

## 9.2 非正弦信号发生器

主要特点：

振荡条件比较简单，只要反馈信号能使**比较电路**状态发生变化，即能产生周期性的振荡。

电路的核心：**电压比较器**

## 非正弦信号发生器的主要组成：

### (1) 开关器件（如电压比较器等）

主要作用：产生高、低电平。

### (2) 反馈网络

主要作用：将输出电压适当地反馈给开关器件使之改变输出状态。

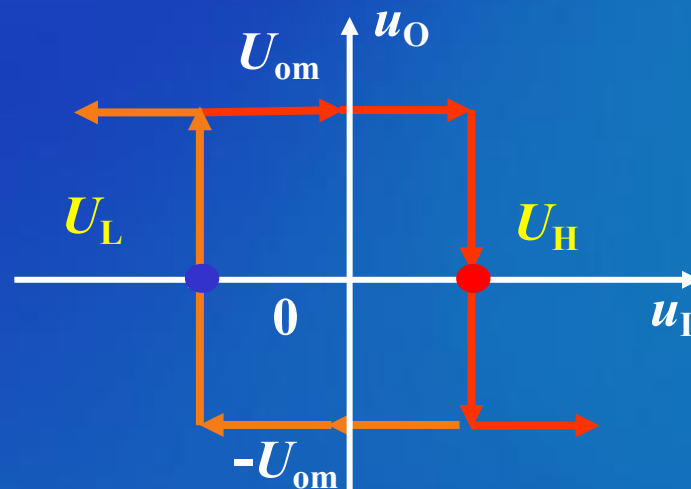
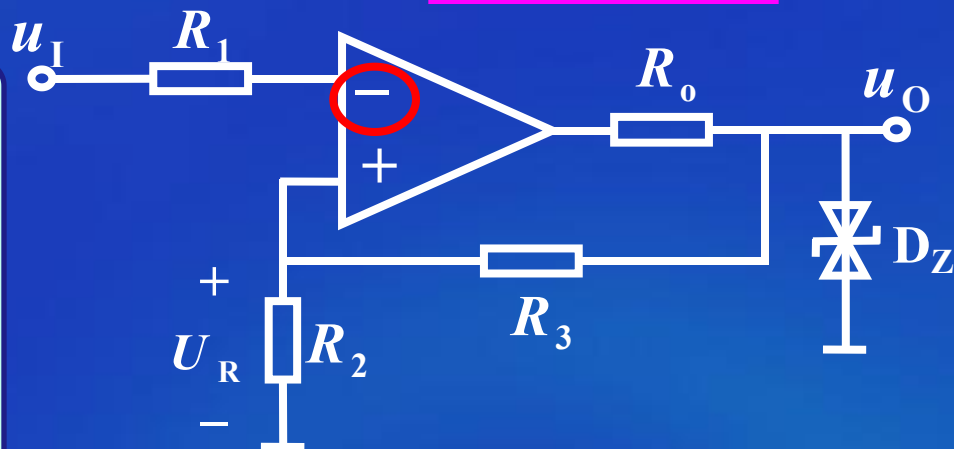
### (3) 延时环节

主要作用：实现延时，以获得所需要的振荡频率。

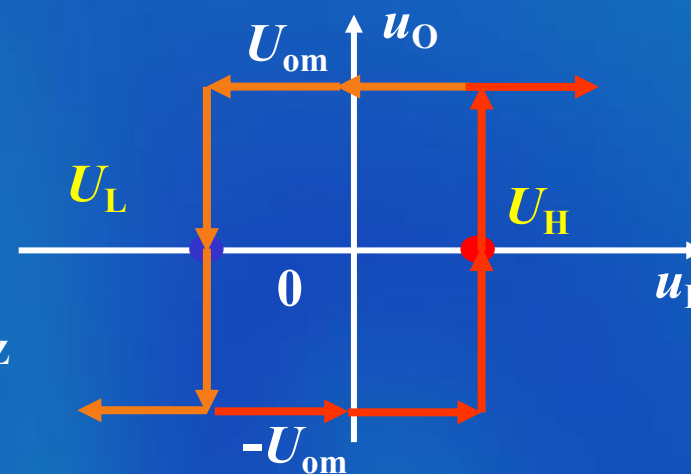
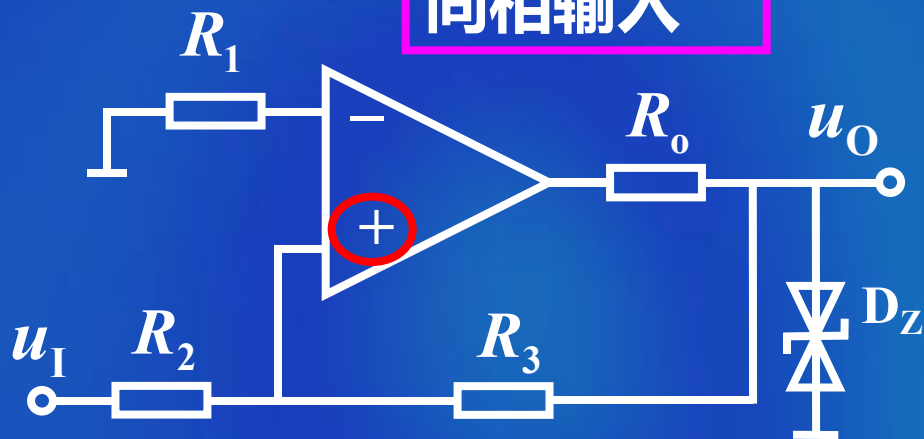
# (1) 电压比较器

两种迟滞比较器的特性

反相输入



同相输入

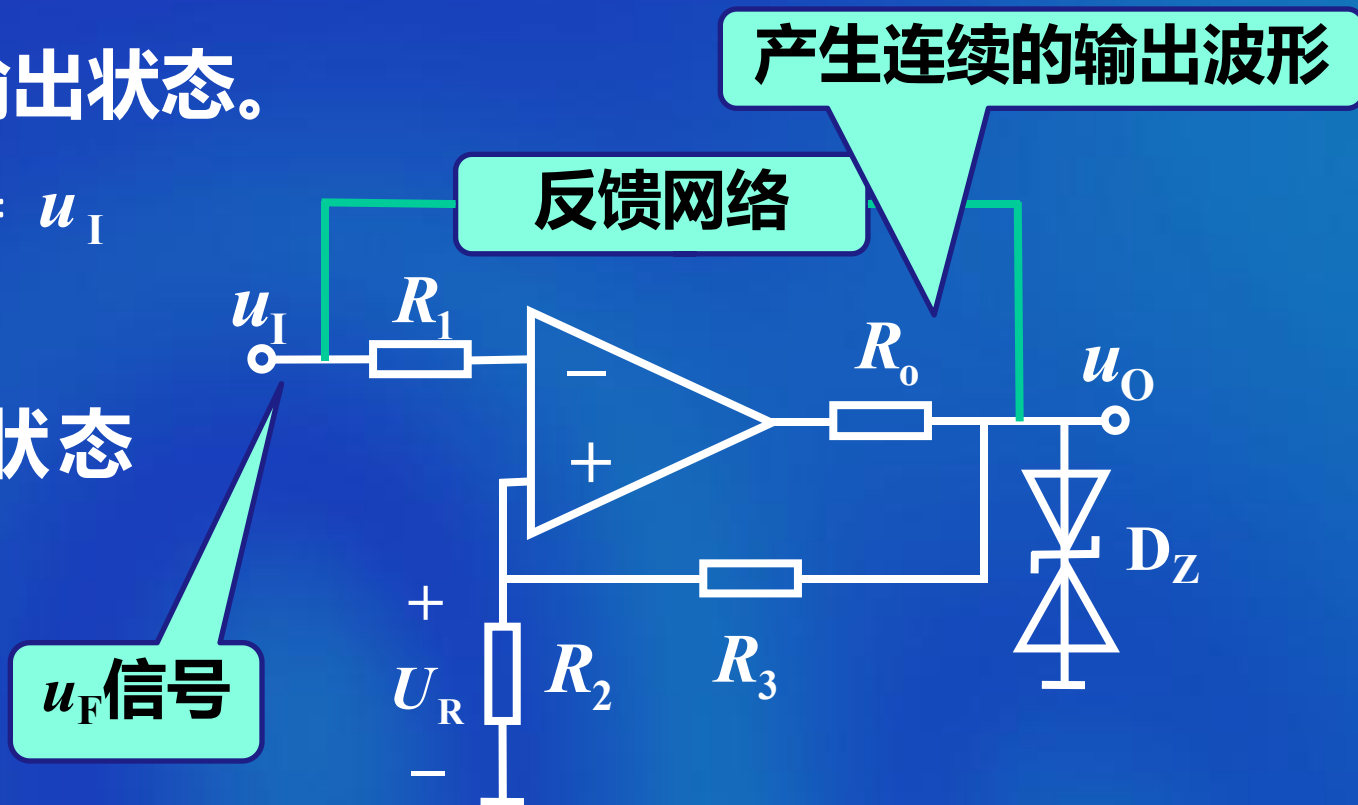


## (2) 反馈网络

主要作用：将输出电压适当地反馈给开关器件  
使之改变输出状态。

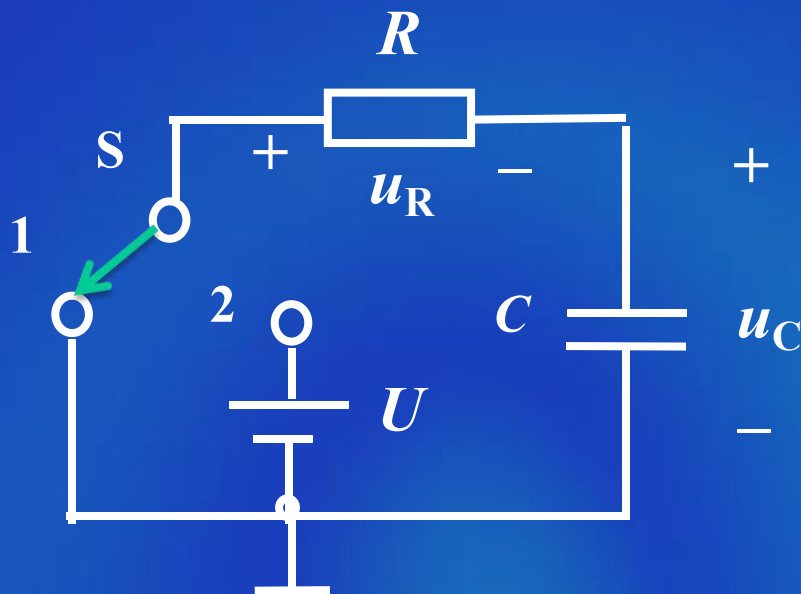
如果  $u_F = u_I$

则比较器状态  
不断改变



### (3) 延时环节

非正弦信号发生器的方波、矩形波、三角波和锯齿波等波形一般是利用惰性元件**电容 $C$** 和**电感 $L$** 的**充放电**实现的。



a. 首先开关在位置 “1” , 稳定。

突然开关接通位置 “2” ,

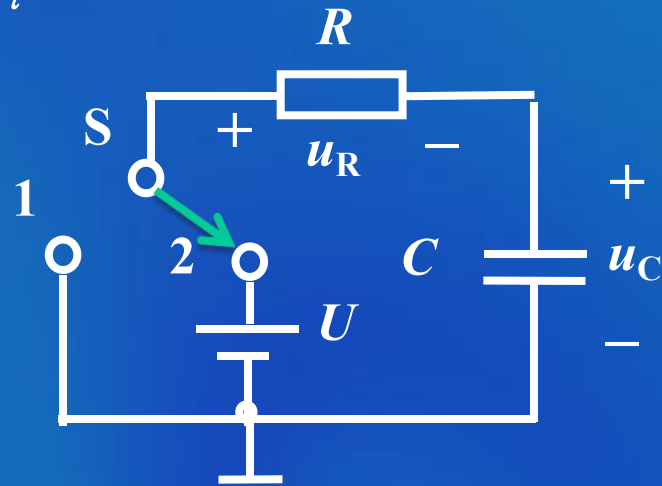
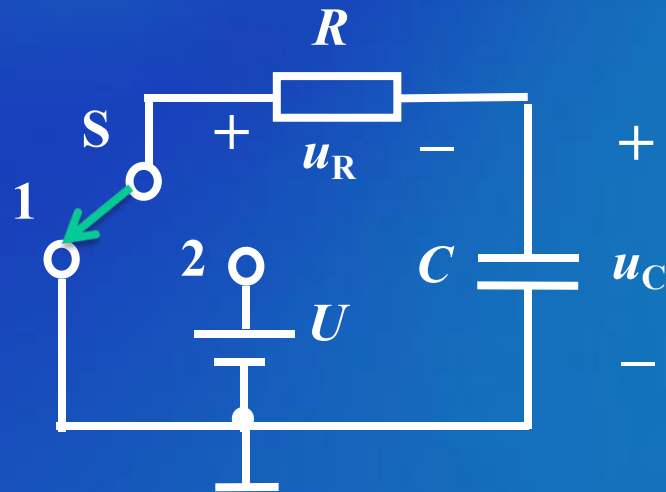
则电源  $U$  通过  $R$  , 对电容  $C$  充电

• 根据三要素法

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_C(0_+) = 0 \quad u_C(\infty) = U$$

$$\tau = RC$$



b. 稳定后  $u_C(\infty) = U$

再将开关接通位置“1”。

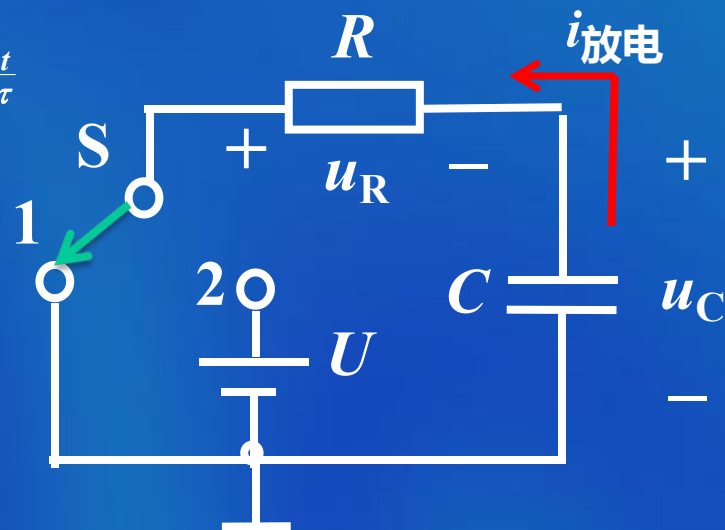
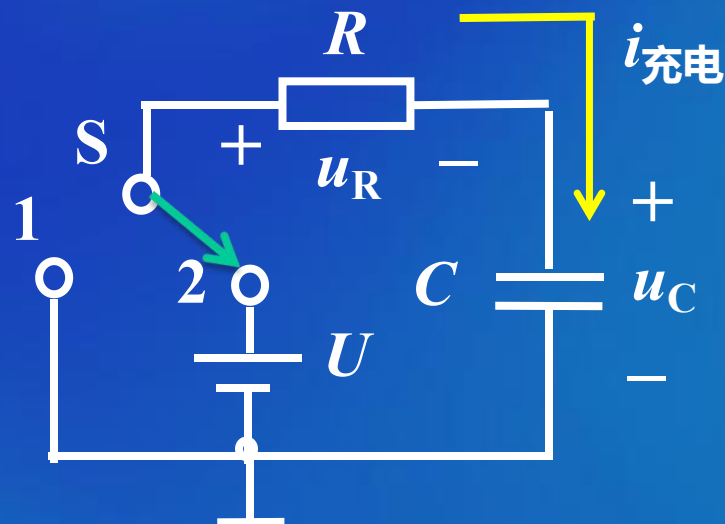
则通过  $R$ ，电容  $C$  放电。

根据三要素法

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

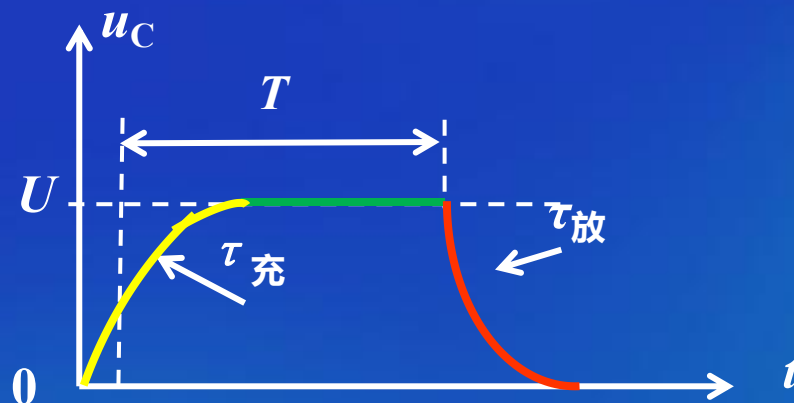
$$u_C(0_+) = U \quad u_C(\infty) = 0$$

$$\tau = RC$$



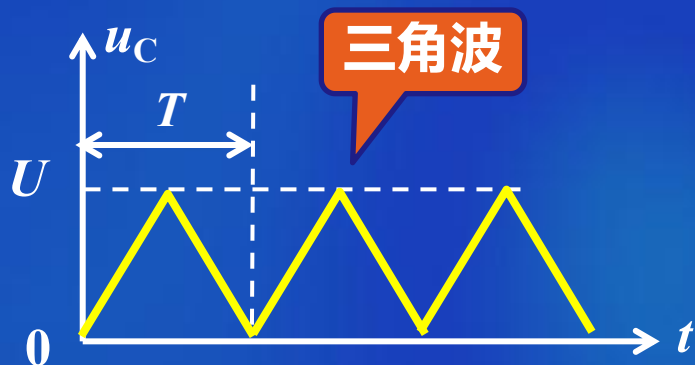
a. 当  $\tau_{\text{充}} = \tau_{\text{放}} \ll T$  时

充放电波形图

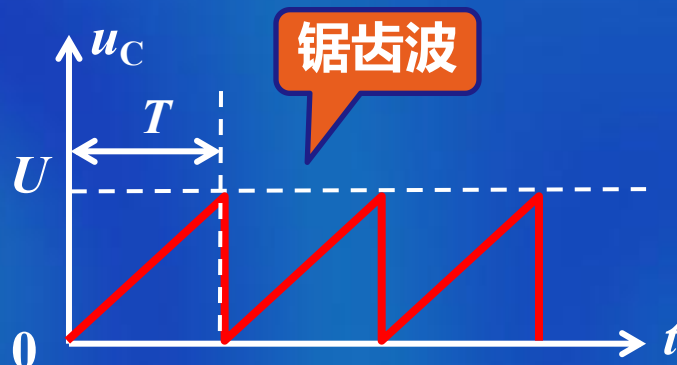


改变充放电时间常数，则可以得到不同的波形

b.  $\tau_{\text{充}} = \tau_{\text{放}} \gg T$



c.  $\tau_{\text{充}} \gg \tau_{\text{放}}, \tau_{\text{充}} \gg T$





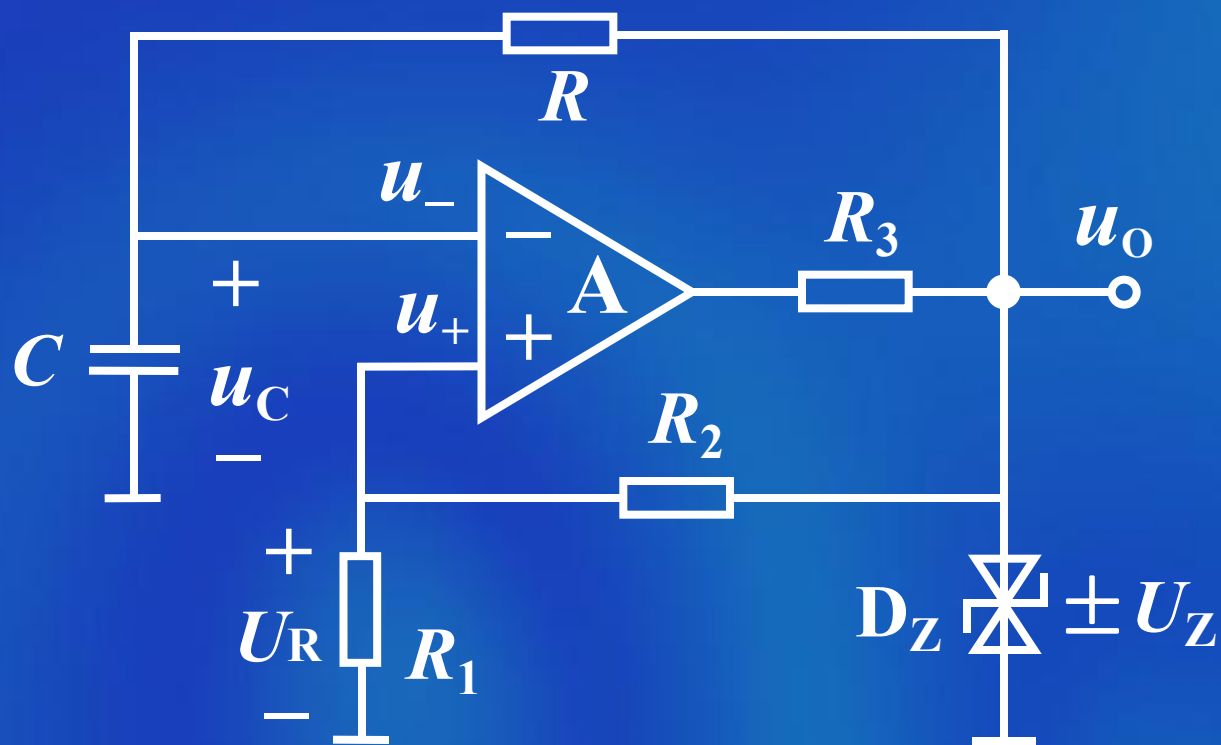
## 非正弦信号发生器的主要组成：

{ 开关器件  
反馈网络  
延时环节

输出波形 { 方波  
矩形波  
三角波  
锯齿波

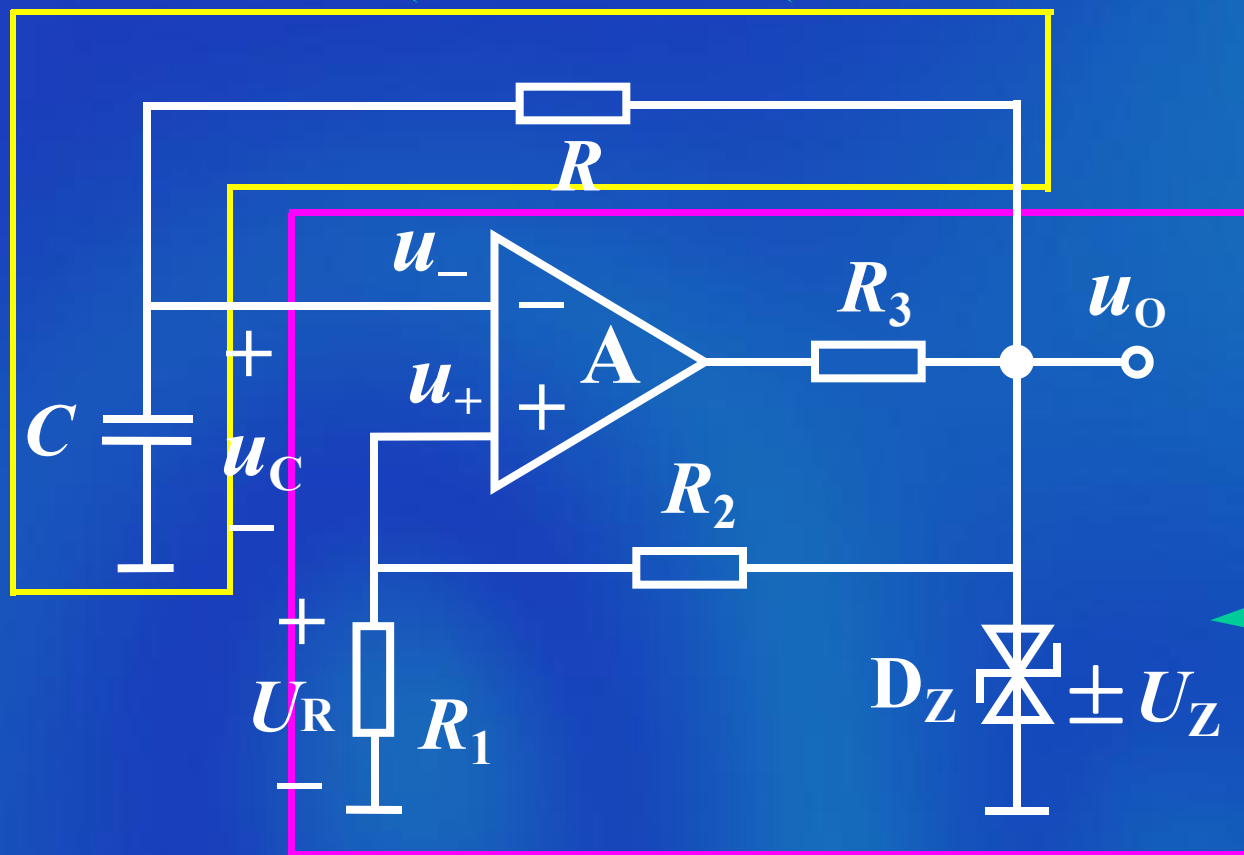
## 9.2.1 方波发生器

### 1. 电路组成



延迟  
环节

反馈  
环节



迟滞比  
较器

## 2 工作原理

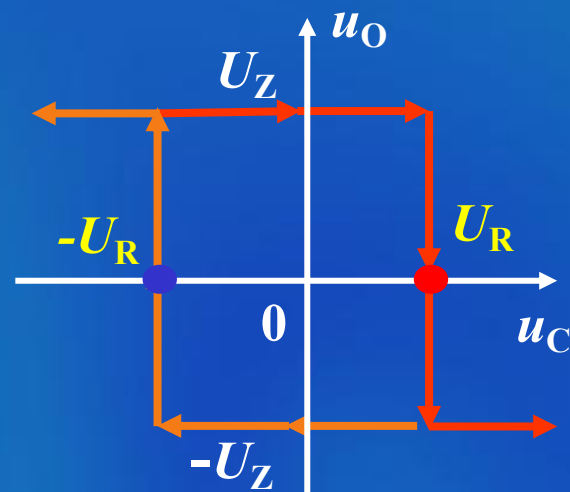
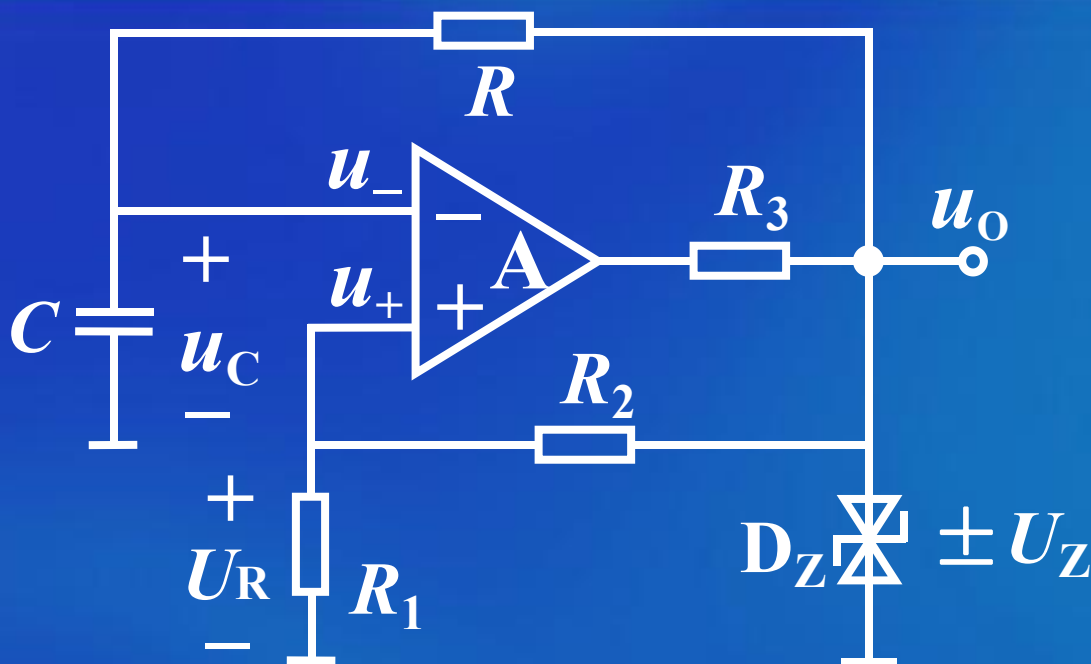
设  $t=0$  时

$$u_O = +U_Z$$

$$u_C(0_+) = 0$$

则

$$\begin{aligned} u_R &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_O \\ &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+U_Z) \\ &= +FU_Z \quad \left( F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \end{aligned}$$



