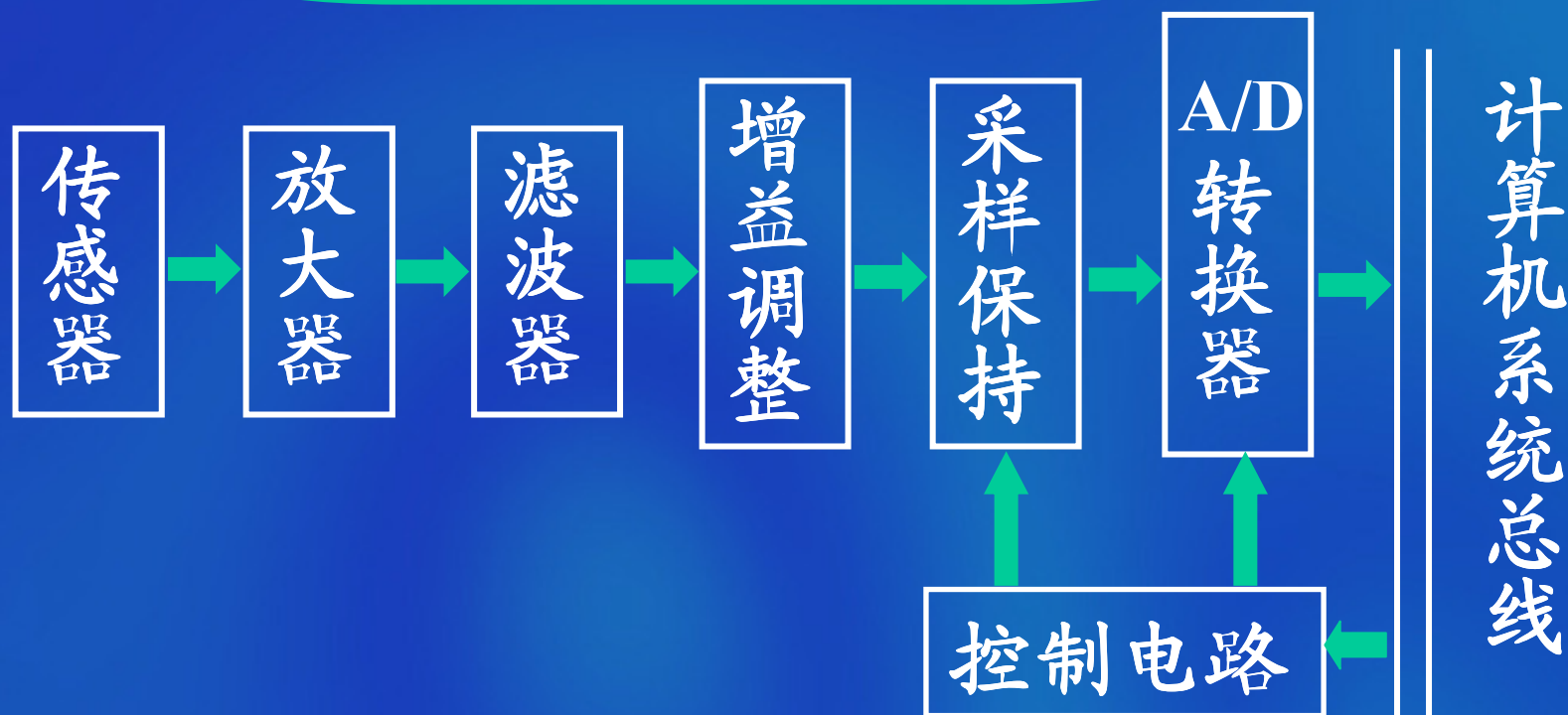


## 7 信号检测与处理电路

### 7.1 电子系统概述

#### 信号检测系统基本框图



提取测信号

进一步去除  
无用信号

联系处理系  
统的桥梁

放大测量信号  
抑制干扰信号

信号加工  
处理系统

传感器

放大器

滤波器

增益调整

采样保持

A/D  
转换器

控制电路

计算机系统总线

上页

下页

后退

## 7.2 信号检测系统中的放大电路

### 7.2.1 测量放大器

主要特点 {

- 输入抗阻高
- 共模抑制比高
- 常用于测量直流缓变微弱信号

应用：热电偶、应变电桥、流量计、生物电测量等

# 1. 三运放测量放大器

## (1) 基本电路图

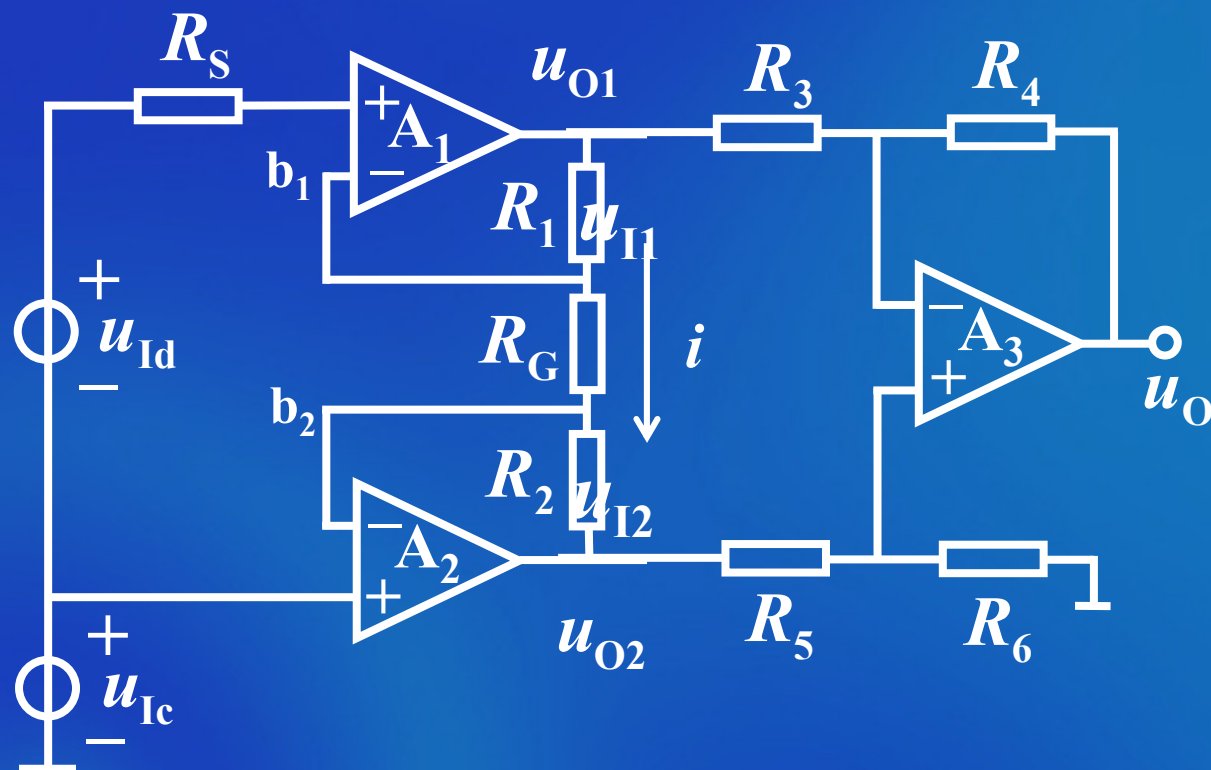
共模抑制比高

输入抗阻高

对电路要求:

a. 运放 $A_1$ 、 $A_2$ 的特性一致性

b. 电阻 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 要精密配合 (  $R_3=R_5$ 、 $R_4=R_6$  )



## (2) 电路分析

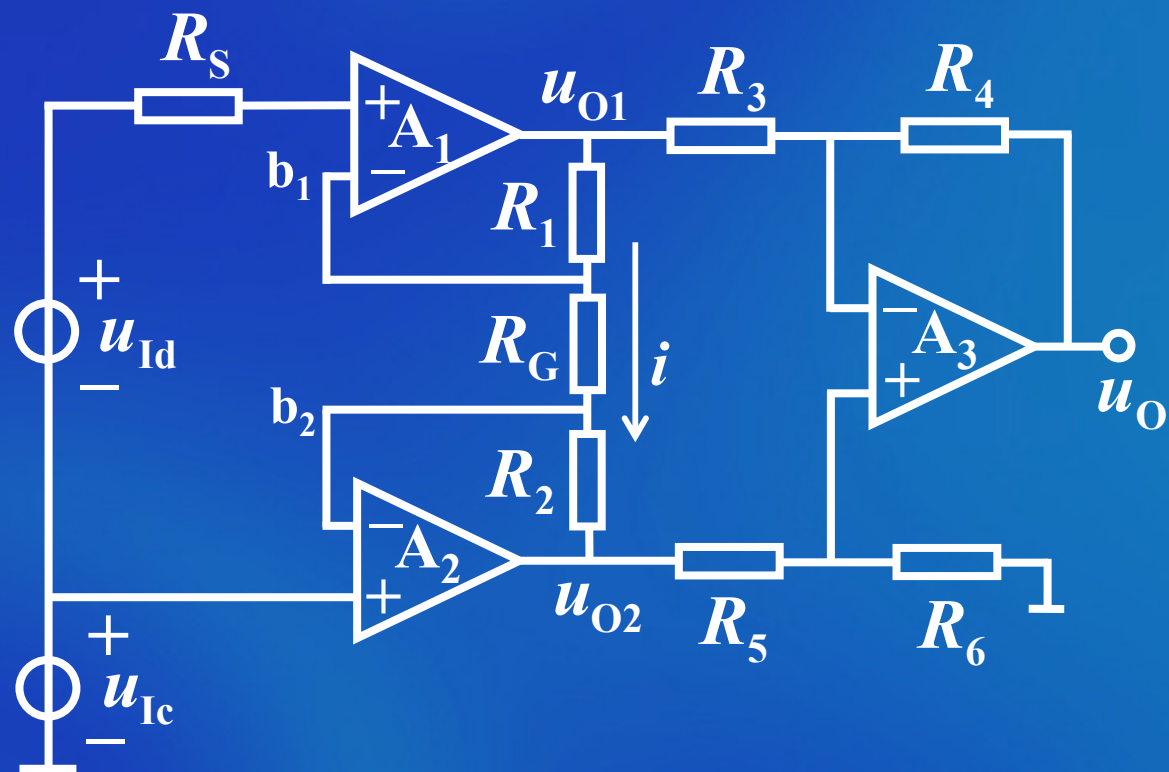
由图可知

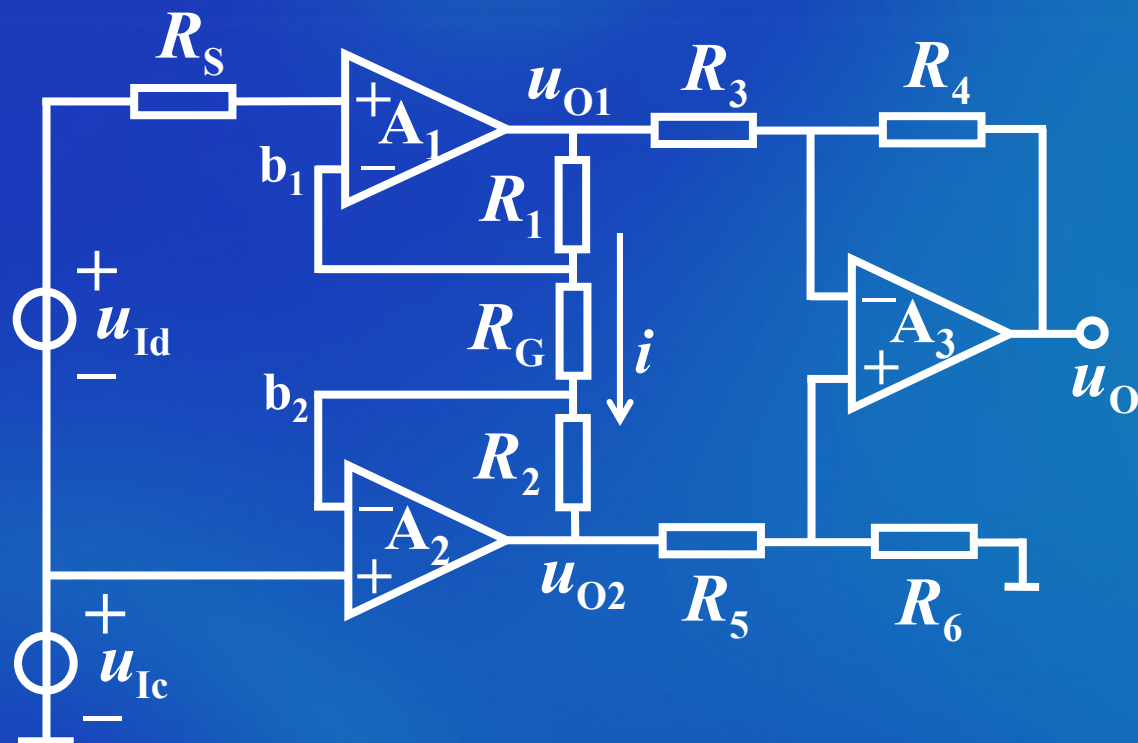
$$u_{b1} = u_{Id} + u_{Ic}$$

$$u_{b2} = u_{Ic}$$

$$i = \frac{u_{b1} - u_{b2}}{R_G} = \frac{u_{O1} - u_{O2}}{R_1 + R_G + R_2}$$

而  $u_{b1} - u_{b2} = u_{Id}$





所以

$$u_{O1} - u_{O2} = \frac{R_1 + R_G + R_2}{R_G} u_{Id}$$

$$u_O = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \times \frac{R_6}{R_5 + R_6} u_{O2} - \frac{R_4}{R_3} u_{O1}$$



令  $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \times \frac{R_6}{R_5 + R_6} u_{o2} - \frac{R_4}{R_3} u_{o1}$$

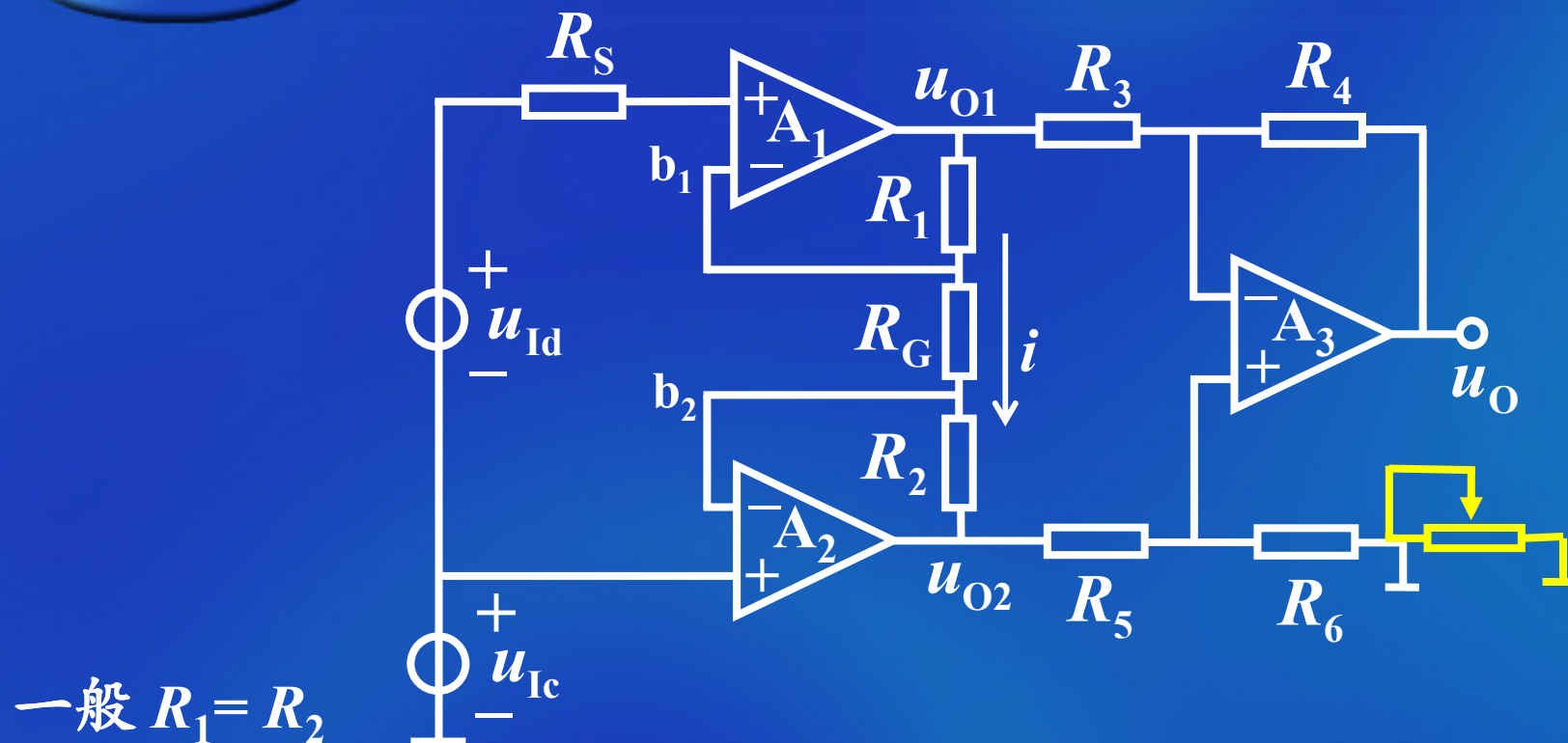
$$= -(u_{o1} - u_{o2})$$

$$= -\left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G}\right) u_{Id}$$

输出信号共模信号  $u_{Ic}$  无关

因此，放大器具有很高的抑制共模信号的能力。

**测量放大器：**高增益、直接耦合、差动输入、单端输出、高输入阻抗、高共模抑制比的放大电路



$$u_O = -\left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G}\right) u_{Id}$$

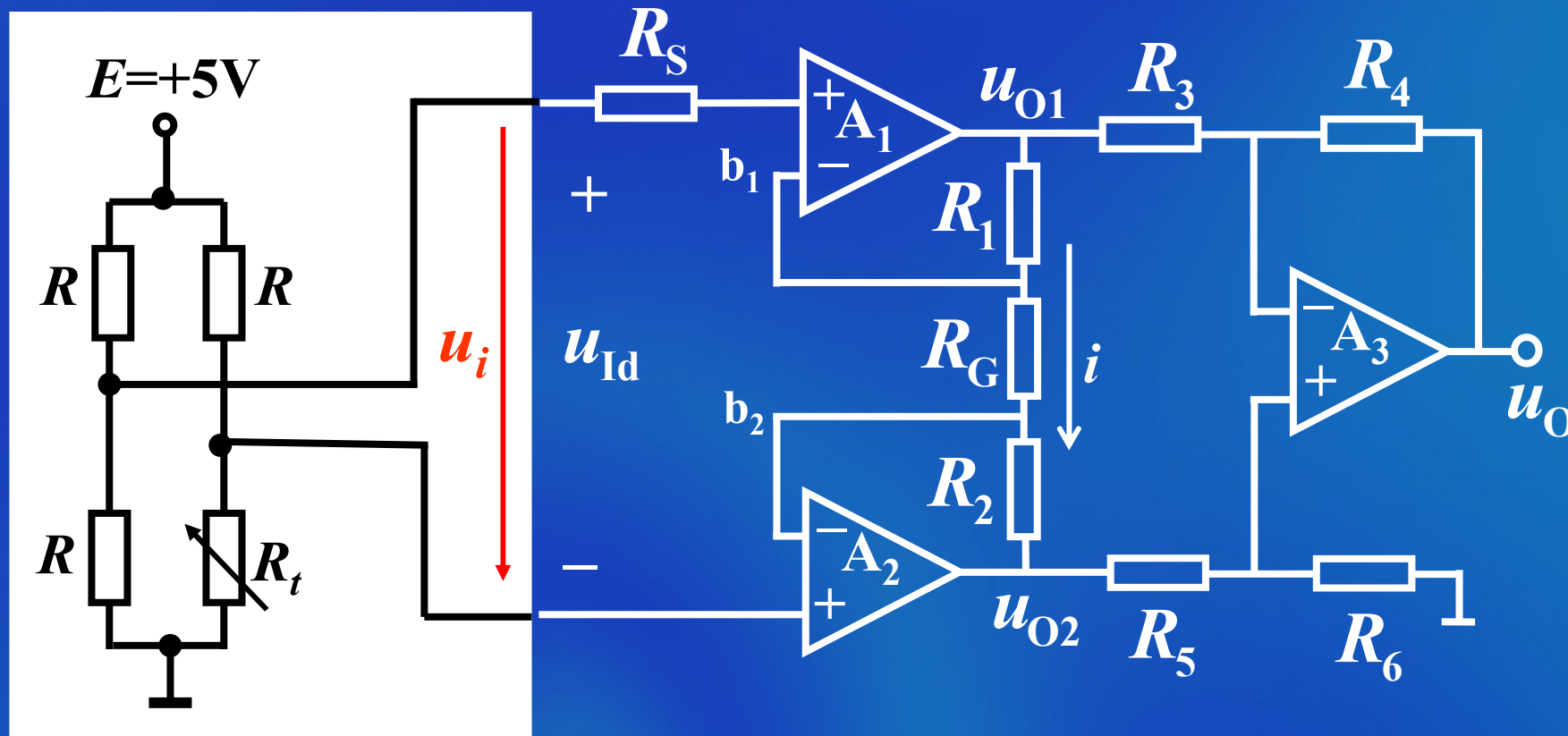
$$= -\left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) u_{Id}$$

问：1.如何改变增益最方便？ $R_G$

2.电阻不一致如何调整？



例：由三运放放大器组成的温度测量电路。



$R_t$  : 热敏电阻

集成化:仪表放大器

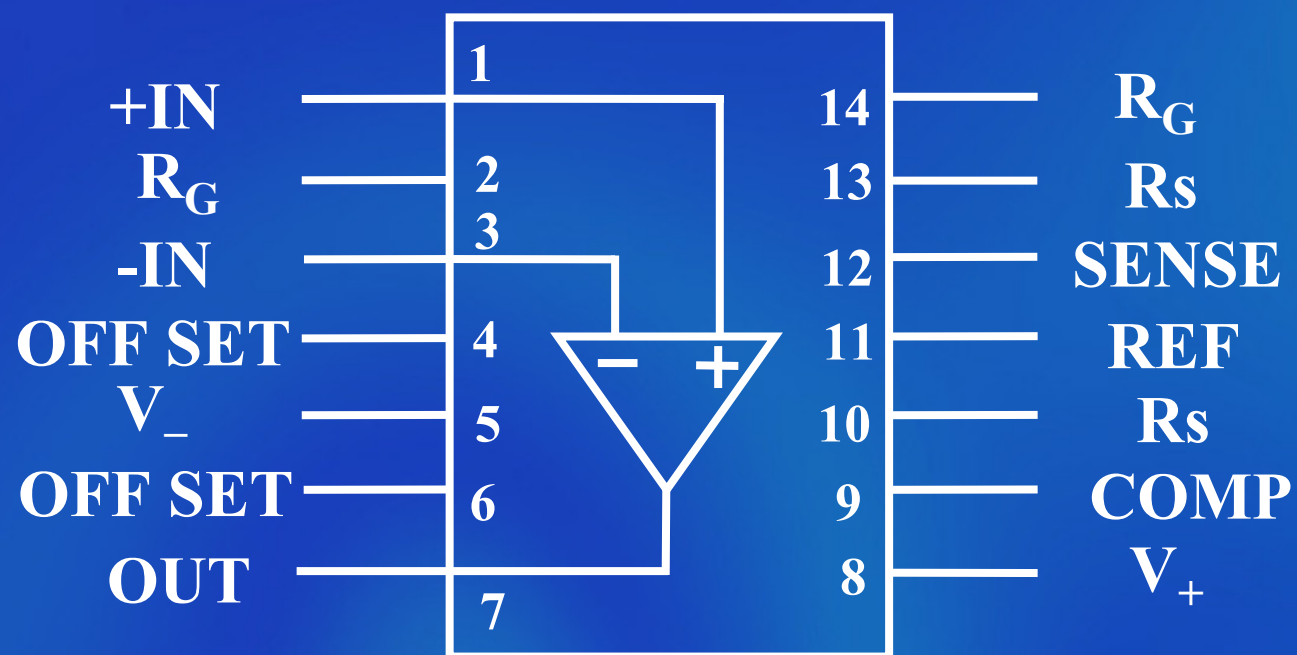
## 2. 单片集成测量放大器AD521

集成化的三运放测量放大器。

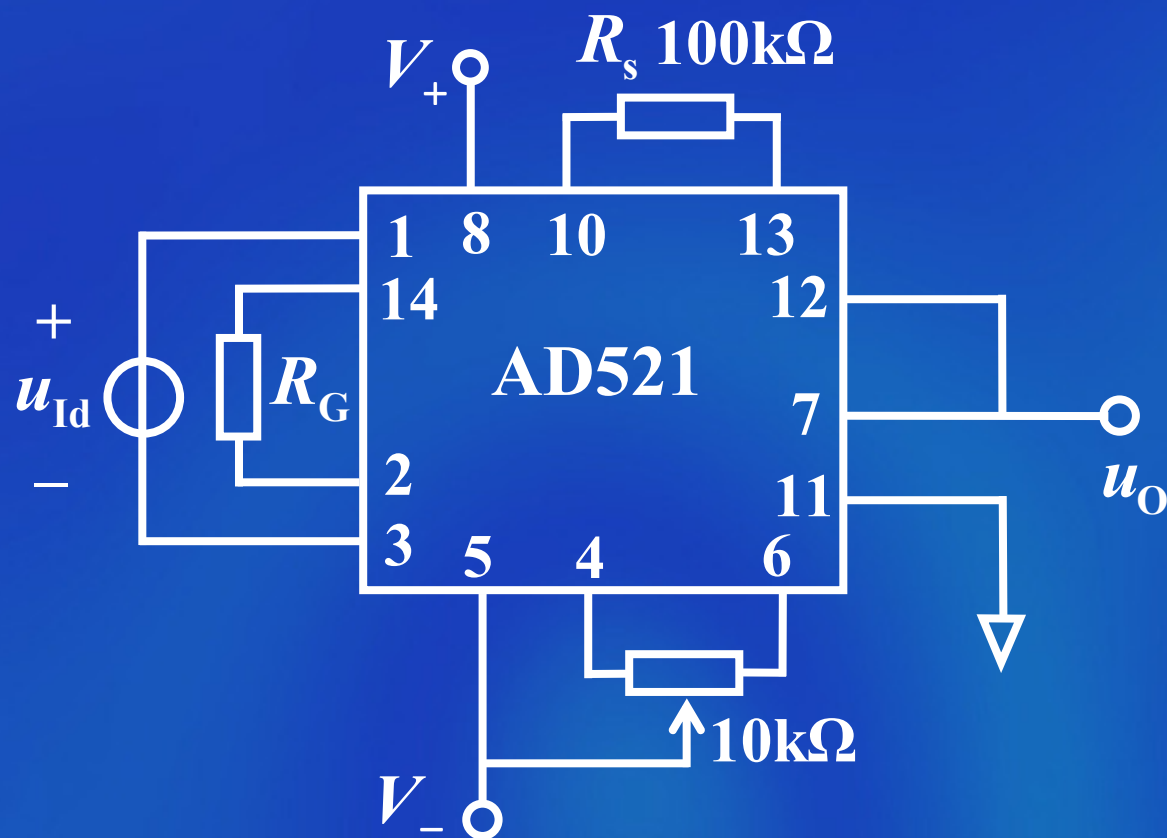
性能指标:

- (1) 共模抑制比120dB
- (2) 输入阻抗 $3 \times 10^9 \Omega$
- (3) 增益带宽大于2MHz
- (4) 电压放大倍数0.1~1000
- (5) 电源电压 $\pm (5 \sim 18)V$
- (6) 过载能力较强, 动态特性好

## (1) 引脚说明



## (2) 基本连接方式图



$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_s}{R_G}$$

## 7.2.2 隔离放大器

特点:

输入回路与输出回路之间是电绝缘的。

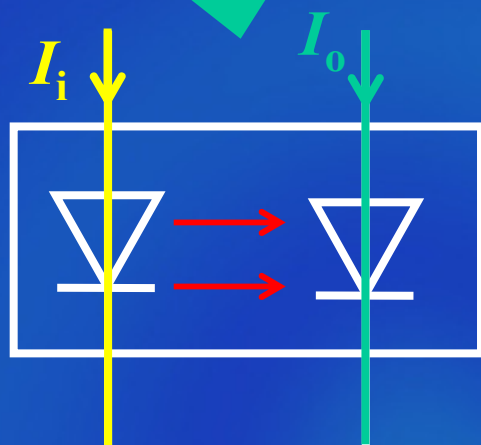
信号传递的主要方式:

{ 电磁耦合, 即经过变压器传递信号  
光电耦合

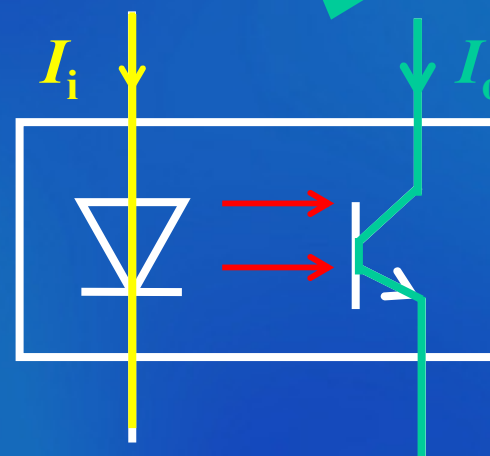
# 1. 光电耦合隔离放大器

## 光电耦合器原理图

二极管——二极管型



二极管——三极管型





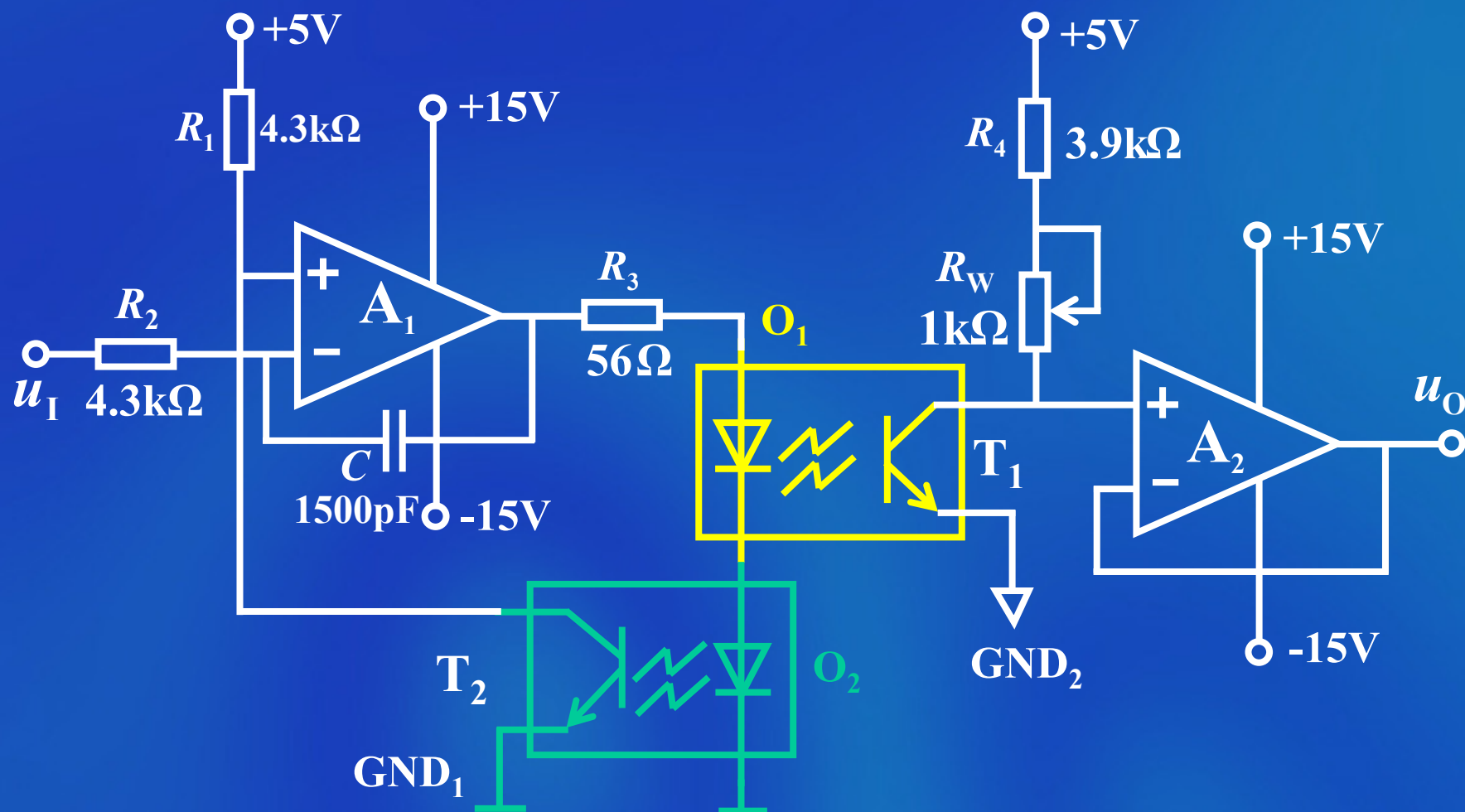
## 光电耦合器的特点

- a. 耦合器中的发光和光敏元件都是非线性器件。
- b. 非线性器件传输模拟信号将会导致信号失真。

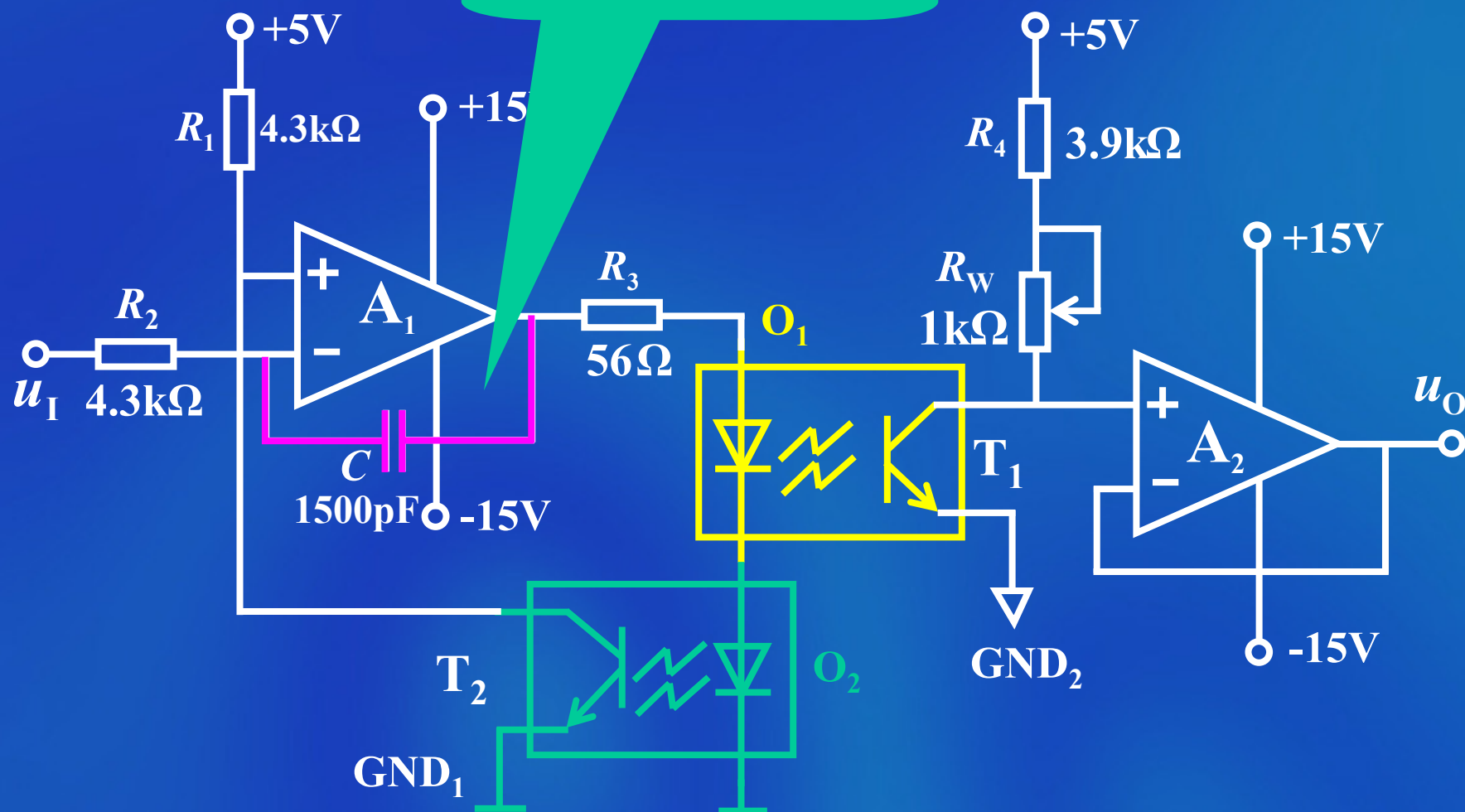
## 克服非线性失真采取的主要措施

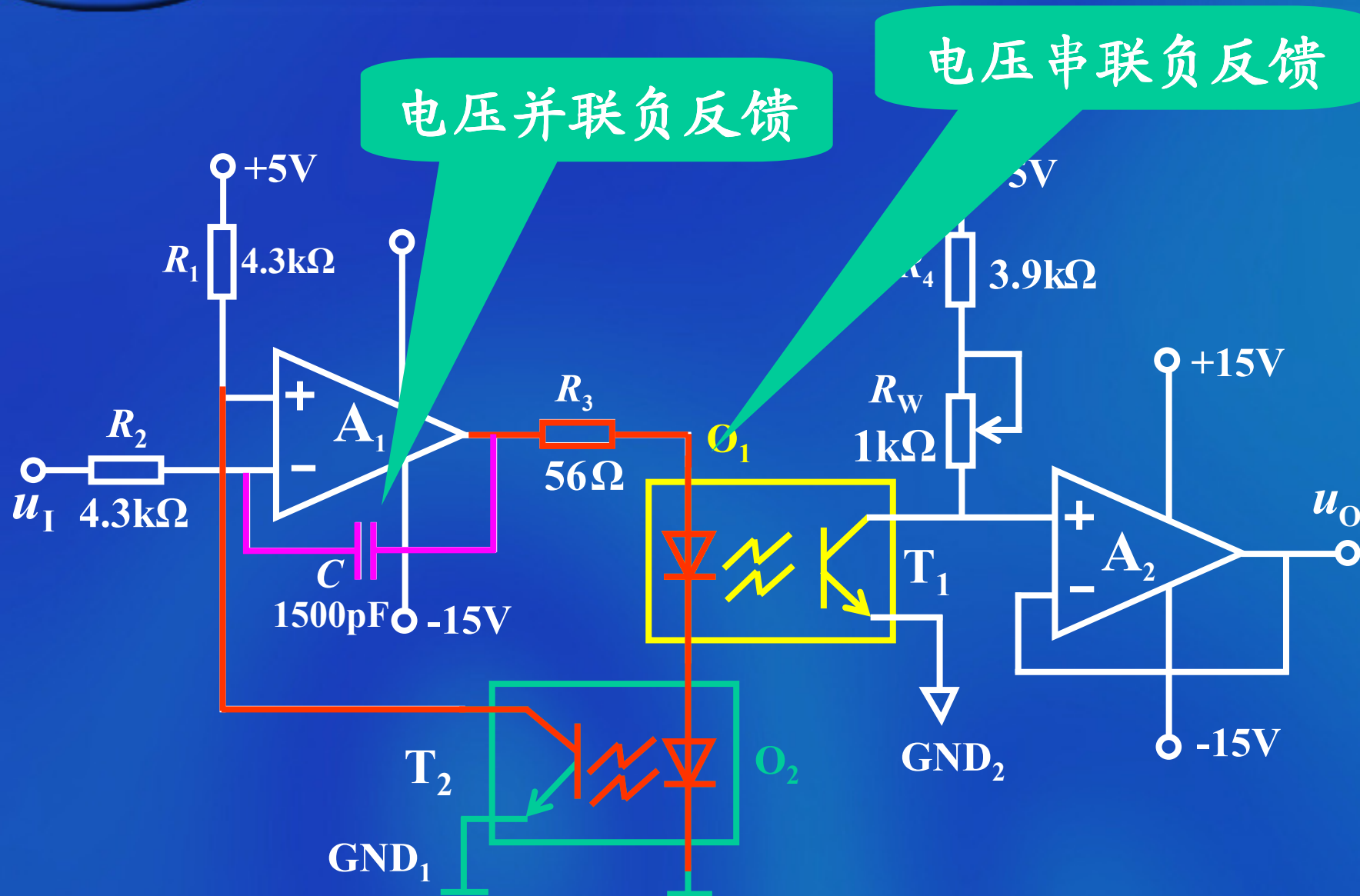
- a. 给非线性器件施加合适的直流偏置，在小范围内线性传输信息。
- b. 采用负反馈技术

