

# 电路分析与电子技术基础

## 非正弦波发生电路

(4.5 ~ 4.6)

## n 非正弦波发生电路

ü 电子系统中，非正弦波被广泛使用。

ü 在之前的模拟电路中，已对正弦波发生电路作了介绍。

ü 这里，以方波、三角波为例，介绍非正弦信号发生电路。

ü 模拟电路产生非正弦波形时，电压比较器是其中的主要单元。

## Ø 非正弦波发生电路

✓ 模拟电压比较器（4.5.1 ~ 2）

✓ 方波与三角波发生器（4.5.3）

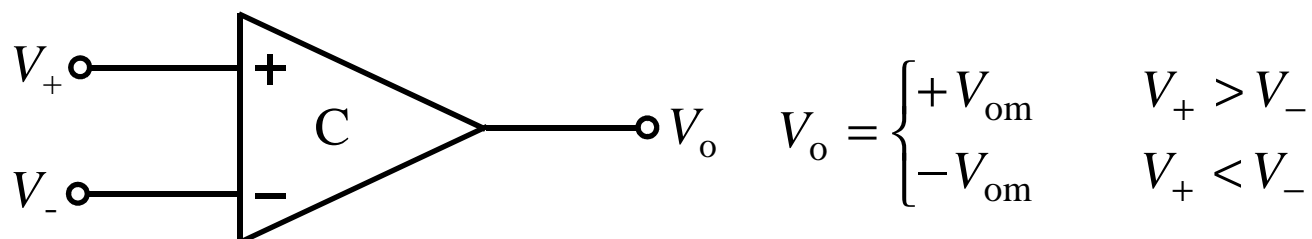
✓ 压控振荡器（4.6）

## ✓ 模拟电压比较器

ü 模拟电路产生非正弦波形时，电压比较器是其中的主要单元。

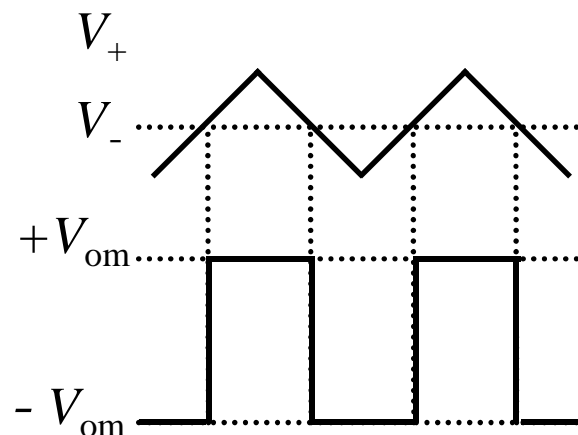
ü 模拟电压比较器：

根据对两个输入的模拟信号大小比较，使电路输出在两个极限电平  $+V_{om}$  和  $-V_{om}$  之间转换。



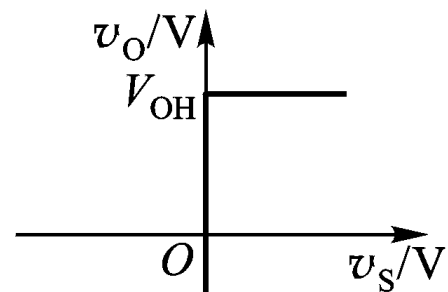
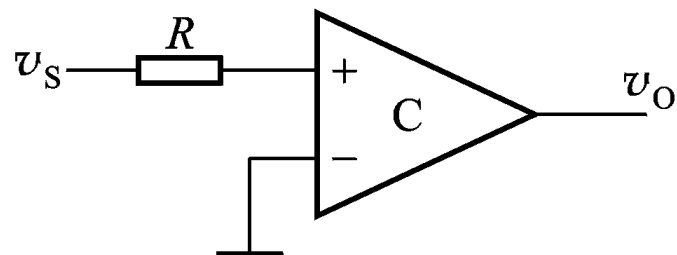
ü 模拟电压比较器 ~ 运算放大器  
(虚短、虚断?)

ü 简单应用

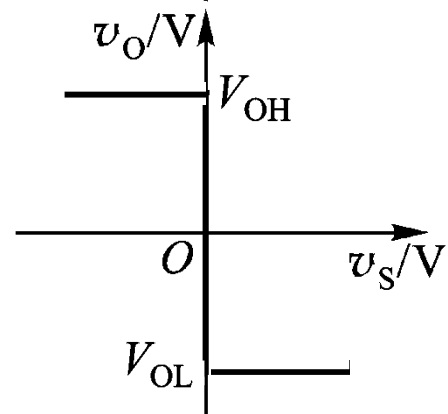
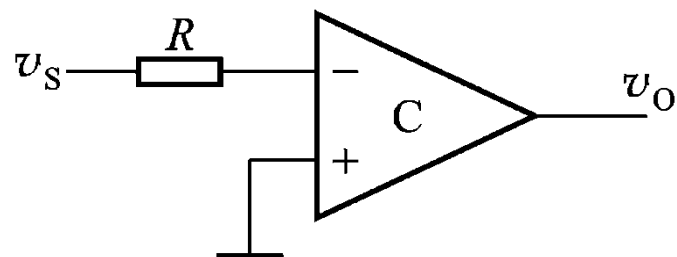


## Ø 模拟电压比较器（过零比较器）

Ü 同相过零比较器:

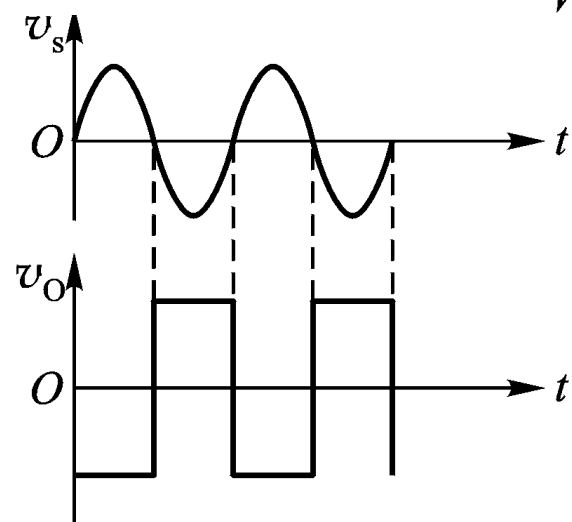


Ü 反相过零比较器:



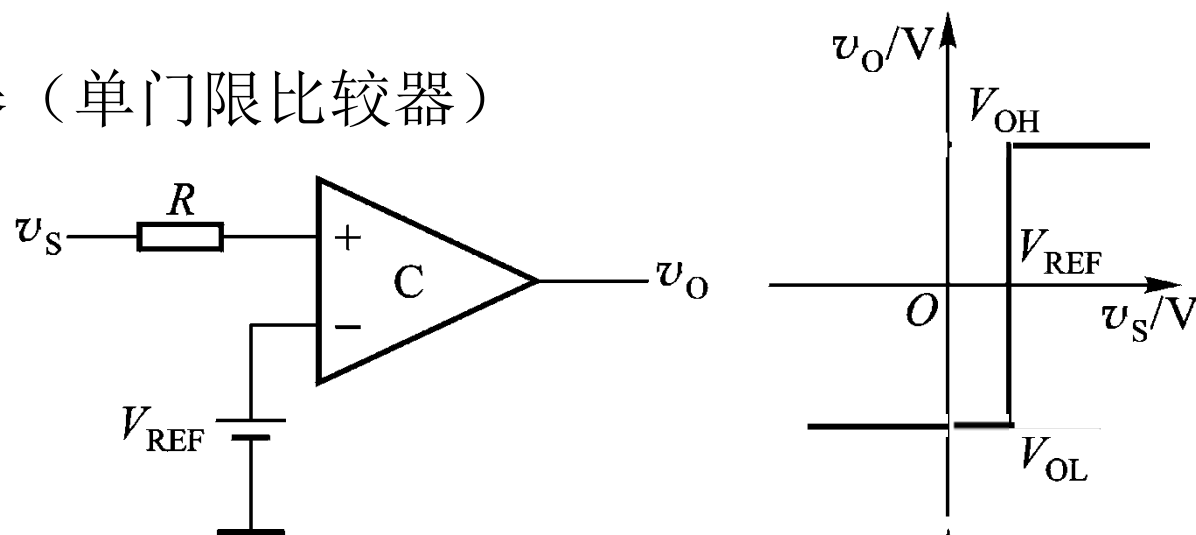
Ü 应用

（将正弦波变换成同频率方波）

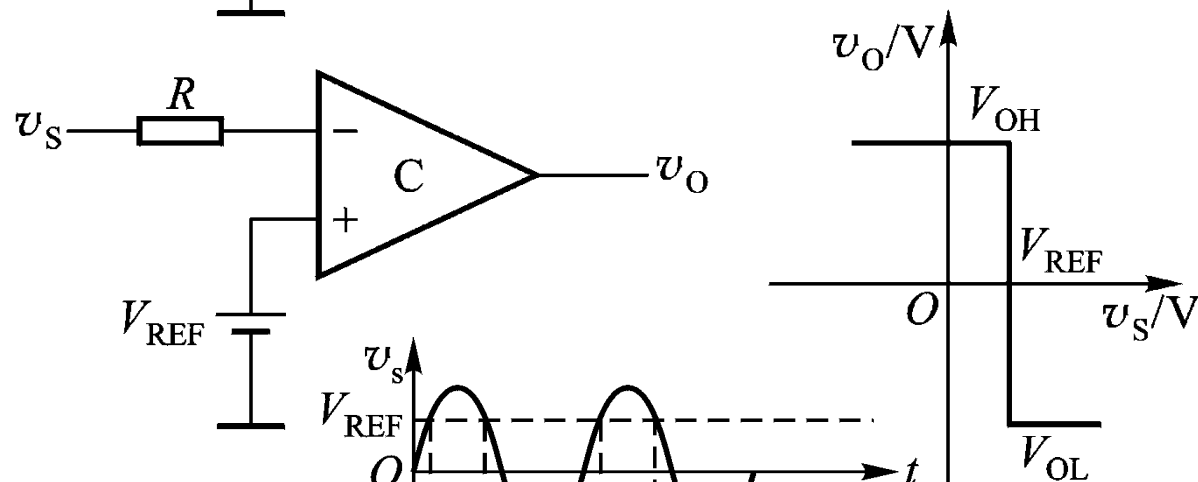


## Ø 模拟电压比较器（单门限比较器）

Ü 同相单门限比较器：

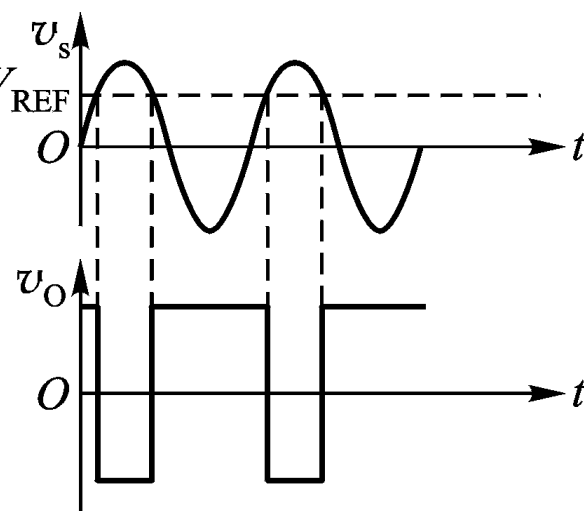


Ü 反相单门限比较器：



Ü 应用

（将正弦波变换成同频率矩形波）



## Ø 模拟电压比较器（单限比较器）

ü 单限比较器：包括过零比较器、单门限比较器。

ü 优点：利用运放开环增益无穷大特点，简单，灵敏度高；

缺点：抗干扰能力较差；

用途：整形、波形变换等。

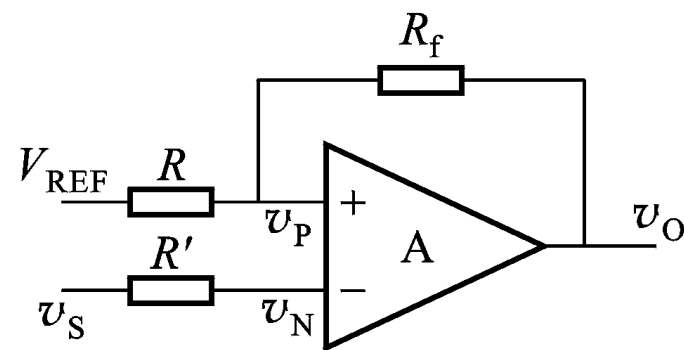
ü 迟滞型比较器：有效提高比较器的抗干扰能力。

（双限比较器）

## Ø 模拟电压比较器（滞回比较器）

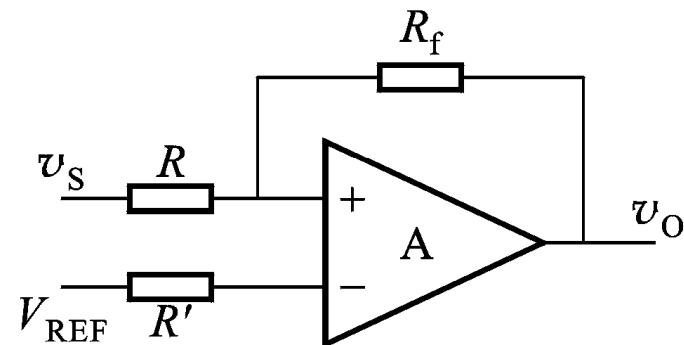
### Ü 反相滞回比较器：

被比较电压接反相端，参考电压接同相端；  
输出与输入构成正反馈。



### Ü 同相滞回比较器：

被比较电压接同相端，参考电压接反相端；  
输出与输入构成正反馈。

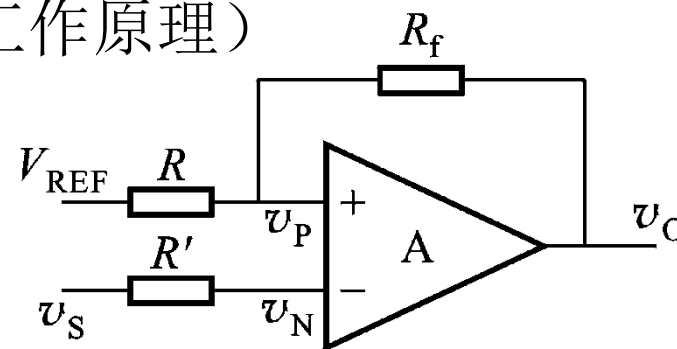


Ü 由于运放的开环增益无穷大，所以比较器实际上是对  $v_P$  和  $v_N$  两点的电平大小进行比较。



## Ø 模拟电压比较器（反相滞回比较器工作原理）

ü 由于运放的开环增益无穷大，  
所以比较器实际上是对  
 $v_P$  和  $v_N$  两点的电平大小进行比较。



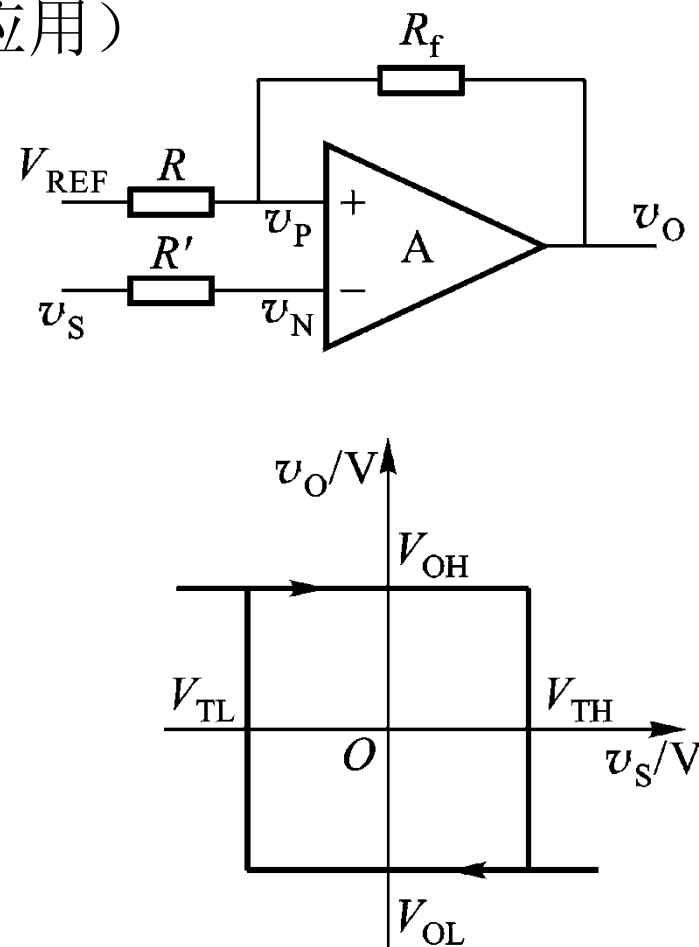
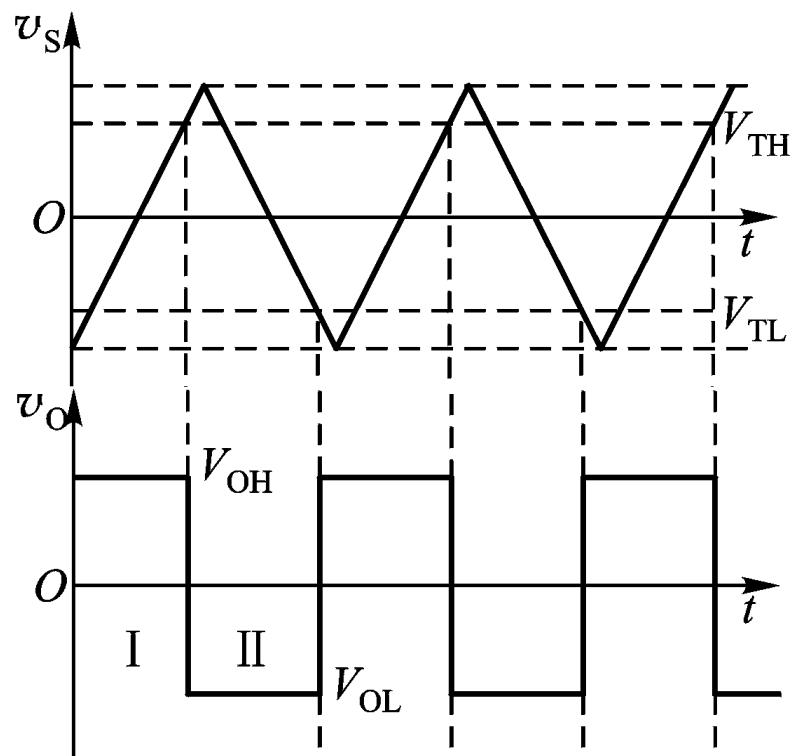
$$v_P = \frac{R}{R + R_f} v_O + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF} \quad , \quad v_N = v_S$$

当  $v_O = V_{OH}$  时  $\Rightarrow v_P = V_{TH}$  （上触发电平）

当  $v_O = V_{OL}$  时  $\Rightarrow v_P = V_{TL}$  （下触发电平）

ü  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$  是比较器输出电平翻转的两个阈值电平；  
若被比较电压  $v_S < V_{TL}$ ，比较器输出高电平  $V_{OH}$ ；  
若被比较电压  $v_S > V_{TH}$ ，比较器输出低电平  $V_{OL}$ 。

## Ø 模拟电压比较器（反相滞回比较器应用）

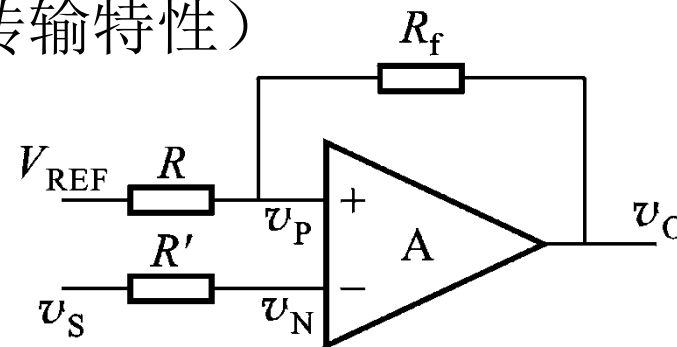


### ü 电压传输特性曲线

- ü  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$  是比较器输出电平翻转的两个阈值电平；  
若被比较电压  $v_S < V_{TL}$ ，比较器输出高电平  $V_{OH}$ ；  
若被比较电压  $v_S > V_{TH}$ ，比较器输出低电平  $V_{OL}$ 。

