

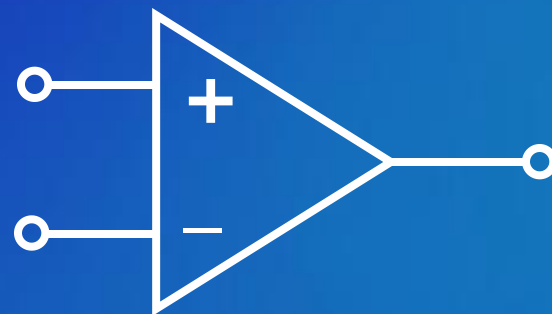
8.4 电压比较器

运放的工作
状态：



线性

非线性



确定运放工作区的方法：判断电路中**有无负反馈**。

**判
别**

有无反馈？



有

无



负反馈

正反馈



运放
线性

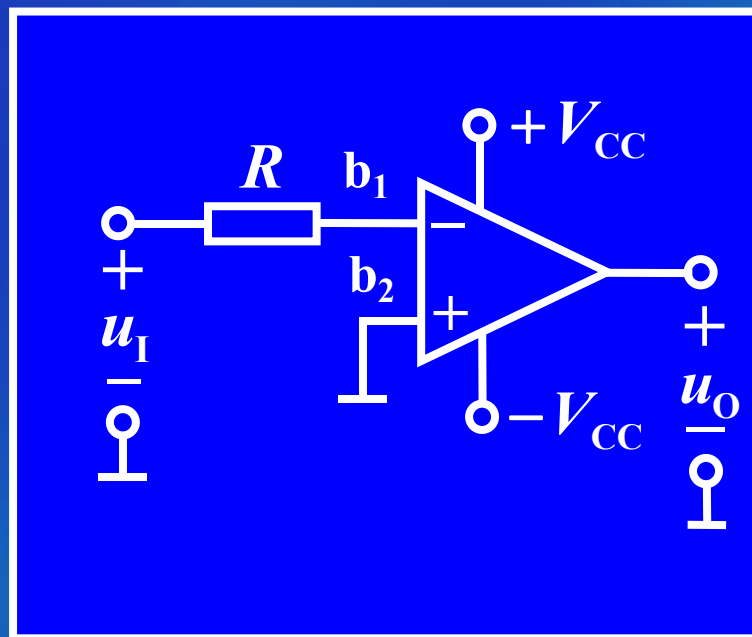
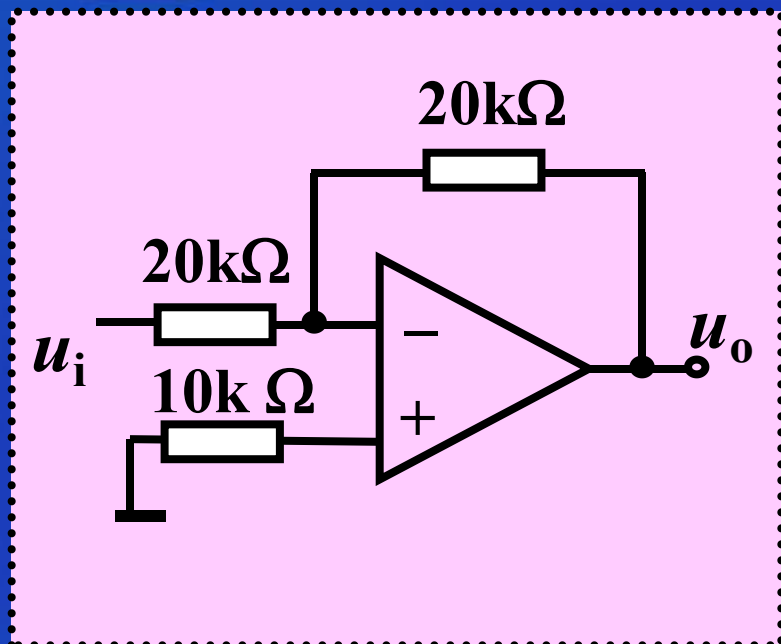


运放
非线性

上页

下页

后退



判
别

有无反馈？

有



负反馈



运放
线性

正反馈



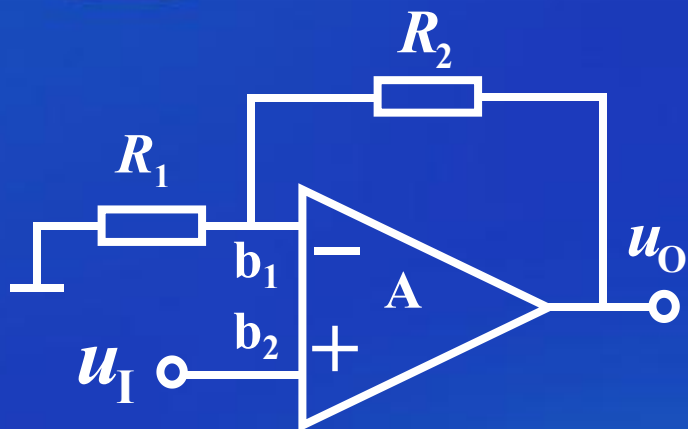
运放非
线性

无

上页

下页

后退



有负反馈

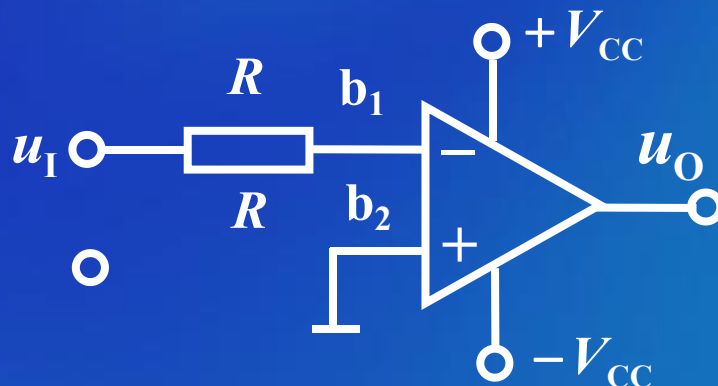
运放线性

$$u_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_I = 3u_I$$

$$u_I = 10\text{mV} \quad | \quad u_O = 30\text{mV}$$

$$u_I = -30\text{mV} \quad | \quad u_O = -90\text{mV}$$

线性



无反馈

运放非线性

$$u_O = -A_{ud} u_I$$

$$u_I = 10\text{mV} \quad | \quad u_O \approx -V_{cc}$$

$$u_I = -30\text{mV} \quad | \quad u_O \approx V_{cc}$$

非线性

理想运放

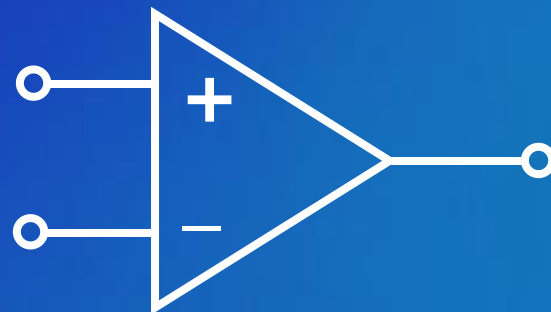
$$A_{ud} \approx \infty$$

线性应用： 是指由运放组成的电路处于线性状态，输出与输入的关系 $u_O = f(u_I)$ 是线性函数。

反相比例器、加法器、积分器等

特点：电路存在负反馈

“虚短”、“虚断” 是分析工具



非线性应用： 是指由运放组成的电路处于非线性状态，输出与输入的关系 $u_O = f(u_I)$ 是非线性函数。

- 特点：
1. “虚短” 不成立
 2. 输入电阻仍可以认为很大，可用 “虚断”
 3. 输出电阻仍可以认为是0

8.4 电压比较器

功能：用来比较输入电压**相对大小**的电路。

输入端的信号有 
 比较电压（基准电压或参考电平）
 被比较的输入电压

输出端的信号状态——只有高电平和低电平。

工作原理——输入信号偏离参考电压时，输出电压将发生**跃变**。

将输出电压发生跃变的现象称为比较器**翻转**。

何为跃变？



高电平 \Rightarrow 低电平

低电平 \Rightarrow 高电平

将输出电压发生跃变的现象称为比较器**翻转**。

8.4.1 单门限比较器

1. 零电平比较器

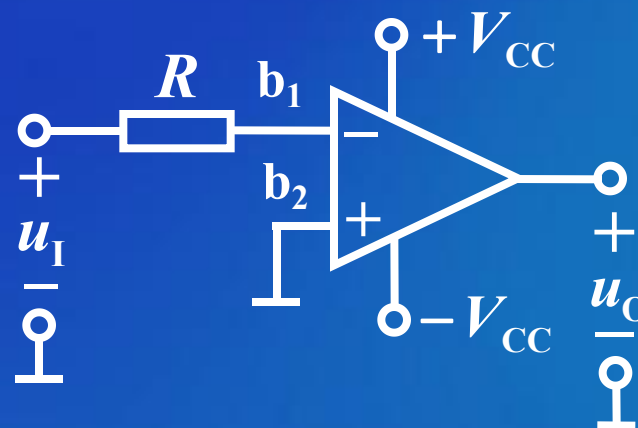
(1) 电路组成

(2) 电路特点

a. 运放工作于开环状态

b. $u_{b1} = u_I$, $u_{b2} = 0$

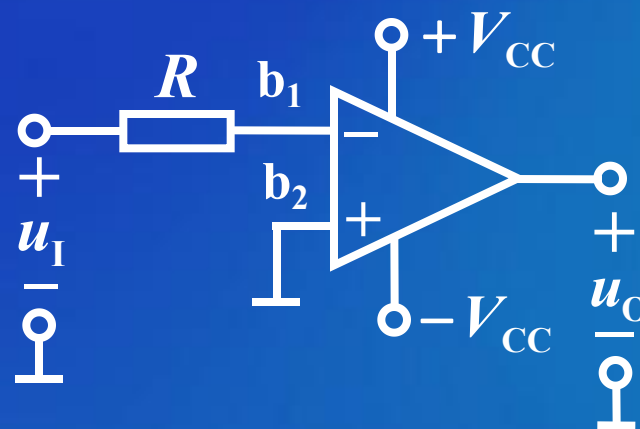
c. 输出电压 $u_O \approx \pm V_{CC}$



(3) 工作原理

a. 当 $u_I < 0$ 时, $u_O \approx +V_{CC}$

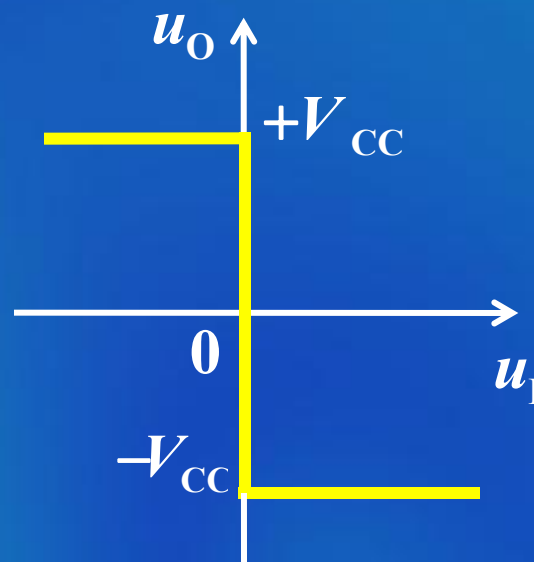
b. 当 $u_I > 0$ 时, $u_O \approx -V_{CC}$



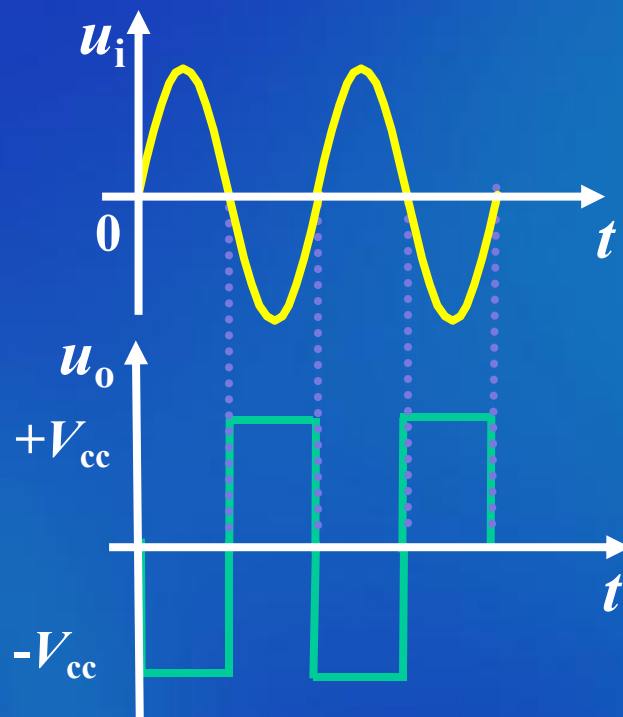
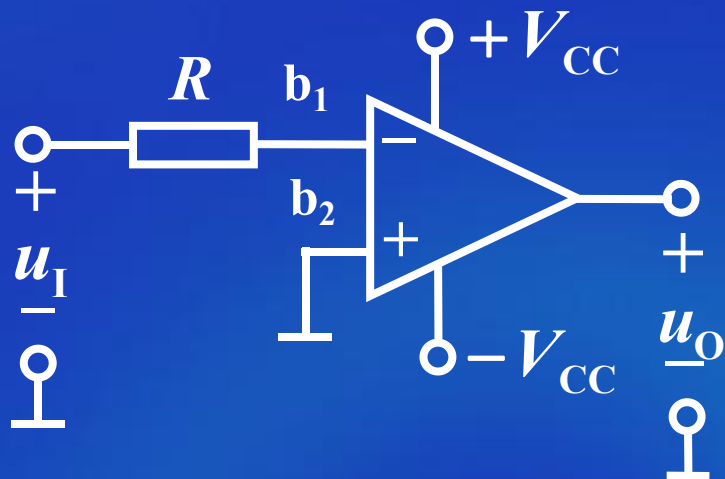
(4) 传输特性

$$u_O = f(u_I)$$

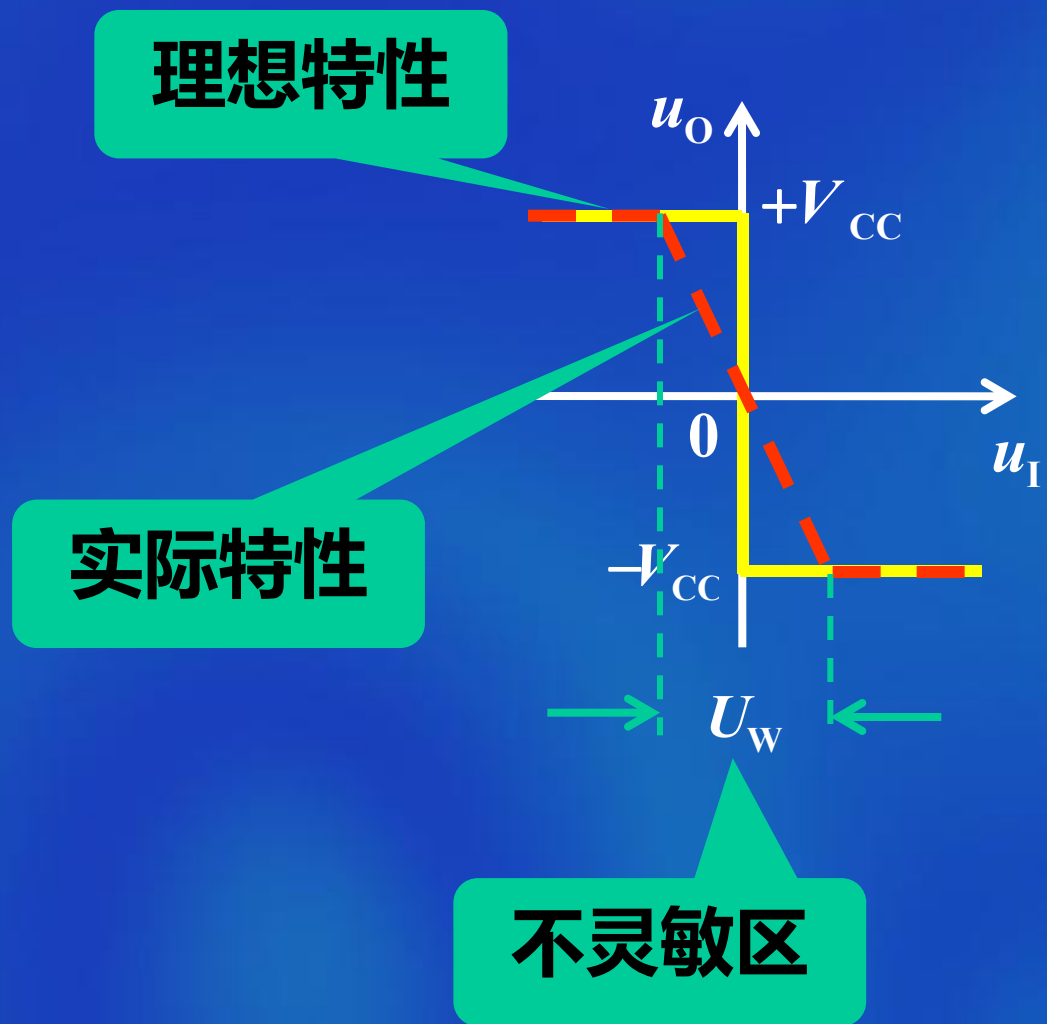
u_I 与零电平（电位）进行比较，故称为零电平比较器。



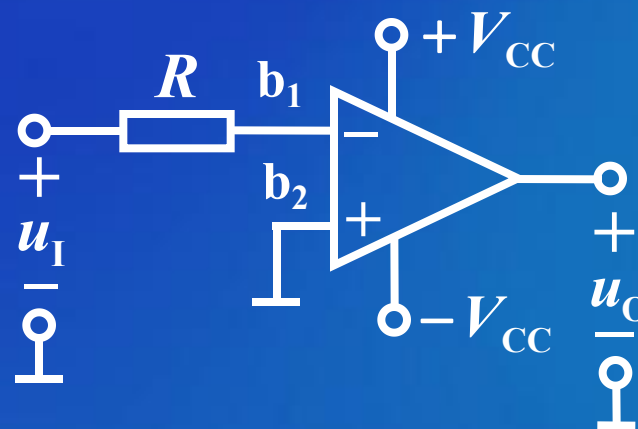
(5) 实际应用



例：利用零电平电压比较器将**正弦波**变为**方波**。



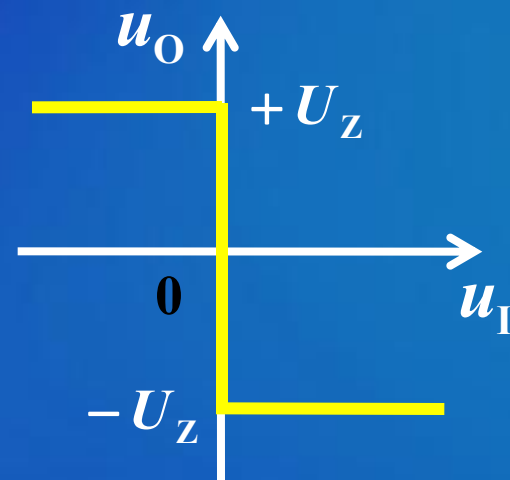
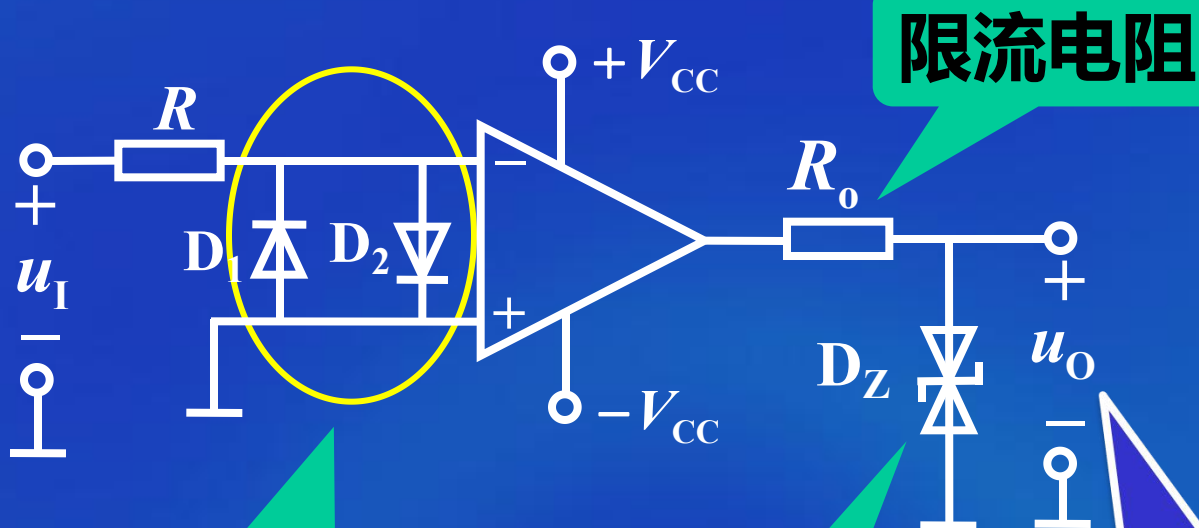
(5) 电路存在的问题



- a. 输出电压基本由电源电压确定。
- b. 输出电平易受电源波动、饱和深度的影响。
- c. 输出电平不易改变。

改进型的零电平比较器

传输特性



输入保护电路

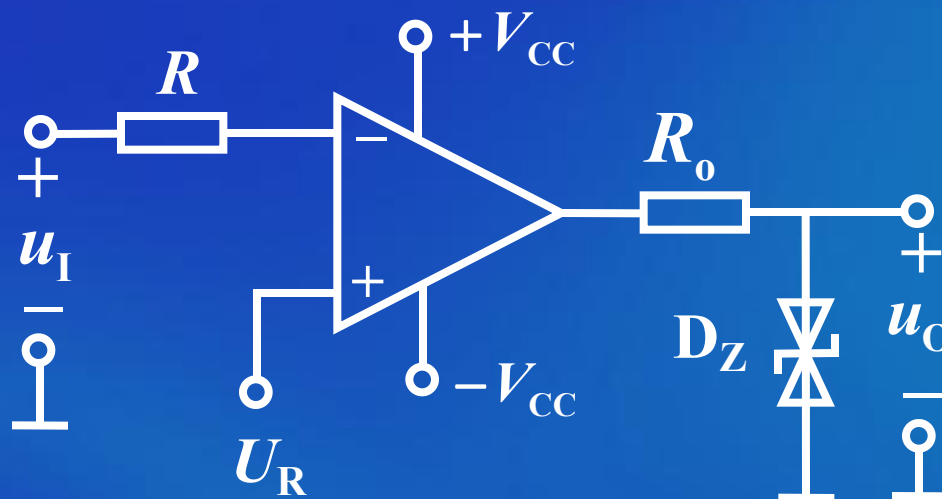
双向限幅稳压管

输出电压 $u_O = \pm U_Z$

2. 非零电平比较器

(1) 电路组成

(2) 电路特点



a. 运放工作于开环状态

b. $u_{b1} = u_I$, $u_{b2} = u_R$

c. 输出电压 $u_O \approx \pm U_Z$

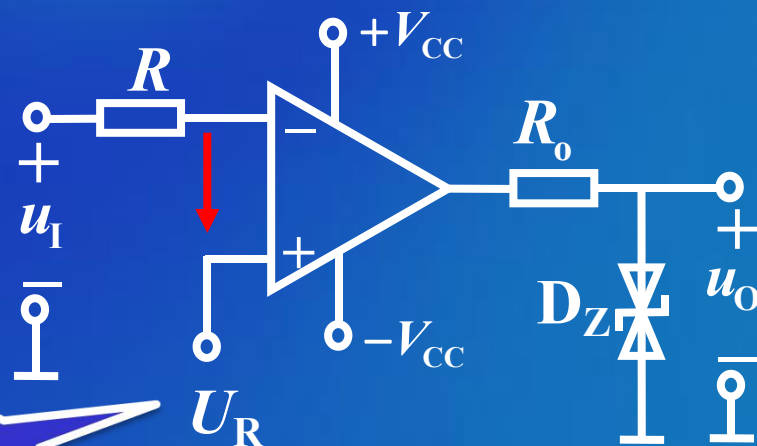
(3) 工作原理

a. 当 $u_I - U_R < 0$, 即 $u_I < U_R$

$$u_O \approx +U_Z$$

b. 当 $u_I - U_R > 0$ 时,

$$u_O \approx -U_Z$$

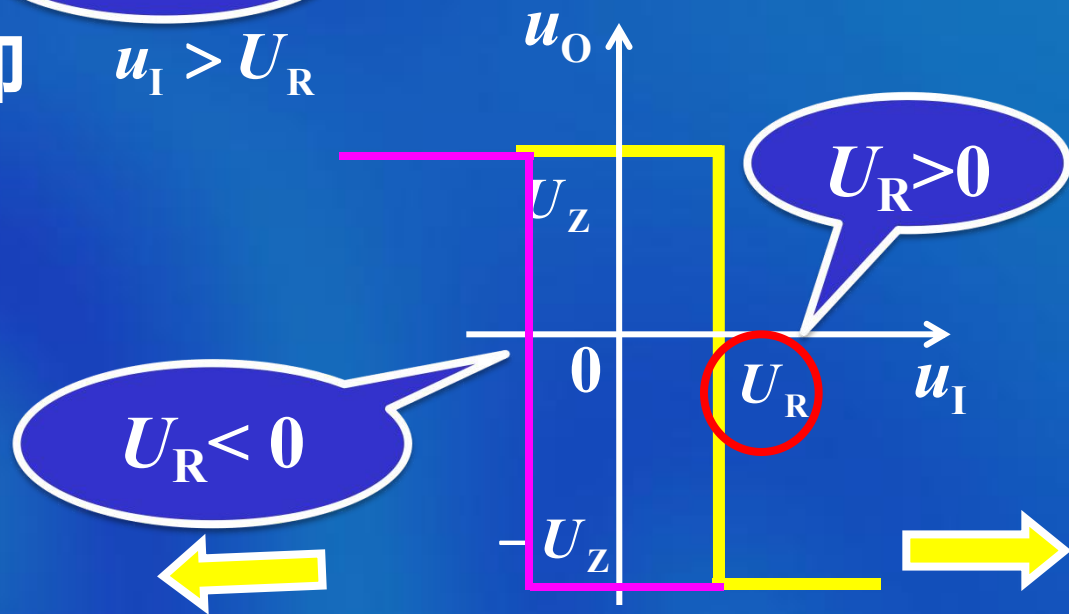


$U_R < 0$?