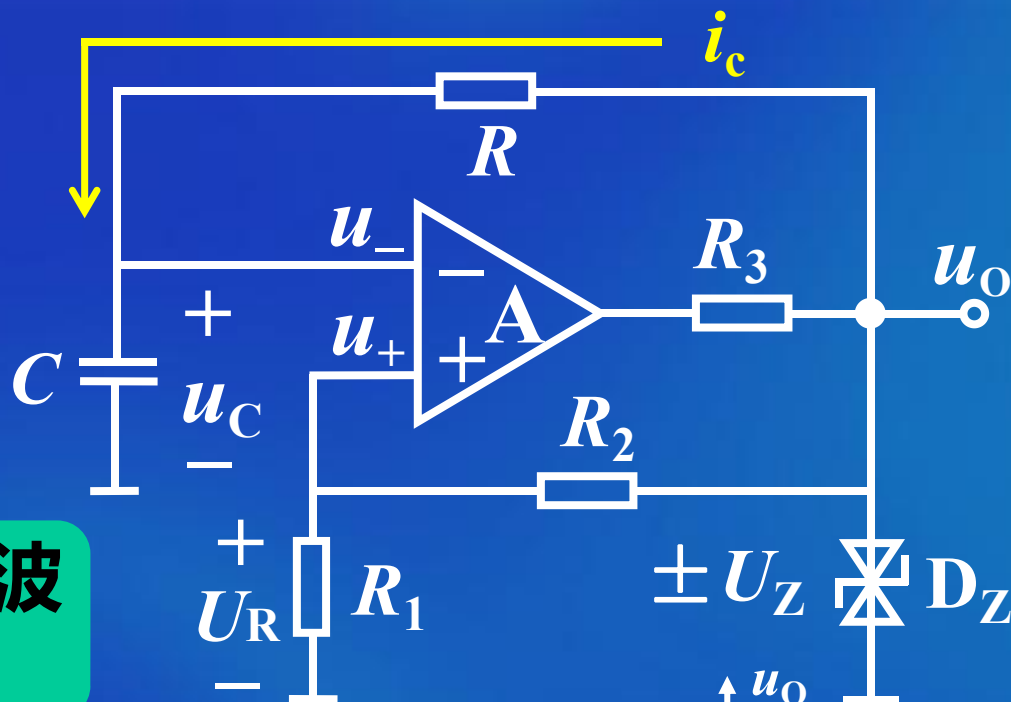
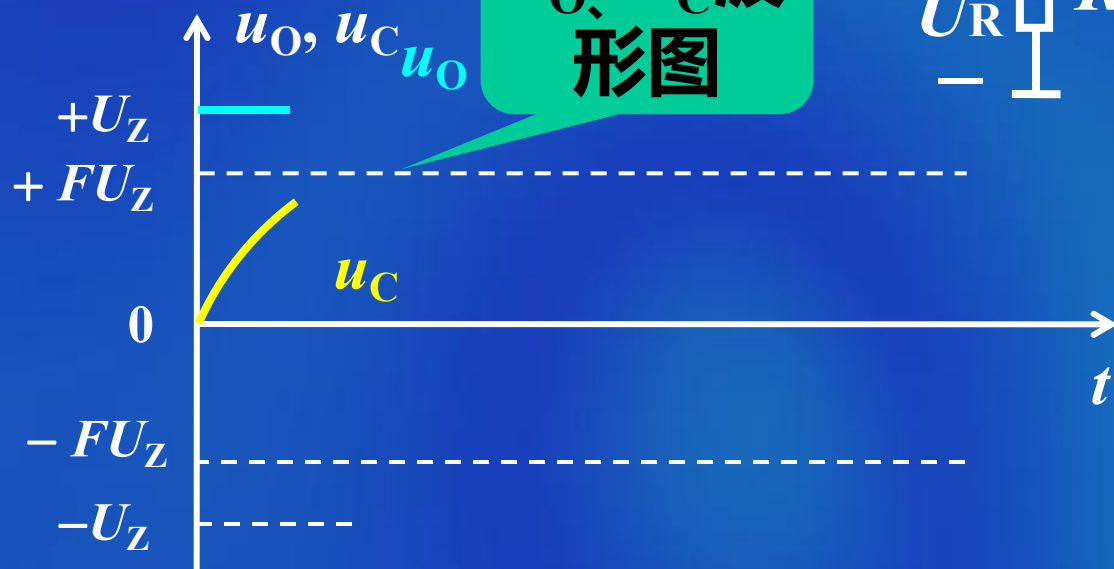
a. 当 $t > 0$ 时

$$u_O = +U_Z$$

电容 $C$ 充电

$u_C$ 按指数规律上升

$u_O$ 、 $u_C$ 波形图

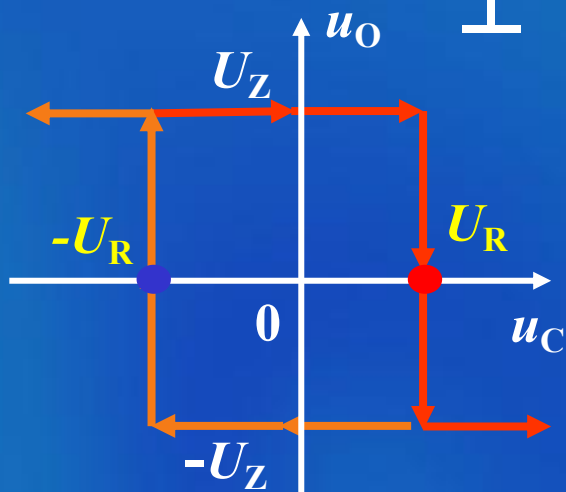
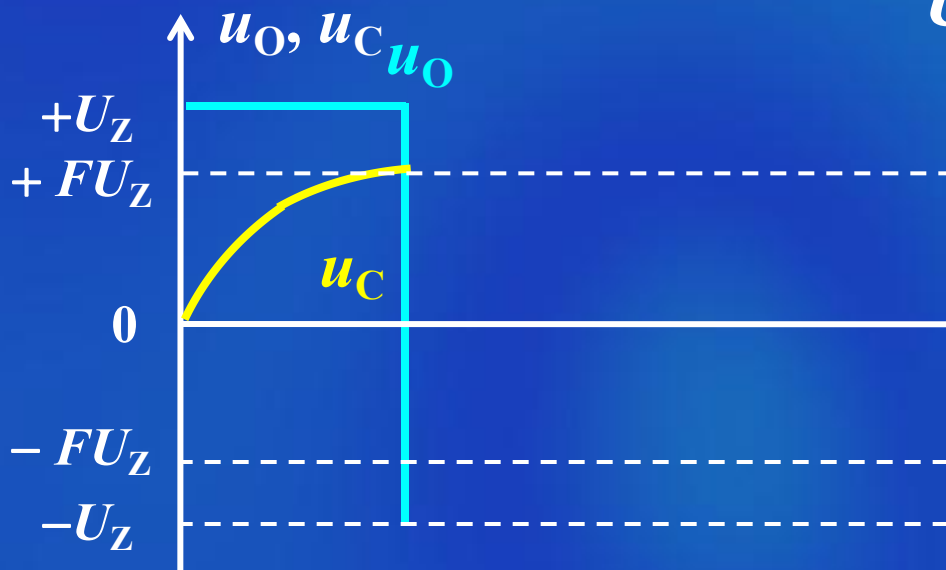
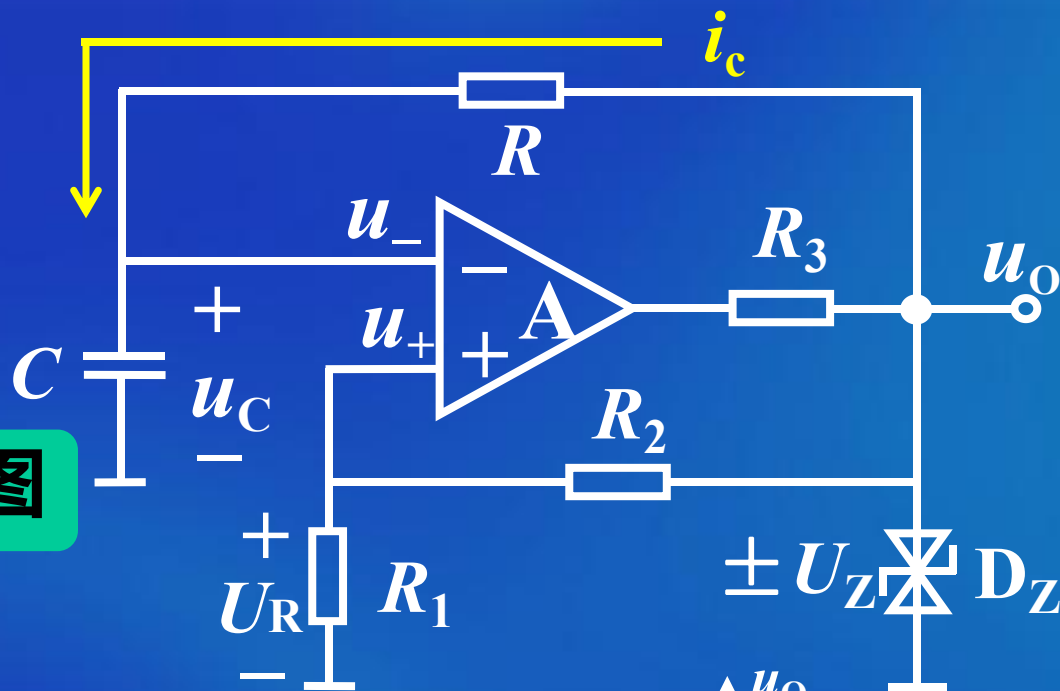


b. 当  $u_C > FU_Z$  时

$$u_O = -U_Z$$

$$U_R = -FU_Z$$

$u_O$ 、 $u_C$  波形图



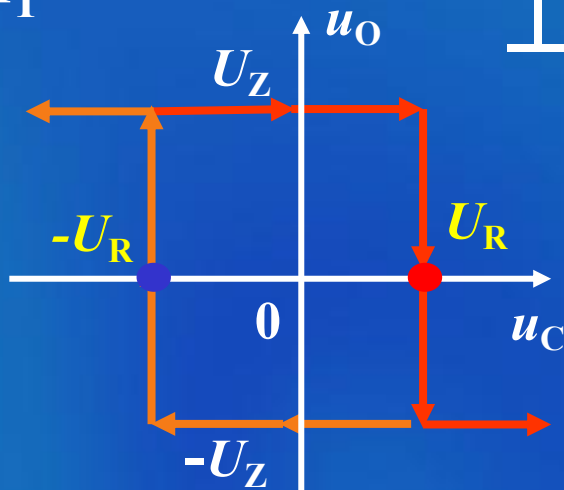
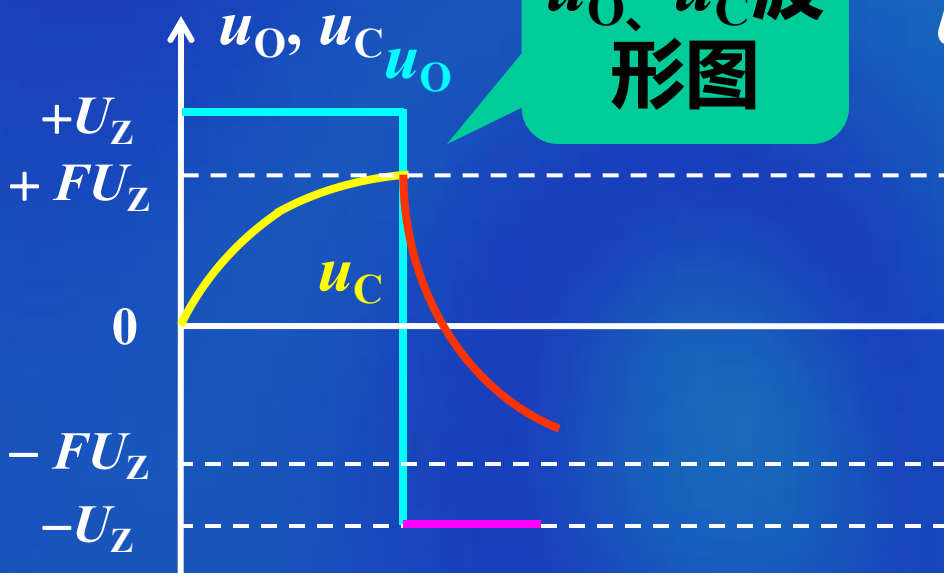
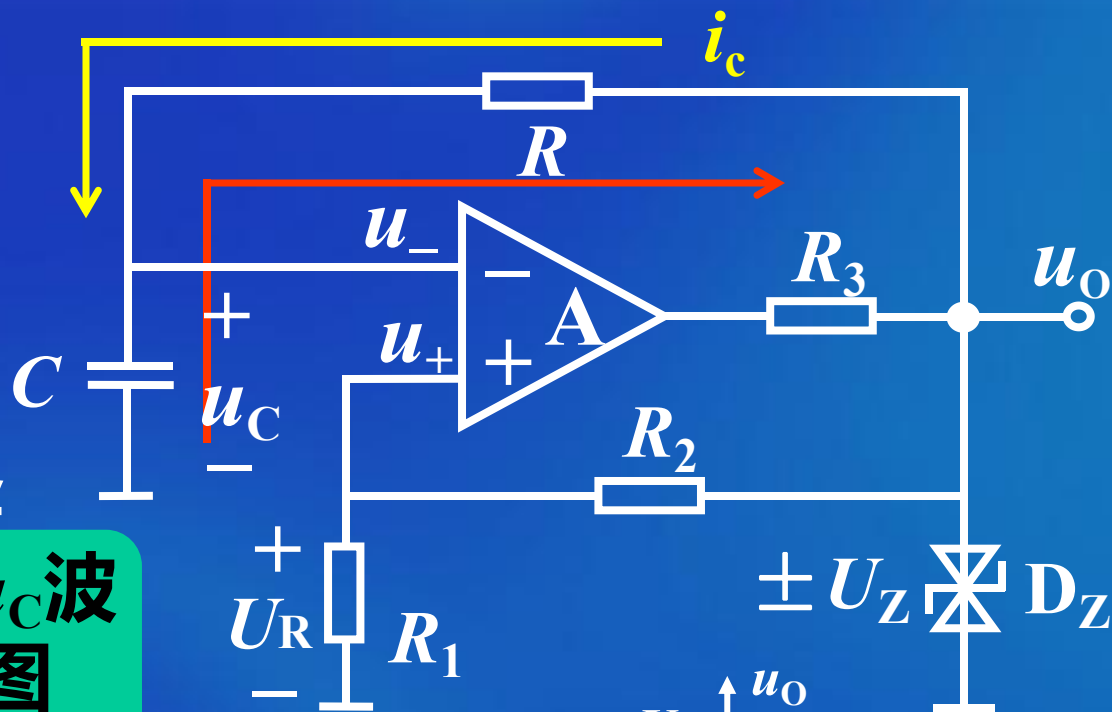
c. 当  $u_O = -U_Z$  时

$$U_R = -FU_Z$$

电容  $C$  放电

$u_C$  按指数规律下降

$u_O$ 、 $u_C$  波形图

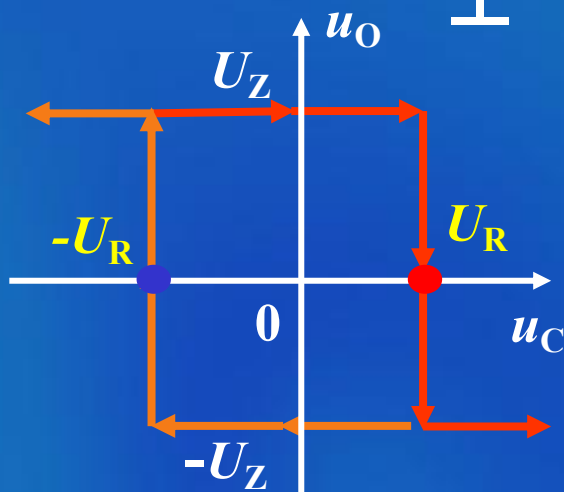
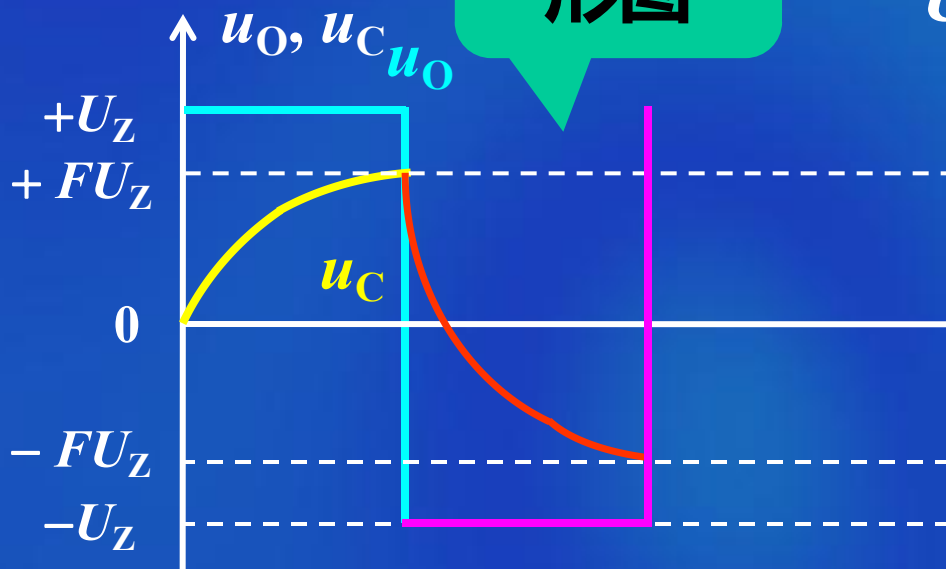
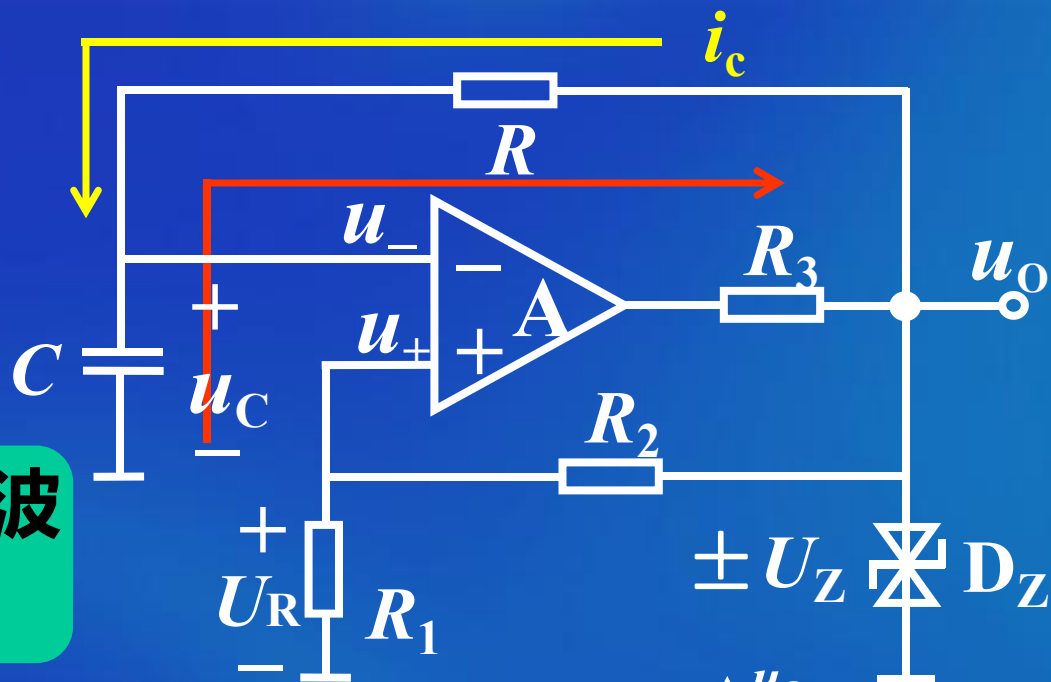


d. 当  $u_C < -FU_Z$  时

$$u_O = U_Z$$

$$U_R = FU_Z$$

$u_O$ 、 $u_C$  波形图





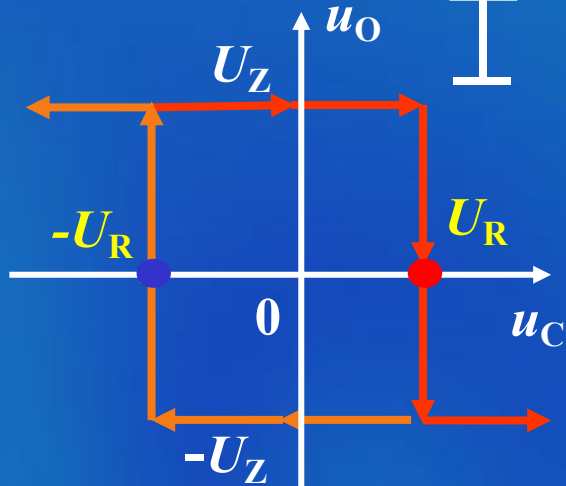
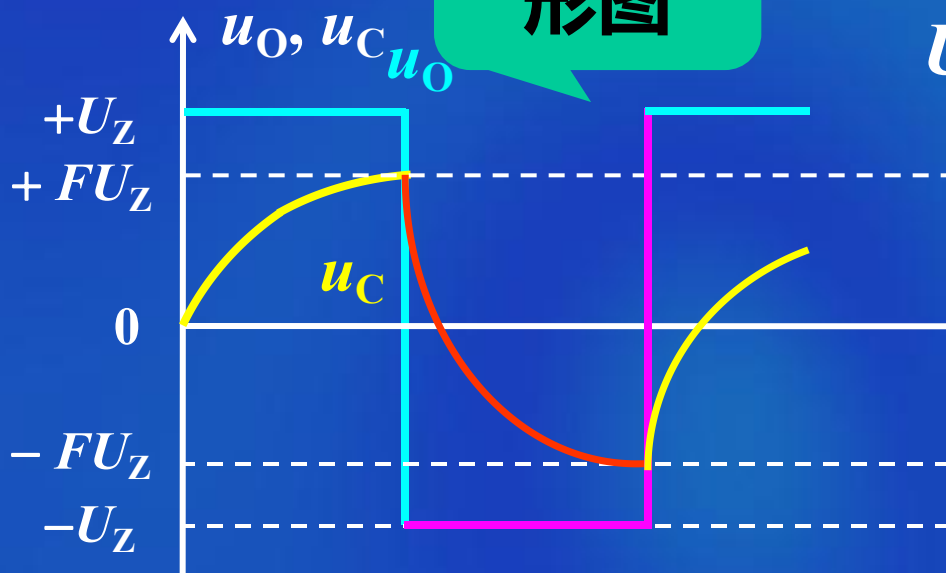
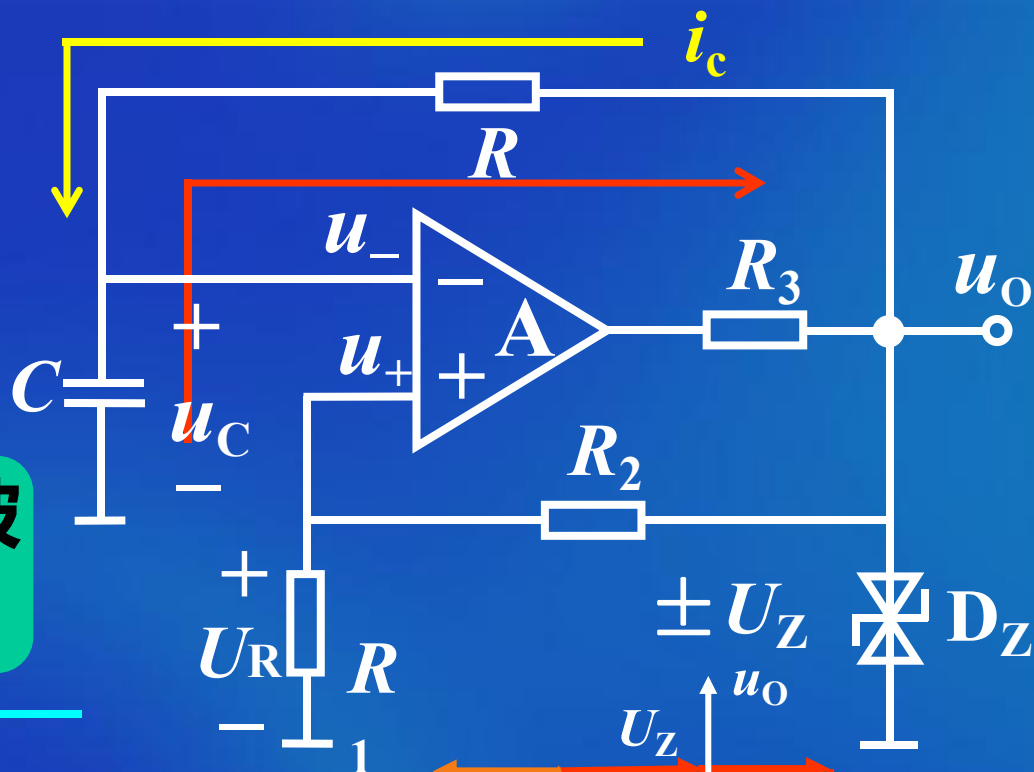
e. 当  $u_O = +U_Z$  时

