

第4章（2） 函数信号发生电路

4.5.1 电压比较器

- 1 基本比较器
- 2 滞回比较器
- 3 窗口比较器和三态比较器
- 4 集成电压比较器

4.5.2 非正弦波发生器

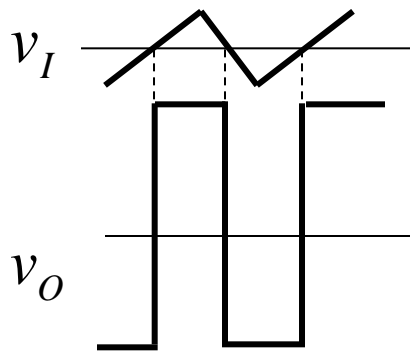
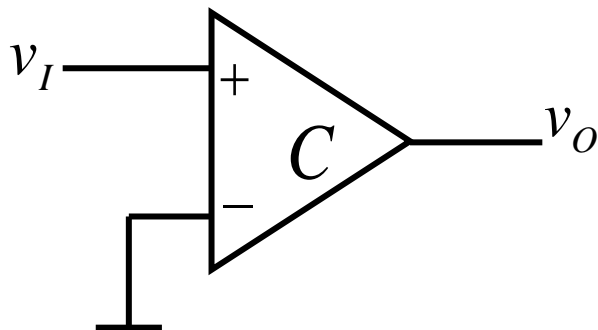
- 1 由集成运放组成的非正弦波发生器
- 2* **CMOS**门电路组成的晶体振荡器
- 3 压控振荡器

4.1.3* 单片集成多功能函数发生器

4.5.1 电压比较器

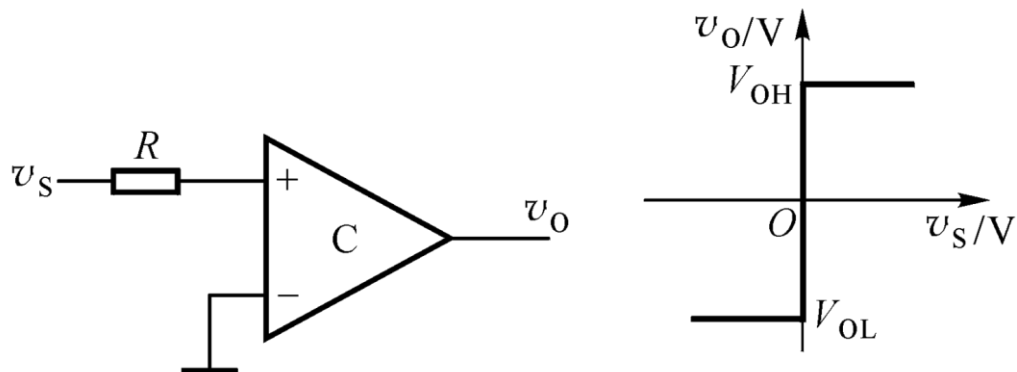
1 模拟电压比较器

- 在模拟电路中，正弦波产生电路已经作了介绍；
- 这里主要介绍非正弦函数的产生电路，即矩形波、三角波等；
- 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；
- 模拟电压比较器
对两个输入模拟信号进行比较，
使电路输出在两个极限电平 $+V_{Om}$ 和 $-V_{Om}$ 之间自动转换。

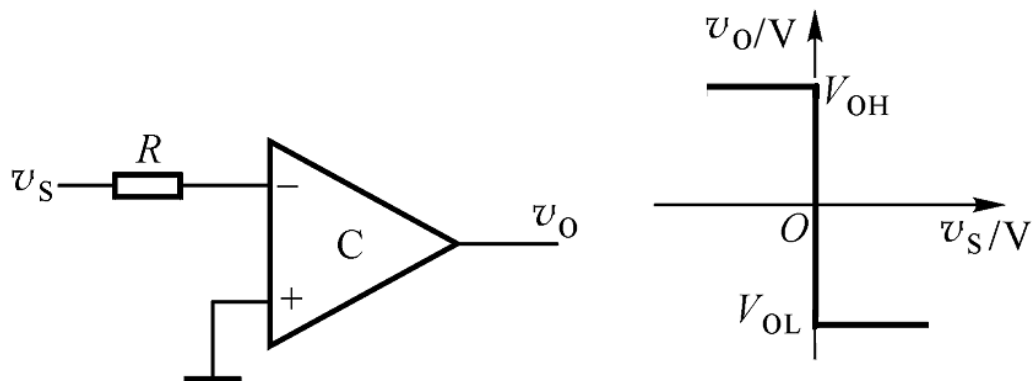


■ 一、单限比较器

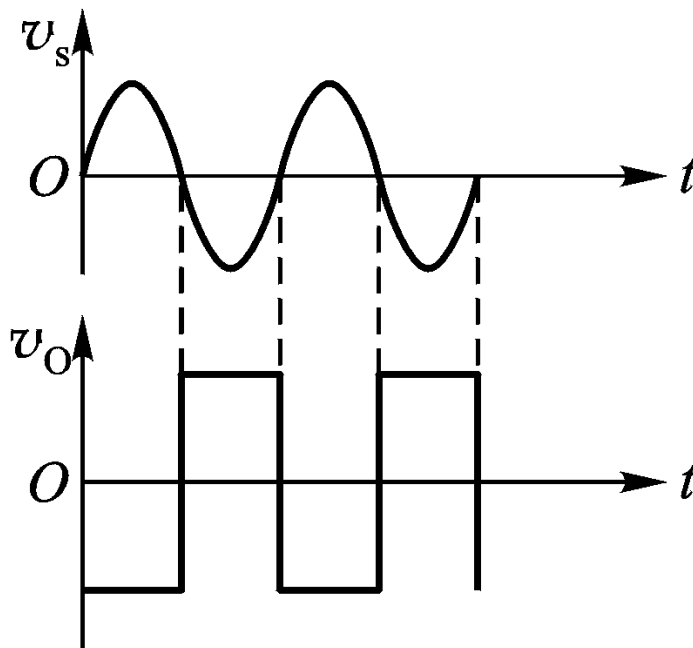
❖ 过零比较器



同相过零比较器



反相过零比较器



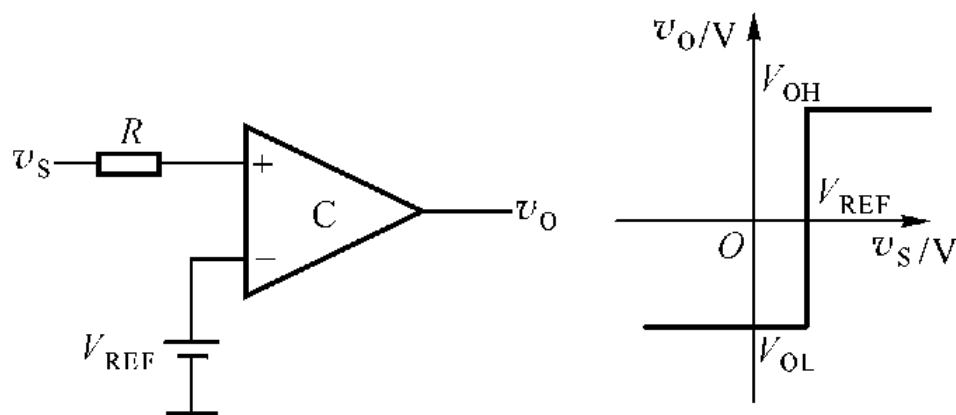
用过零比较器将正弦波
变换成同频率方波

❖ 单门限比较器

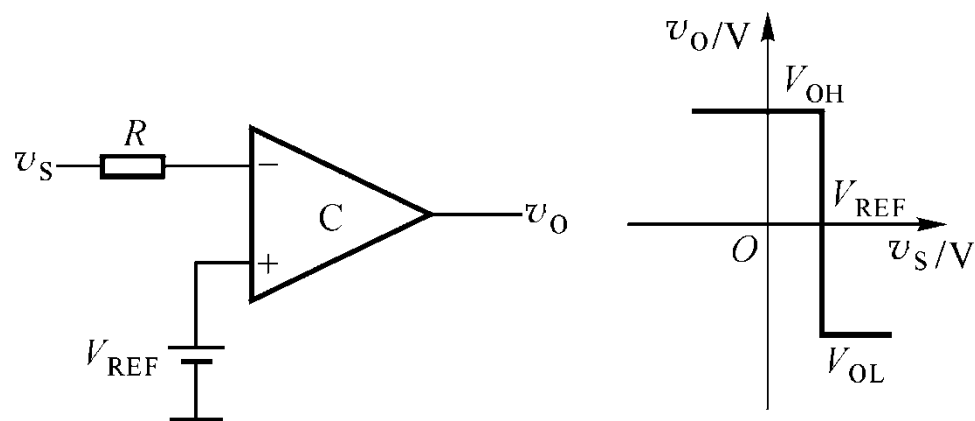
优点：利用运放开环增益无穷大特点，简单，灵敏度高。

缺点：抗干扰能力较差。

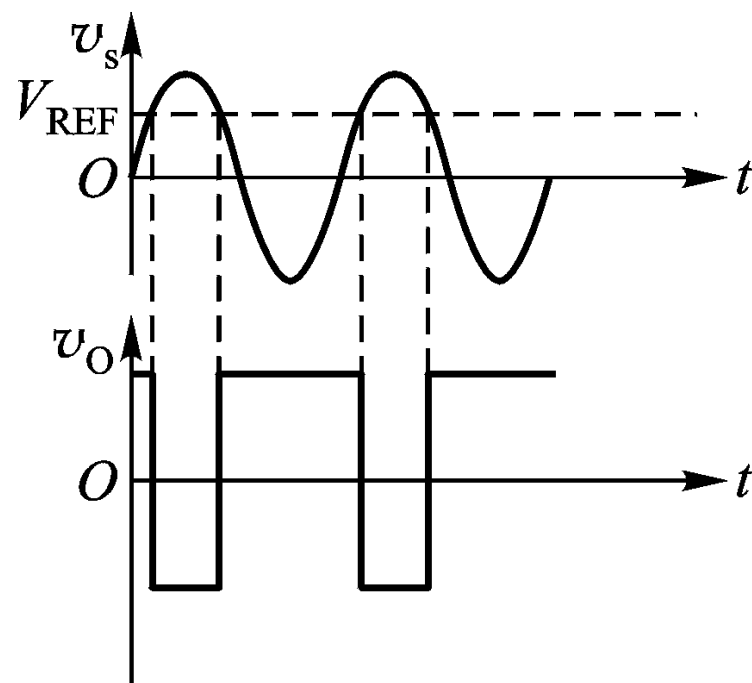
用途：整形，波形变换。



同相单门限比较器

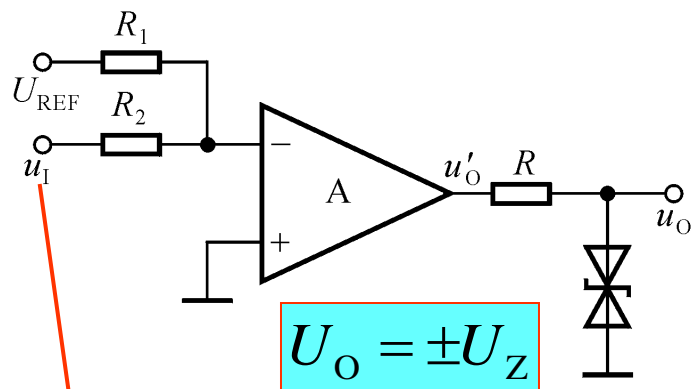


反相单门限比较器



用门限比较器将正弦波变换成同频率矩形波

一般单限比较器



作用于反相输入端

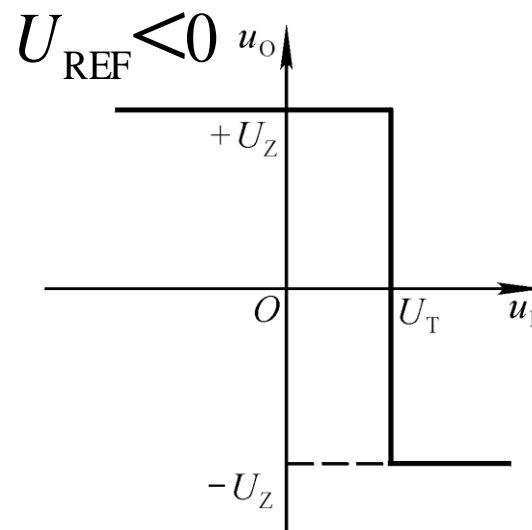
$$U_O = \pm U_Z$$

$$u_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_I$$

令 $u_N = u_P = 0$, 得

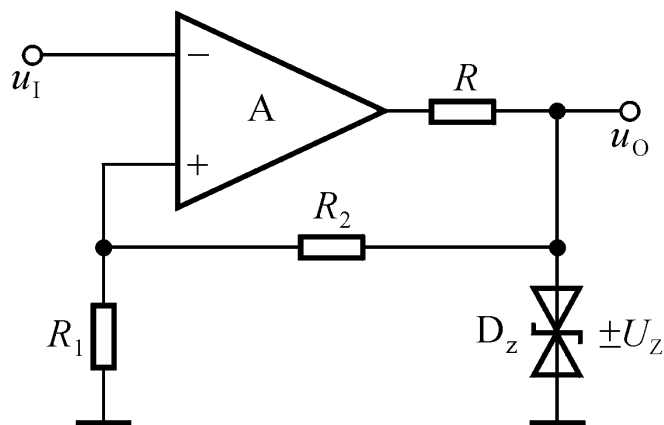
$$U_T = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{REF}$$

- (1) 若要 $U_T < 0$, 则应如何修改电路?
- (2) 若要改变曲线跃变方向, 则应如何修改电路?
- (3) 若要改变 U_{OL} 、 U_{OH} 呢?