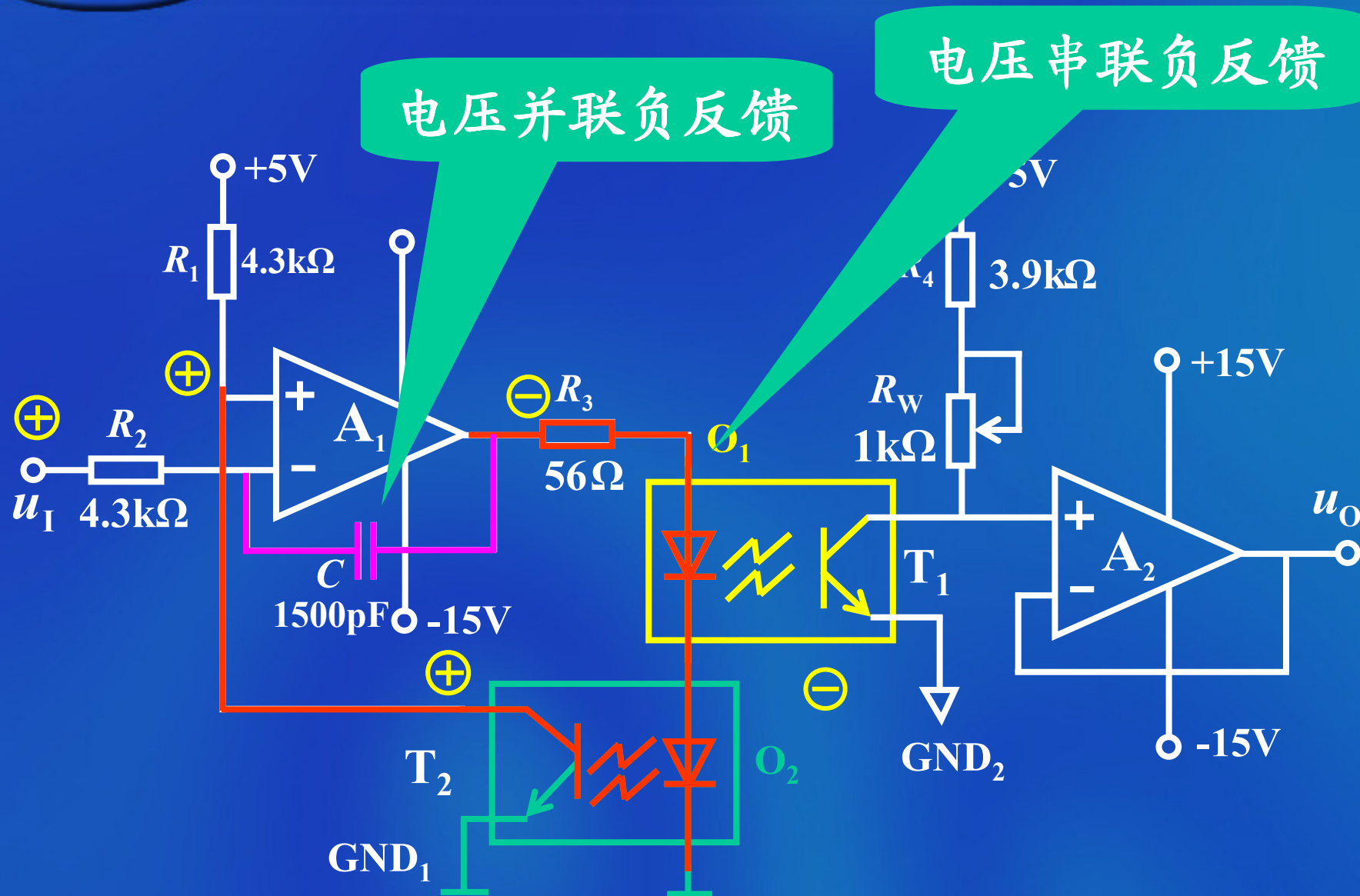
# 一种典型的光电耦合隔离放大器



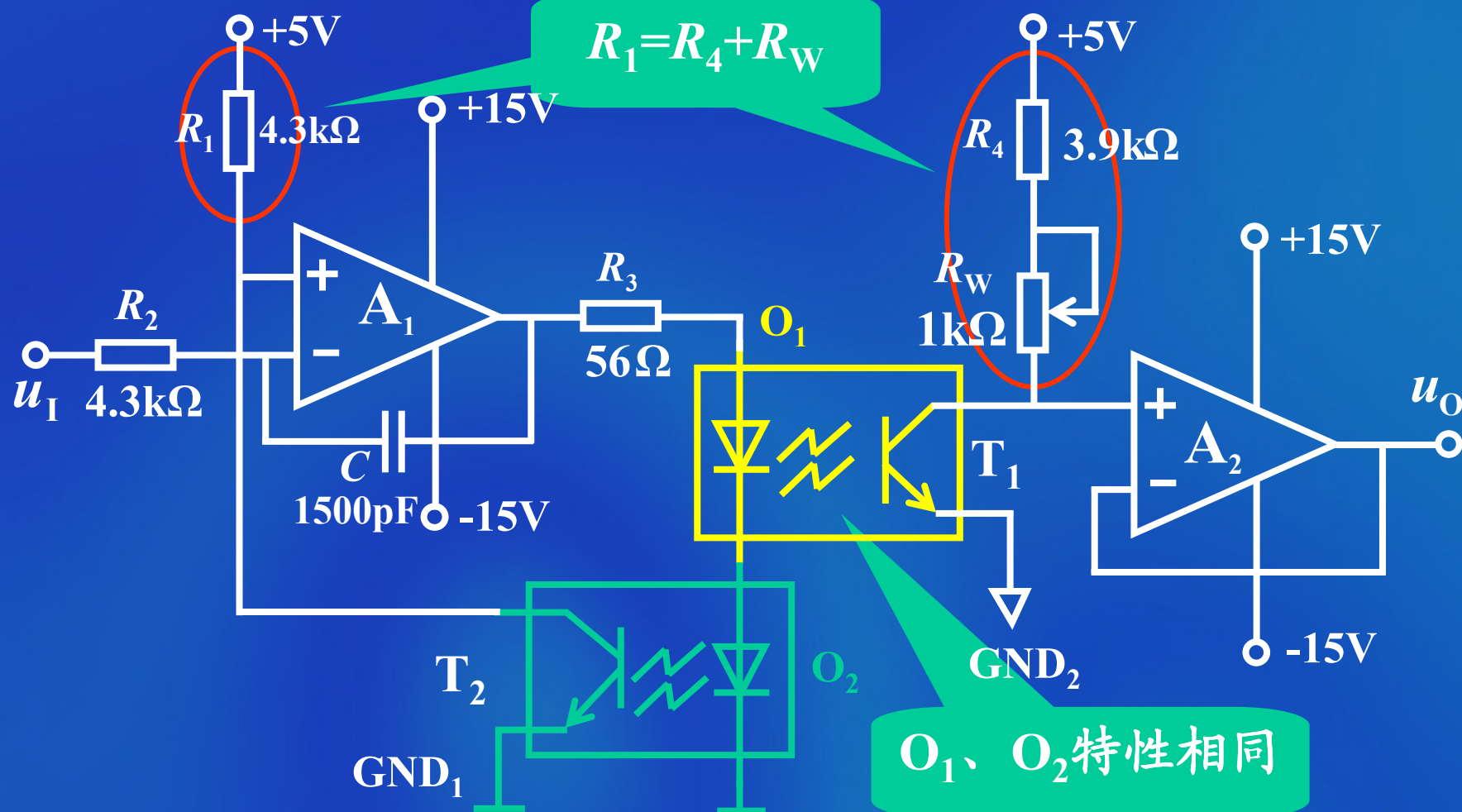
电压并联负反馈



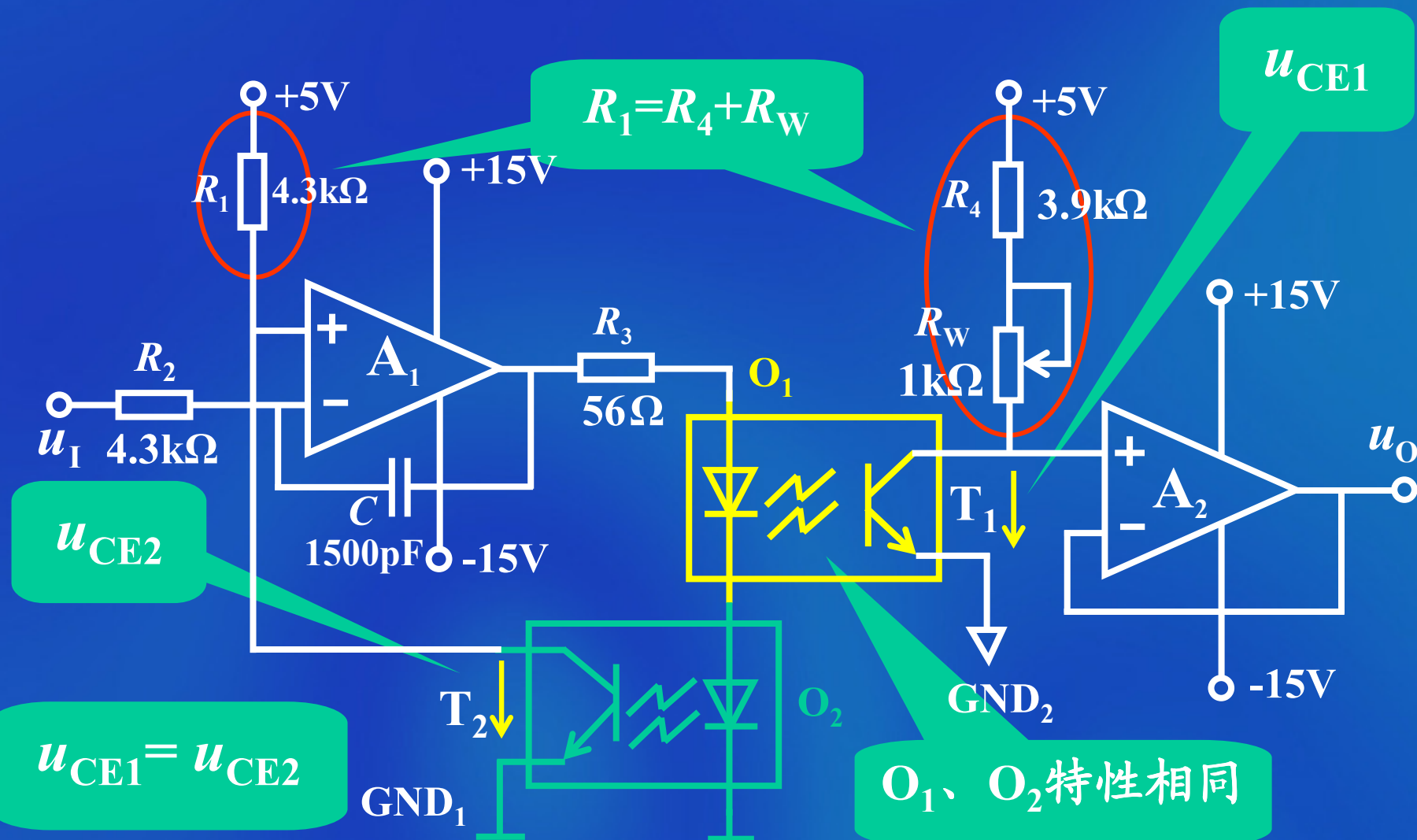


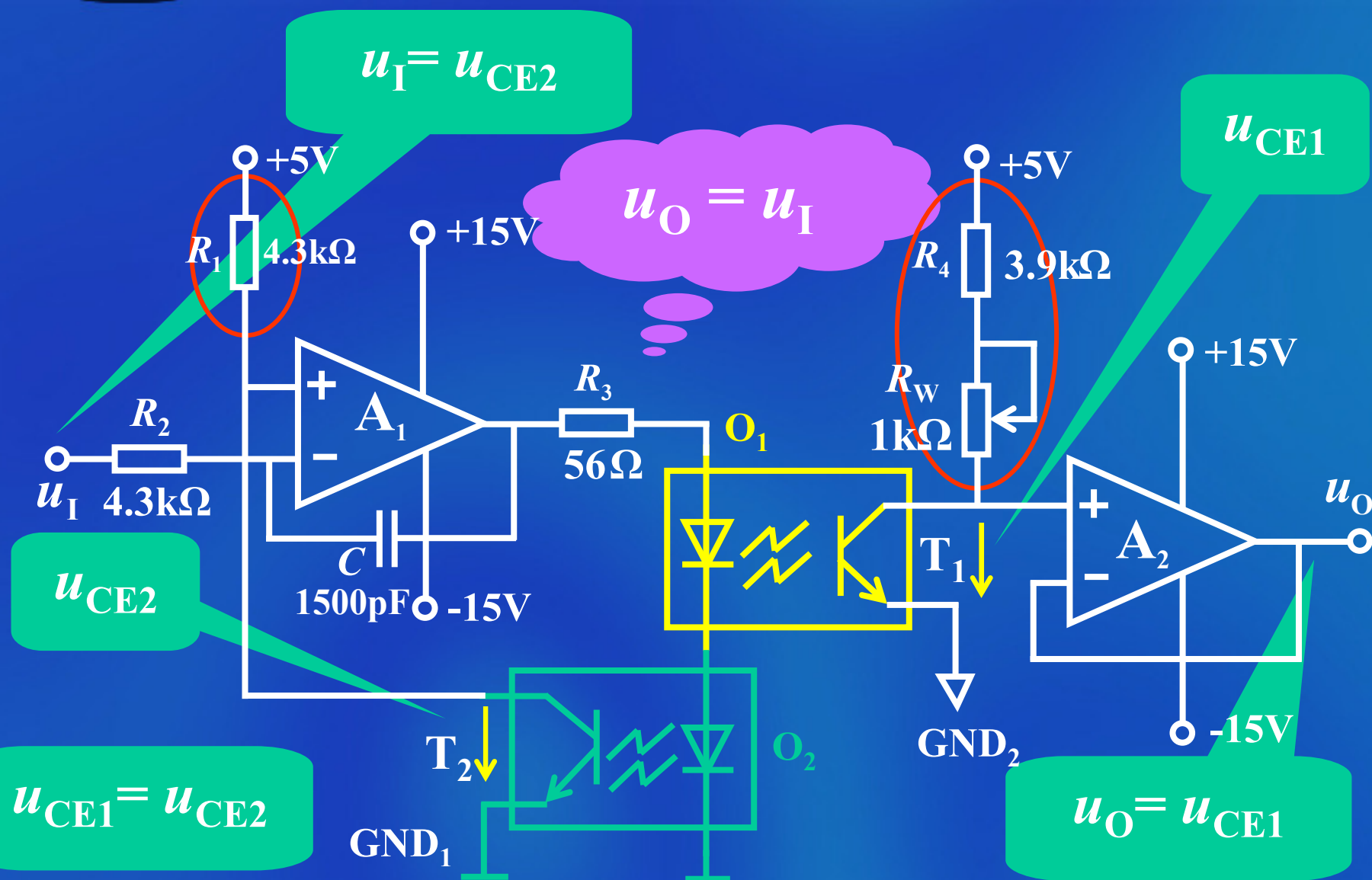


# 工作原理



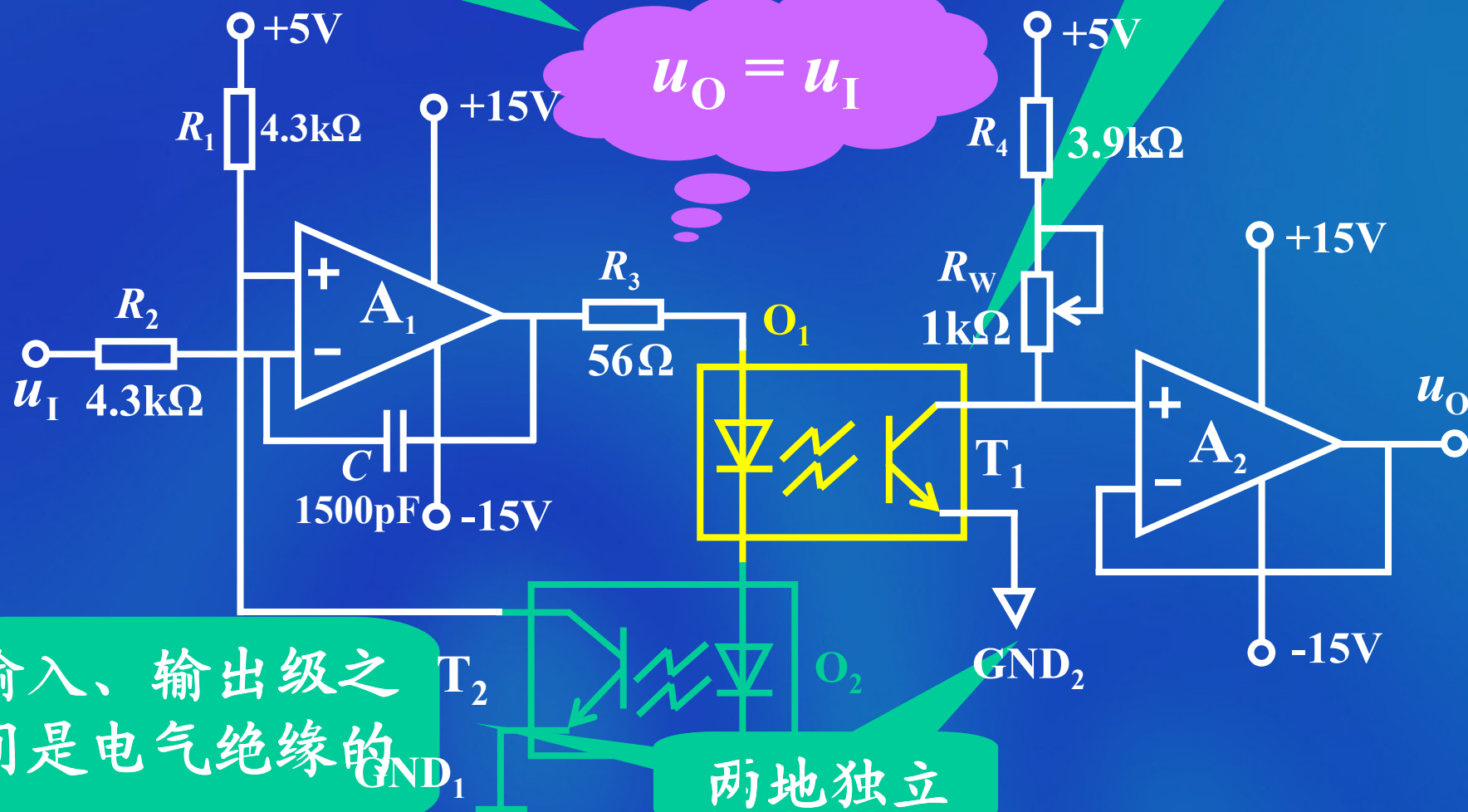






实现信号传输

实现信号隔离



输入、输出级之间是电气绝缘的

两地独立

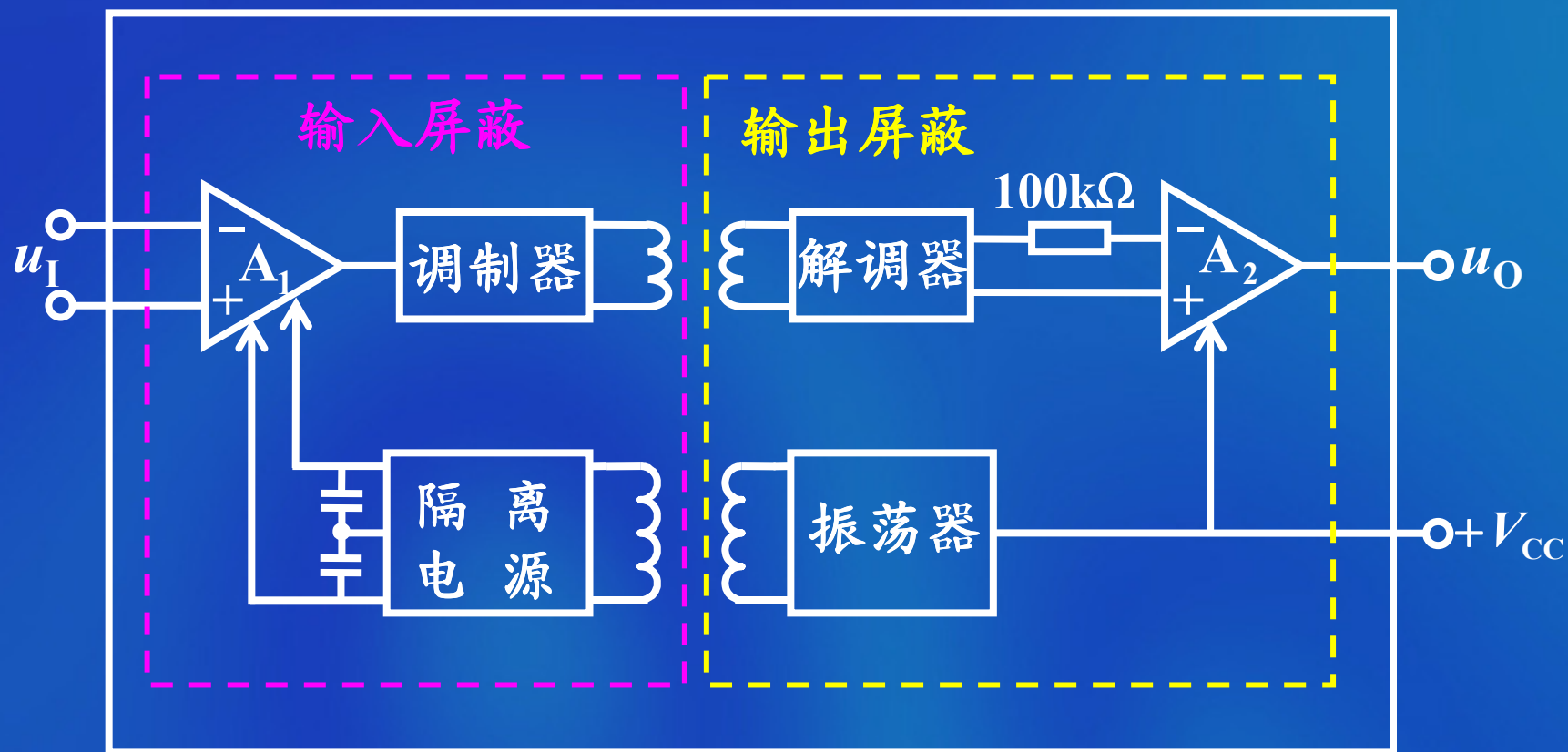
上页

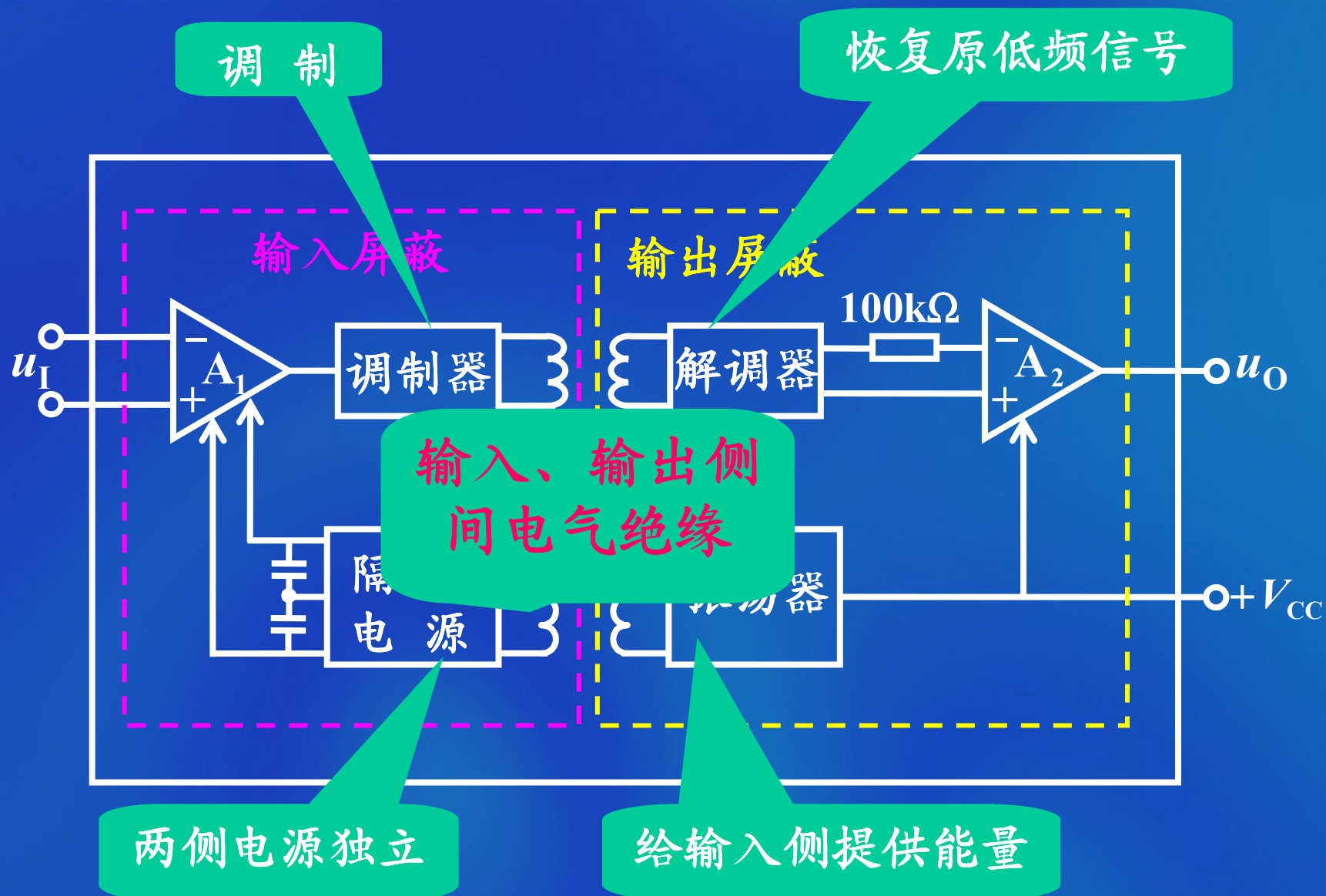
下页

后退

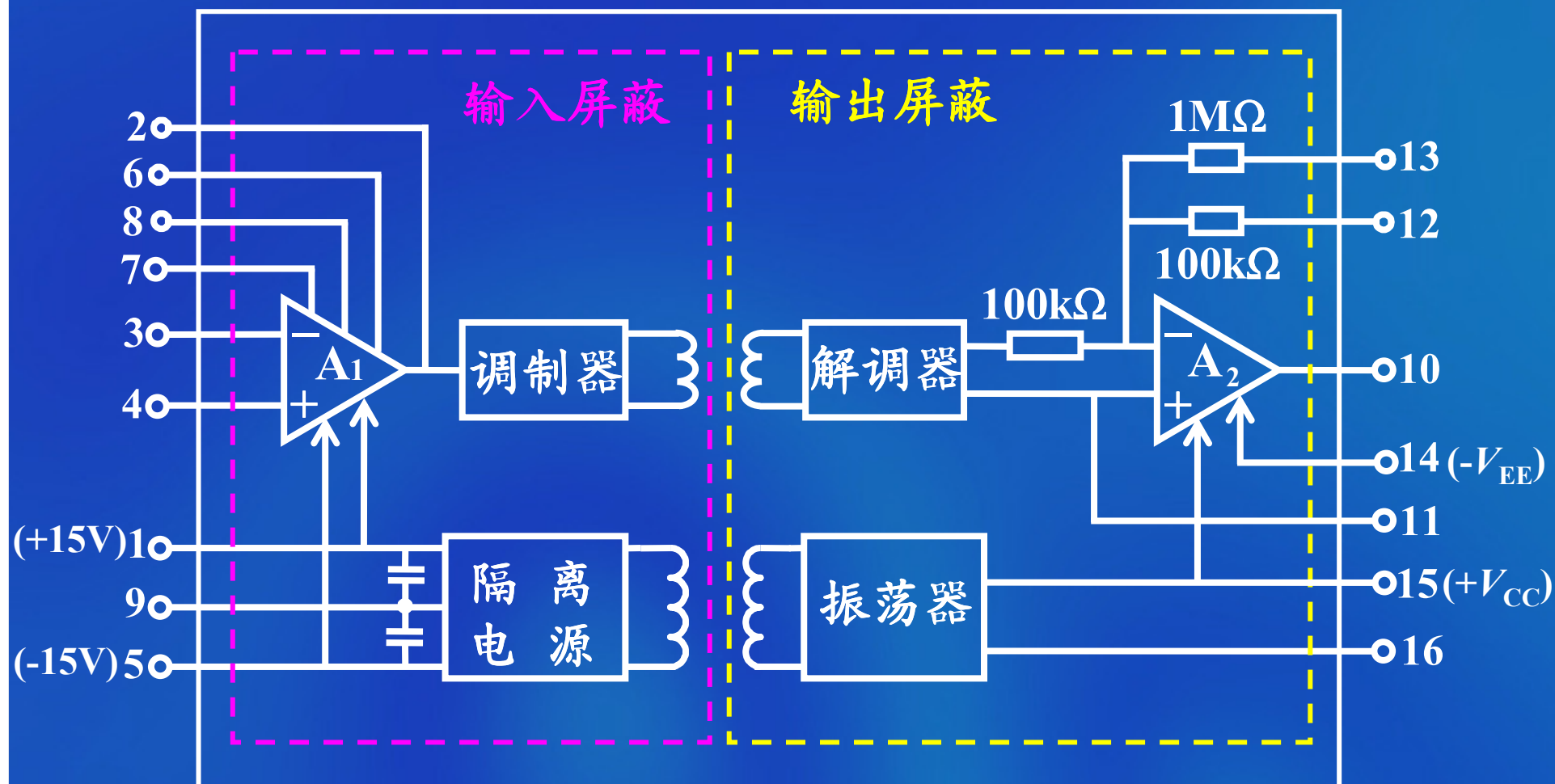
## 2. 变压器隔离放大器

### 放大器原理图





# 变压器隔离放大器AD277原理图和引脚





## 7.3 有源滤波器

### 7.3.1 滤波器的基础知识

功能：只允许某一部分频率的信号顺利的通过。

通带：能够通过信号的频率范围。

阻带：不能够通过信号的频率范围。

截止频率：通带和阻带之间的分界频率。

## 滤波器的分类

a. 根据处理的信号不同 { 模拟滤波器  
数字滤波器

b. 根据使用的滤波元件不同 {  $RC$ 型  
 $LC$ 型  
 $RLC$ 型

c. 根据工作频率不同

低通滤波器

高通滤波器

带通滤波器

带阻滤波器

全通滤波器

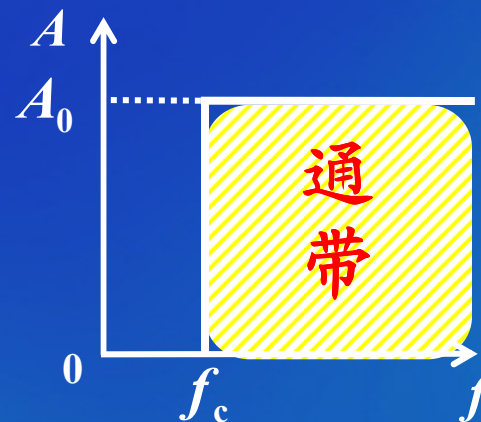
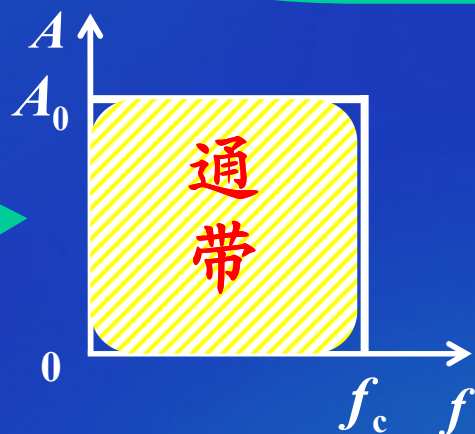
上页