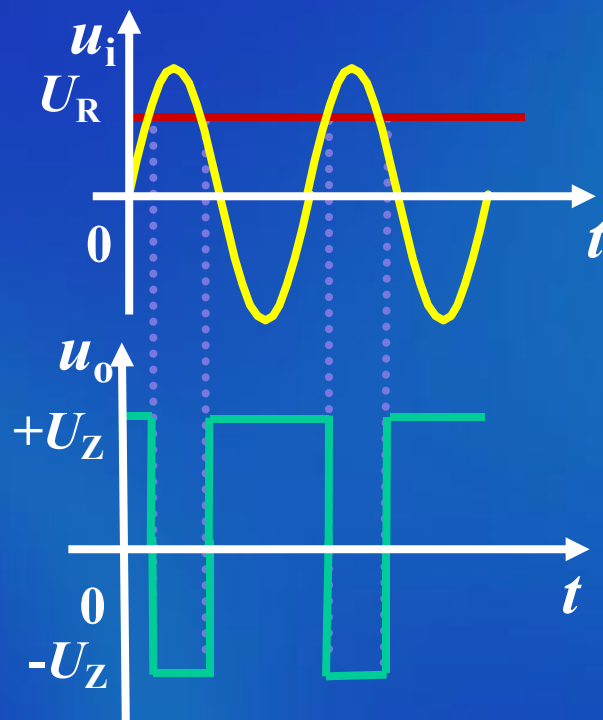
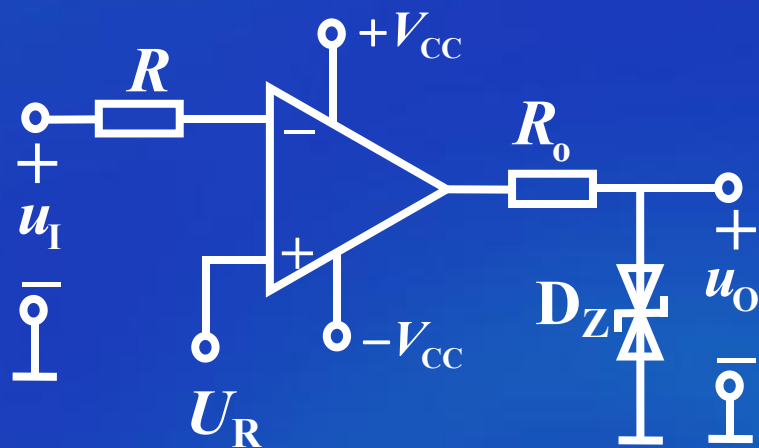
即 $u_I > U_R$

(4) 传输特性

$$u_O = f(u_I)$$



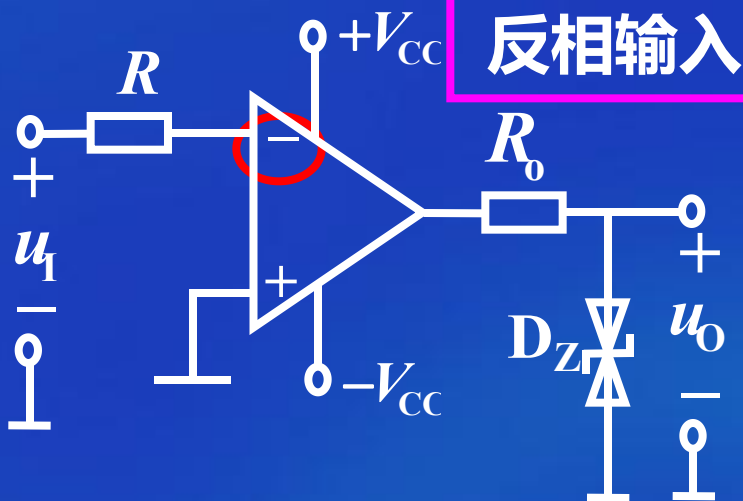
(5) 实际应用



例：利用零电平电压比较器将正弦波变为矩形波。

零电平比较器

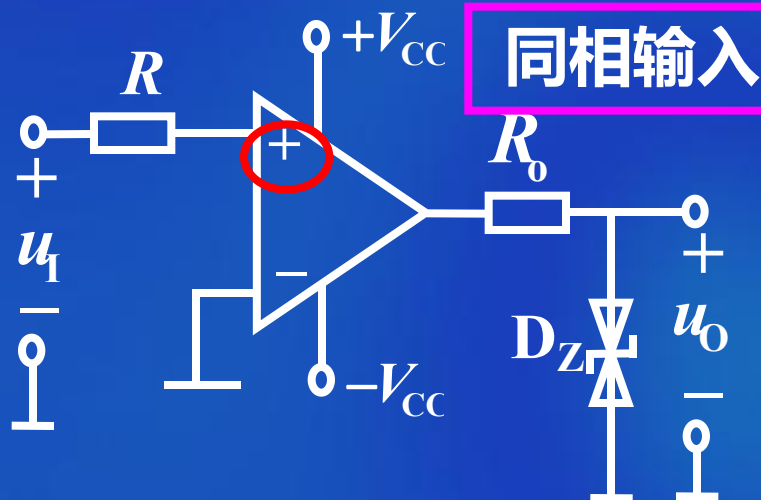
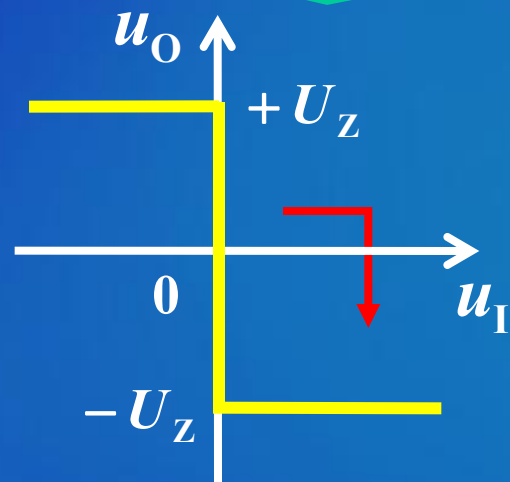
电路



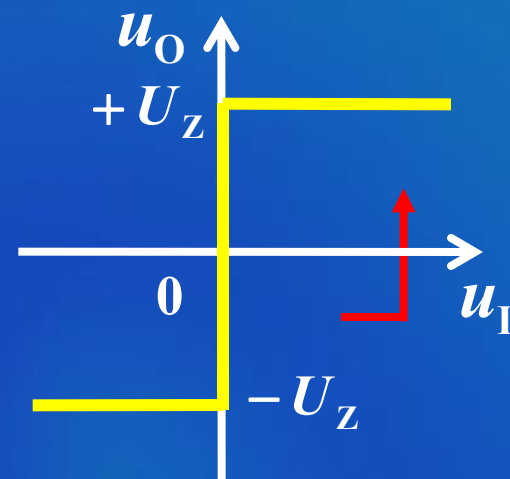
工作原理

- a. 当 $u_I < 0$ 时 ,
 $u_O \approx +U_Z$
- b. 当 $u_I > 0$ 时 ,
 $u_O \approx -U_Z$

传输特性

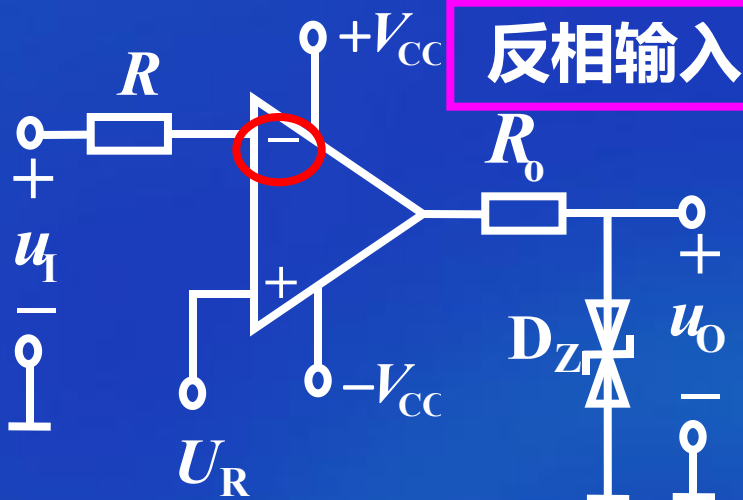


- a. 当 $u_I < 0$ 时 ,
 $u_O \approx -U_Z$
- b. 当 $u_I > 0$ 时 ,
 $u_O \approx +U_Z$



非零电平比较器

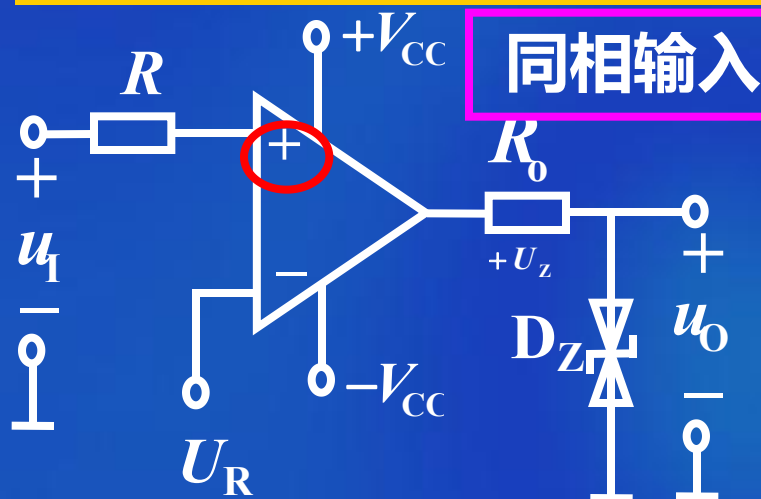
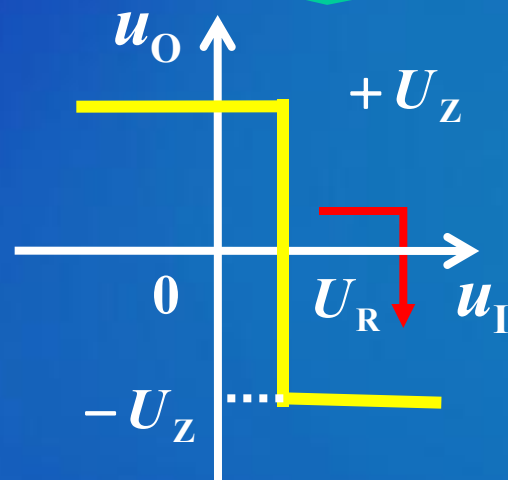
电路



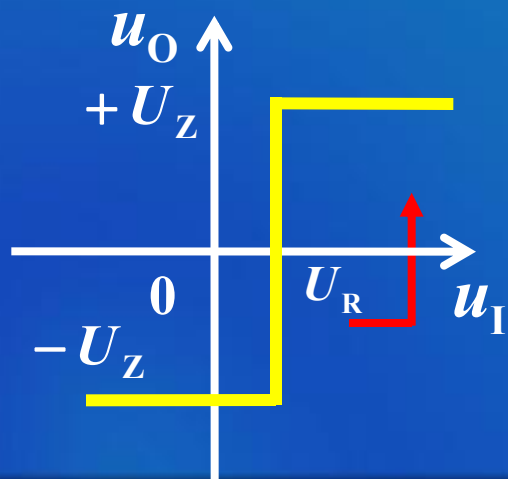
工作原理

- a. 当 $u_I < u_R$ 时 ,
 $u_O \approx +U_Z$
- b. 当 $u_I > u_R$ 时 ,
 $u_O \approx -U_Z$

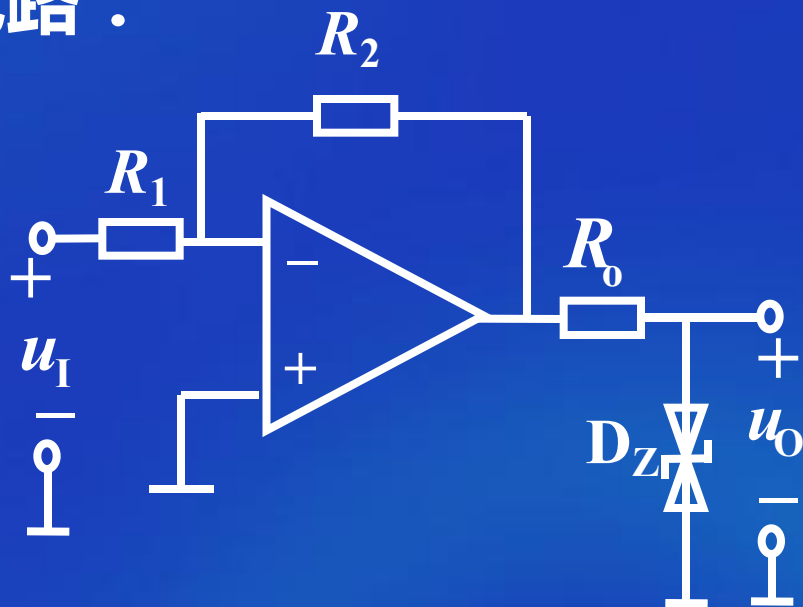
传输特性



- a. 当 $u_I < u_R$ 时 ,
 $u_O \approx -U_Z$
- b. 当 $u_I > u_R$ 时 ,
 $u_O \approx +U_Z$