二、滞回比较器

1. 阈值电压



$$U_{OL} = -U_Z$$

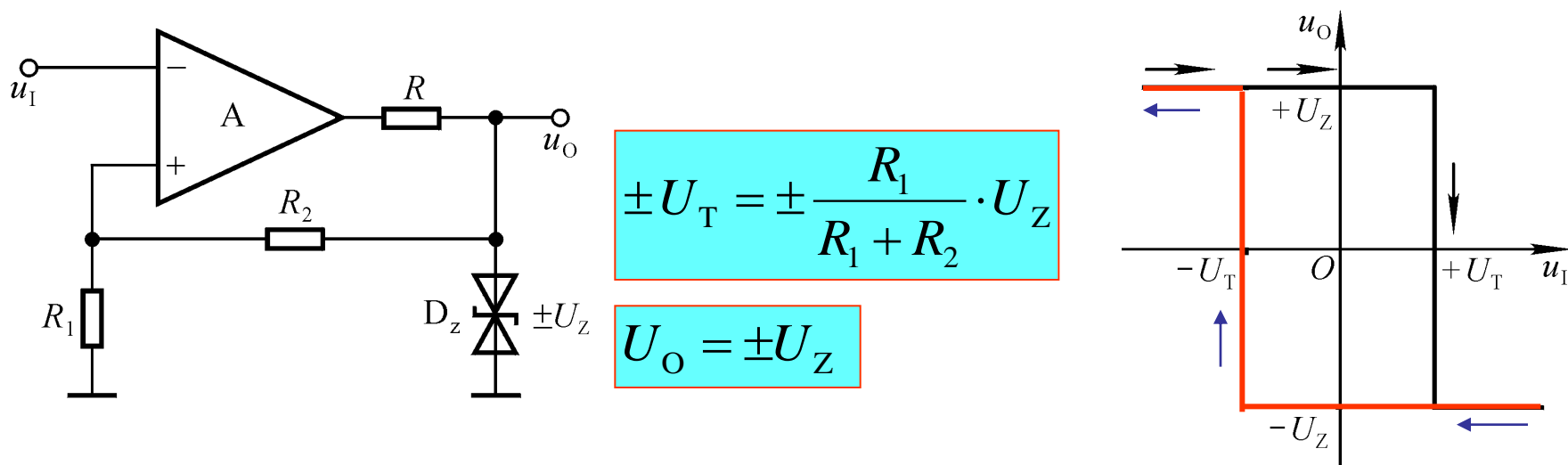
$$U_{OH} = +U_Z$$

$$u_N = u_I$$

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O, \text{ 令 } u_N = u_P, \text{ 得}$$

$$\pm U_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$

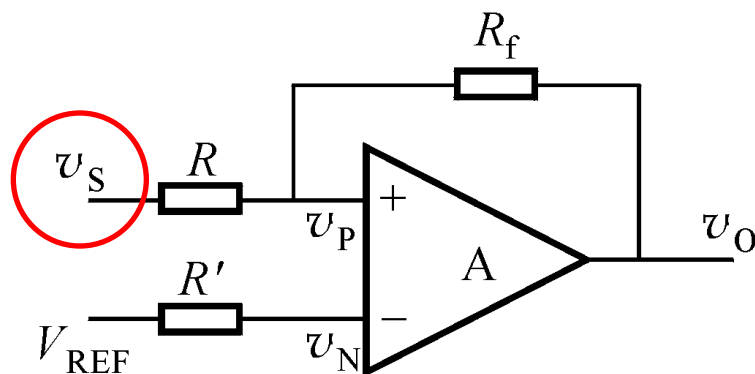
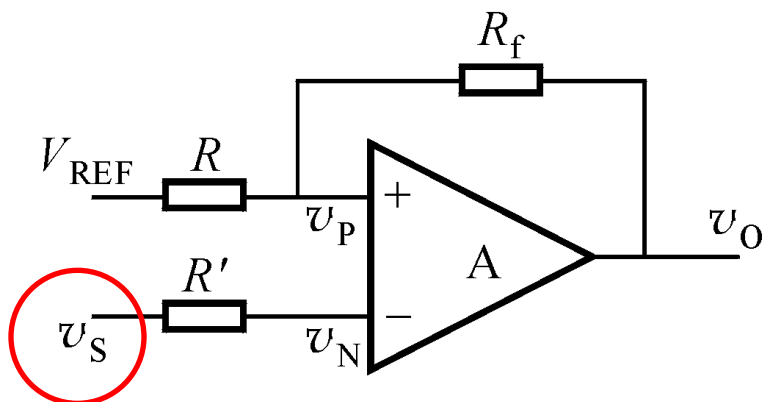
2. 工作原理及电压传输特性



设 $u_I < -U_T$, 则 $u_N < u_P$, $u_O = +U_Z$ 。此时 $u_P = +U_T$, 增大 u_I , 直至 $+U_T$, 再增大, u_O 才从 $+U_Z$ 跃变为 $-U_Z$ 。

设 $u_I > +U_T$, 则 $u_N > u_P$, $u_O = -U_Z$ 。此时 $u_P = -U_T$, 减小 u_I , 直至 $-U_T$, 再减小, u_O 才从 $-U_Z$ 跃变为 $+U_Z$ 。

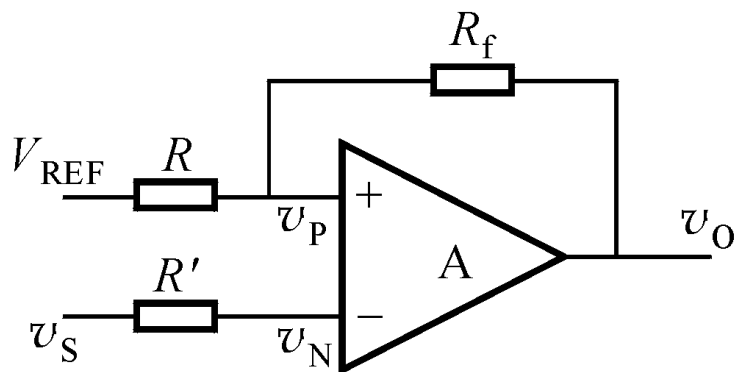
❖ 反相滞回比较器 比较电压接反相端，参考电压接同相端；
输出与输入构成正反馈。



❖ 同相滞回比较器 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。

由于运放的开环增益无穷大，
所以比较器实际上对 v_p 和 v_N 两点电平大小进行比较。

❖ 反相滞回比较器工作原理



$$v_p = \frac{R}{R + R_f} v_o + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF}$$

$$v_o = V_{OH} \Rightarrow v_p = V_{TH}$$

(上触发电平)

$$v_o = V_{OL} \Rightarrow v_p = V_{TL}$$

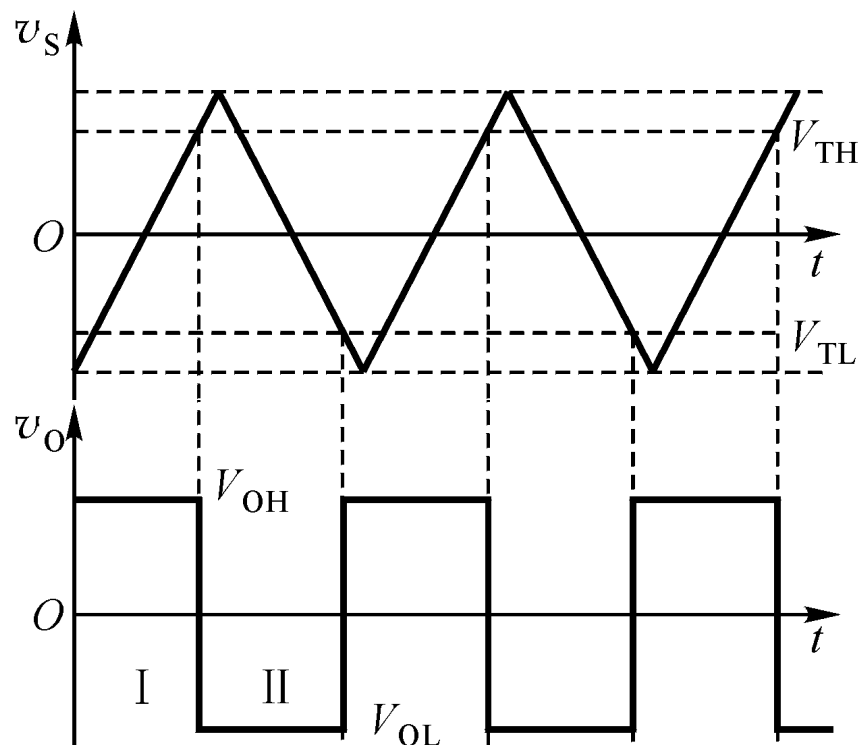
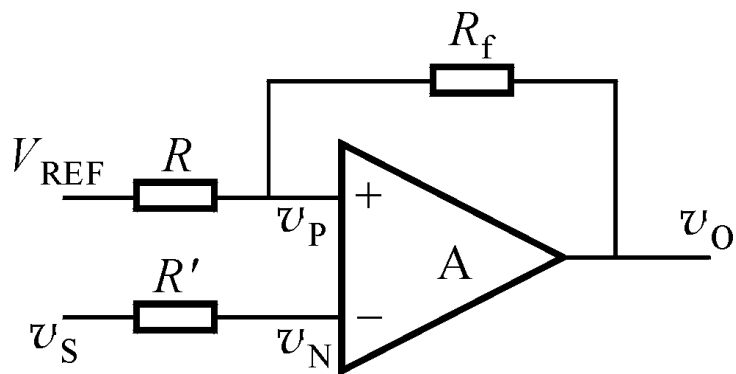
(下触发电平)

V_{TH} 和 V_{TL} 是比较器输出电平翻转的两个阈值电平；

当比较电平 $v_S < V_{TL}$ ，比较器输出高电平 V_{OH} ；

当比较电平 $v_S > V_{TH}$ ，比较器输出低电平 V_{OL} ；

❖ 反相滞回比较器的应用

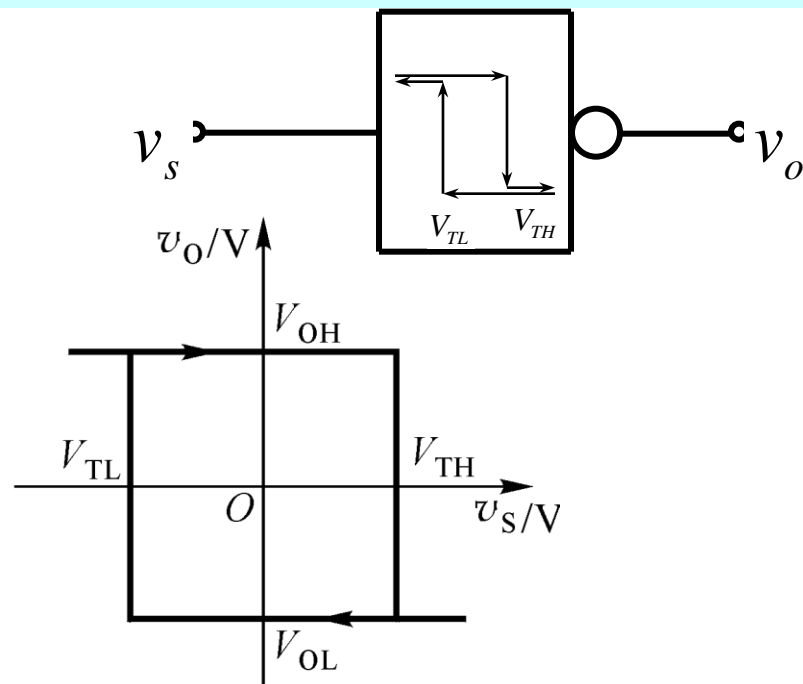
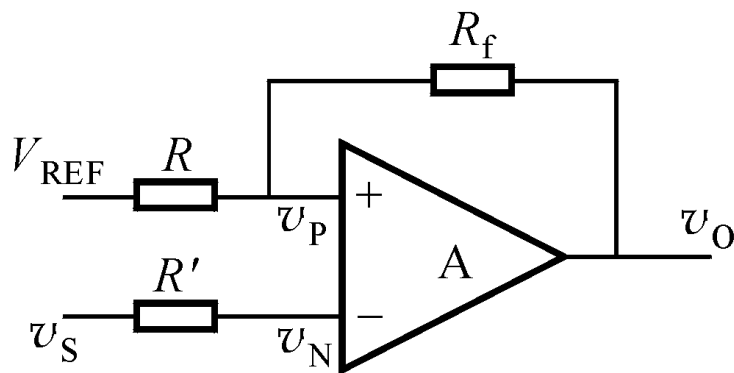