$$U_R = FU_Z$$

电容  $C$  又充电

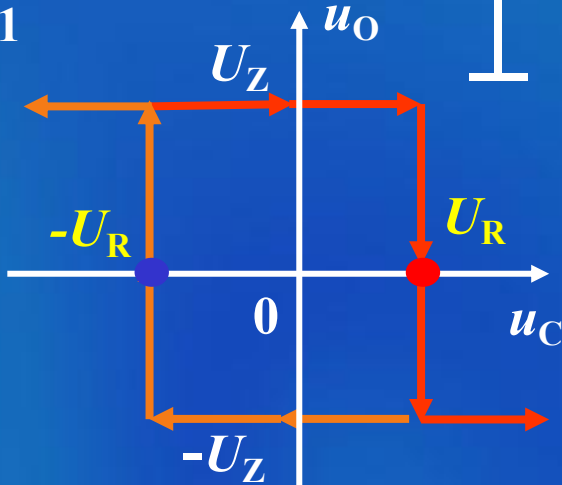
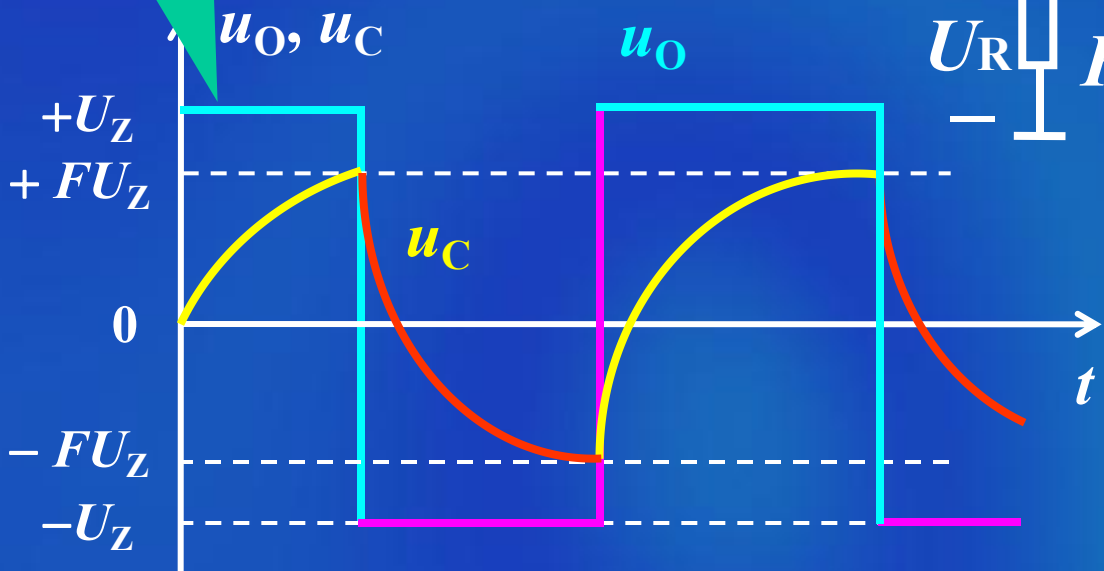
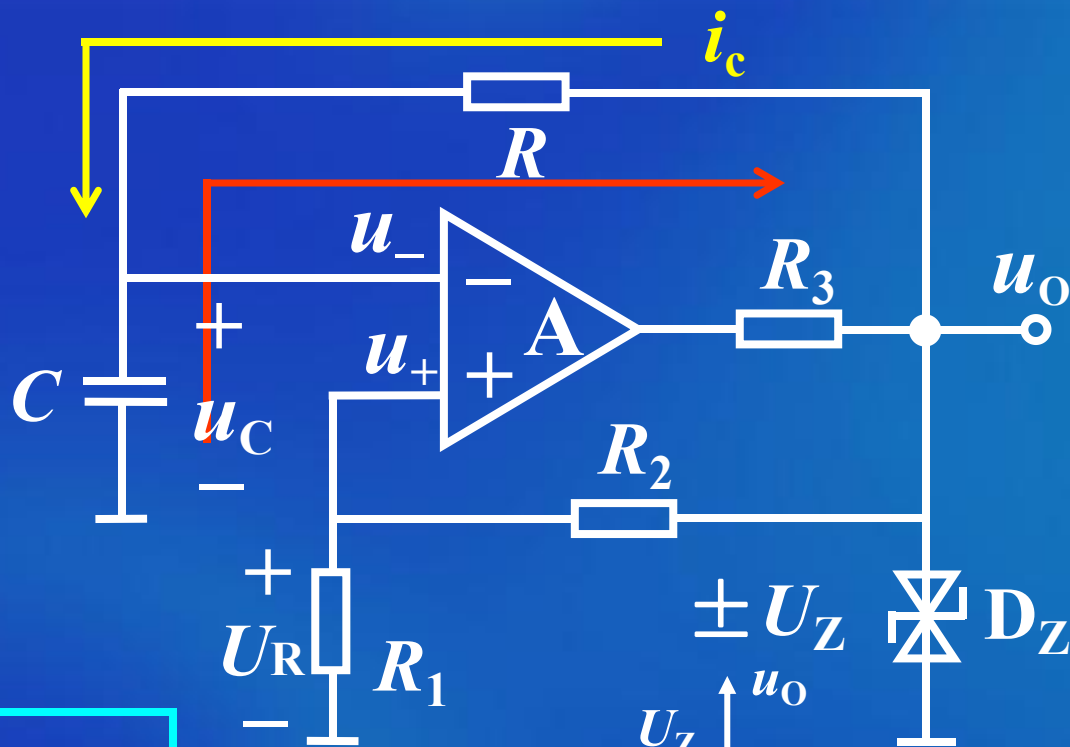
$u_C$  又按指数规律上升