下页

后退

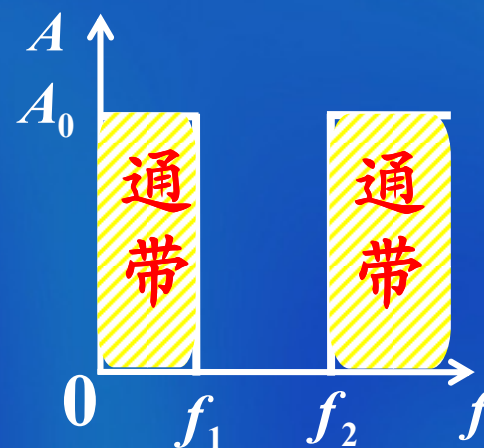
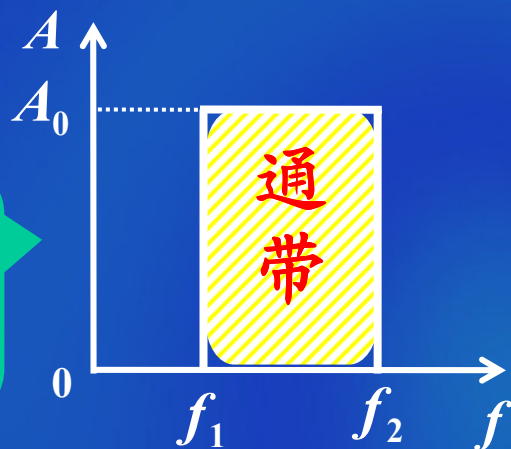
## 理想滤波器的幅频特性

低通



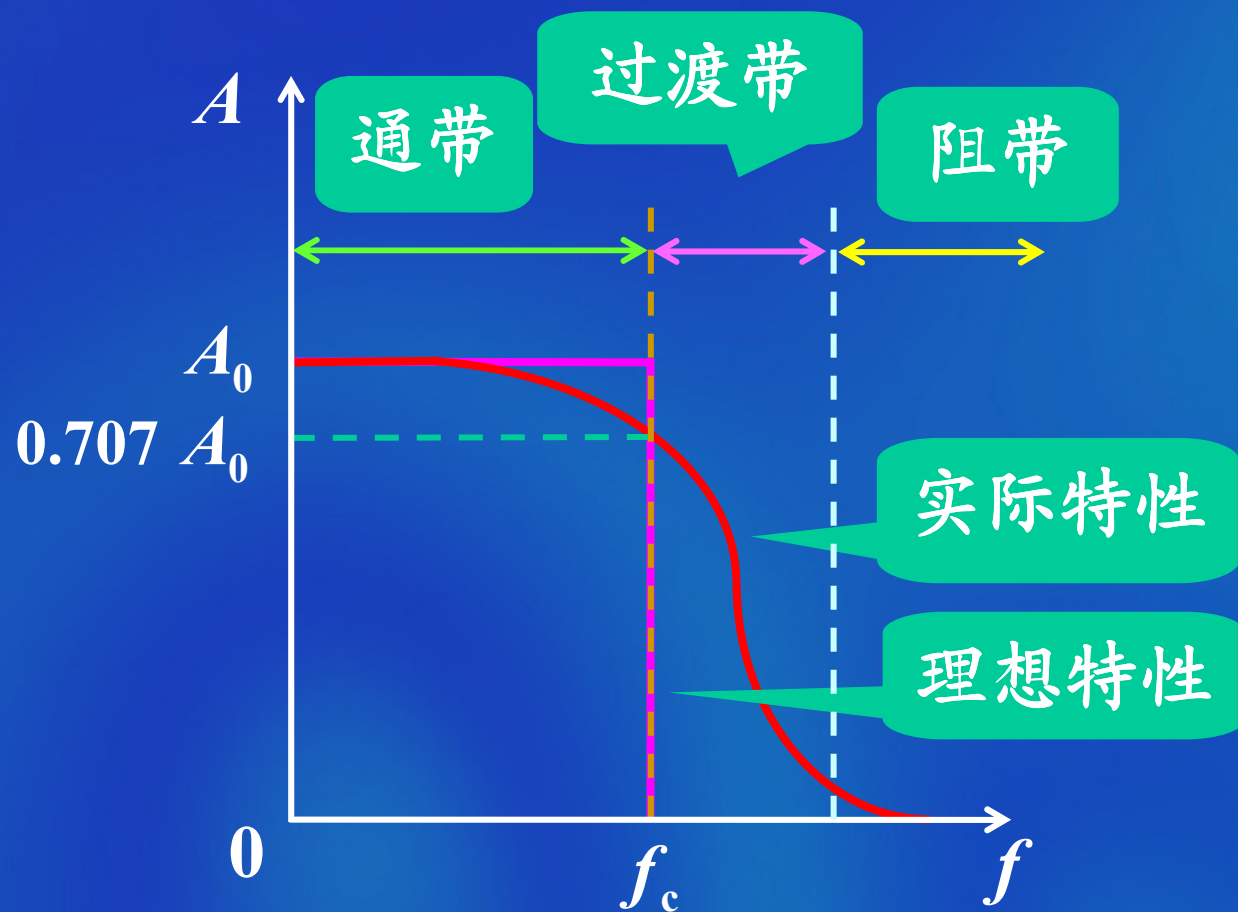
高通

带通



带阻

## 实际低通滤波器的幅频特性



d. 根据滤波器的阶数分

- 一阶滤波器
- 二阶滤波器
- 高阶滤波器

滤波器的阶数越高，性能越好。

e. 根据采用的元器件不同

- 无源滤波器
- 有源滤波器



## (a) 无源滤波器

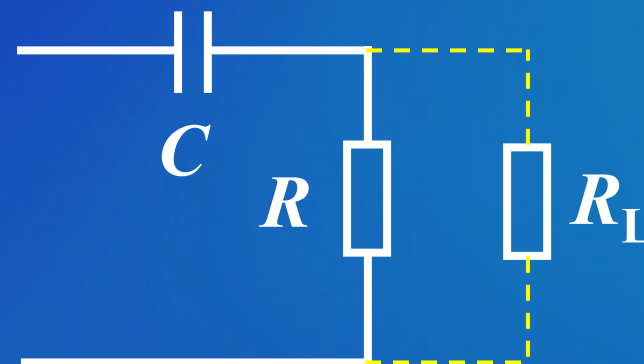
组成： 由电阻、电容、电感等无源器件组成。

优点 {

- 电路简单
- 高频性能好
- 工作可靠

缺点 {

- 通带信号有能量损耗
- 负载效应比较明显
- 体积和重量比较大，电感还会引起电磁感应。



无源高通滤波器

## (b) 有源滤波器:

组成: 由电阻、电容和有源器件 (如集成运放) 组成

优点 {

- 电路体积小、重量轻
- 通带内的信号可以放大
- 精度高、性能稳定、易于调试
- 负载效应小
- 可以多级相联, 用低阶来构成高阶滤波器

缺点

通带范围小

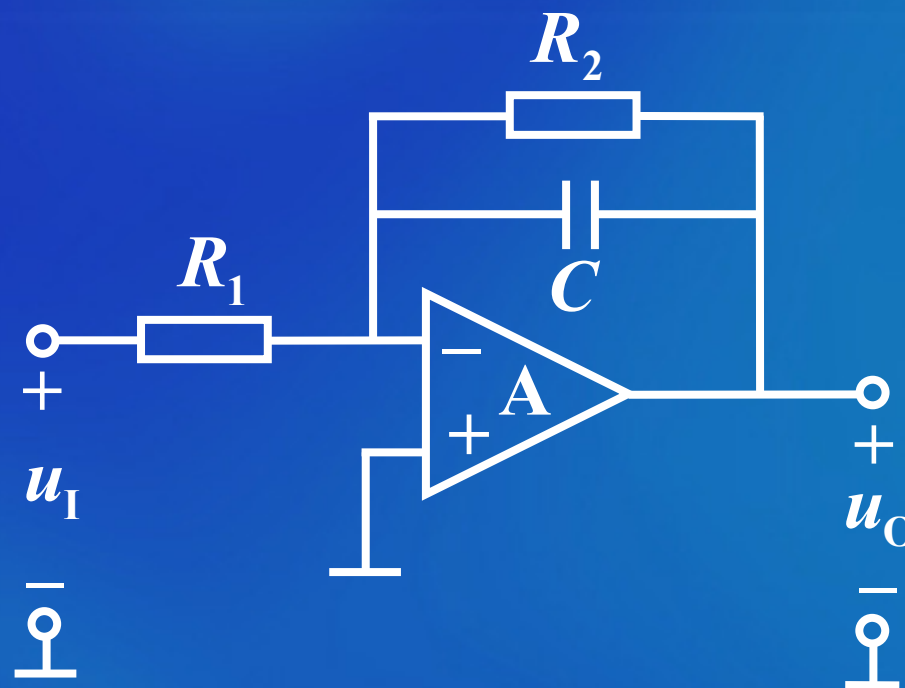
需要直流电源

适用于低频、低压、小功率等场合。

## 7.3.2 低通有源滤波器

### 1. 一阶低通有源滤波器

#### (1) 电路组成



#### (2) 电路性能分析

a. 电路的传递函数  $A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$

令  $s=j\omega$

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$$

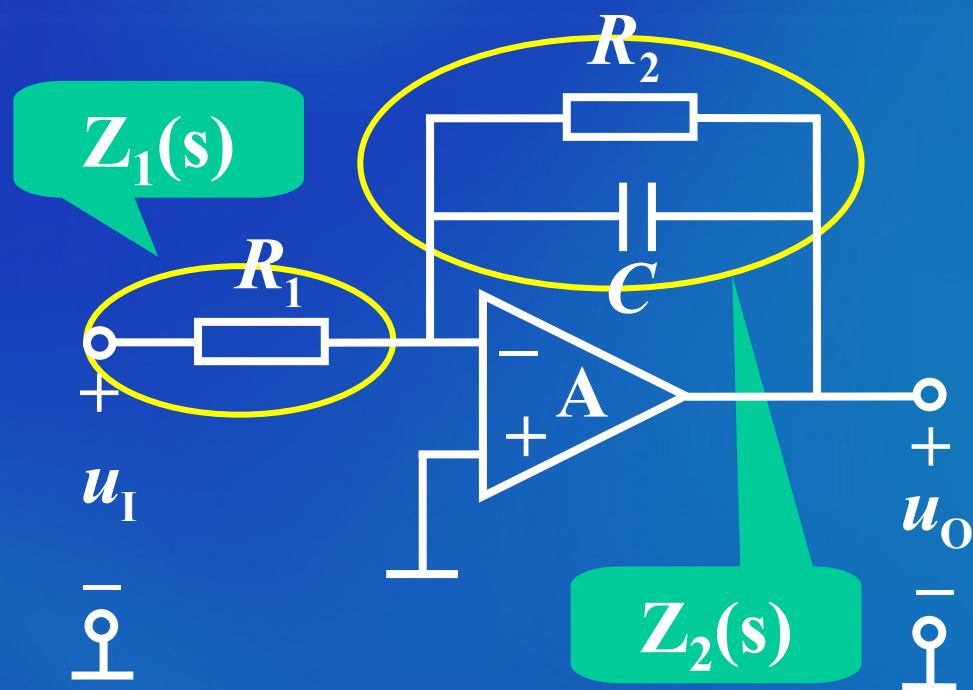
$$= -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

式中  $Z_1(s) = R_1$

$$Z_2(s) = R_2 // \frac{1}{sC} = \frac{R_2}{1 + sR_2C}$$

故

$$A(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + sCR_2}$$



$$A(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + sCR_2}$$

令

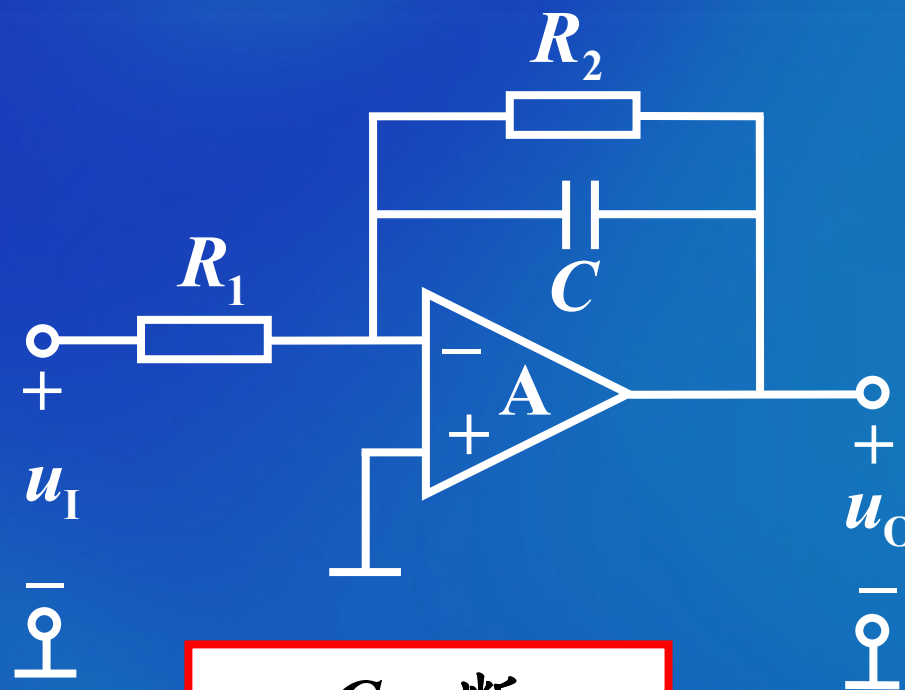
$$A_0 = -R_2/R_1$$

$$\omega_c = 1/(R_2C)$$

$A_0$  —— 滤波器的通带增益

$\omega_c$  —— 滤波器的截止角频率

$$A(s) = A_0 \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$



$C$ —断



$$A(s) = A_0 \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

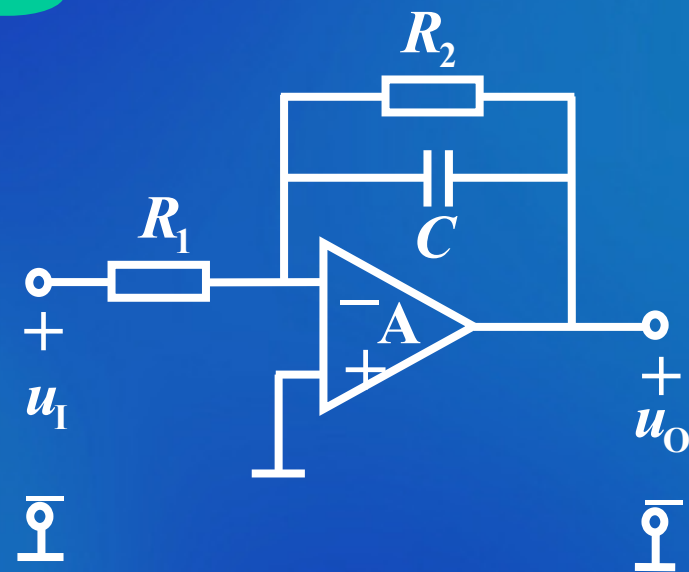
令  $s = j\omega$

b. 滤波器的频率特性

$$A(j\omega) = A_0 \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c}$$

$$= A_0 \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$= A_0 \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

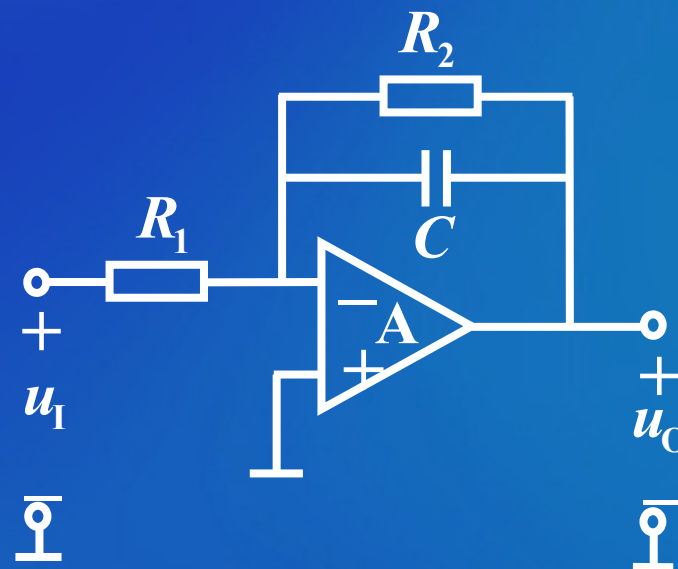


即

$$A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

式中

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$



称为滤波器的截止频率

因电路的频率特性与 $f$ 的一次方有关故称之为—阶 $RC$ 低通有源滤波器

由  $A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$  得

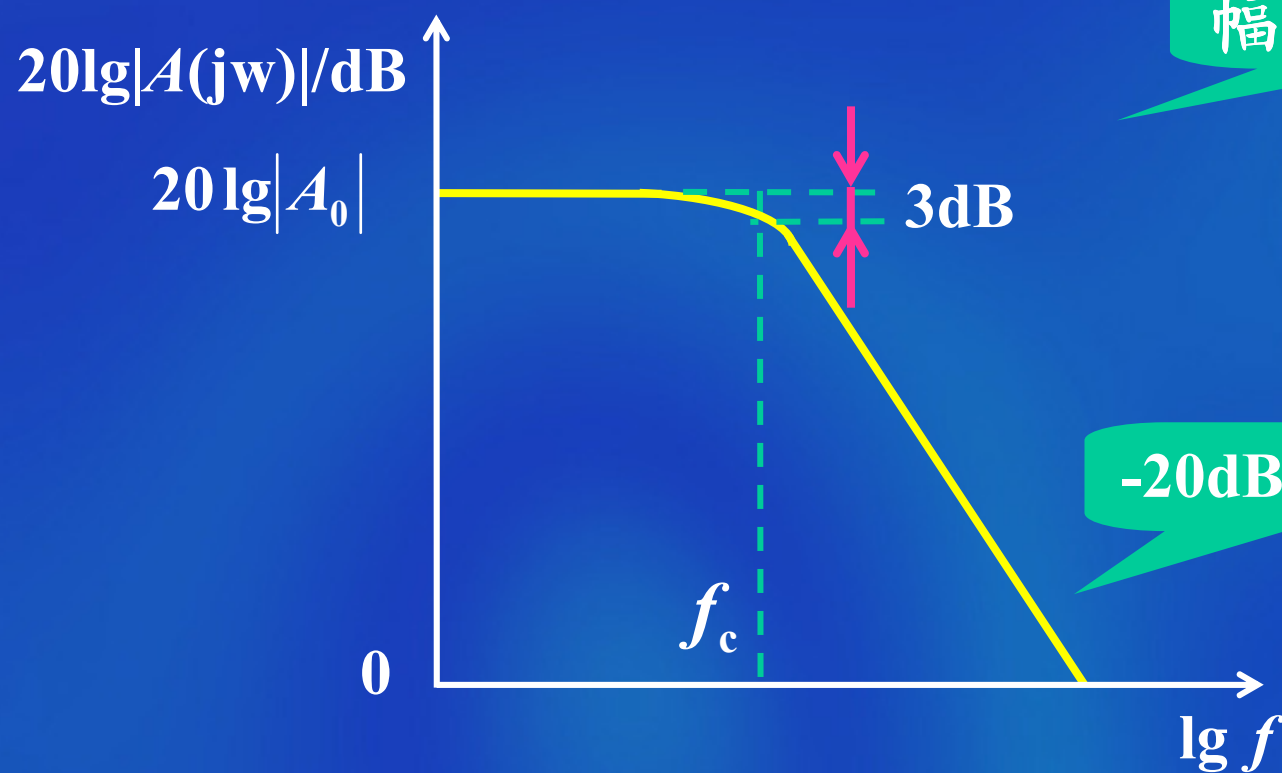
c. 滤波器的幅频特性

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$

d. 相频特性

$$\varphi(j\omega) = -180^\circ - \arctan \frac{f}{f_c}$$

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$



幅频特性曲线

-20dB/十倍频

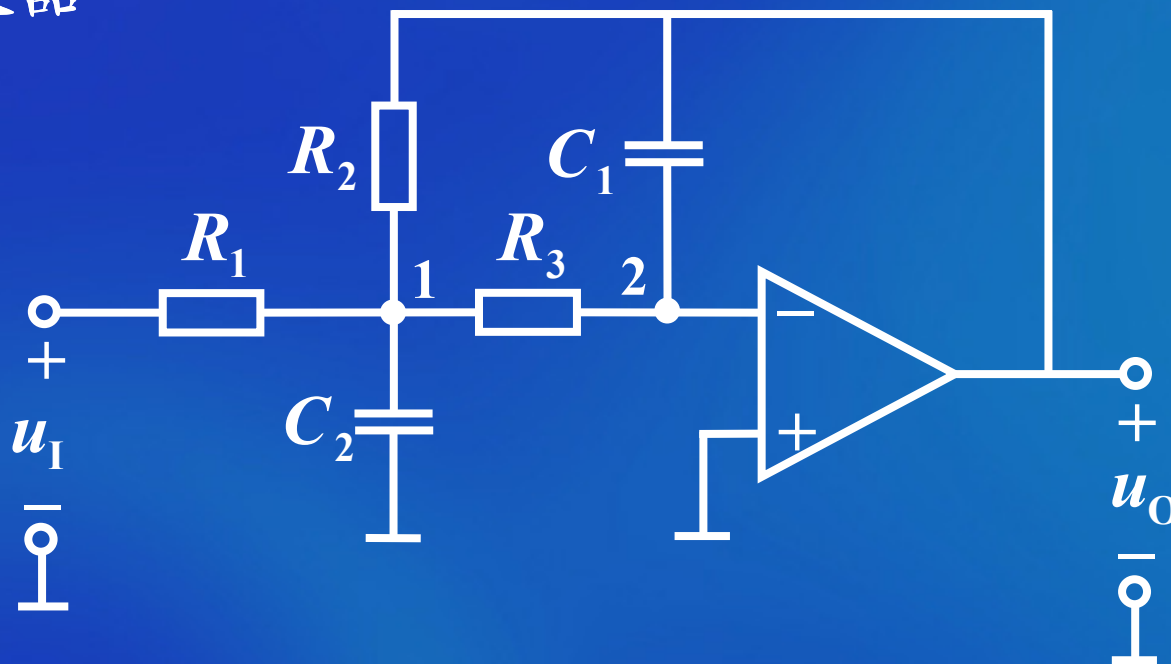
### (3) 一阶滤波器特点

a. 电路简单

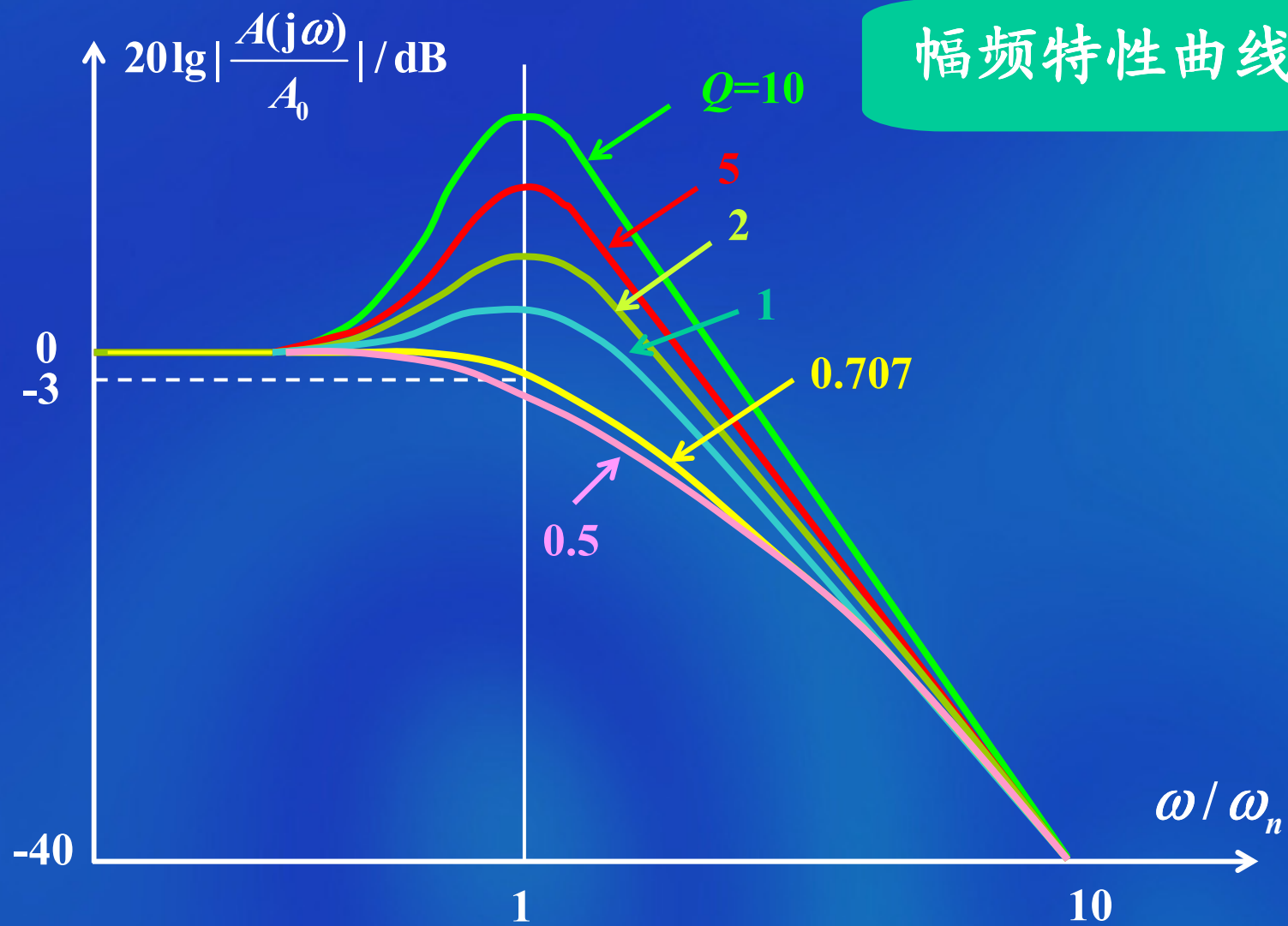
b. 过渡带输出的衰减慢，衰减速率 $20\text{dB}/\text{十倍频}$

## 2. 二阶有源低通滤波器

### (1) 电路组成



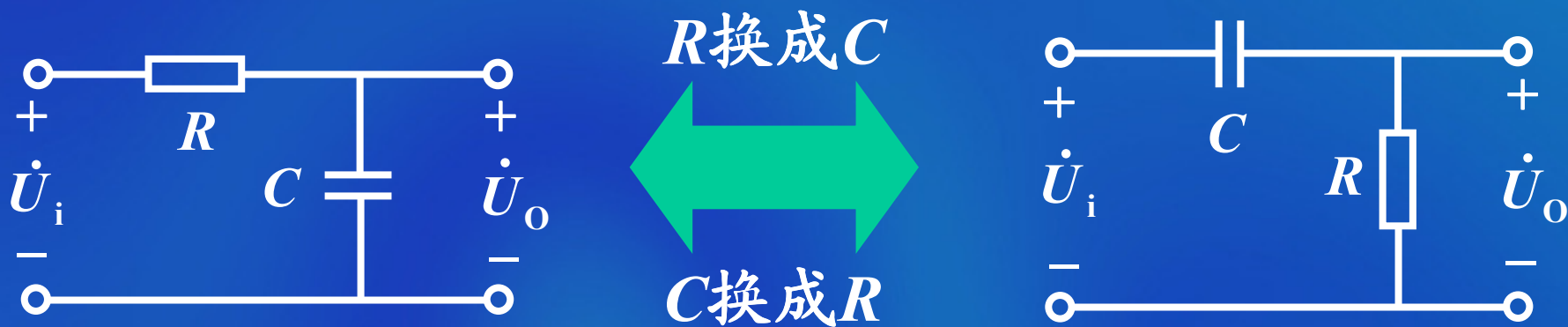




### 7.3.3 高通有源滤波器

#### 1. 一阶高通有源滤波器

##### (1) 低通与高通电路的对偶关系



## (2) 一阶高通滤波器

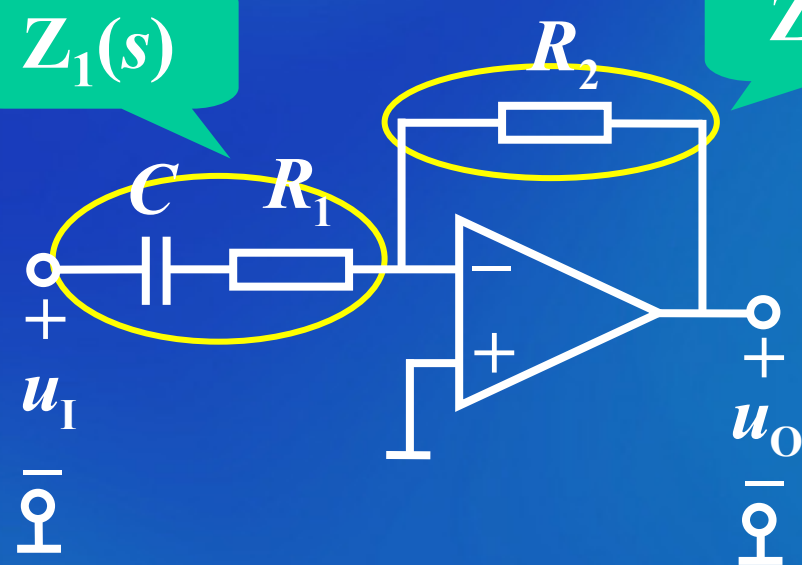
### a. 高通滤波电路

### b. 电路分析

#### (a) 传递函数

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$$

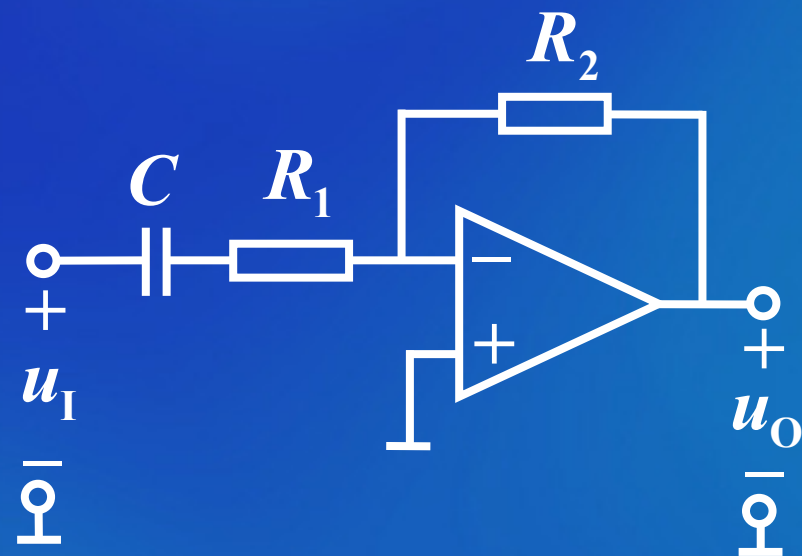
$$= -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$



$$Z_1(s) = R_1 + \frac{1}{sC}$$

$$Z_2(s) = R_2$$

$$\begin{aligned}
 A(s) &= - \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sCR_1}} \\
 &= - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{sCR_1}} \\
 &= - \frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + \frac{1}{CR_1}} \\
 &= A_0 \frac{s}{s + \omega_c}
 \end{aligned}$$



**C—短**

式中  
通带增益

$$A_0 = -R_2/R_1$$

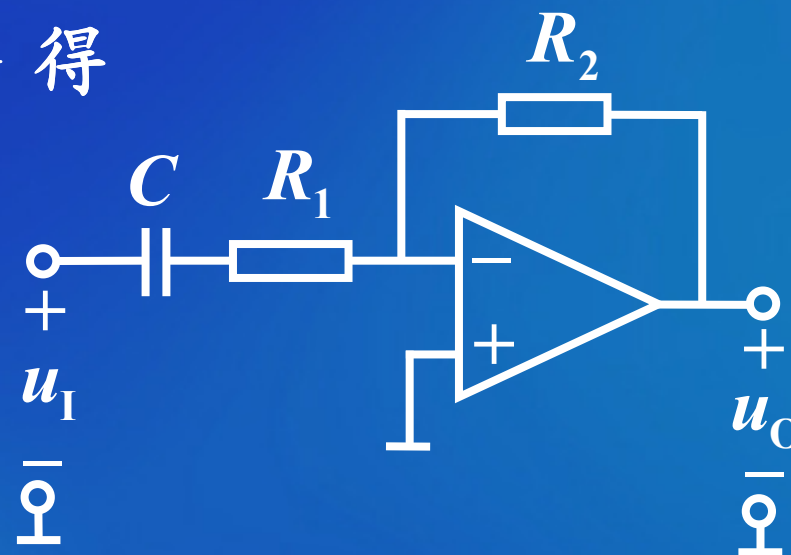
截止角频率  $\omega_c = 1/(R_1C)$

## (b) 频率特性

令  $s = j\omega$  由  $A(s) = A_0 \frac{s}{s + \omega_c}$  得

滤波器的频率特性

$$\begin{aligned} A(j\omega) &= A_0 \frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \\ &= A_0 \frac{1}{1 + j\frac{\omega_c}{\omega}} \\ &= A_0 \frac{1}{1 - j\frac{f_c}{f}} \end{aligned}$$



