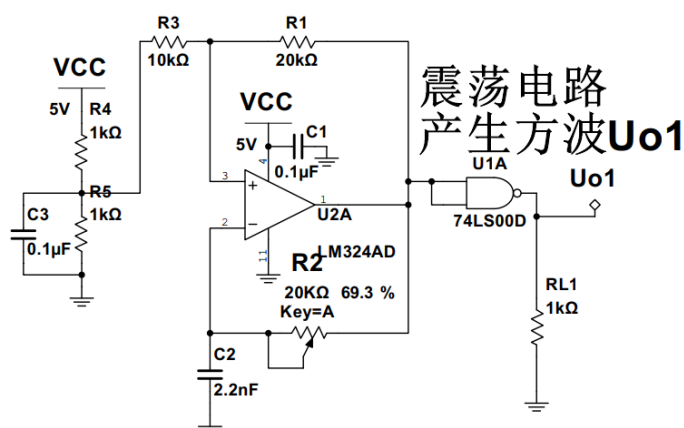


## 第一级：振荡电路 产生方波 $U_{o1}$



**假定条件：**假定所有器件理想，即电阻电容为理想器件；运放为理想器件轨到轨输出，即输出摆幅为 0-5V，当然这里仿真用的 LM324 输出不能到 5V，但是理论计算的时候无需考虑使用的实际运放以简化计算。

**原理：**当运放输出高电平时，运放同相端电压为  $U_{H+}$ ，此时电容  $C2$  通过电阻  $R2$  充电。当电容  $C2$  两端的电压超过  $U_{H+}$  后，运放输出为低电平，此时运放同相端电压为  $U_{L+}$ ，电容  $C2$  通过电阻  $R2$  放电。当电容  $C2$  两端电压低于  $U_{L+}$  后，运放输出高电平，此时完成一个方波周期。

**计算：**

①计算运放同相端两个状态的电压  $U_{H+}$  和  $U_{L+}$ ：

设在稳定工作以后，设运放输出高电平和低电平的时候同相端的电压分别为  $U_{H+}$  和  $U_{L+}$ ，电阻  $R4$  和  $R5$  连接处的电压分别为  $U_{HX}$  和  $U_{LX}$ 。当运放输出为高电平时满足公式  $\frac{VCC - U_{HX}}{R4} + \frac{VCC - U_{HX}}{R1 + R3} = \frac{U_{HX}}{R5}$  和  $U_{H+} = \frac{(VCC - U_{HX})R3}{R1 + R3} + U_{HX}$ ；当运放输出为低电平时满足公式  $\frac{U_{LX}}{R5} + \frac{U_{LX}}{R1 + R3} = \frac{VCC - U_{LX}}{R4}$  和  $U_{L+} = \frac{U_{LX}R1}{R1 + R3}$ 。

则代入实际数据可计算得到： $U_{HX} = \frac{155V}{61} \approx 2.54V$ ， $U_{H+} = 3.36V$ ； $U_{LX} = \frac{150V}{61} \approx 2.46V$ ， $U_{L+} = 1.64V$ 。

②计算稳定工作后  $R2$  和  $C2$  的充电时间  $T_1$ ：

充电过程为运放输出高电平的阶段，即输出的方波高电平时间为  $T_1$ 。此过程中电容  $C2$  两端的电压由  $U_{L+}$  充电至  $U_{H+}$ ，即电容电压从 1.64V 充电至 3.36V 的时

间为 $T_1$ 。

给出如下 RC 充放电公式，设 $V_0$ 为电容上的初始电压， $V_1$ 为电容最终可充到或放到的电压值， $V_t$ 为 $t$ 时刻电容上的电压值，RC 充放电常数 $\tau=RC$ 。则有如下

公式 $V_t=V_0+(V_1-V_0)\times(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$ ，即 $t=\tau\times\ln(\frac{V_1-V_0}{V_1-V_t})$ 。

则电容电压从 1.64V 充电至 3.36V 的时间为 $T_1$ 满足如下公式：

$$T_1=\tau\times\ln(\frac{V_{CC}-U_{L+}}{V_{CC}-U_{H+}})。$$

假设电位器此时位于 50%位置，则接入电路中电阻值为 10kΩ。代入数据求得： $\tau=RC=10\times10^3\Omega\times2.2\times10^{-9}F=2.2\times10^{-5}s$ ，

$$T_1=\tau\times\ln(\frac{V_{CC}-U_{L+}}{V_{CC}-U_{H+}})=2.2\times10^{-5}s\times\ln(\frac{5V-1.64V}{5V-3.36V})\approx15.8us。$$