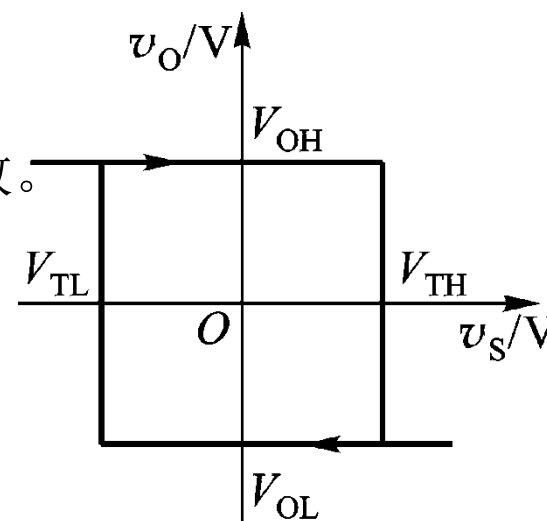
## Ø 模拟电压比较器（反相滞回比较器传输特性）

ü 曲线形如磁性材料的磁滞回线。  
（滞迟比较器）



ü 回差特性：

电路由低电平翻转到高电平所需的触发电平  $V_{TH}$ ，  
和由高电平翻转到低电平所需的触发电平  $V_{TL}$  不一致。



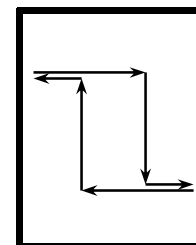
ü 回差（电压）：两个触发电平之差。

$$\Delta V = V_{TH} - V_{TL}$$

滞回比较器的固有特性，其大小可调；

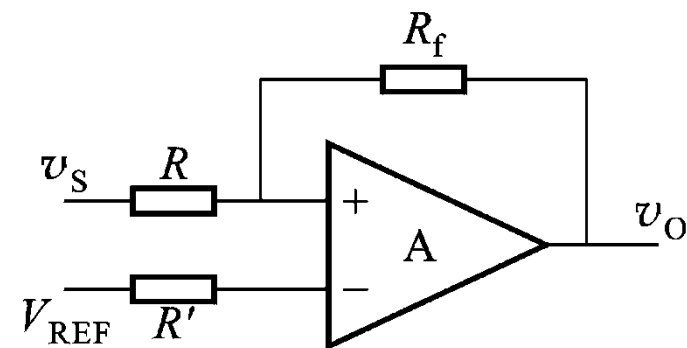
回差越大，电路越不易误触发，即抗干扰能力越强。

ü 符号

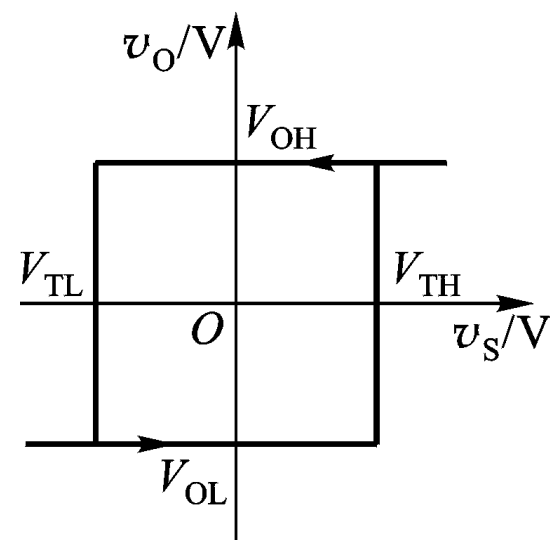


## Ø 模拟电压比较器（同相滞回比较器）

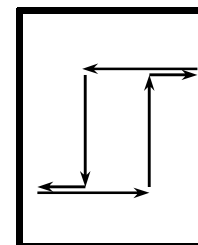
Ü 同相滞回比较器。



Ü 电压传输特性曲线



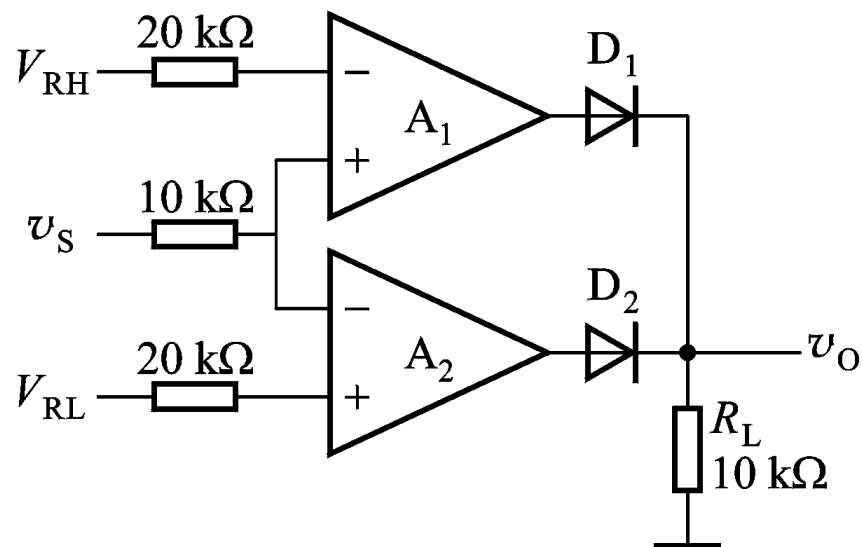
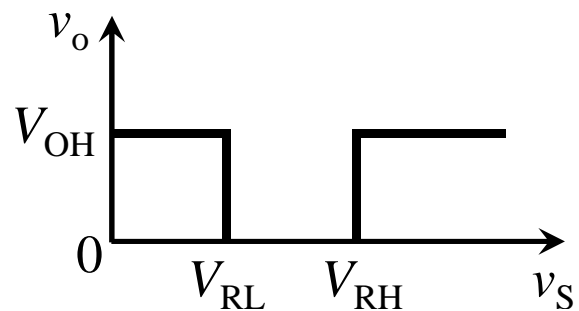
Ü 回差特性



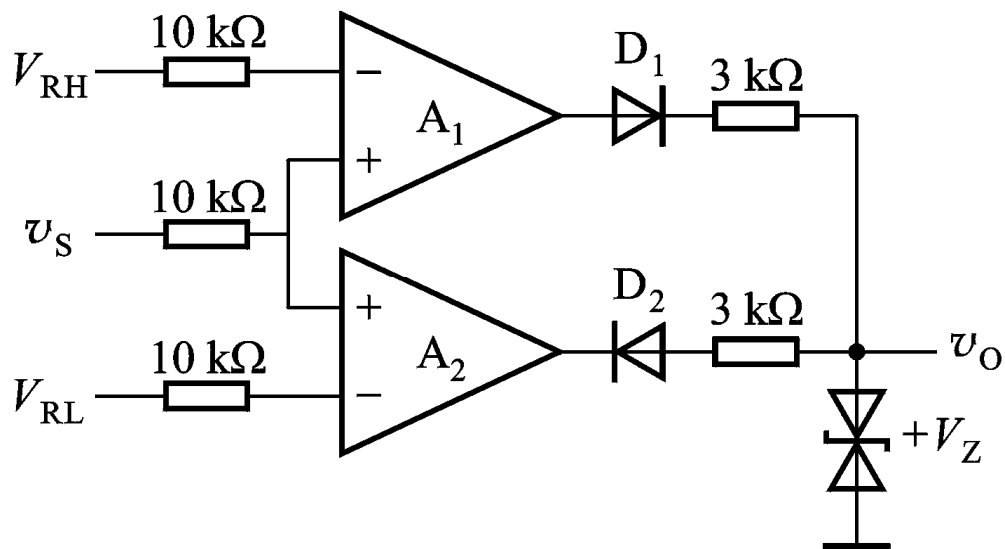
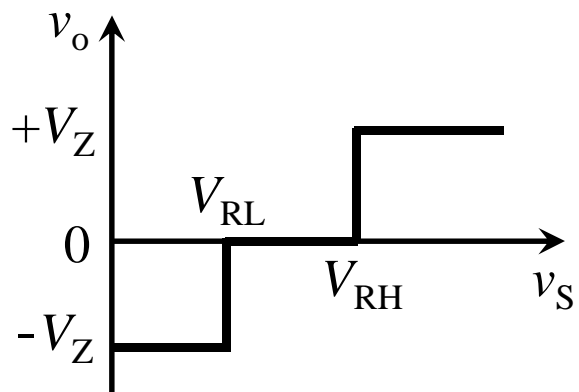
Ü 符号

## Ø 其它比较器

### ü 窗口比较器



### ü 三态比较器



## Ø 集成电压比较器

ü 是一种模拟电路与数字电路之间的接口电路。

ü 输入级通常是一个恒流源式差分放大器。

ü 输出级多为集电极开路（OC）、发射极开路（OE）方式。

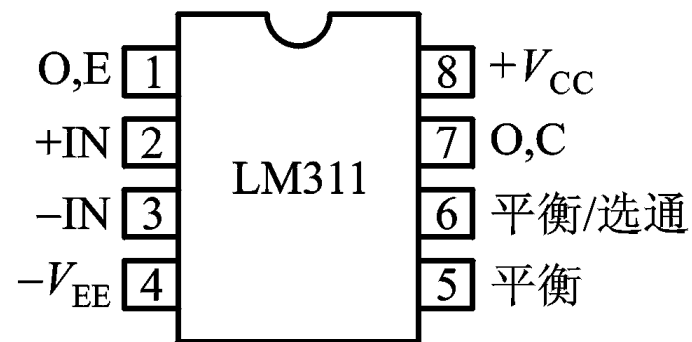
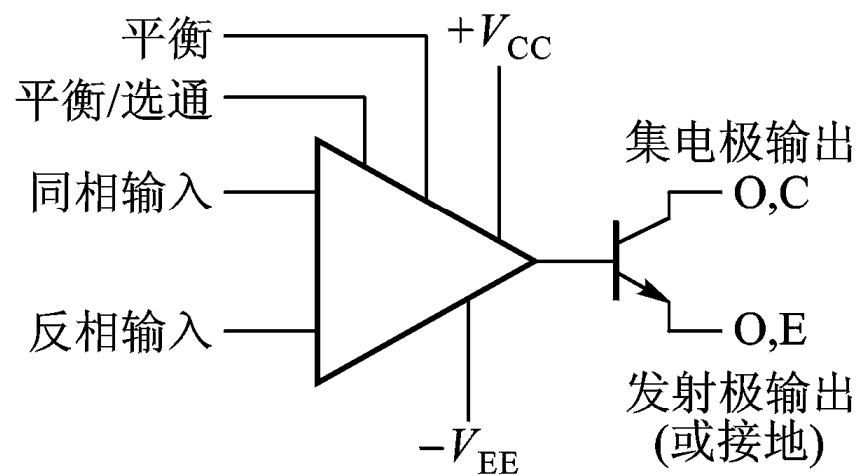
ü 中间级增益大，并具有电平移动及双端信号转换为单端信号功能。