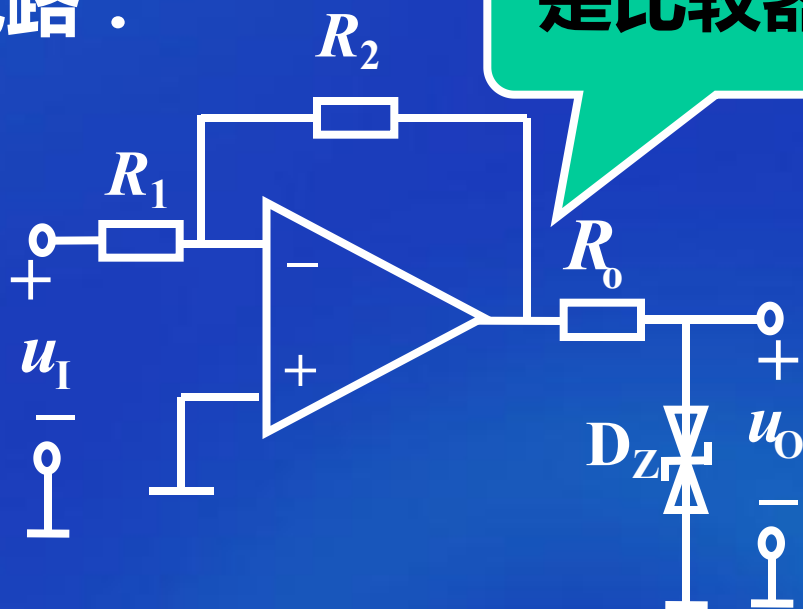


电路：



是比较器吗？

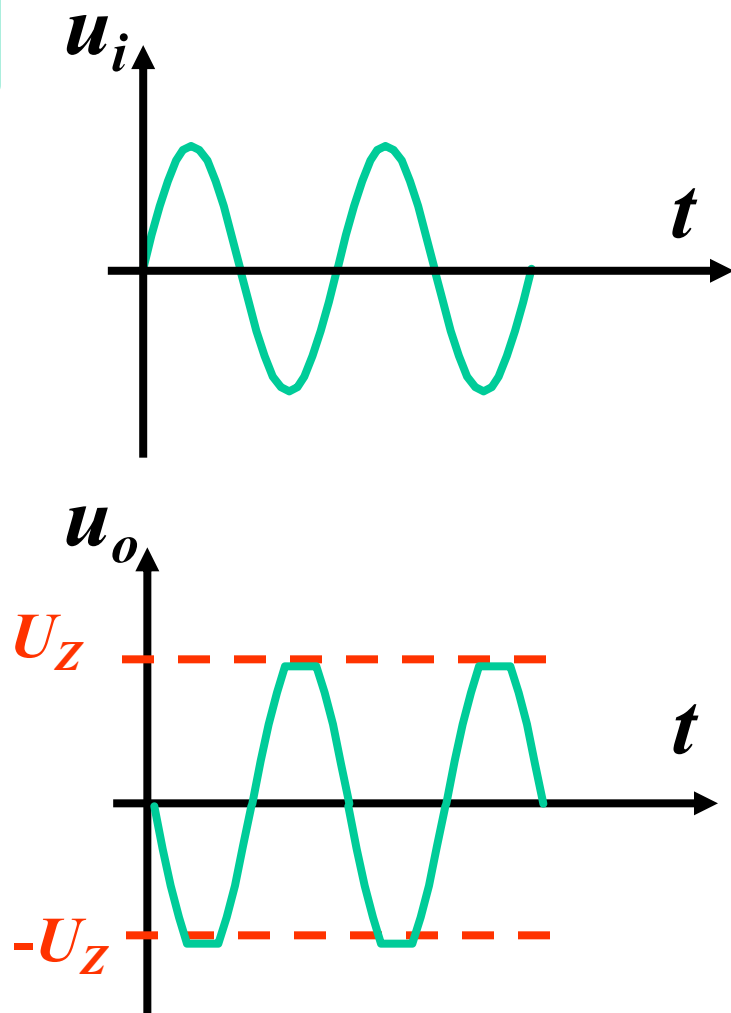
电路：

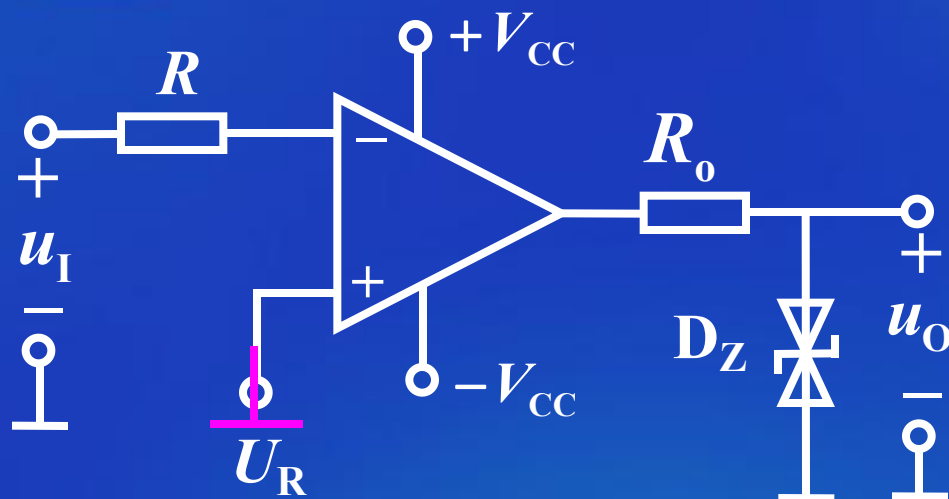


是比较器吗？

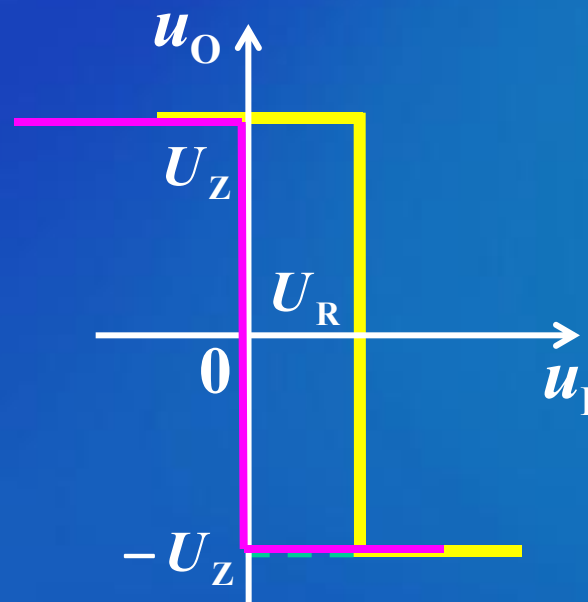
运放处于**线性状态**，但外围电路有非线性元件——稳压二极管。

限幅器





传输特性



问：零电平比较器非零电平比较器区别与联系？

只与一个电位比较：**单门限**

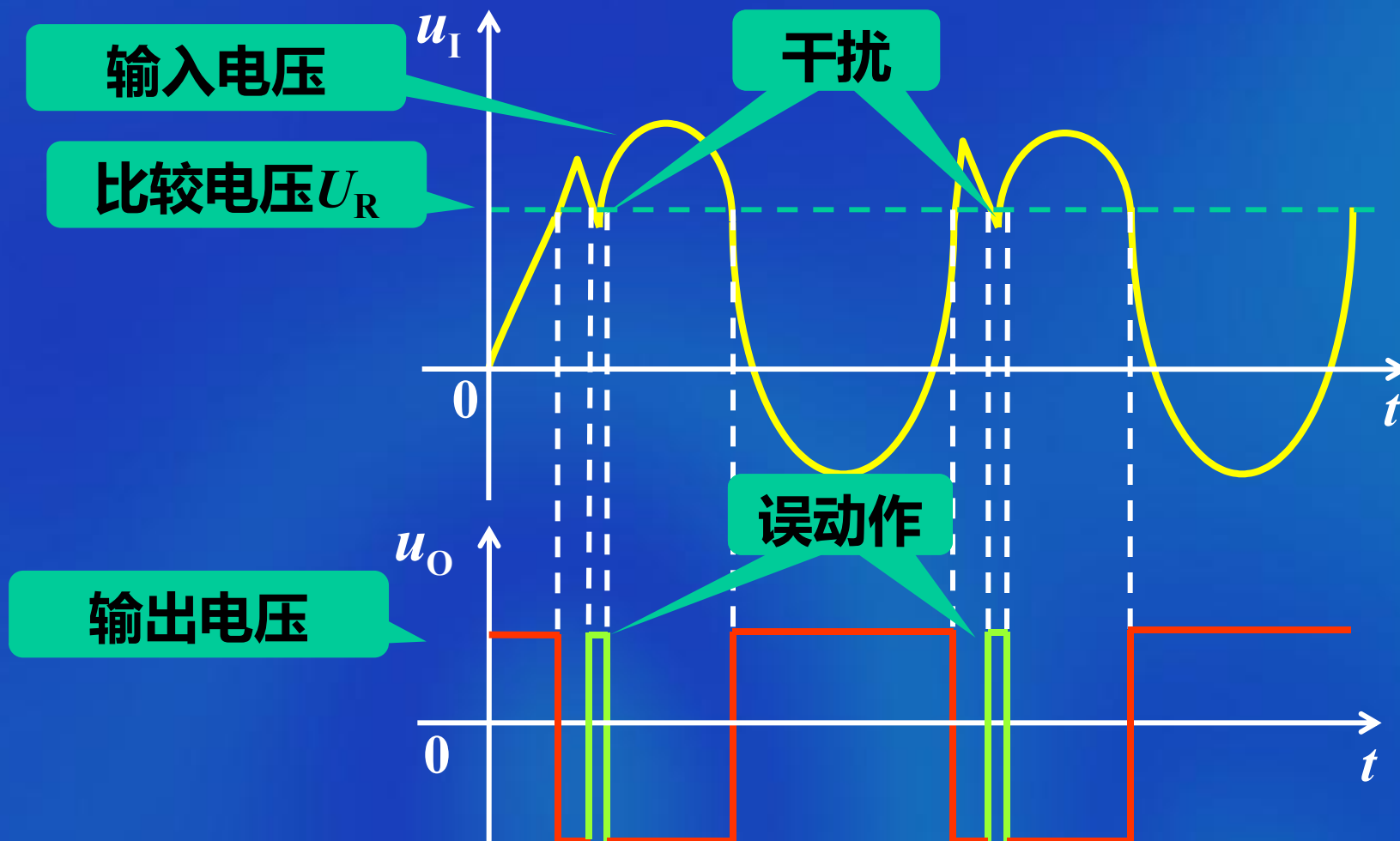
单门限电压比较器的特点

电路简单

灵敏度高

抗干扰能力差

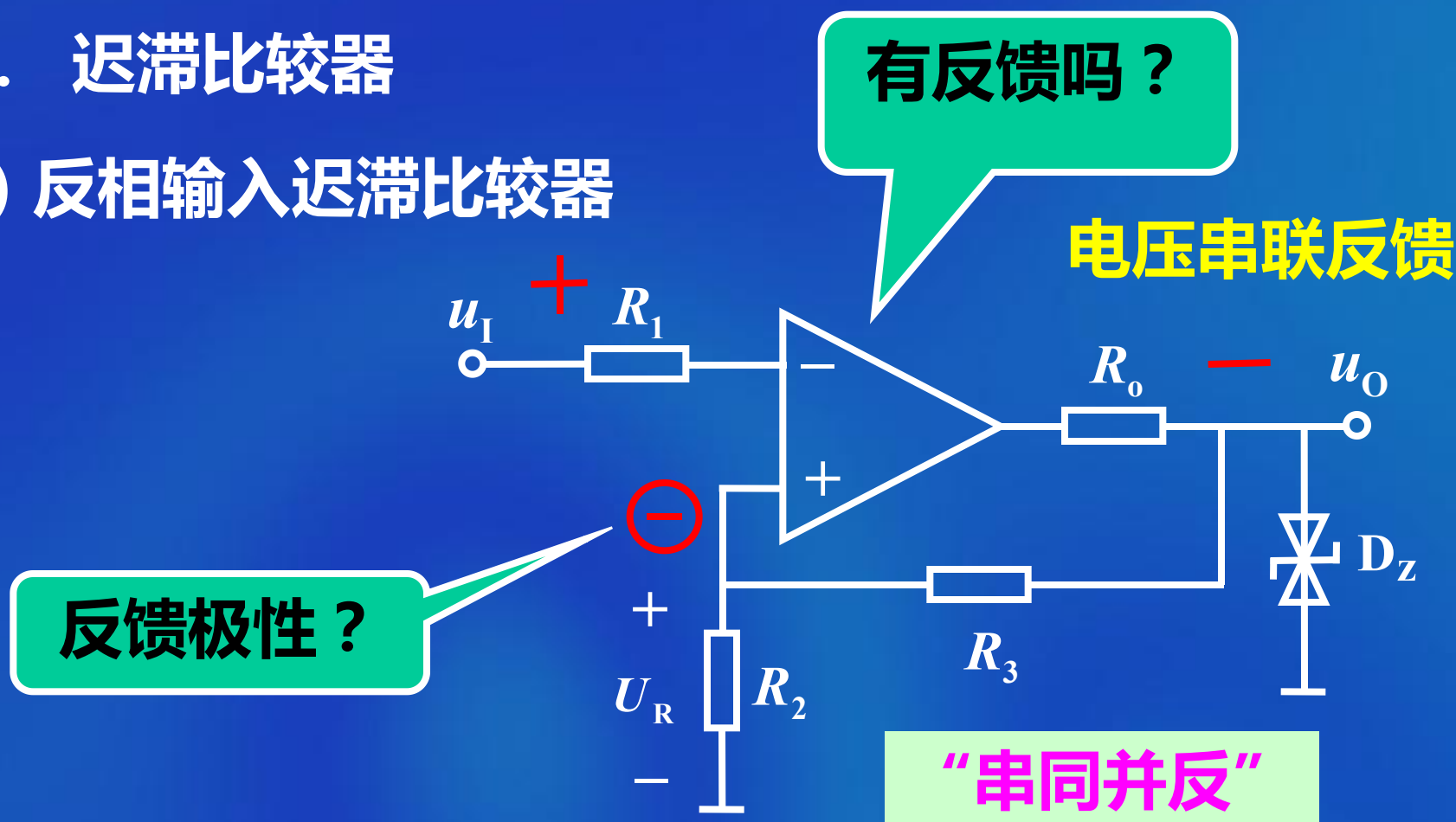
单门限比较器抗干扰性能差的波形图



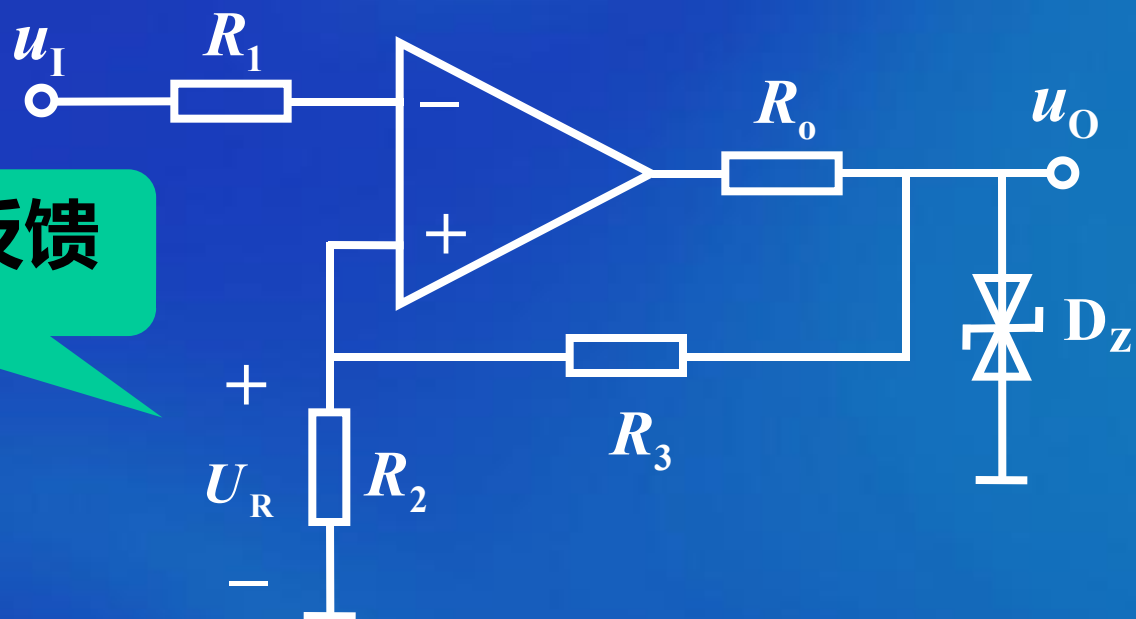
8.4.2 多门限比较器

1. 迟滞比较器

1) 反相输入迟滞比较器



电路引入正反馈



正反馈的作用

加速输出翻转过程

给电路提供双极性参考电平

a. 工作原理

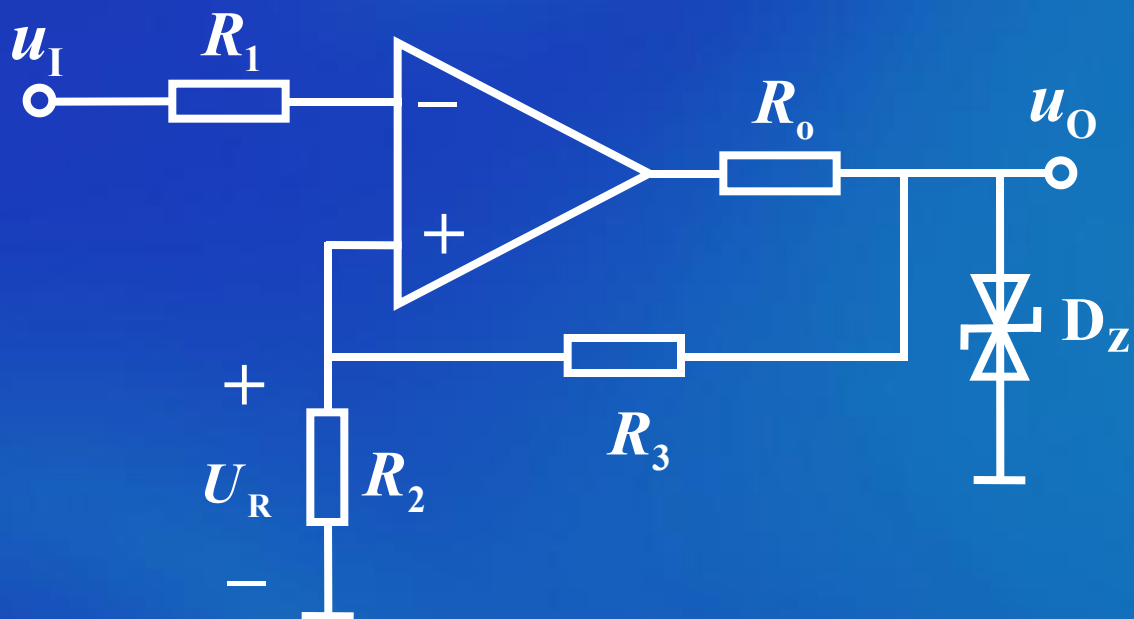
输出电压

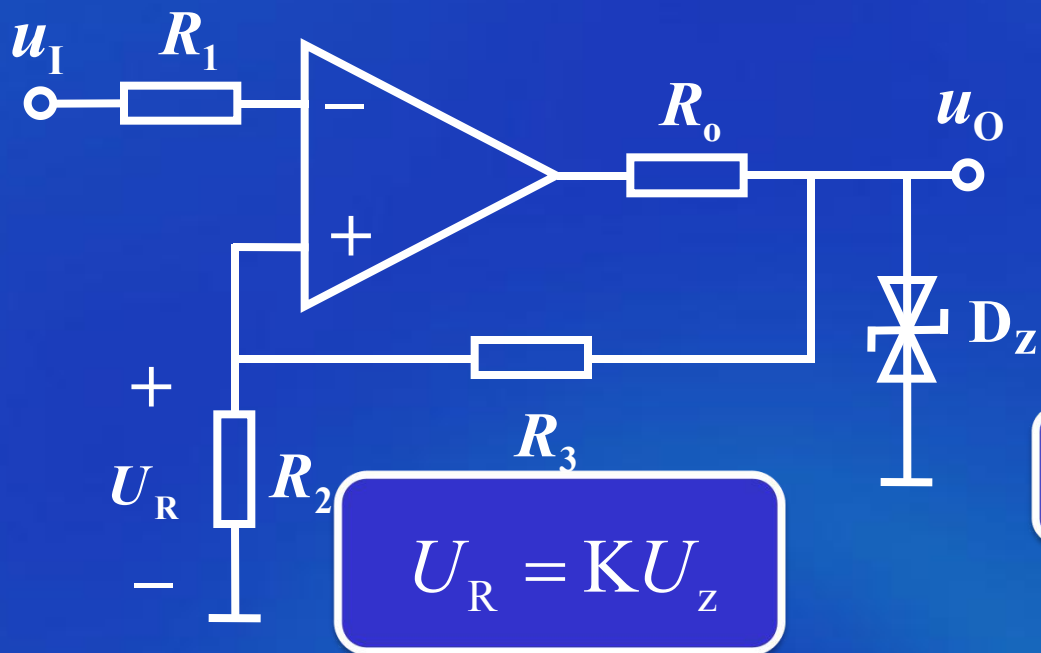
$$u_O = \pm U_Z$$

反馈电压

$$U_R = \pm K U_Z$$

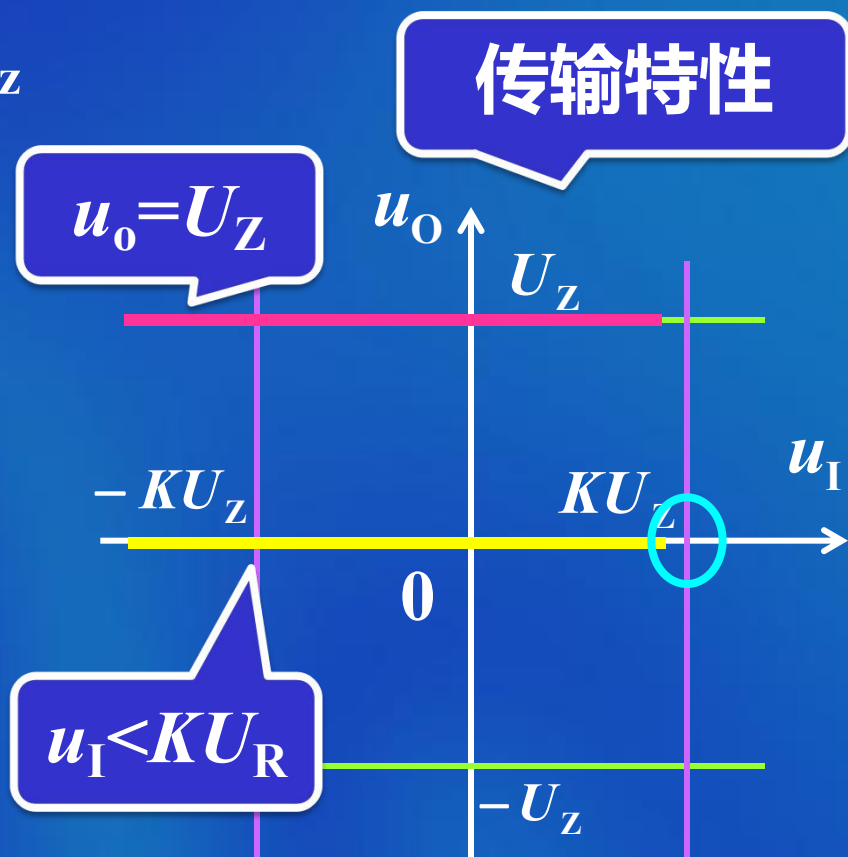
$$K = R_2 / (R_2 + R_3)$$

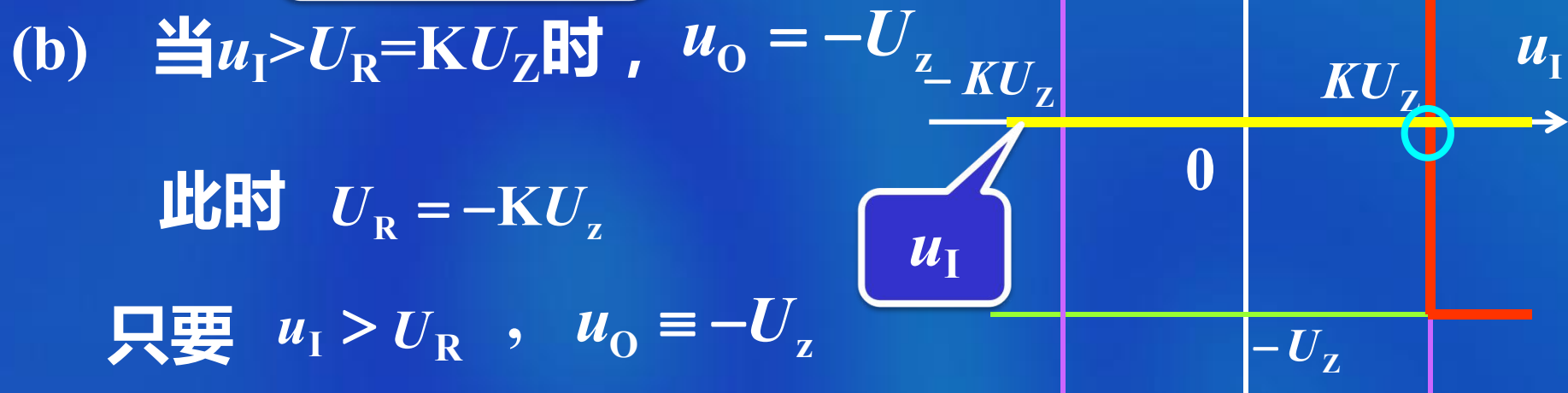
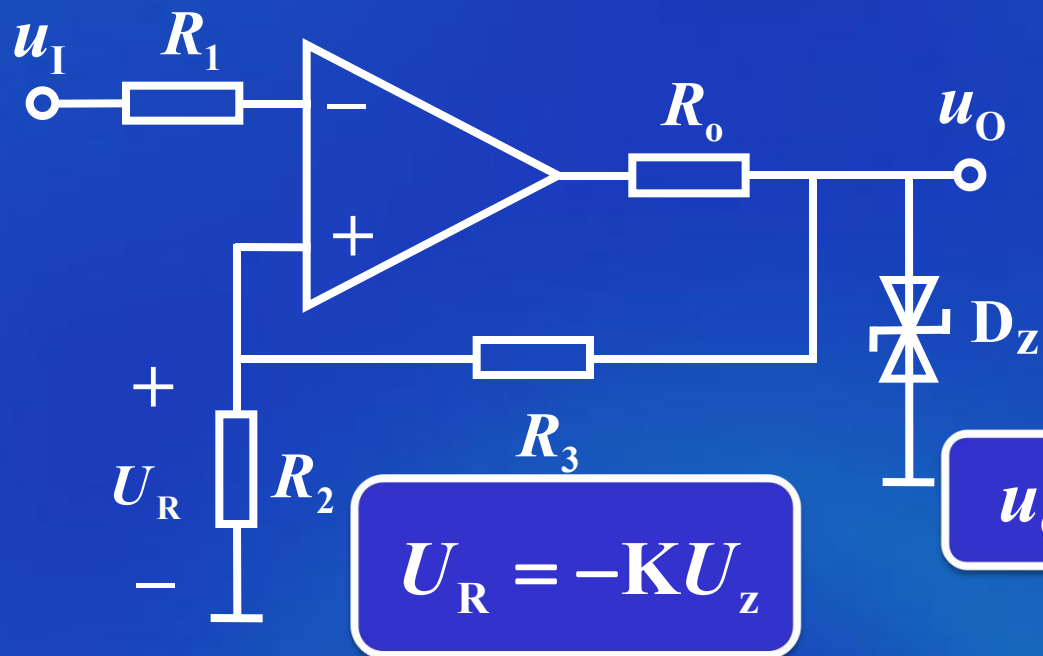