当比较电平 $v_S < V_{TL}$ ，比较器输出高电平 V_{OH} ；

当比较电平 $v_S > V_{TH}$ ，比较器输出低电平 V_{OL} ；

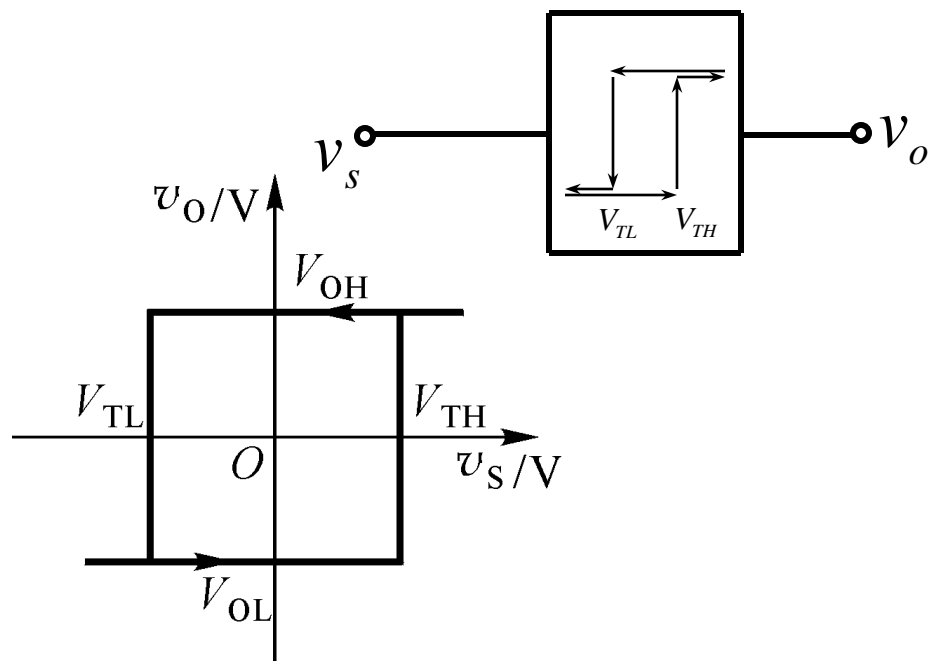
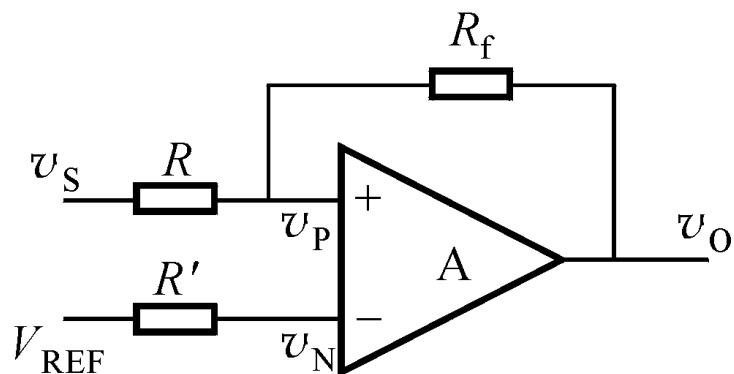
回差是滞回比较器的固有特性，它的大小可以通过有关电阻调节。回差电压越大，电路越不易误触发，即抗干扰能力越强。

❖ 反相滞回比较器电压传输特性

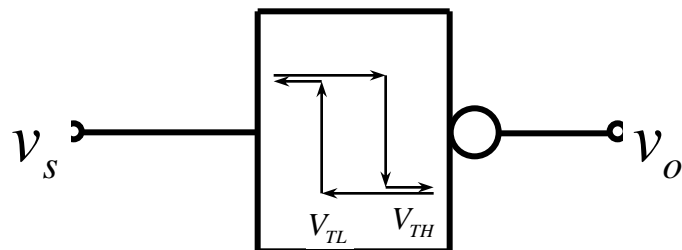
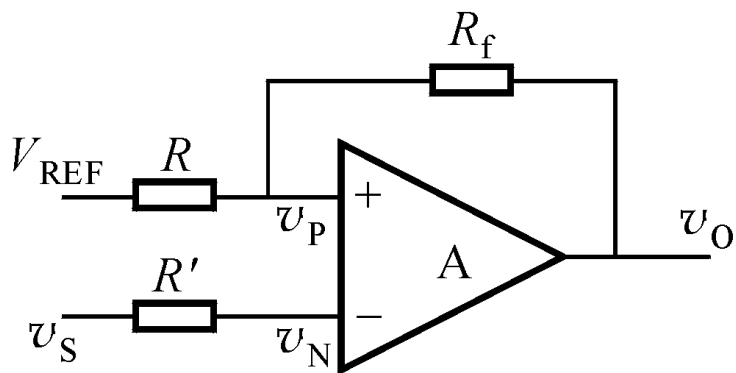


- 特性如磁性材料的磁滞回线，称滞迟比较器（滞回比较器）；
- 滞回比较器电压传输特性有一个十分重要的特性——回差特性；
- 电路由低电平翻转到高电平所需的触发电平 V_{TH} ，和由高电平翻转到低电平所需的触发电平 V_{TL} 不一致；这两个触发电平之差称回差电压（简称回差）；
$$\Delta V = V_{TH} - V_{TL}$$

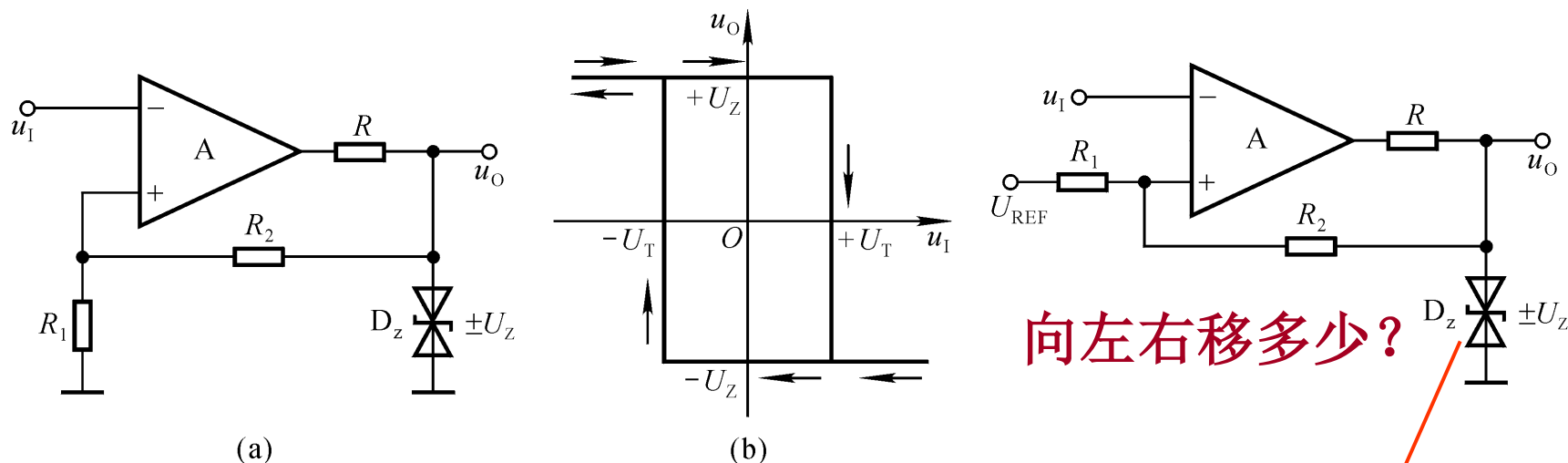
❖ 同相滞回比较器相关参数



❖ 反相滞回比较器电压传输特性

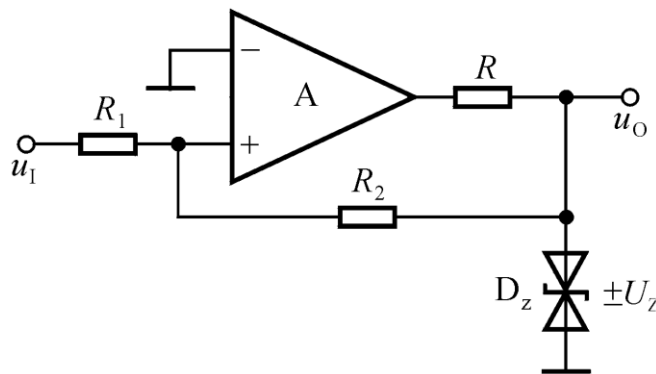


讨论一：如何改变滞回比较器的电压传输特性



向左右移多少？

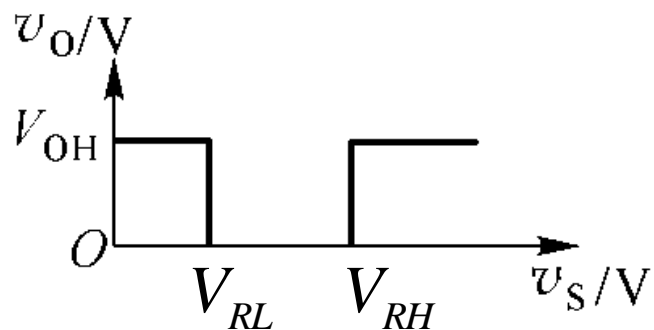
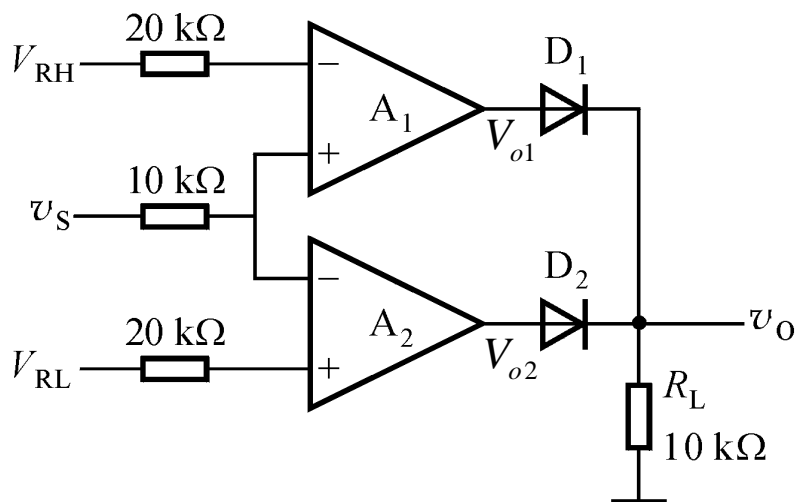
1. 若要电压传输特性曲线左右移动，则应如何修改电路？
2. 若要电压传输特性曲线上下移动，则应如何修改电路？
3. 若要改变输入电压过阈值电压时输出电压的跃变方向，则应如何修改电路？