滤波器的截止频率

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

## (c) 滤波器的幅频特性

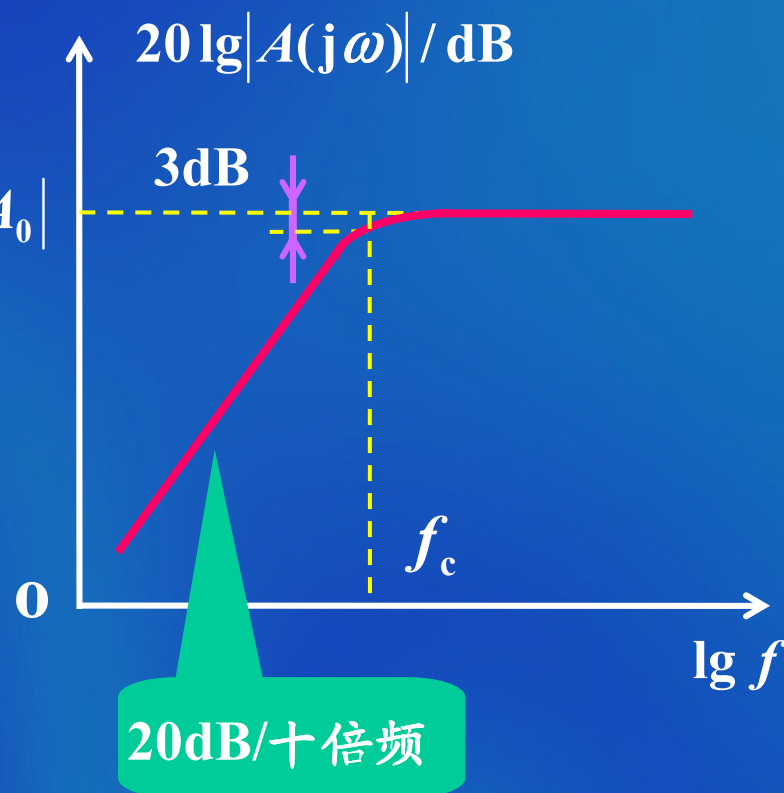
由

$$A(j\omega) = A_0 \frac{1}{1 - j \frac{f_c}{f}}$$

$$|A(j\omega)| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + (f_c/f)^2}}$$

$$\varphi(j\omega) = -180^\circ + \arctan \frac{f_c}{f}$$

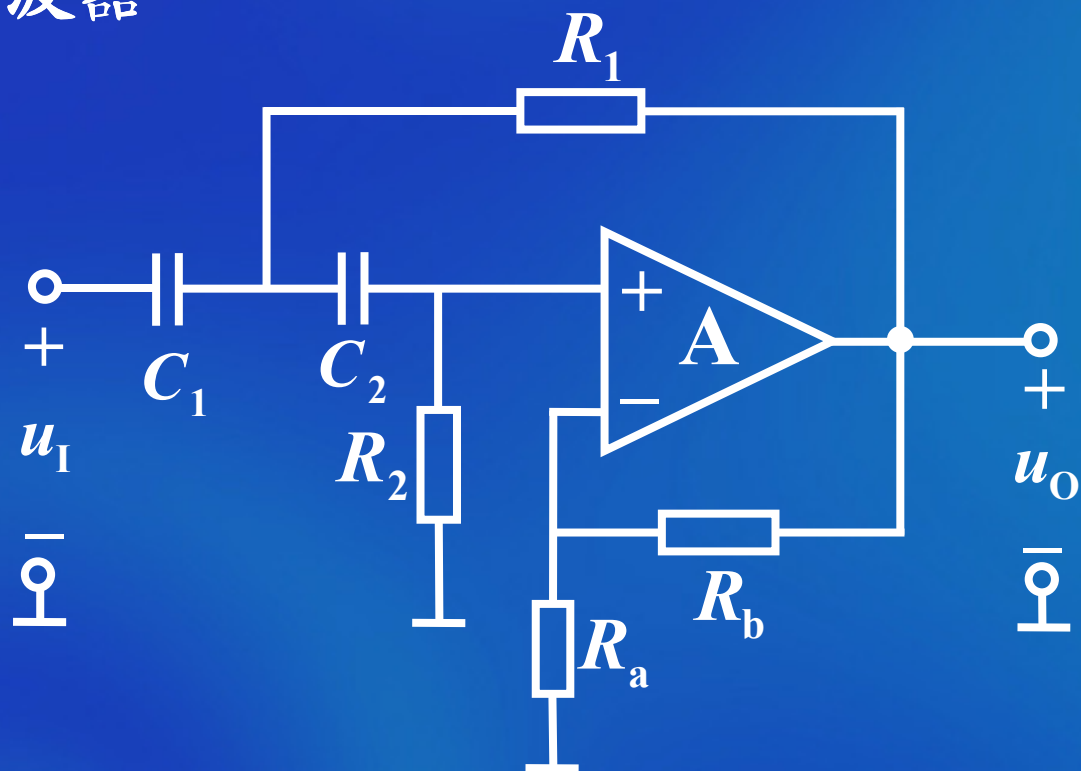
得



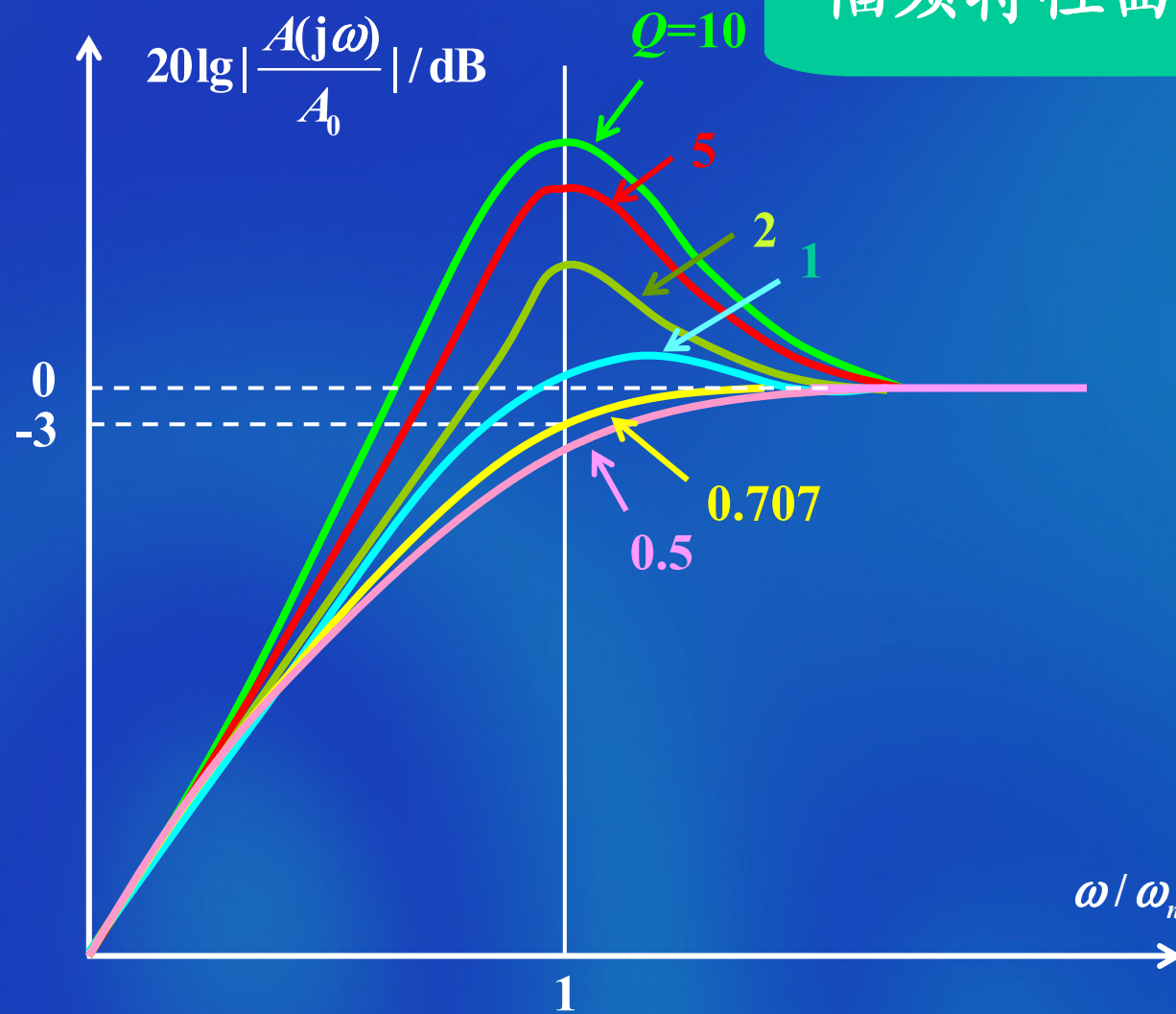


## 2. 二阶高通有源滤波器

### (1) 电路组成

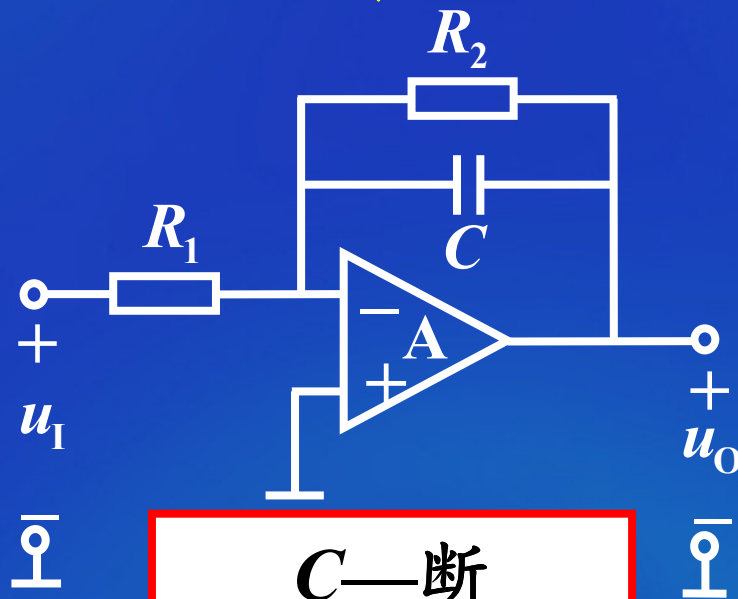


# 幅频特性曲线



# 一阶低通

电路



$C$ —断

通带  
增益

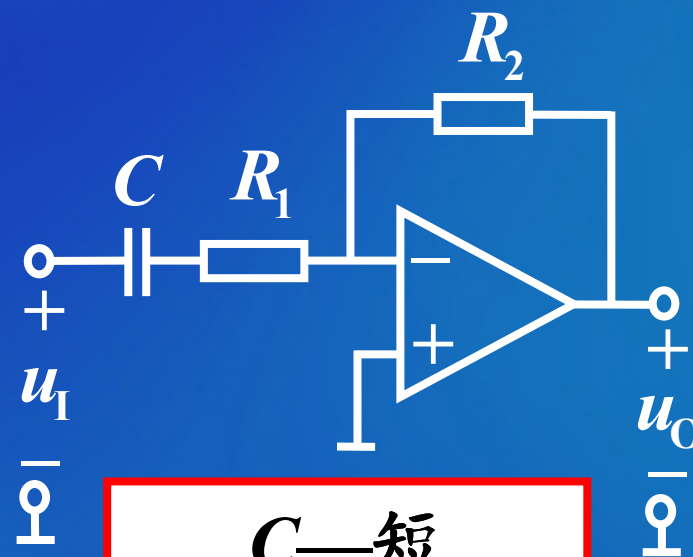
$$A_0 = -R_2 / R_1$$

截止  
频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

高短低断

# 一阶高通



$C$ —短

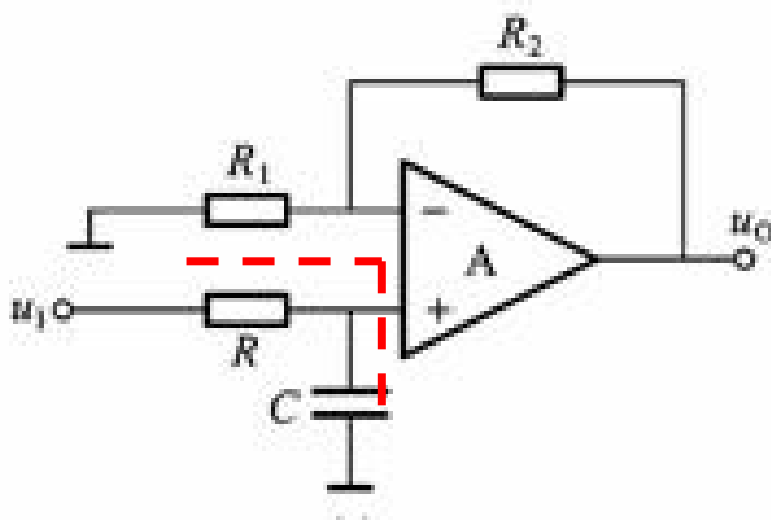
$$A_0 = -R_2 / R_1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

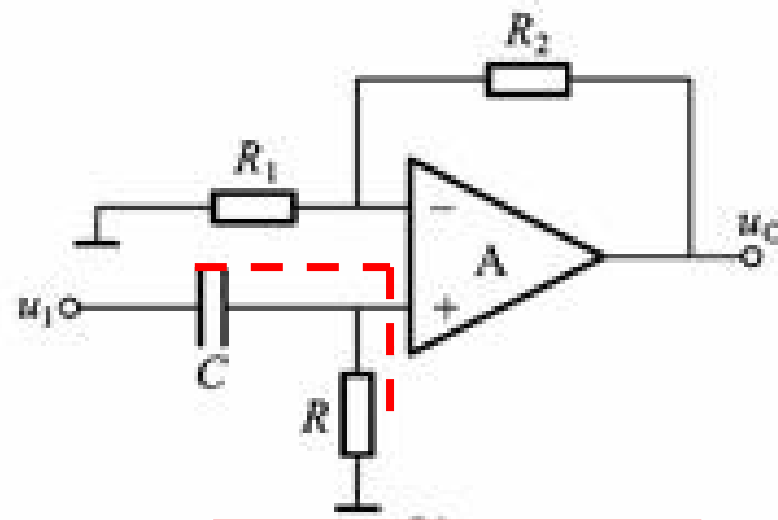
# 一阶低通

# 一阶高通

电路



$C$ —断



$C$ —短

通带

增益

$$A_0 = 1 + R_2 / R_1$$

$$A_0 = 1 + R_2 / R_1$$

高短低断

截止

频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

上页

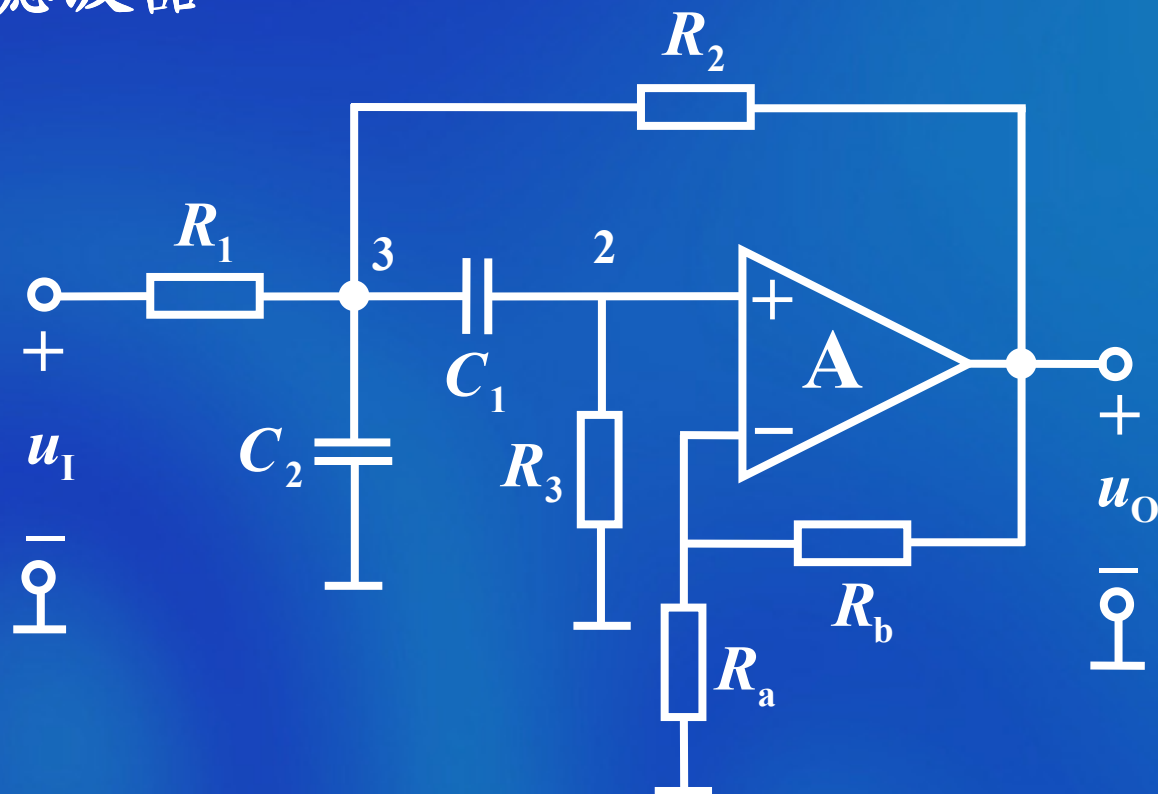
下页

后退

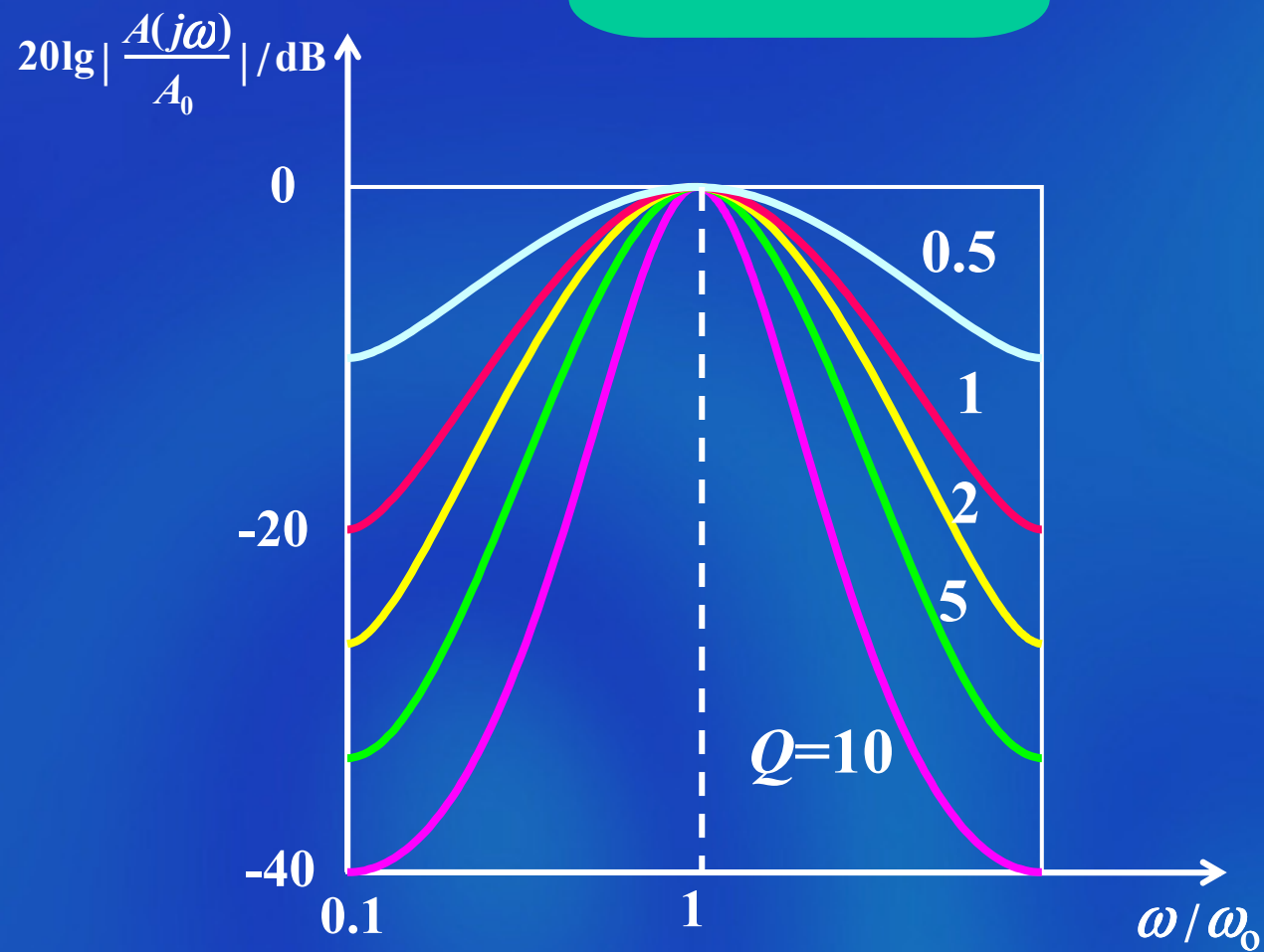
## 7.3.4 带通和带阻有源滤波器

### 1. 二阶带通有源滤波器

#### (1) 电路组成



## 带通滤波器的幅频特性

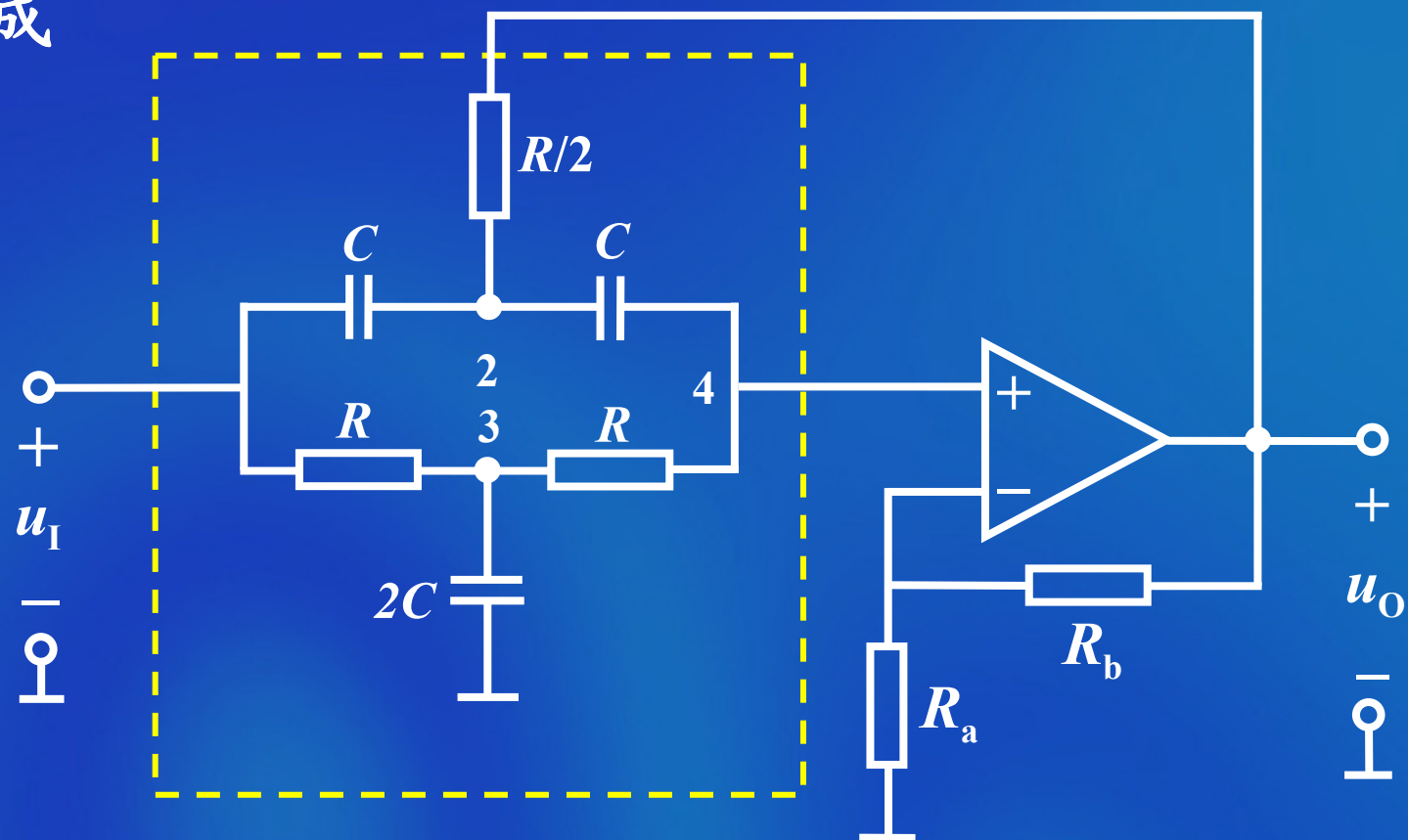


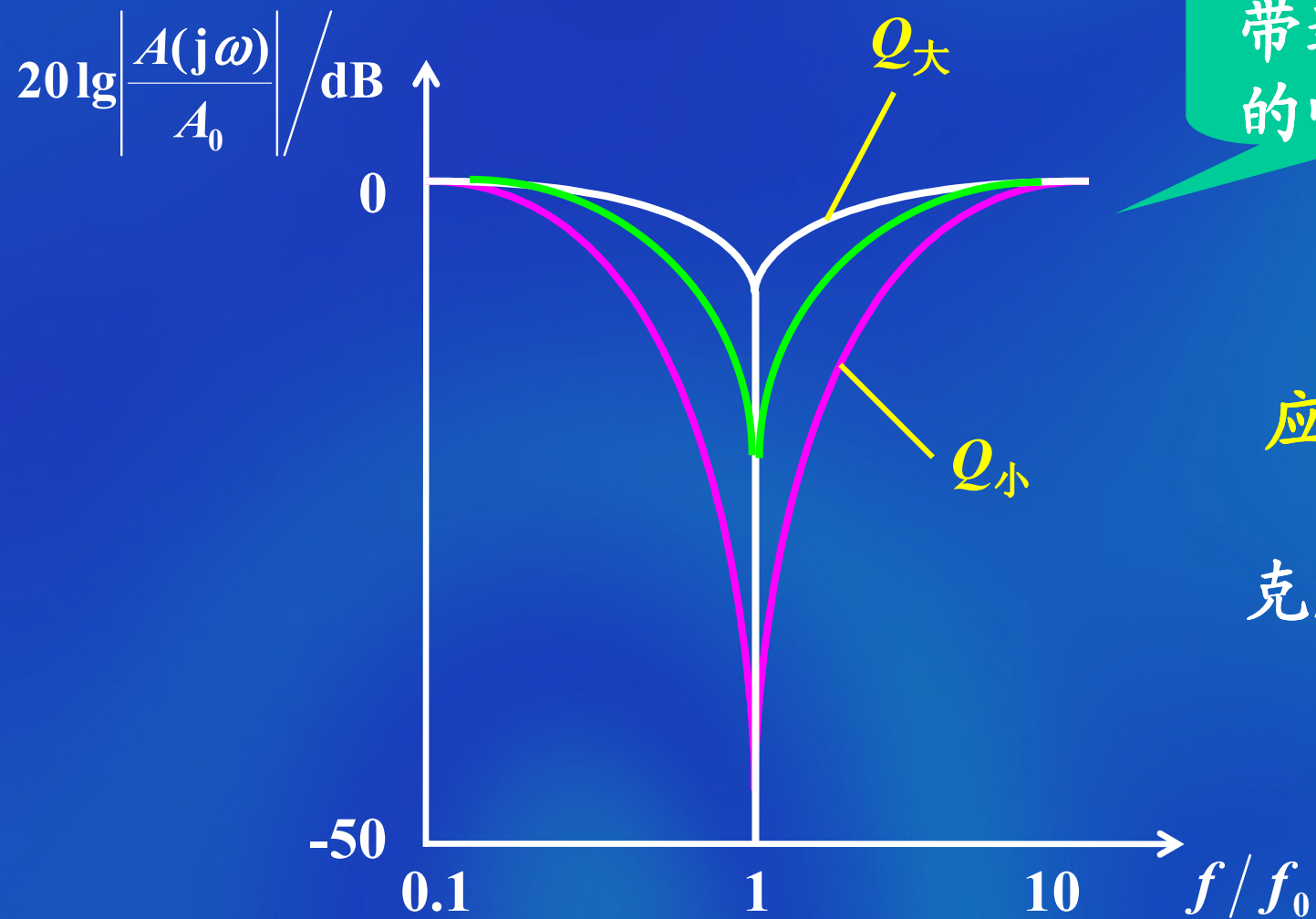
应用?



## 2. 二阶带阻有源滤波器

### (1) 电路组成





应用?

克服工频  
干扰

## 实际应用举例

- 心电检测中，测量的信号为mV级，需要进行信号放大，要求放大倍数 $>30$ ；
- 信号的频率范围大致在0.1-110Hz之间，为了消除高频干扰，需要设计滤波电路；
- 人体为大阻抗信号源，需要设计的放大器是高输入阻抗，高共模抑制比的放大电路。

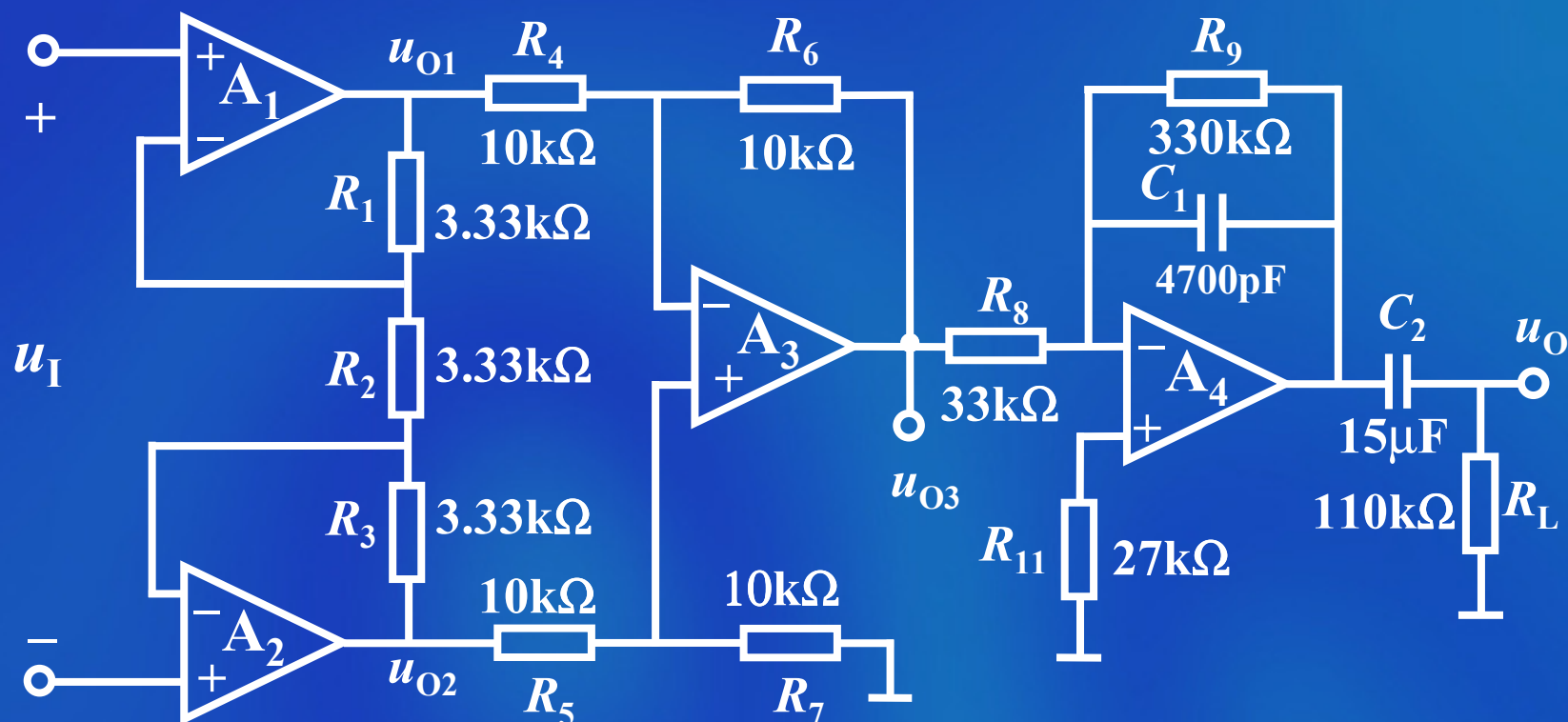
如何运用我们学习过的知识解决此问题？

## 练习题

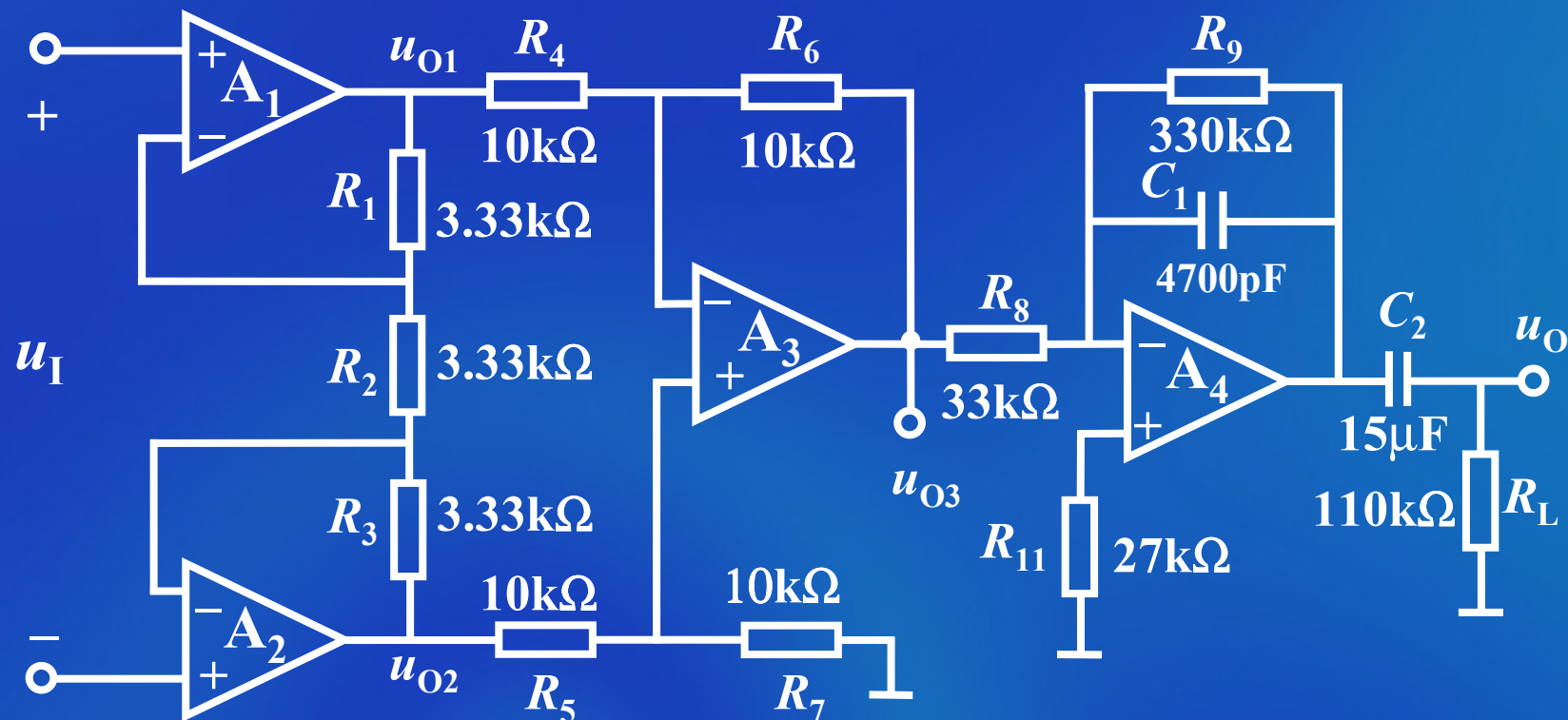
例1 在图示电路中，设各运放都具有理想特性。试求：

(a)  $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o3} / \dot{U}_i$

(b) 电路的中频电压放大倍数  $\dot{A}_{um} = \dot{U}_o / \dot{U}_i$

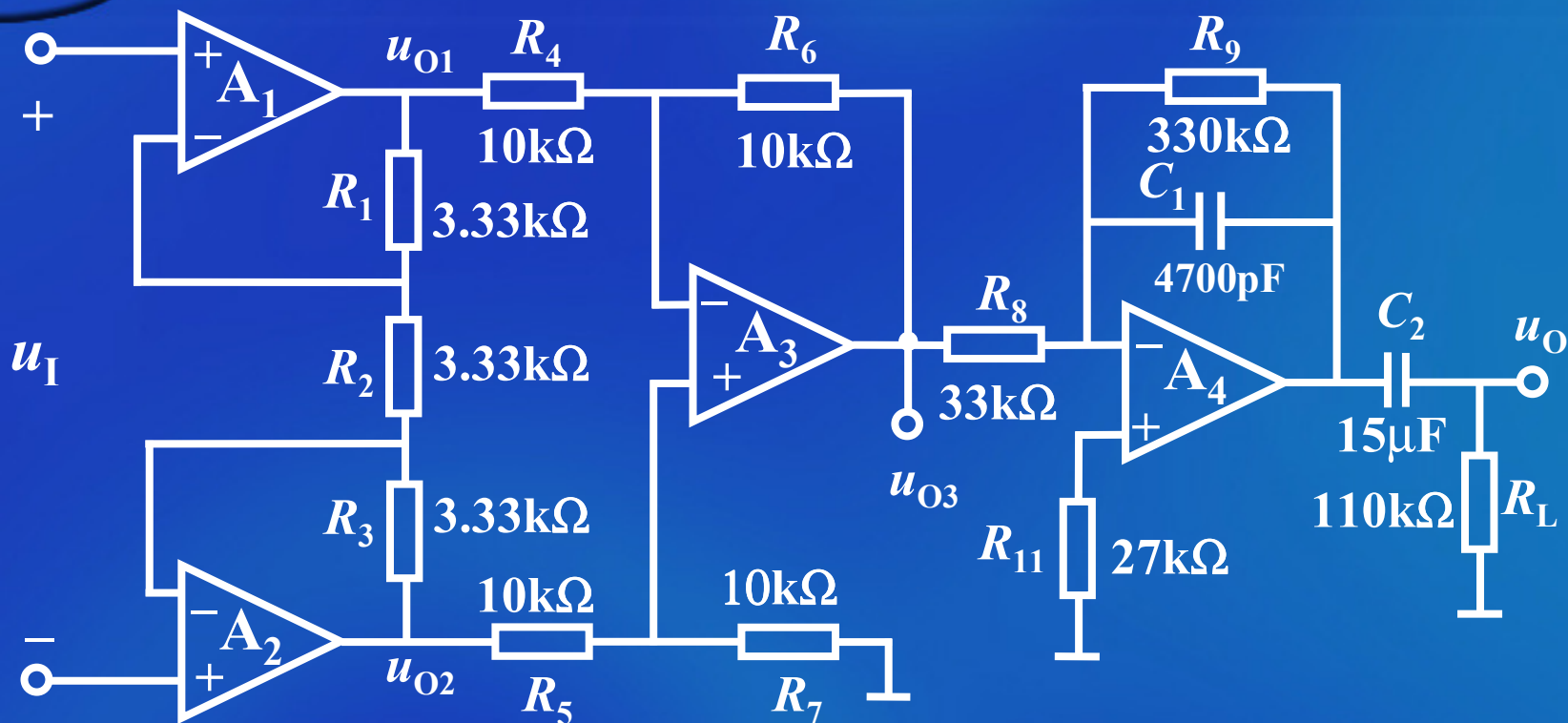


(c) 整个电路的上、下限截止频率 $f_H$ 和 $f_L$ 之值。



解 由图可知，运放A<sub>1</sub>~A<sub>3</sub>构成三运放测量放大器，运放A<sub>4</sub>构成一阶低通滤波器，电容器C<sub>2</sub>和负载R<sub>L</sub>构成高通滤波器。