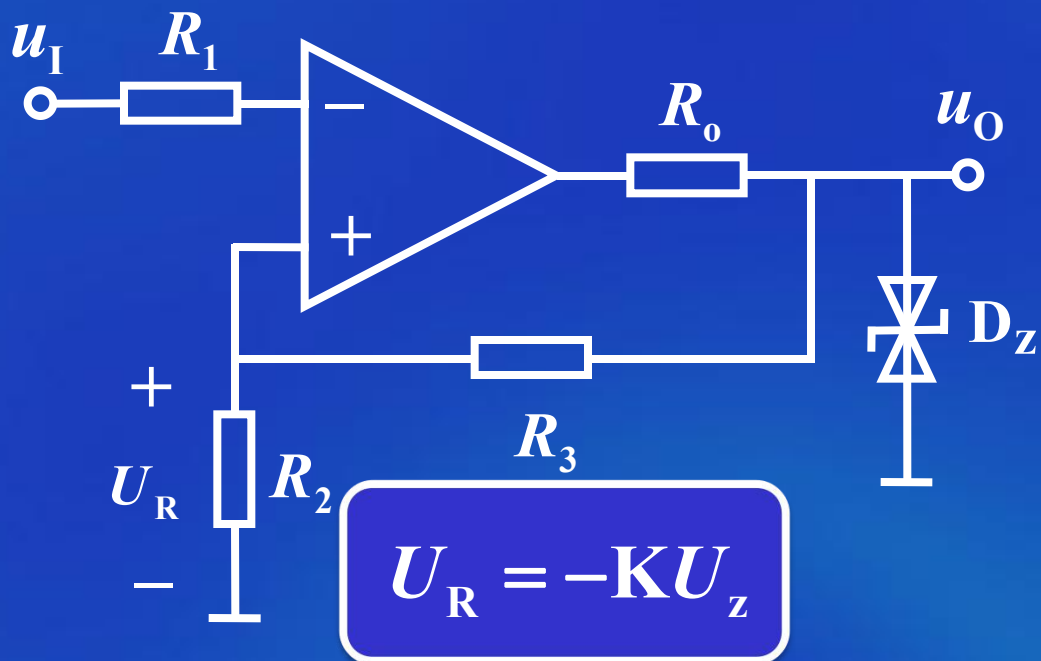


(a) 当 $u_O = U_Z$ 时 $U_R = KU_Z$

如果 $u_I < U_R$ $u_O \equiv U_Z$



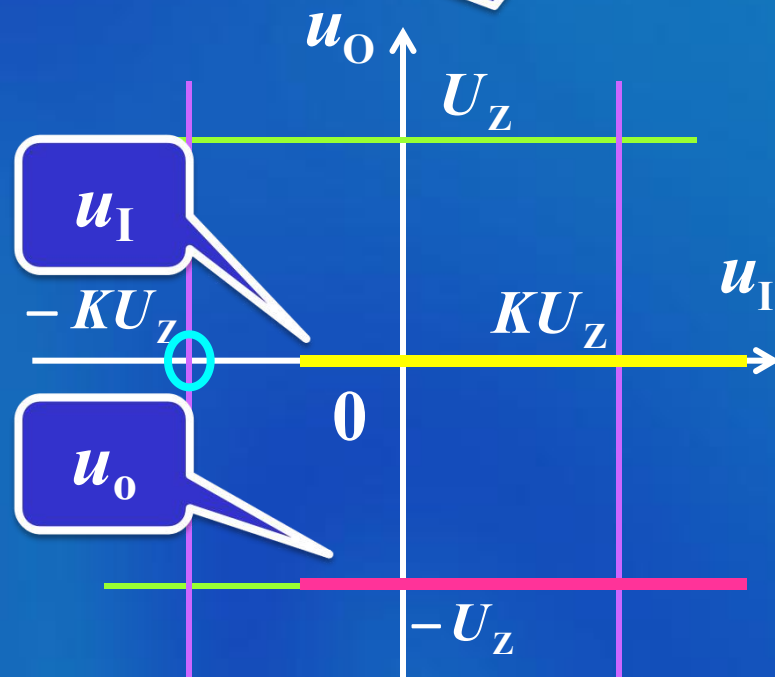


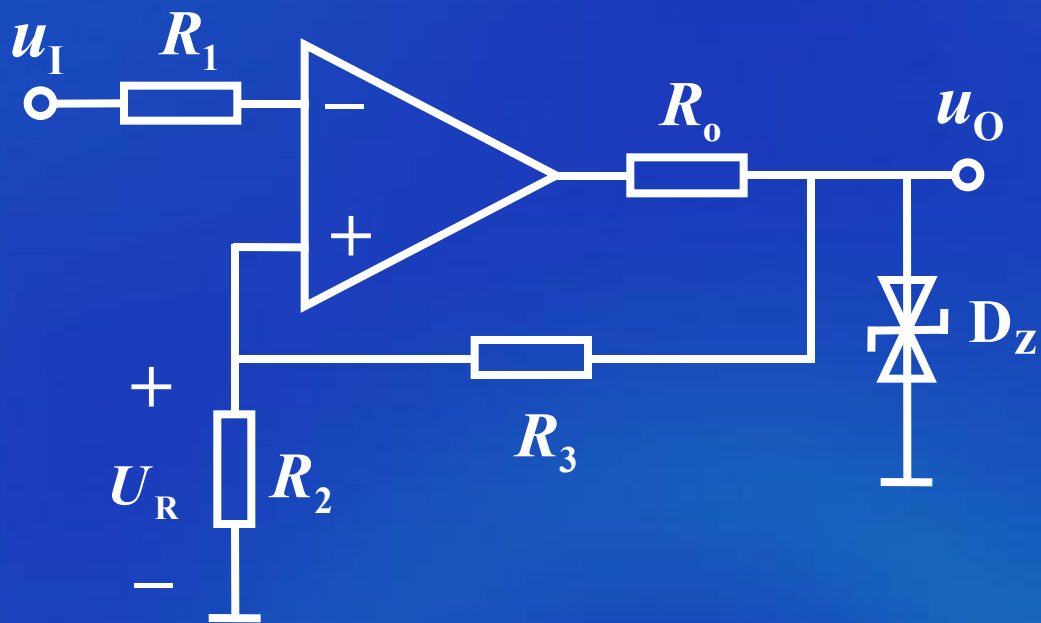


(c) 当 $u_O = -U_Z$ 时 $U_R = -KU_Z$

如果 $u_I > U_R$ $u_O \equiv -U_Z$

传输特性



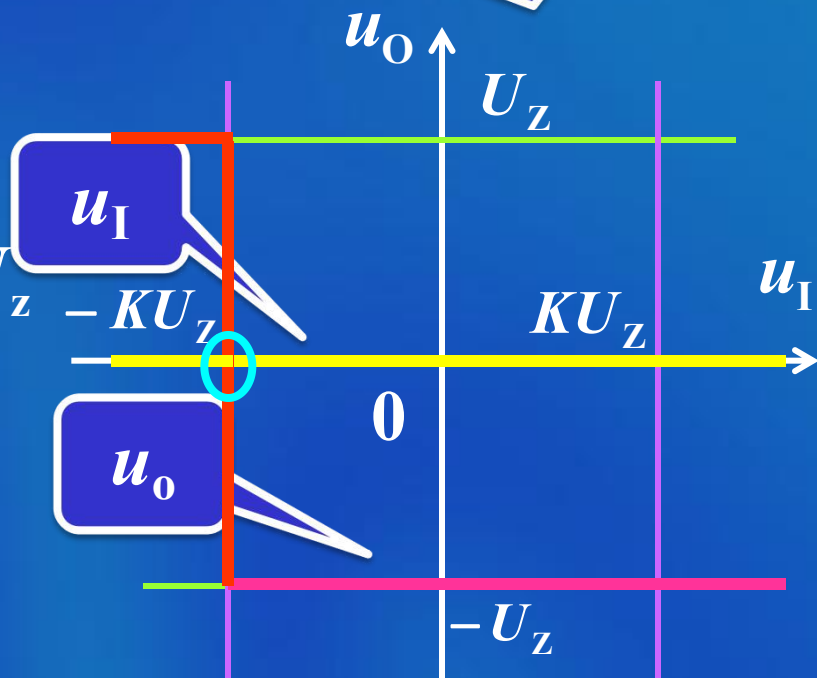


(d) 当 $u_I < U_R = -KU_Z$ 时, $u_O = +U_Z$

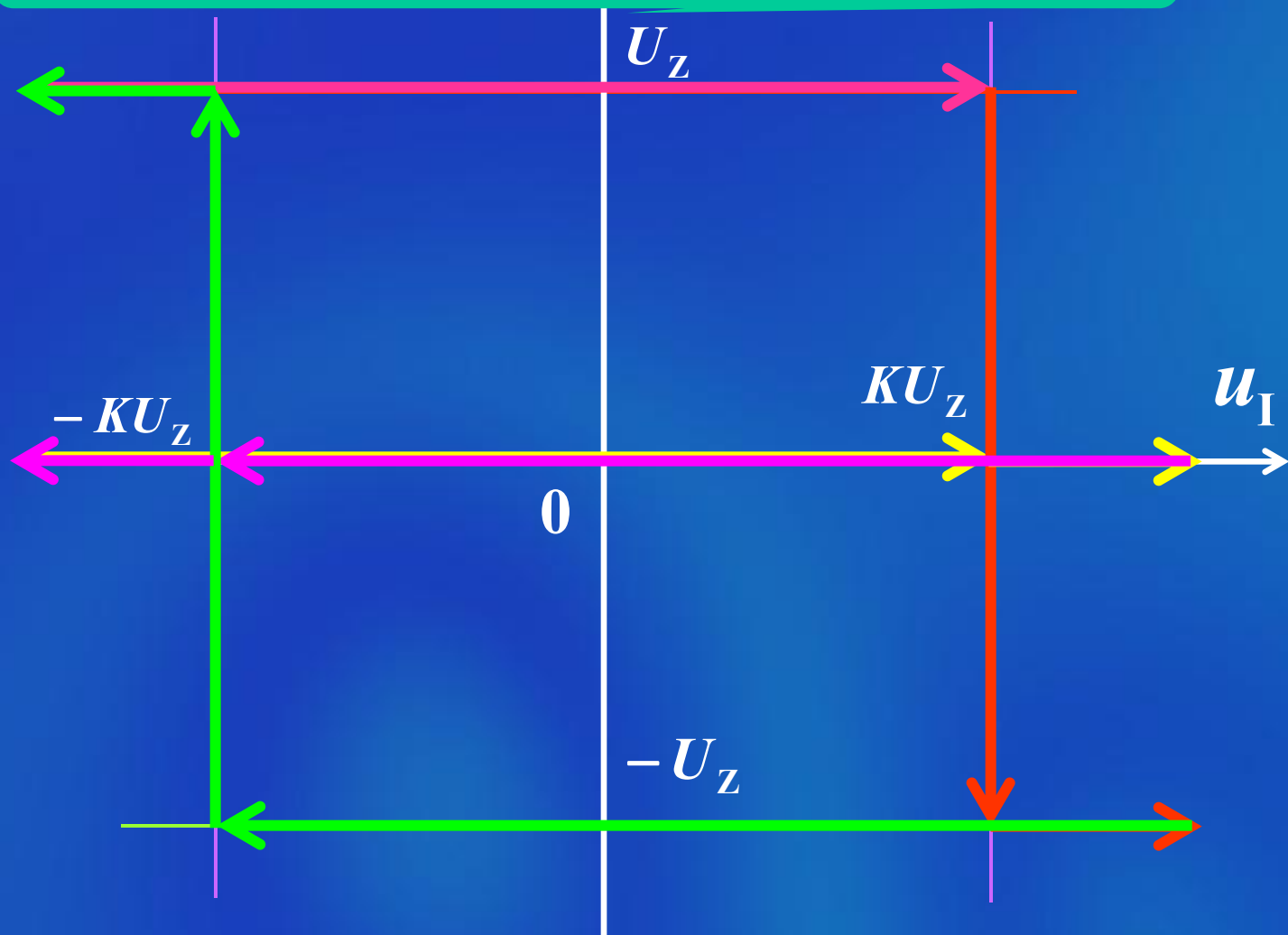
此时 $U_R = KU_Z$

只要 $u_I < U_R$, $u_O \equiv U_Z$

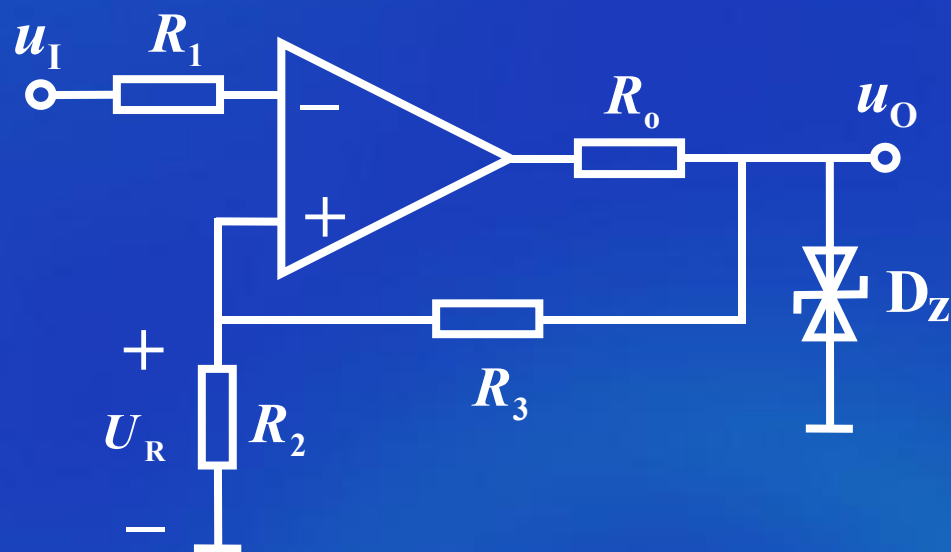
传输特性



反相输入迟滞比较器传输特性



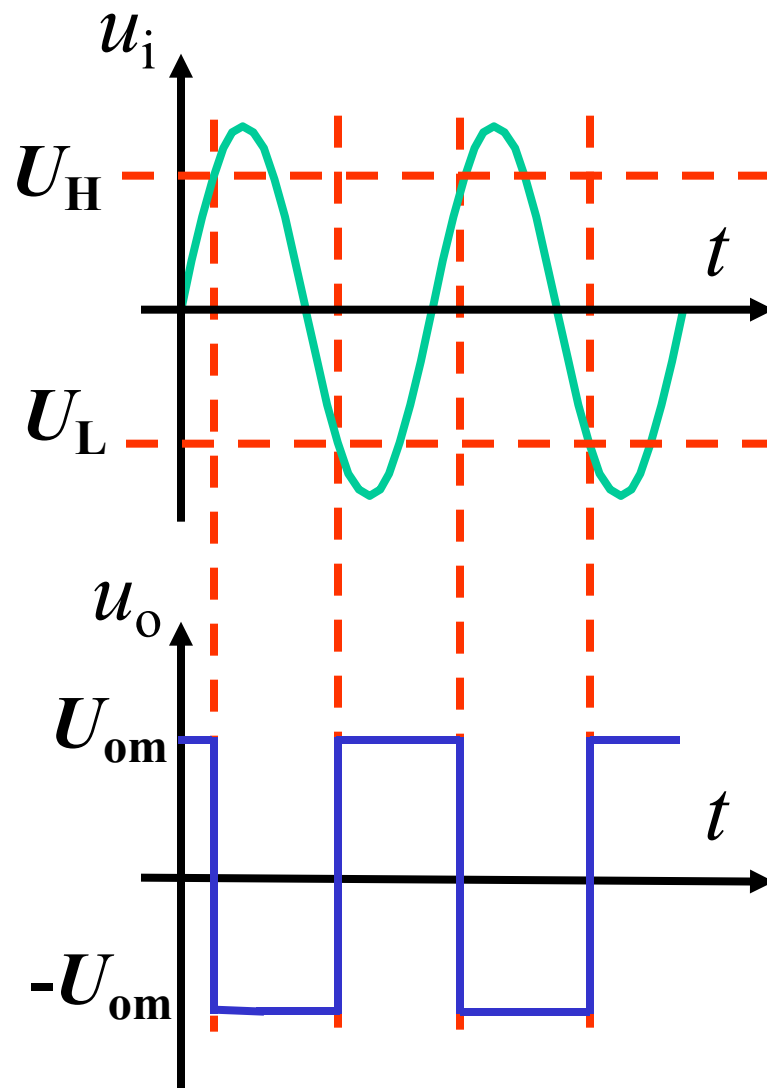
实际应用



例：利用反相迟滞电压比较器将正弦波变为方波。

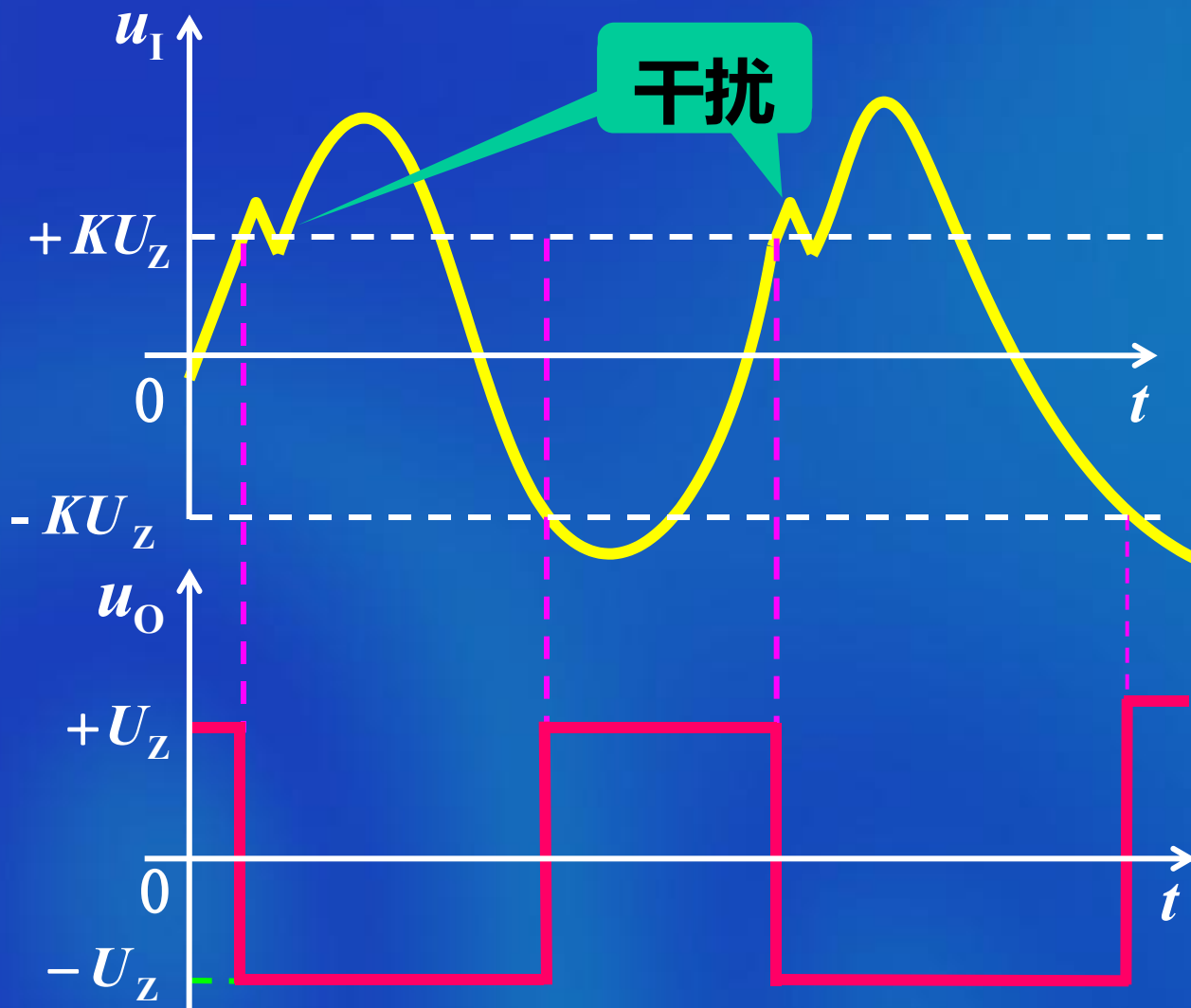
与单门限比较器有何不同？

两个翻转点！



说明迟滞比较器抗干扰性能的波形图

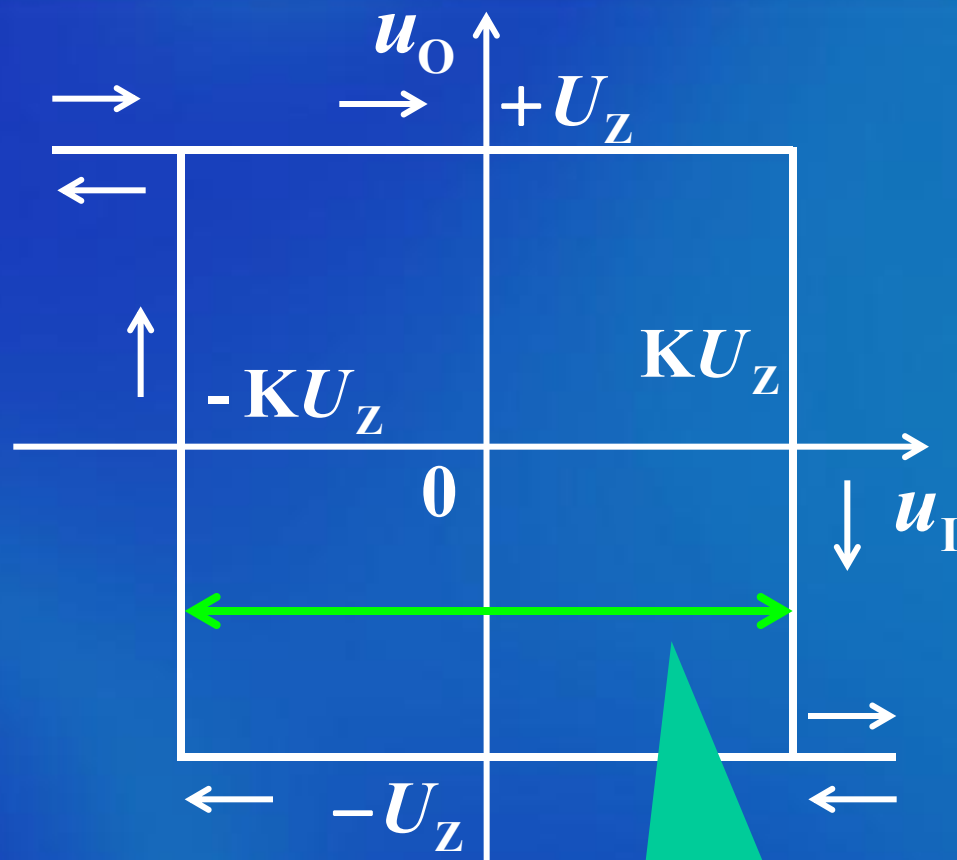
输入信号



输出信号

迟滞比较器的特点

- (1) 提高了电路抗干扰能力。
- (2) 降低了电路的灵敏度
- (3) 不能分辨 $2KU_Z$ 范围内变化的信号。

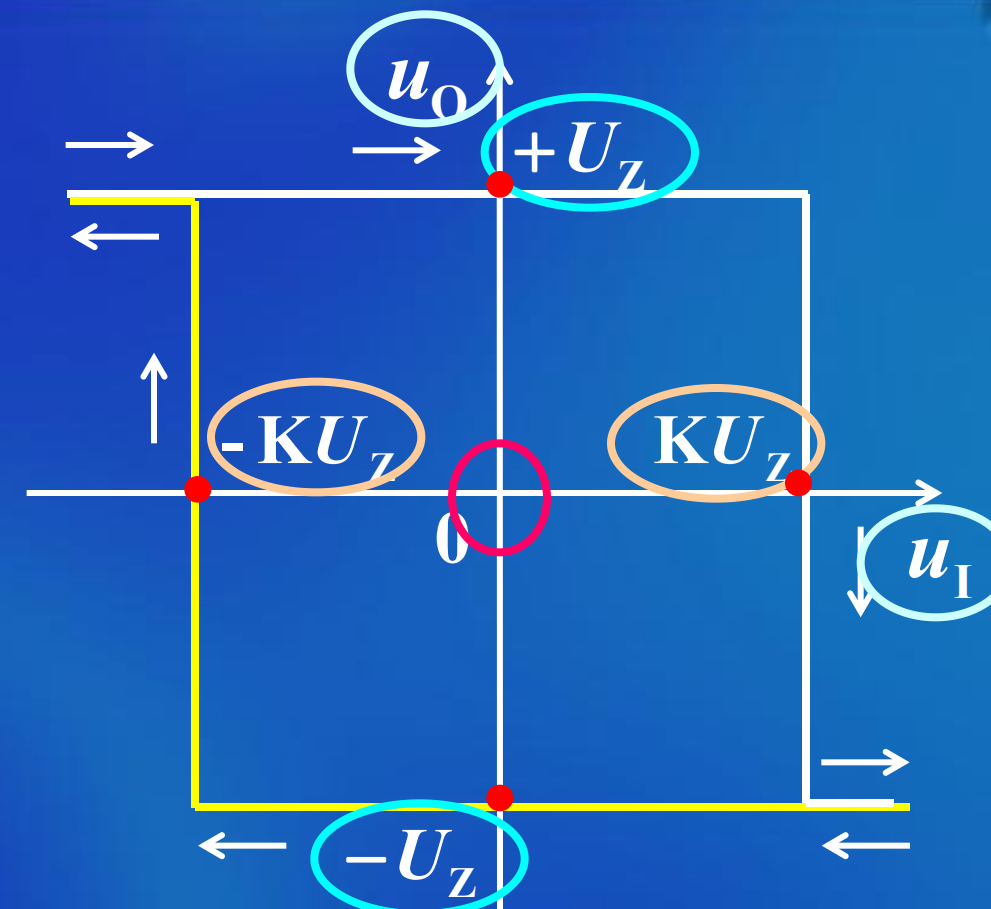


传输特性的画法：

1. 画出坐标系
2. 标出特征点
3. 画出翻转曲线
4. 标注翻转的方向

传输特性的要求：

一个中心，四个基本点



坐标轴

翻转点

结果

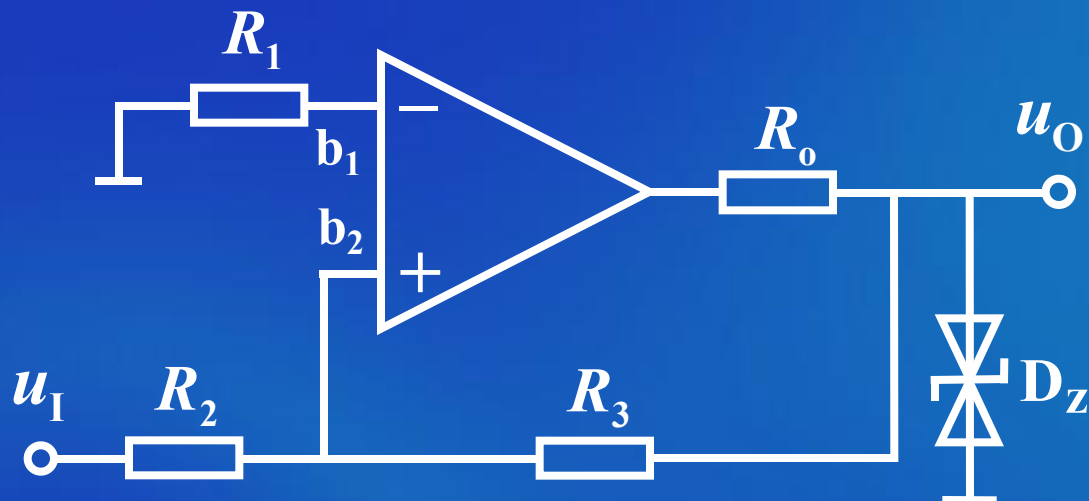
方向

(2) 同相输入迟滞比较器

a. 电路

b. 特性分析

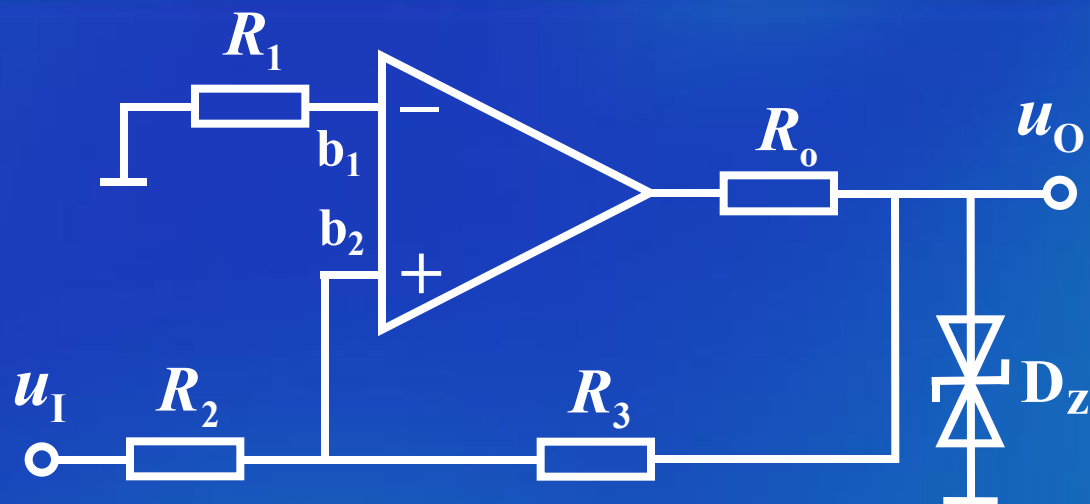
由图可知



$$u_{b1} = 0$$

$$u_{b2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_I + \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_O$$

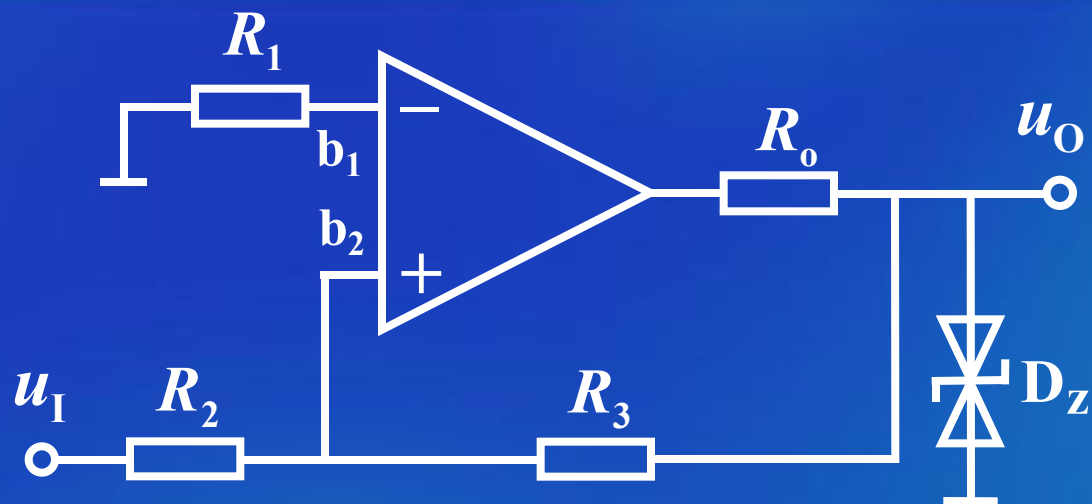
$$u_O = \pm U_Z$$



$$u_{b2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_I + \frac{R_2}{R_2 + R_3} (\pm U_z)$$

根据比较器的特性，当 $u_{b2} = u_{b1}$ 时电路翻转。

$$\text{令 } u_{b2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_I + \frac{R_2}{R_2 + R_3} (\pm U_z) = 0$$



