $0$  时， $u_{o1}$  从  $-U_Z$  变成  $+U_Z$ 。如此周期性变化， $A_1$  输出端的是矩形波电压  $u_{o1}$ ， $A_2$  输出的是三角波电压  $u_o$ 。

当输出达到正向峰值  $U_{om}$  时，此时  $u_{o1} = -U_Z$ ， $A_1$  的同相输入端  $u_{+1} = 0V$ ，所以有

$$u_{+1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2}u_o = 0$$

则正向峰值为  $U_{om} = \frac{R_1}{R_2}U_Z$ ，同理负向峰值  $-U_{om} = \frac{R_1}{R_2}U_Z$ 。

$$\text{振荡周期为 } T = 4R_4C \frac{U_{om}}{U_Z} = \frac{4R_4R_1C}{R_2}$$

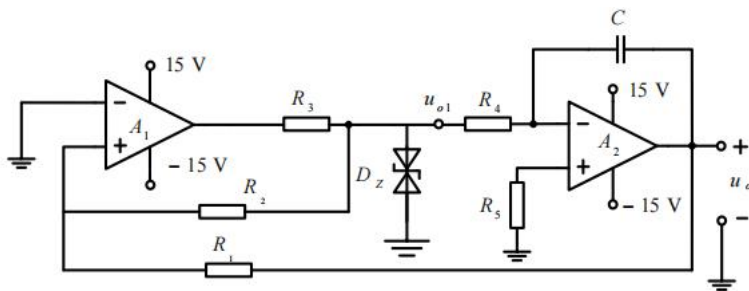


图 7-2 三角波发生器电路

## 四、实验过程

(叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-1”)

### 1. 方波发生电路

选择元器件，按图 7-3 接线，构成方波发生电路，运放使用 LM741 或者  $\mu A741$ ，采用  $+15V$  和  $-15V$  供电， $D_z$  为双向稳压管 2DW231。



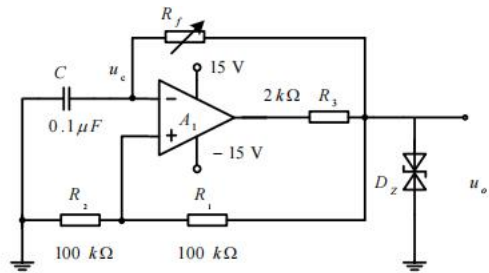


图 7-3 方波发生器实验电路图

- ① 分析图 7-3 的工作原理，请理论计算，分别求出  $R_f=10k\Omega$ ， $R_f=100k\Omega$  的  $u_o$  的周期时间  $T_1$  和  $T_2$ ，并填入表 7-2 中
- ② 用示波器观测输出电压  $u_o$  和反相端  $u_c$  的波形，分别测出  $R_f=10k\Omega$ ，以及  $R_f=100k\Omega$  的  $u_o$  的频率、周期时间、幅值、占空比，并记录  $R_f=10k\Omega$  时的输出波形  $u_o$ 。

## 2. 占空比可调的矩形波发生电路

图 7-4 为可调节占空比矩形波发生器电路图，其中  $D_1$  和  $D_2$  为二极管 1N4007， $R_w$  为  $100k\Omega$  电位器。运放使用 LM741 或者  $\mu A741$ ，采用 +15V 和 -15V 供电。 $D_z$  为双向稳压管 2DW231。

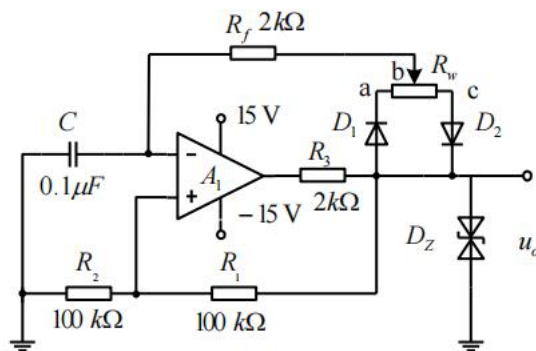


图 7-4 可调节占空比矩形波发生器电路图 ( $d = \frac{T_{H1}}{T}$ )