ü 频带宽。

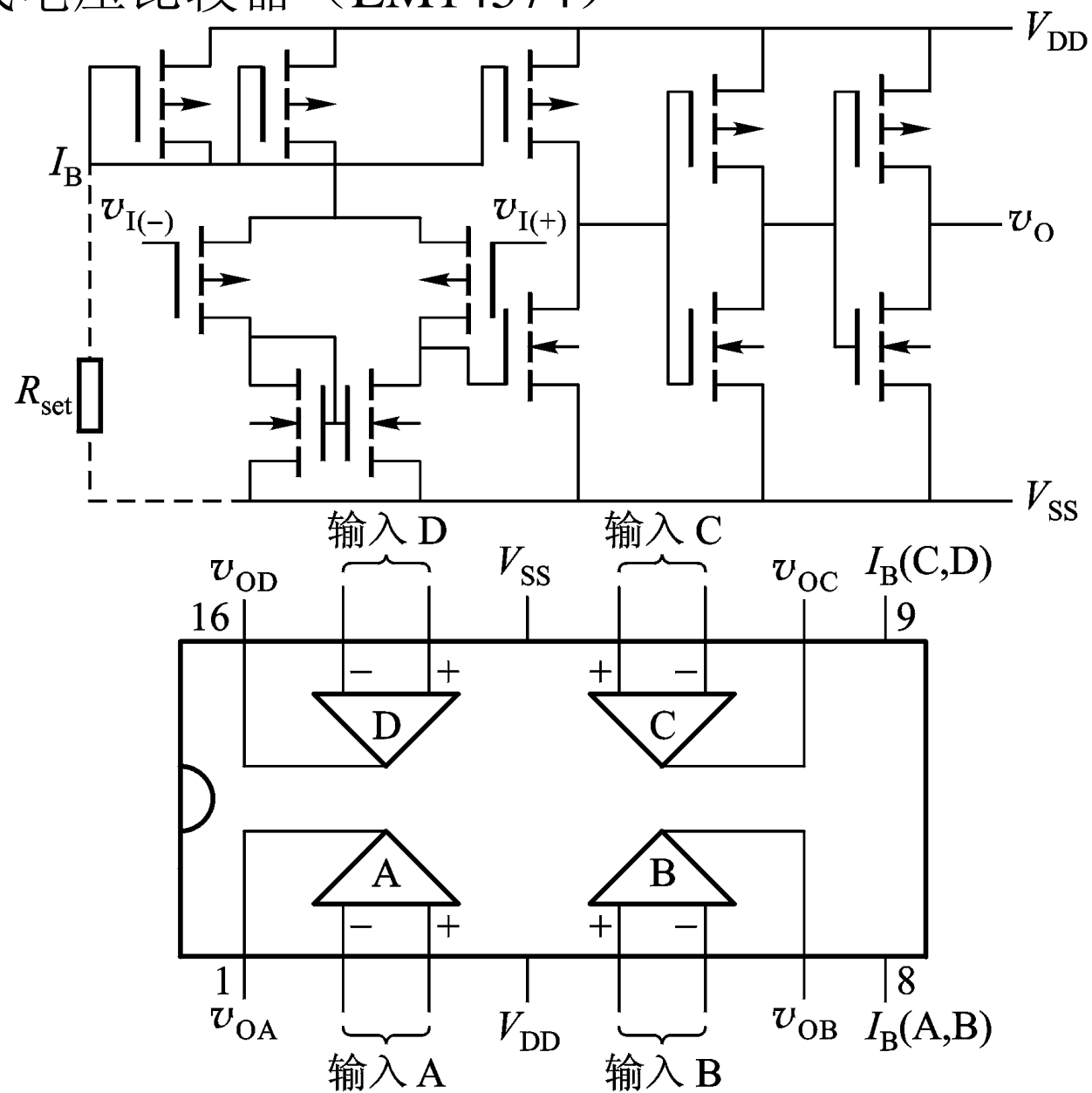
ü 一般带有可控制的选通端。

ü 品种：高速、低功耗、双/单电源、选通、可编程型等。

## Ø 集成电压比较器 (LM311)



## 集成电压比较器（LM14574）





## ✓ 方波与三角波发生器

ü 电路类型多样，本章节介绍：以比较器 + 电容充放电为基础的电路。

ü 分析原则：

振荡器电路，无始无终，所以需人为地选择一个时间点切入。

ü 分析步骤：

（1）定义上电瞬间的输出电压值，计算比较器同相、反相端电压值，从而确认电容的状态（充电或放电）；

（2）由于电容的充电或放电，其端电压变化会影响到比较器的同相或反相端电压值，导致在某一时间点，比较器的输出发生翻转，电容的状态发生改变（由充电变为放电，或反之）；

（3）类似于步骤 2，在下一某时间点，比较器的输出再次发生翻转，电容的状态也再次发生改变 ...

## ∅ 方波、（近似）三角波发生器

ü 右图所示非正弦波发生器电路。

$A$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ ：反向滞回比较器；

$R$ 、 $C$ ：电容充放电回路；

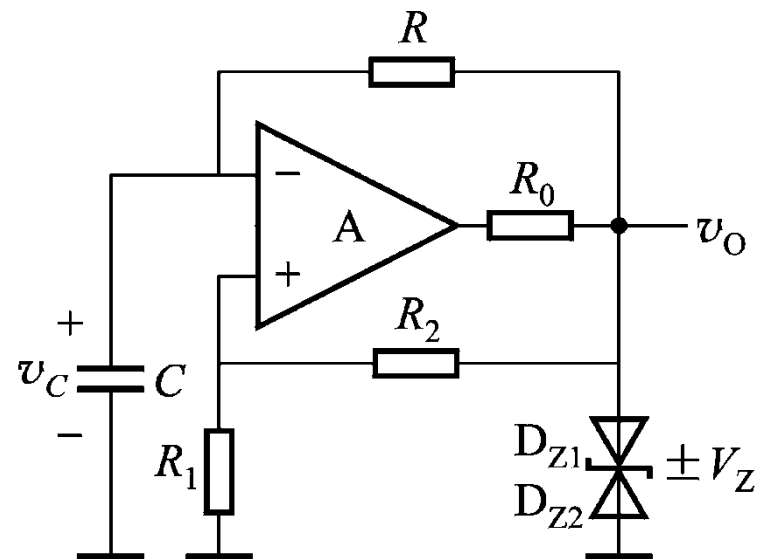
$R_0$ 、 $D_{Z1}$ 、 $D_{Z2}$ ：双向限幅电路。

ü 基本振荡原理：

输出电压  $v_O$  经  $RC$  电路积分；

利用电容  $C$  上的充放电电压  $v_C$  取代外加的输入信号  $v_S$ ；

$v_S$  与  $v_+$  比较后，产生振荡。



## ⌀ 方波、（近似）三角波发生器（电路分析）

ü 设上电瞬间（ $t=0$ ）： $V_O = +V_Z$ ；

此时，有：

$$V_- = 0, V_+ = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

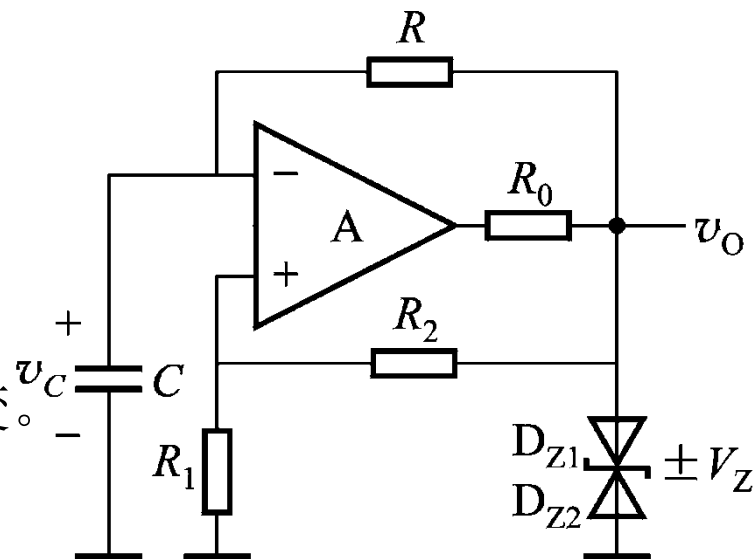
电容  $C$  充电， $v_-$  增加， $v_O$  保持  $+V_Z$  不变。

ü 设  $t=t_1$  时刻： $v_-$  增长至略大于  $v_+$ ；

则： $v_O$  翻转为  $-V_Z$ ；

$$V_- = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}, V_+ = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

电容  $C$  放电， $v_-$  减少， $v_O$  保持  $-V_Z$  不变。



## Ø 方波、（近似）三角波发生器（电路分析）

ü 设  $t = t_2$  时刻：  $v_-$  减少至略小于  $v_+$ ；

则：  $v_O$  翻转为  $+V_Z$ ；

$$V_- = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}, V_+ = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

电容  $C$  充电，  $v_-$  增加，  $v_O$  保持  $+V_Z$  不变。

↓    ↑

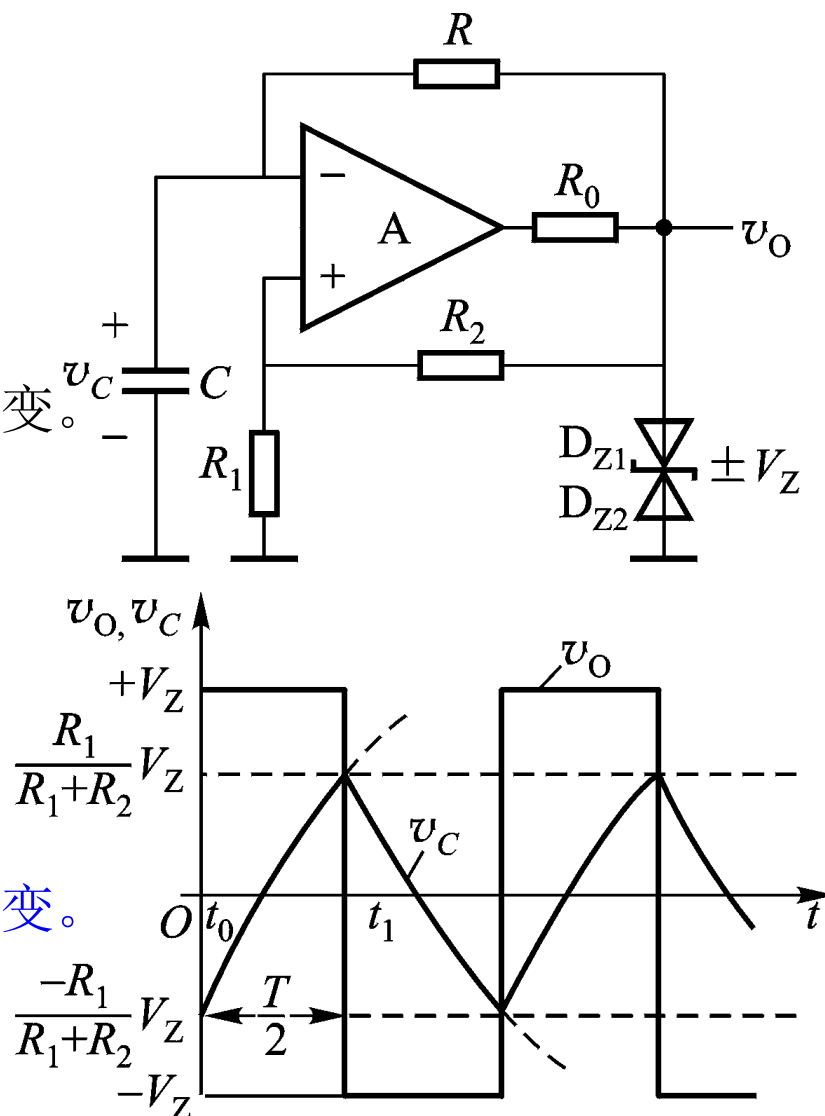
ü 设  $t = t_1$  时刻：  $v_-$  增长至略大于  $v_+$ ；