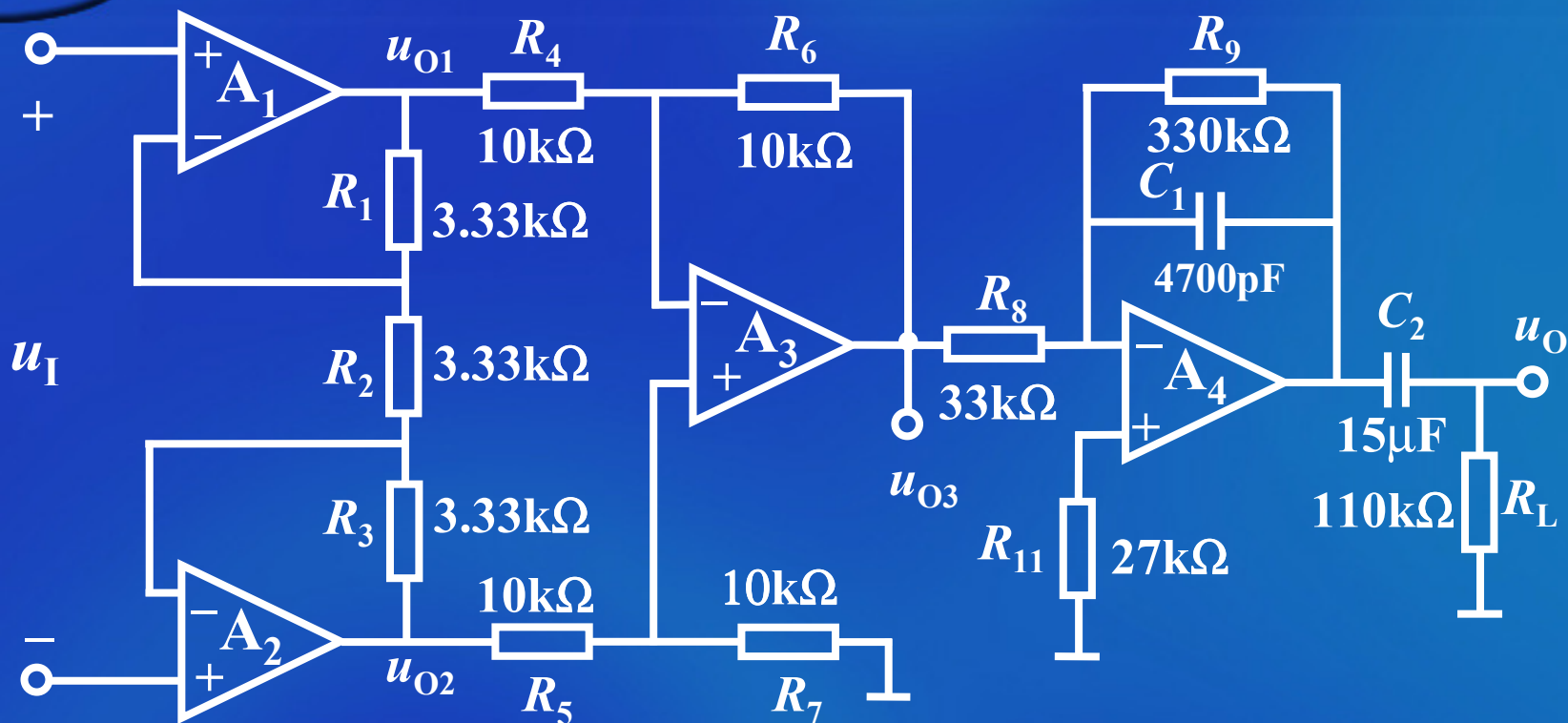


(a) 写出 $u_{O3}$ 与 $u_i$ 的关系

$$u_{O3} = \left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) \times \frac{R_7}{R_5 + R_7} u_{O2} - \frac{R_4}{R_3} u_{O1}$$

$$= -(u_{O1} - u_{O2}) = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} u_i = -3u_i$$

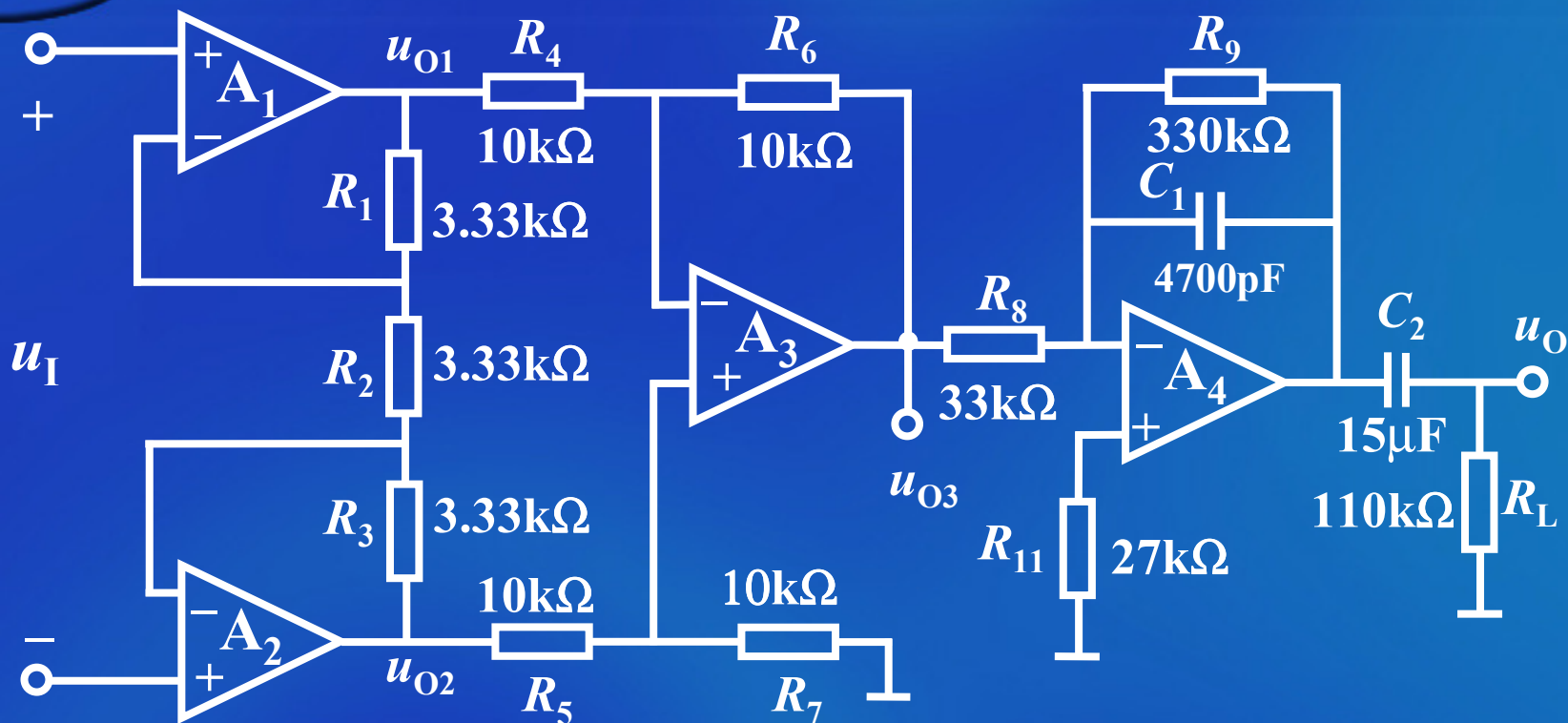




所以,  $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o3} / \dot{U}_i = -3$

(b) 电路的中频电压放大倍数

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o3}}{\dot{U}_i} \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{o3}} = \dot{A}_{u1} \left( -\frac{R_9}{R_8} \right) = -3 \times \left( -\frac{330}{33} \right) = 30$$



(c) 整个电路的上、下限截止频率分别为

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_9 C_1} \approx 102.6\text{Hz}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_L C_2} \approx 0.095\text{Hz}$$

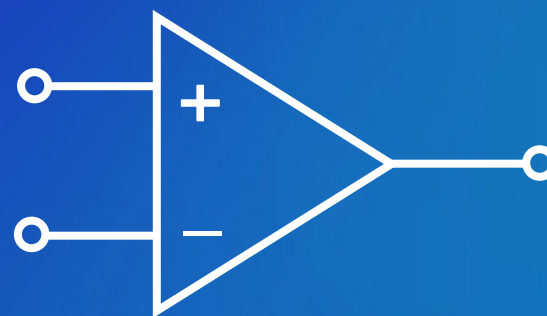
## 7.4 电压比较器

运放的工作状态:



线性

非线性



确定运放工作区的方法: 判断电路中是否有负反馈。

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

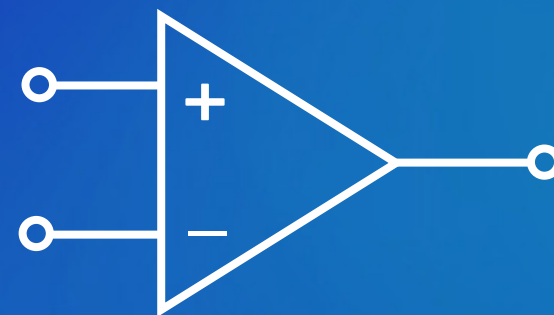
后退

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

## 7.4 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**。



## 7.4.1 单门限比较器

### 1. 零电平比较器

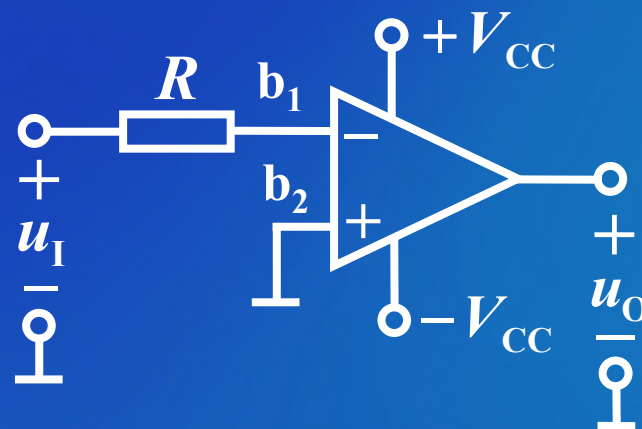
(1) 电路组成

(2) 电路特点

a. 运放工作于开环状态

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

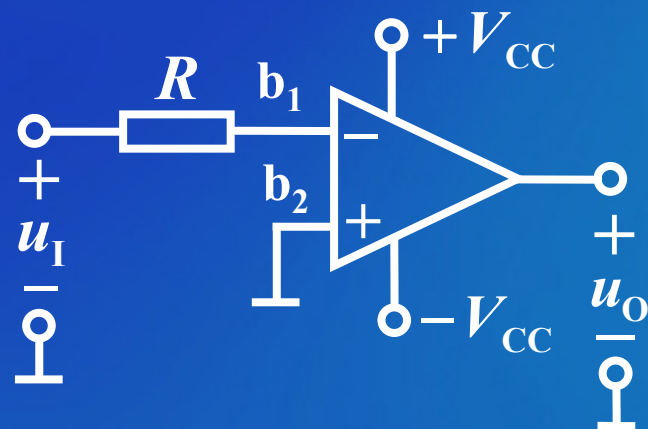
c. 输出电压  $u_O \approx \pm V_{CC}$





### (3) 工作原理

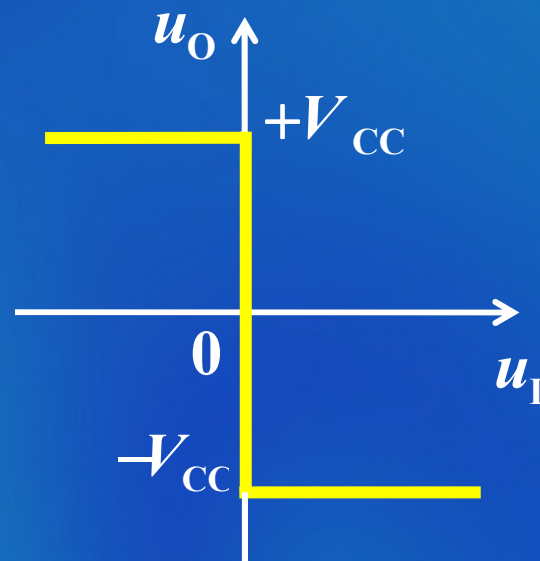
- a. 当  $u_I < 0$  时,  $u_O \approx +V_{CC}$
- b. 当  $u_I > 0$  时,  $u_O \approx -V_{CC}$



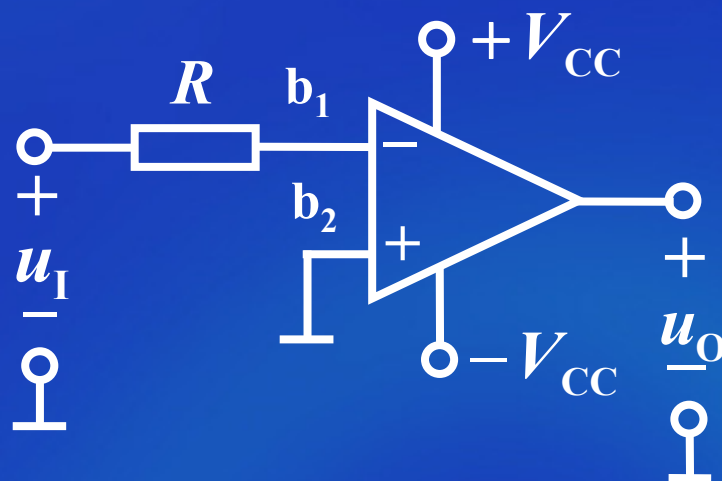
### (4) 传输特性

$$u_O = f(u_I)$$

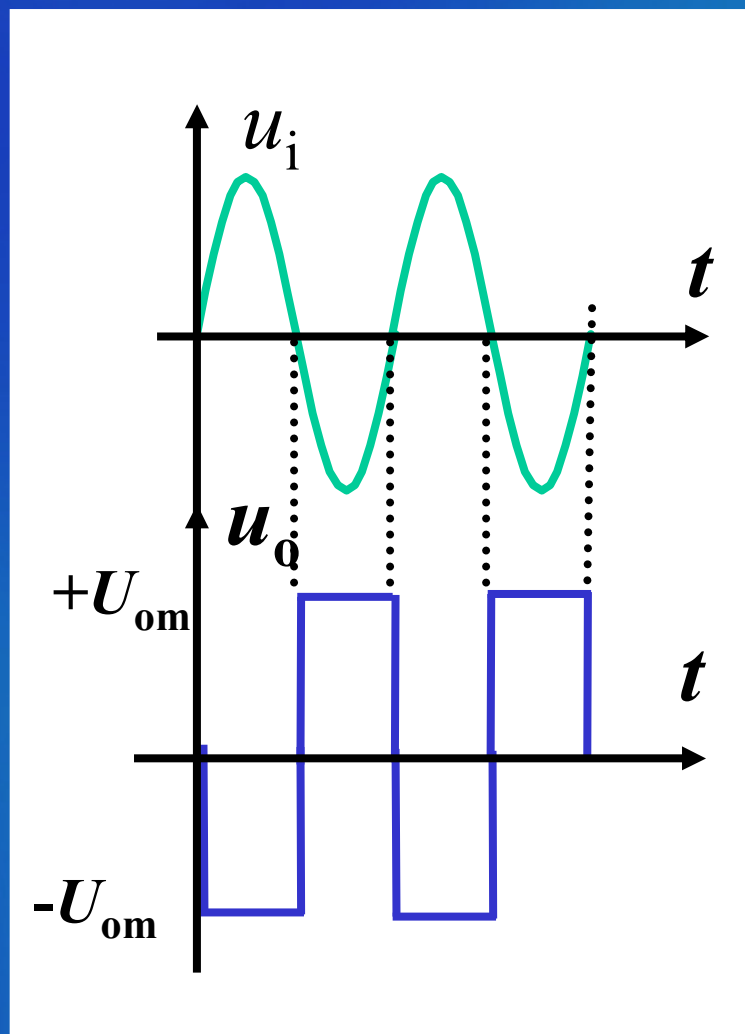
$u_I$  与零电平（电位）进行比较，故称为零电平比较器。

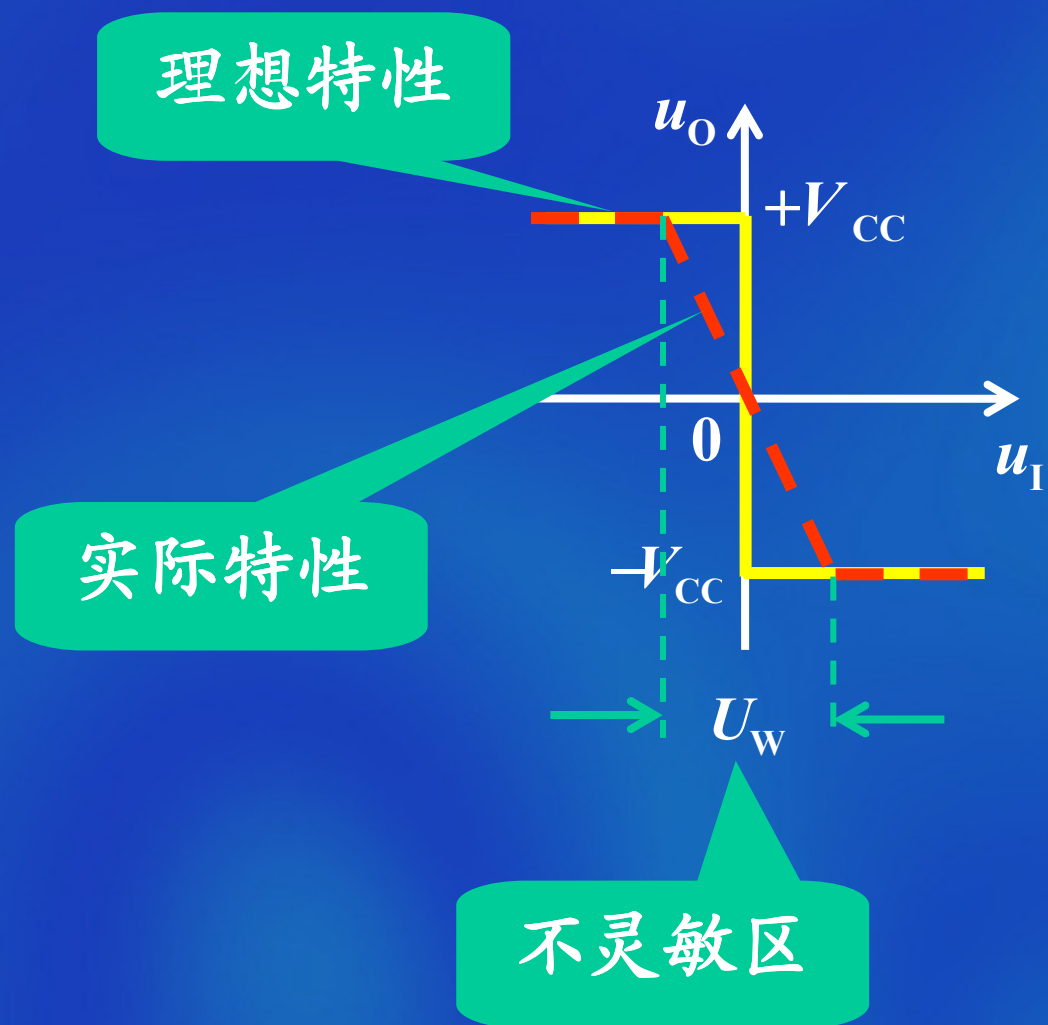


## (5) 实际应用

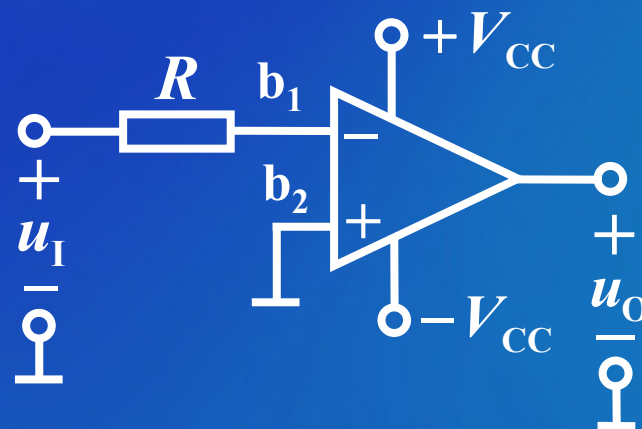


**例：**利用零电平电压比较器将正弦波变为方波。



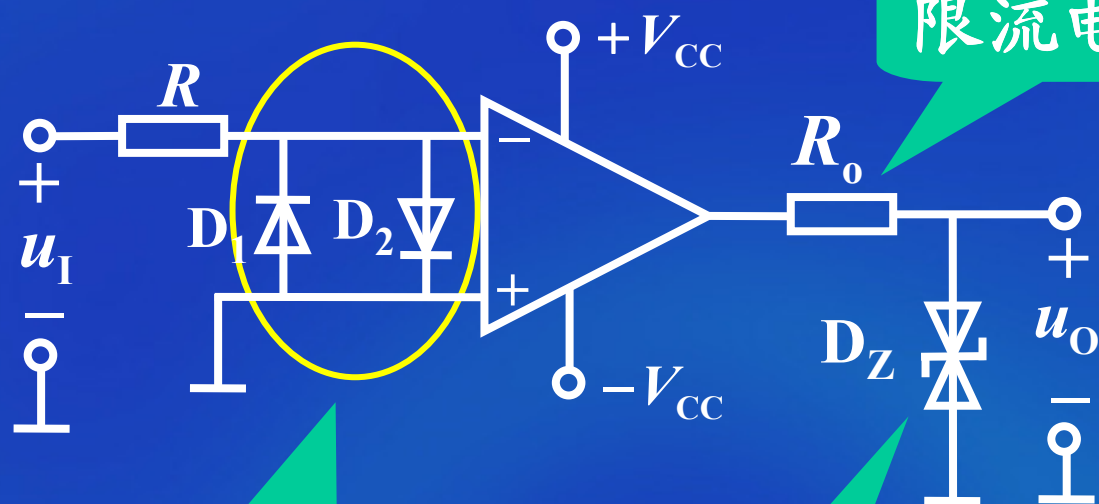


## (5) 电路存在的问题



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

## 改进型的零电平比较器

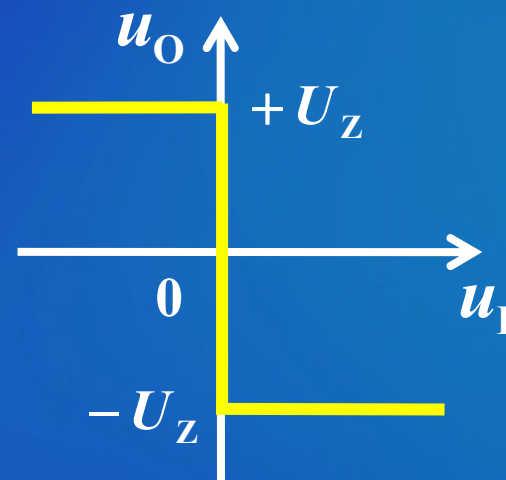


输入保护电路

双向限幅稳压管

限流电阻

## 传输特性

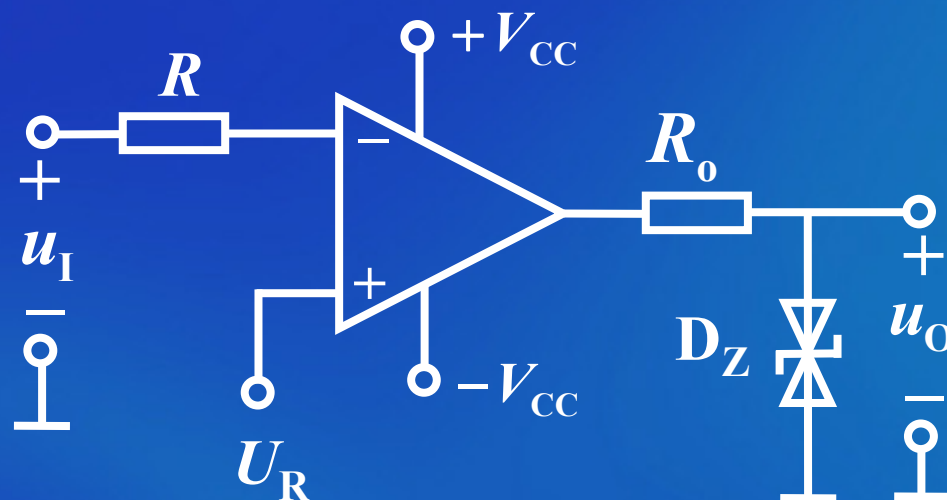


输出电压  $u_O = \pm U_Z$

## 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  $u_I < U_R$

$$u_O \approx +U_Z$$

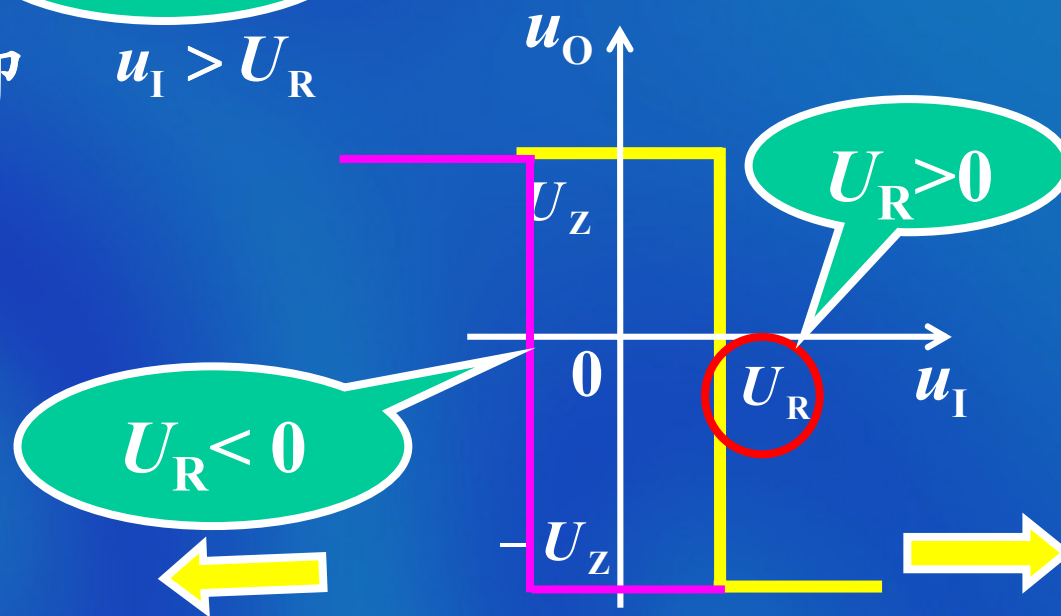
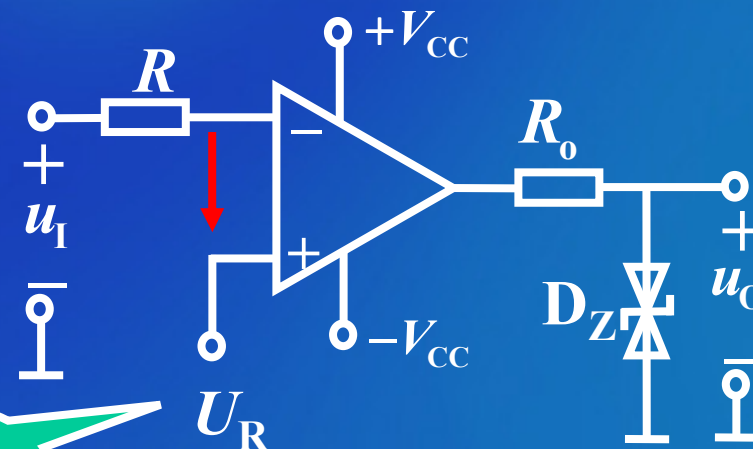
$U_R < 0$  ?

b. 当  $u_I - U_R > 0$  时, 即  $u_I > U_R$

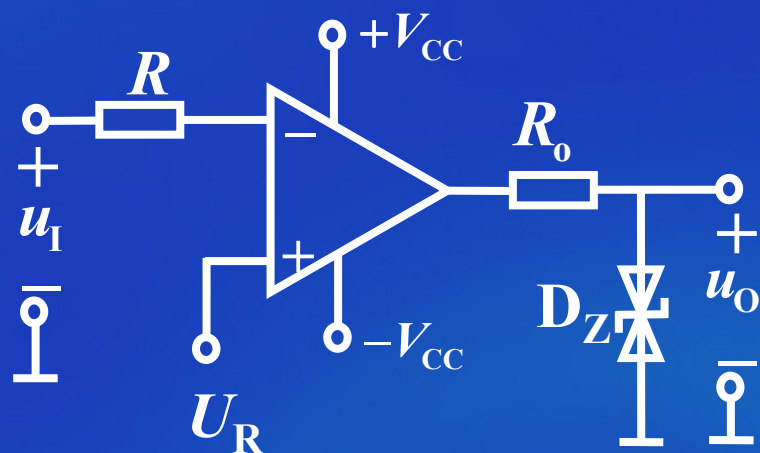
$$u_O \approx -U_Z$$

### (4) 传输特性

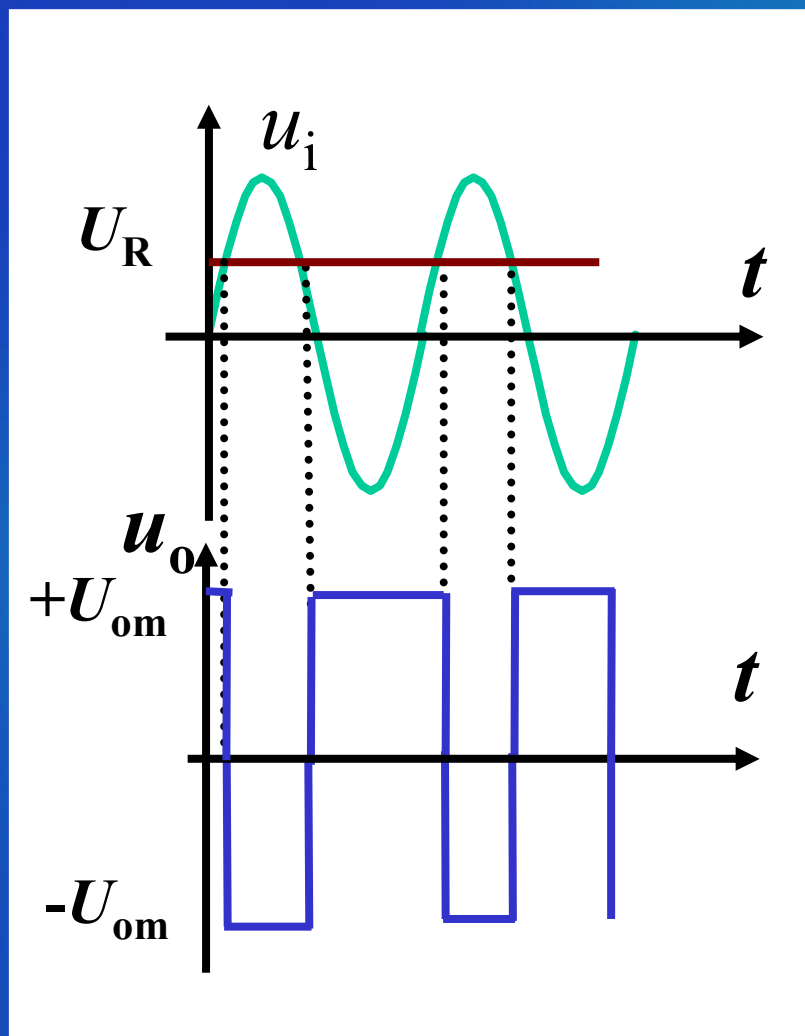
$$u_O = f(u_I)$$



## (5) 实际应用

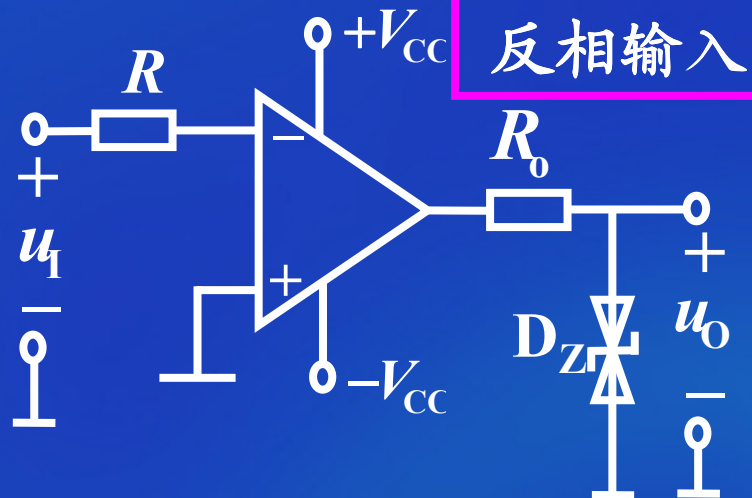


**例：**利用零电平电压比较器将正弦波变为矩形波。



# 零电平比较器

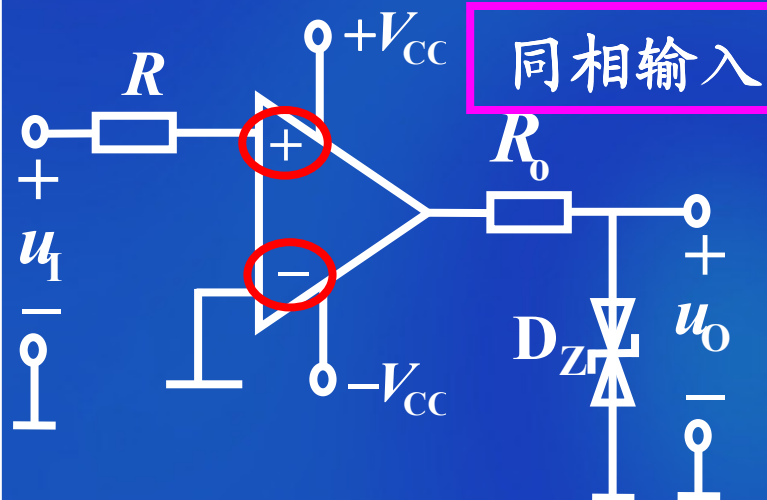
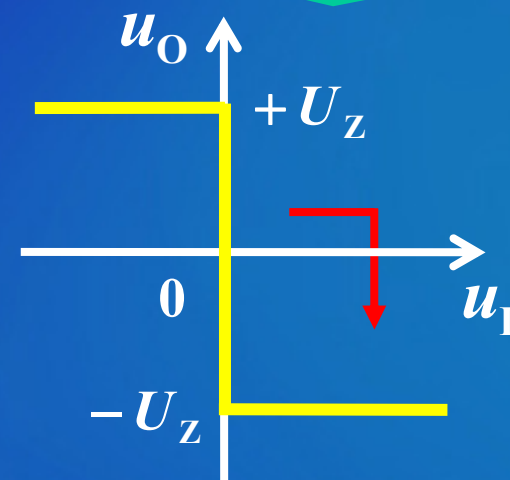
## 电路