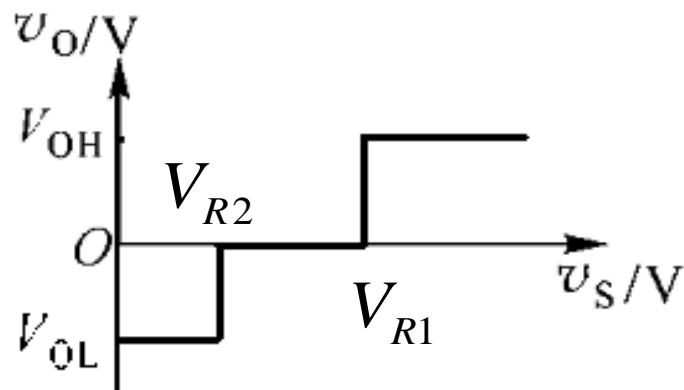
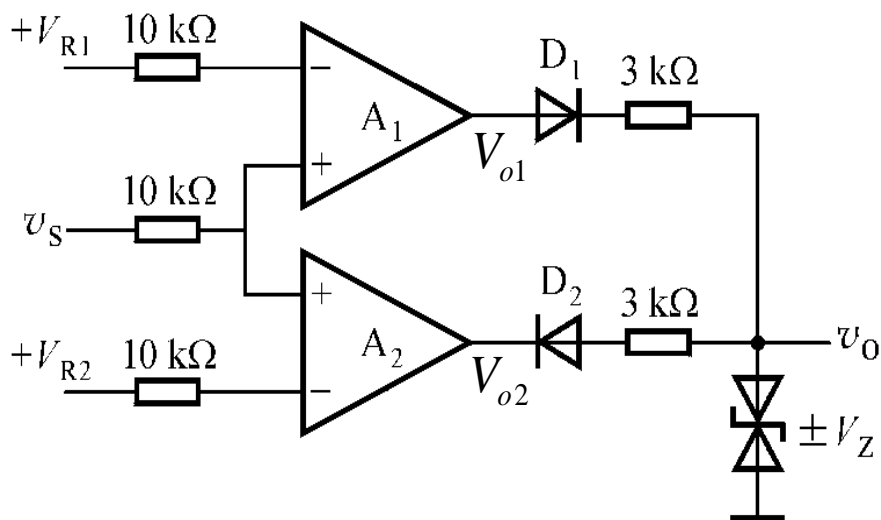
改变输出
限幅电路

■ 三、其它比较器

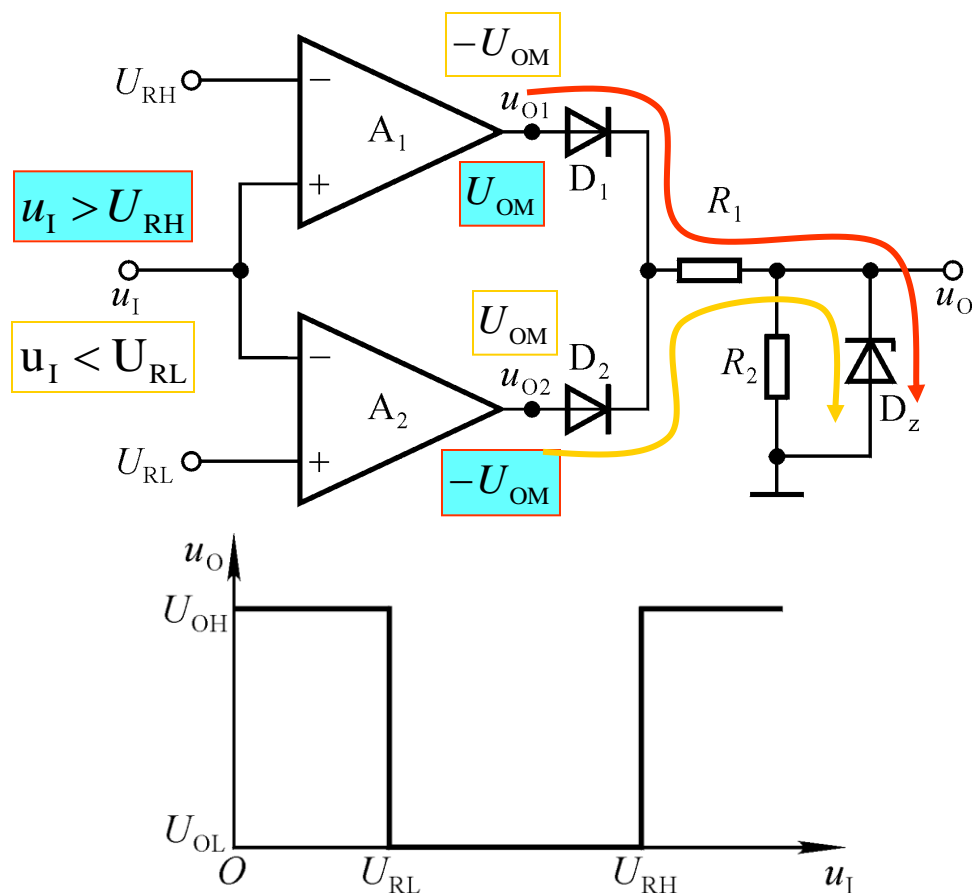
❖ 窗口比较器



❖ 三态比较器



1、窗口比较器



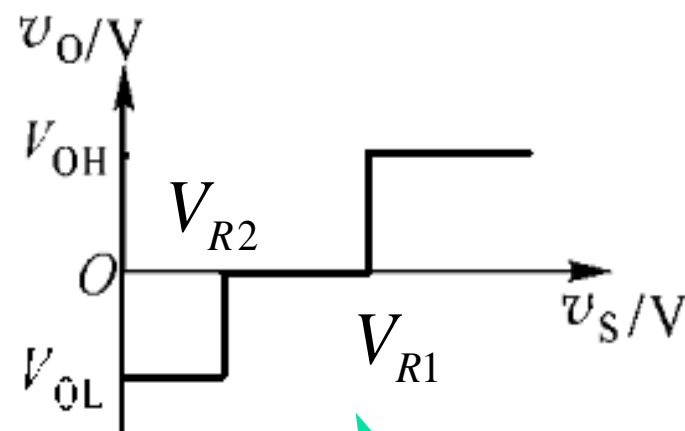
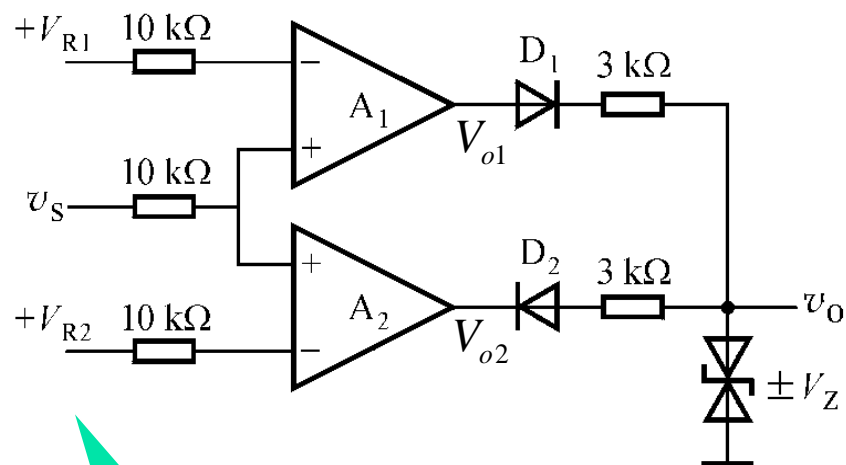
当 $u_I > U_{RH}$ 时, $u_{O1} = -u_{O2} = U_{OM}$, D_1 导通, D_2 截止;
 $u_O = U_Z$ 。

当 $u_I < U_{RL}$ 时, $u_{O2} = -u_{O1} = U_{OM}$, D_2 导通, D_1 截止;
 $u_O = U_Z$ 。

当 $U_{RL} < u_I < U_{RH}$ 时, $u_{O1} = u_{O2} = -U_{OM}$, D_1 、 D_2 均截止;
 $u_O = 0$ 。

2、三态电压比较器

$$\text{令 } V_{R1} > V_{R2}$$



三态比较器
电路

$$v_S < V_{R2}, V_{o1} = V_{o2} = V_{oL}$$

$$\mathbf{D_2 \text{导}, D_1 \text{截}, } v_o = V_{oL}$$

$$v_S > V_{R1}, V_{o1} = V_{o2} = V_{oH}$$

$$\mathbf{D_2 \text{截}, D_1 \text{导}, } v_o = V_{oH}$$

$$V_{R1} > v_S > V_{R2} \quad \mathbf{D_2 \text{截}, D_1 \text{截}, } v_o = 0$$

三态比较器电压
传输特性

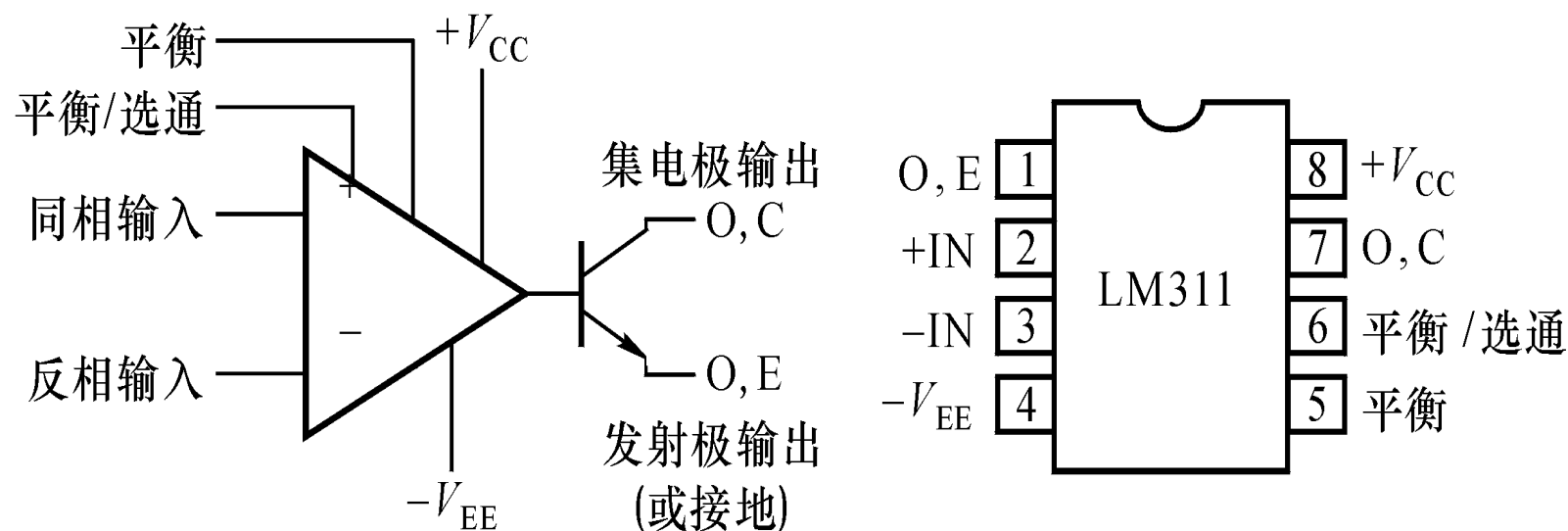
4.5.2 集成电压比较器

- ✓ 是一种模拟电路与数字电路之间的接口电路。
- ✓ 输入级通常是一个恒流源式差分放大器。
- ✓ 输出级多为集电极开路（OC）、发射极开路（OE）方式。
- ✓ 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。
- ✓ 频带宽。
- ✓ 带有可控制的选通端。
- ✓ 品种：高速型、低功耗型、双电源型、单电源型、选通型、可编程型等。