$u_O$ 、 $u_C$  波形图



$u_O$ 、 $u_C$ 波形图

$u_O$ 为方波



# $u_C$ 波形非三角波

原因：非恒流充电

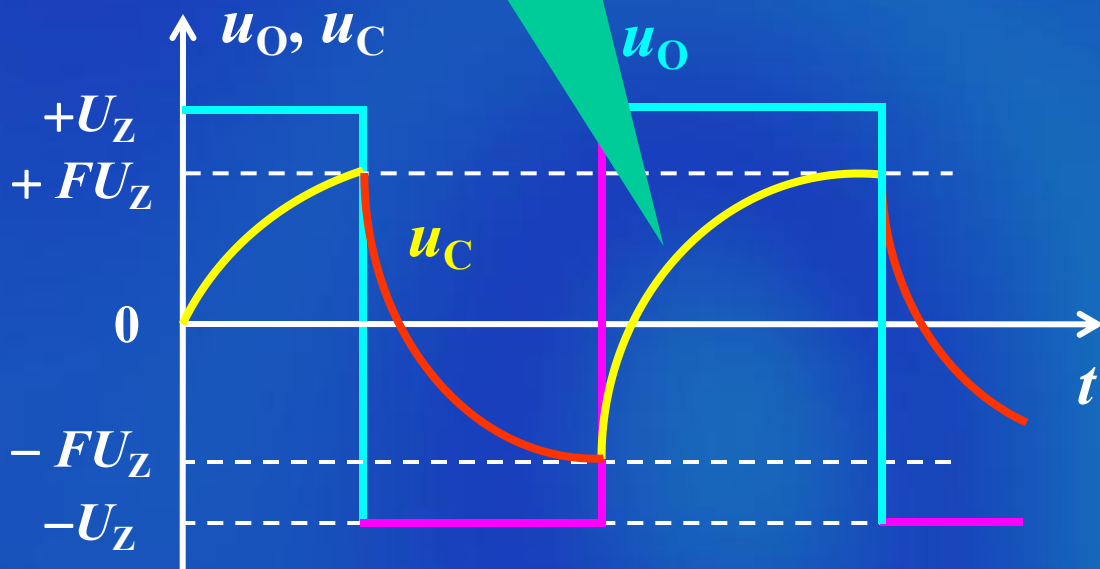
$u_C$  波形随着  $t$  的增加而上升，

充电电流随时间下降

$u_C$  非三角波

$$i_{\text{充}} = \frac{u_O - u_C}{R}$$

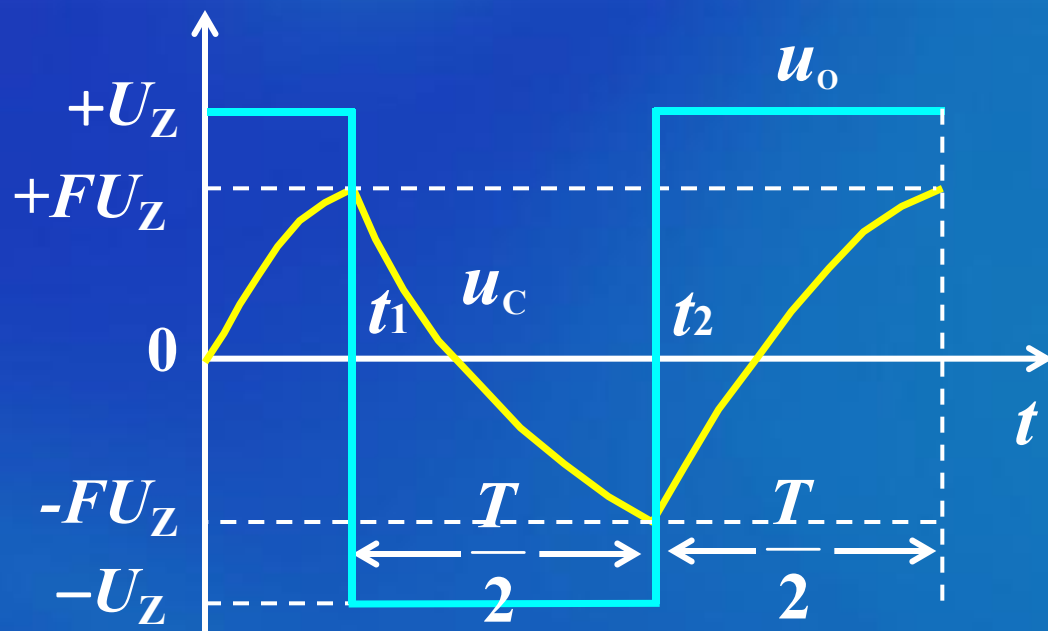
因此非三角波



## 2. 主要参数计算

电容两端电压的变化规律

根据三要素法



$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

如果选定时间起点为  $t_2$  , 那么

$$u_C(0_+) = -FU_Z$$

$$u_C(\infty) = U_Z$$

$$\tau = RC$$

当  $t=T/2$  时

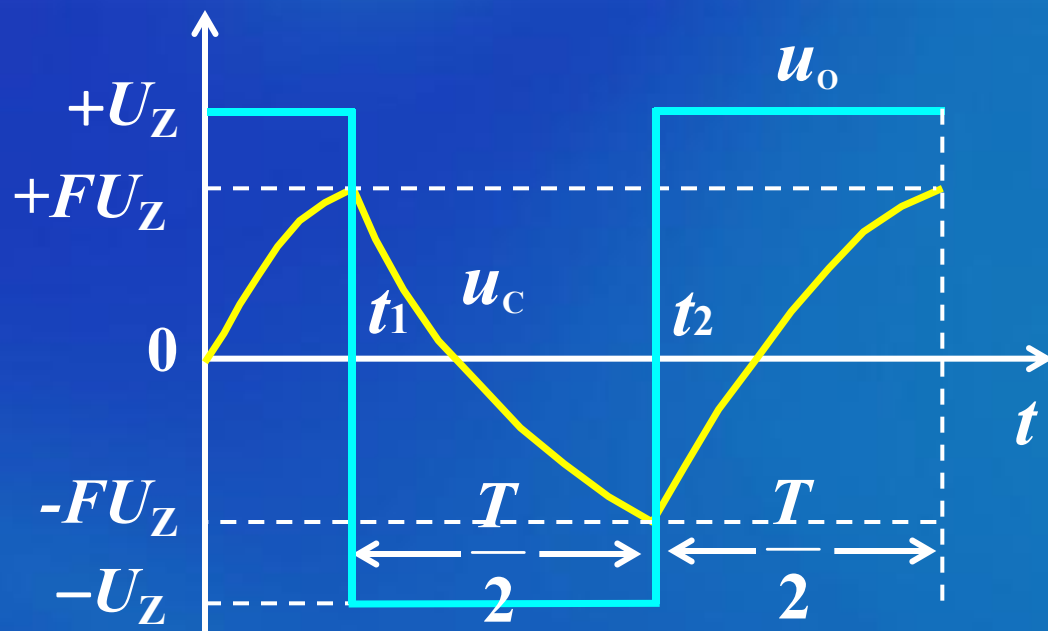
$$u_C(T/2) = FU_Z$$

即

$$FU_Z = U_Z + [-FU_Z - U_Z]e^{-\frac{T/2}{\tau}}$$

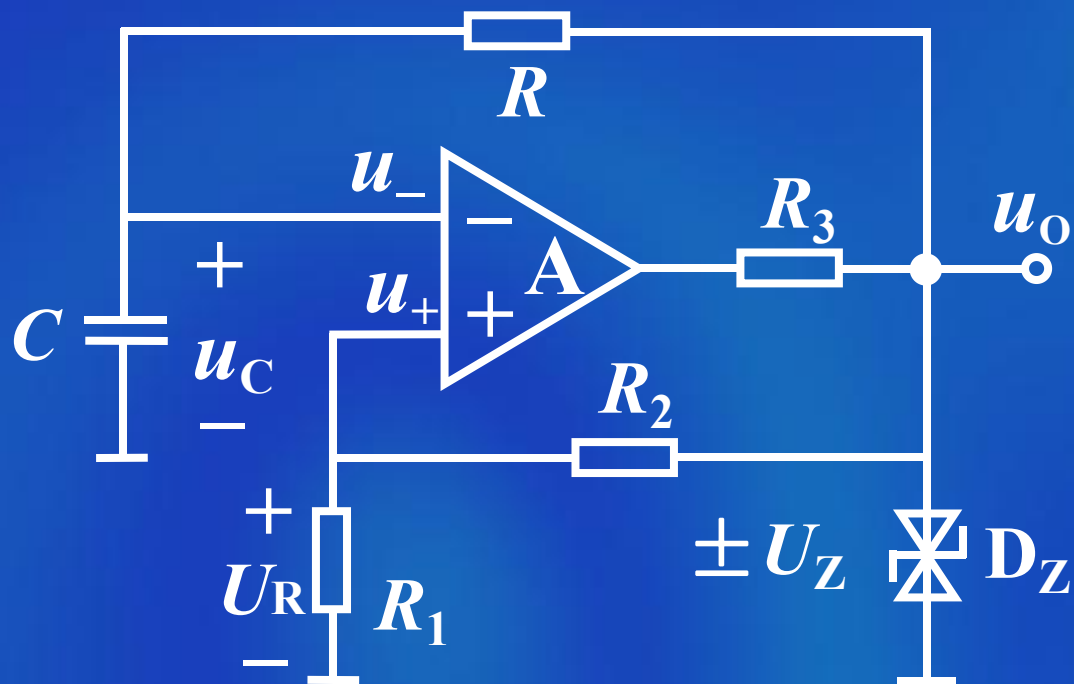
由此得电路的振荡周期

$$T = 2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2)$$

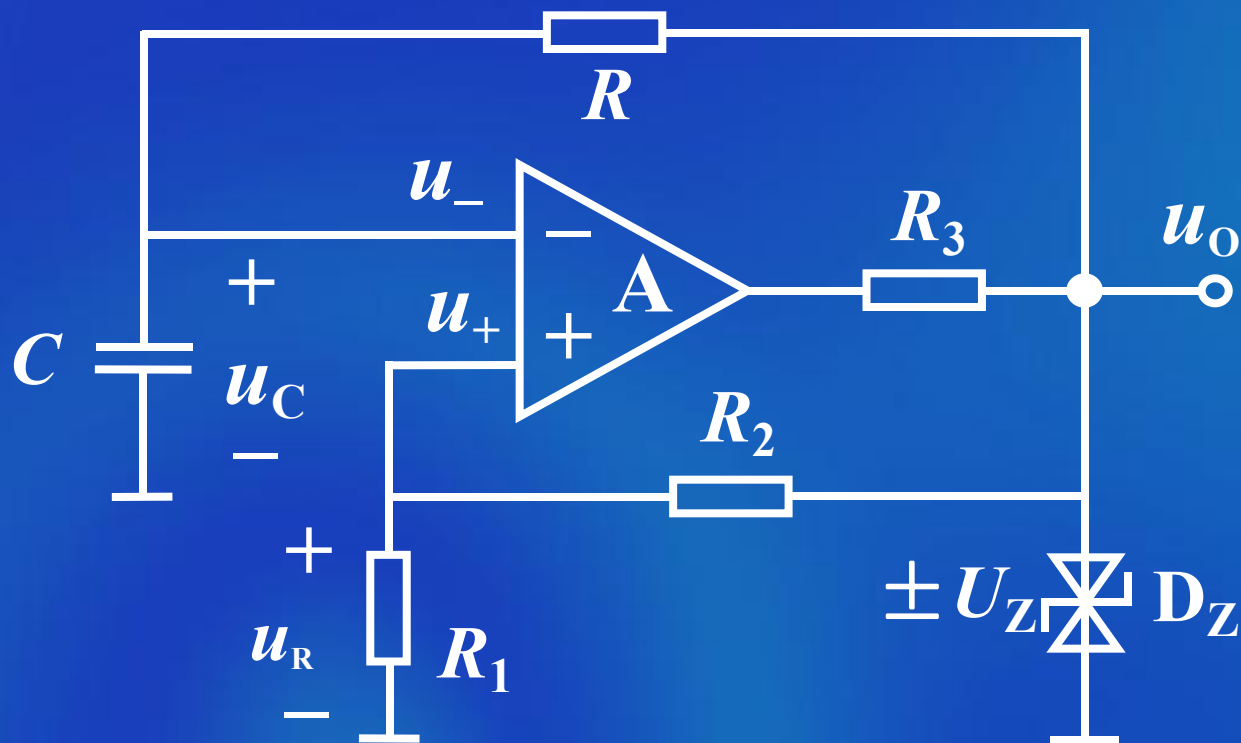


振荡频率：

$$f_0 = \frac{1}{2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2)}$$

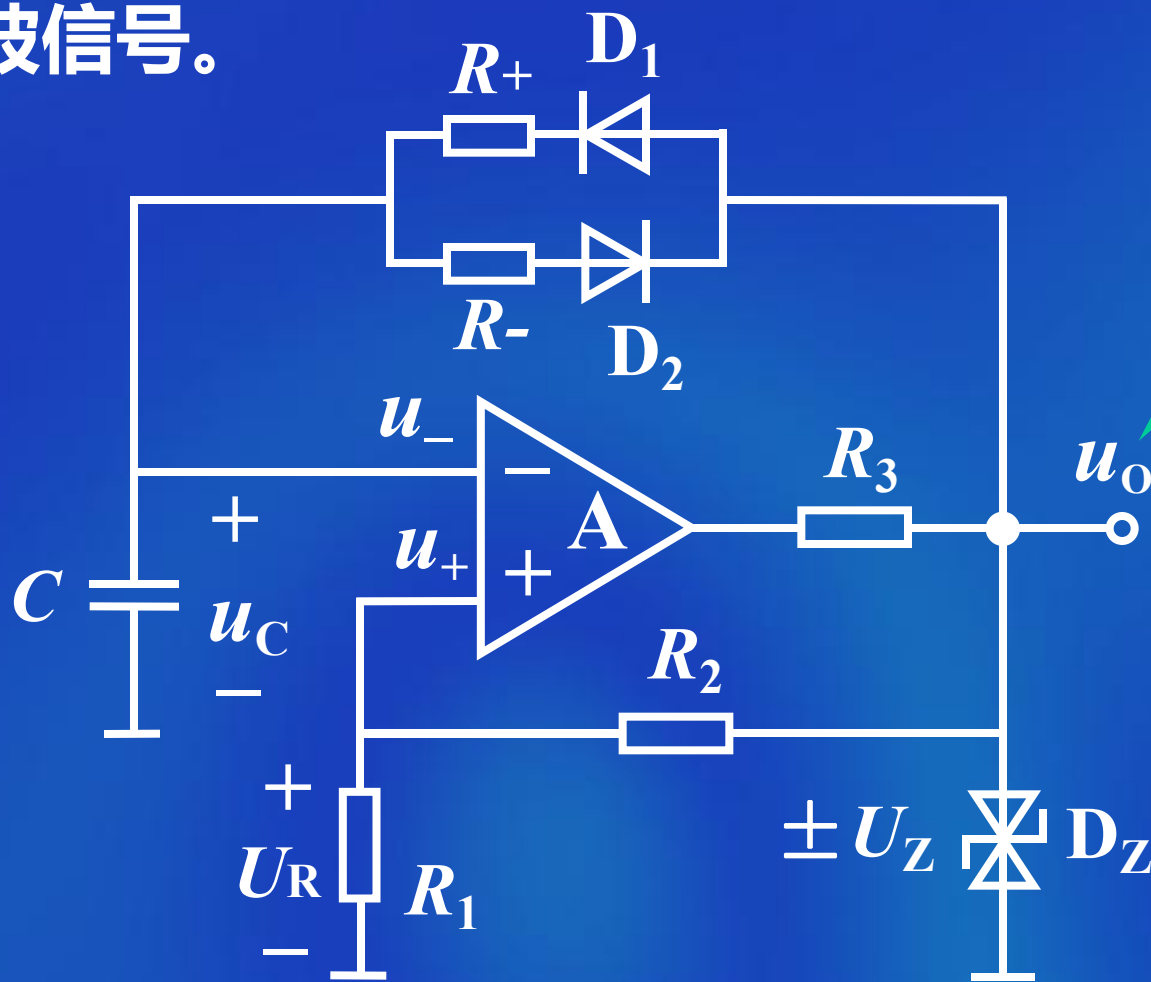


# 思考题



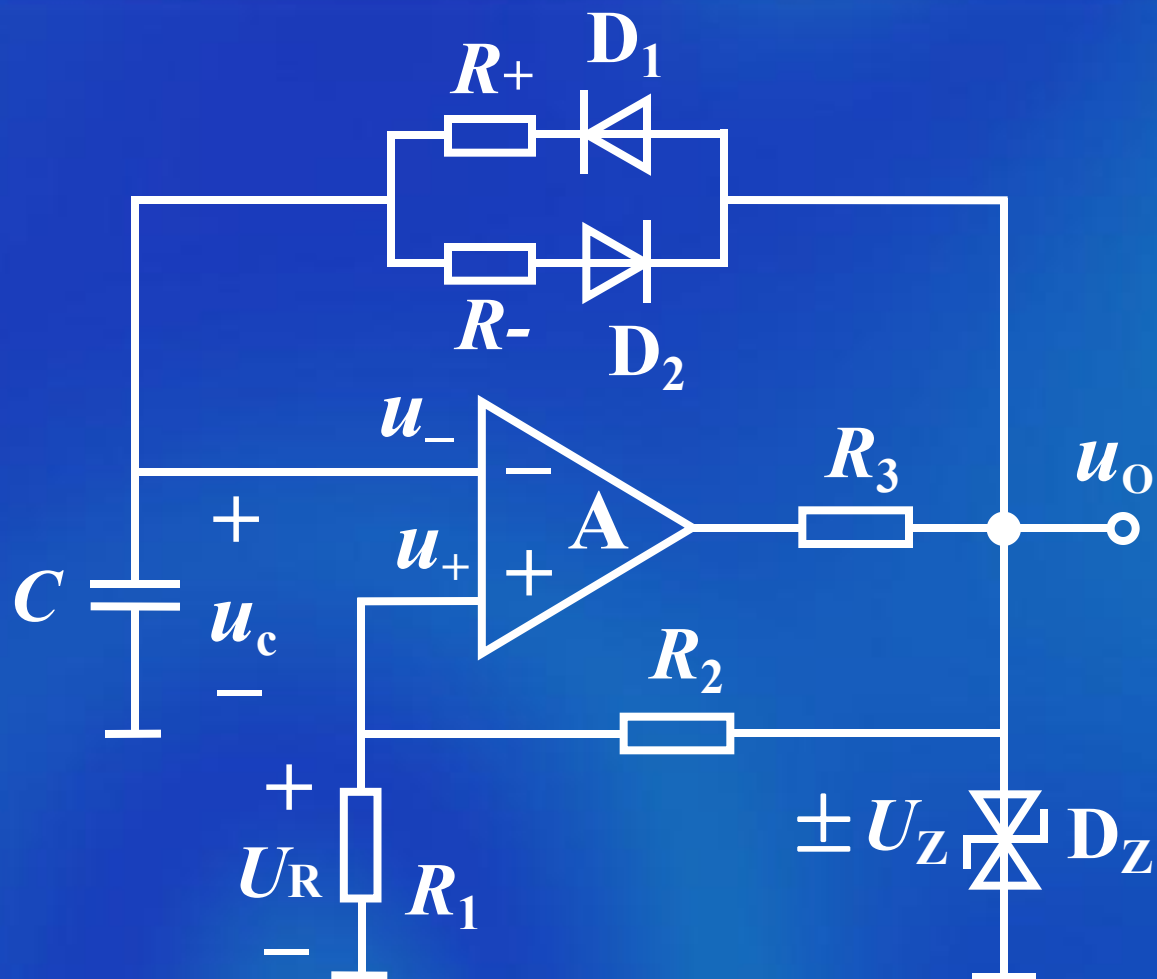
1.对上图电路如何改进，可获得矩形波信号？

答：如果将方波信号发生器中的电容 $C$ 的充电和放电回路分使充电和放电的时间常数不相等，便可获得矩形波信号。

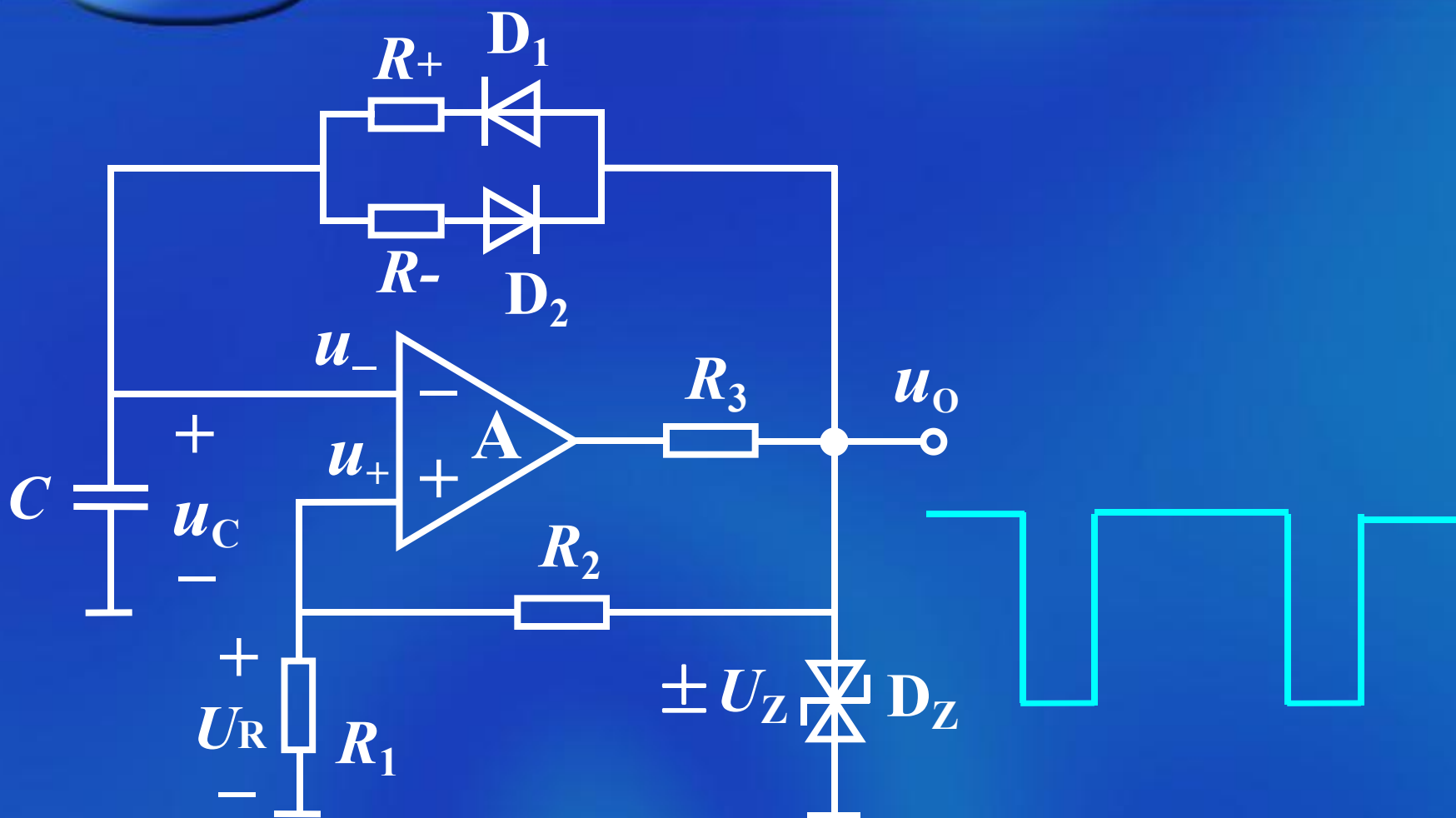


改进电路





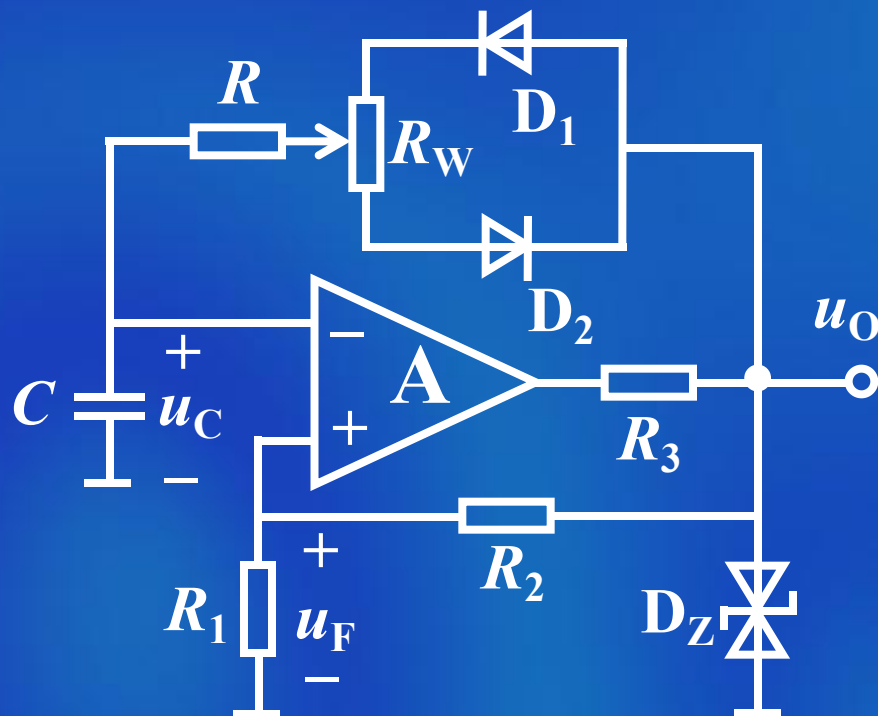
2、在上图示电路中，如果电阻 $R_+ > R_-$ ，输出波形具有什么特点？



答：如果电阻 $R_+ > R_-$ ，那么，电容 $C$ 的充电时间将大于放电时间，输出波形的占空比增大。

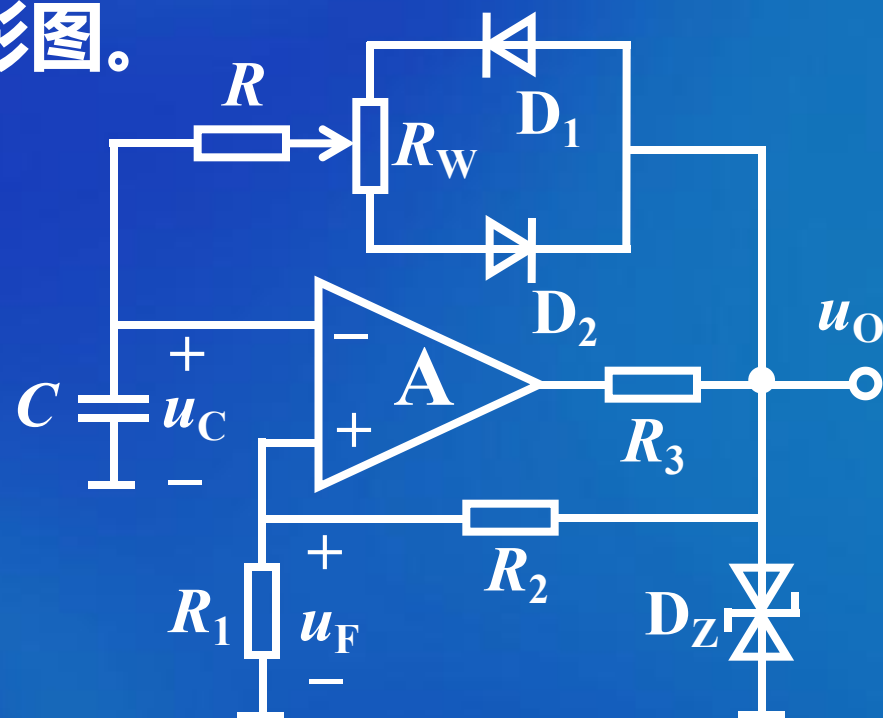
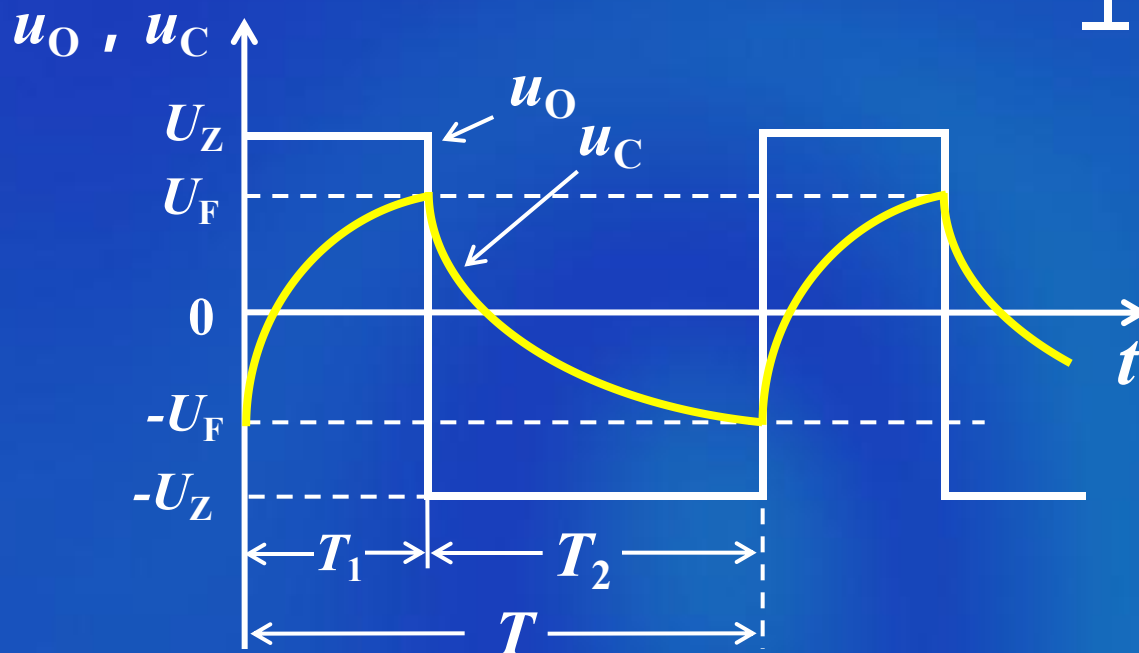
## 练习题

例1 电路如图所示，图中运放A和二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 都是理想器件，稳压管 $D_Z$ 的稳压值为 $U_Z$ 。试证明调节电位器 $R_W$ 改变矩形波占空比时，周期 $T$ 将保持不变。



解 由题意，画出 $u_O$ 和 $u_C$ 的波形图。

# 波形图



其中

$$U_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$$

当 $u_O = U_Z$ 时,  $u_O$ 通过 $D_1$ 对电容充电

$$T_1 = (R + R'_w)C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

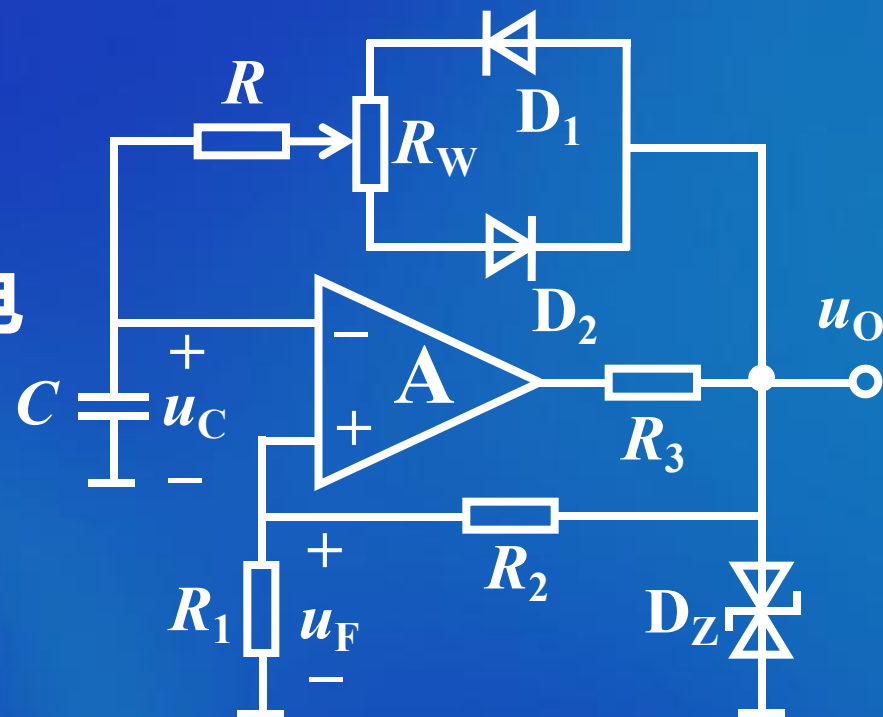
当 $u_O = -U_Z$ 时, 电容通过 $D_2$ 放电

$$T_2 = (R + R''_w)C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

振荡周期

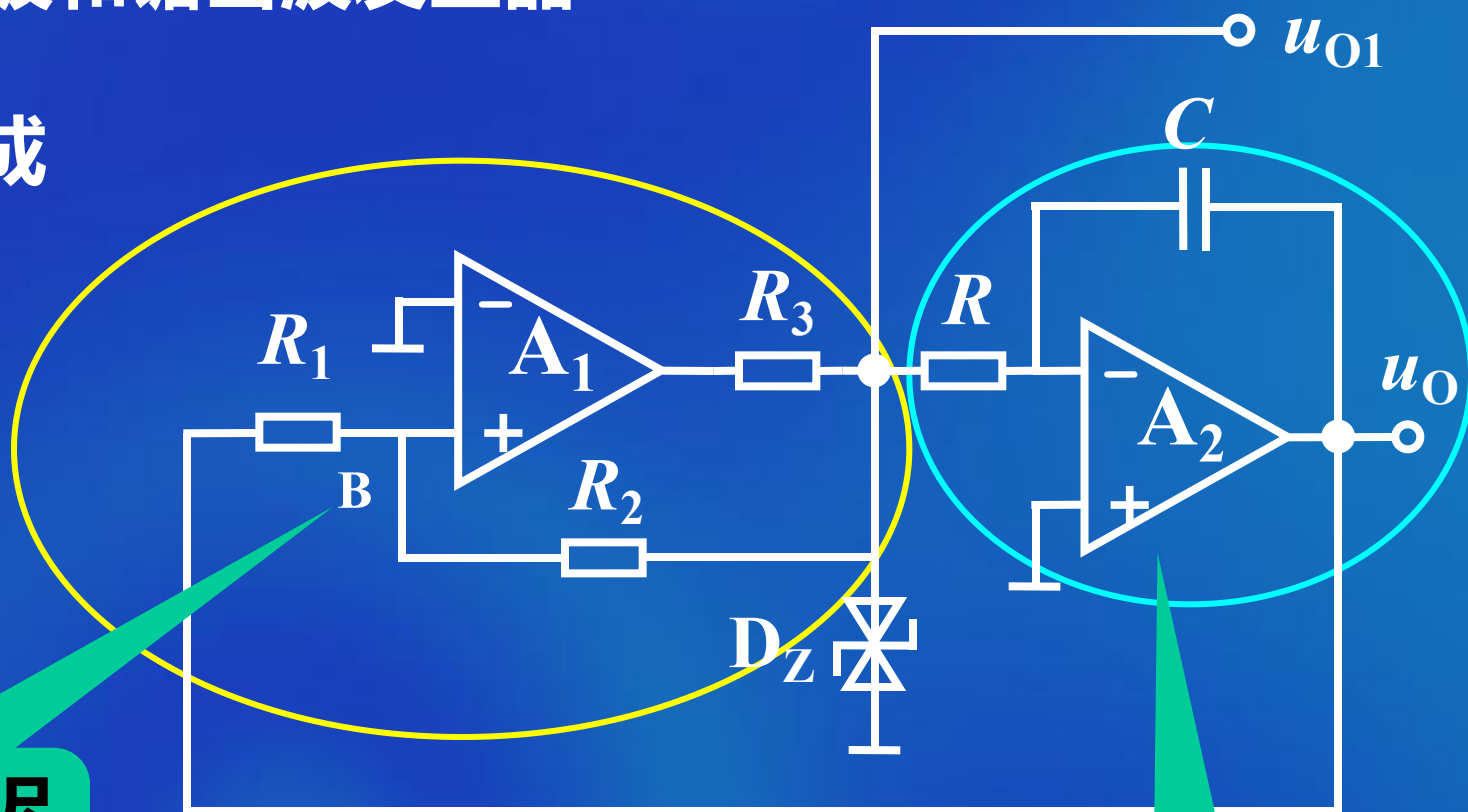
$$T = T_1 + T_2 = (2R + R_w)C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) \quad \text{为常数}$$

可见, 在改变 $R_w$ 滑动端位置时,  $T$ 保持不变。



### 9.2.2 三角波和锯齿波发生器

## 1. 电路组成



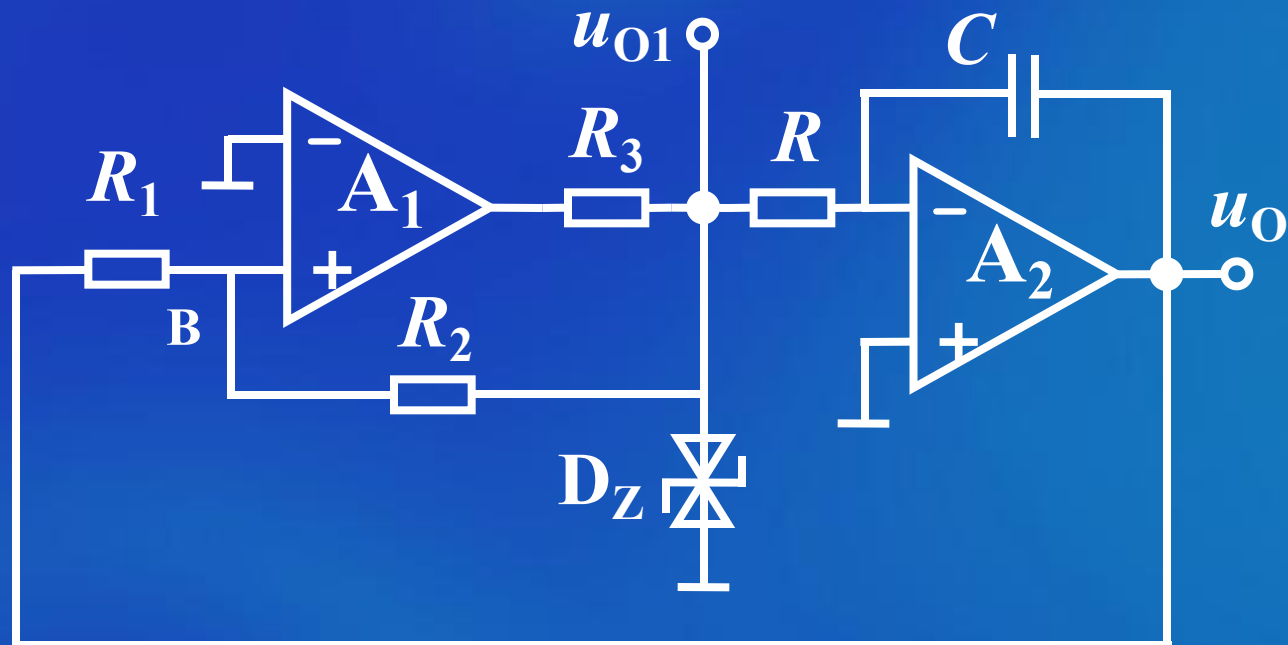
# 同相输入迟滞比较器

# 积分器

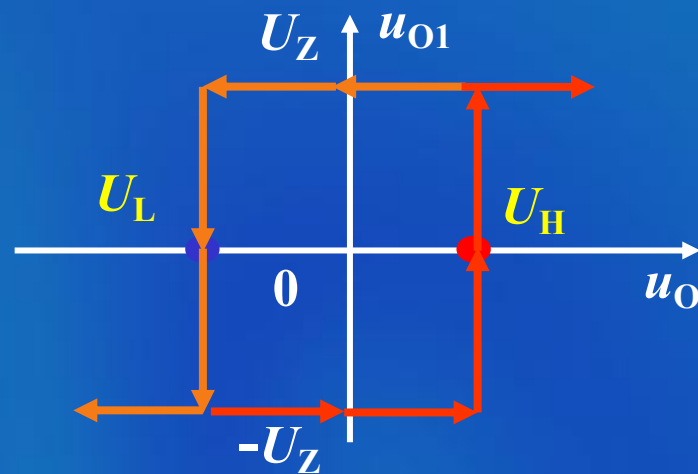
## 2. 工作原理

图中

$$u_{O1} = \pm U_Z$$

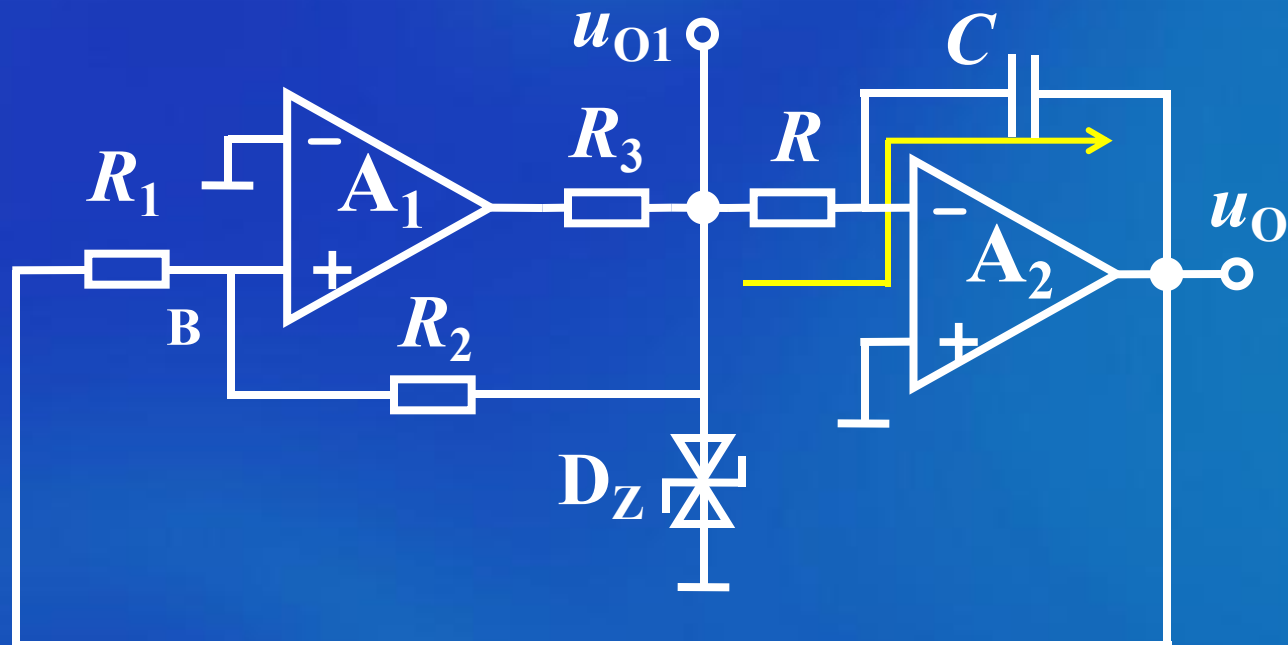


$$\begin{aligned} u_B &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{O1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_O \\ &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} (\pm U_Z) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_O \end{aligned}$$