- ① 电位器  $R_w$  动端 b 点与 a 点电阻为 0 时，用示波器观察并记录输出电压  $u_o$  的波形，需要测试出  $u_o$  的频率、周期、幅值、占空比 ( $d$ )。
- ② 电位器  $R_w$  动端 b 点与 c 点电阻为 0 时，用示波器观察并记录电压  $u_o$  和  $u_c$  的波形，要测试出  $u_o$  的频率、周期、幅值、占空比 ( $d$ )。
- ③ 测试图 7-4 电路的波形参数

## 3. 三角波发生电路

如图 7-5 所示，选择元器件，构成三角波发生电路，其中  $R_1$  为  $100k\Omega$  电位器， $R_4$  为  $220k\Omega$  电位器，运放  $A_1$  和  $A_2$  使用 LM741 或者  $\mu A741$ ，采用 +15V 和 -15V 供电。

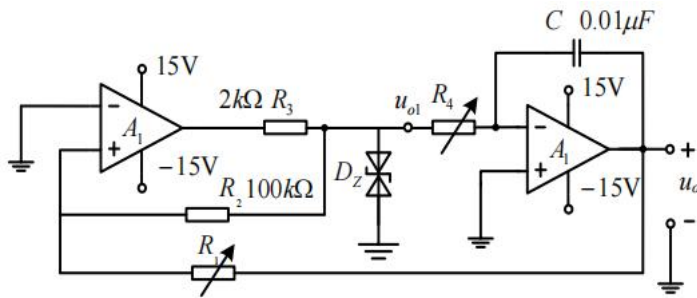


图 7-5 三角波发生器实验电路图

- ① 分析图 7-5 的电路工作原理，回答下面问题：运放  $A_1$  和  $A_2$  是否工作在线性范围内？为什么？
- ② 要求  $u_o$  的幅值为  $\pm 1V$ ，周期时间为  $1ms$
- ③ 取上述计算的  $R_1$  和  $R_4$  的电阻，验证理论计算结果是否正确。并用示波器观测  $u_{o1}$  和  $u_o$  的波形，并在同一个时序下，画出两电压波形。要求测出  $u_{o1}$  的频率、占空比以及  $u_o$  的周期、幅值。

#### 4. 锯齿波发生电路

如图 7-6 所示，选择元器件，构成锯齿波发生电路，其中  $R_1$  和  $R_4$  为  $220k\Omega$  电位器，二极管  $D$  为 1N4007，运放  $A_1$  和  $A_2$  使用 LM741 或者  $\mu A741$ ，采用  $+15V$  和  $-15V$  供电。

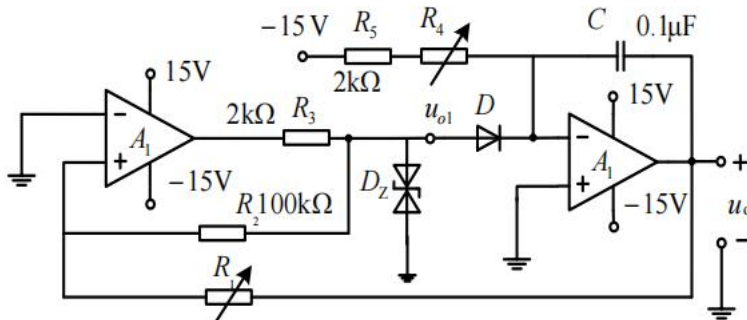


图 7-6 锯齿波发生器实验电路图

- ① 分析图 7-6 的锯齿波发生电路的工作原理，电容  $C$  的充电回路和放电回路各是什么？充电和放电的时间常数是否相同？
- ② 将电阻  $R_4$  所接的电源为  $-15V$ ，为获得  $u_o$  的峰峰值为  $2V$ （即  $\pm 1V$ ），周期时间为  $1ms$  的锯齿波
- ③ 调节电位器  $R_4$  和  $R_1$  使得达到前面的估算值，然后将电位器接入电路，微调电位器，使得输出  $u_o$  的峰峰值为  $2V$ （即  $\pm 1V$ ），周期时间为  $1ms$  的锯齿波。并在同一时序下，记录  $u_{o1}$  和  $u_o$  电压波形。要求测出  $u_{o1}$  的频率、占空比以及  $u_o$  的周期、幅值。
- ④ 保持电位器不变，将电阻  $R_4$  所接的电源更改为  $+15V$ ，并将二极管  $D$  反接，并观察  $u_{o1}$  和  $u_o$  的波形变化，并在同一时序下，记录波形，要求测出  $u_{o1}$  的频率、占空比以及  $u_o$  的周期、幅值。