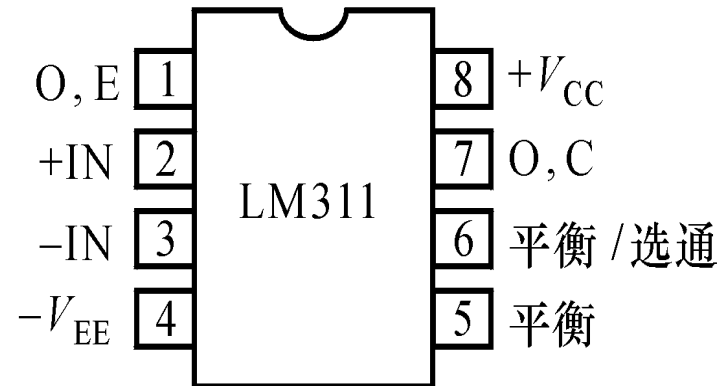
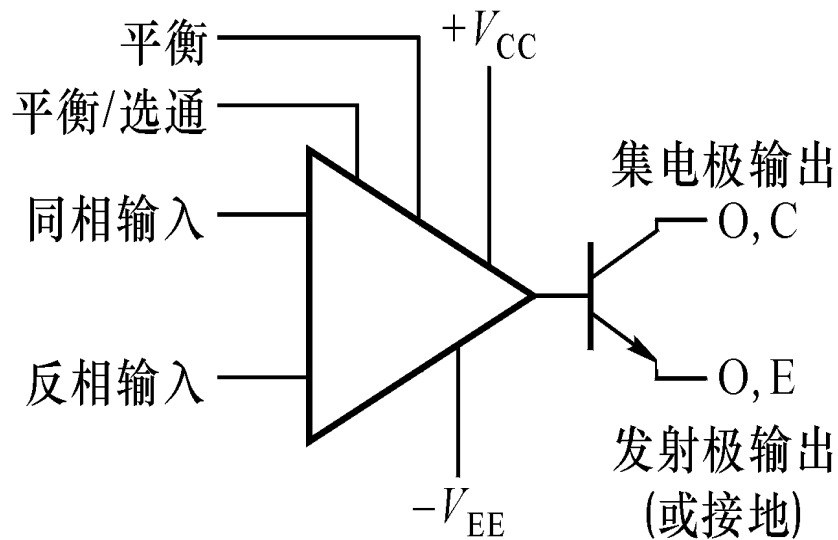
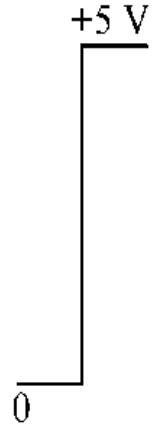
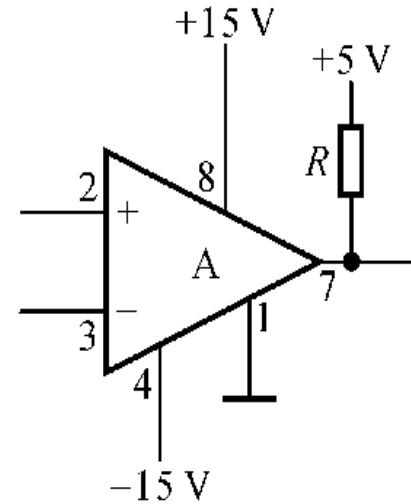
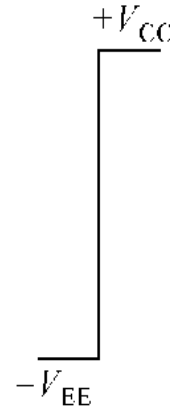
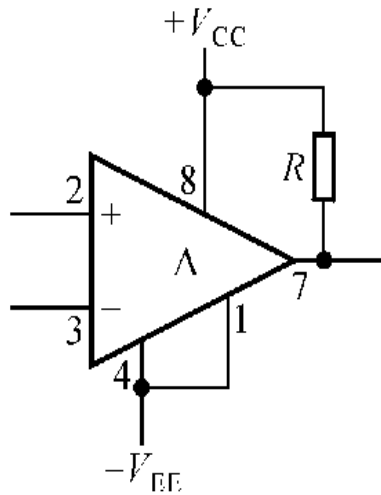
4.1.2 集成电压比较器

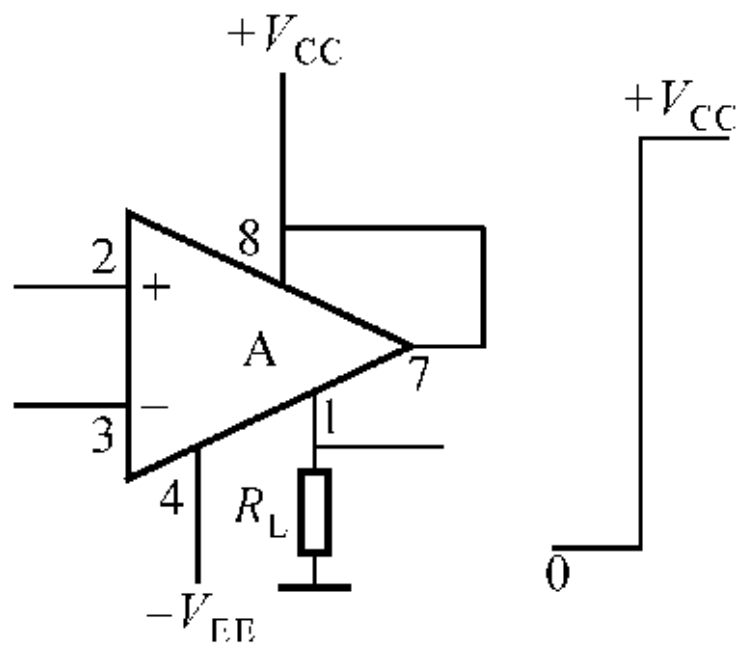
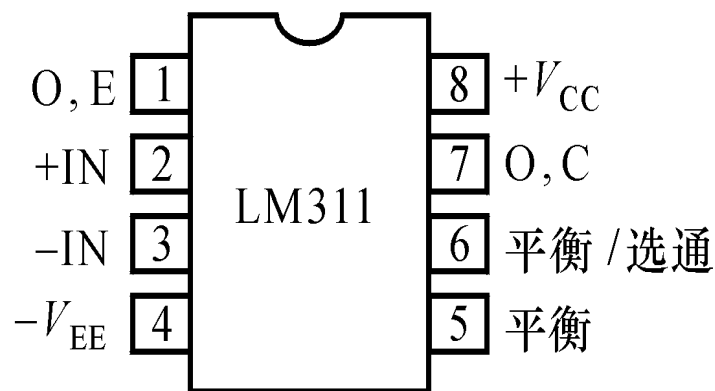
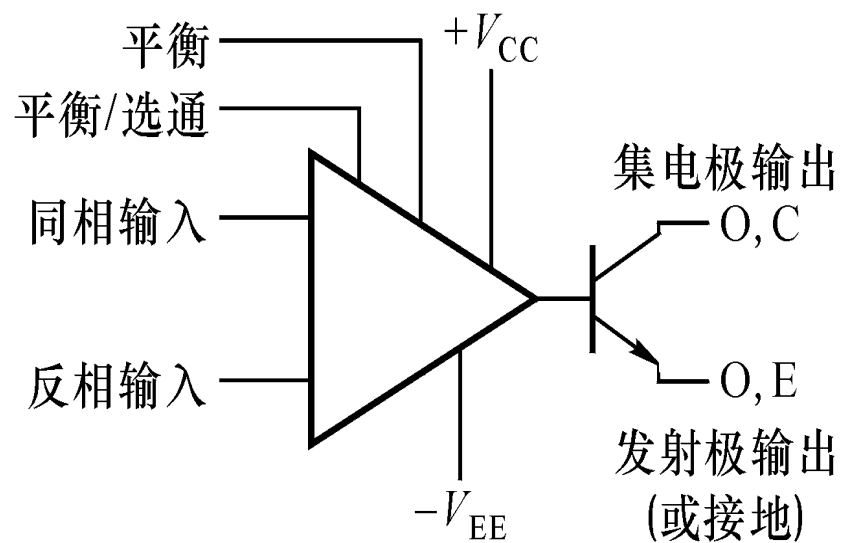
➤ LM311型集成比较器