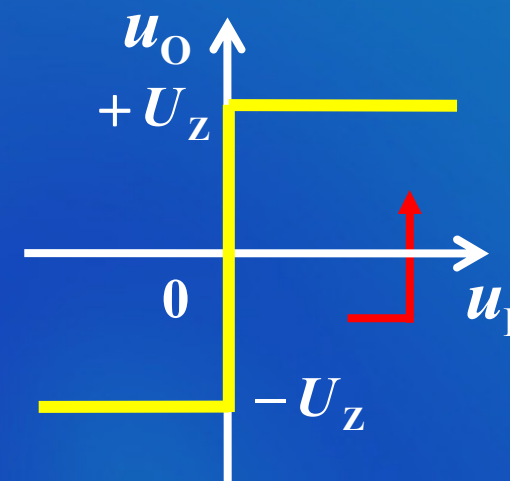
## 工作原理

- 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

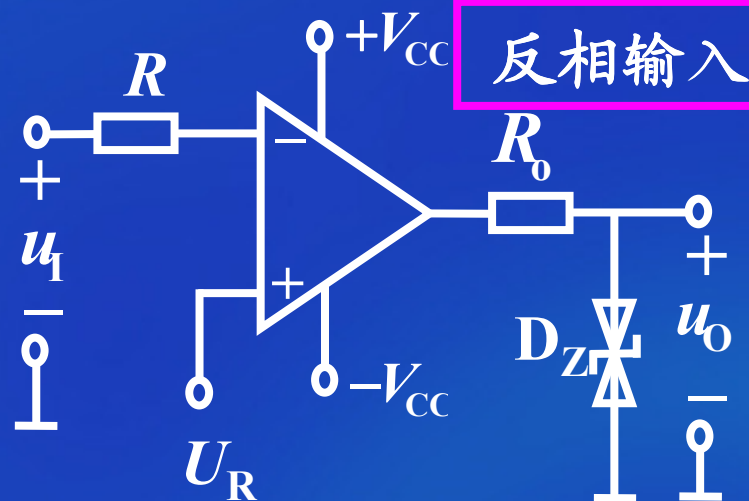


- a. 当  $u_I < 0$  时,  
 $u_O \approx -U_Z$
- b. 当  $u_I > 0$  时,  
 $u_O \approx +U_Z$



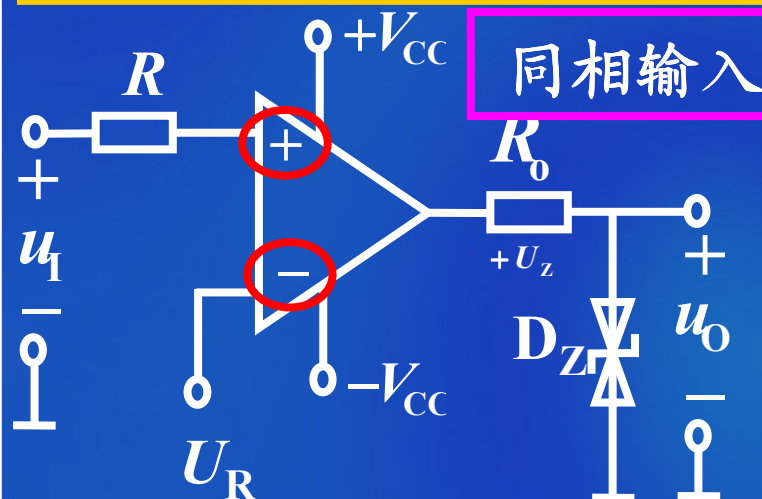
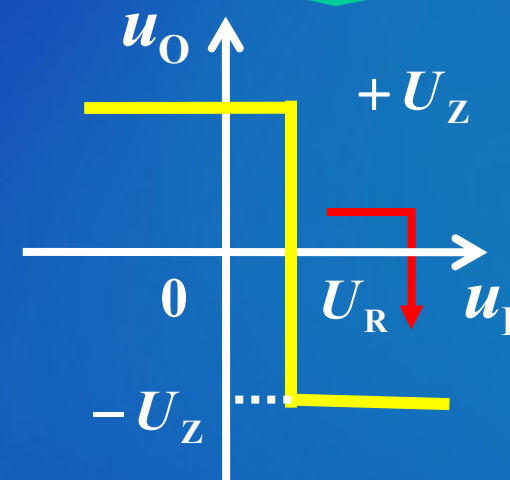
# 非零电平比较器

## 电路

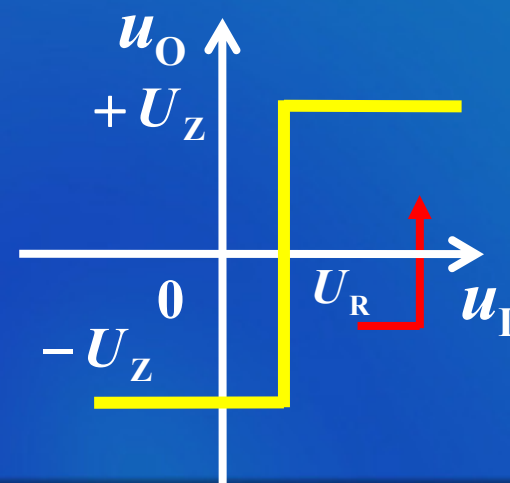


- a. 当  $u_I < u_R$  时,  
 $u_O \approx +U_Z$
- b. 当  $u_I > u_R$  时,  
 $u_O \approx -U_Z$