#### 5. RC 桥式正弦波振荡电路

按图 7-7 接好电路，其中  $R_1=R_2=R=10k\Omega$ ， $C_1=C_2=C=0.1\mu F$ 。

图 7-7 RC 桥式正弦波振荡电路

振荡电路调整：开启  $+15V$  和  $-15V$  直流稳压电源给运放  $A_1$  供电，将示波器调至适当的档位后接至输出端  $u_o$  处，观察振荡电路输出端  $u_o$  的波形。若无正弦波输出，可缓慢调节  $R_f$ ，

使得电路产生振荡，观察电路输出波形的变化，解释所观察到的现象。然后仔细调节  $R_f$ ，使电路输出较好的基本不失真的正弦波形，进行测量。

① 正反反馈系数  $|F|$  的测定。将示波器的两个通道分别接  $u_o$  和  $u_f$  端，仔细调节  $R_f$ ，在确保两个通道的正弦波不失真的前提下，将输出幅度调的尽量大些，测量  $u_o$  的峰峰值  $U_{opp}$  和  $u_f$  的峰峰值  $U_{fpp}$ ，计算  $|F|=U_{fpp}/U_{opp}$ 。

② 振荡频率  $f_o$  的测量。

③ 将示波器的两个通道显示的  $u_o$  和  $u_f$  的波形画在同一坐标系中，要求体现两个波形之间的相位关系，填入表 7-3。

结合上面的实验结果，根据理论知识，分析 RC 不同取值对振荡频率  $f_o$  的影响。

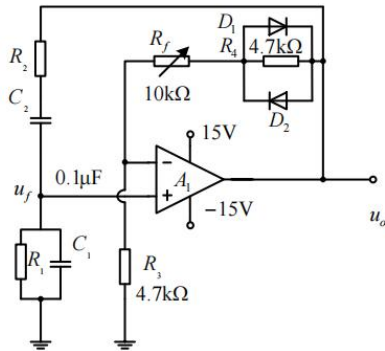


图 7-7 RC 桥式正弦波振荡电路

## 五、实验数据分析

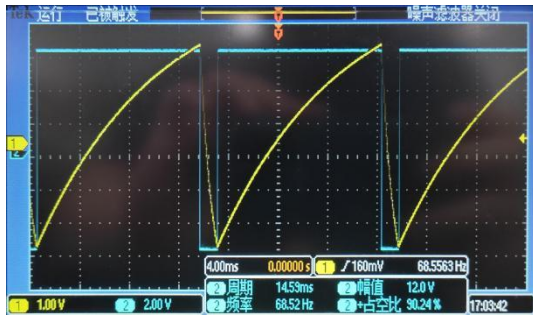
(按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析 and 处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行)

### 1、方波发生器电路

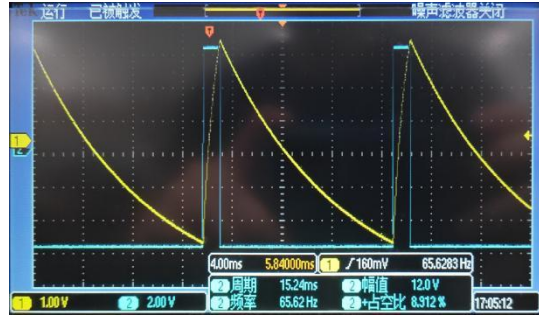
| 输出电压参数           | 计算周期    | 频率      | 周期      | 幅值         | 占空比    | $R_f=10k\Omega$ 的输出电压波形 |
|------------------|---------|---------|---------|------------|--------|-------------------------|
| $R_f=10k\Omega$  | 0.0022s | 403.9Hz | 2.482ms | $\pm 6.0V$ | 49.01% |                         |
| $R_f=100k\Omega$ | 0.022s  | 40.58Hz | 24.64ms | $\pm 6.0V$ | 48.91% |                         |