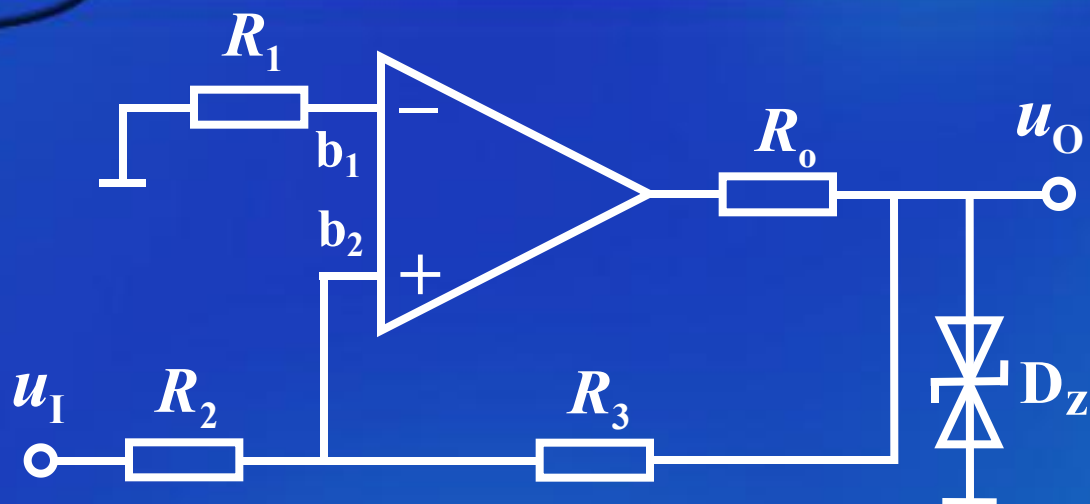
得比较器的翻转电平为

$$U_H = KU_Z$$

$$U_L = -KU_Z$$

$$K = R_2 / R_3$$

即当 $u_I = \pm KU_Z$ 时 $u_{b2} = 0$



传输特性

(a) 当 $u_O = +U_Z$ 时

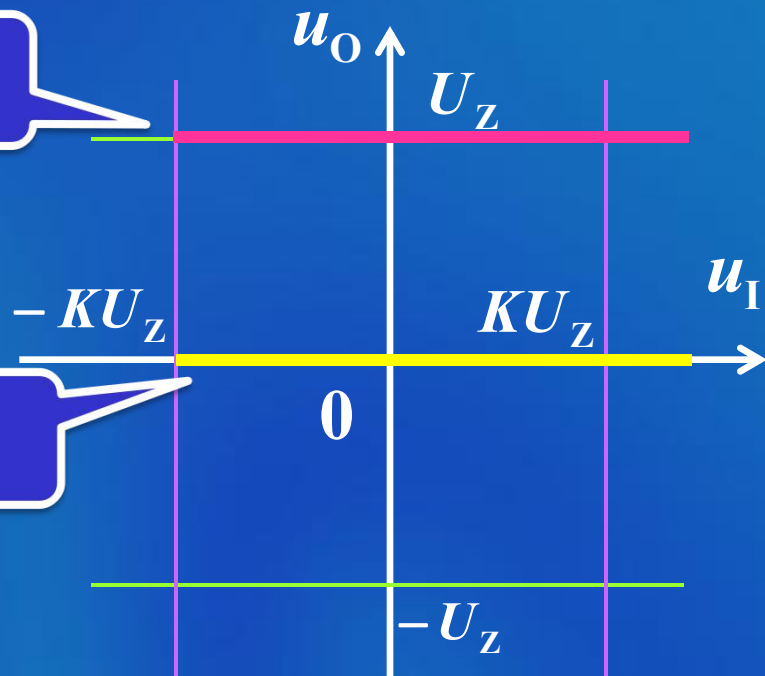
只要 $u_I > -KU_Z$

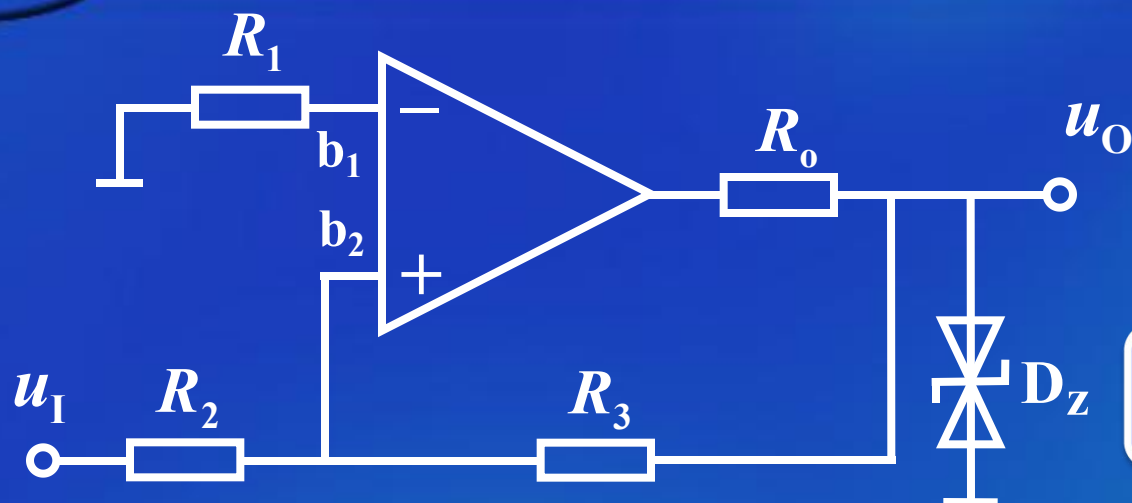
$$u_{b2} > 0$$

即 $u_O \equiv +U_Z$

$$U_O = +U_Z$$

$$u_I > -KU_Z$$





传输特性

(b) 当 $u_O = -U_Z$ 时

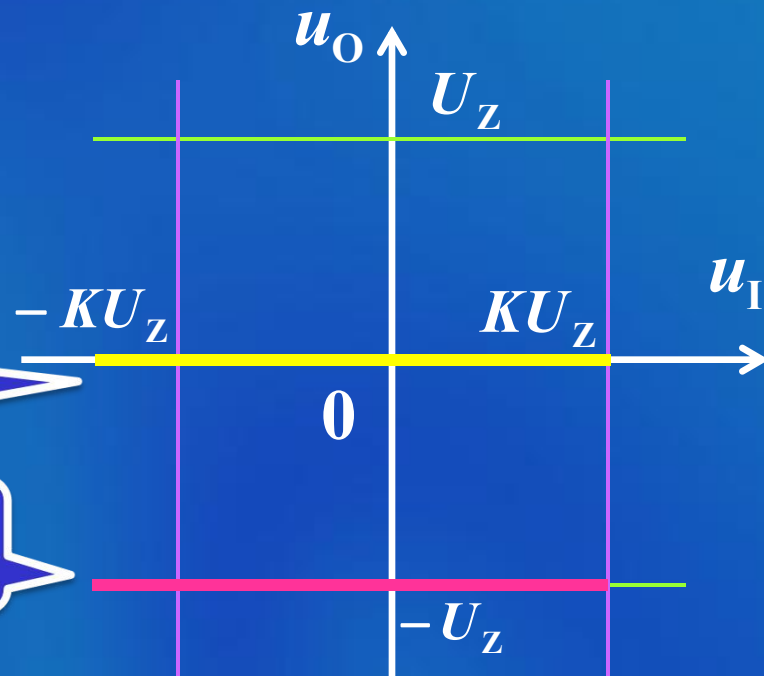
只要 $u_I < KU_Z$

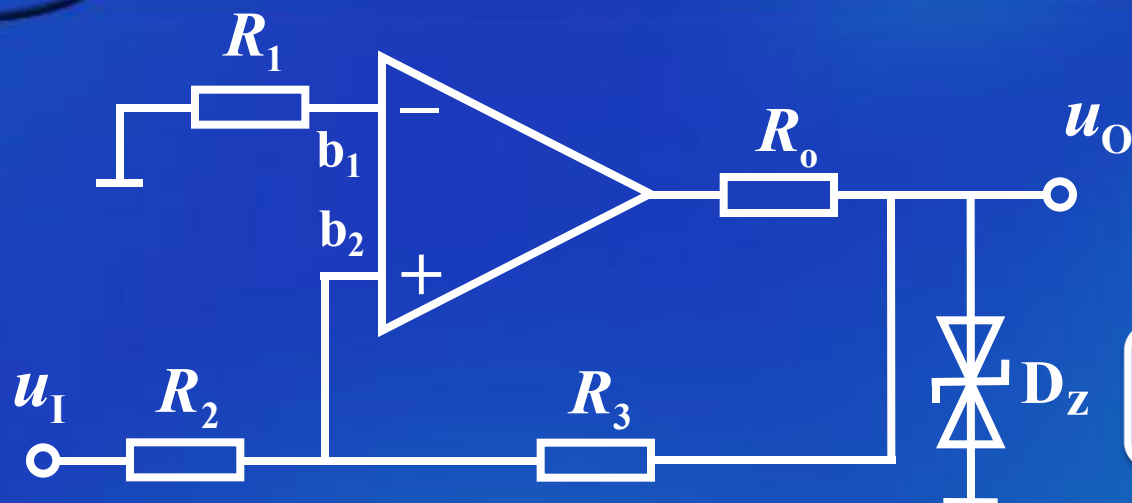
$$u_{b2} < 0$$

$$u_O \equiv -U_Z$$

$$u_I < KU_Z$$

$$U_O = -U_Z$$





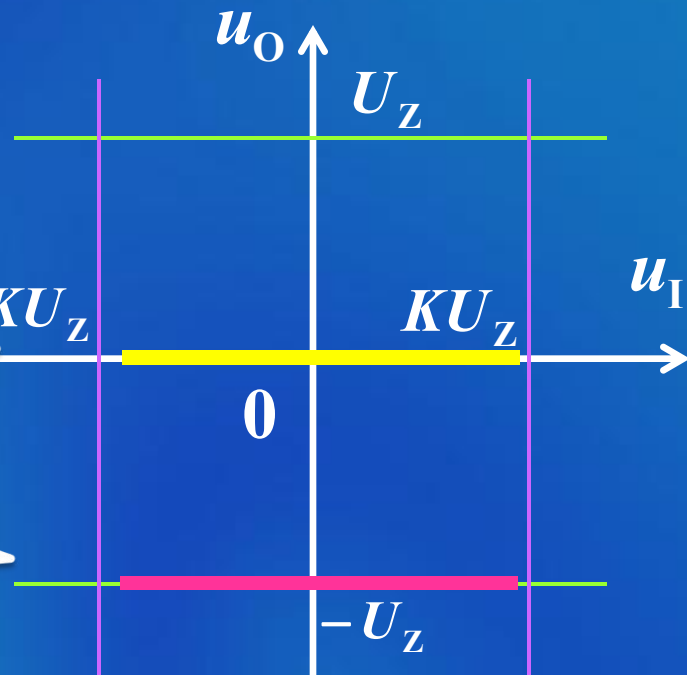
传输特性

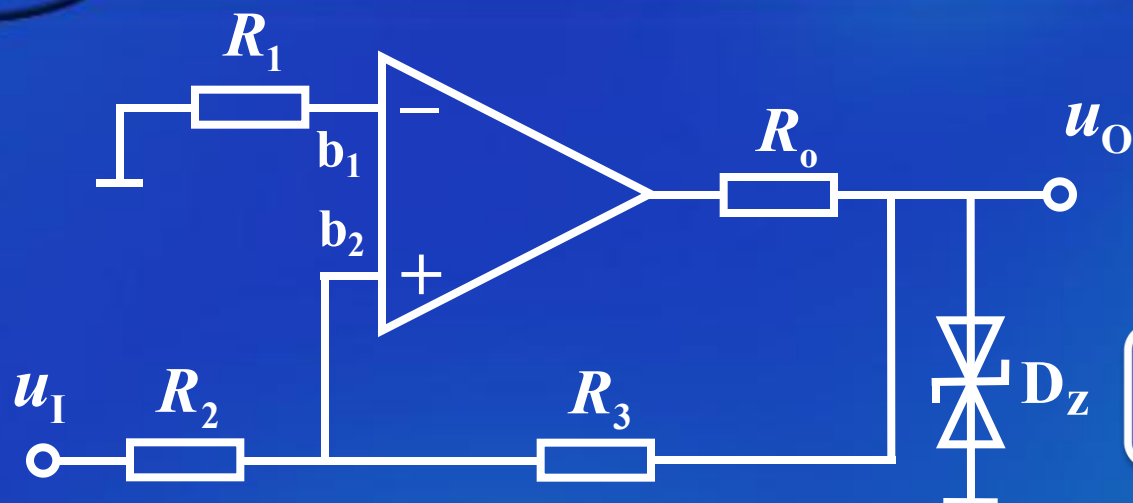
(c) 当 $-KU_Z < u_I < KU_Z$ 时

输出维持原状态

$$|u_I| < KU_Z$$

$$U_o = -U_Z$$





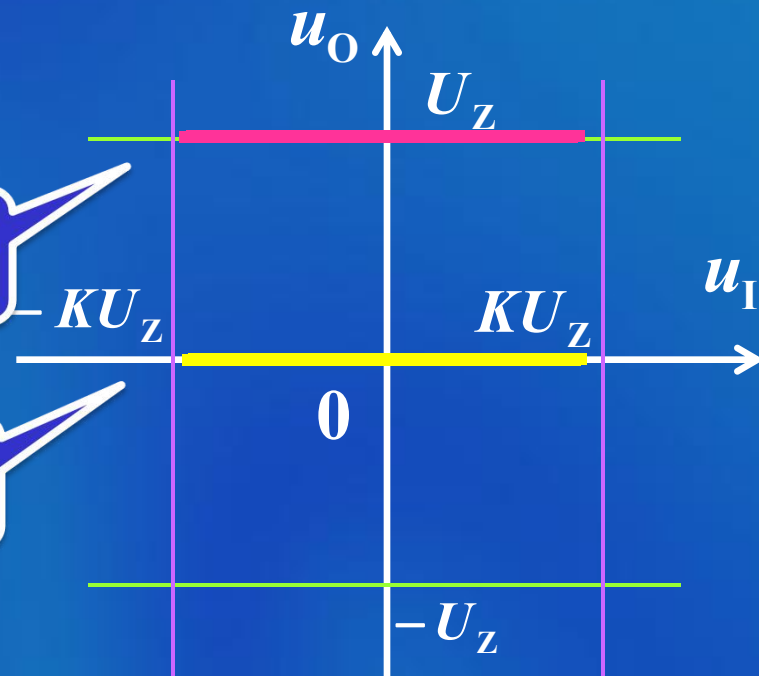
传输特性

(c) 当 $-KU_Z < u_I < KU_Z$ 时

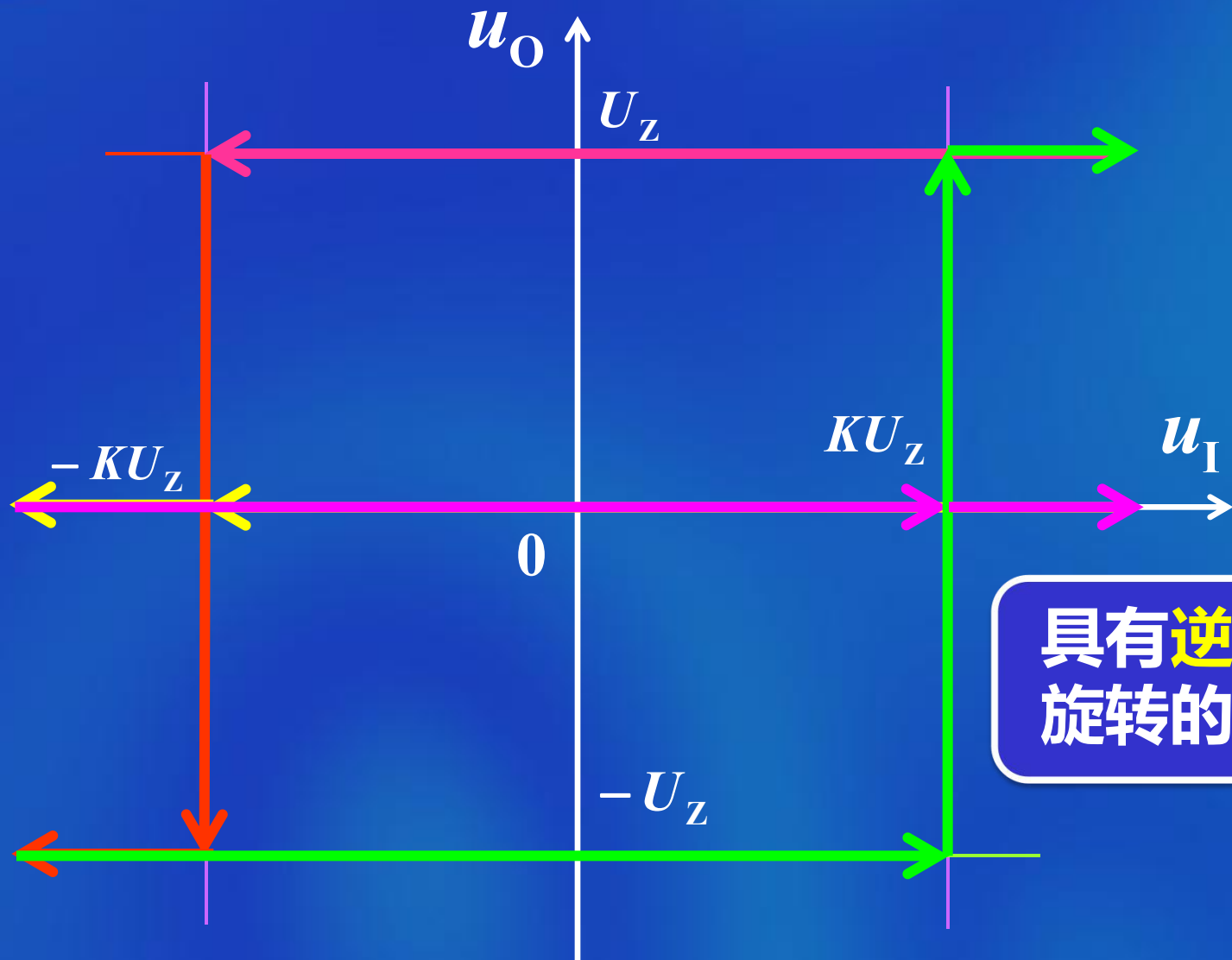
输出维持原状态

$$U_o = U_Z$$

$$|u_I| < KU_Z$$



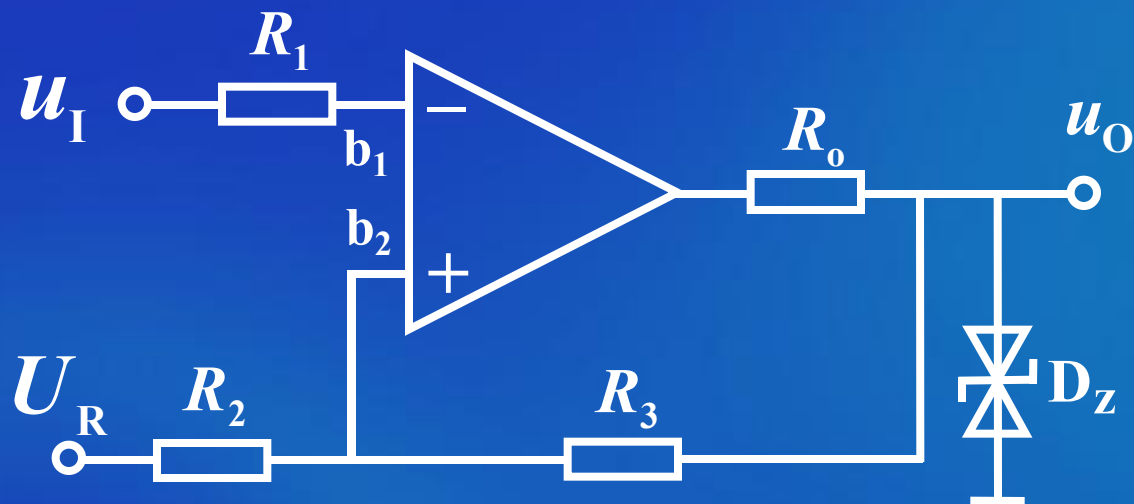
同相
输入迟滞
比较器传
输特性



具有逆时针
旋转的特性

c. 特性平移的迟滞比较器

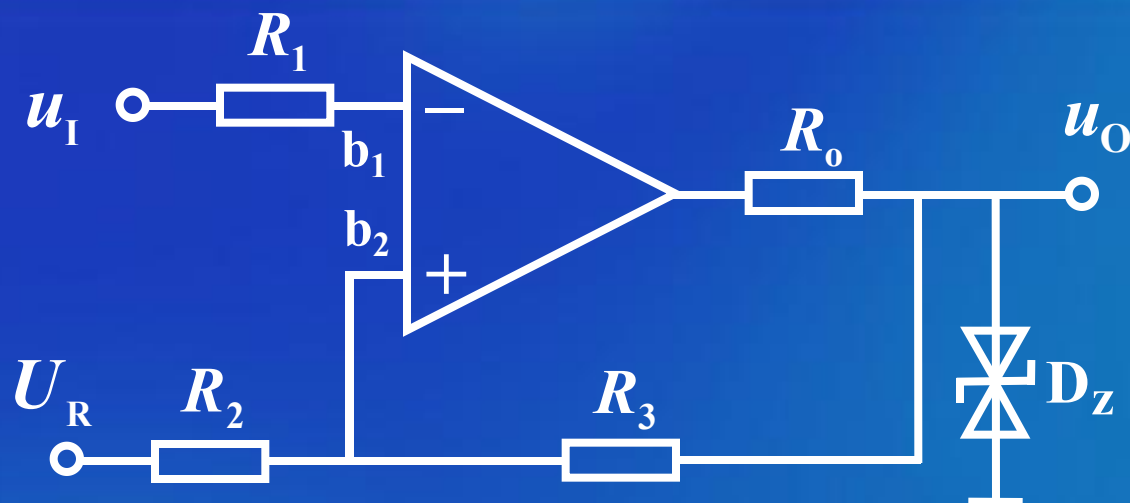
图中



$$u_{b1} = u_I$$

$$u_{b2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_R + \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_O$$

$$u_O = \pm U_Z$$



令 $u_{b2} = u_{b1}$

即
$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} U_R + \frac{R_2}{R_2 + R_3} (\pm U_z) = u_I$$

得电路的翻转电平为

$$U_L = U_R R_3 / (R_2 + R_3) - U_z R_2 / (R_2 + R_3)$$

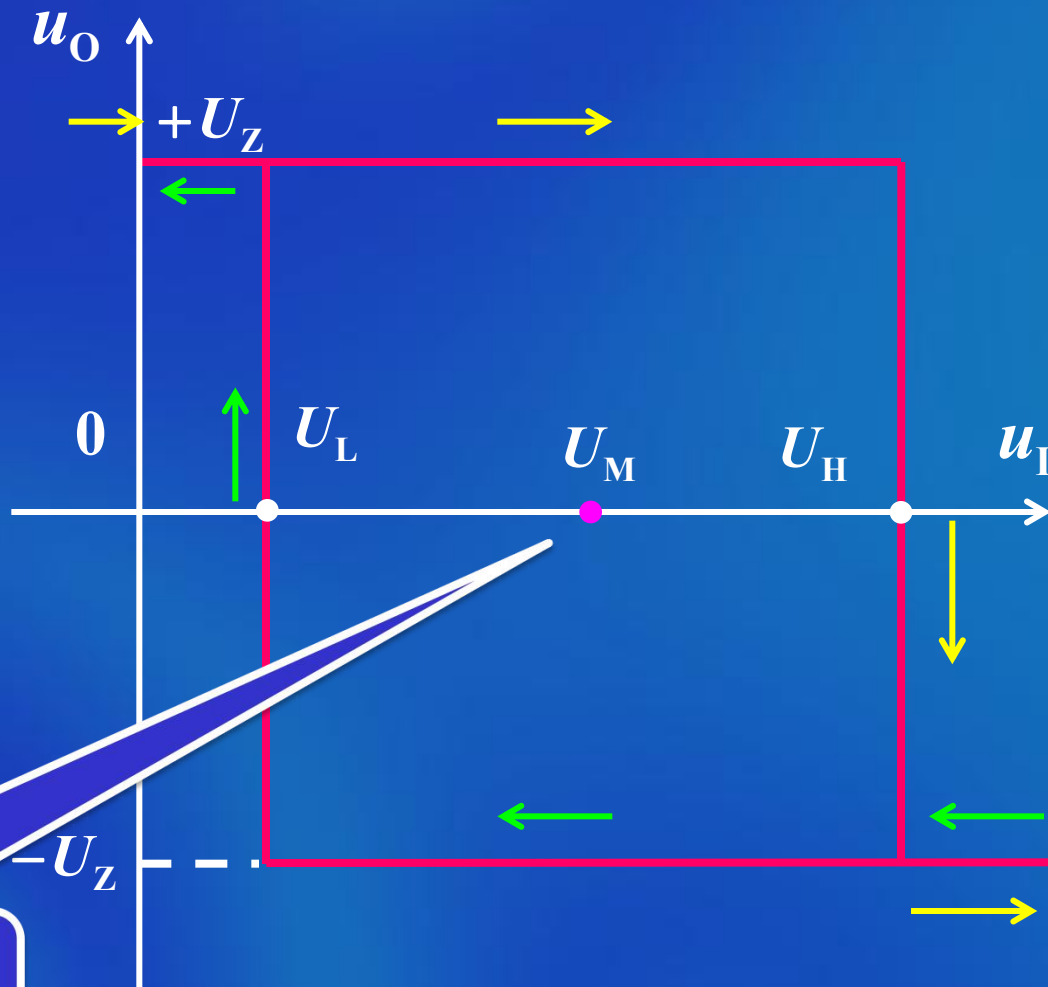
$$U_H = U_R R_3 / (R_2 + R_3) + U_z R_2 / (R_2 + R_3)$$