特点： 电源电压可以单组+5V，也可±15V，适应范围宽；输出与TTL或CMOS电平兼容；可以直接驱动多种负载（灯泡、继电器等）。

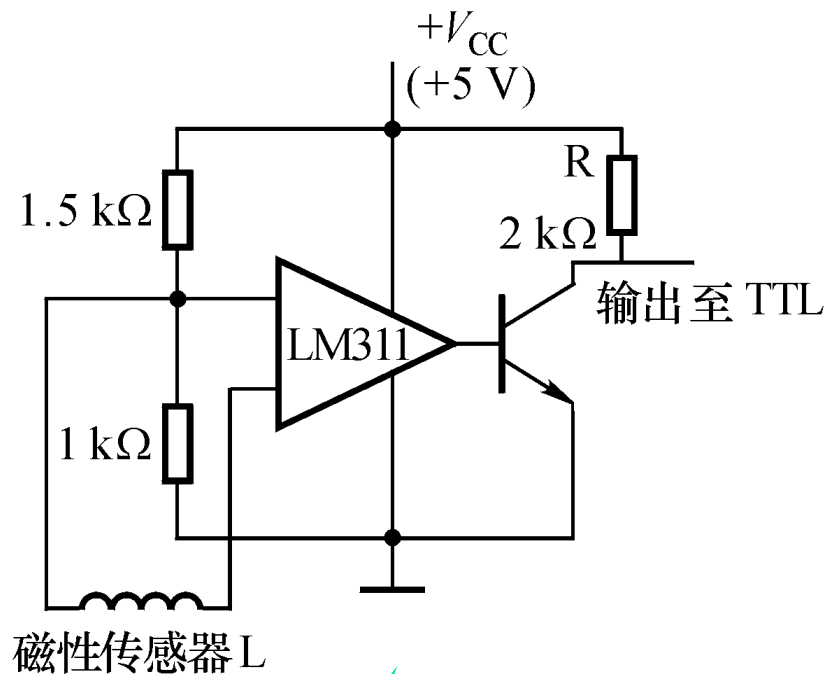


LM311的几种实际连接

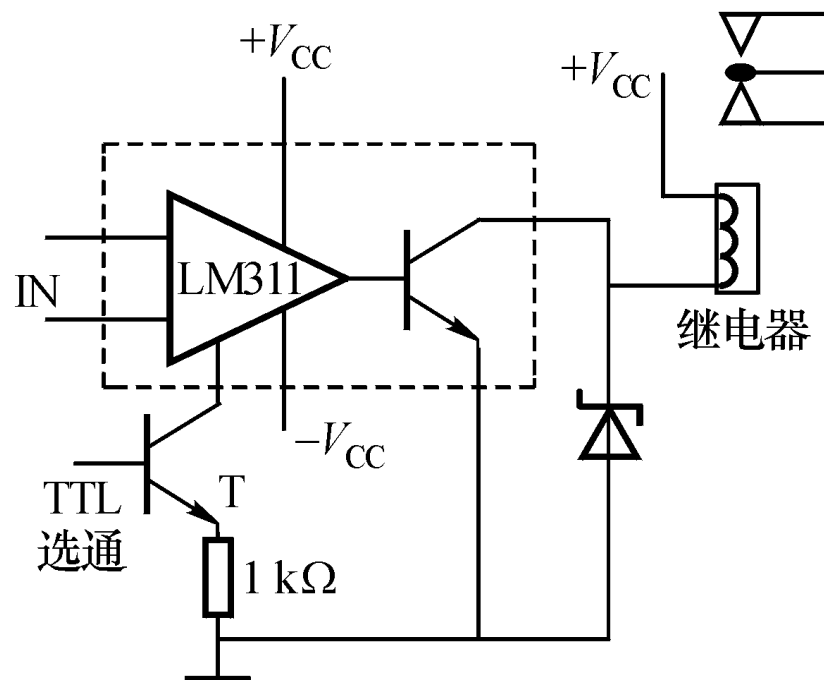




两种典型应用



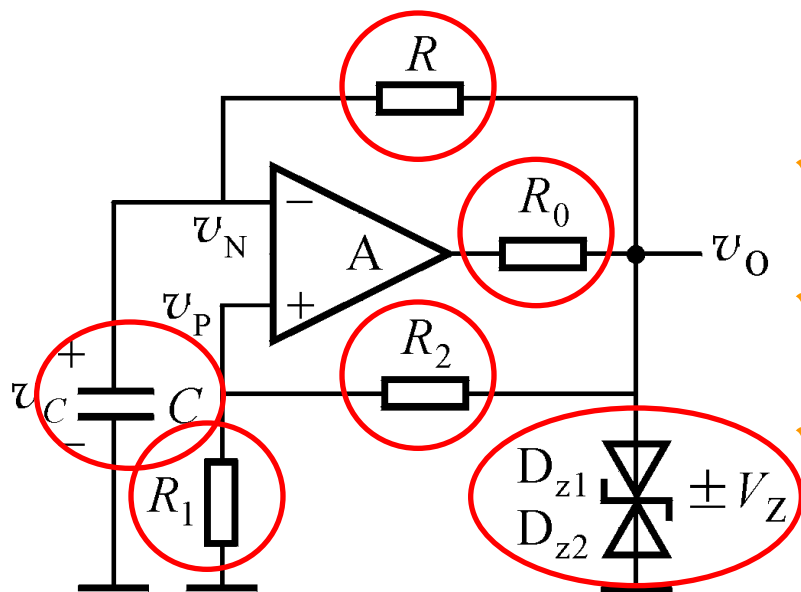
磁性测量
电路



继电器驱动
电路

4.5.3 非正弦波发生器

■ 一、由集成运放组成的非正弦波发生器



✓ R 、 C ：电容充放电回路。

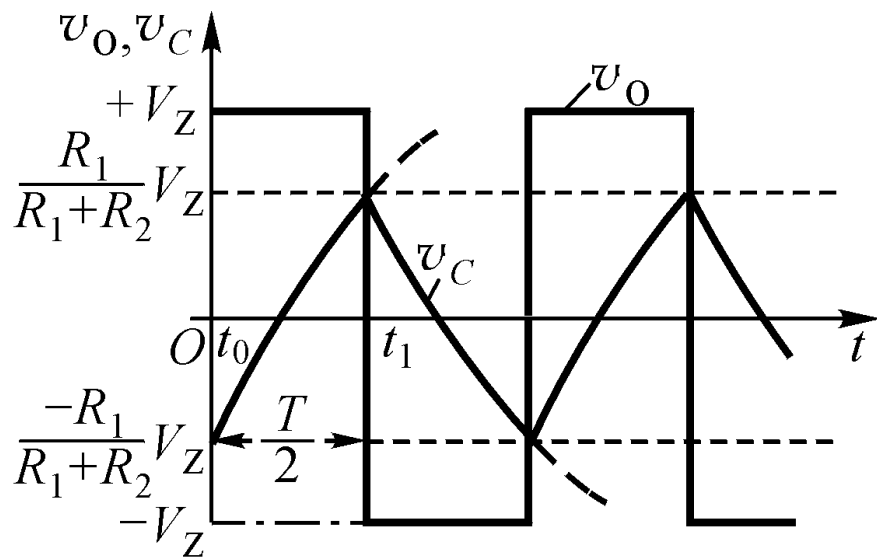
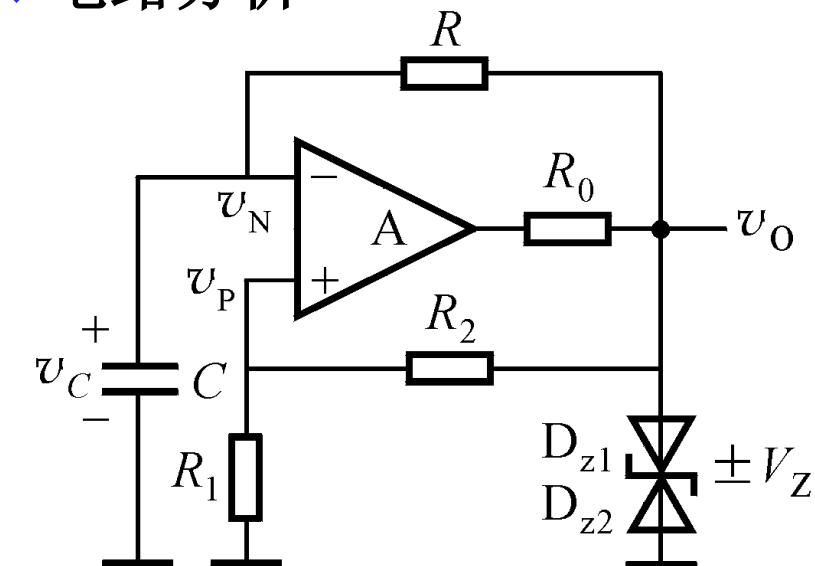
✓ R_0 、 D_{z1} 、 D_{z2} ：输出双向限幅电路。

✓ R_1 、 R_2 ：反向滞回比较器。

振荡原理

将输出电压 v_O 经 RC 电路积分后，
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。

❖ 电路分析



✓ 设上电瞬间 ($t = 0$) : $v_0 = +v_z$ 。

$$V_{(-)} = V_C(0^+) = 0 \quad V_{(+)} = +V_z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

电容C充电, v_0 保持 $+v_z$ 。

✓ 设 $t = t_1$ 时刻:

$v_{(-)} = v_c$ 增长至略大于 $v_{(+)}$
比较器的输出翻转为 $-v_z$ 。

$$V_{(-)} = +V_z \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad V_{(+)} = -V_z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

电容C放电, v_0 保持 $-v_z$ 。

✓ 设 $t = t_2$ 时刻:

$v_{(-)} = v_c$ 下降至略小于 $v_{(+)}$
比较器的输出翻转为 $+v_z$ 。

$$V_{(-)} = -V_z \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad V_{(+)} = +V_z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

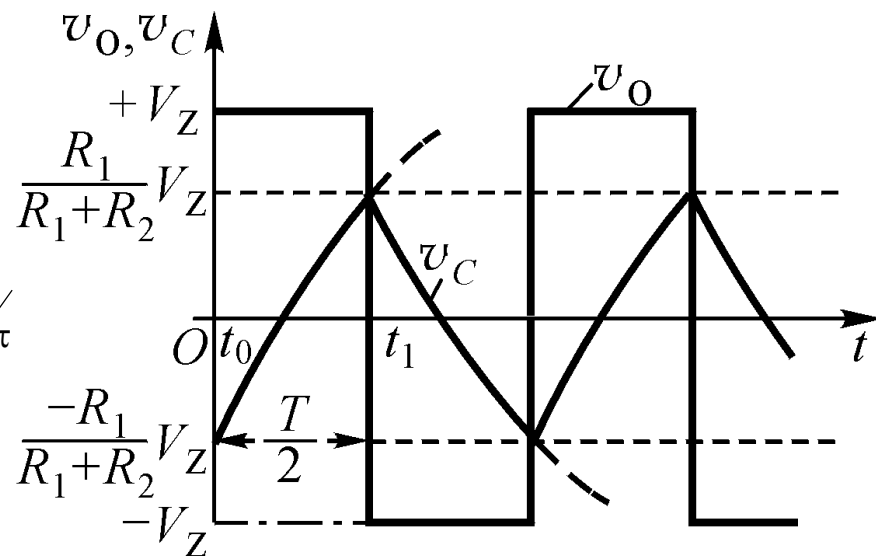
电容C充电, v_0 保持 $+v_z$ 。

❖ 技术指标

➤ 振荡周期（或频率）

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

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



✓ 充电 $v_C(\infty) = +V_Z$, $v_C(t_0^+) = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, $v_C(t_1) = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

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

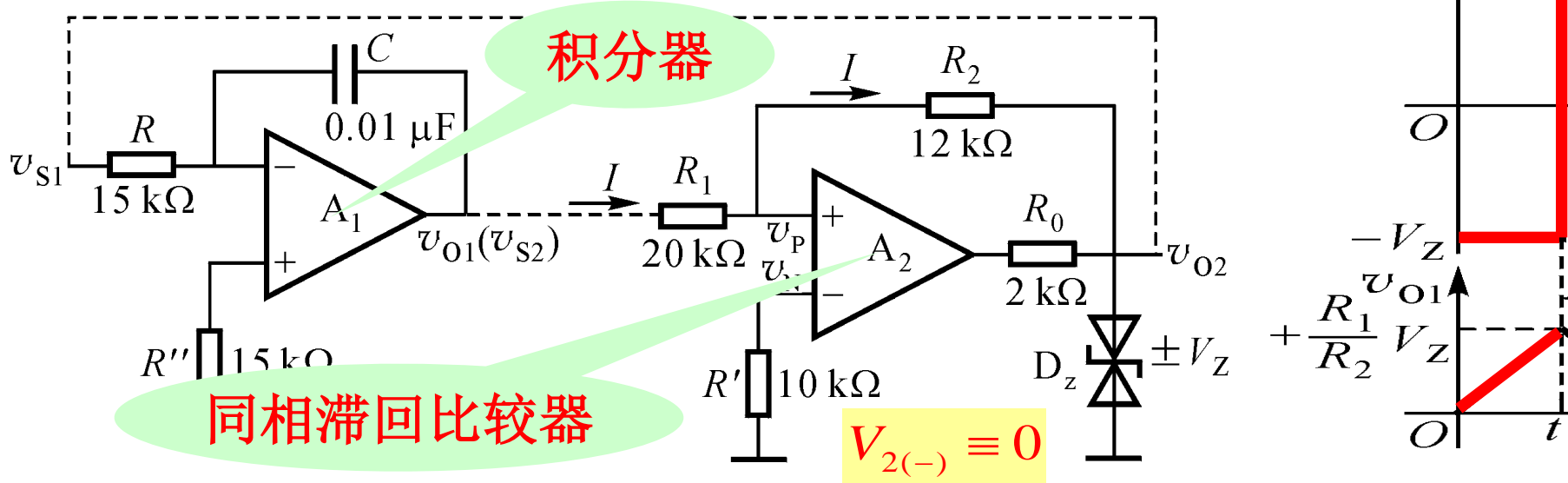
$$T_{\text{放}} = RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

✓ 放电 $v_C(\infty) = -V_Z$, $v_C(t_1^+) = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, $v_C(t_2) = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

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

➤ 振荡幅度

❖ 线性良好的三角波和锯齿波（恒流充放电）

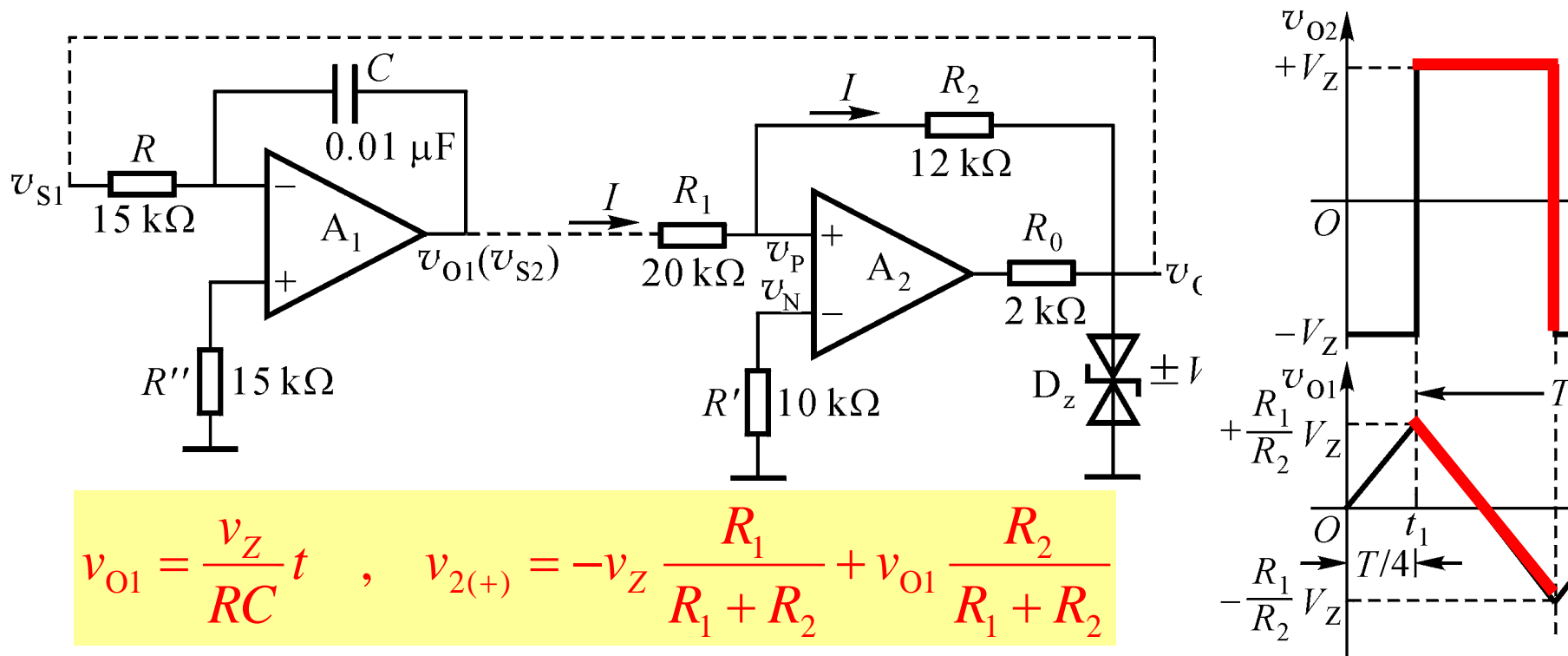


✓ 设上电瞬间 ($t = 0$) : $v_{O2} = -v_z$, $v_{O1} = -v_C = 0$ 。

$$v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{-v_Z}{R} dt + v_{O1}(0^+) = \frac{v_Z}{RC} t \quad \text{积分器负电流充电}$$