当  $u_B = 0$  时

比较器翻转

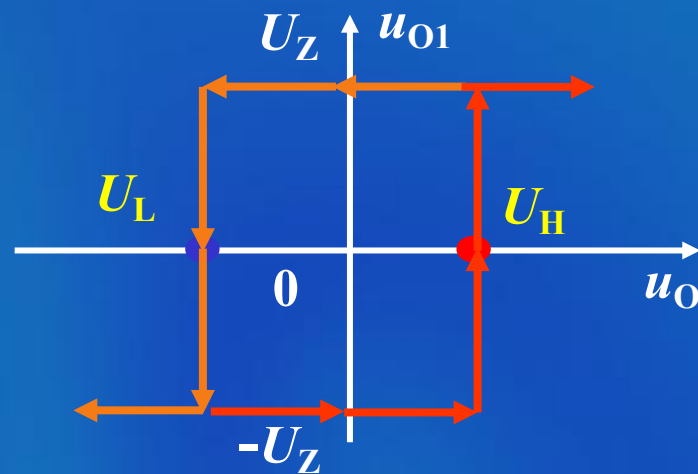


令

$$u_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \pm U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_O = 0$$

得

$$u_L = -\frac{R_1}{R_2} U_Z \quad u_H = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$





(1) 当  $u_{O1} = U_Z$  时

电容  $C$  充电

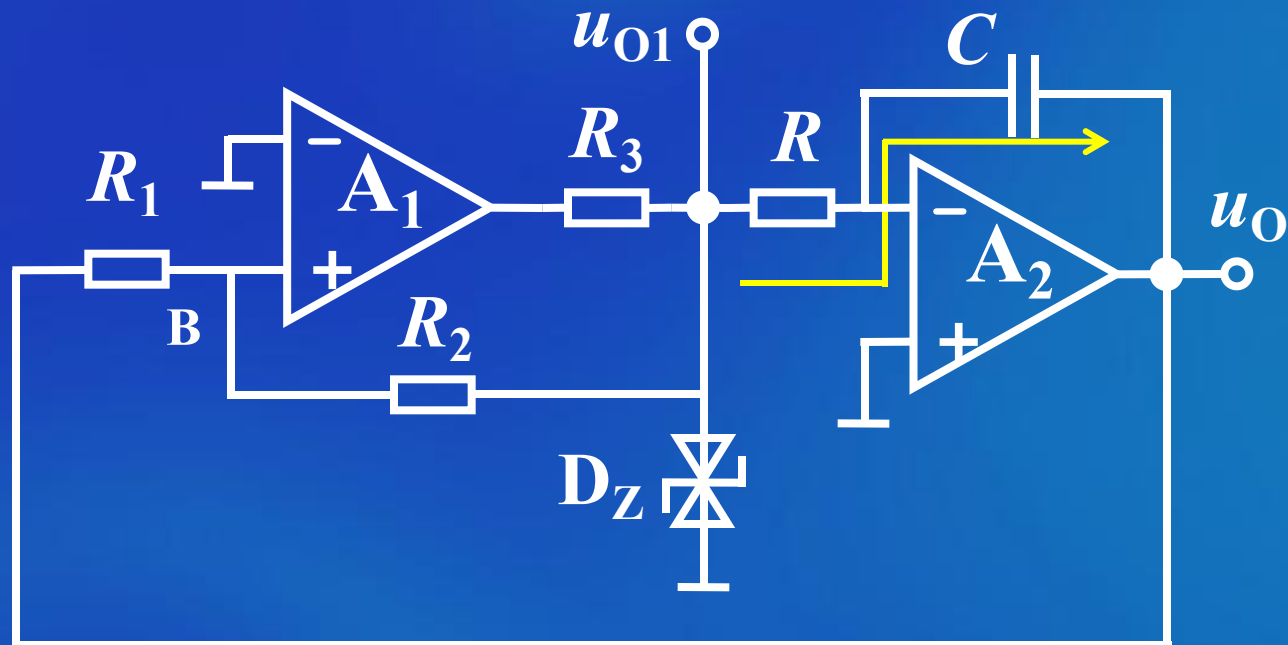
设  $u_C(0_+) = 0$

输出电压

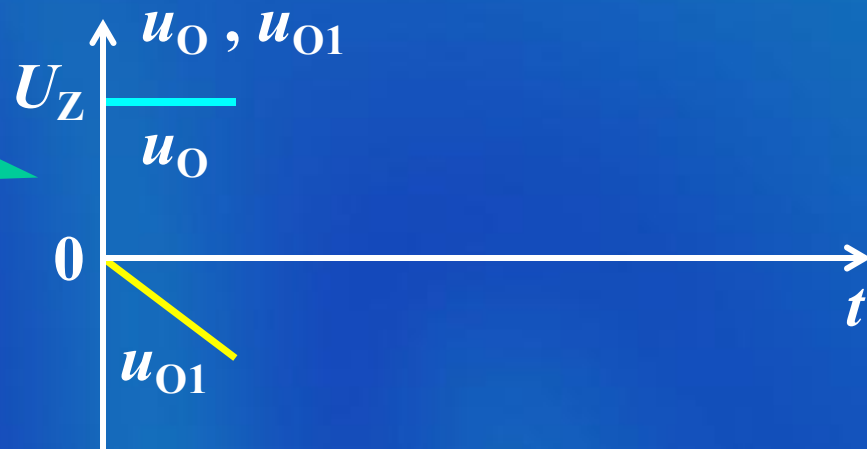
$$u_O = -\frac{1}{RC} \int_t^{t+\Delta t} u_{O1} dt$$

$$= -\frac{U_Z}{RC} \Delta t$$

$u_O$  随时间线性下降



波形图

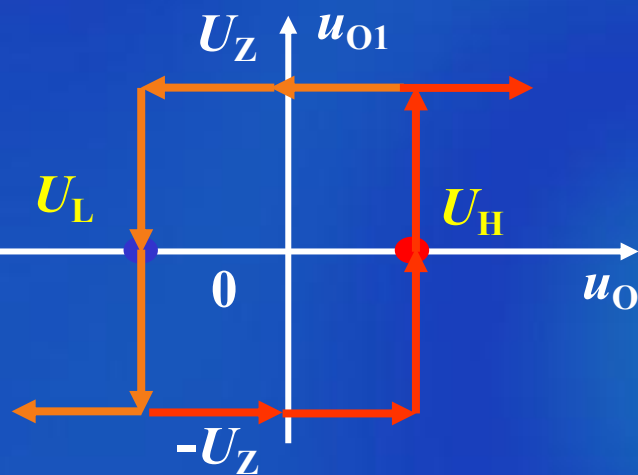
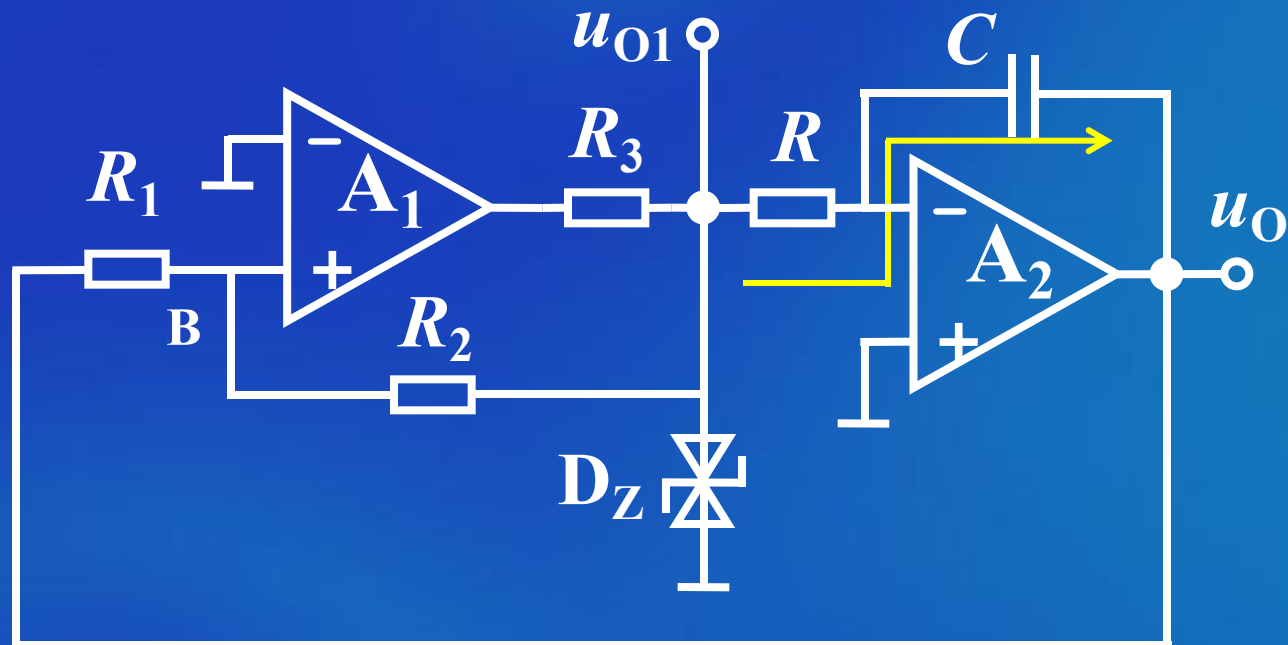


(2) 当  $u_B = 0$  时

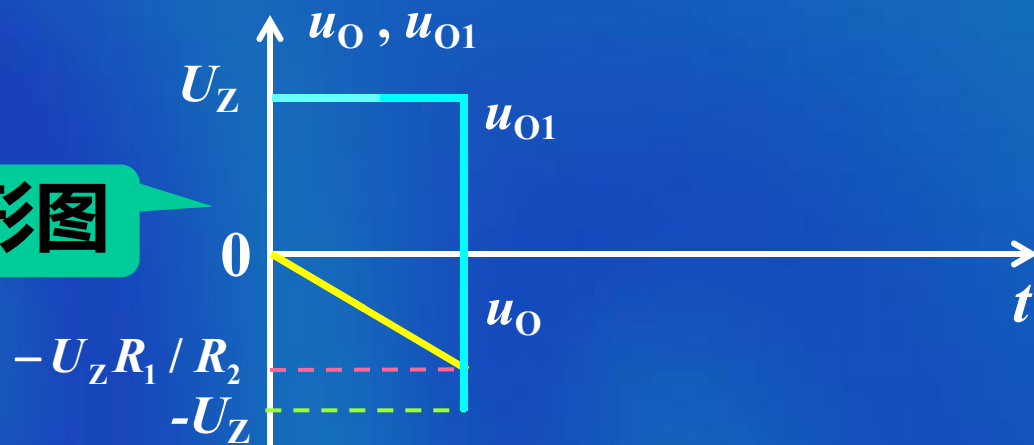
$$u_{O1} = -U_Z$$

$$u_L = -\frac{R_1}{R_2} U_Z$$

$$u_H = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$



波形图

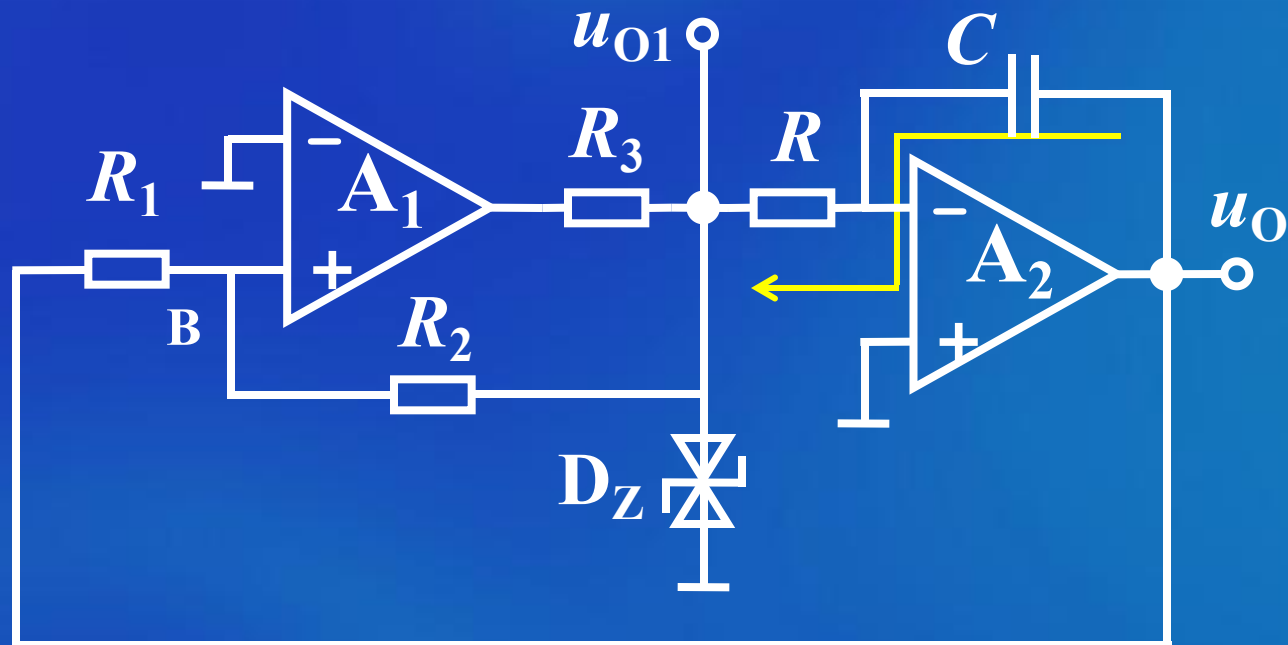


(3) 当  $u_B < 0$  时

$$u_{O1} = -U_Z$$

电容器放电

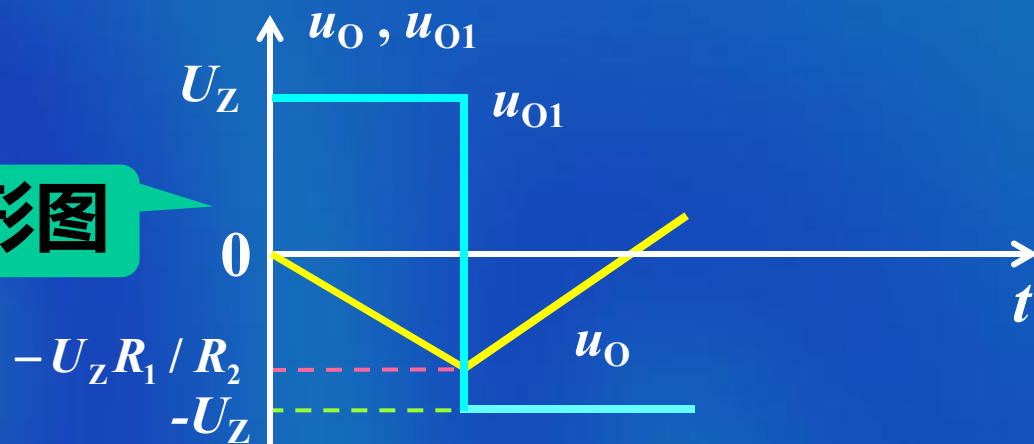
输出电压



$$u_O = -\frac{1}{RC} \int_t^{t+\Delta t} u_{O1} dt$$

$$= \frac{U_Z}{RC} \Delta t$$

波形图



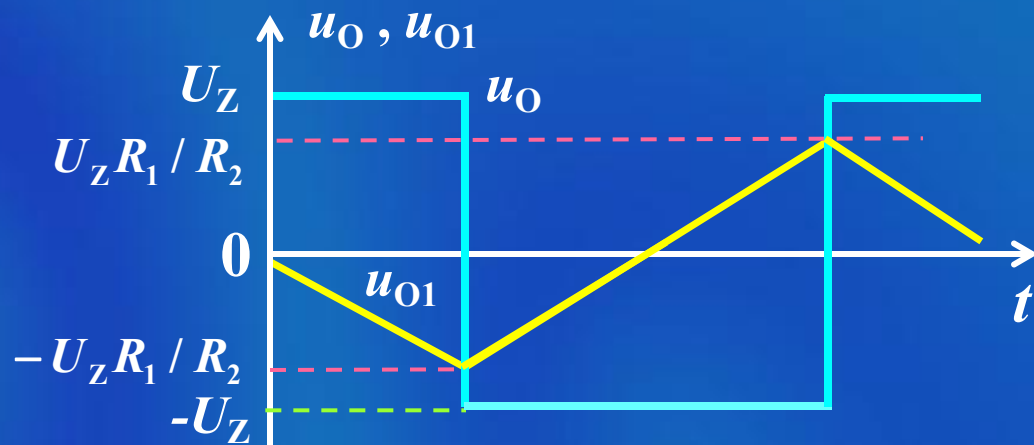
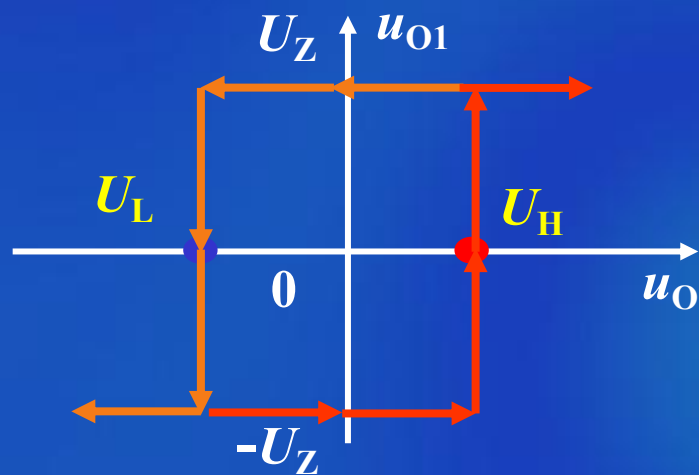
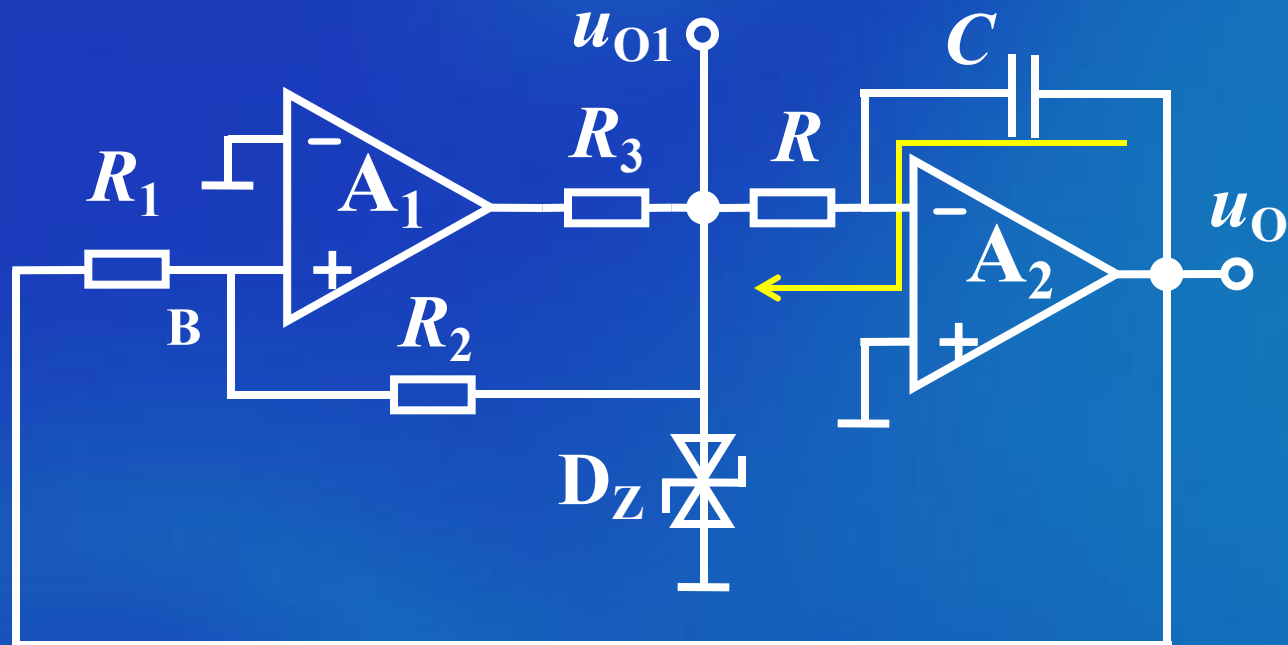
$u_O$  随时间线性上升

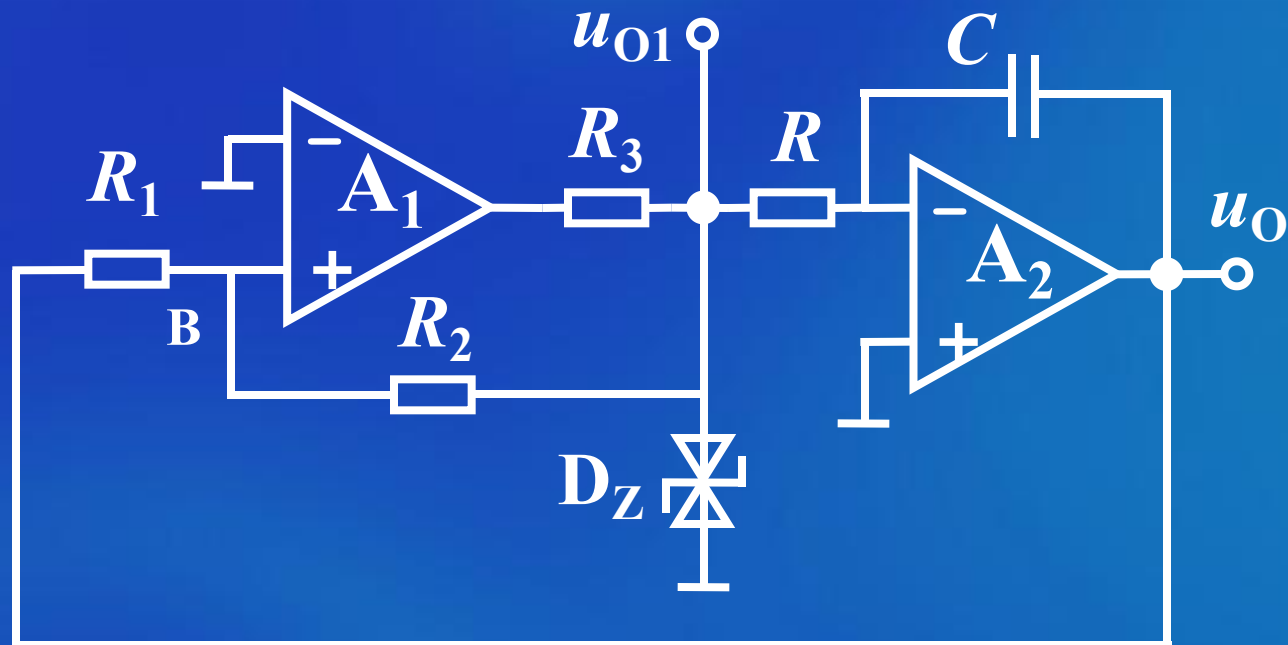
(4) 当  $u_B > 0$  时

$$u_{O1} = U_Z$$

$$u_L = -\frac{R_1}{R_2} U_Z$$

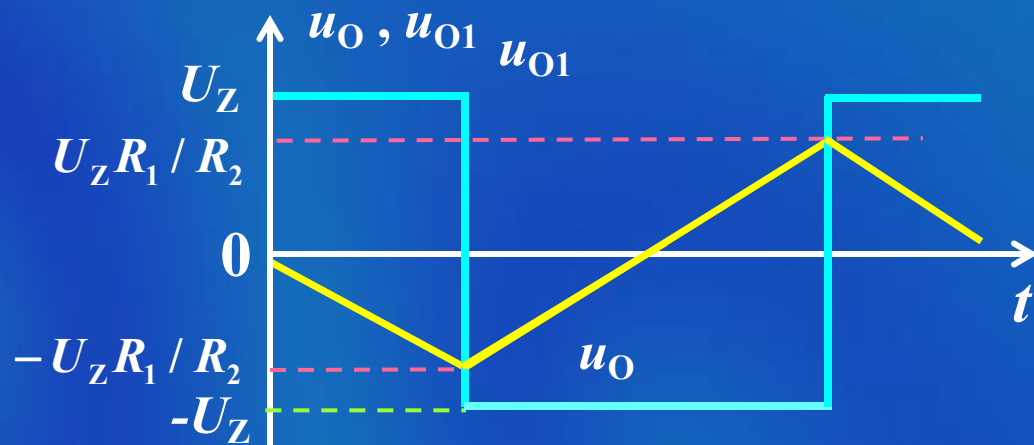
$$u_H = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$