③计算稳定工作后 R2 和 C2 的放电时间 $T_2$ ：

则电容电压从 3.36V 充电至 1.64V 的时间为 $T_2$ 满足如下公式：

$$T_2=\tau\times\ln(\frac{0-U_{H+}}{0-U_{L+}})，\quad\text{此 时 代 入 数 据 可 得}$$

$$T_2=\tau\times\ln(\frac{0-U_{H+}}{0-U_{L+}})=2.2\times10^{-5}s\times\ln(\frac{3.36V}{1.64V})\approx15.8us=T_1。$$

所以，振荡电路在稳定工作后，对应频率约为 31.6kHz（当电位器 R2 接入电路中的阻值变大之后，震荡周期变长，频率降低，实际电路中需要调节电位器的阻值使得震荡频率满足题目要求）。

### 元件参数取值：

电阻 R4 和 R5 连接处的电压分别为 $U_{HX}$ 和 $U_{LX}$  其实只是个电压参考，因此 R4 和 R5 取值小一些即可，避免输出阻抗太大这一点电压变化太大，这里选了 1k，然后并联一个 0.1 电容 C3 是一般的电路取值。

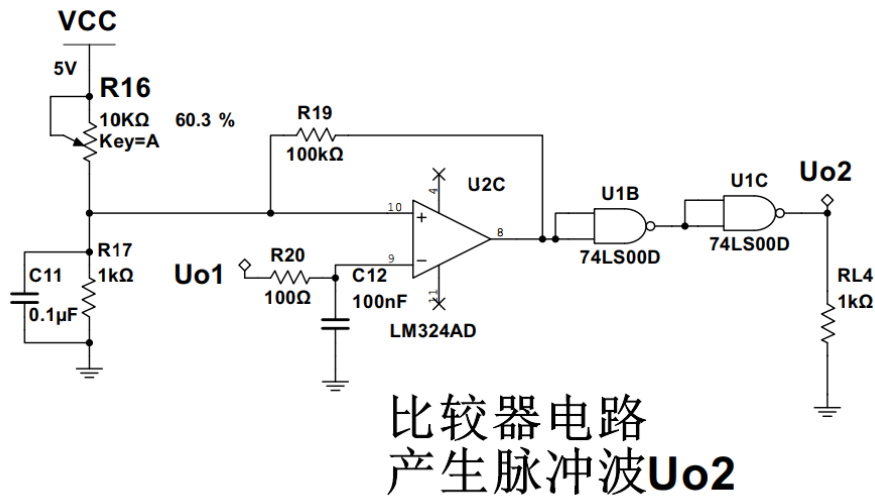
R1 和 R3 决定了迟滞的窗口大小，这两个取值决定了 $U_{H+}$ 和 $U_{L+}$ 的大小，迟滞窗口的大小也即是后面 RC 充放电的起始和截止电压，会对充放电周期有影响，但充放电时间收到后面的 R2 和 C2 影响更大，所以 R1 和 R3 先大概取两个值即

可，比如选取 R3 为 10k，选取充放电电压约为  $2.5-1.64=3.36-2.5=1.11\text{V}$ ，可以计算出  $R1=20\text{k}$ 。

R2 和 C2 决定充放电的快慢，选取 C2 为一个常用值即可，比如这里选取 C2 为 2.2nF（当然，选 1nF-10nF 范围基本都可以，只是后面电阻 R2 需要根据 C2 的值匹配）。如果要产生 20k 左右的波形，经计算，电阻 R2 约为 10-15k 左右，选取一个 20k 电位器就可以满足题目要求。

C1 是电源去耦滤波电容，常选用 0.1uF。

第二级：比较器电路 产生脉冲波  $U_{o2}$

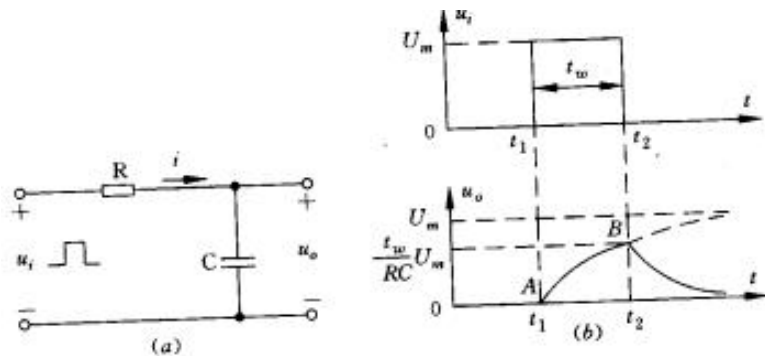


其中电路主要拓扑为比较器电路，即使用一个电位器可调直流电平输入到运放的同相端，一个三角波输入到运放的反相端。通过调节直流电平的值可以调节输出窄脉冲的占空比以实现题目的要求。下面开始计算。