$$v_p = -v_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

v_{O2} 保持 $-v_z$

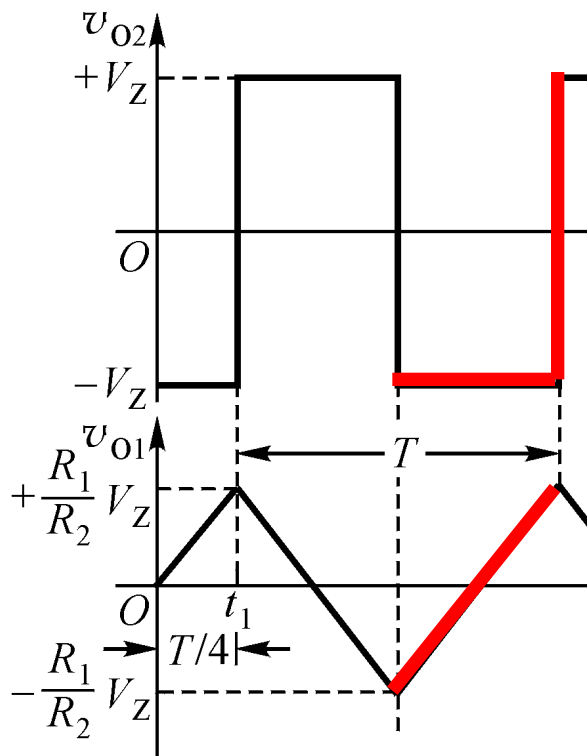
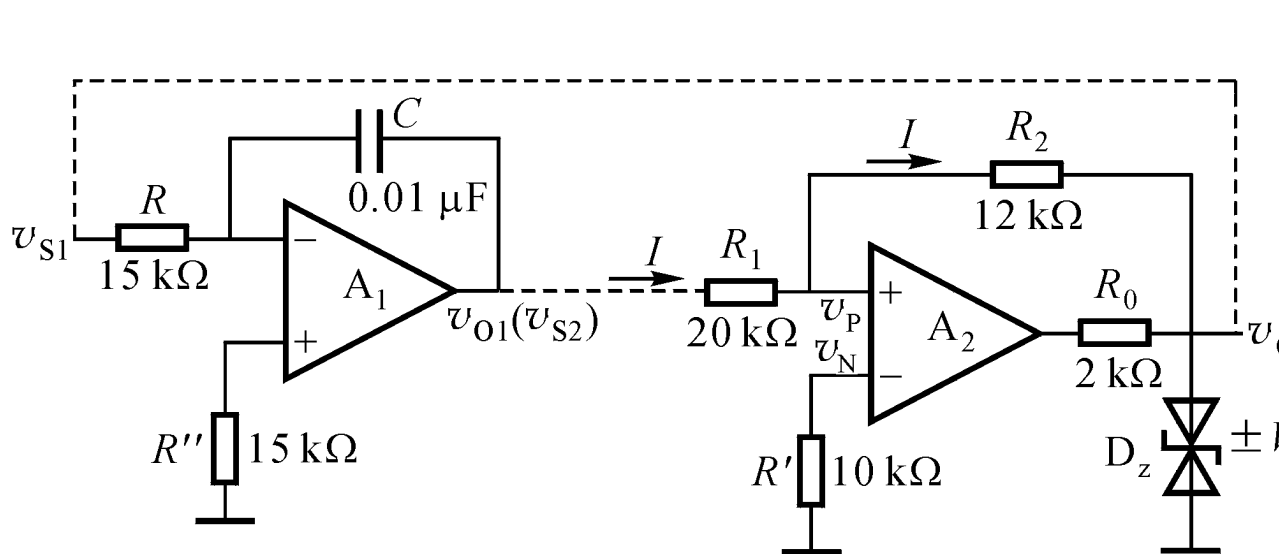


✓ 设 $t = t_1$ 时刻，比较器翻转： $v_{O2} = +v_Z$ 。电容器正电流充电

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

$$v_p = +v_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

v_{O2} 保持 $+v_Z$



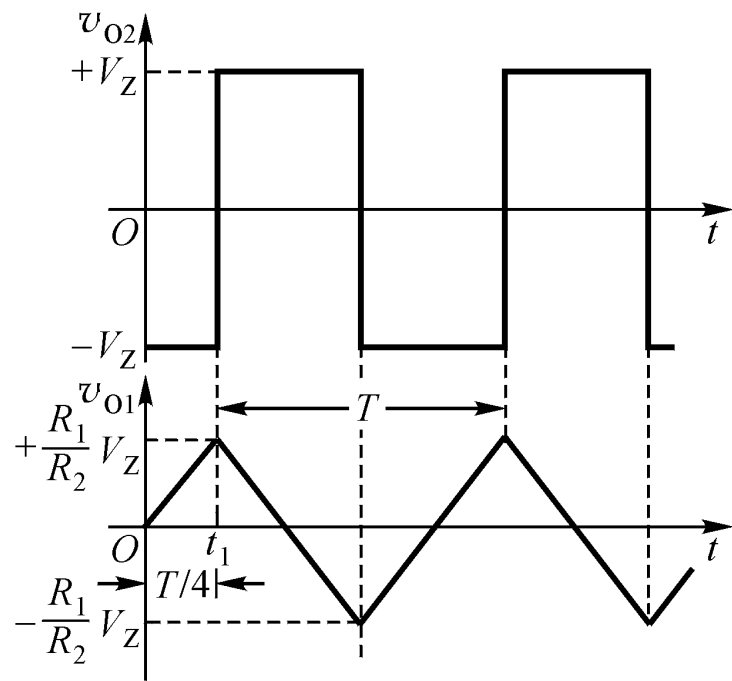
$$v_{O1} = -\frac{v_Z}{RC}(t - t_1) + v_Z \frac{R_1}{R_2}, \quad v_{2(+)} = +v_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

✓ 设 $t = t_2$ 时刻，比较器翻转： $v_{O2} = -v_Z$ 。 电容 负电流充电

$$v_{O1} = -v_C = -\frac{1}{C} \int_{t_2}^t \boxed{\frac{-v_Z}{R}} dt + v_{O1}(t_2^+) = +\frac{v_Z}{RC}(t - t_2) \boxed{-v_Z \frac{R_1}{R_2}}$$

$$v_{2(+)} = -v_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} + v_{O1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

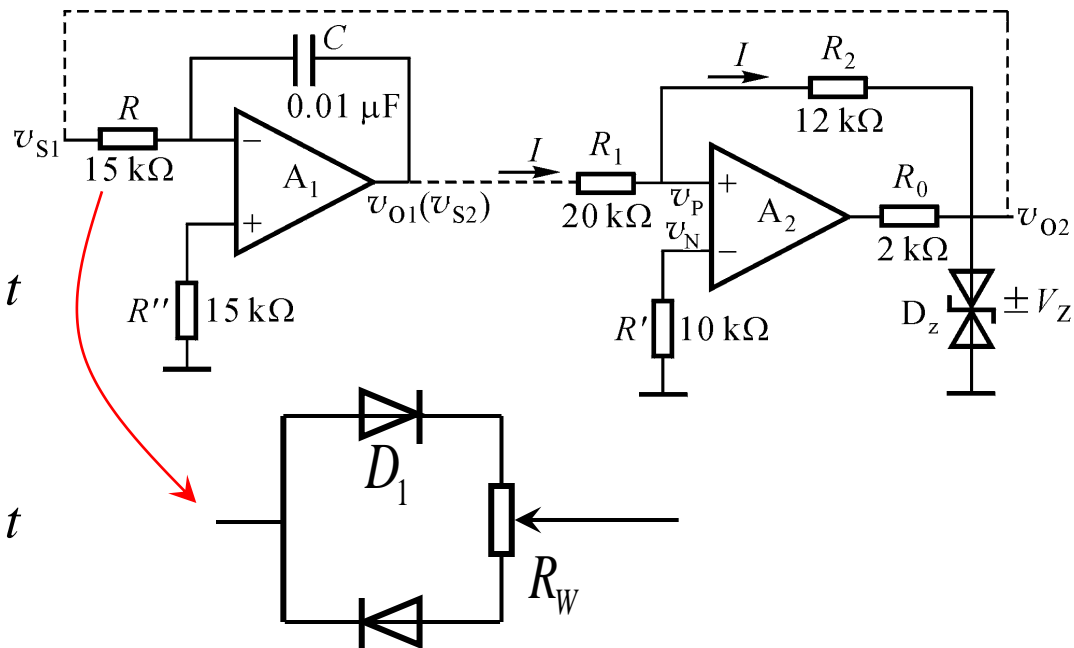
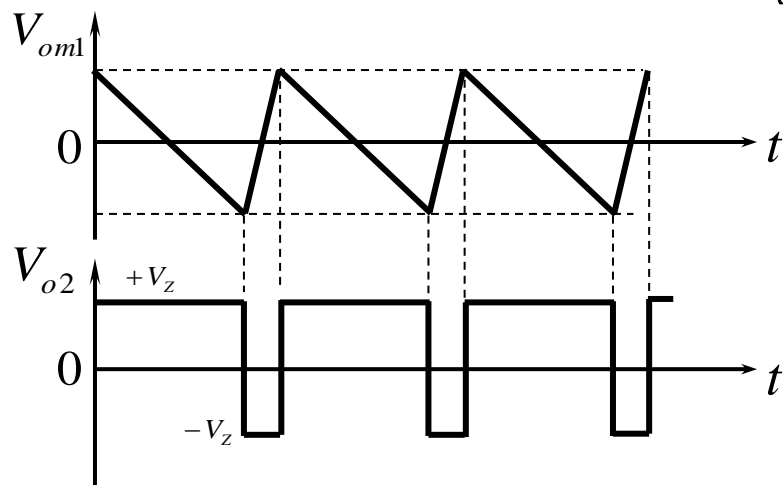
v_{O2} 保持 $-v_Z$



$$2V_{om1} = \frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{2}} V_Z dt = \frac{V_Z}{RC} \cdot \frac{T}{2}$$

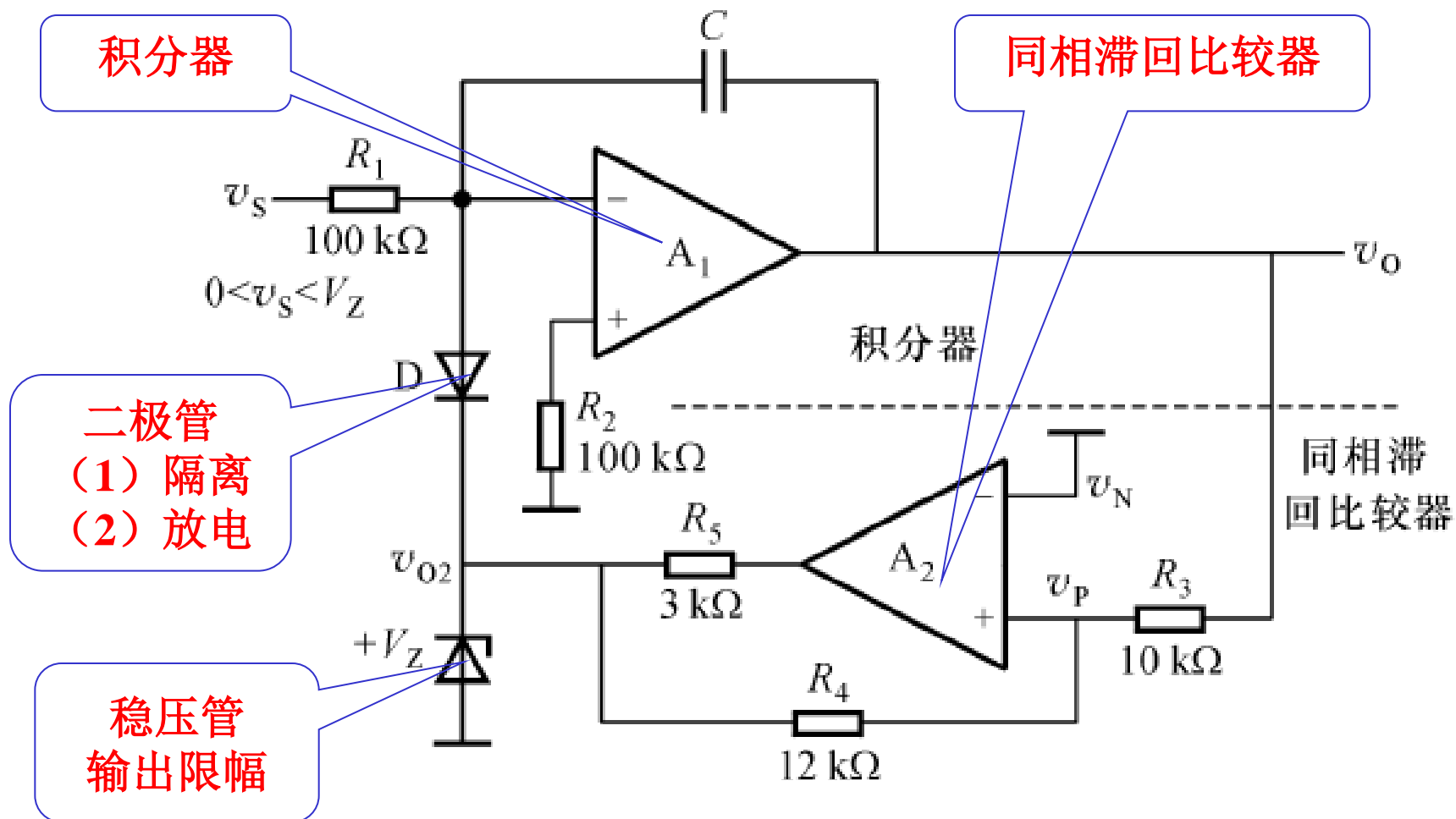
$$T = 4RC \frac{V_{om1}}{V_Z} = 4RC \frac{R_1}{R_2}$$