$u_{O1}$  输出方波

$u_O$  输出三角波



## 2. 主要指标

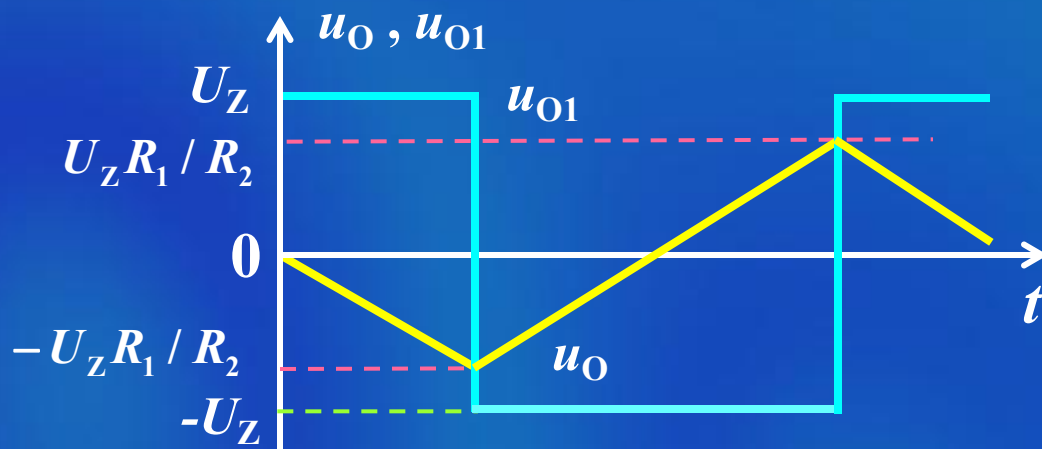
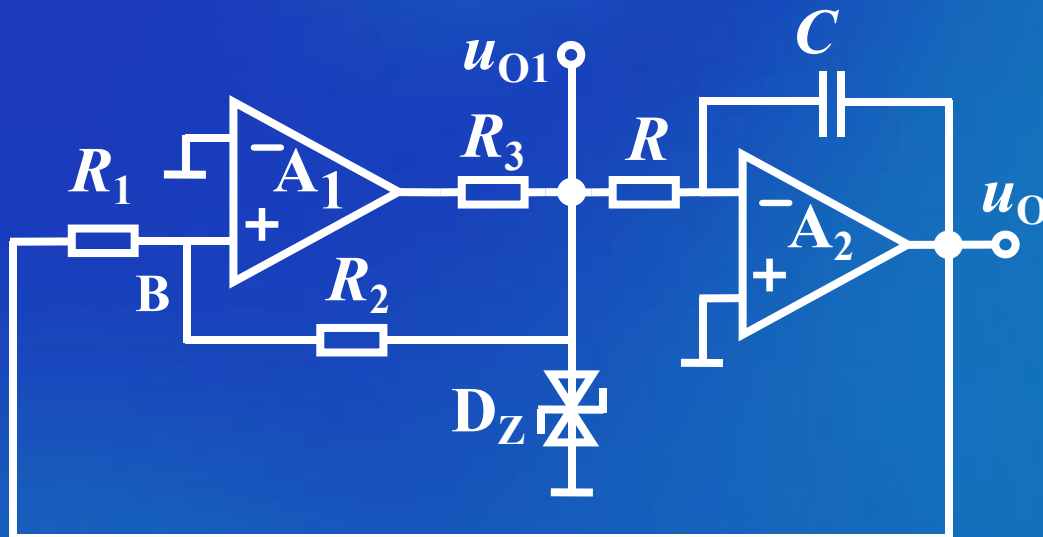
### (1) 输出电压幅值

#### (a) 方波幅值

$$U_{om} = U_Z$$

#### (b) 三角波幅值

$$U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$



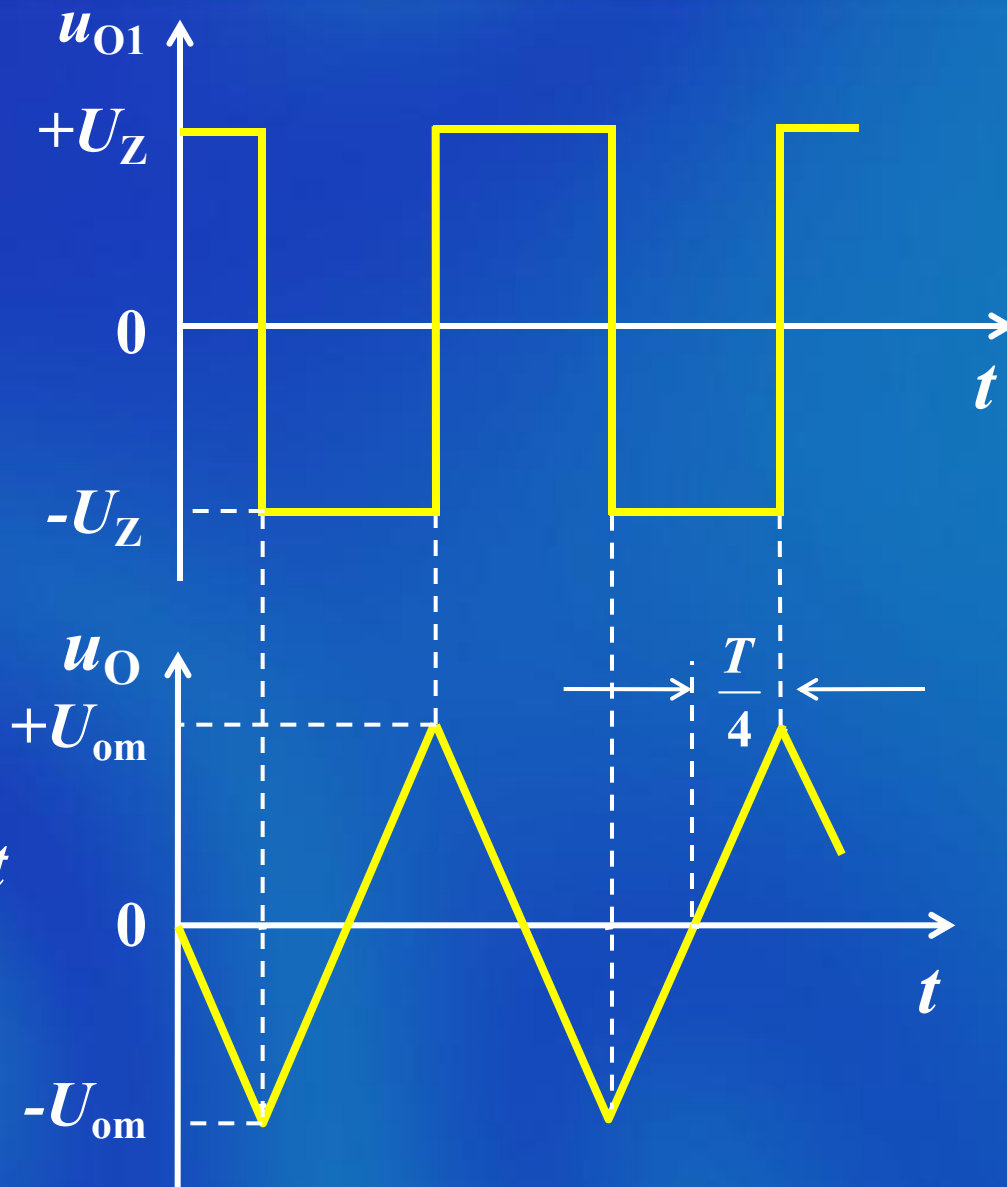
## (2) 振荡频率

由图可知

三角波从零上升到 $U_{Om}$ 的时间 $T/4$ 。

而

$$\begin{aligned} U_{om} &= -\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{4}} u_{O1} dt \\ &= -\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{4}} (-U_Z) dt \\ &= \frac{TU_Z}{4RC} \end{aligned}$$

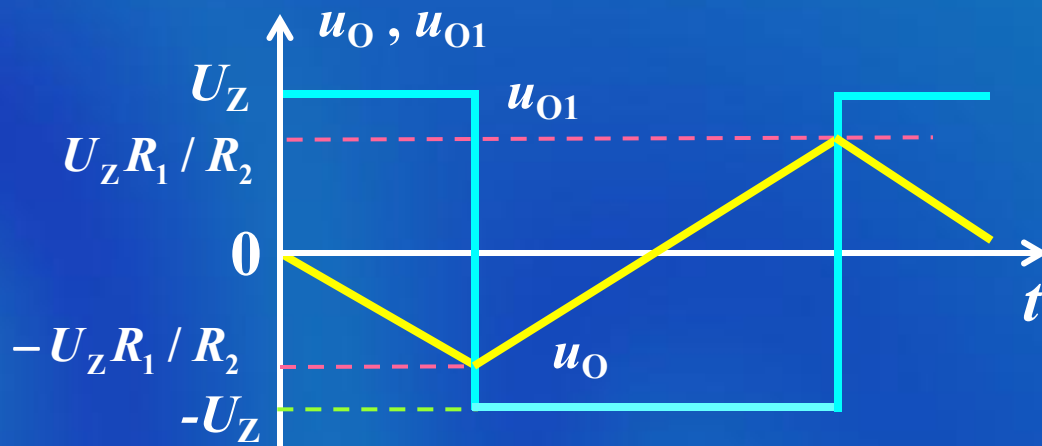
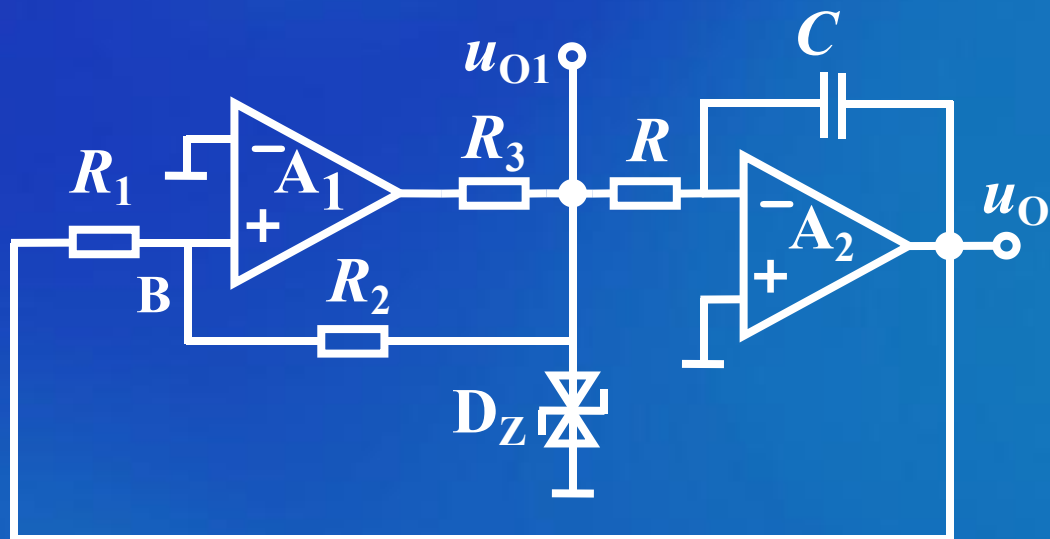


## 故电路的振荡周期

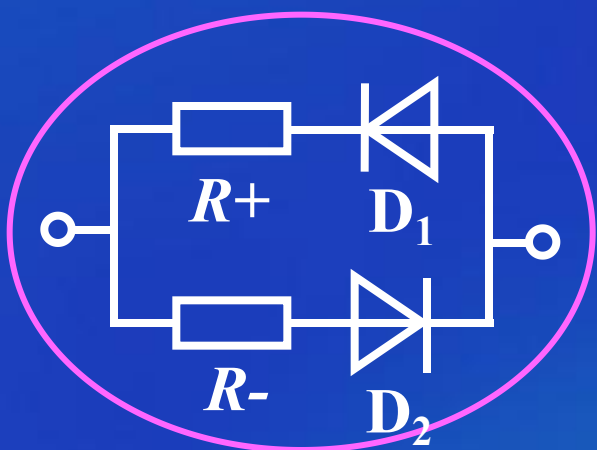
$$\begin{aligned}
 T &= 4RC \frac{U_{om}}{U_Z} \\
 &= \frac{4RCU_Z R_1}{U_Z R_2} \\
 &= \frac{4RCR_1}{R_2}
 \end{aligned}$$

## 振荡频率

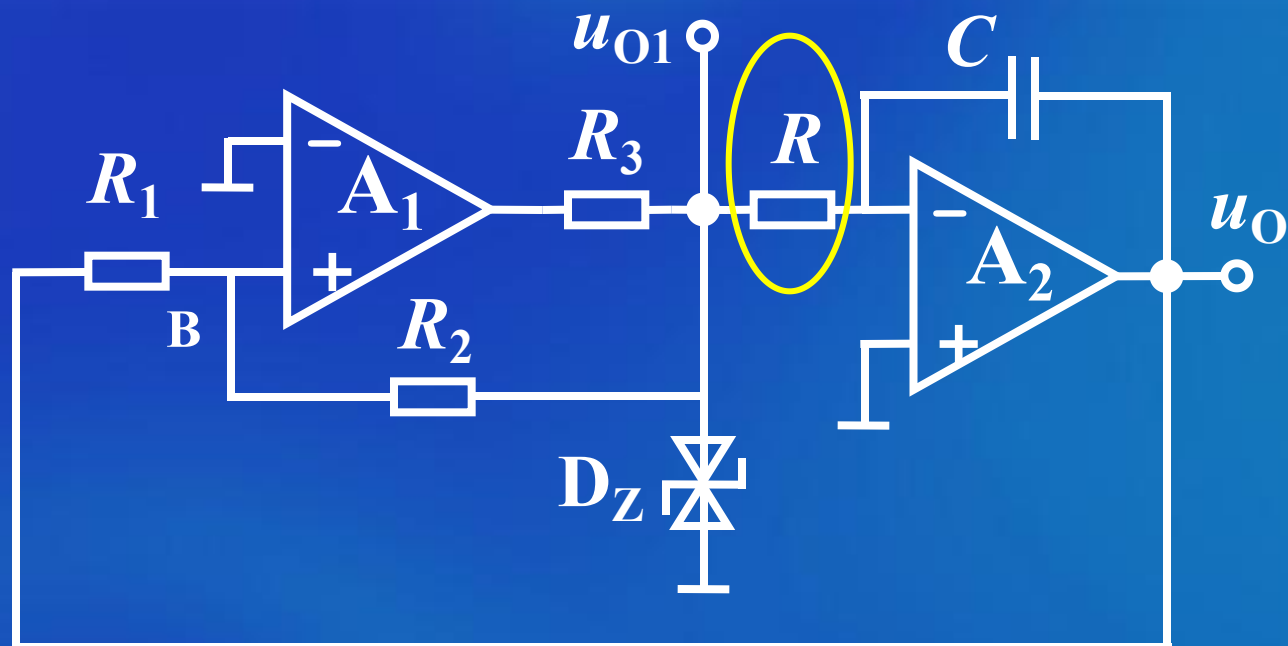
$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4R_1 RC}$$







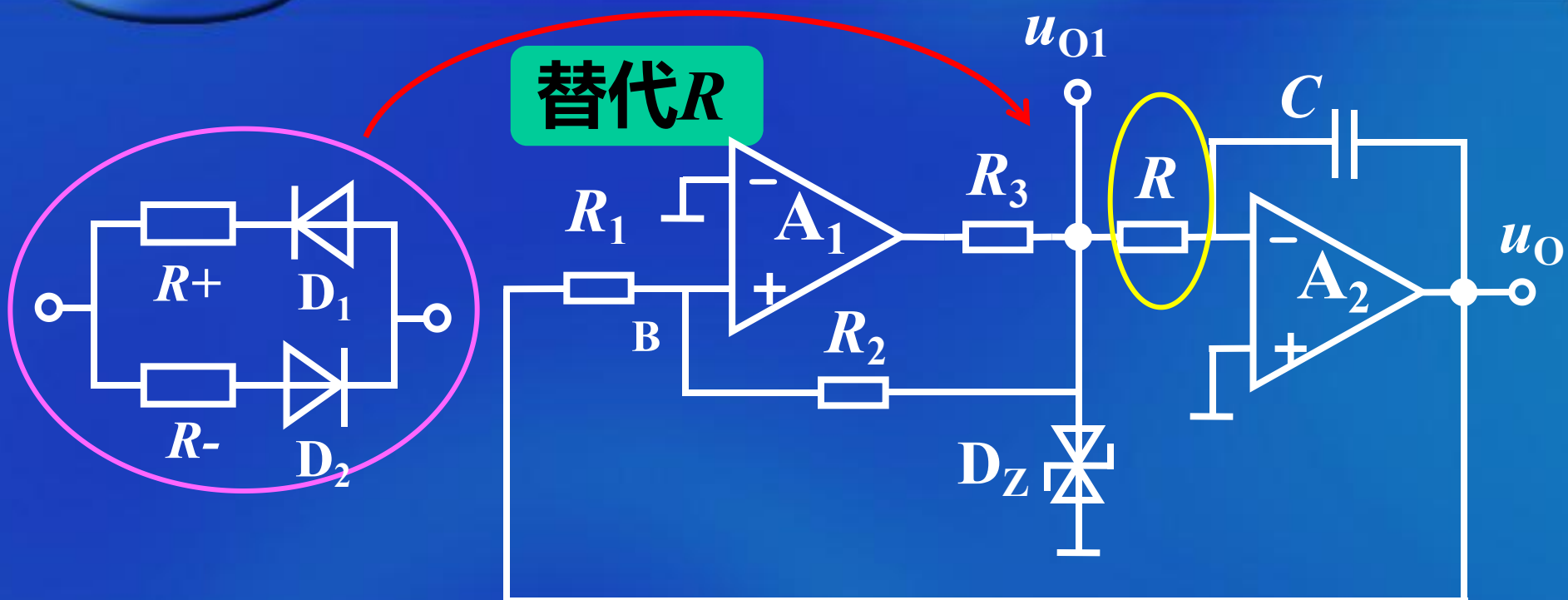
(a)



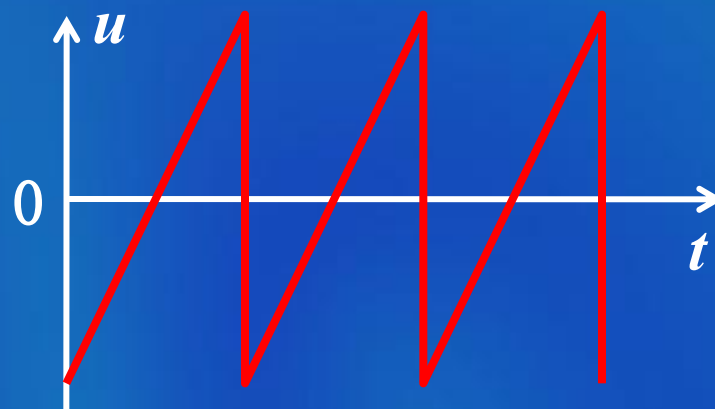
(b)