### 2、占空比可调的矩形波发生电路(需要测试出 $u_o$ 的频率、周期、幅值、占空比)

分别记录  $R_{ab}=0$  与  $R_{bc}=0$  的  $u_o$  波形



$R_{ab}=0$



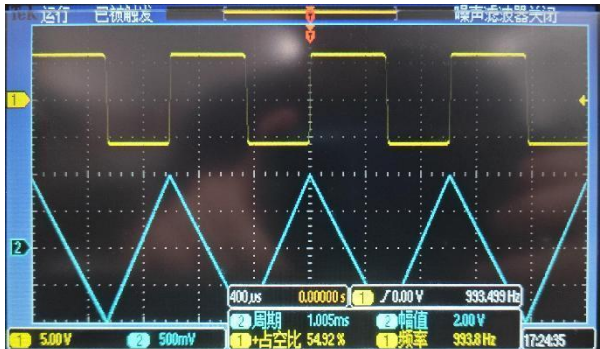
$R_{bc}=0$

表 7-3 占空比可调矩形波发生电路测试表格

|               |         |                                 |                                      |
|---------------|---------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 幅值 $U_{om}/V$ | 周期 $T$  | 调整电位器 $R_w$ 时，<br>周期时间 $T$ 是否变化 | 一个周期内，<br>$u_o$ 大于 0 的占空比 $d$ 的可调范围： |
| $\pm 6.0V$    | 15.00ms | 不变                              | 8.912%~90.24%                        |

### 3、三角波发生电路

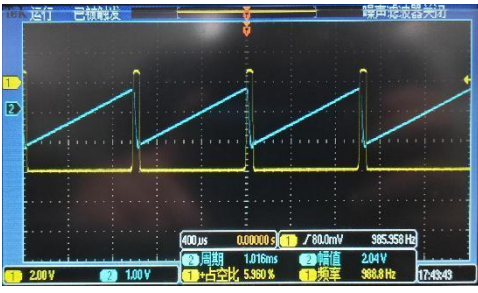
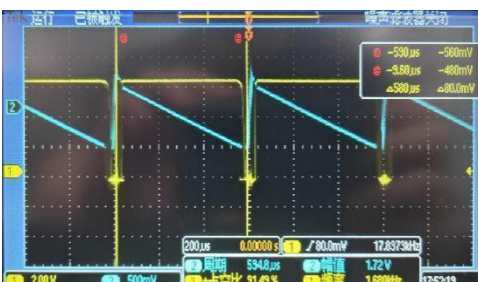
表 7-4 三角波发生电路测试表格

|   |   |   |
|---|---|---|
| ① | 运放 $A_1$ 和 $A_2$ 是否工作在线性范围内？为什么？  | 答：运放 $A_1$ 开环，不工作在线性范围内， $A_2$ 引入负反馈，工作在线性范围内   |
| ② | $R_1 = \underline{16.13k\Omega}$ $R_4 = \underline{154.99k\Omega}$  |   |
| ③ | 记录同一时序下的 $u_{o1}$ 和 $u_o$ 波形<br> | $u_{o1}$ 测量：<br>频率 = <u>993.8Hz</u><br>占空比 = <u>54.92%</u><br><br>$u_o$ 的测量：<br>周期 = <u>1.005ms</u><br>幅值 = <u><math>\pm 1.00V</math></u> |

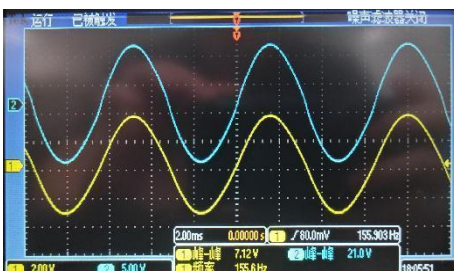
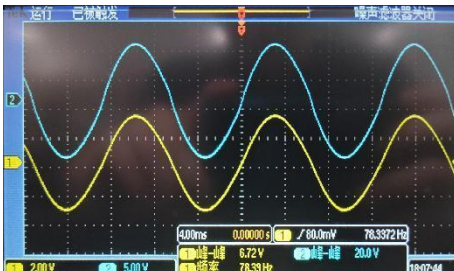
### 4、锯齿波发生电路