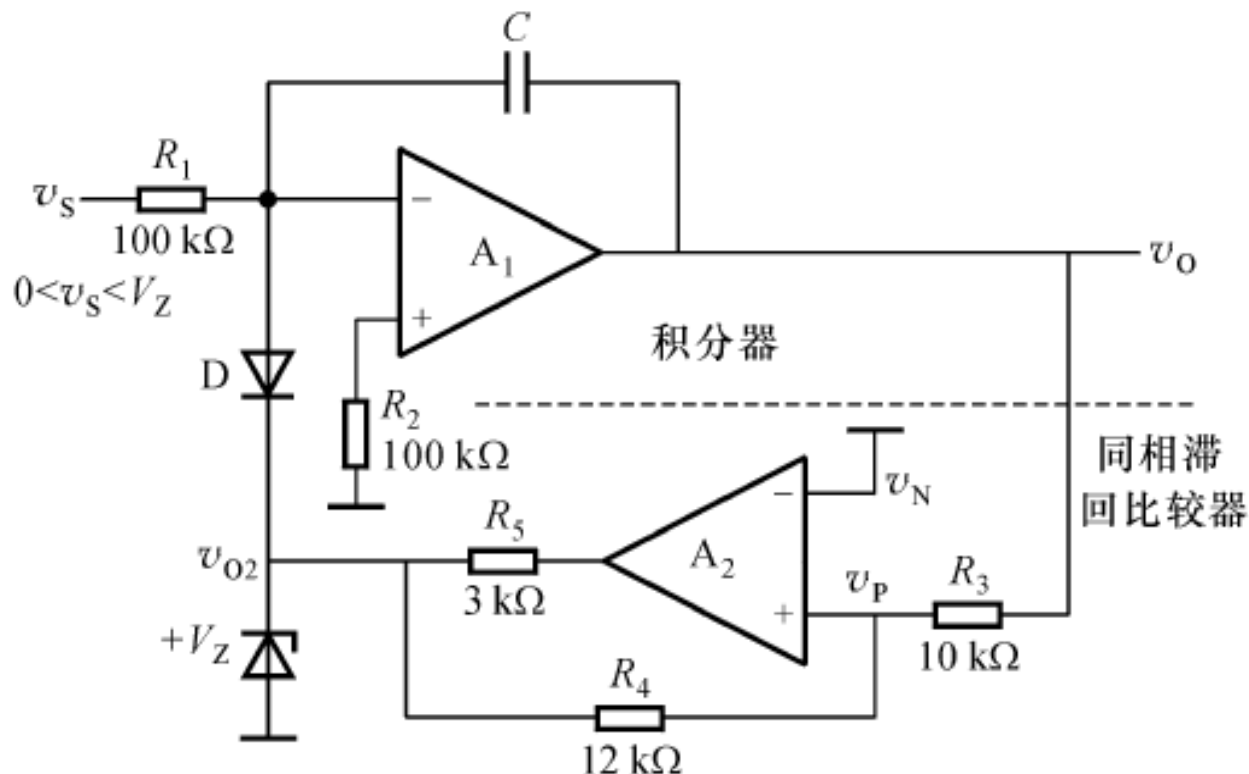
$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4RR_1C}$$



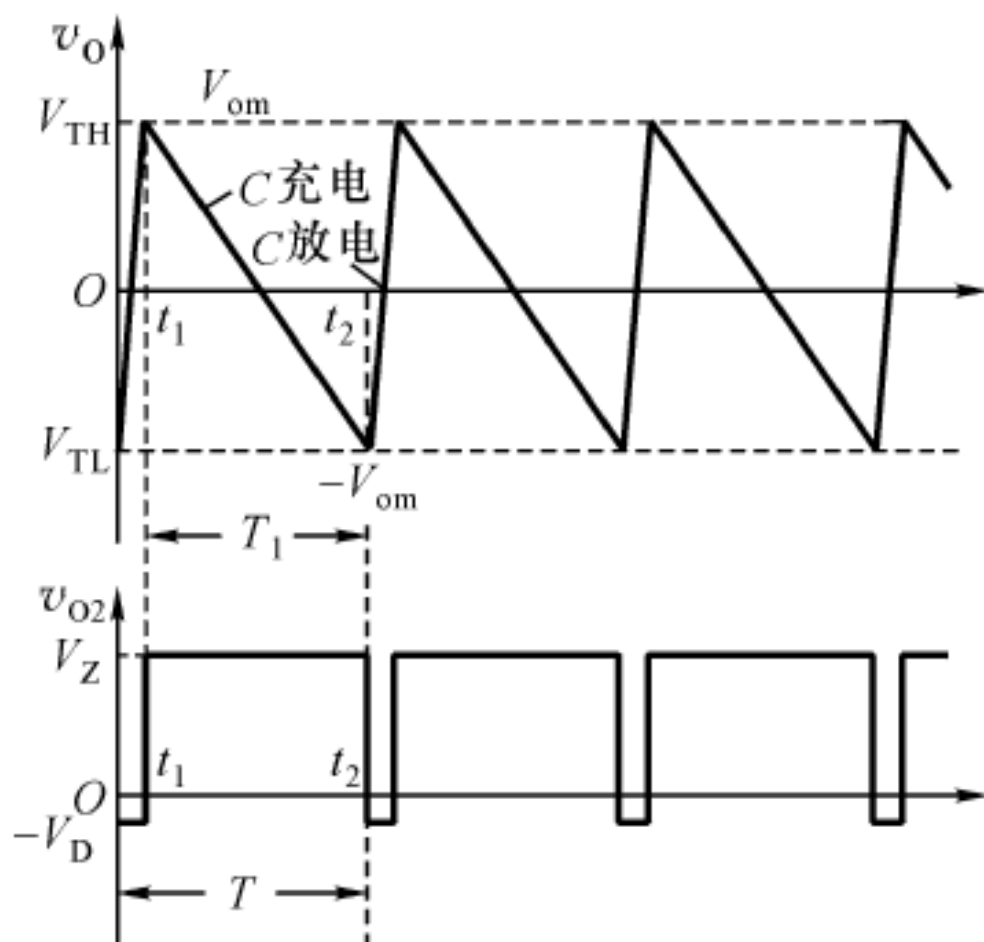
4.6 压控振荡器

电路的振荡频率与控制电压成比例，即**电压控制振荡频率**。





- 设比较器输出高电平，即 $V_{O2} = +V_Z$ ；
- D 截止，积分器反向积分， V_O 线性下降；
- 当 V_O 下降至 0 并继续下降至 V_{TL} 时，比较器输出低电平；
- D 导电， C 放电， V_O 快速上升；
- 当 V_O 升至 V_{TH} 时，比较器输出又变高电平；



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

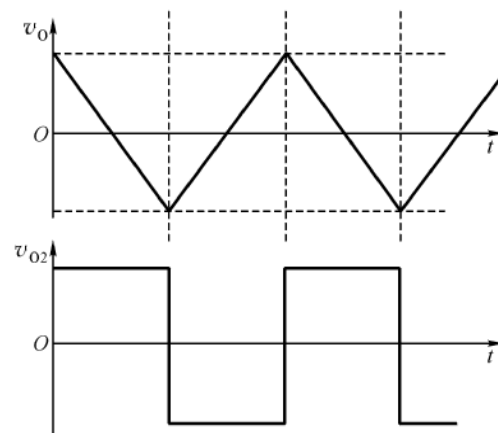
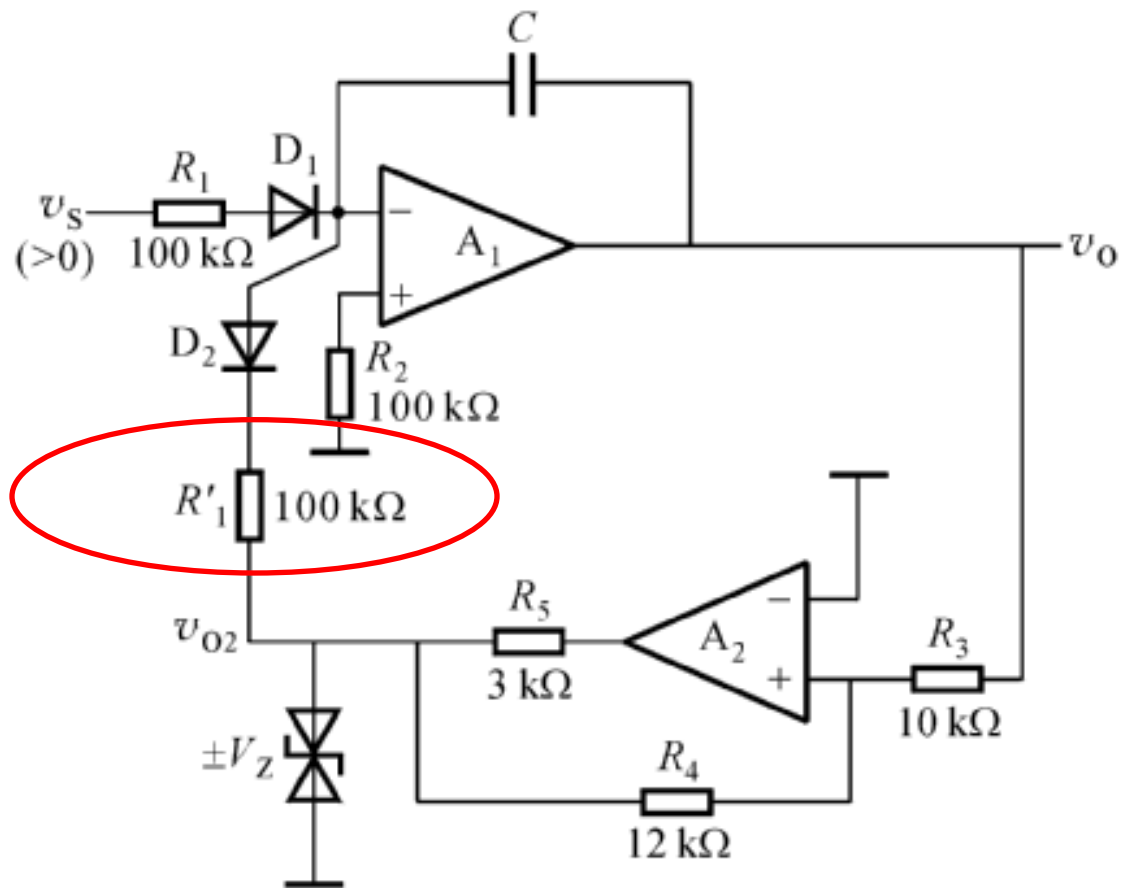
$$\frac{V_{om}}{R_3} = \frac{V_Z}{R_4}$$

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

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

反向积分时间长，而放电时间很短，
振荡周期由反向积分时间决定。

充放电电流相等的压控振荡器



作业

■ 4.1, 2, 3, 5, 6, 7

■ 4.8, 9, 10, 11

■ 4.12, 13, 14

正弦波发生

比较器

方波三角波

讨论：图示为光控电路的一部分，它将连续变化的光电信号转换成离散信号（即不是高电平，就是低电平），电流 I 随光照的强弱而变化。

(1)在 A_1 和 A_2 中，哪个工作在线性区？哪个工作在非线性区？为什么？

(2)试求出表示 u_O 与 i_I 关系的传输特性。