则：  $v_O$  翻转为  $-V_Z$ ；

$$V_- = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}, V_+ = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

电容  $C$  放电，  $v_-$  减少，  $v_O$  保持  $-V_Z$  不变。

方波、近似三角波



## ∅ 方波、（近似）三角波发生器（参数指标）

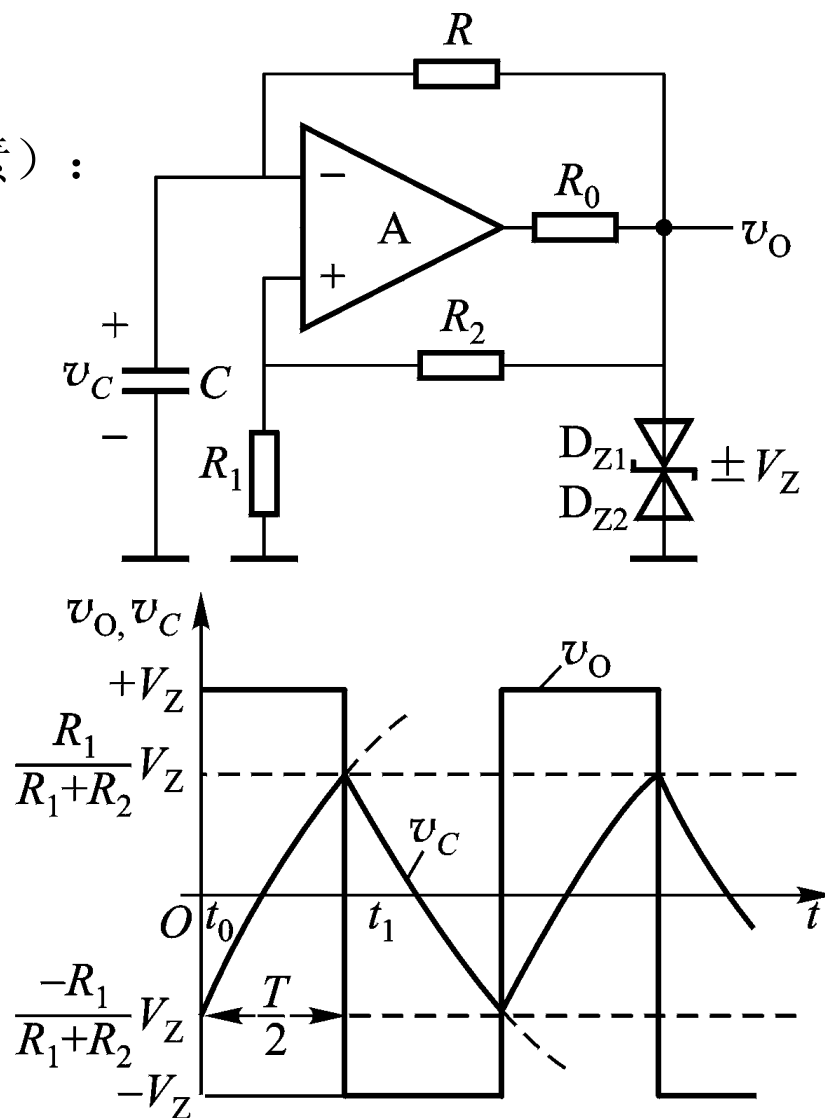
ü 振荡周期（频率）：

一阶 RC 电路的过渡过程方程（三要素）：

$$f(t) = f_p(t) + [f(0+) - f_p(0+)]e^{-\frac{t}{T}}$$

$$v_C(t) = v_C(\infty) + [v_C(t_0^+) - v_C(\infty)]e^{-\frac{t}{T}}$$

$$t = RC \ln \frac{v_C(\infty) - v_C(t_0^+)}{v_C(\infty) - v_C(t)}$$



## Ø 方波、（近似）三角波发生器（参数指标）

ü 振荡周期（频率）： $t = RC \ln \frac{v_C(\infty) - v_C(t_0^+)}{v_C(\infty) - v_C(t)}$

充电时： $v_C(\infty) = +V_Z$

$$v_C(t_0^+) = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_C(t_1) = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow T_{\text{充}} = RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