表 7-5 锯齿波发生电路测试表格

|   |   |   |
|---|---|---|
| ① | 分析图 6-6 的锯齿波发生电路的工作原理，电容 $C$ 的充电回路和放电回路各是什么？充电和放电的时间常数是否相同？ | 答：放电回路是 $R_1$ 、 $R_2$ 这条路，充电回路是 $R_4$ 、 $R_5$ 这条路，不相同 |
| ② | $R_1 = \underline{12k\Omega}$ $R_4 = \underline{68k\Omega}$ |   |

|   |   |  |
|---|---|--|
| ③ | 记录同一时序下的 $u_{o1}$ 和 $u_o$ 波形<br>                                       | $u_{o1}$ 测量:<br>频率= <u>987.2Hz</u><br>占空比= <u>5.968%</u><br><br>$u_o$ 的测量:<br>周期= <u>1.007ms</u><br>幅值= <u><math>\pm 1.00V</math></u>  |
| ④ | 将电阻 $R_4$ 所接的电源更改为+15V, 并将二极管 D 反接<br>记录同一时序下的 $u_{o1}$ 和 $u_o$ 波形<br> | $u_{o1}$ 测量:<br>频率= <u>1.680kHz</u><br>占空比= <u>91.49%</u><br><br>$u_o$ 的测量:<br>周期= <u>0.580ms</u><br>幅值= <u><math>\pm 0.86V</math></u> |

### 5、RC 桥式正弦波振荡电路。

|               | $U_{opp}$ | $U_{ipp}$ | F     | $f_o$        | $u_o$ 和 $u_f$ 的波形  |
|---------------|-----------|-----------|-------|--------------|--|
| $R=10k\Omega$ | 21.0V     | 7.12V     | 0.339 | 155.6Hz<br>Z | 记录同一时序下的 $u_{o1}$ 和 $u_f$ 波形<br> |
| $R=20k\Omega$ | 20.0V     | 6.72V     | 0.336 | 78.39Hz<br>Z | 记录同一时序下的 $u_{o1}$ 和 $u_o$ 波形<br> |

李萨如图形法测量振荡频率  $f_o$



振荡频率约为 77.62Hz

结合上面的实验结果，根据理论知识，分析 RC 不同取值对振荡频率  $f_o$  的影响。

RC 变大将导致振荡频率下降

## 6、设计性实验

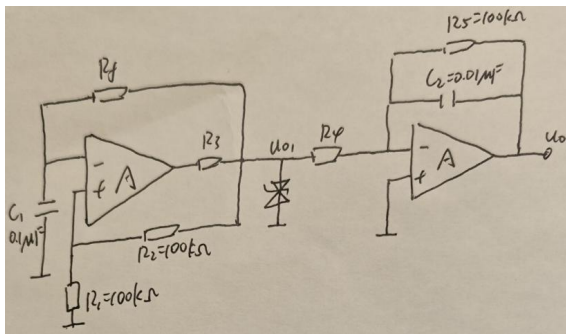
使用实验室现有的元器件  $\mu A741$  等，设计一个波形发生电路，实现以下功能：

- 1) 独立产生幅值为  $\pm 6.2V$ ，占空比为 50% 的方波电压，频率设计在 700Hz~1kHz 之间。
- 2) 然后，将此方波电压转换为一个三角波，幅值为  $\pm 2V$  左右