①积分电路的计算

这里使用无源 RC 积分电路。

RC 积分电路如图所示。从图中可以看出，积分电路也是 R-C 串联电路，与微分电路相比，只是将 RC 电路对调，即从电容 C 上取出电压。时间常数  $\tau$  远大于输入矩形波的脉宽  $t_w$ ，即  $\tau \gg t_w$ 。积分电路是将矩形波变换成锯齿波或三角波的波形变换电路。



输出电压为  $u_o = u_C = \frac{1}{C} \int i dt$

输入电压为  $u_i = u_R + u_o$

当时间常数  $\tau \gg t_w$  时,  $u_R \gg u_o$

则  $u_R \approx u_i$

所以有  $i = \frac{u_R}{R} \approx \frac{u_i}{R}$

故  $u_o \approx \frac{1}{RC} \int u_i dt$

所以输出电压与输入电压的积分成正比。

而在此电路中将第一级产生的方波积分之后可以生成一个三角波。

明白原理后, 在实际仿真和调试的过程中, RC 的值可以先 设定一个近似值  
然后仿真看波形即可。

## ②比较器迟滞窗口的计算

为了减少三角波上面毛刺的干扰, 这里将传统的比较器电路添加了一个正反馈电阻 R19 构建成了一个迟滞比较器电路, 又称窗口比较器。

计算过程可以分为两个状态, 即运放输出高电平的状态和输出低电平的状态。  
需要求得这两个状态分别的运放同相输入端的电压。

运放同相输入端的电压具体的推导过程和推导原理与第一级中的振荡器电路完全一样, 因为都是正反馈电路。这里的详细计算参考第一级中推导即可。

使用直流电平和一个三角波进行比较, 如下图所示, 既可以调节占空比。

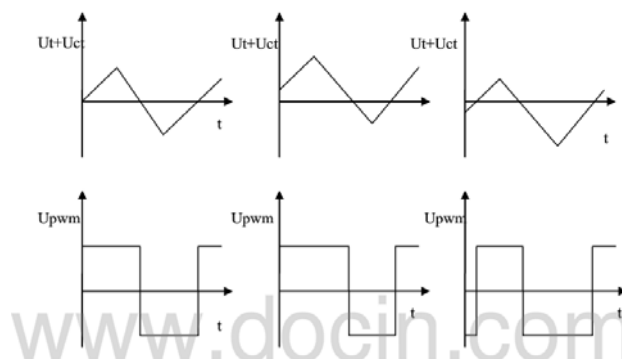


图 5 三角波脉宽调制器

### 元件参数取值：

R20 和 C12 组成积分电路，按照理论计算，需要满足  $\tau \gg t_w$  这个条件，所以，R 和 C 的参数可以选取稍大一些。这里选取常用电容 0.1 $\mu$ F，电阻选取了 100 欧姆即可，通过仿真，可以观察到波形正常，生成了一个三角波，满足题意即可。

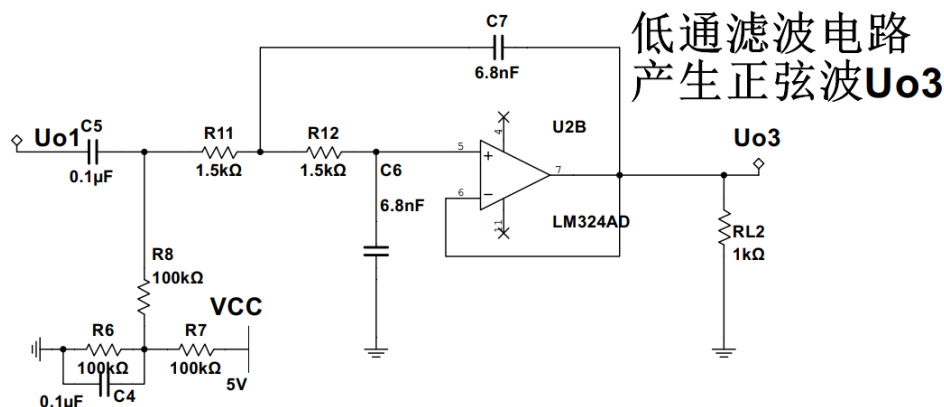
R16 和 R17 是电阻分压的原理，选取 R17 为 1k，使用一个相对 R17 较大的 10k 电位器 R16 可以让生成的直流电平在一个较大范围内变化即可。