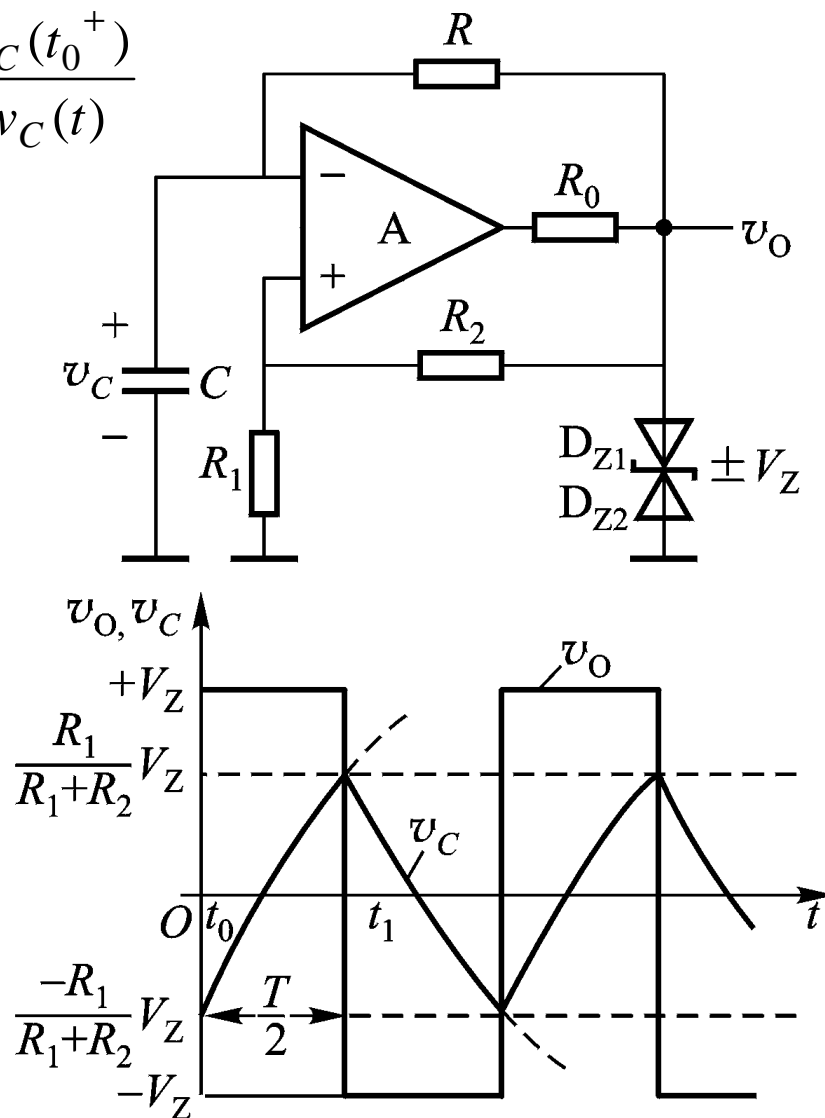
（同理）放电时：

$$T_{\text{放}} = RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

所以：

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

ü 振荡幅值： $\pm V_Z$



## 方波、（线性度良好的）三角波发生器

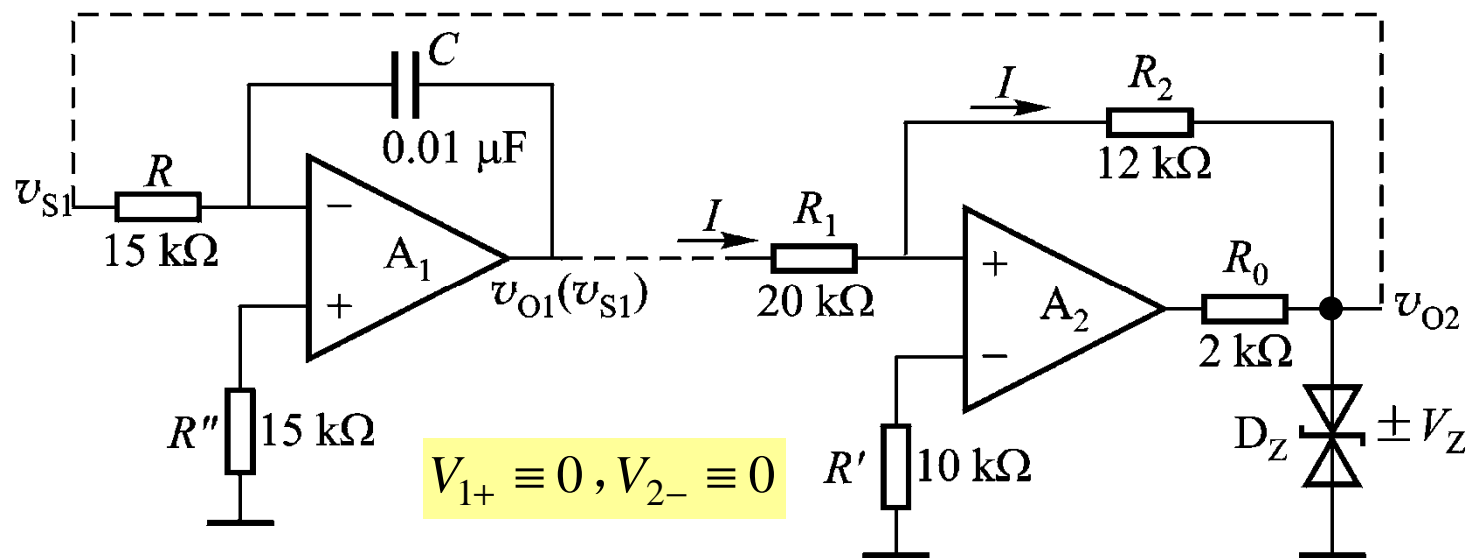
右下图所示非正弦波发生器电路。

$A_1$ ：积分器电路；

$A_2$ ：同相滞回比较器电路。

基本振荡原理同前一电路。

特点：恒流充放电。



## ∅ 方波、（线性度良好的）三角波发生器（电路分析）

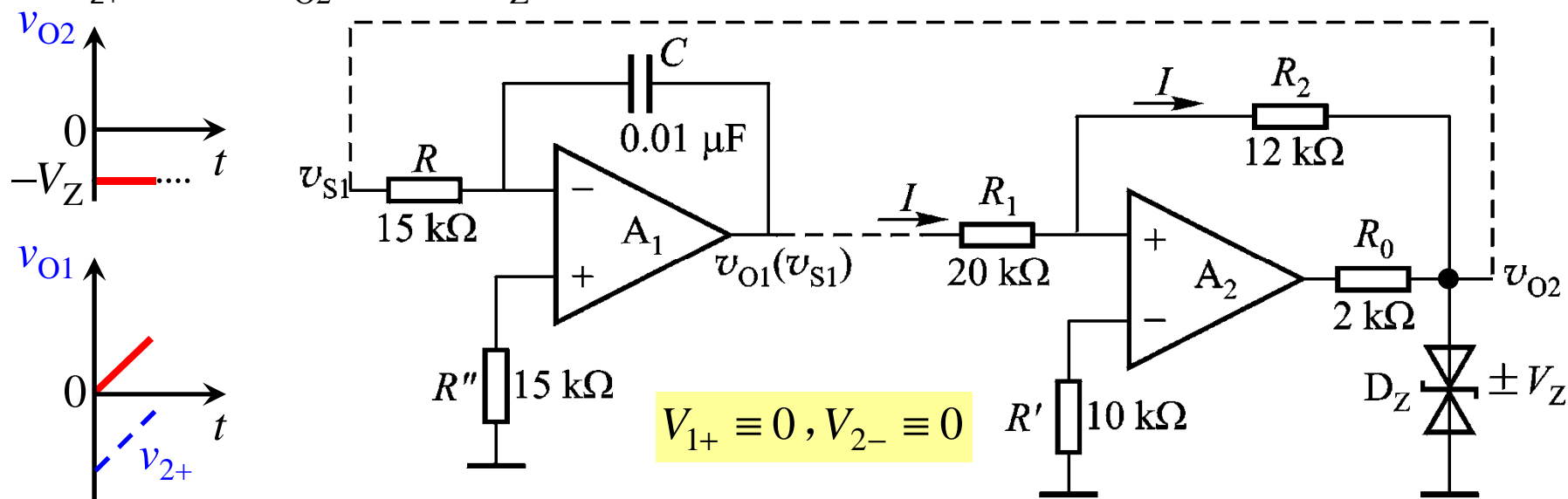
☺ 设上电瞬间（ $t=0$ ）： $V_{O2} = -V_Z$ ， $V_{O1} = -V_C = 0$ ；

$$\text{此时：} V_{2+} = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{电容 } C \text{ 放电：} v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{-V_Z}{R} dt + V_{O1}(0^+) = \frac{V_Z}{RC} t$$

$$v_{2+} = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$v_{2+}$  增加， $v_{O2}$  保持  $-V_Z$  不变。





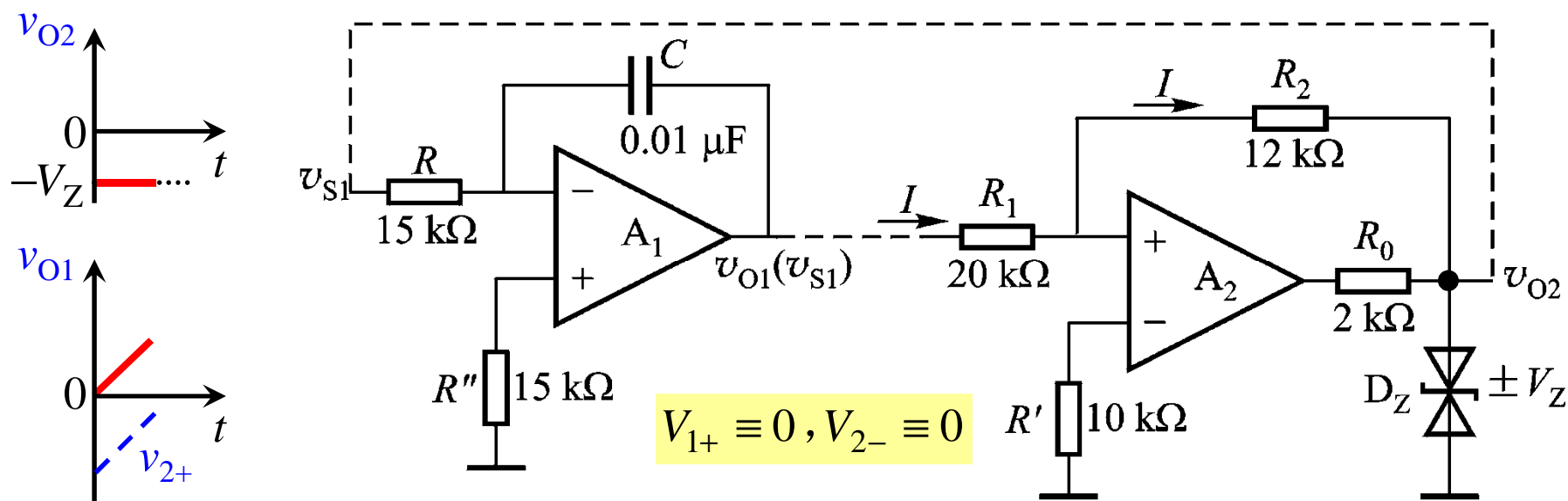
## ∅ 方波、（线性度良好的）三角波发生器（电路分析）

☺ 设  $t = t_1$  时刻：  $v_{2+}$  增长至略大于  $v_{2-}$ ，  $v_{O2}$  翻转为  $+V_Z$ ；

$$\text{此时： } V_{O1} = V_Z \frac{R_1}{R_2}$$

$$\text{电容 } C \text{ 充电： } v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_{t_1}^t \frac{+V_Z}{R} dt + V_{O1}(t_1^+)$$

$$v_{2+} = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



## ⌀ 方波、（线性度良好的）三角波发生器（电路分析）

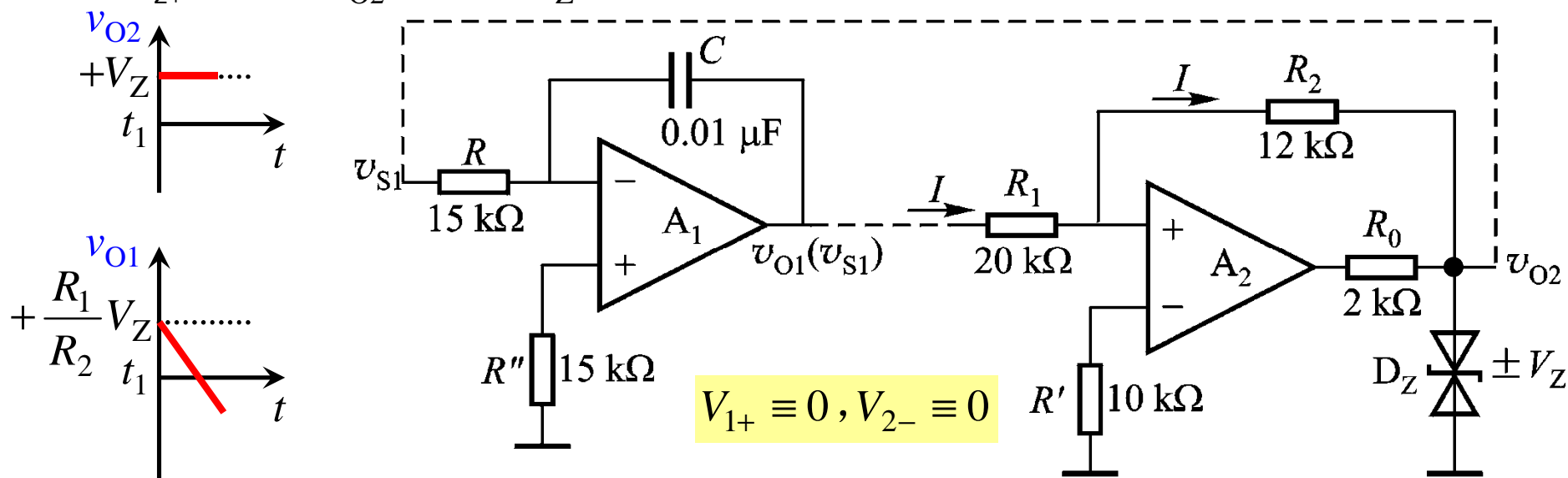
☺ 设  $t = t_1$  时刻：  $v_{2+}$  增长至略大于  $v_{2-}$ ，  $v_{O2}$  翻转为  $+V_Z$ ；

此时：  $V_{O1} = V_Z \frac{R_1}{R_2}$

电容  $C$  充电：  $v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_{t_1}^t \frac{+V_Z}{R} dt + V_{O1}(t_1^+) = -\frac{V_Z}{RC} (t - t_1) + V_Z \frac{R_1}{R_2}$

$$v_{2+} = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$v_{2+}$  减少，  $v_{O2}$  保持  $+V_Z$  不变。