传输特性

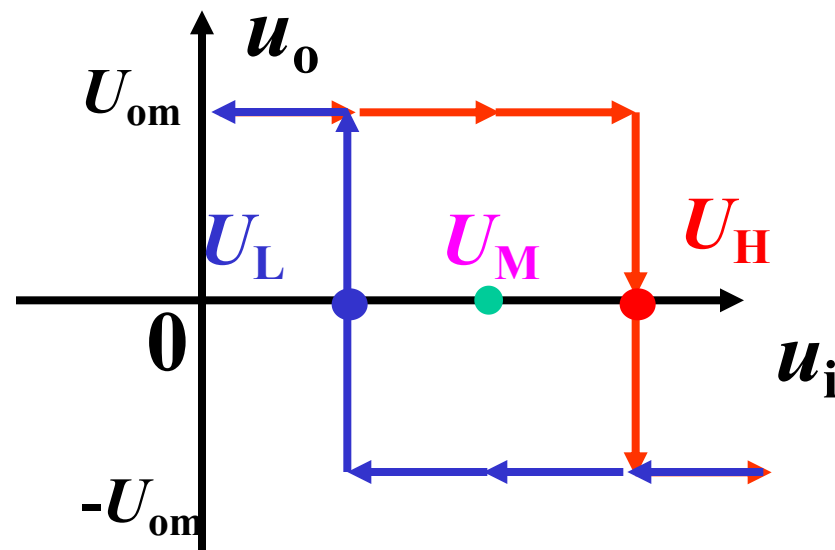
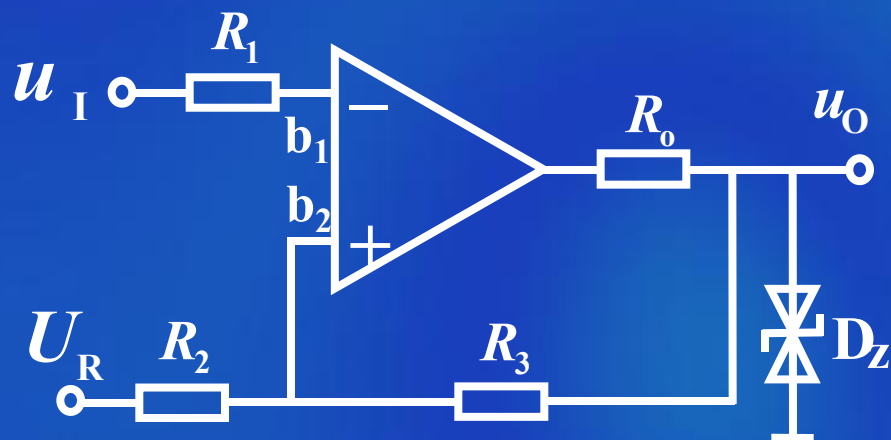
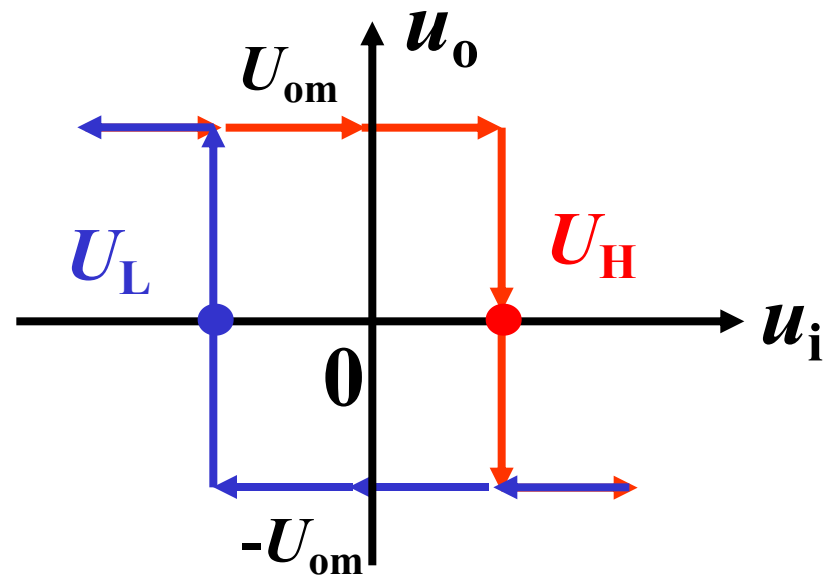
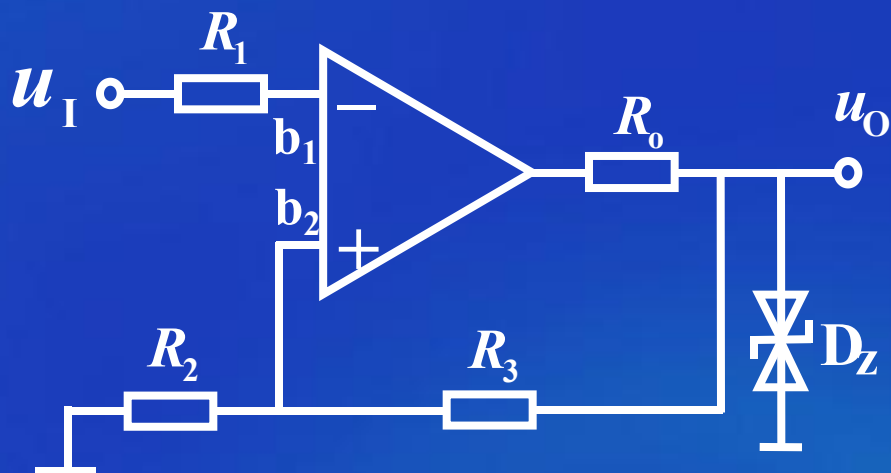
迟滞回环沿着
坐标横轴平移

$$U_M = U_R R_3 / (R_2 + R_3)$$

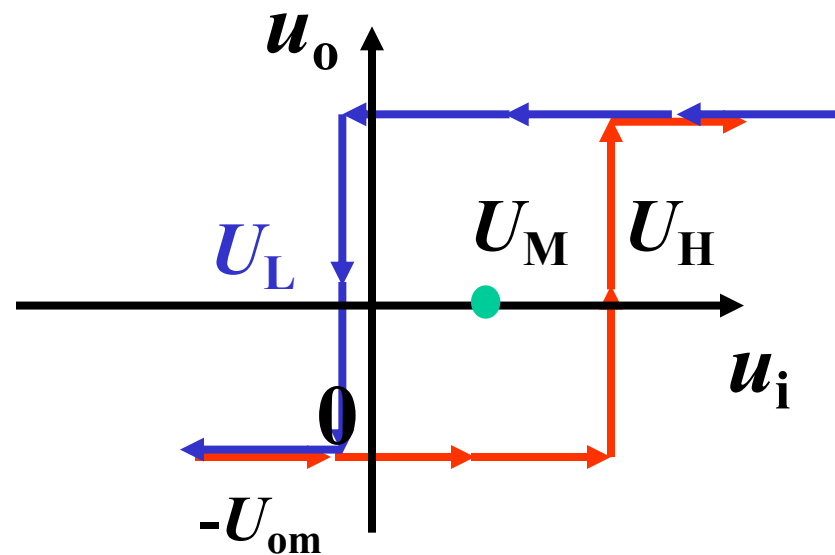
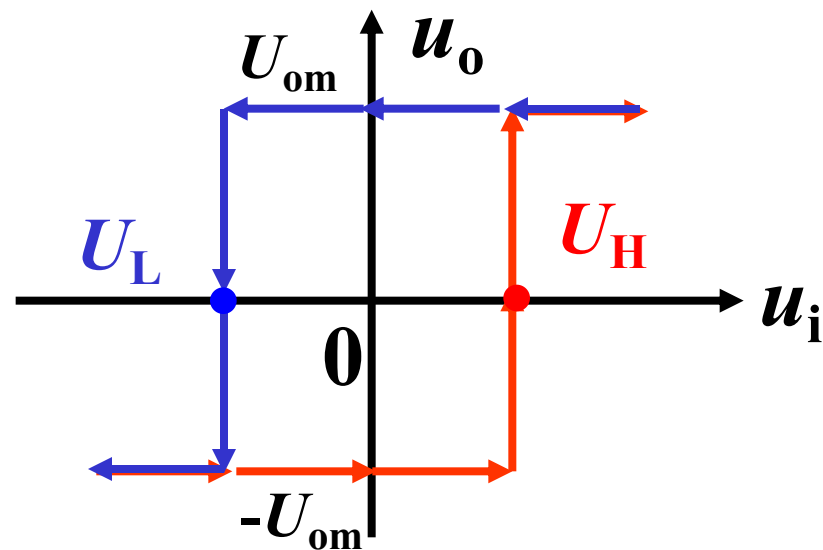
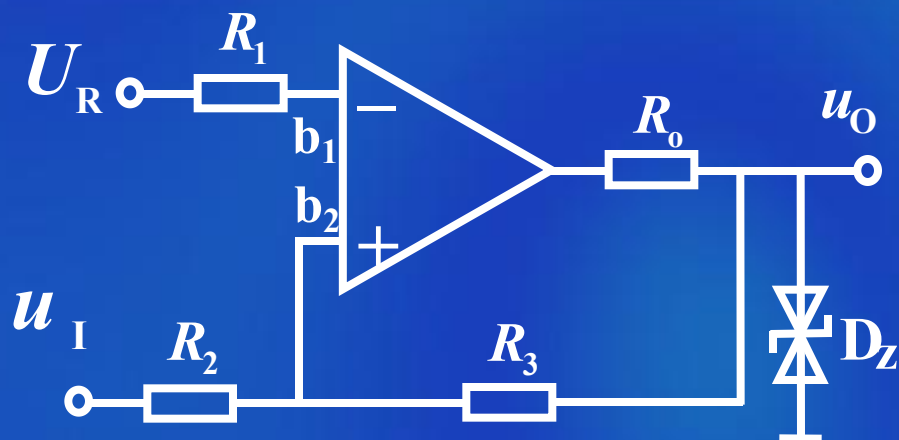
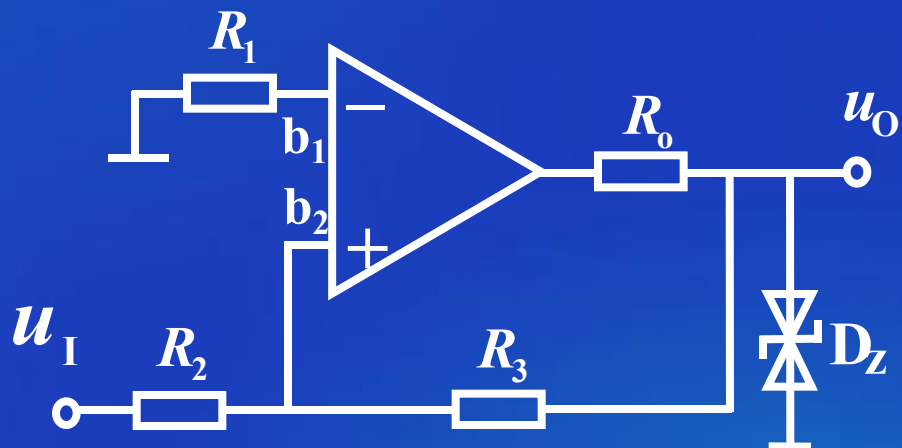
设 $U_R > 0$, 右移



两种反相迟滞比较器对比：



两种同相迟滞比较器对比：



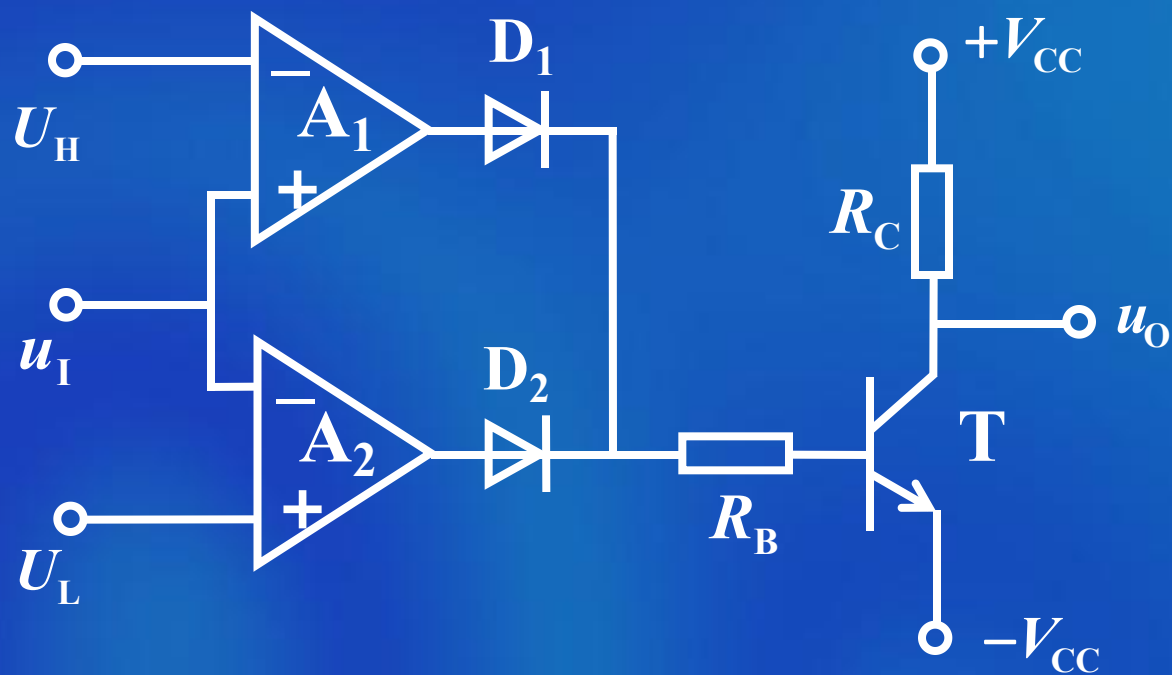
总 结

- 电压比较器的分析步骤：

- 1.观察运放的工作状态---（线性or非线性）
- 2.运放工作状态非线性——电压比较器
- 3.分析比较器类型（单门限or迟滞比较器）
- 4.同相输入or反相输入比较器（确定翻转的方向）
- 5.分析比较器的翻转点（ U_L 与 U_H ）
- 6.画出传输特性（一个中心，四个基本点）
- 7.其它分析（若给出输入信号，画出输出波形等）

2. 窗口比较器

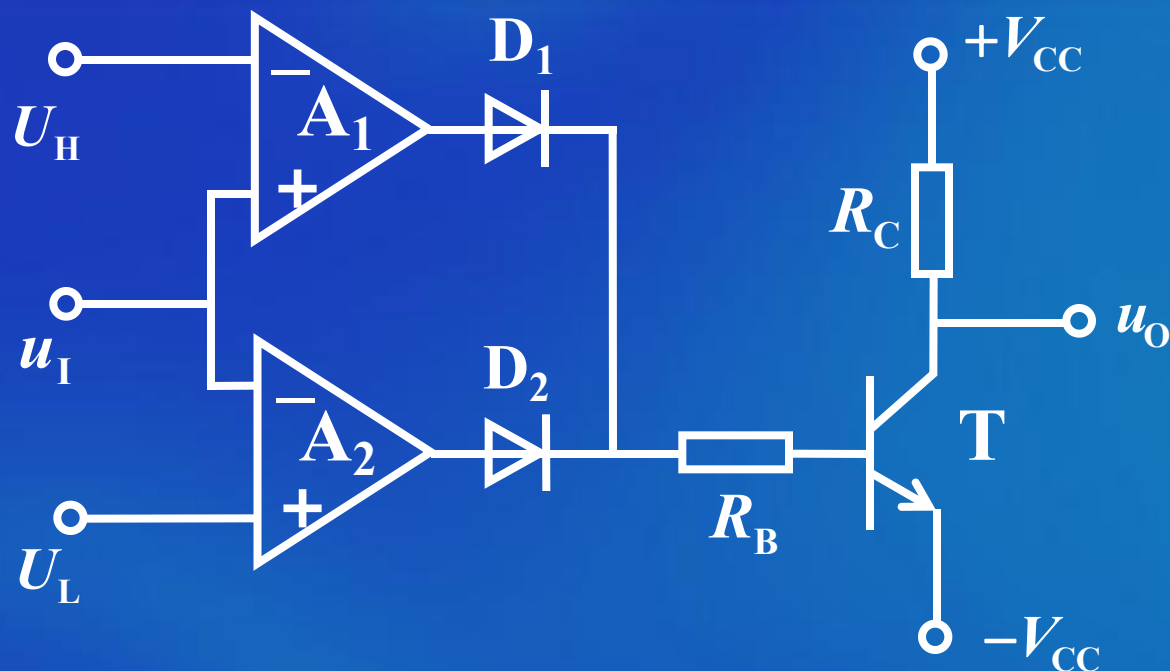
(1) 电路



2. 工作原理

(设 $U_H > U_L > 0$)