1. 如果用图(a)示电路替代图(b)示电路的电阻 $R$ ，那么输出电压 $u_o$ 的波形有何特点？

答：三角波两边斜率不同，即三角波变成为锯齿波。



2、在上图示电路中，如果电阻  $R_+ > R_-$ ，画出输出信号的波形。

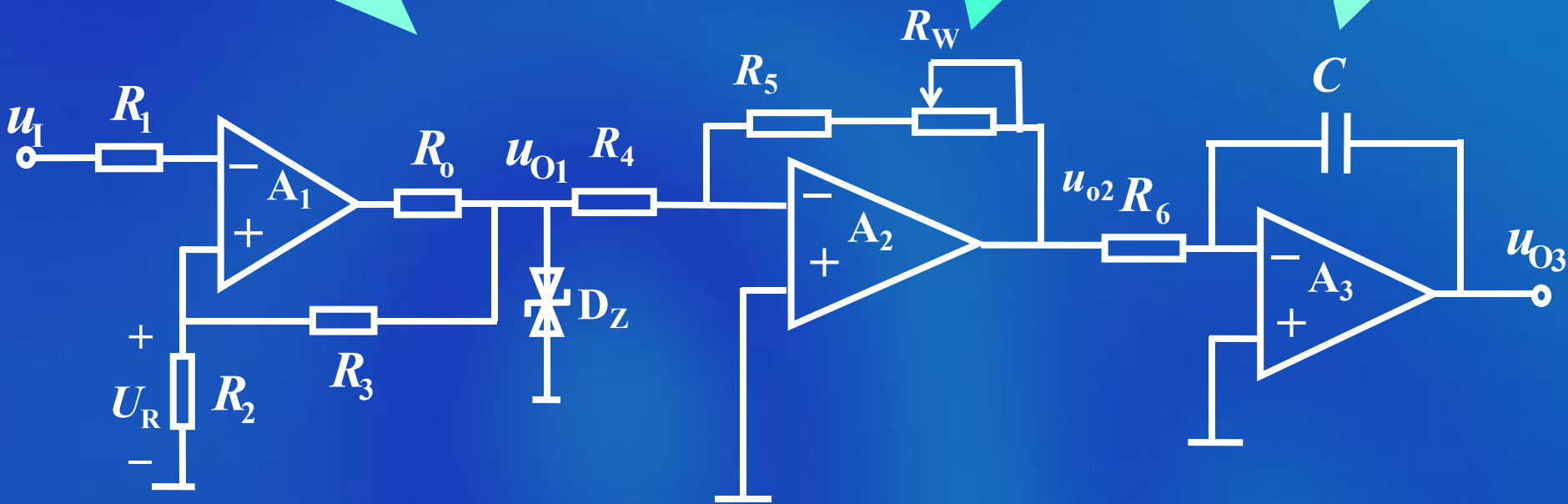


**例：** 分析下图电路的功能。

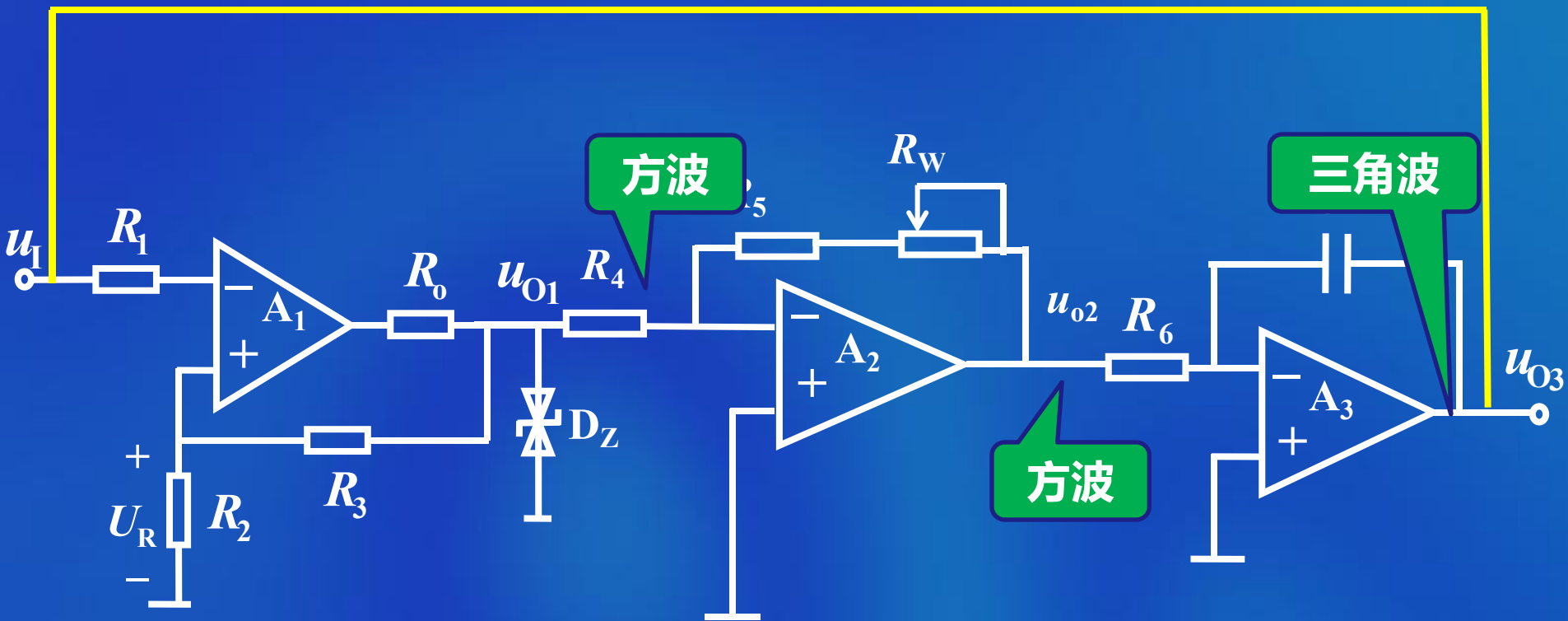
反相输入迟滞比较器

反相比例器

积分器



## 非正弦信号发生器



## 9.2.3 压控振荡器

压控振荡器 (voltage-controlled oscillator, **VCO**) 是一种以电压输入来用来控制振荡频率的电子振荡电路。

**主要功能：将电压变化转换为频率的变化。**



它是一种将电平变换为相应频率的脉冲变换电路，或者说是输出脉冲频率脉冲频率与输入信号电平成比例的电路。它被广泛地应用在自动控制，自动测量与检测等技术领域。

**压控振荡器**的控制电压可以有不同的输入方式:

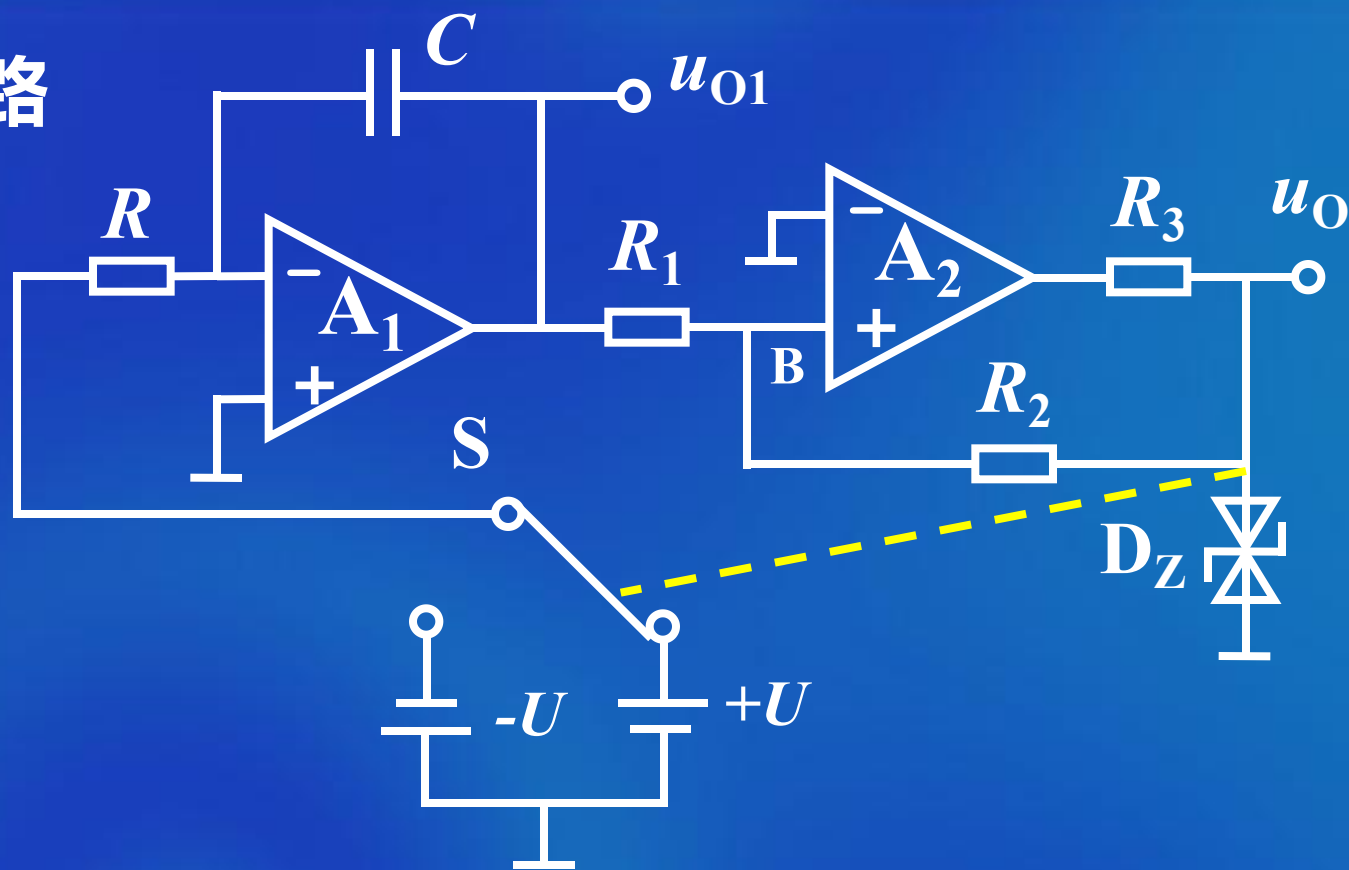
**直流电压**作为控制电压，电路可制成频率调节十分方便的信号源

**正弦电压**作为控制电压，电路就成为调频振荡器

**锯齿电压**作为控制电压，电路将成为扫频振荡器

# 压控振荡器电路

## 原理图

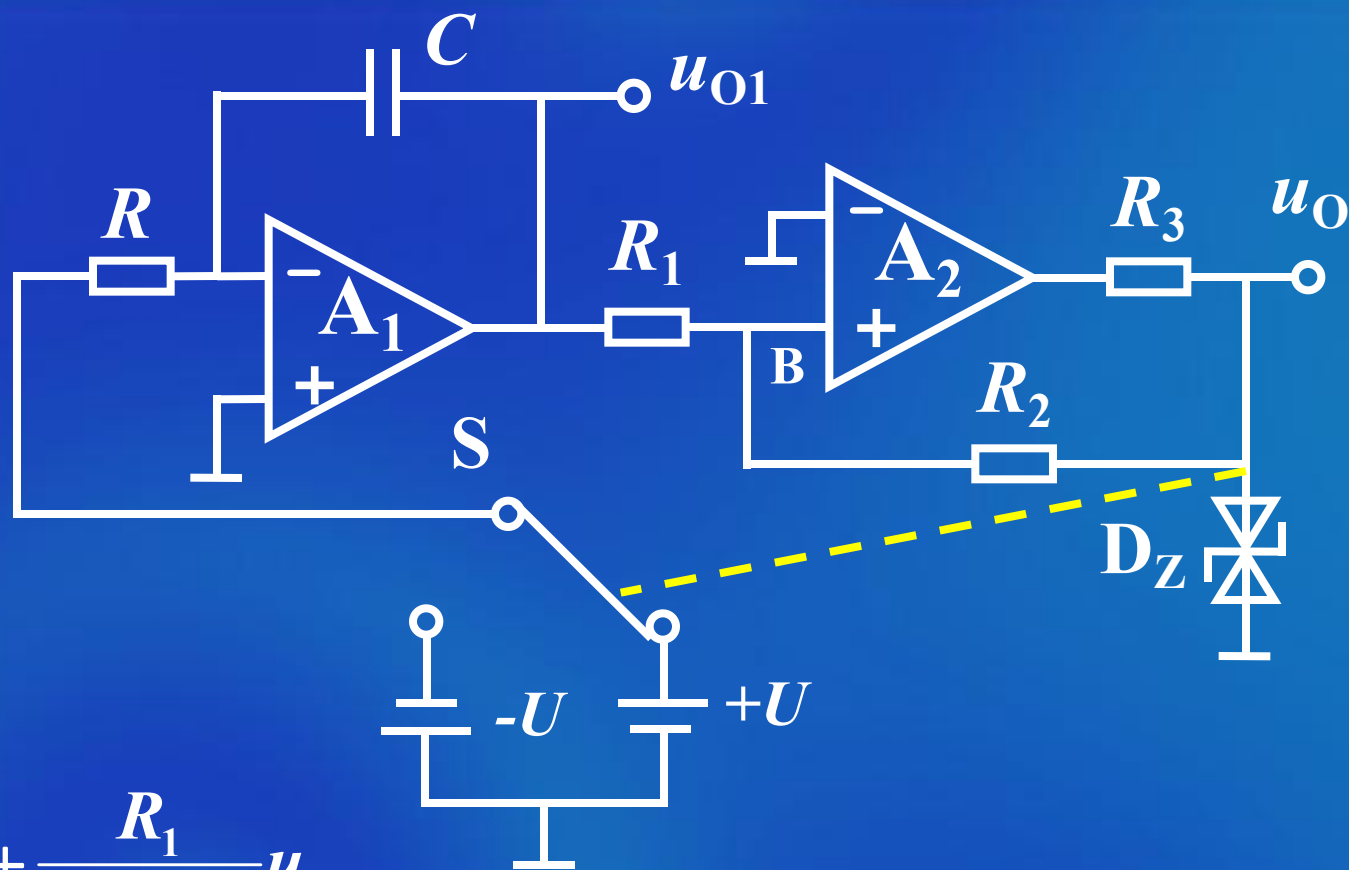


$u_O = +U_Z$  时，开关  $S$  接通  $+U$

$u_O = -U_Z$  时，开关  $S$  接通  $-U$

## (1) 工作原理

图中



$$u_O = \pm U_Z$$

$$u_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{O1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_O$$

$$= \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{O1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (\pm U_Z)$$

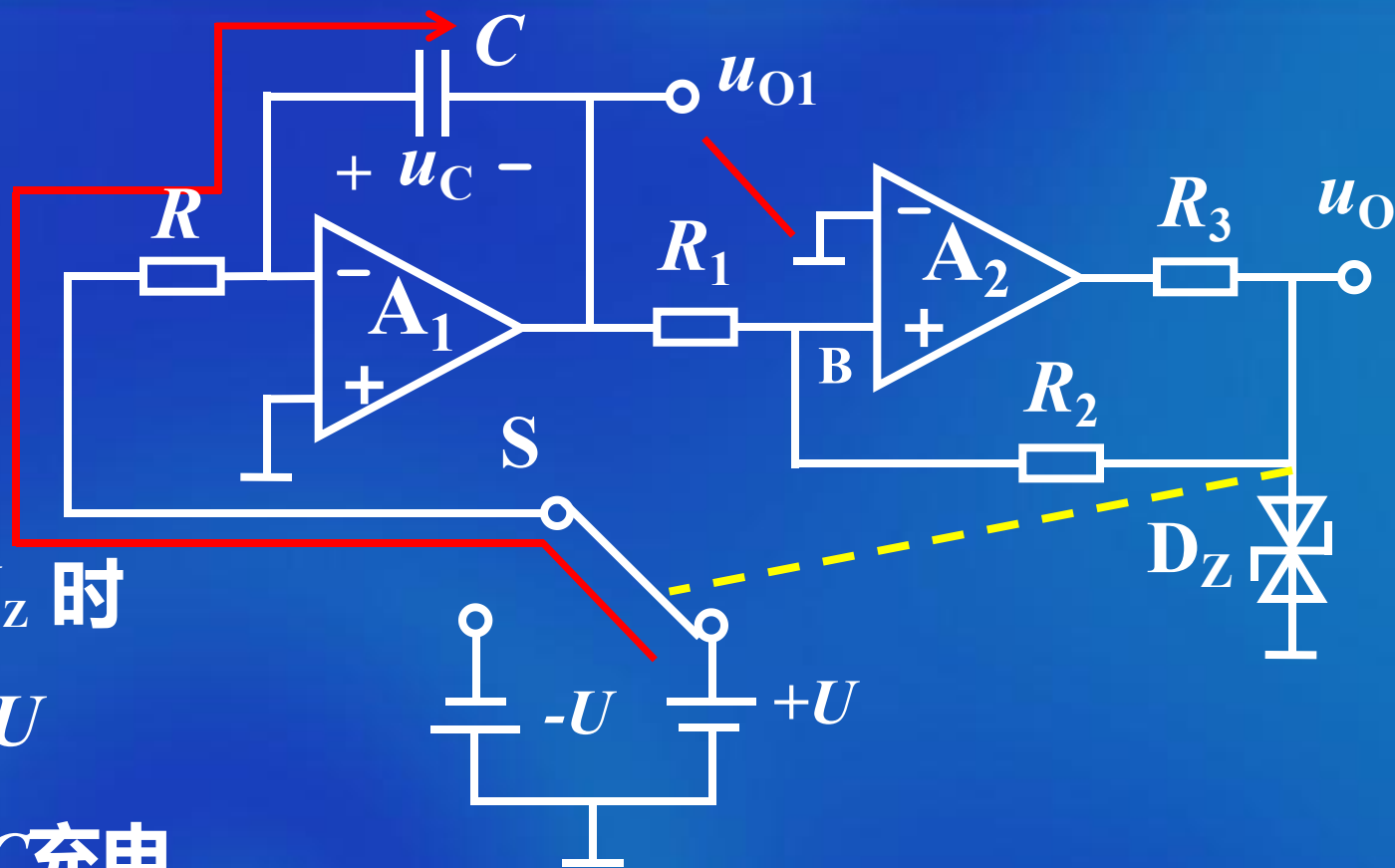


设  $u_C(0^-)=0$

(a) 当  $u_O = U_Z$  时

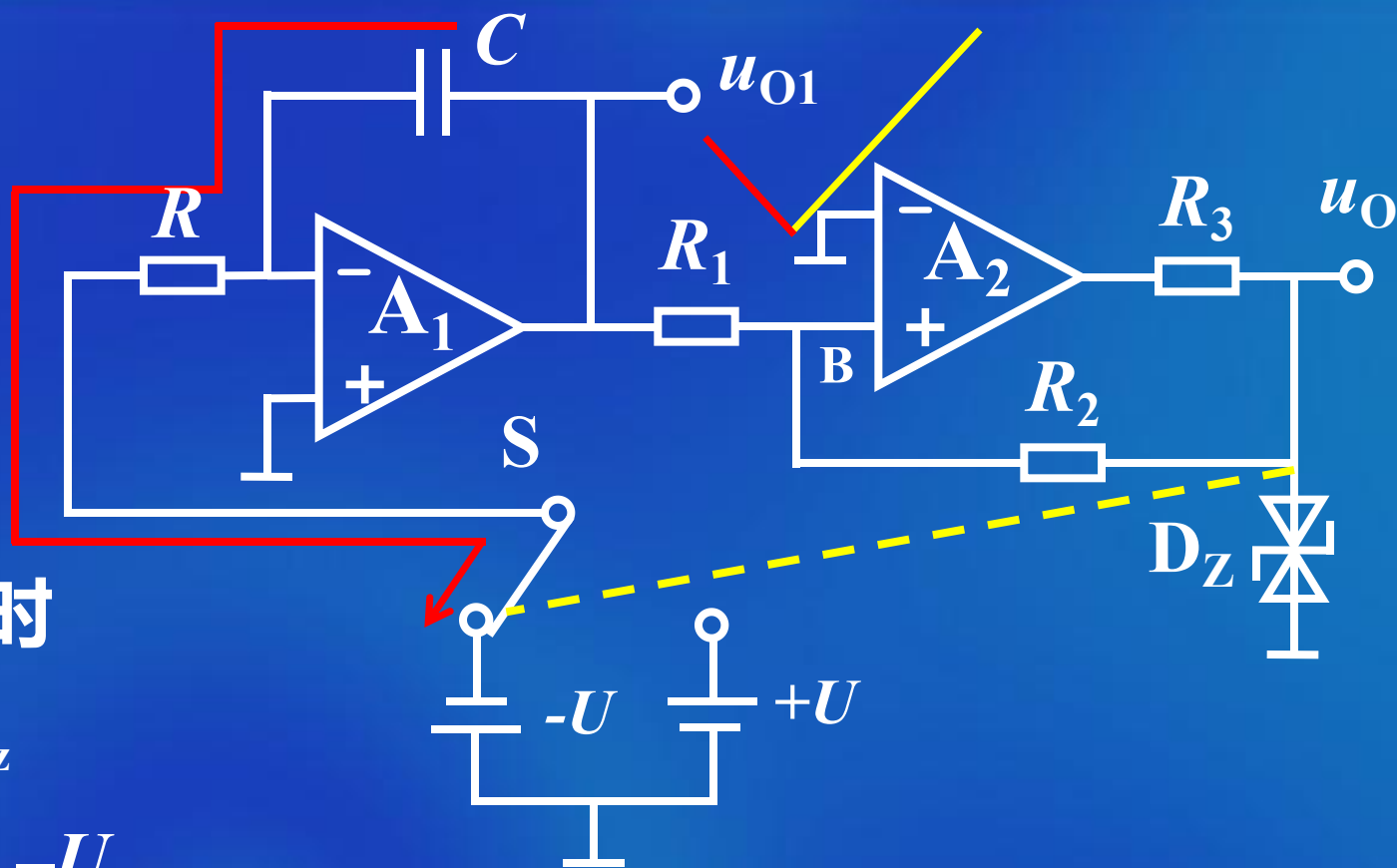
S 接电源  $+U$

$U$  通过  $R$  向  $C$  充电



$$u_{O1} = -\frac{1}{RC} \int_t^{t+\Delta t} U dt = -\frac{U}{RC} \Delta t$$

$u_{O1}$  随时间线性下降



(b) 当  $u_B \leq 0$  时

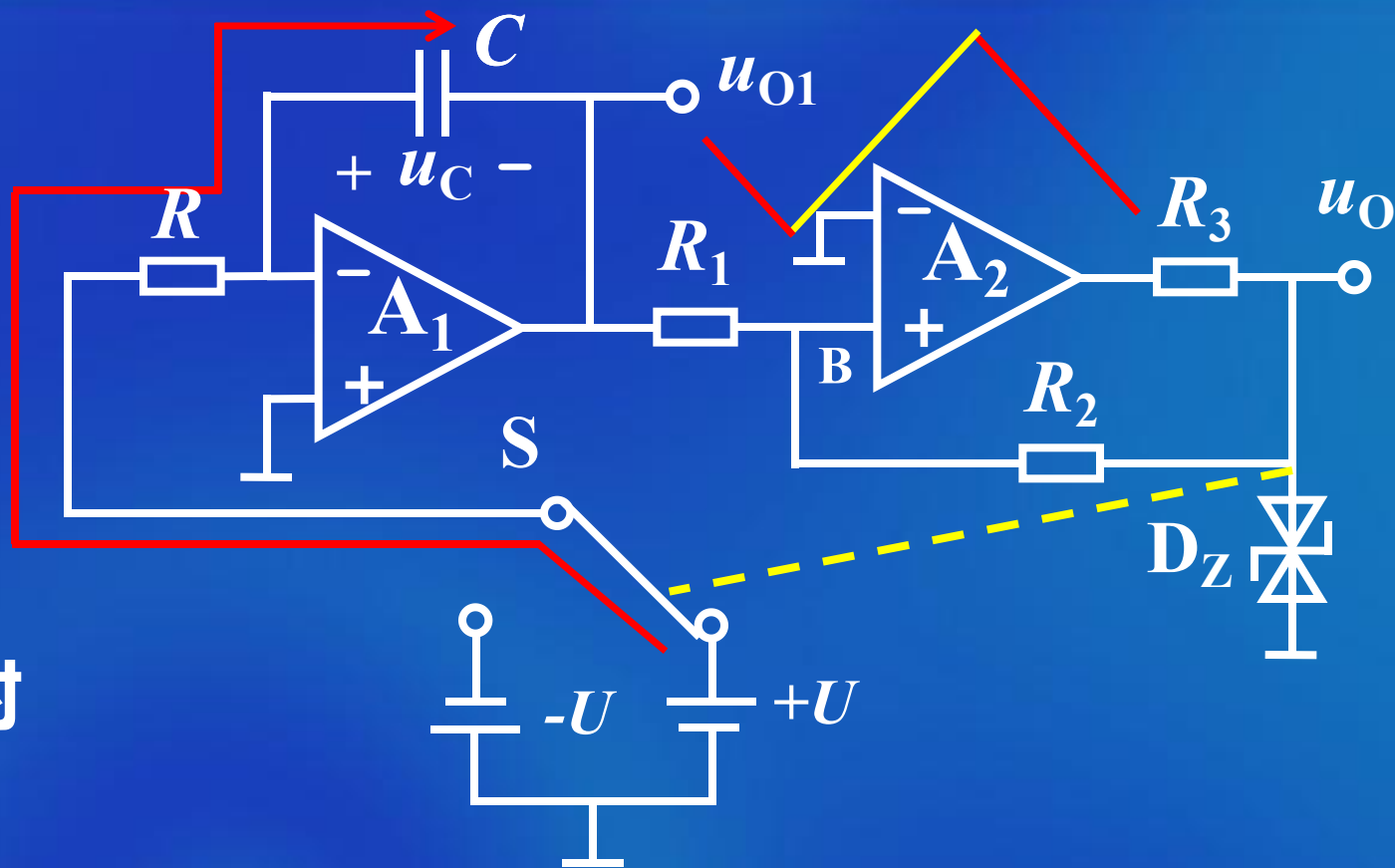
$$u_O = -U_Z$$

开关 S 接  $-U$

电容 反向充电

$$u_{O1} = -\frac{1}{RC} \int_t^{t+\Delta t} (-U) dt = \frac{U}{RC} \Delta t$$

$u_{O1}$  随时间线性上升



(c) 当  $u_B \geq 0$  时

$$u_o = U_z$$

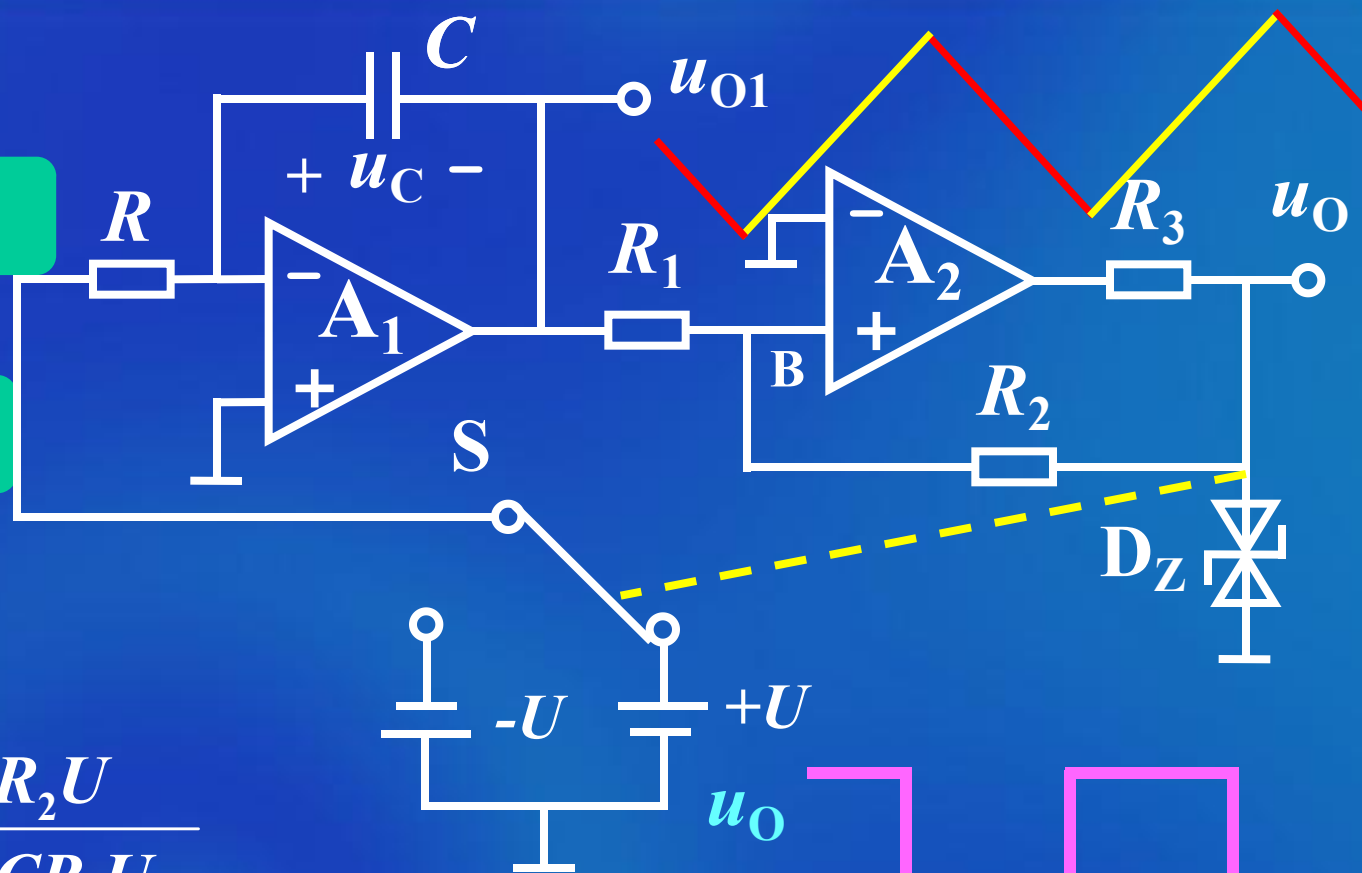
$S$  又接  $U$

电容 又正向充电

$u_{O1}$  又随时间线性下降

$u_{O1}$  输出三角波

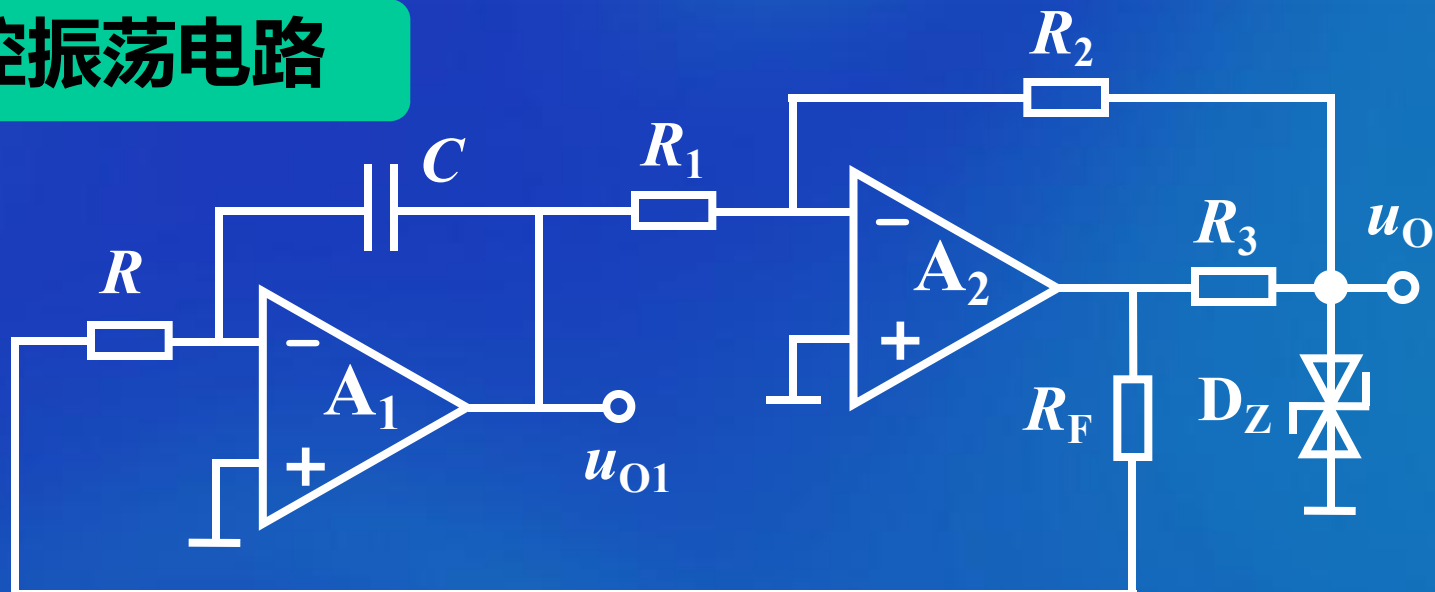
$u_O$  输出方波



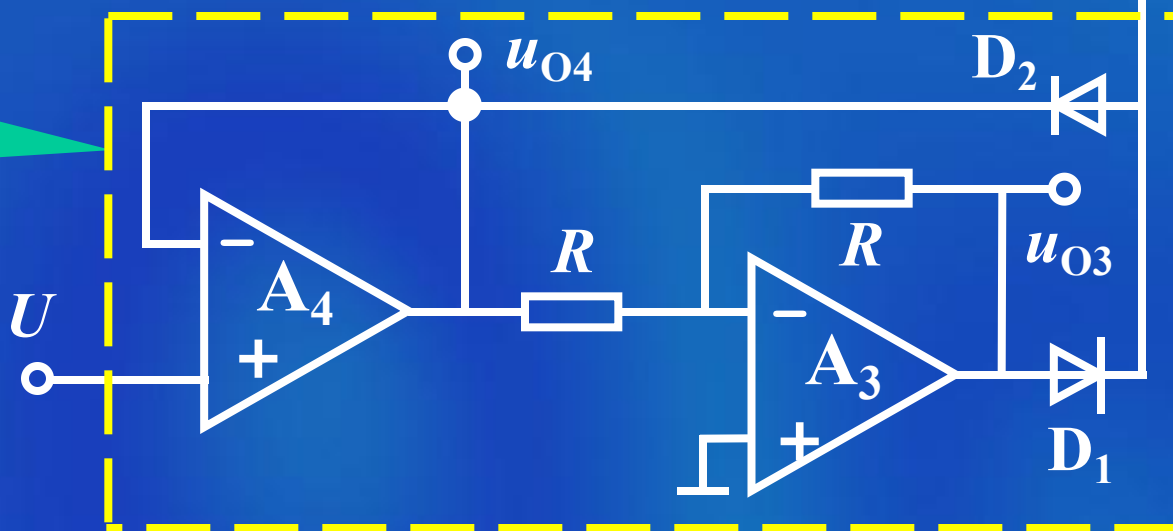
$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{R_2 U}{4RCR_1 U_Z}$$