## 方波、（线性度良好的）三角波发生器（电路分析）

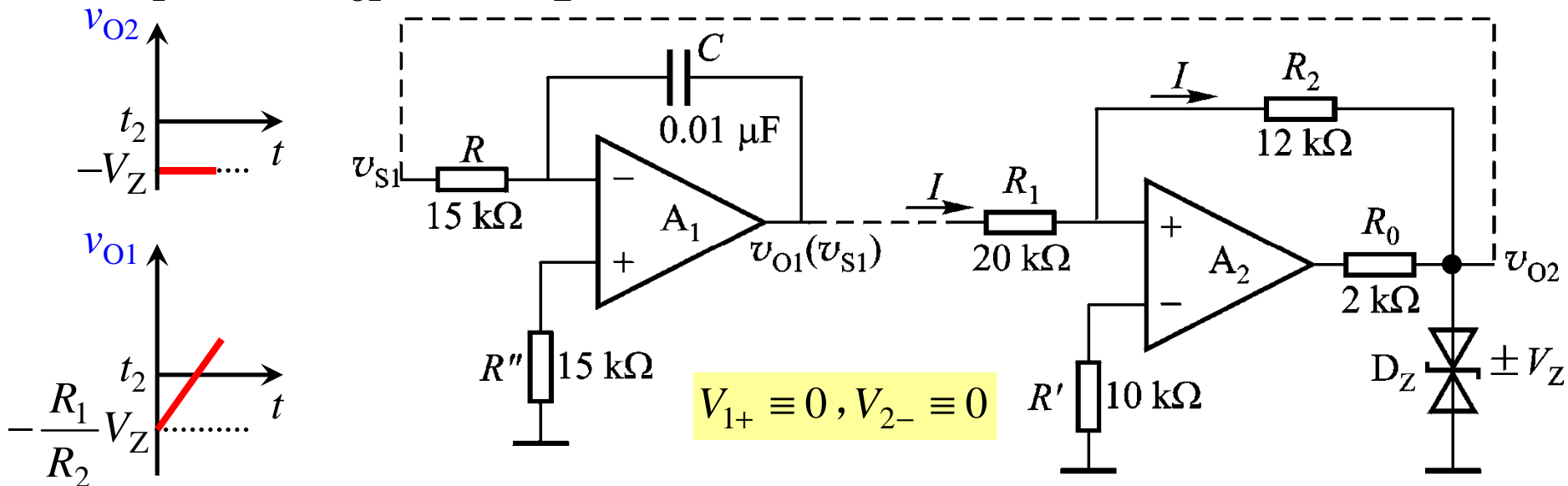
☺ 设  $t = t_2$  时刻:  $v_{2+}$  减少至略小于  $v_{2-}$ ,  $v_{O2}$  翻转为  $-V_Z$ ;

$$\text{此时: } V_{O1} = -V_Z \frac{R_1}{R_2}$$

$$\text{电容 } C \text{ 放电: } v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_{t_2}^t \frac{-V_Z}{R} dt + V_{O1}(t_2^+) = +\frac{V_Z}{RC} (t - t_2) - V_Z \frac{R_1}{R_2}$$

$$v_{2+} = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$v_{2+}$  增加,  $v_{O2}$  保持 -  $V_Z$  不变。



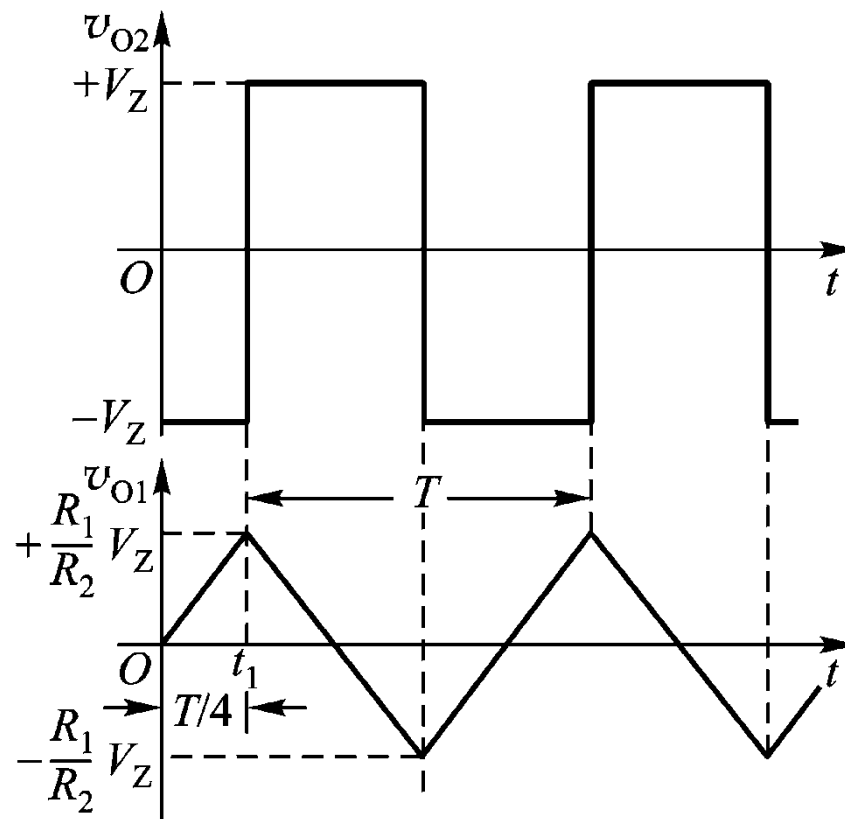
## ∅ 方波、（线性度良好的）三角波发生器（参数指标）

ü 总体波形图（右图）。

$$2V_{Om1} = \frac{1}{RC} \int_0^T V_Z dt = \frac{V_Z}{RC} \cdot \frac{T}{2}$$

$$T = 4RC \frac{V_{Om1}}{V_Z} = 4RC \frac{R_1}{R_2}$$

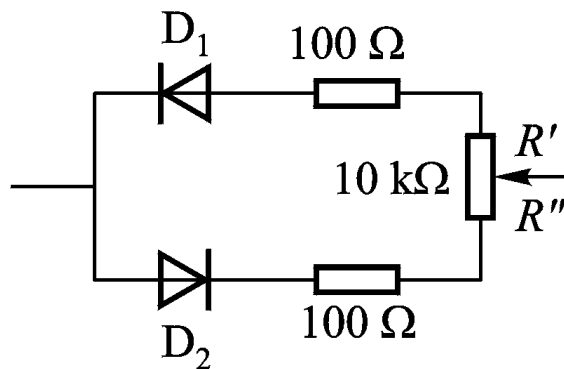
$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4RR_1C}$$