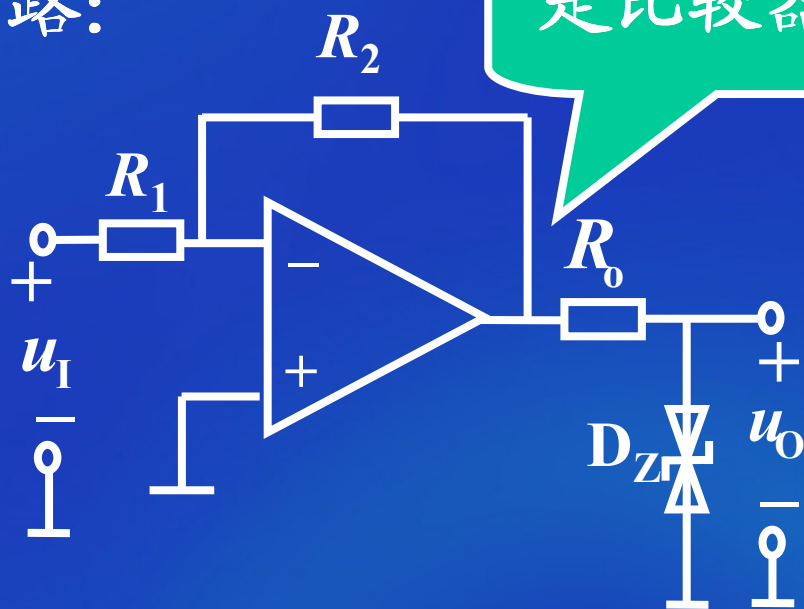
## 传输特性



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



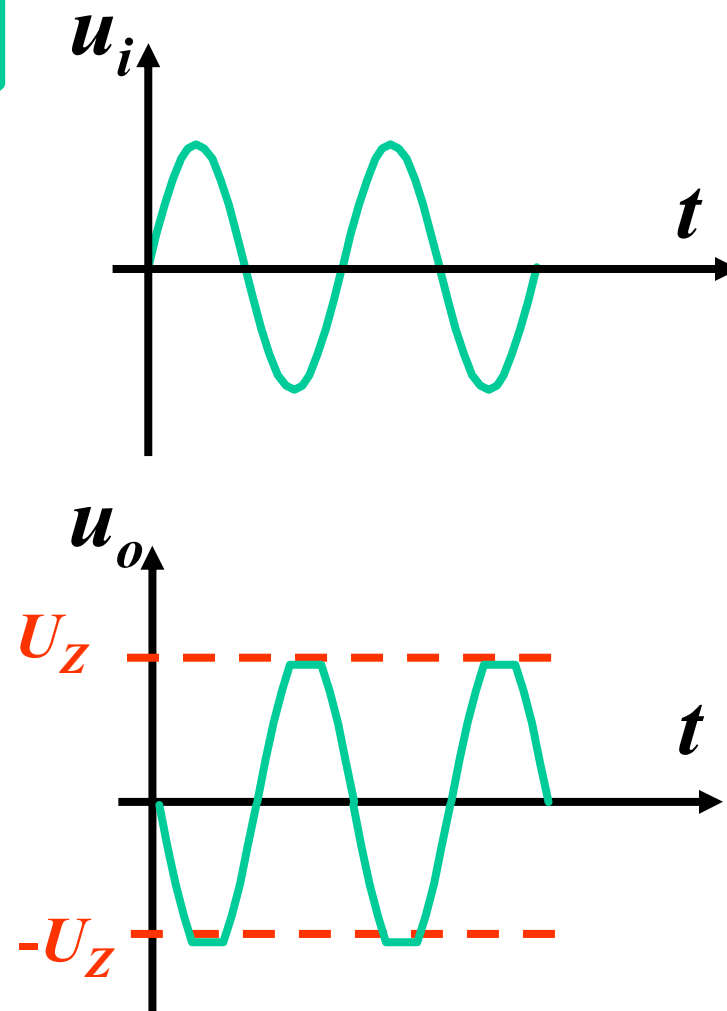
电路：

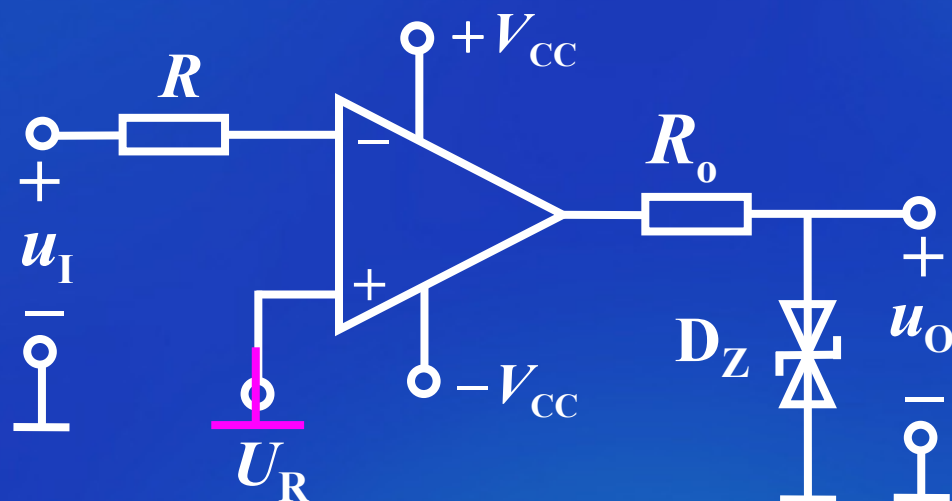


是比较器吗？

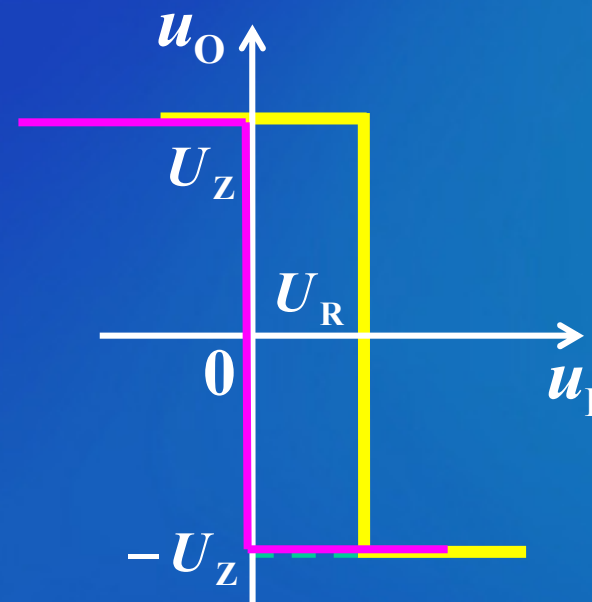
运放处于线性状态，但外围电路有非线性元件——稳压二极管。

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

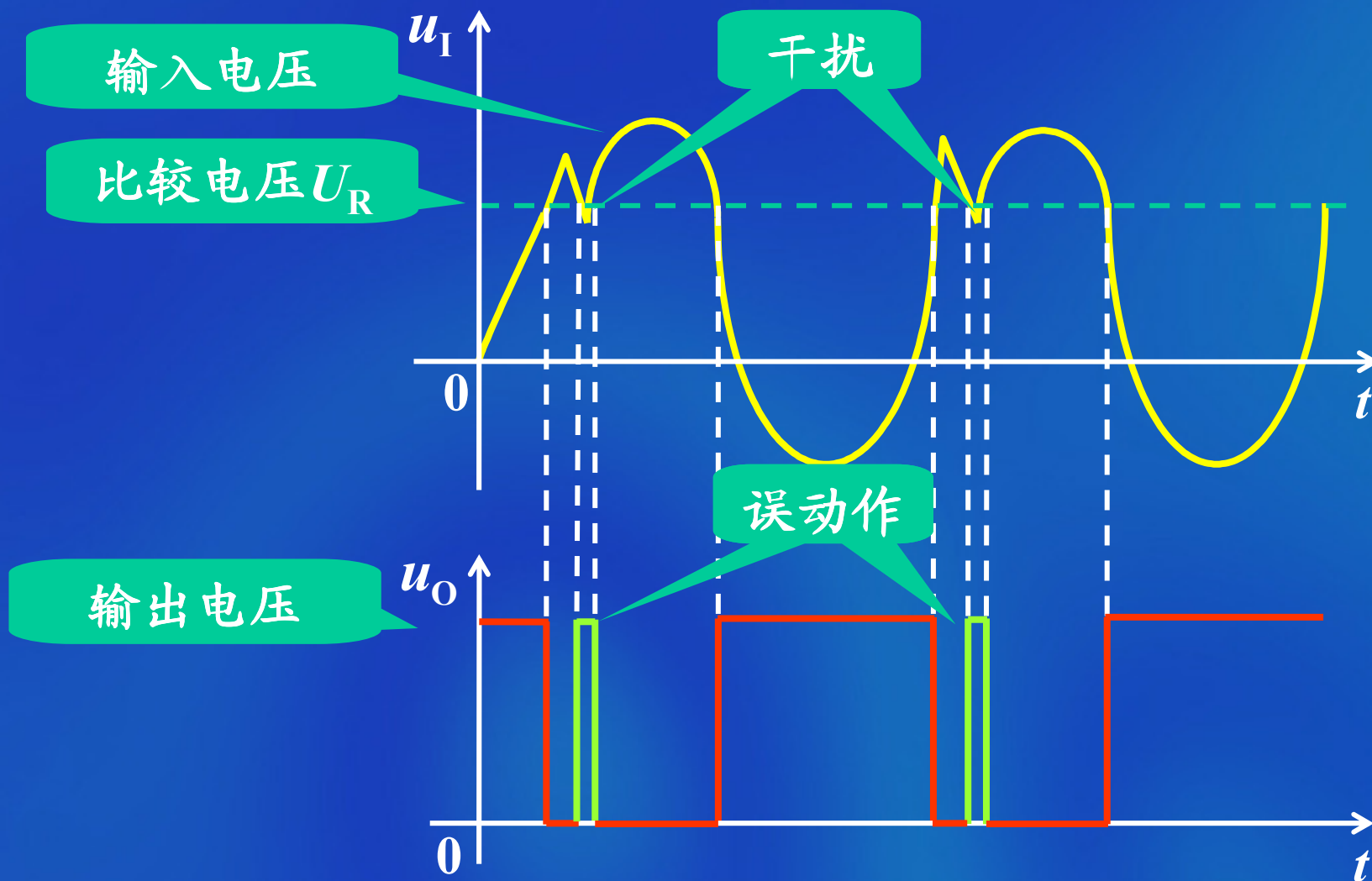
电路简单

灵敏度高

抗干扰能力差



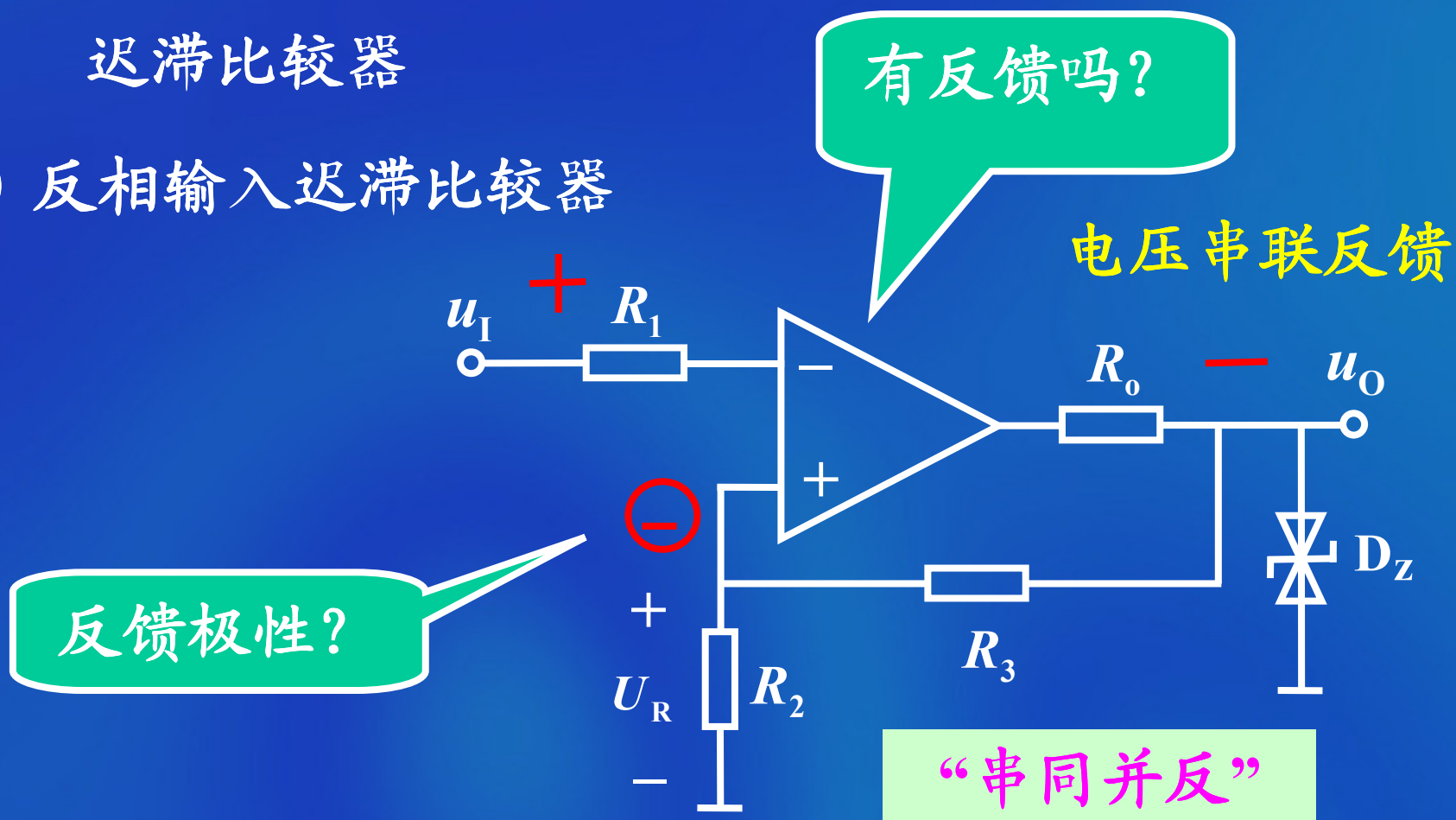
## 单门限比较器抗干扰性能差的波形图

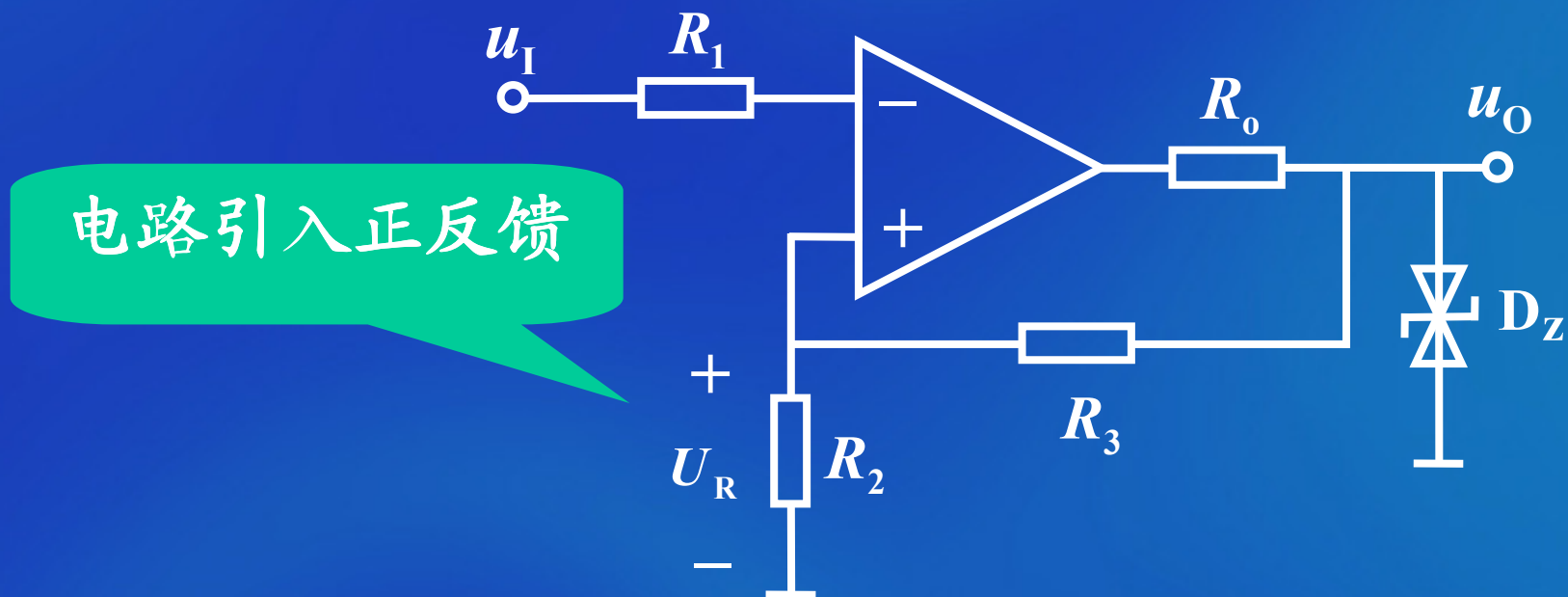


## 7.4.2 多门限比较器

### 1. 迟滞比较器

#### 1) 反相输入迟滞比较器





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

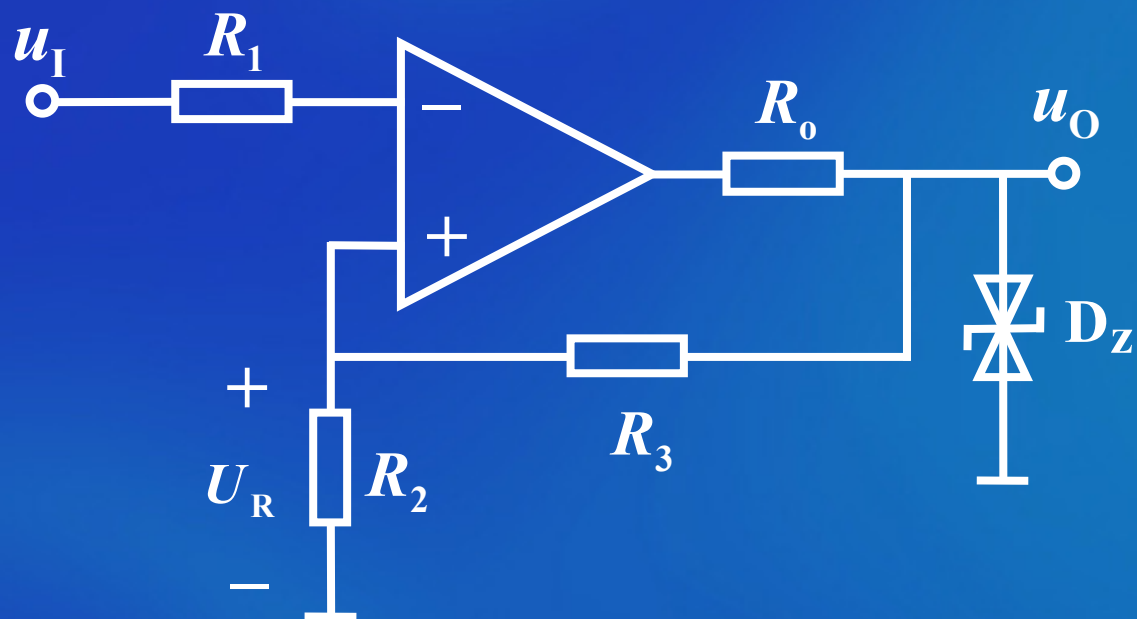
输出电压

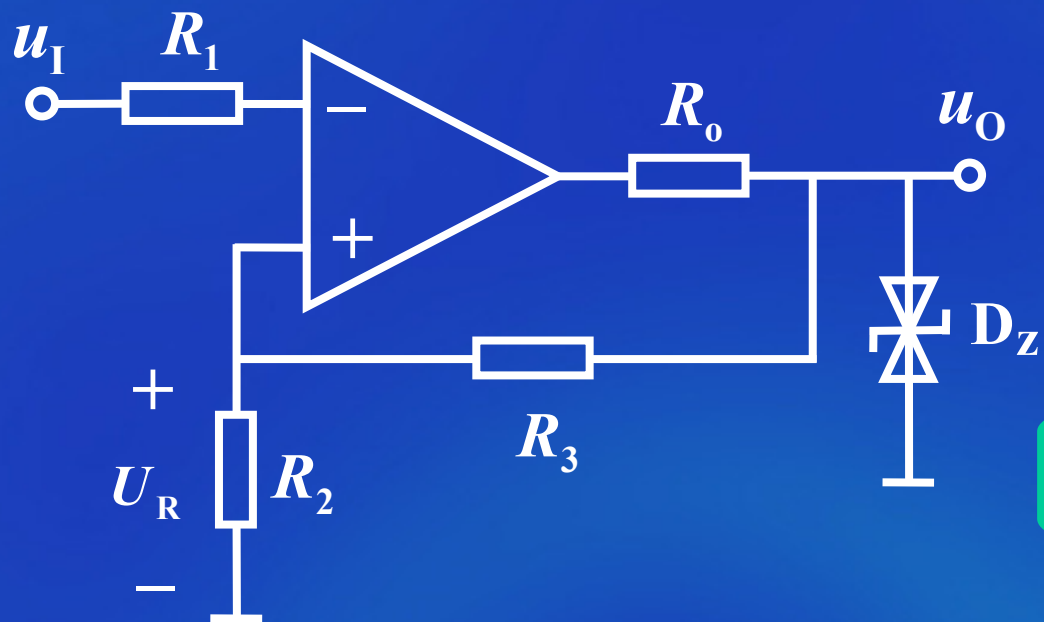
$$u_O = \pm U_Z$$

反馈电压

$$U_R = \pm K U_Z$$

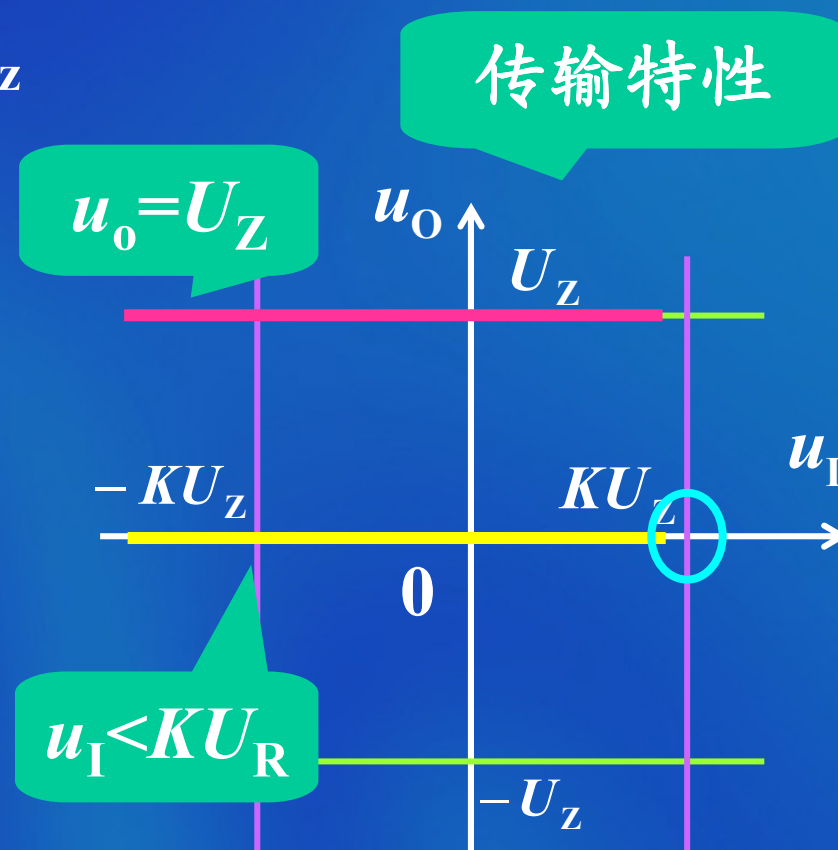
$$K = R_2 / (R_2 + R_3)$$

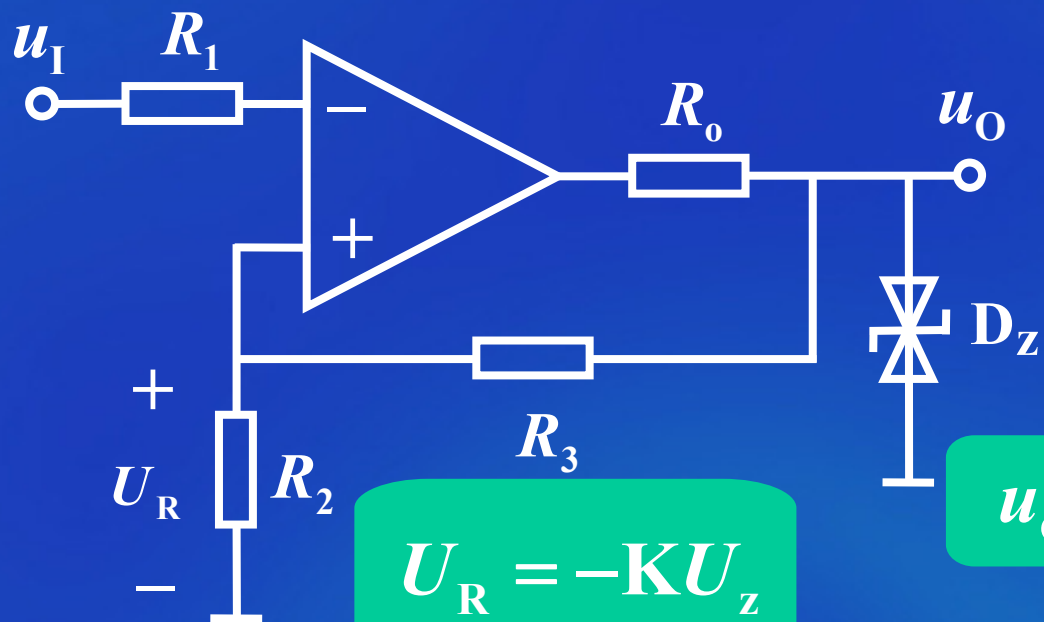




(a) 当  $u_O = U_Z$  时  $U_R = KU_Z$

如果  $u_I < U_R$   $u_O \equiv U_Z$





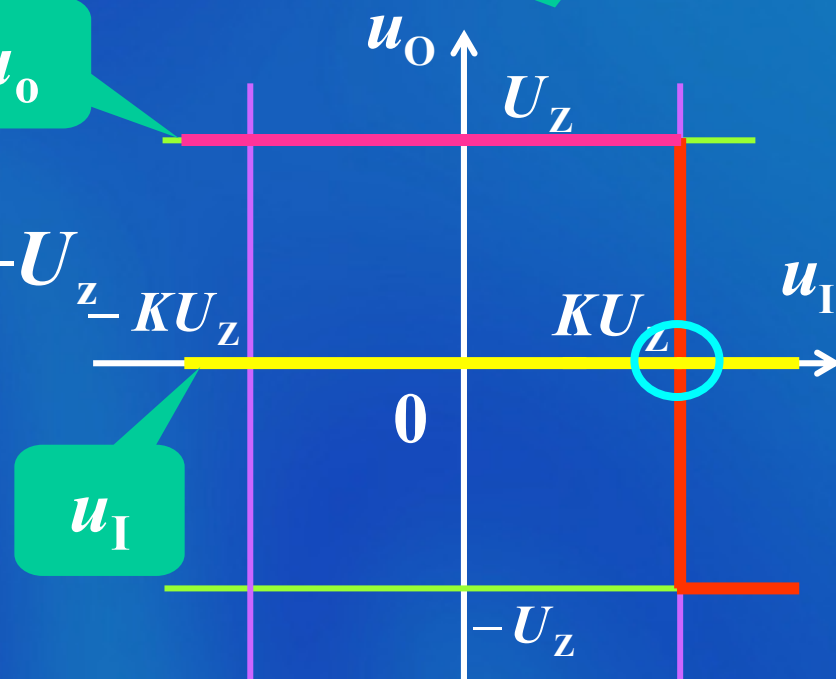
$$U_R = -KU_Z$$

(b) 当  $u_I > U_R = KU_Z$  时,  $u_O = -U_Z$

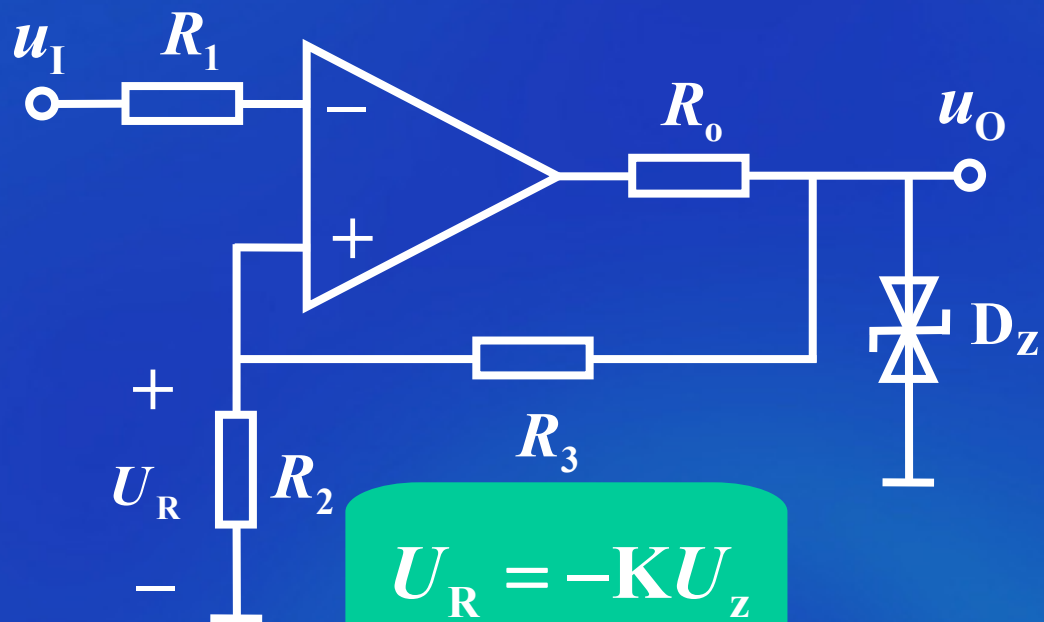
此时  $U_R = -KU_Z$

只要  $u_I > U_R$ ,  $u_O \equiv -U_Z$

传输特性



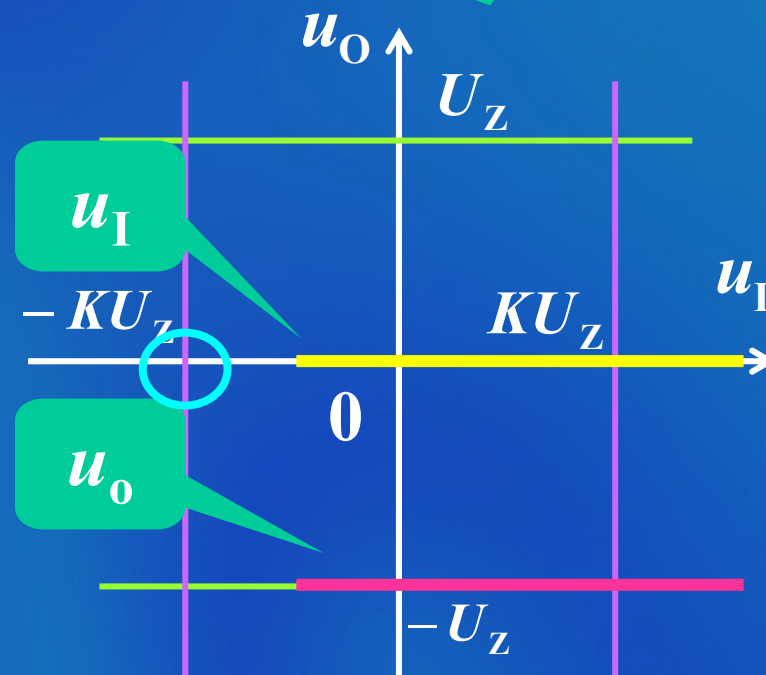


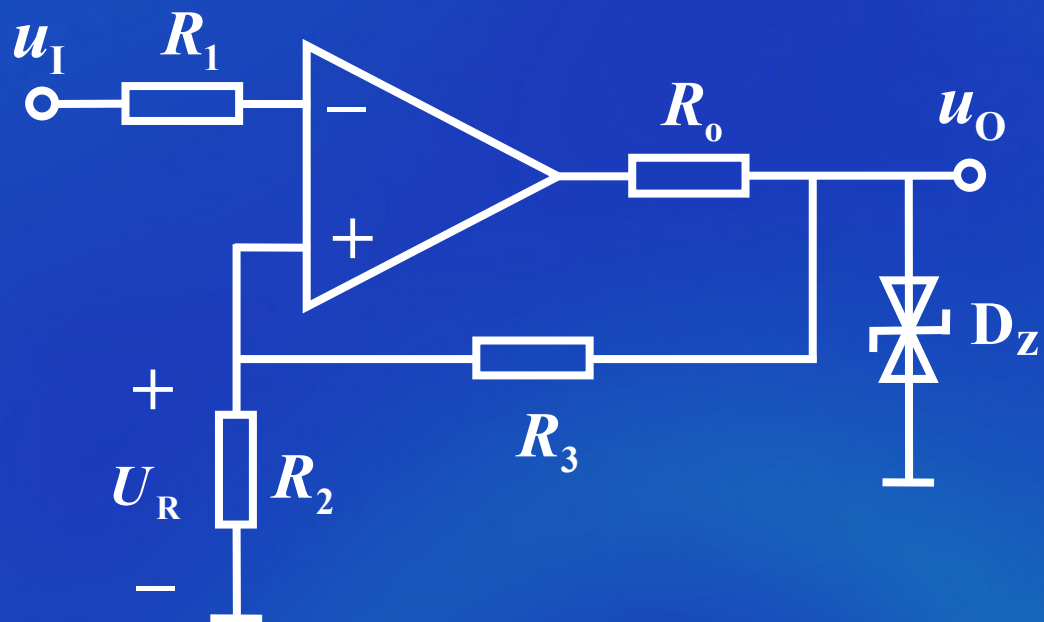


(c) 当  $u_O = -U_Z$  时  $U_R = -KU_Z$

如果  $u_I > U_R$   $u_O \equiv -U_Z$

传输特性



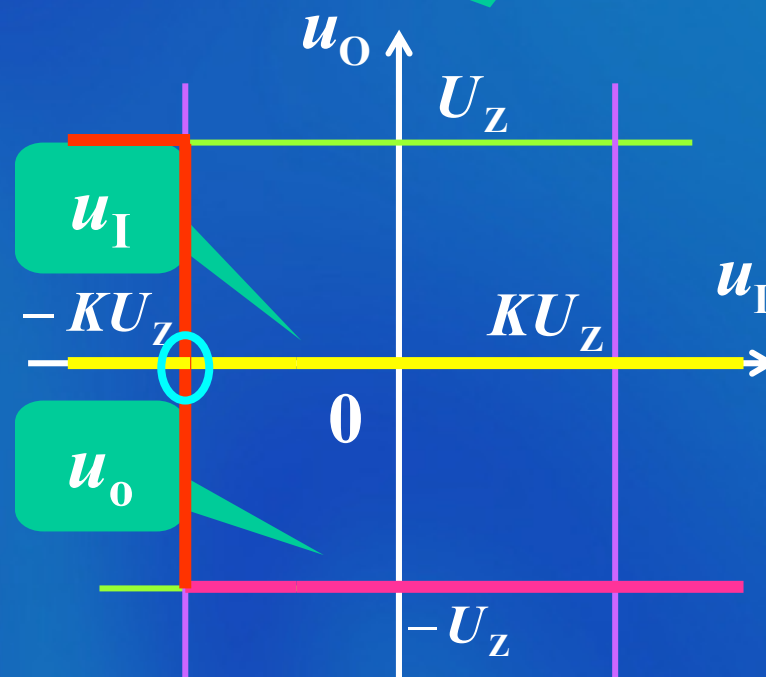


(d) 当  $u_I < U_R = -KU_Z$  时,  $u_O = +U_z$

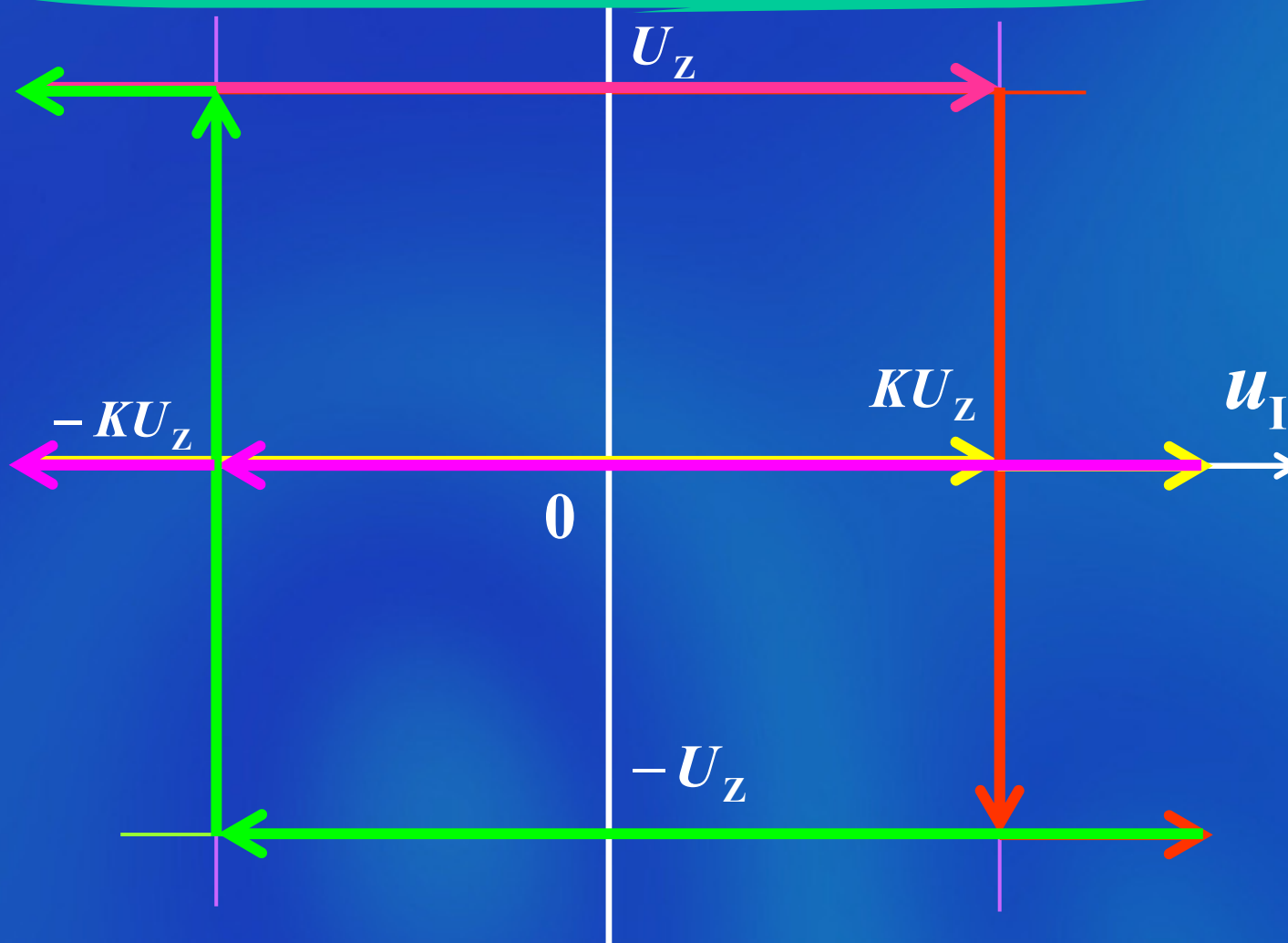
此时  $U_R = KU_z$

只要  $u_I < U_R$ ,  $u_O \equiv U_z$

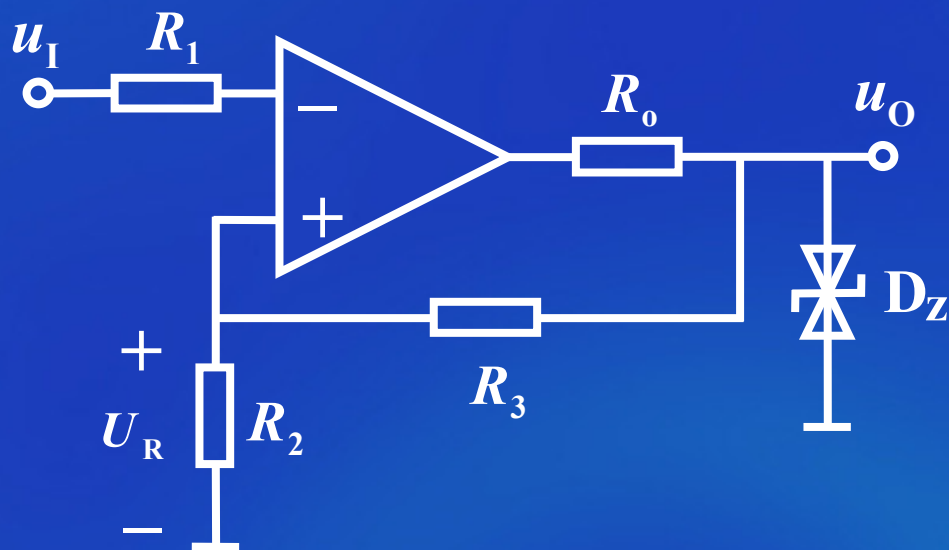
传输特性



## 反相输入迟滞比较器传输特性



## 实际应用

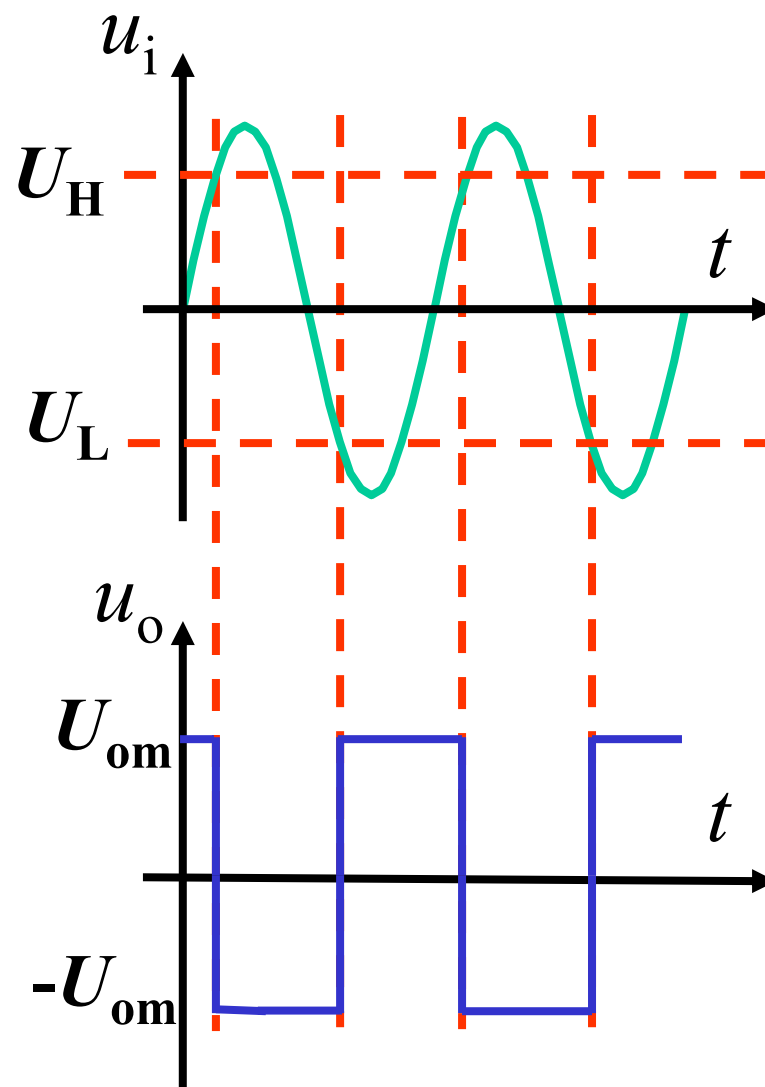


例：利用反相迟滞电压比较器将正弦波变为方波。

与单门限比较器有何不同？

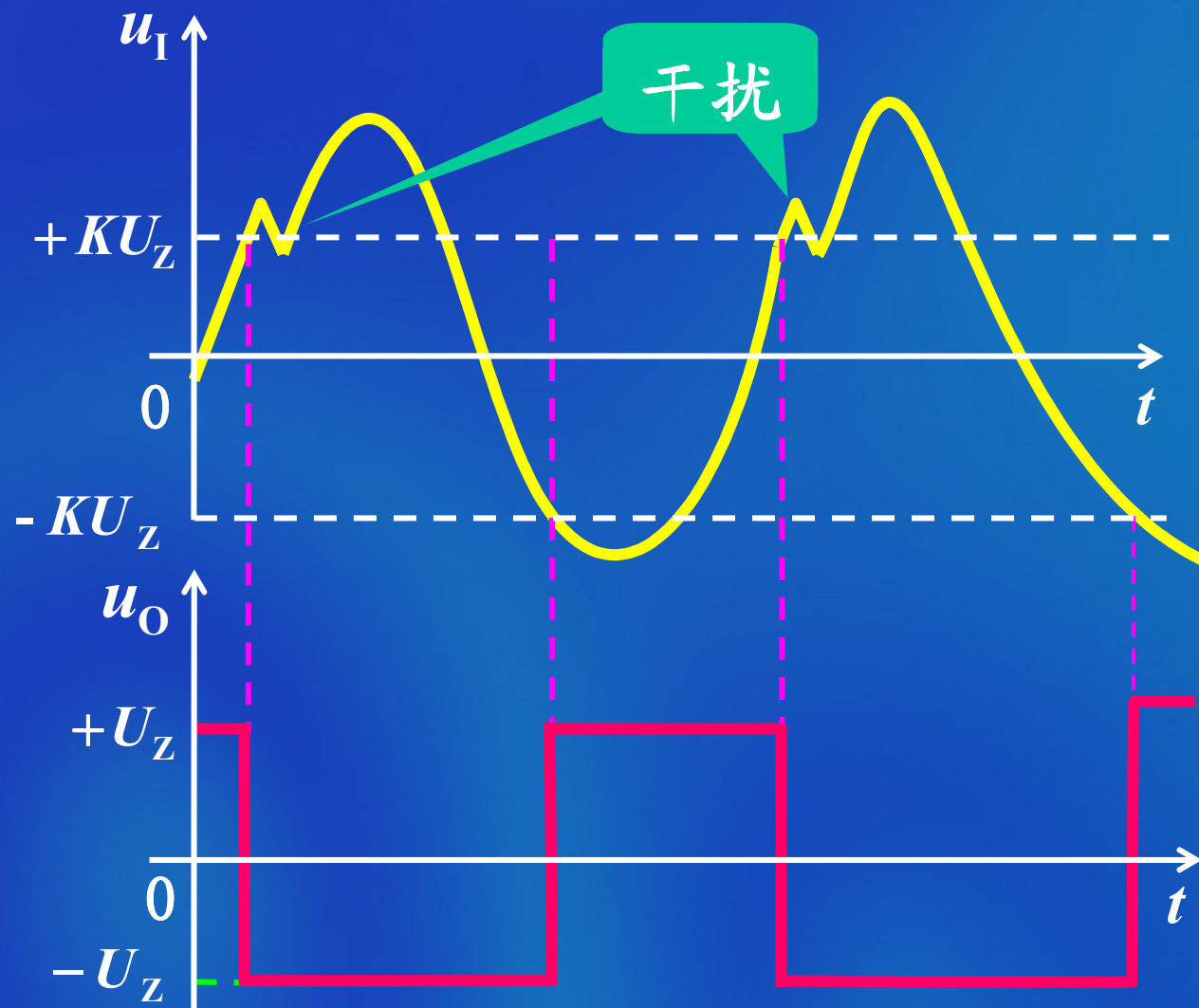


两个翻转点！



## 说明迟滞比较器抗干扰性能的波形图

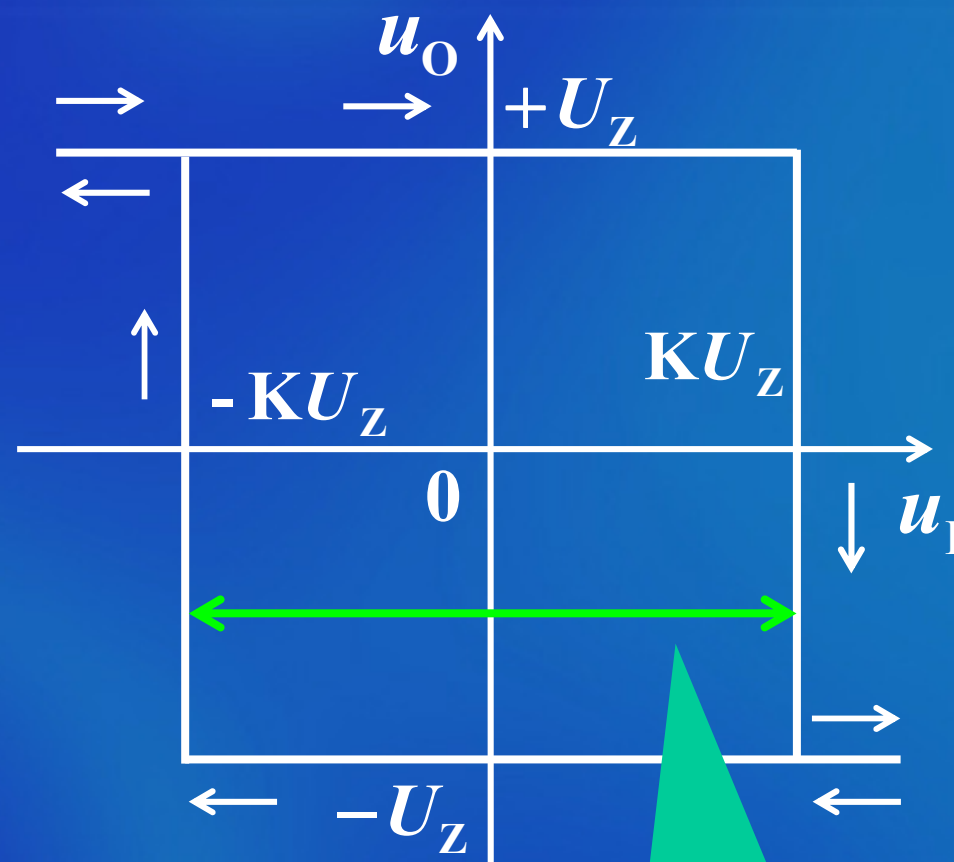
输入信号



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。



不能分辨区

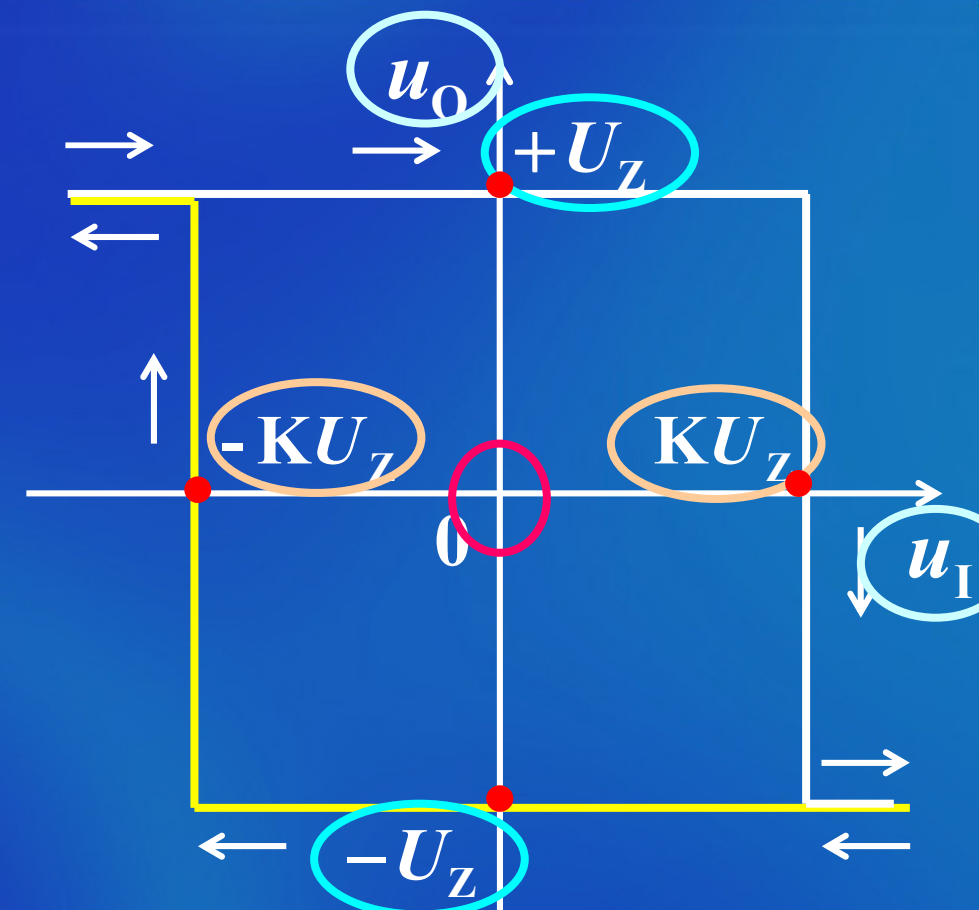


## 传输特性的画法:

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

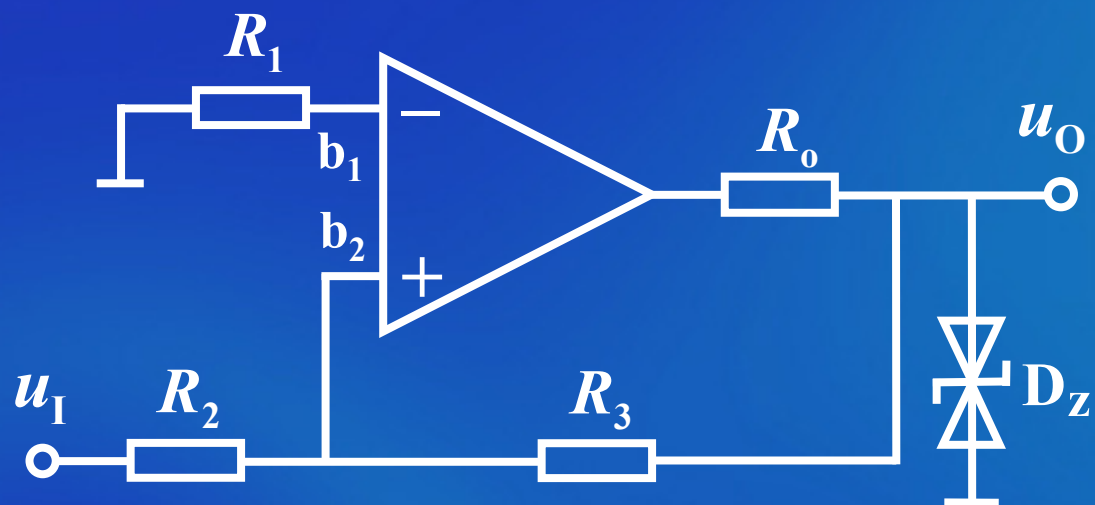
b. 特性分析

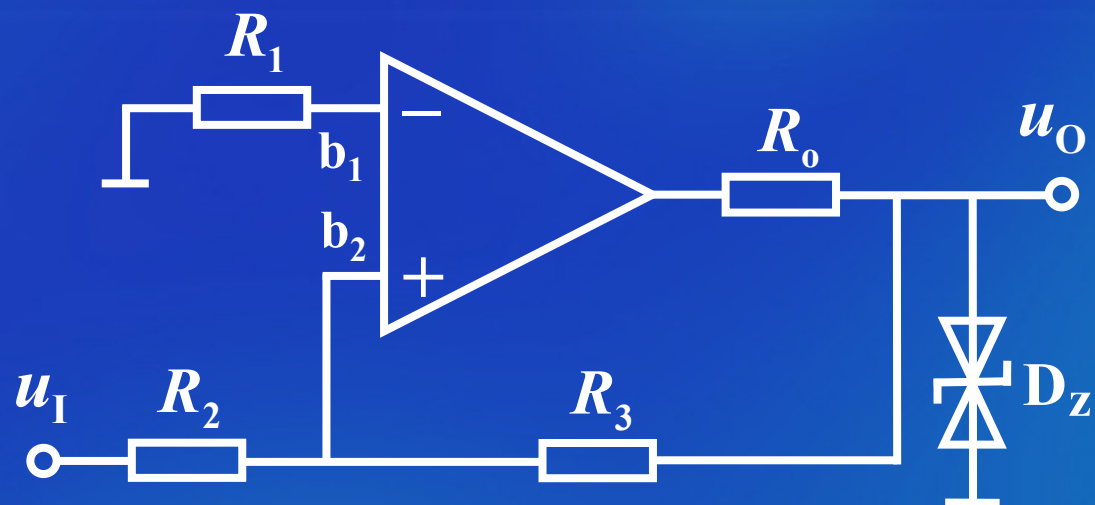
由图可知

$$u_{b1} = 0$$

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

$$u_O = \pm U_z$$

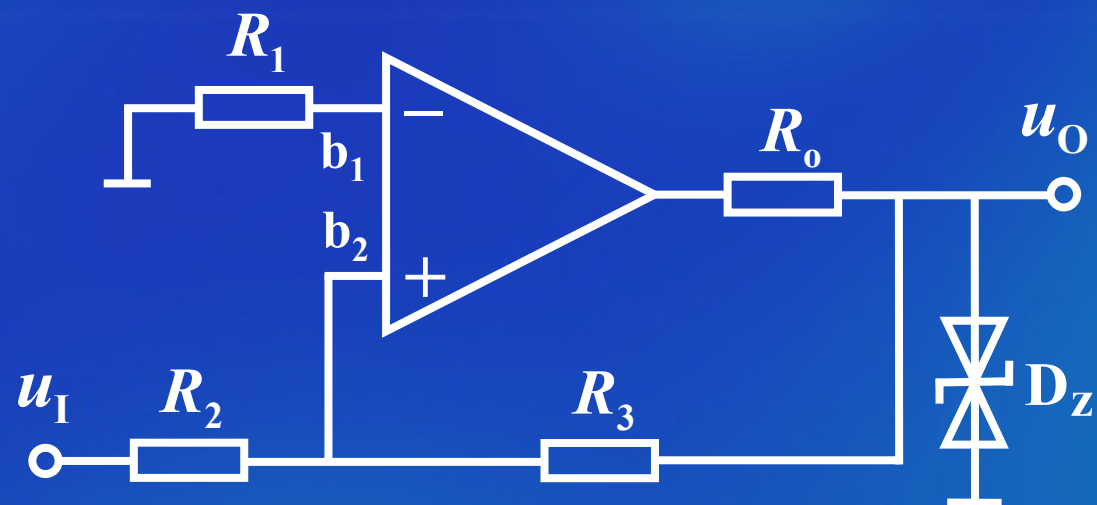




$$u_{b2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_I + \frac{R_2}{R_2 + R_3} (\pm U_z)$$