$f_0 \propto U$  , 实现了电压控制振荡频率的目的

# 一种压控振荡电路



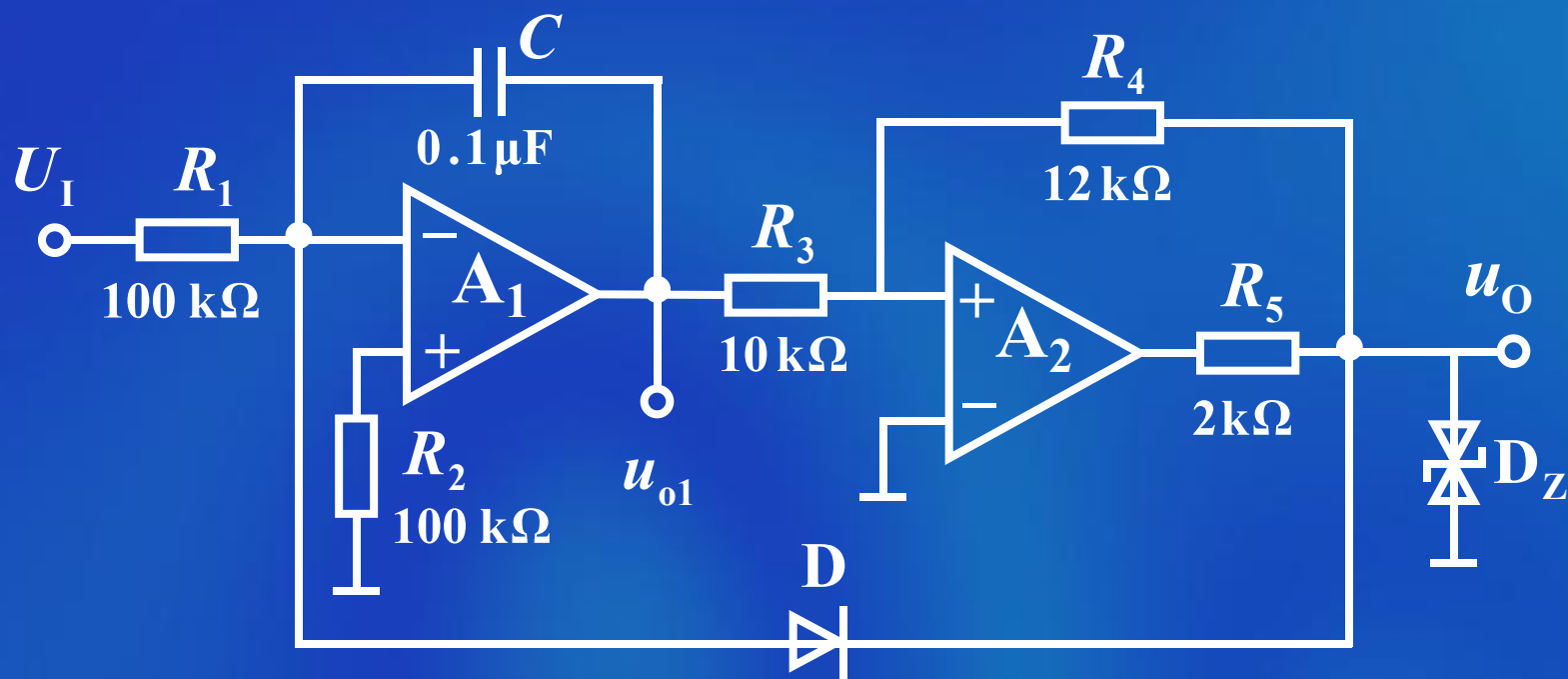
电子模拟开关

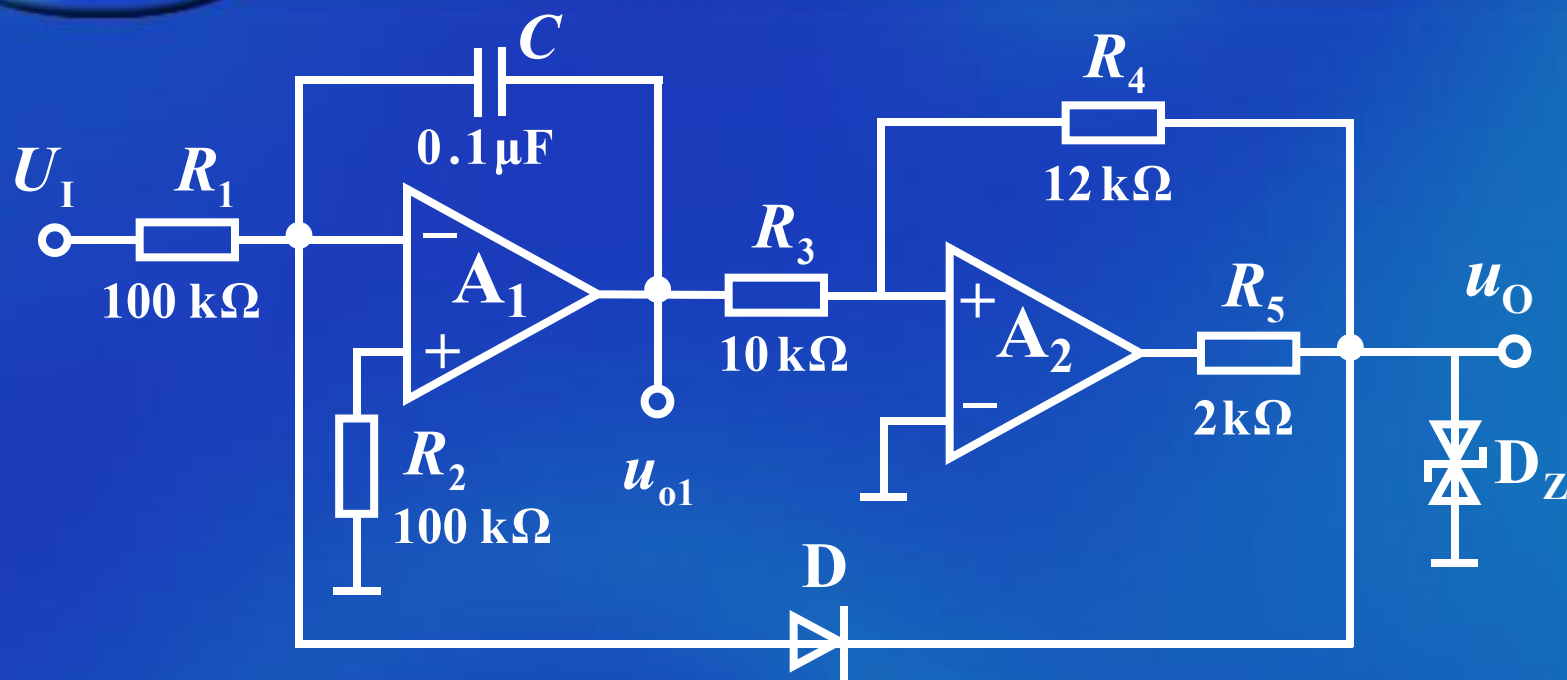


## 本章小结



三版P330 9.20 图示电路为一压控振荡器。设输入电压  $0 < U_I < 6V$ ，运放  $A_1$ 、 $A_2$  为理想器件；二极管  $D$  的正向压降为  $0.6V$ ，稳压管  $D_Z$  的稳定电压为  $\pm 6V$ ，它们的其它性能理想。

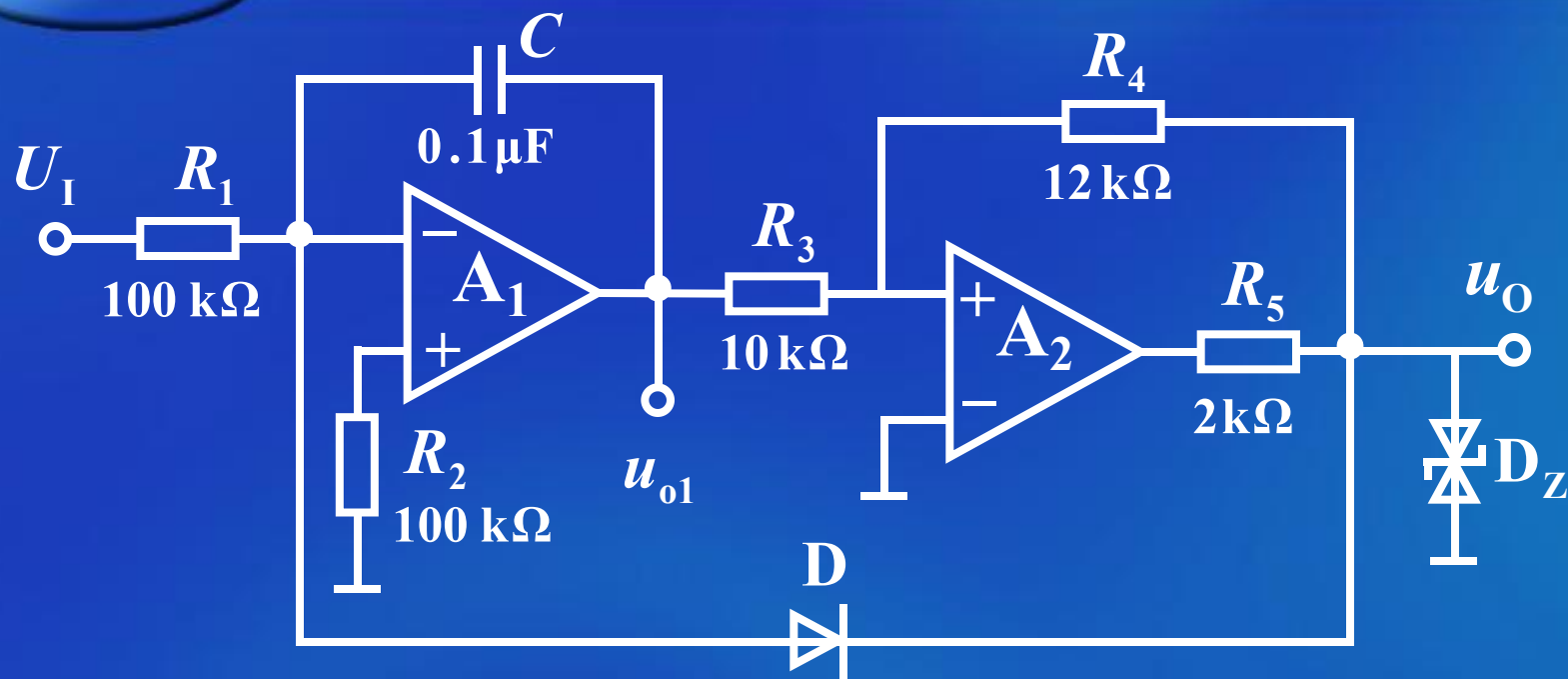




- (a) 运算放大器 $A_1$ 、 $A_2$ 各组成什么电路？  
 (b) 画出 $u_{o1}$  和 $u_o$  波形；  
 (c) 写出振荡频率 $f_0$  与输入电压 $u_i$ 的函数关系式。

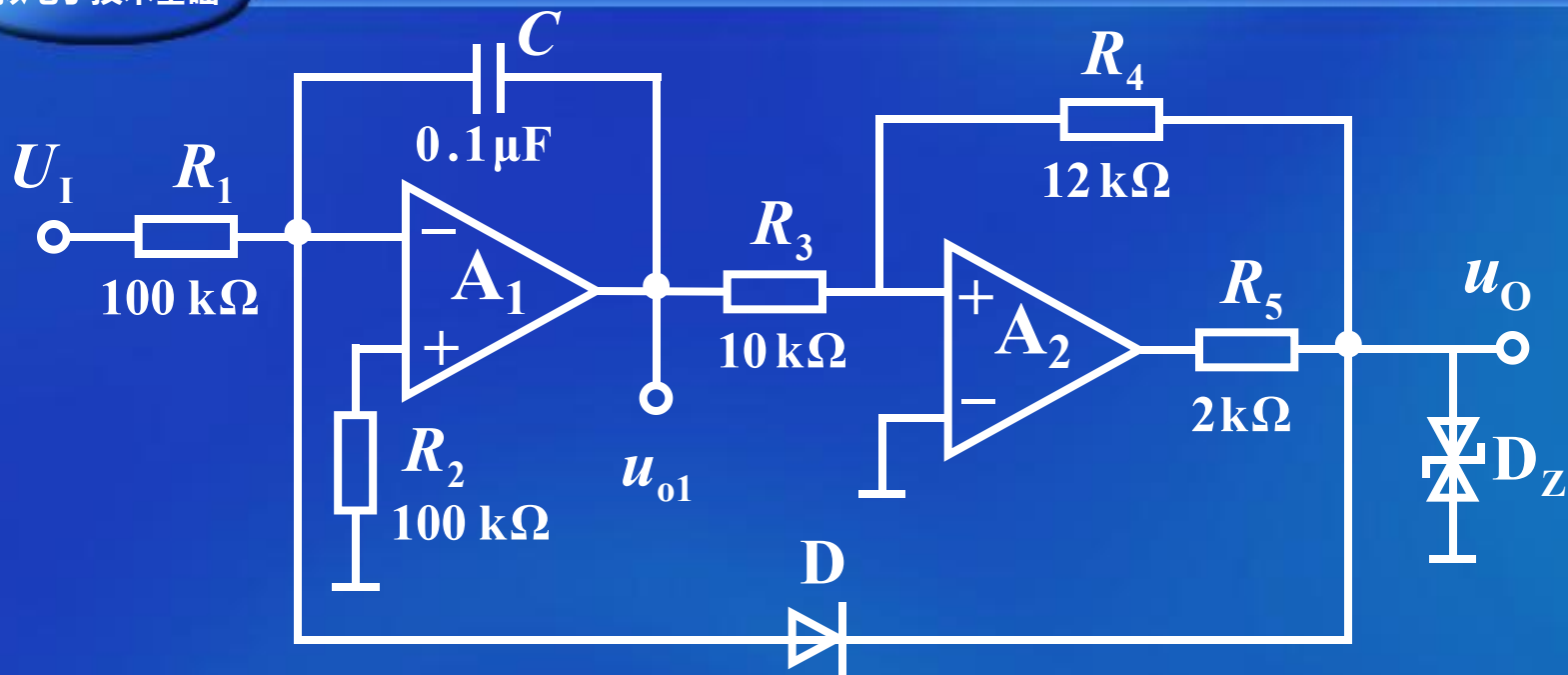
解 (a)  $A_1$  构成反相输入积分电路， $A_2$  构成同相输入电压比较器。





(b) 当  $u_o = 6V$  时，二极管  $D$  截止，电容  $C$  充电， $u_{o1}$  随时间负向线性增大。

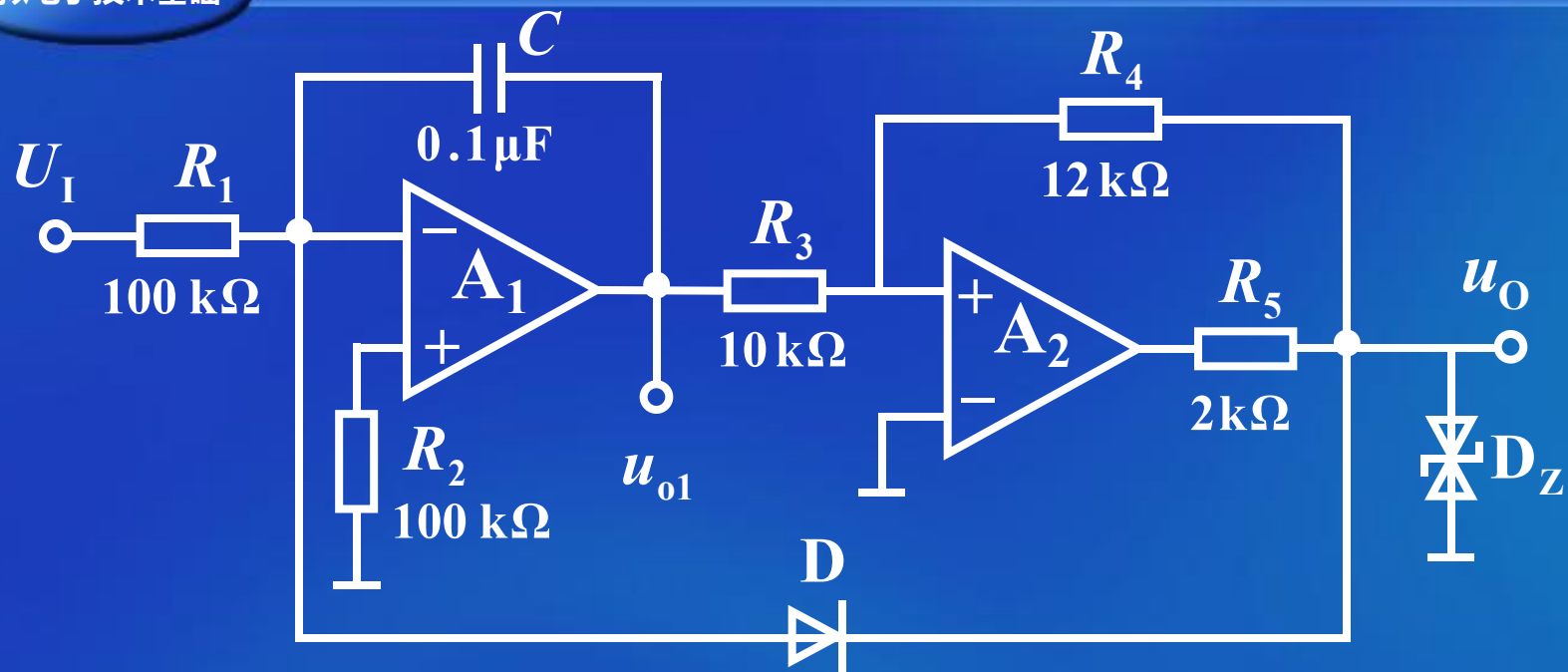
当运放  $A_2$  的同相端电位  $u_{2+}$  过零时，比较器翻转， $u_{o2} = -6V$ 。



此时，D导通， $u_{O2} = -0.6V$ 。C迅速放电， $u_{O1}$ 快速正向增大。

当 $u_{2+}$ 再次过零时，比较器再次翻转， $u_{O2} = 6V$ ，二极管再次截止。

如此周而复始，形成周期性振荡。



由图可知，运放 $A_2$ 同相端电位

$$u_{2+} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_{O1} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_O$$

令 $u_{2+}=0$ 得

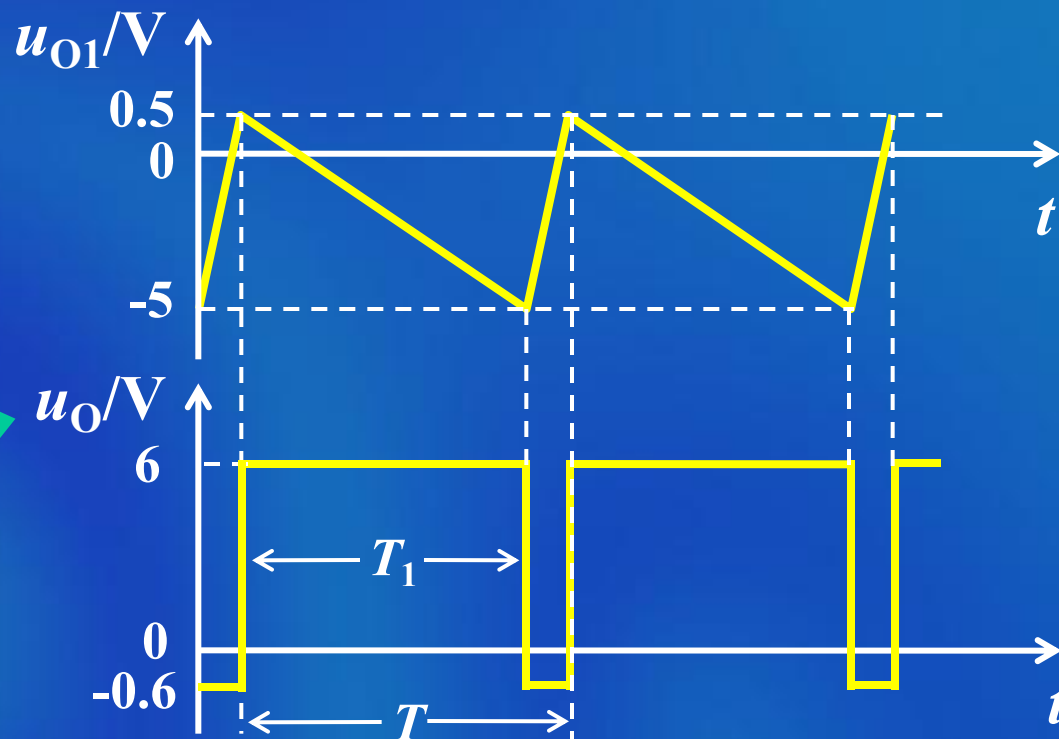
$$u_{O1} = -\frac{R_3}{R_4} u_O$$

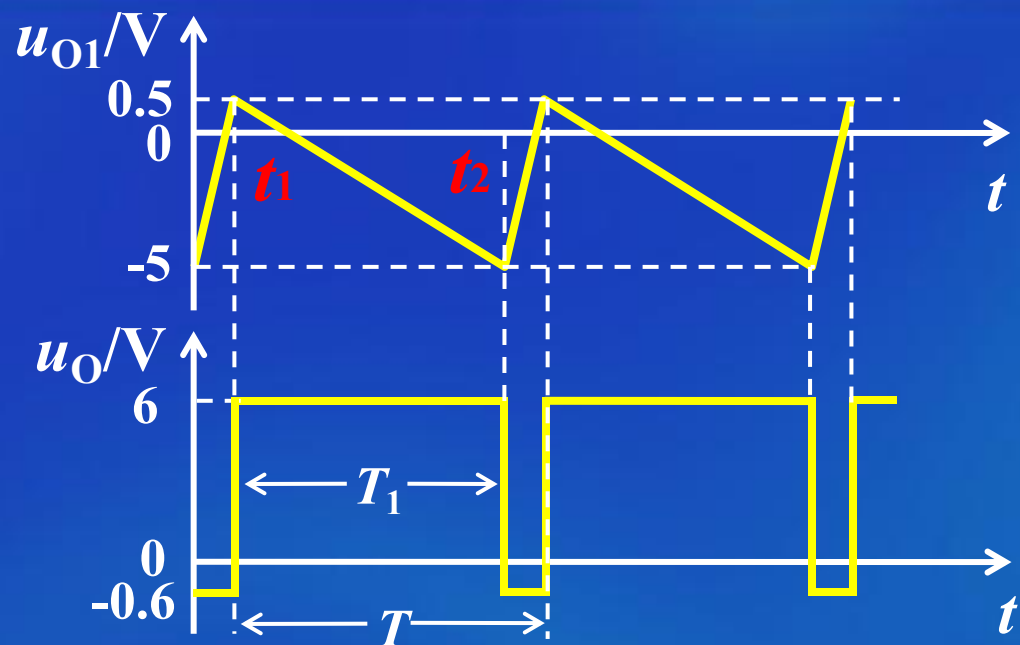
由式  $u_{O1} = -\frac{R_3}{R_4} u_O$  知

当  $u_O = 6V$  时,  $u_{O1} = -5V$ , 比较器状态翻转。

当  $u_O = -0.6V$  时,  $u_{O1} = 0.5V$ , 比较器状态翻转。

$u_{O1}$  和  $u_{O2}$  的波形





(c) 由于二极管的导通电阻很小，电容放电时间极短，所以， $T \approx T_1$ 。 则

$$\begin{aligned}
 u_{O1}(t_2) &= -\frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} U_I dt + u_{O1}(t_1) \\
 &= -\frac{U_I}{R_1 C} (t_2 - t_1) + 0.5 \approx -\frac{U_I}{R_1 C} T_1
 \end{aligned}$$

当  $u_{O1} = -\frac{R_3}{R_4}U_Z$  时,

电容充电结束, 此时

$$-\frac{T_1}{R_1 C}U_I = -\frac{R_3}{R_4}U_Z$$

$$T_1 = \frac{R_1 R_3 C U_Z}{R_4 U_I}$$

故  $f_0 \approx \frac{R_4 U_I}{R_1 R_3 C U_Z} = 20 U_I$