R19 是一个正反馈电阻，当这个电阻较大的时候，引入的反馈量比较小，因为电阻 R19 的作用仅仅是引起一个小迟滞避免三角波有干扰噪声导致输出震荡，所以在这里直接选取了 100k（10 倍的电位器最大值）仅仅能引入较小的正反馈量。

其实很多时候，模拟电路的设计就是经验取值，然后再进行调试因为电路元件之间很多都是相互关联的，先大概选取一下经验参数然后再根据选取的经验参数再计算是一种比较快的方法。

调试的过程中注意分级，单步看现象是否正确，如果现象正确就直接进行了（当然也可以在根据经验设计完参数之后再计算进行验证）；如果现象不正确就计算一下哪些参数不合适，再进行微调即可。

### 第三级：低通滤波电路 产生正弦波 Uo3



这一级需要输出一个与方波同频的正弦波，可以使用低通滤波器得到方波的基波，即可满足题目所要求。

该电路为基本的二阶有源低通滤波器电路，具体的推导百度即可得到更多详细的资料，这里仅从设计的层面进行理论计算。

由电路特性可知，为了便于设计，常取  $C6=C7$ ， $R11=R12$ 。

截止频率计算过程为  $f = \frac{1}{2\pi R11 \times C7} = \frac{1}{2\pi \times 1.5 \times 10^3 \Omega \times 6.8 \times 10^{-9} F} \approx 15.6kHz$

因为二阶有源滤波器的阻带衰减不是非常严重，这里的截止频率设定的有些低，低于了 21kHz，理论来看并不是很合理，但是在仿真的时候也可以满足题目要求，就先这样设定了，滤波参数可以根据实际电路和仿真调整。

电路中 R6、R7、R8 和电容 C4 为电路提供了一个  $1/2VCC$  的偏置，可以参考常见的单电源供电电路的设计。电容 C5 为隔直电容，防止运放因前级的直流分量而发生饱和。

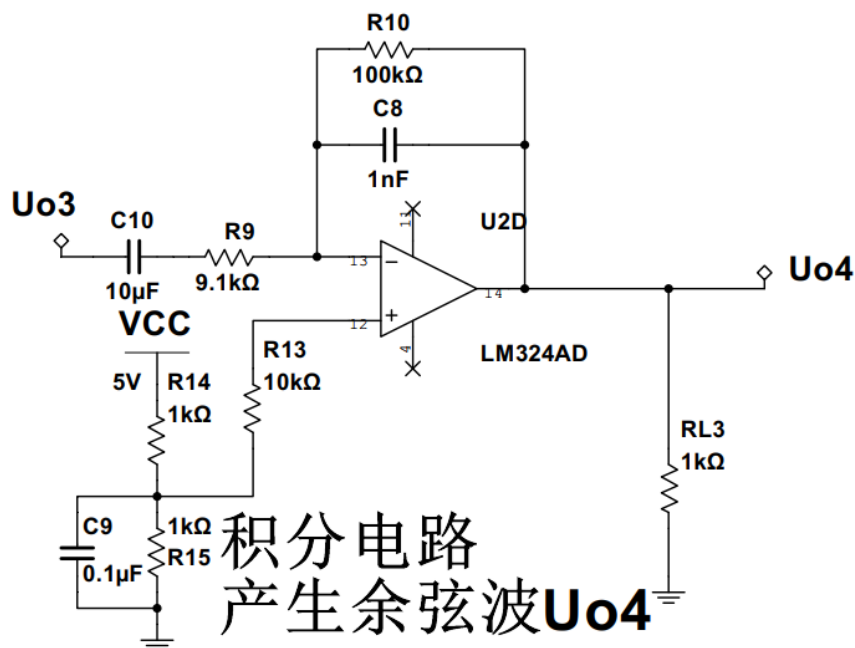
#### 元件参数取值：

C5 为隔直电容，这里的信号是 20kHz 左右，选取一个 0.1μF 的电容对交流信号引起的容抗就很小了，所以经验值选个 0.1μF 就行。

R6、R7、R8 和 C4 也只是产生一个  $1/2VCC$  直流偏置，根据经验值选取参数即可。

滤波元件 R11、R12、C6、C7 需要根据截止频率进行计算。先选取电容值（因为电阻值可以用电位器调节，并且电阻值分布得更密集）为 6.8nF（经验值，其实随便取也可以的，只要根据这个电容值和设计的截止频率计算出来的电阻值比较合适就行），然后计算出来电阻值是 1k 左右，这里选 1.5k 电阻值，再结合实验现象可以进一步确定取值就行了。