ü 矩形波、锯齿波

（调整占空比）

方案例：改变积分时间



## ✓ 压控振荡器

### ü 压控振荡器：

电路的振荡频率与控制电压成比例，即电压控制振荡频率。

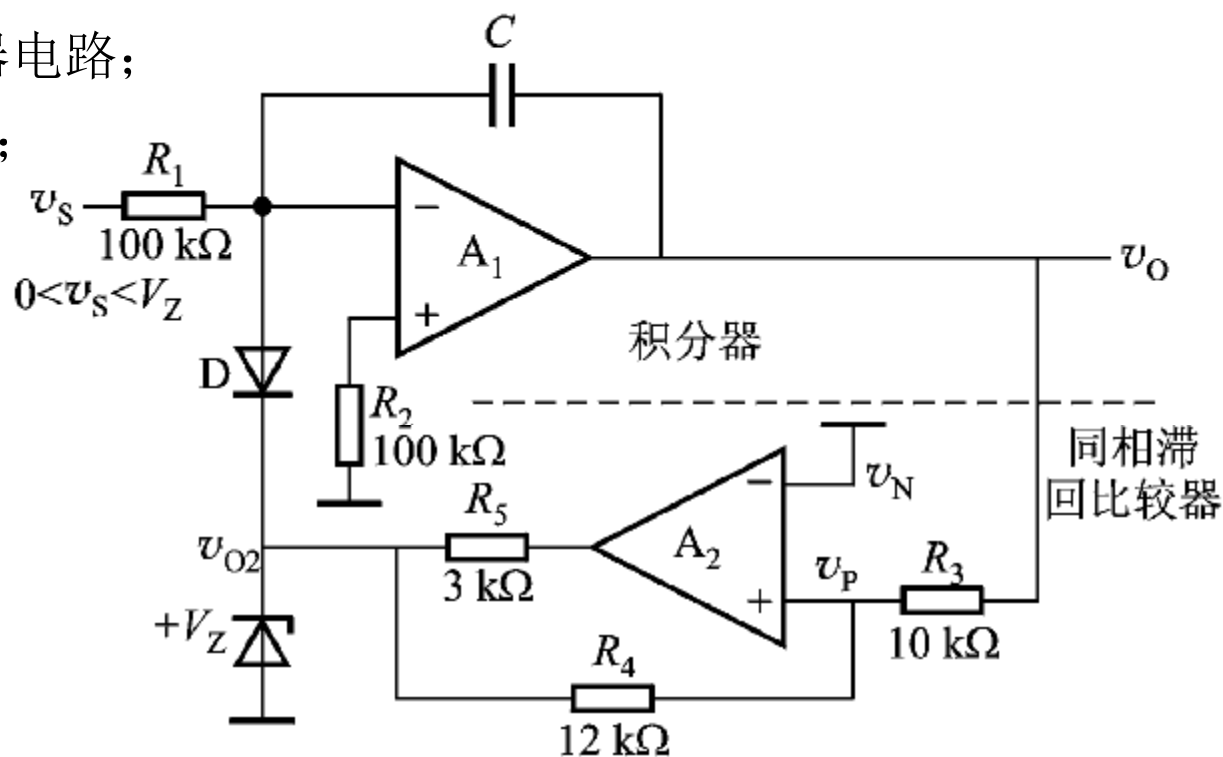
### ü 右下图所以压控振荡器电路。

$A_1$ ：积分器电路；

$A_2$ ：同相滞回比较器电路；

D：隔离、放电作用；

Z：输出限幅作用。



## Ø 压控振荡器

ü 设比较器输出高电平，即  $V_{O2} = +V_Z$ 。

ü D 截止，积分器反向积分， $v_O$  线性下降；

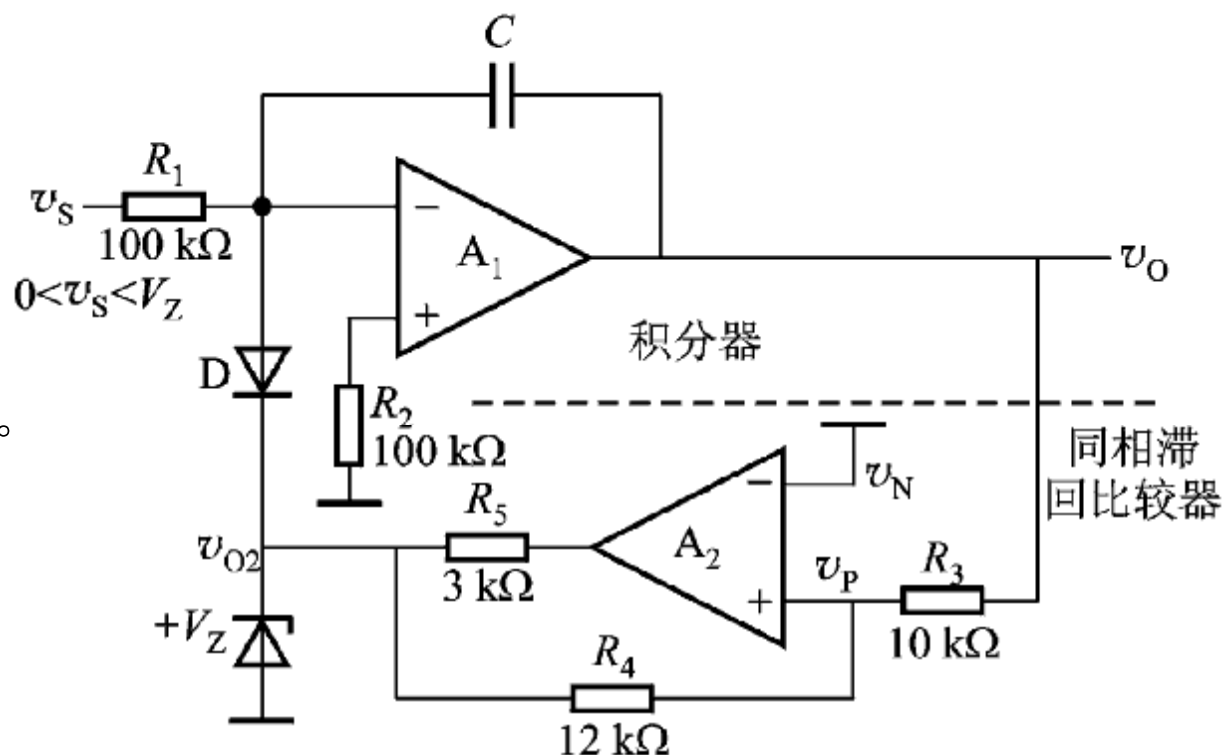
当  $v_O$  下降至  $V_{TL}$  时，比较器输出低电平。

$$V_{TL} = -V_Z \frac{R_3}{R_4}$$

ü D 导通， $C$  放电， $v_O$  快速上升；

当  $v_O$  上升至  $V_{TH}$  时，比较器输出变为高电平。

$$V_{TH} = 0.7 \times \frac{R_3}{R_4}$$



## Ø 压控振荡器（参数指标）

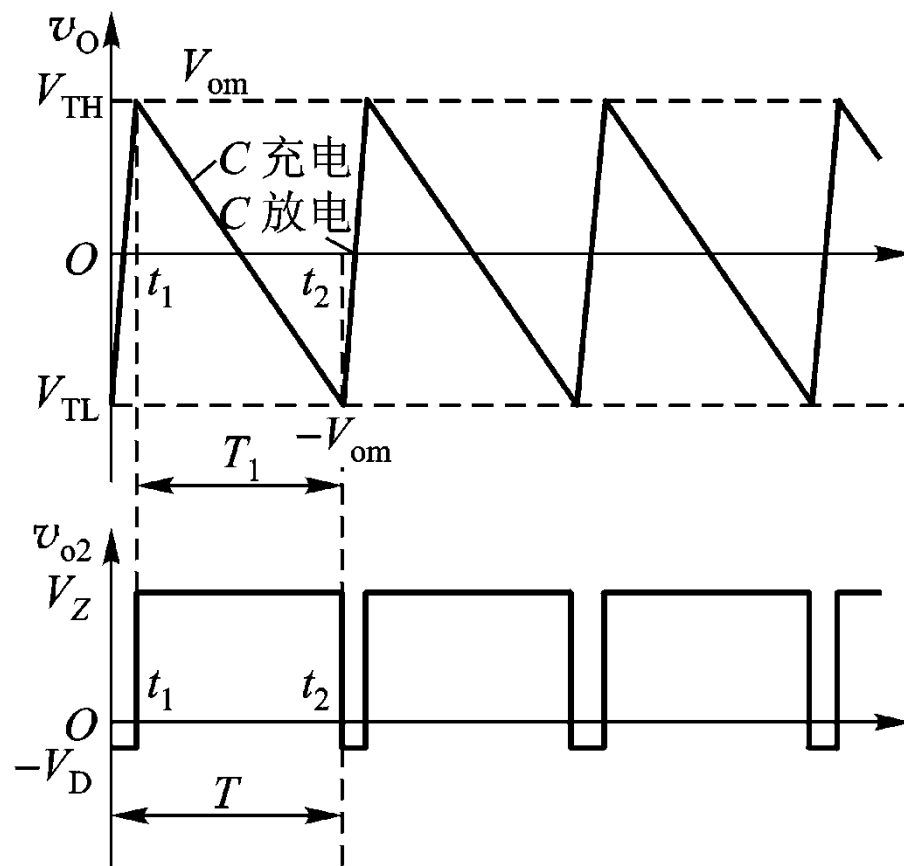
Ü 总体波形图（右图）。

$$2V_{om} = \frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} V_S dt = \frac{V_S}{R_1 C} T_1$$

$$\frac{V_{om}}{R_3} = \frac{V_Z}{R_4}$$

$$T_1 = \frac{2R_1 R_3 C}{R_4} \cdot \frac{V_Z}{V_S}$$

$$f \approx \frac{R_4}{2R_1 R_3 C} \cdot \frac{V_S}{V_Z}$$

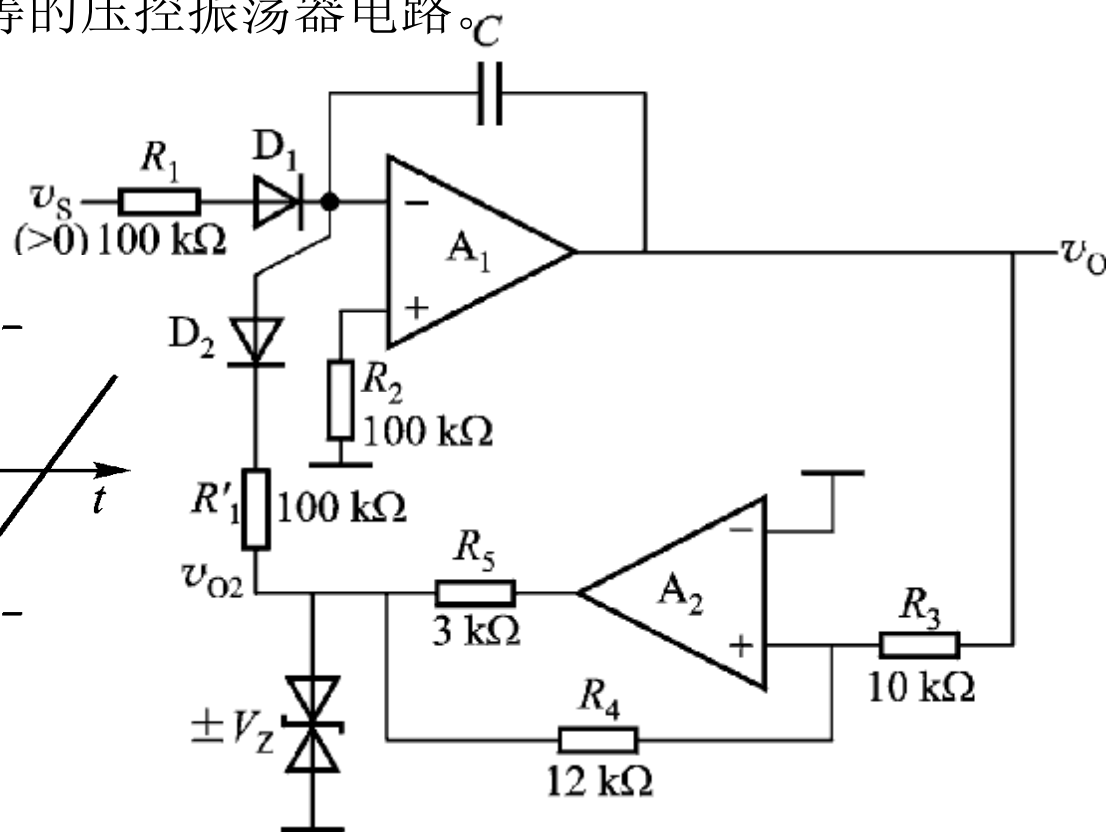
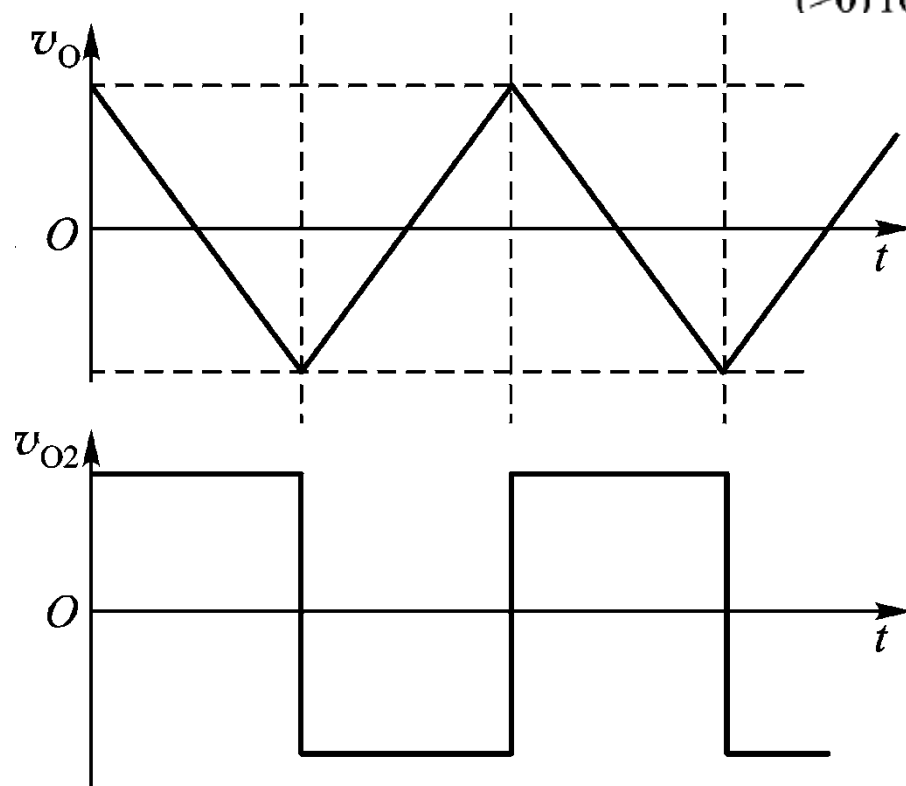


Ü 反向积分（充电）时间长，而放电时间很短；  
振荡周期主要由反向积分时间决定。

## 压控振荡器（占空比调整）

右下图所示充放电电流相等的压控振荡器电路。

波形图（下）





## ✓ 本节作业

### ü 习题 4 (P225)

9 (比较器)

12、13 (非正弦波)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。