要求：

- ① 画出设计的电路图，说明工作原理；

工作原理：首先由 RC 电路和反相输入滞回比较器组成矩形波发生电路，再将方波输入到积分电路中输出三角波



- ② 写出电路参数的计算过程；

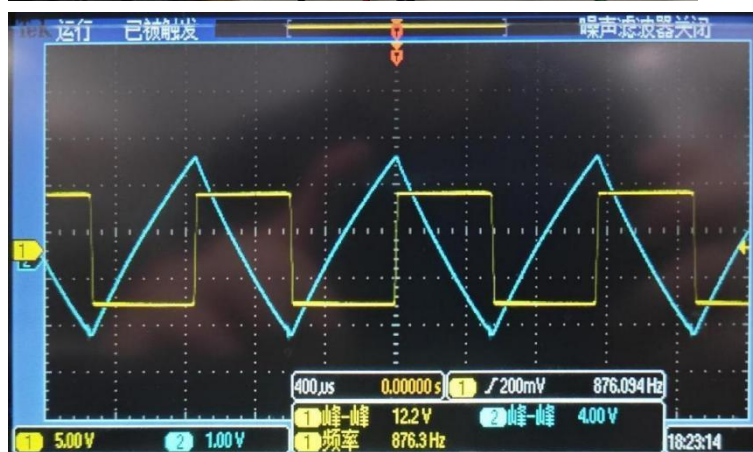
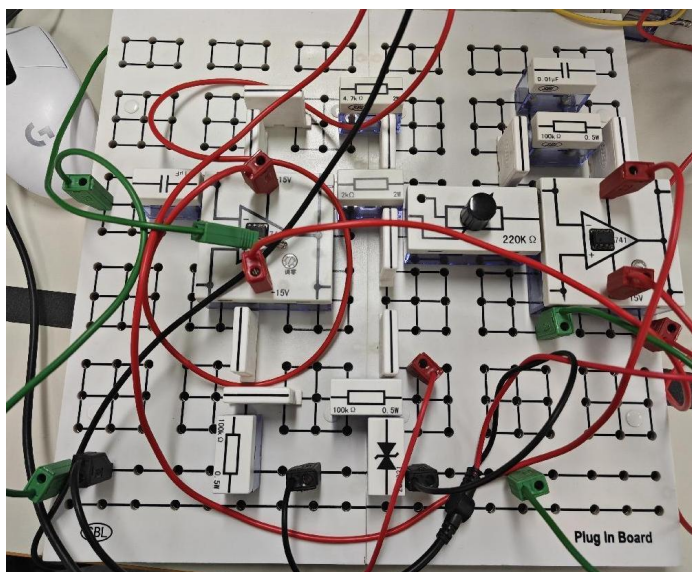
$$T = 2R_f C_1 \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) = \frac{1}{f}$$

得  $R_f = \frac{1}{2C_1 f \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)}$

将  $700\text{Hz} < f < 1000\text{Hz}$  代入，  
 $4551\Omega < R_f < 6501\Omega$   
 选用  $R_f = 4.7k\Omega$

由  $\frac{u_{o1}}{R_4} = -C \frac{du_o}{dt}$  得  $u_o = -\frac{1}{R_4 C} \int u_{o1} dt$   
 $\therefore T = 1\text{ms}$   $u_{o1} = 6.2V$  代入，得  
 $R_4 \approx 155k\Omega$

③ 搭建出电路，测试方波电压波形和三角波电压波形，并在同一时序下绘制波形图。



## 六、问题思考

(回答指导书中的思考题)

1. 方波发生器电路中  $C$  的数值增大时，频率  $f$  和占空比  $d$  是否变化？改变  $R_2$  是否引起  $f$  和  $d$  的变化？为什么？

答：由计算公式可知，周期  $T$  与  $R_2$  和  $C$  都成正比，所以  $C$  增大时频率  $f$  变低， $R_2$  增大时频率  $f$  也变低。但是占空比  $d$  一直为 50%，不受  $C$  和  $R_2$  的影响。

2. 分析比较三角波发生器和锯齿波发生器的共同特点和区别；

答：共同特点：都由一个同相输入滞回比较器和一个积分运算电路组成  
不同点：锯齿波发生电路对电容充电和放电的回路不一样，时间常数不一样，但是三角波发生电路充电放电的时间常数一样。

3. 若仿真时稳压管选择了 3.3V 的稳压管，实验结果有什么不同？（选择一种类型电路说

明)

答：假如是矩形波发生电路，改变了稳压管的数值只会使输出波形的幅值变为±3.3V，其他参数如波形频率并没有变化。

## 七、实验体会与建议

好