#### 第四级：积分电路 产生余弦波 $U_{o4}$



电路中  $R_{13}$ 、 $R_{14}$ 、 $R_{15}$  和电容  $C_9$  为电路提供了一个  $1/2V_{CC}$  的偏置，可以参考常见的单电源供电电路的设计。电容  $C_{10}$  为隔直电容，防止运放因前级的直流分量而发生饱和。

这一级需要产生一个与正弦信号正交的余弦信号，可以直接使用运放搭建一个积分电路，因为积分电路有移相的功能，可以使波形移相  $90^\circ$  产生与正弦正交的信号。

积分运算电路是模拟电路中应用较广泛的一种功能电路，它的原理电路如图。

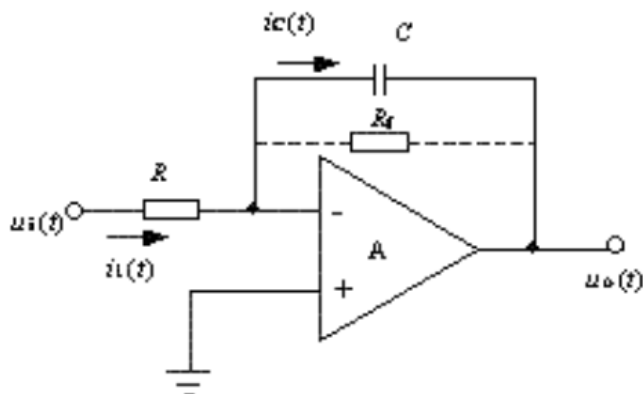


图 6—24 积分运算电路



图中，输入信号  $u_i(t)$  经输入电阻  $R$  接入运放反相输入端，电容  $C$  接在负反馈回路中。与反相

比例运算电路相比，只是将其中的反馈电阻用电容来代替。因而，积分电路也属于反相输入电

路。

运用理想运放反相输入时的“虚短”和“虚断”概念可得如下关系式

$$i_1(t) = u_i(t) / R$$

$$i_1(t) = i_C(t)$$

在  $i_C(t)$  作用下电容  $C$  两端电压  $u_C(t)$  为

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$$

由于输出电压即为电容两端电压,但电压极性相反，即  $u_o(t) = -u_C(t)$ ，代入上述公式可得输出电压与输入电压的关系式

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$$

在实际电路中，调整  $RC$  的值可以改变积分器的输入输出幅度的比值，即增益，可以选用常见的参数然后根据仿真微调，这里选用电容  $1nF$ ，电阻  $9.1k$ 。

实际的积分器由于运算放大器难免会存在偏置电压，尽管偏置电压很低，还是会对电容进行充放电，时间一长，电容就饱和了。在电容两端并联电阻  $R_{10}$  的目的就是为了使给电容提供放电回路，不要饱和。

### 元件参数取值：

电路中  $R_{13}$ 、 $R_{14}$ 、 $R_{15}$  和电容  $C_9$  为电路提供了一个  $1/2V_{CC}$  的偏置，可以参考常见的单电源供电电路的设计，这里选取了  $1k$  电阻和  $10k$  电阻，其实 3 个电阻都选  $100k$ 、 $1k$ 、 $10k$  都没问题的，因为只产生一个基准电压而已，阻值不同也就是导致整个电路的静态功耗、工作电流等不同而已罢了，在不严格要求的电路中，根据经验值取值就行。

$C_{10}$  是隔直电容，选取  $0.1\mu F$ 、 $1\mu F$ 、 $10\mu F$  这些常见参数都可以，只是不同容值引起的容抗不同罢了。

$R_9$  和  $C_8$  是积分元件，可以先确定电容  $C_8$  是  $1nF$ ，然后根据积分电路的参数和电容值，确定电阻  $R_9$  的值，这里也根据经验选了一个值  $9.1k$ 。

**R10** 是一个并联在电容两端的电阻，起到防止运放饱和的作用，选取尽量大一些就行（选取了 10 倍与 **R9** 左右的值，**100k**）。

模拟电路中，所有元件取值大多数都有关联，并且有无穷多个参数都可以正常工作。在设计中，设计经验是非常重要的，很多值靠直觉就可以设计，理论计算大多情况下只是为了验证经验设计的正确性。

多看、多设计一些电路之后就会培养自己的直觉了。