(a) 当 $u_I > U_H$ 时



A_1 输出高电平， A_2 输出低电平。

D_1 导通， D_2 截止

晶体管 T 饱和导通

输出电压 $u_O = -V_{CC}$

(b) 当 $u_I < U_L$ 时

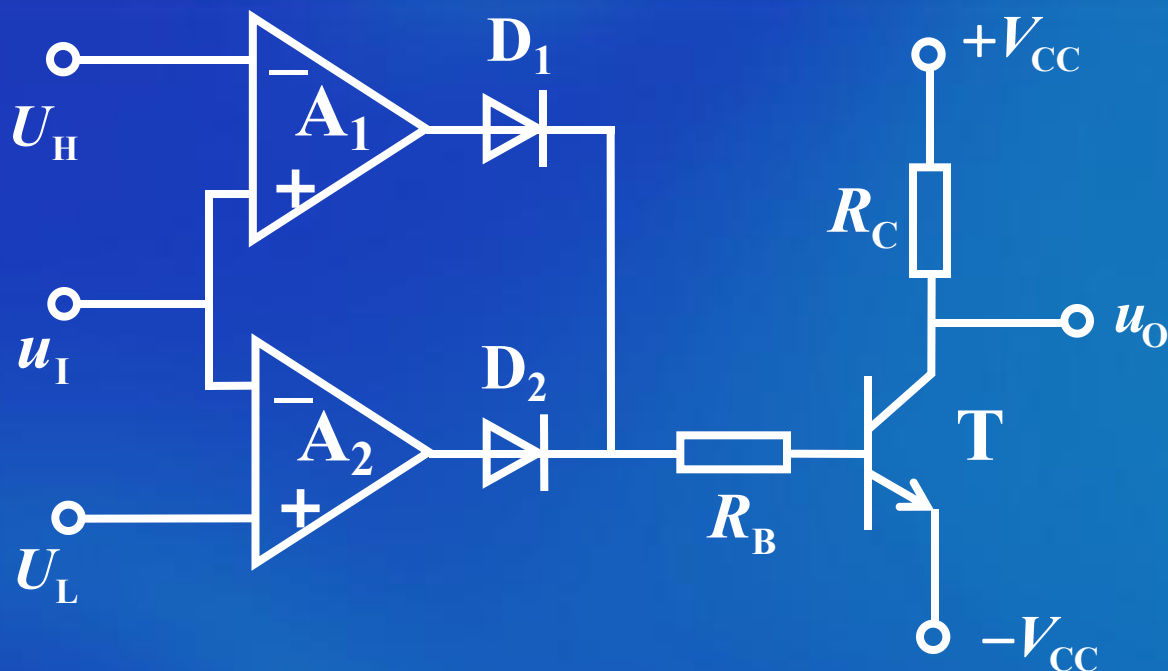
A_1 输出低电平

A_2 输出高电平

D_1 截止, D_2 导通

晶体管T饱和导通

输出电压 $u_O = -V_{CC}$



(c) 当 $U_L < u_I < U_H$ 时

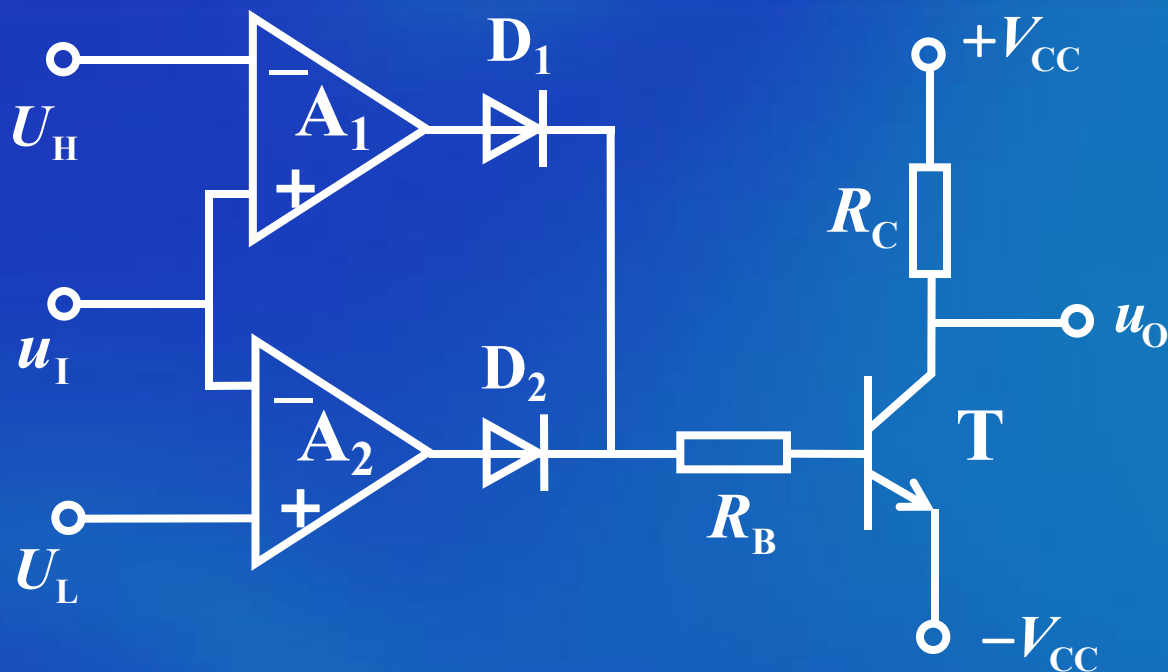
A_1 输出低电平

A_2 输出低电平

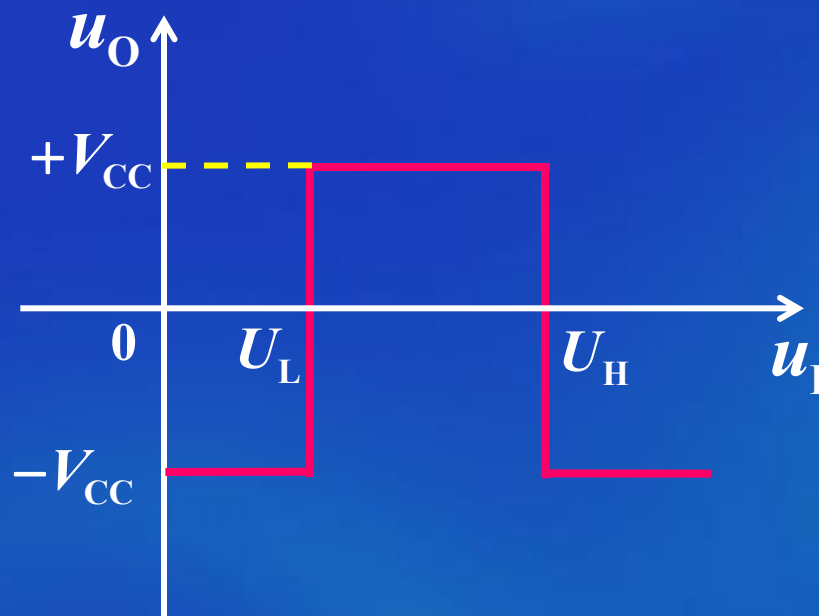
D_1 截止, D_2 截止

晶体管 T 截止

输出电压 $u_O = +V_{CC}$



传输特性

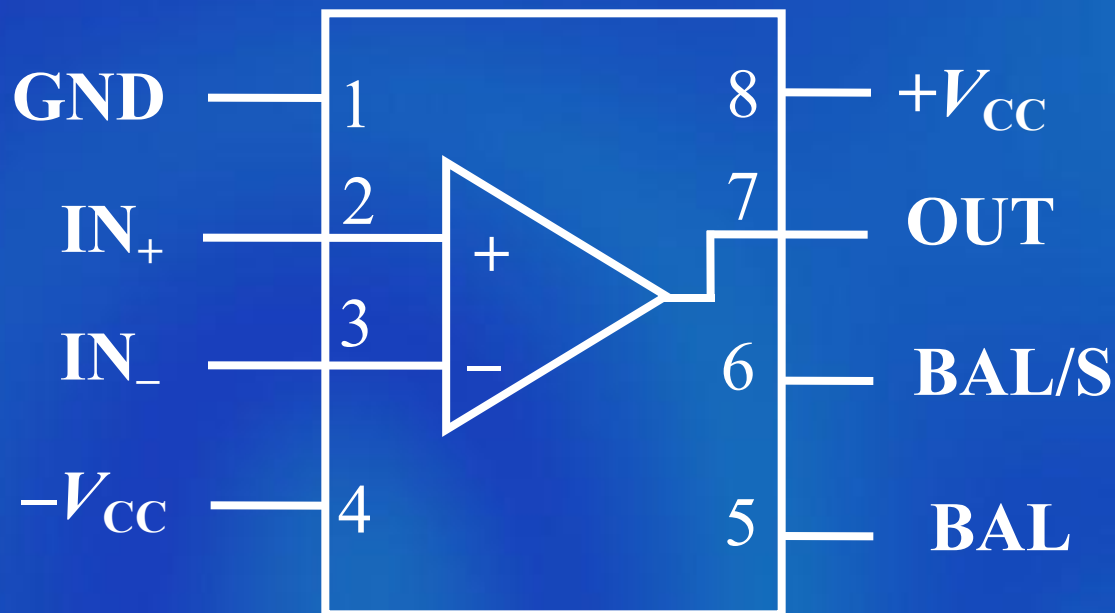


窗口比较器的主要应用

用于工业控制系统，测量温度、压力、液面等的范围。

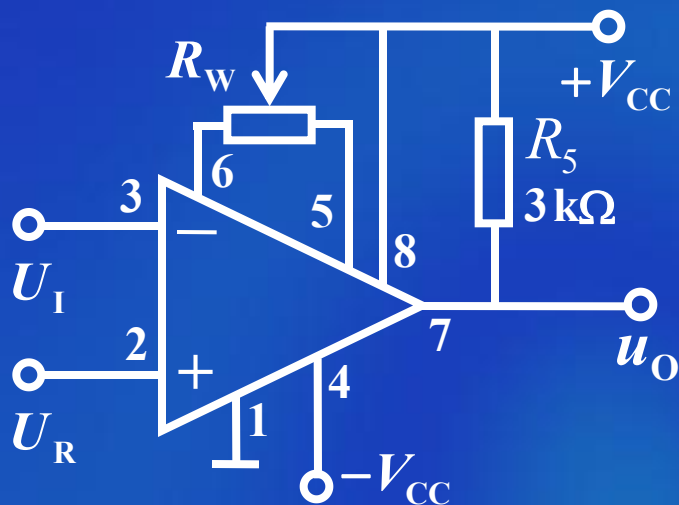
7.4.3 集成电压比较器

LM111系列的封装形式和引脚排列

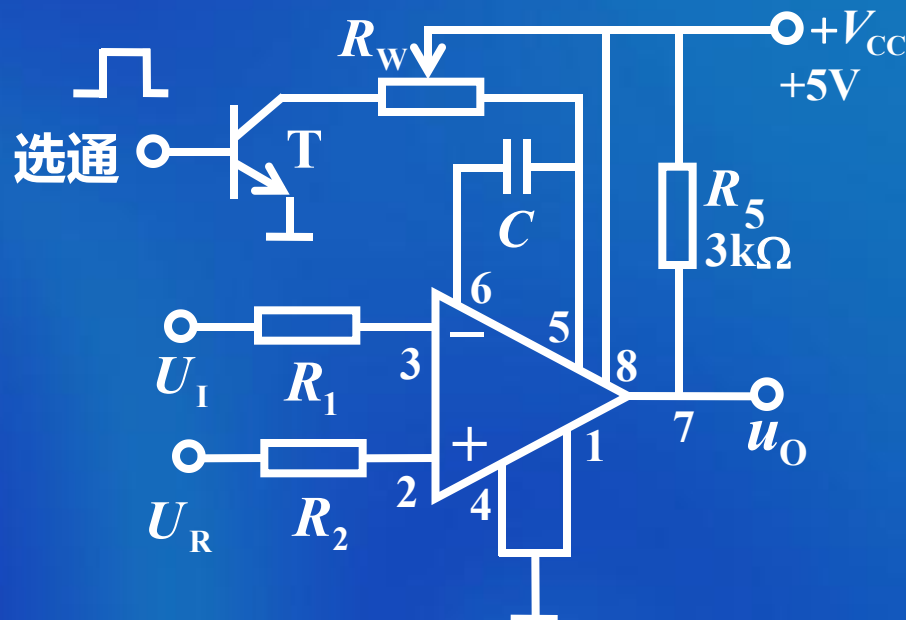


LM111系列典型应用电路

基本应用电路

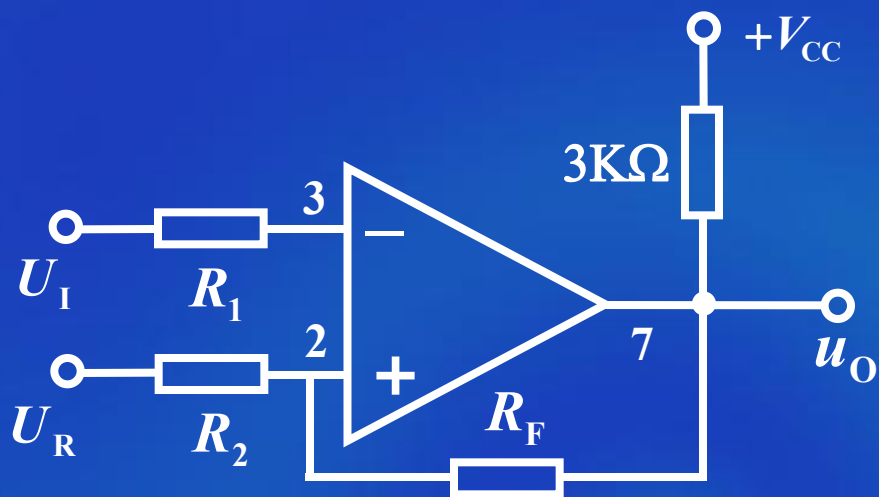


具有选通的接法

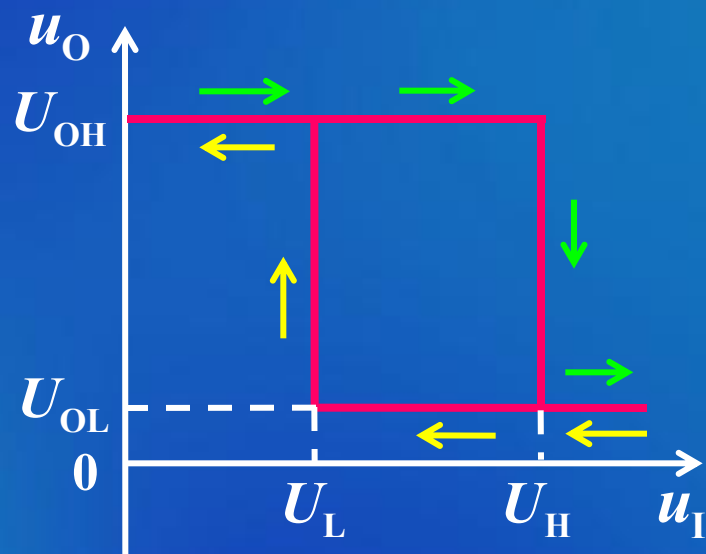


LM111系列实现的施密特电路

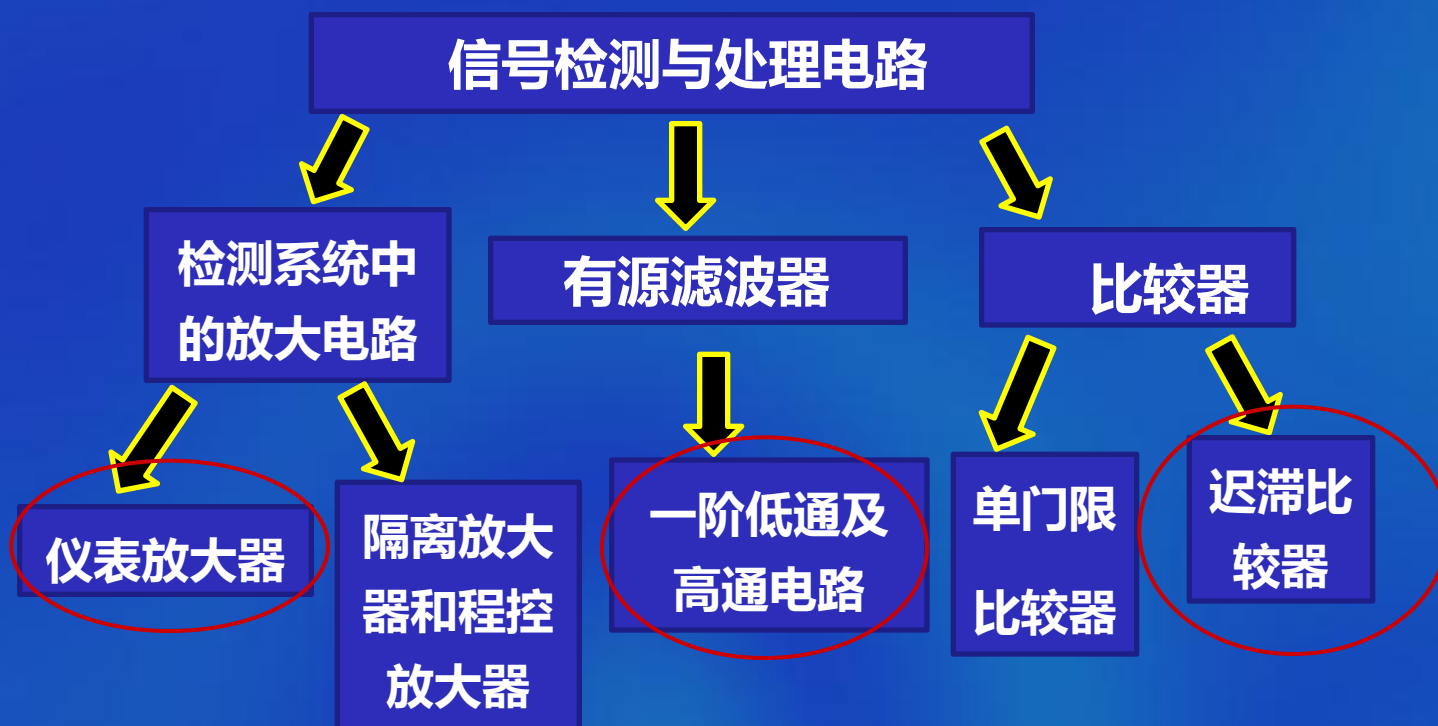
电路



传输特性



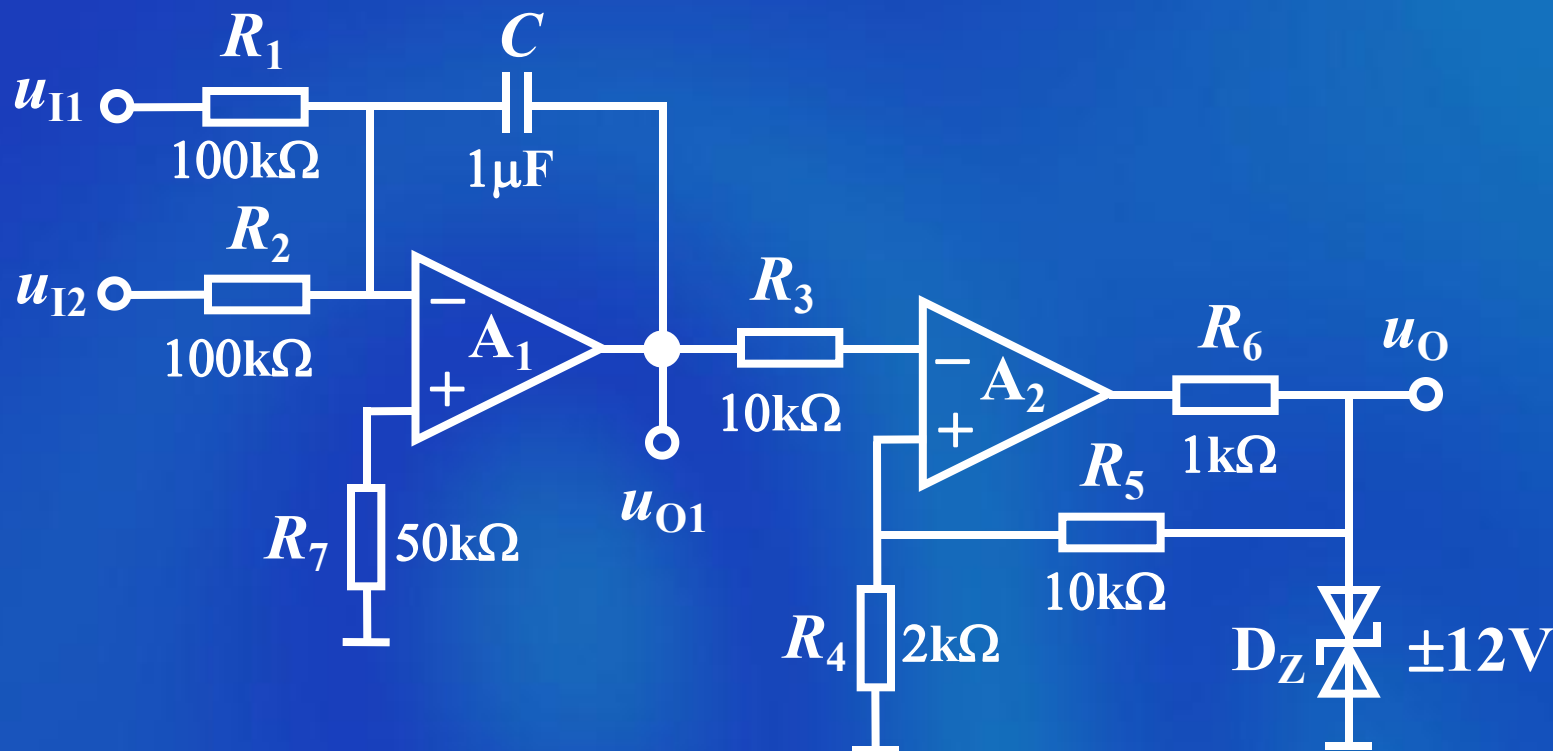
本章小结

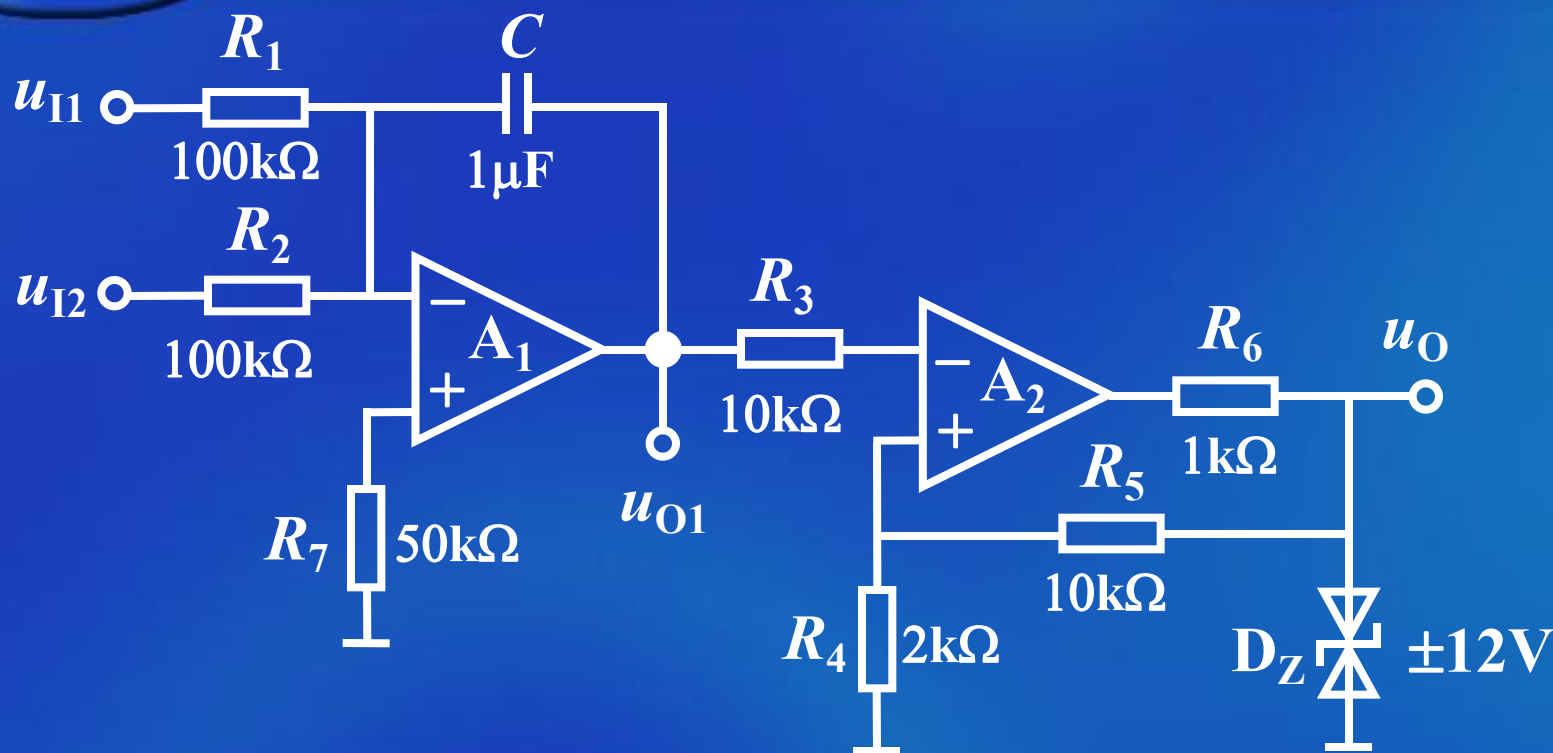


例 1 电路如图所示，已知集成运 A_1 、 A_2 的性能理想。

(1) 写出 u_{O1} 与 u_{I1} 、 u_{I2} 关系式。

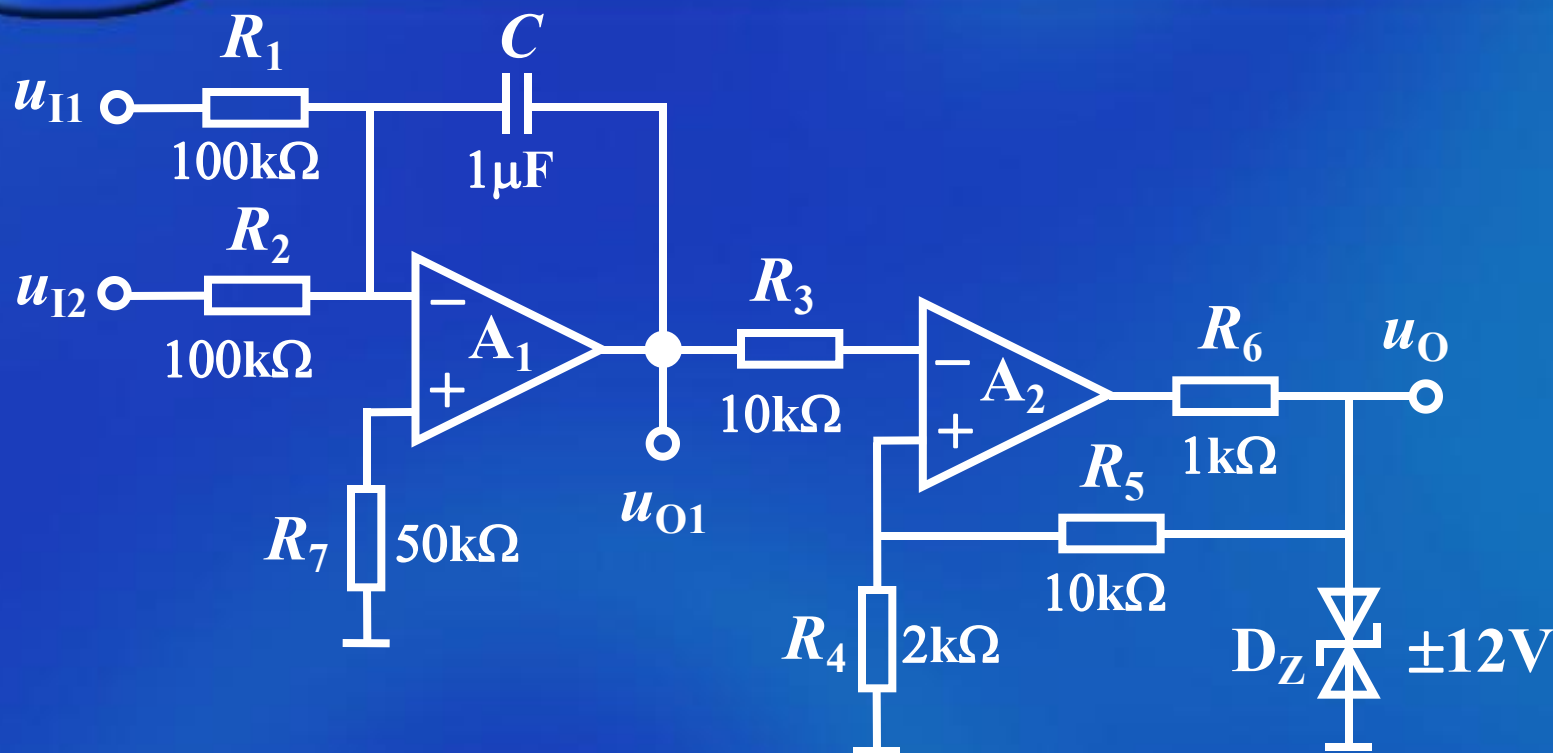
(2) 设 $t=0$ 时， $u_O=12V$ ， $u_C(0)=0V$ 。当 $u_{I1}=-10V$ ， $u_{I2}=0V$ 时，那么经过多长时间 u_O 翻转到 $-12V$ 。





(3) 从 u_O 翻转到 $-12V$ 的时刻起 $u_{I1}=-10V$, $u_{I2}=15V$, 又经过多长时间 u_O 再次翻回 $12V$ 。

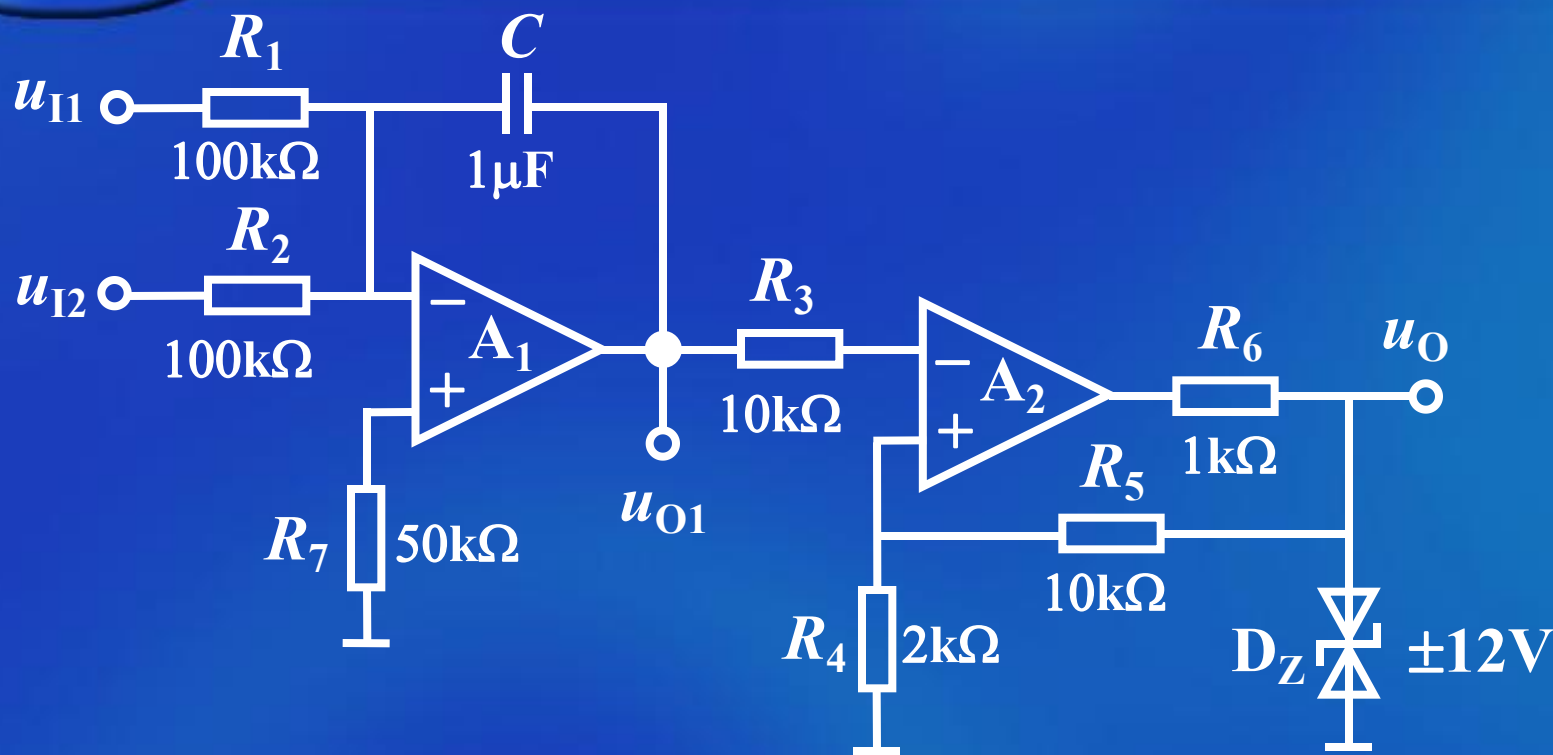
(4) 画出 u_{I1} u_{I2} 与 u_{O1} 的波形。



解（1）由图可知，运放 A_1 组成了积分电路。故

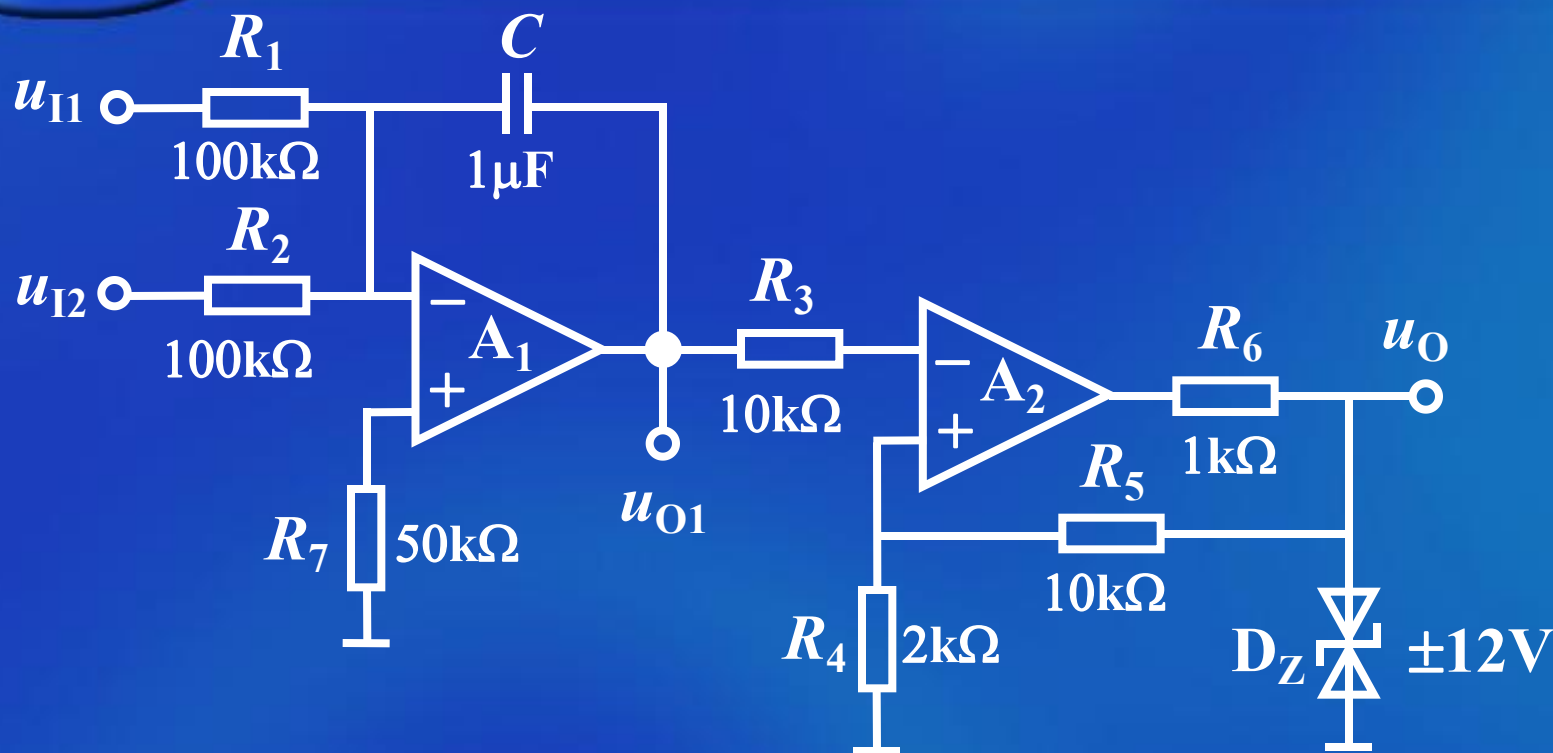
$$u_{O1} = -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^t u_{I1} dt - \frac{1}{R_2 C} \int_{-\infty}^t u_{I2} dt$$

$$\begin{aligned} u_{O1} &= -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^t u_{I1} dt - \frac{1}{R_2 C} \int_{-\infty}^t u_{I2} dt \\ &= -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^t (u_{I1} + u_{I2}) dt \\ &= -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^0 (u_{I1} + u_{I2}) dt - \frac{1}{R_1 C} \int_0^t (u_{I1} + u_{I2}) dt \\ &= -10 \int_0^t (u_{I1} + u_{I2}) dt + u_{O1}(0) \end{aligned}$$



(2) 由于运放 A_2 组成了反相输入迟滞电压比较器。故 u_O 翻转的条件是

$$u_{O1} = \frac{R_4}{R_4 + R_5} u_O = \frac{2}{2 + 10} \times (\pm 12) = \pm 2V$$



已知 $t=0$ 时, $u_O=12\text{V}$, $u_C(0)=0\text{V}$ 。当 $u_{I1}=-10\text{V}$, $u_{I2}=0\text{V}$ 时

$$\begin{aligned} u_{O1} &= -10 \int_0^t (u_{I1} + u_{I2}) dt + u_{O1}(0) \\ &= 100 t \end{aligned}$$

令 $u_{O1} = 100 t = 2V$

得 u_O 翻转到 $-12V$ 的时间为

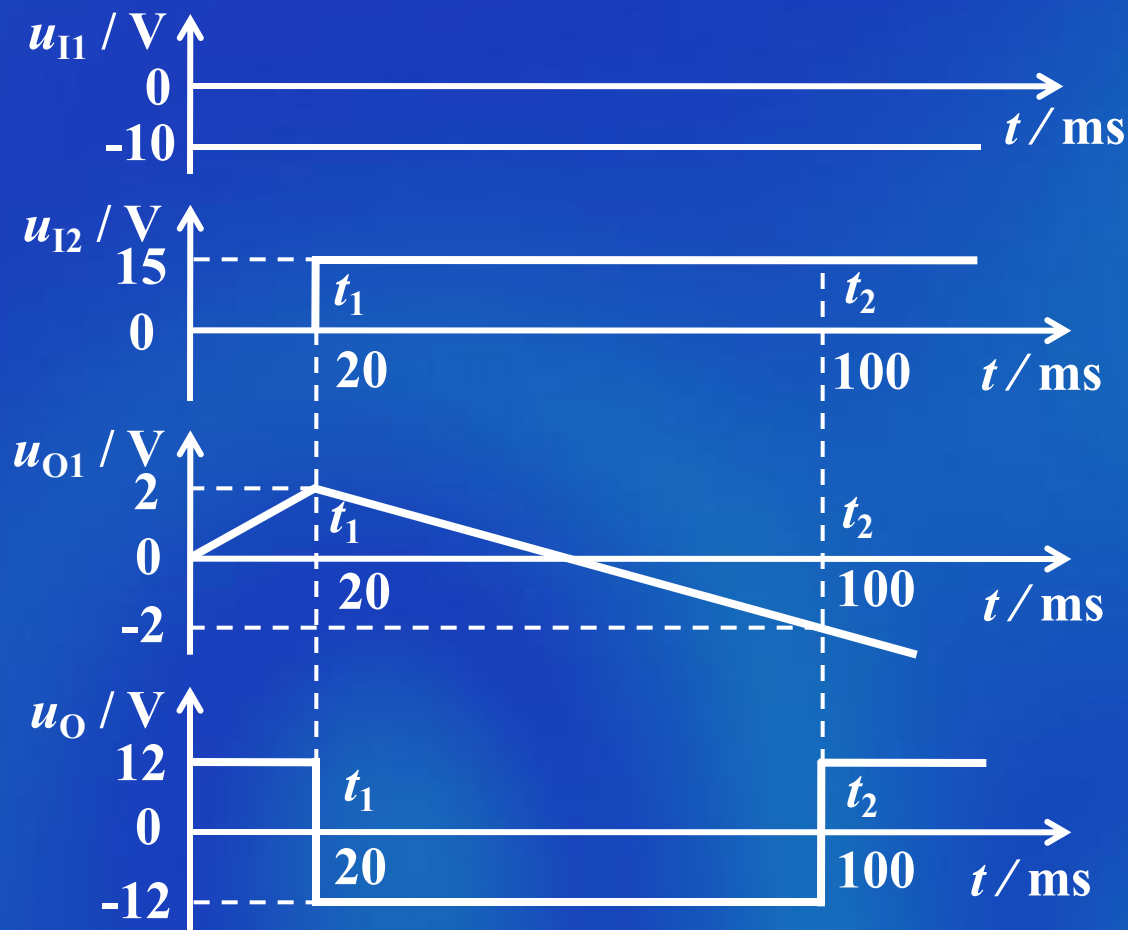
$$t_1 = 20ms$$

(3) 当 $u_{O1} = -2V$ 时 u_O 再次由 $-12V$ 翻转到 $12V$ 。

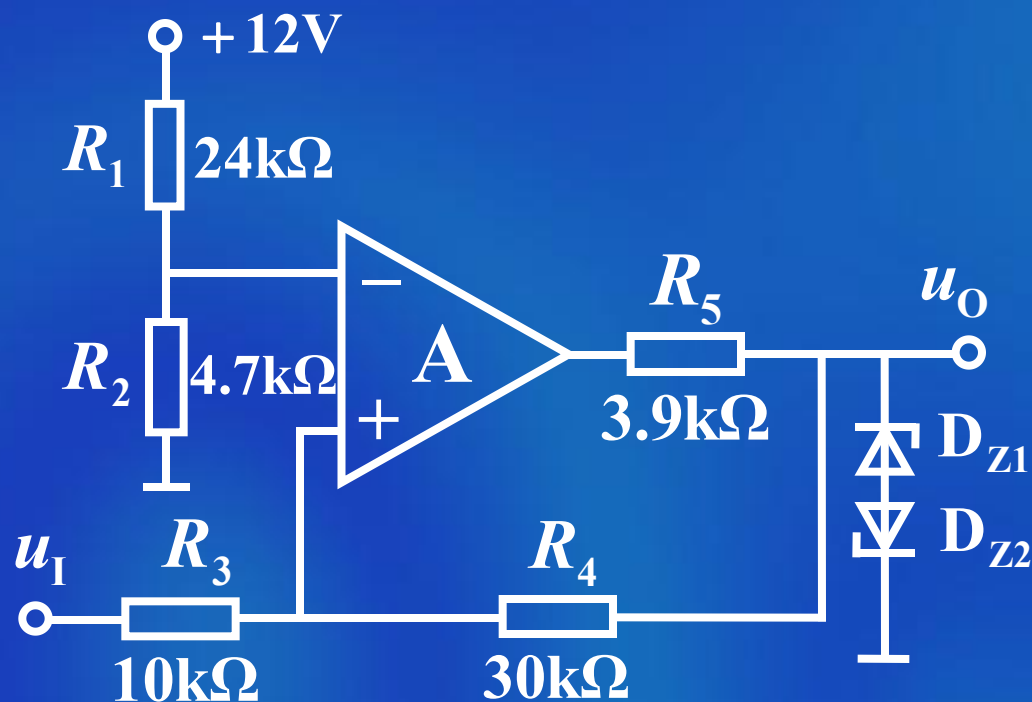
令 $u_{O1}(t_2) = -10 \int_{t_1}^{t_2} (u_{I1} + u_{I2}) dt + u_{O1}(t_1) = -2V$

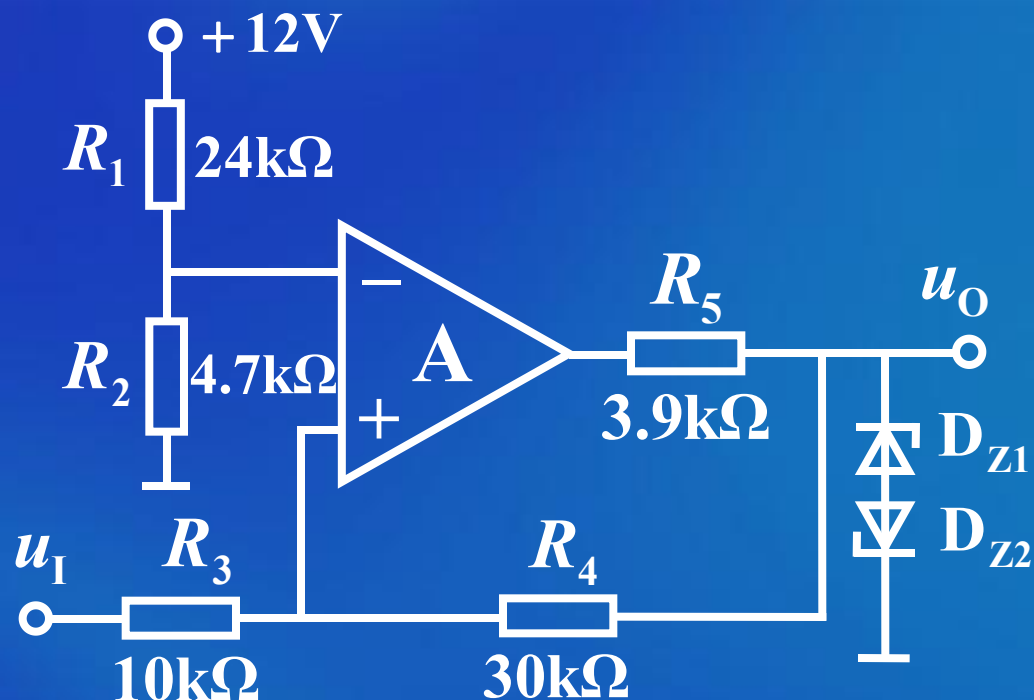
即 $-10 \times (-10 + 15)(t_2 - t_1) + 2 = -2$

解得 $t_2 - t_1 = 80ms$

(4) u_{I1} 、 u_{i2} 、 u_{O1} 与 u_O 的波形图

例2 在图示电路中，已知稳压管 D_{Z1} 、 D_{Z2} 的击穿电压分别为 $U_{Z1}=3.4V$ ， $U_{Z2}=7.4V$ ，正向压降皆为 $U_{D1}=U_{D2}=0.6V$ ，运放A具有理想的特性。画出 u_I 由 $-6V$ 变至 $+6V$ ，再由 $+6V$ 变至 $-6V$ 时电路的电压传输特性曲线。





解 (a) 由图可知电路的输出电压极限值

$$U_{\text{omax}} = U_{Z1} + U_{D2} = 3.4 + 0.6 = 4\text{V}$$

$$U_{\text{omin}} = -U_{D1} - U_{Z2} = -0.6 - 7.4 = -8\text{V}$$

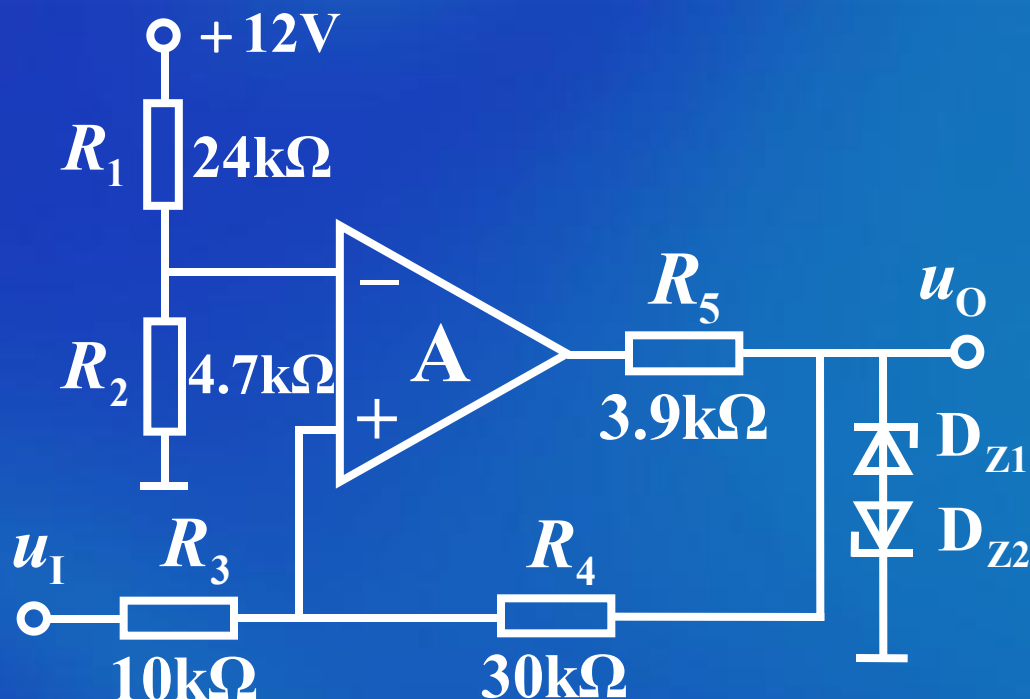
(b) 运放反相输入端电压

$$\begin{aligned}
 U_R &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 12 \\
 &= \frac{4.7}{24 + 4.7} \times 12 \\
 &\approx 2V
 \end{aligned}$$

同相输入端电压

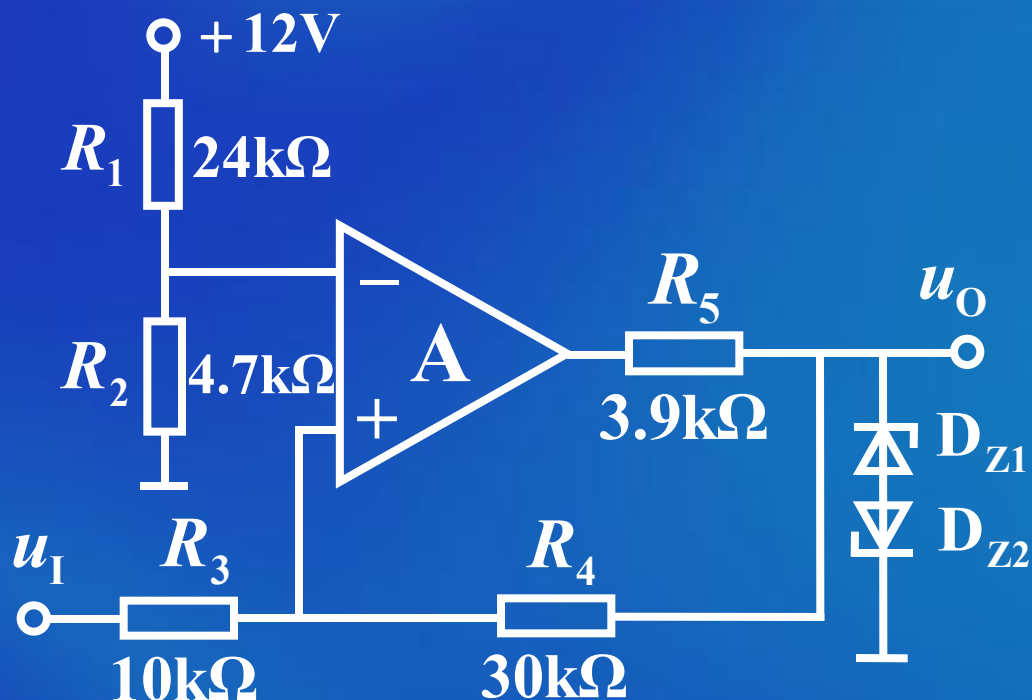
$$u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_I + \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_O$$

当输入电压 u_I 由-6V 向+6V方向变化时，如果同相输入端的电压 u_+ 低于 U_R ，输出电压 u_O 为 U_{omin} ；



当同相输入端的电压 u_+ 略高于 U_R 时，比较器翻转，输出电压 u_O 为 U_{omax} 。

设此时的输入电压为 U_H



由 $u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_H + \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{omin} = U_R$ 得

$$U_H = 5.3V$$

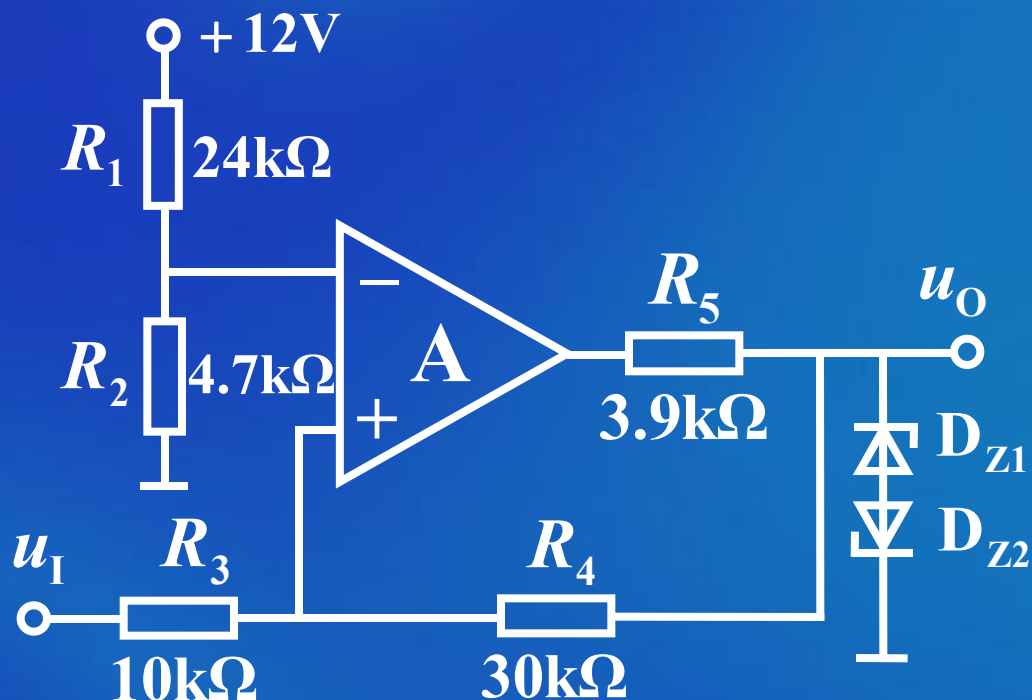
当 u_I 由+6V向-6V方向变化时, 如果 u_+ 高于 U_R , 输出电压 u_O 为 U_{omax} ;

当 u_+ 略低于 U_R 时, 比较器再次翻转, 输出电压 u_O 为 U_{omin} 。

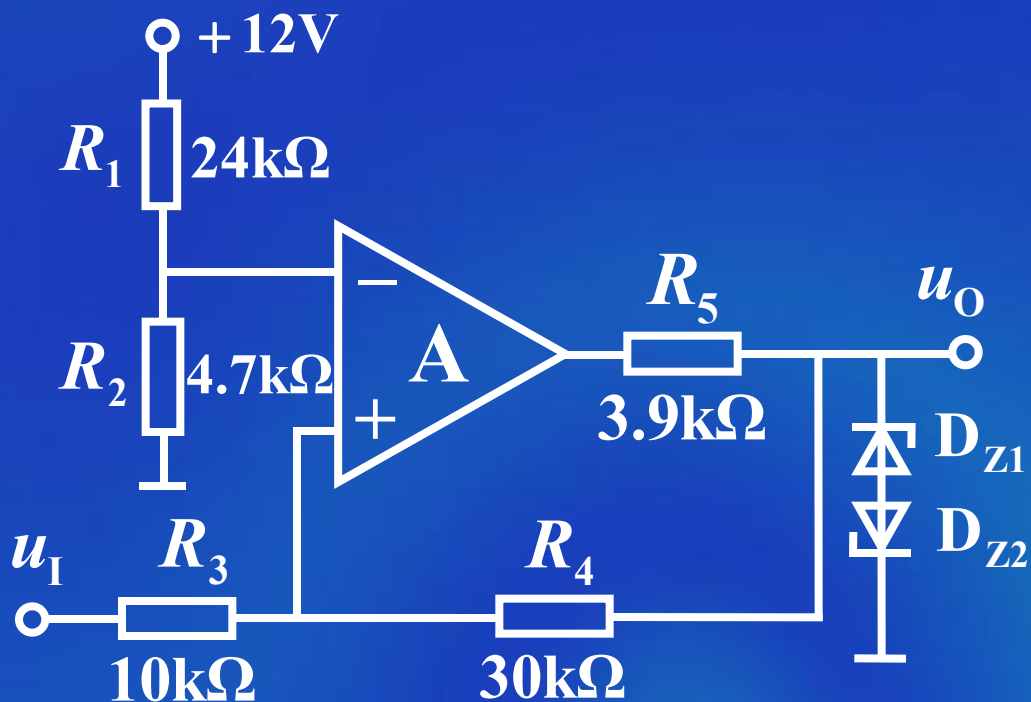
设此时的输入电压为 U_L

$$\text{由 } u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_L + \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{omax} = U_R \text{ 得}$$

$$U_L = 1.3V$$



由此可画出电路的传输特性



传输特性