根据比较器的特性，当  $u_{b2} = u_{b1}$  时电路翻转。

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



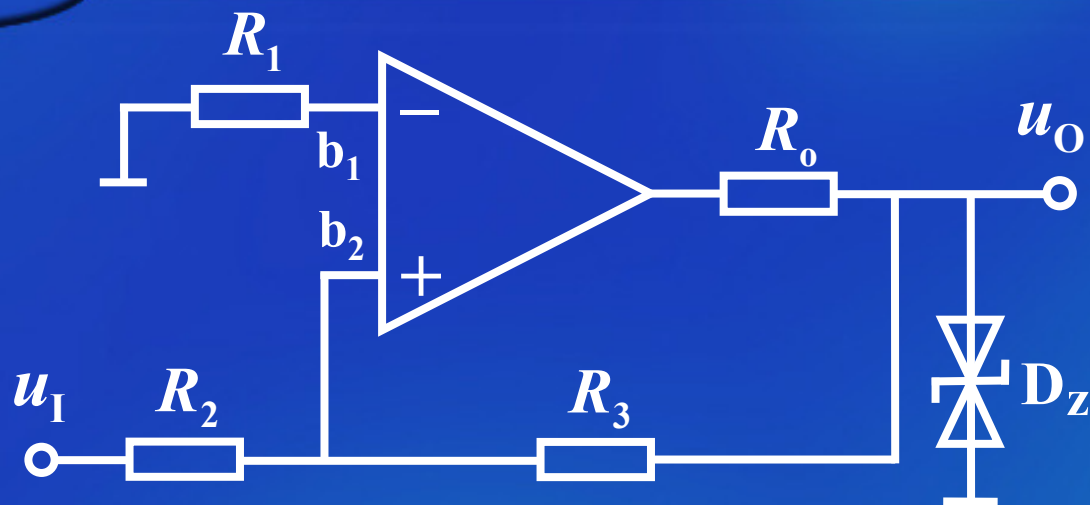
得比较器的翻转电平为

$$U_H = KU_Z$$

$$U_L = -KU_Z$$

$$K = R_2 / R_3$$

即当  $u_I = \pm KU_Z$  时  
 $u_{b2} = 0$



传输特性

(a) 当  $u_O = +U_Z$  时

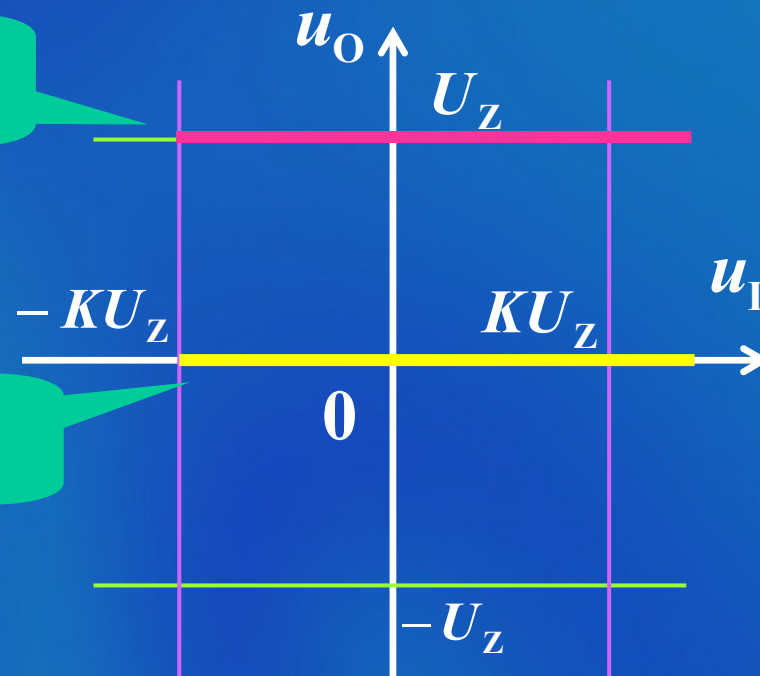
只要  $u_I > -KU_Z$

$$u_{b2} > 0$$

$$\text{即 } u_O \equiv +U_Z$$

$$U_O = +U_Z$$

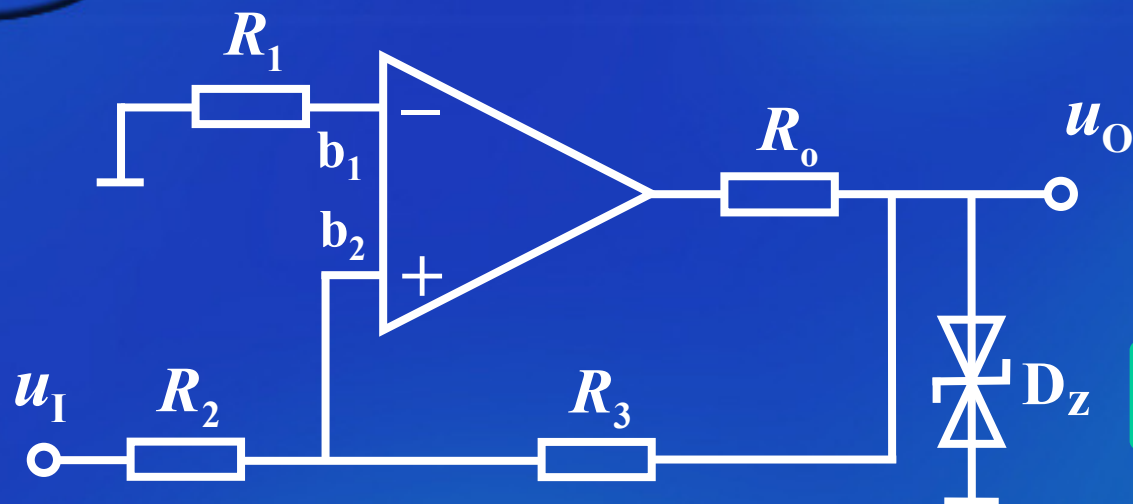
$$u_I > -KU_Z$$



上页

下页

后退



传输特性

(b) 当  $u_O = -U_Z$  时

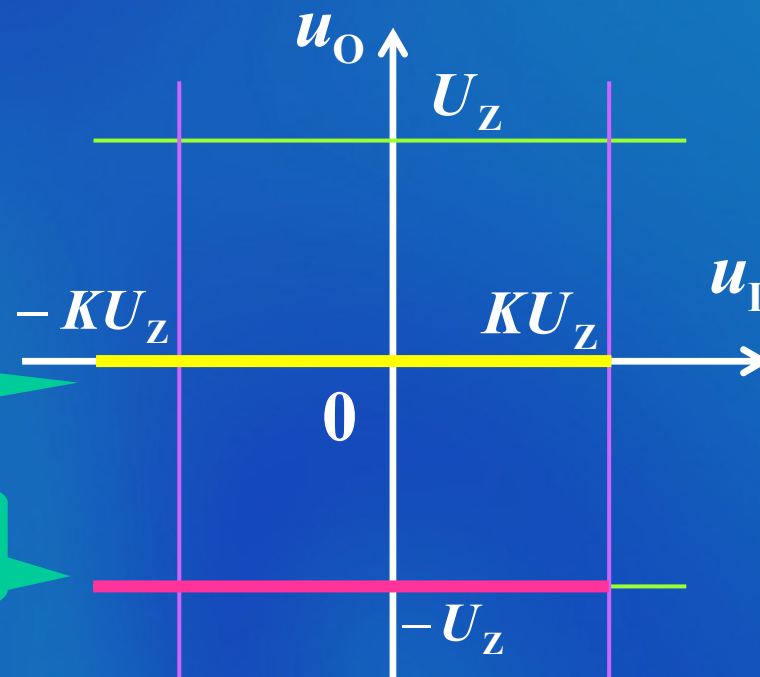
只要  $u_I < KU_Z$

$$u_{b2} < 0$$

$$u_O \equiv -U_Z$$

$$u_I < KU_Z$$

$$U_O = -U_Z$$

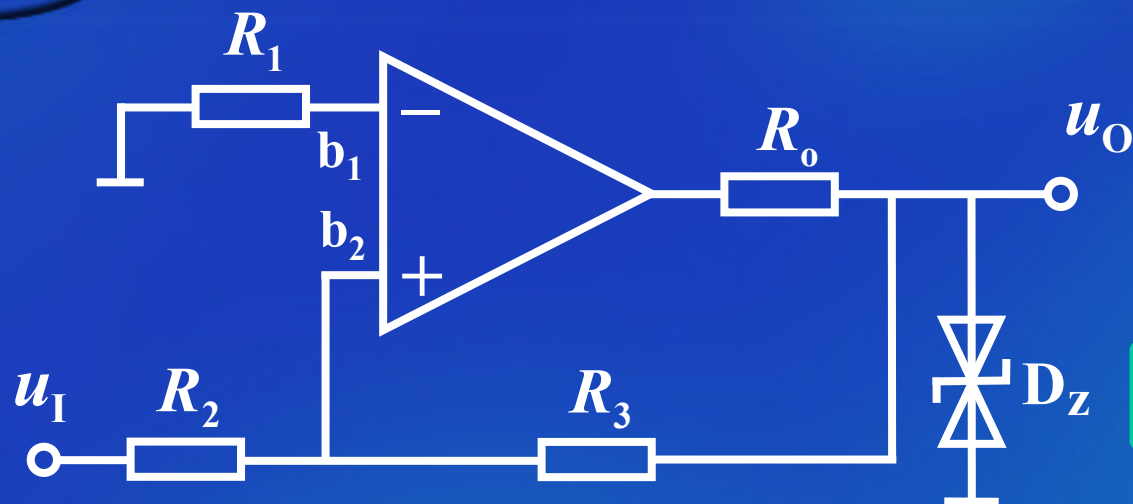


上页

下页

后退





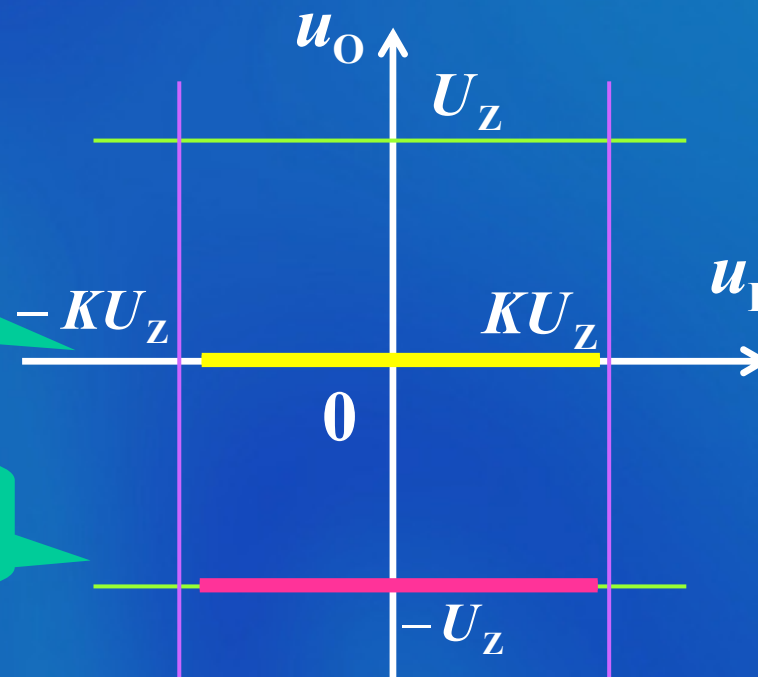
传输特性

(c) 当  $-KU_Z < u_I < KU_Z$  时

输出维持原状态

$$|u_I| < KU_Z$$

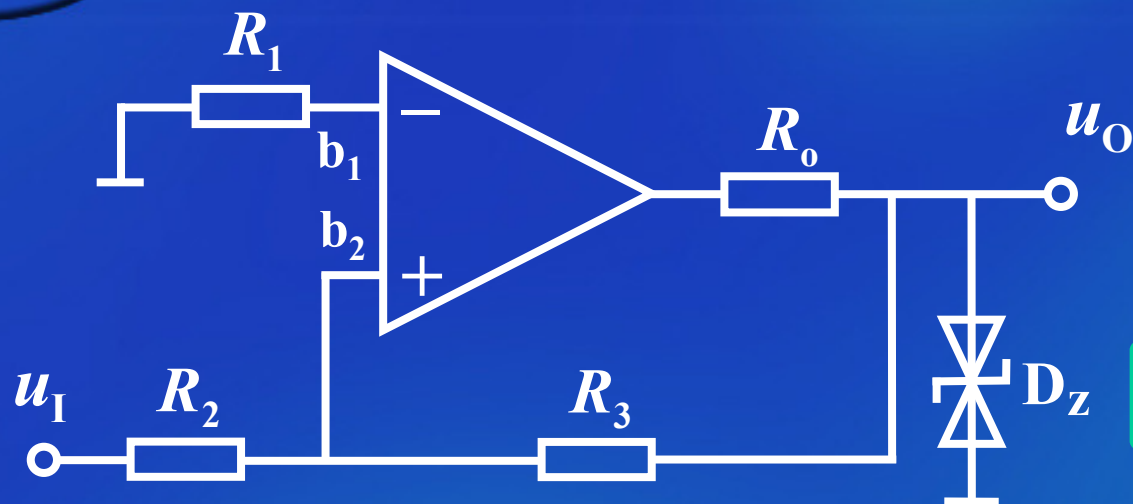
$$U_o = -U_Z$$



上页

下页

后退



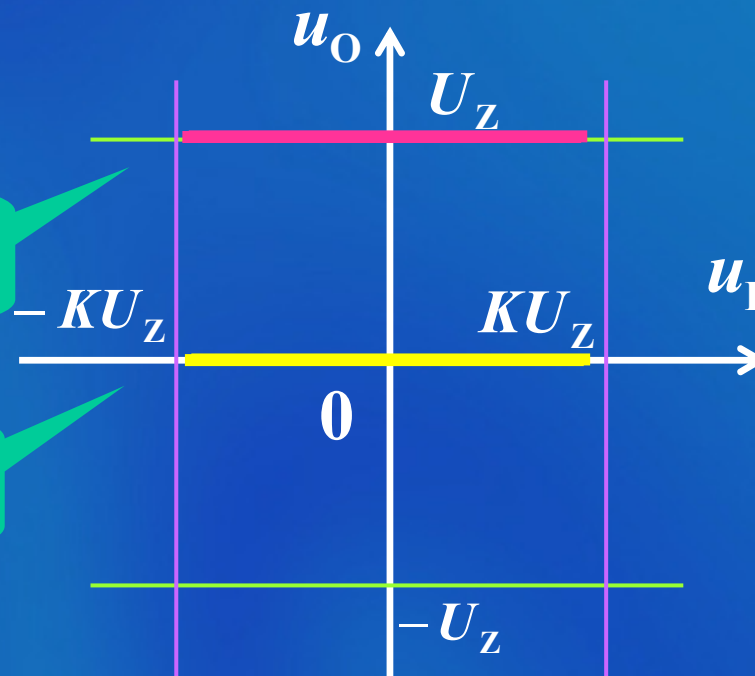
传输特性

(c) 当  $-KU_Z < u_I < KU_Z$  时

输出维持原状态

$$U_o = U_Z$$

$$|u_I| < KU_Z$$

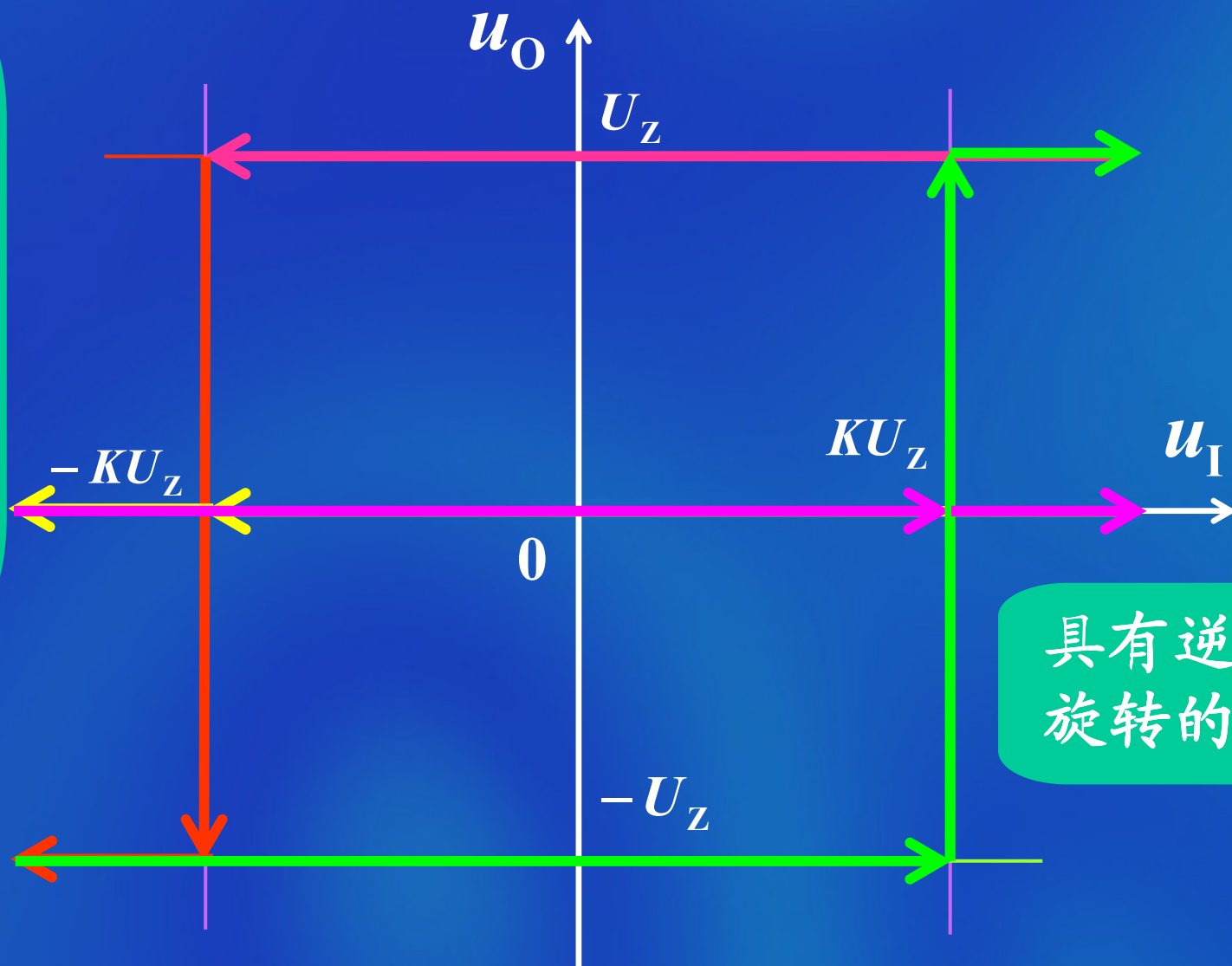


上页

下页

后退

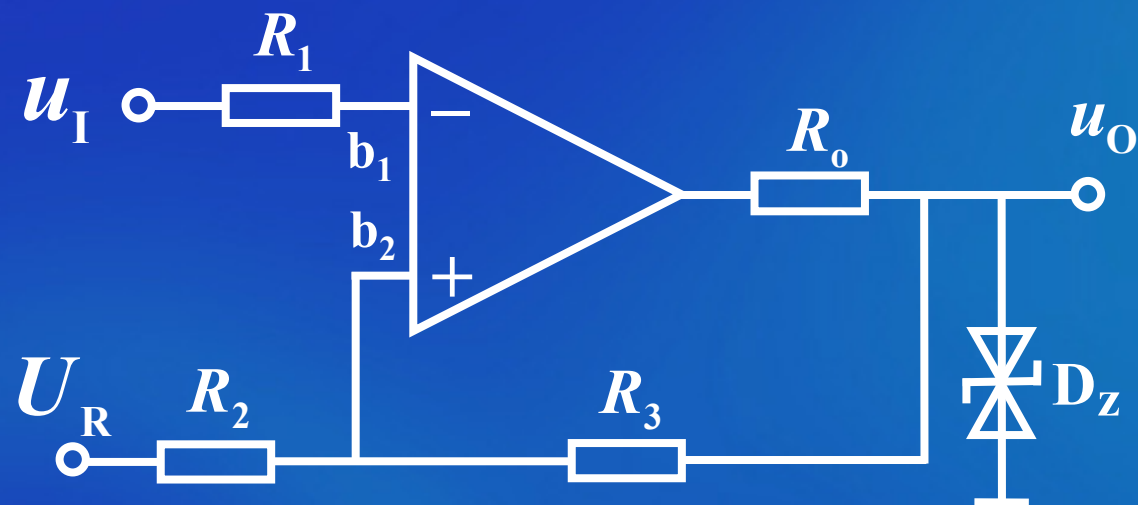
同相输入迟滞比较器传输特性



具有逆时针旋转的特性

# c. 特性平移的迟滞比较器

图中

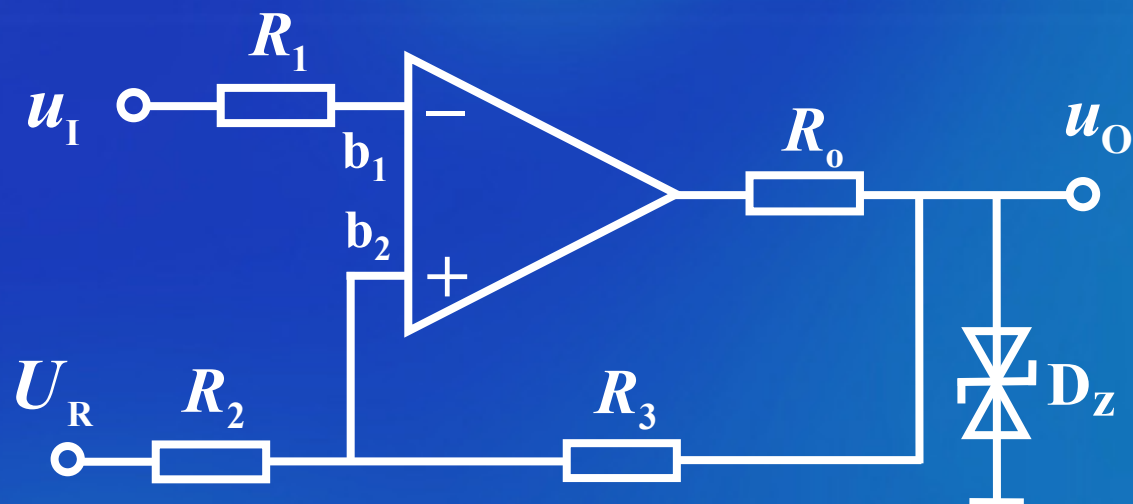


$$u_{b1} = u_I$$

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

$$u_O = \pm U_z$$

令  $u_{b2} = u_{b1}$



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

得电路的翻转电平为

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

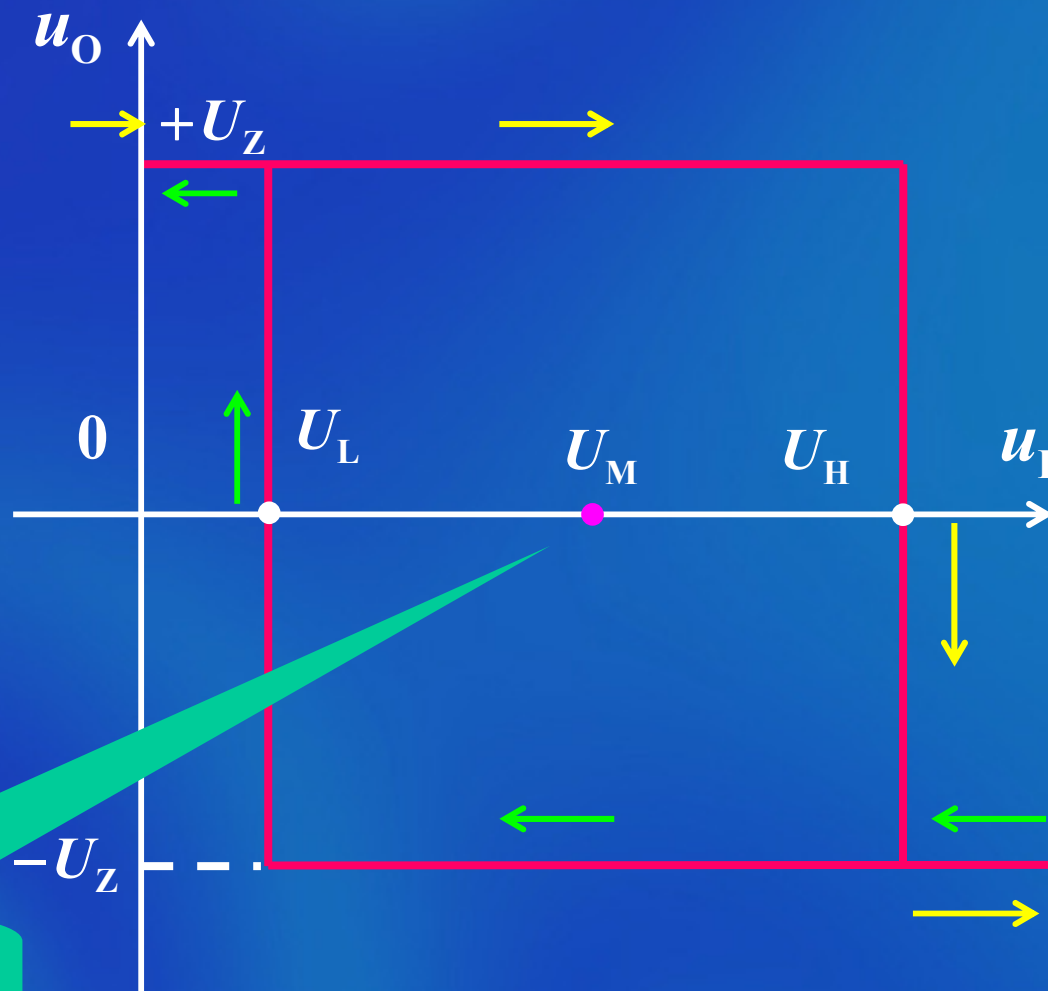
$$U_H = U_R R_3 / (R_2 + R_3) + U_z R_2 / (R_2 + R_3)$$

## 传输特性

迟滞回环沿着  
坐标横轴平移

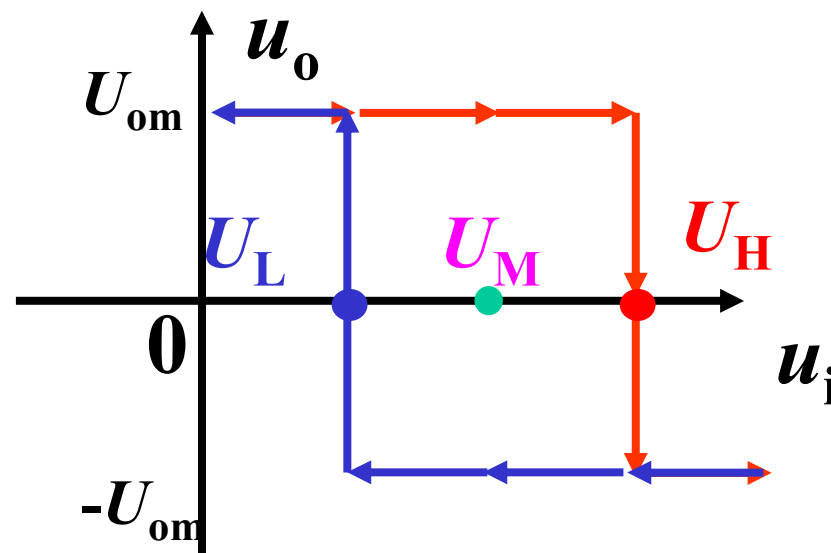
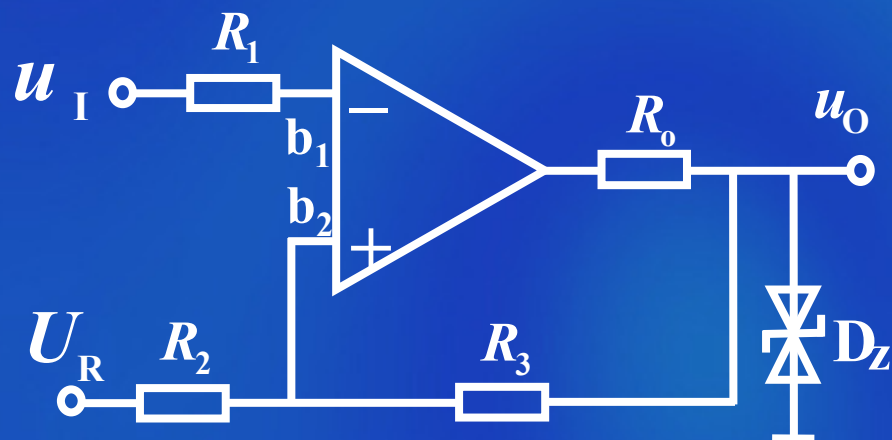
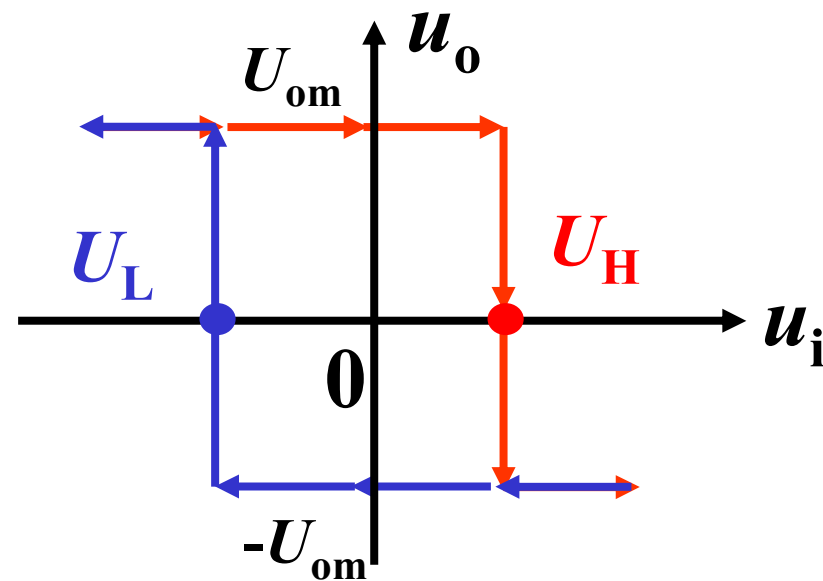
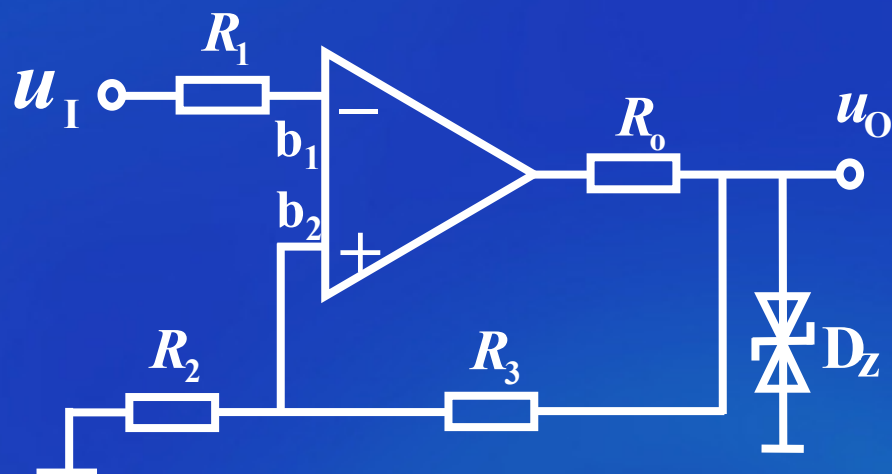
$$U_M = U_R R_3 / (R_2 + R_3)$$

设  $U_R > 0$ , 右移

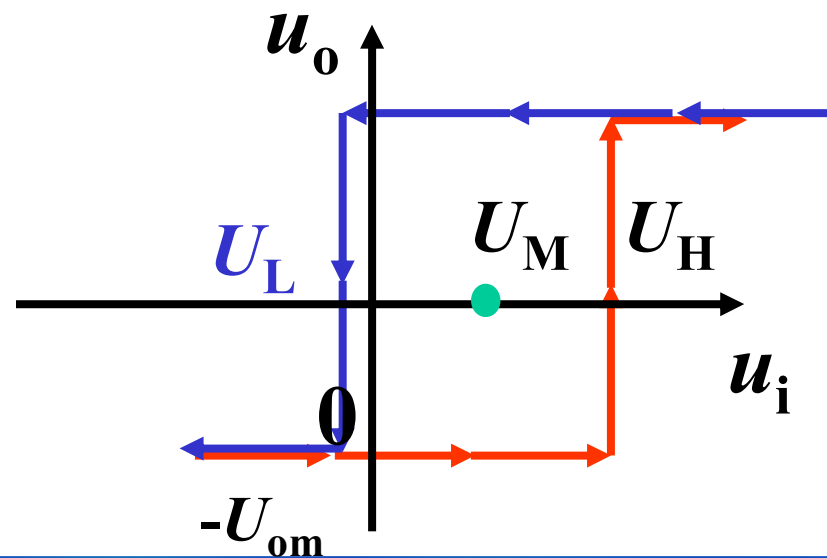
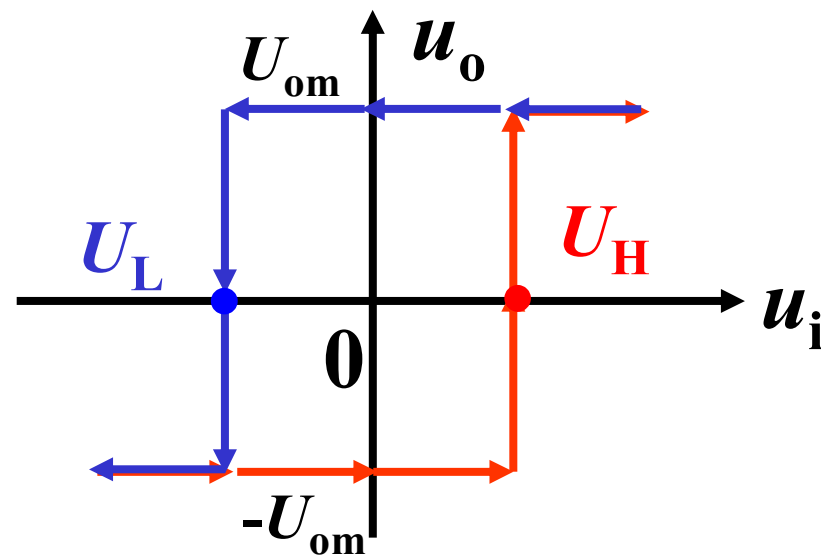
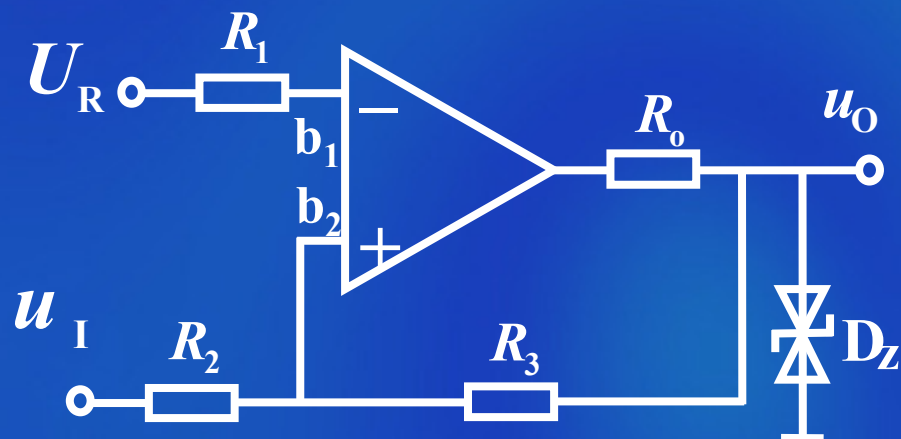
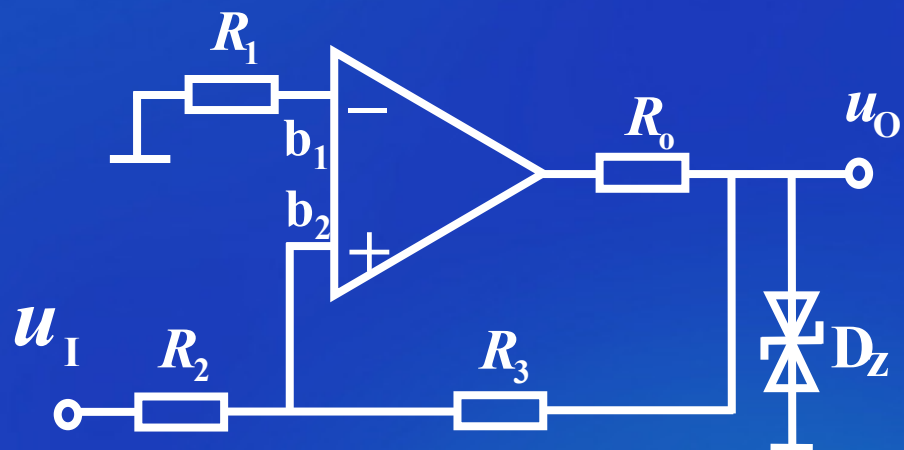




# 两种反相迟滞比较器对比:



# 两种同相迟滞比较器对比:



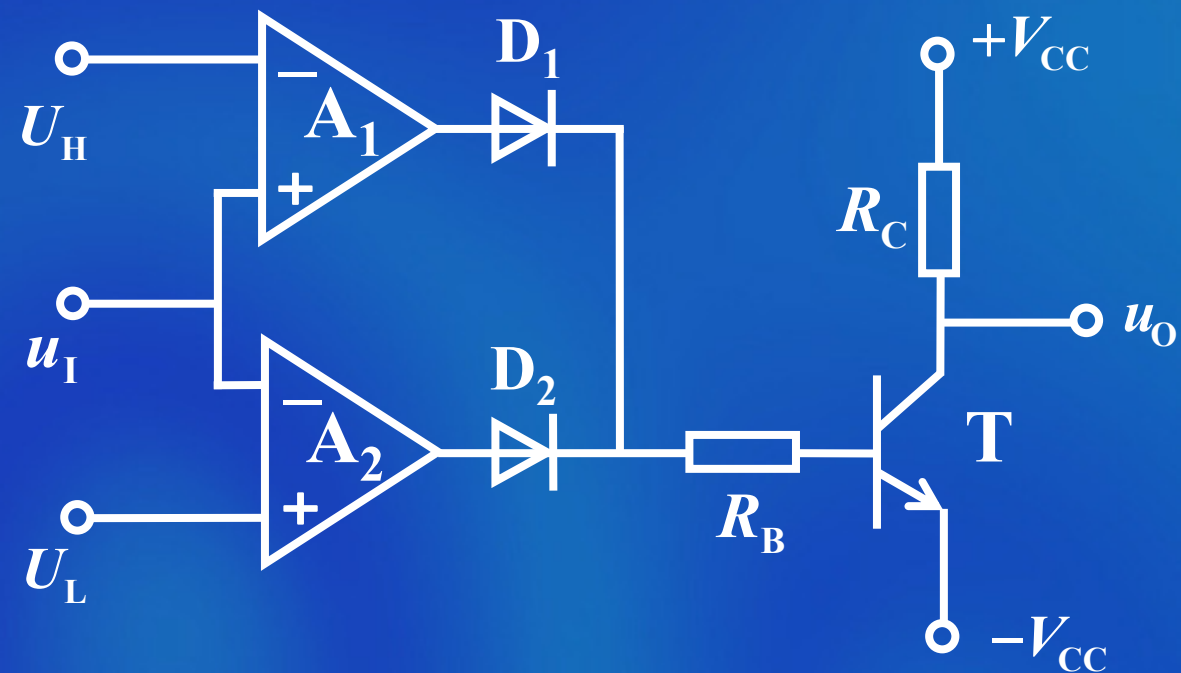
# 总 结

- 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

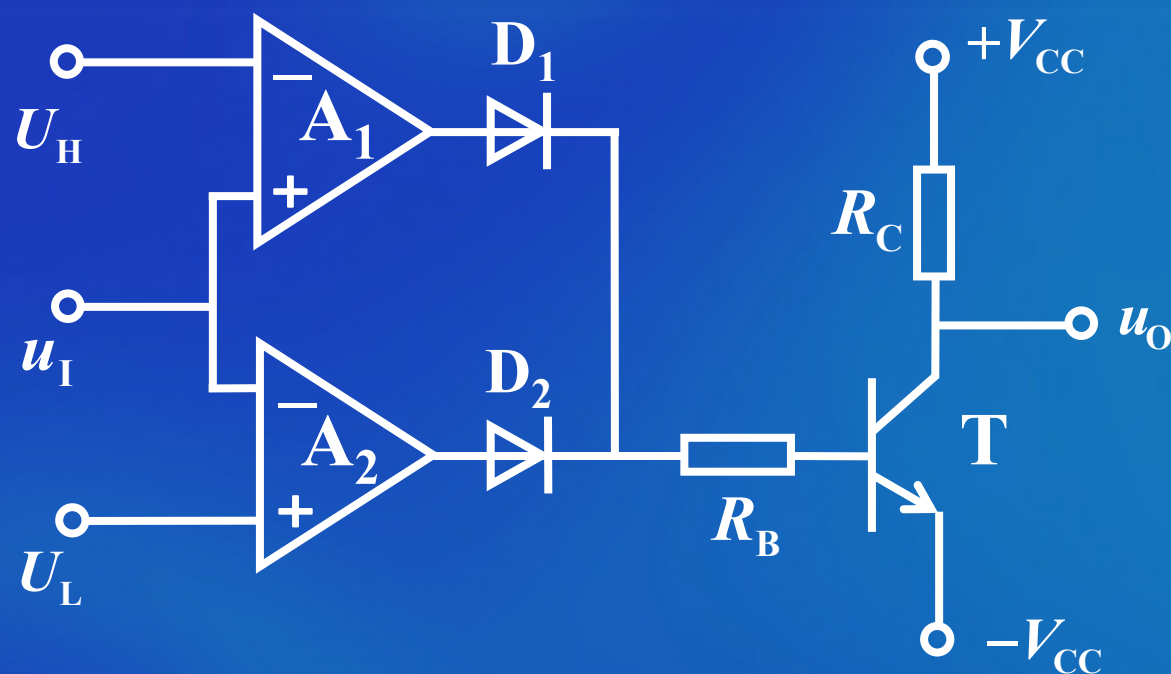
### (1) 电路



## 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

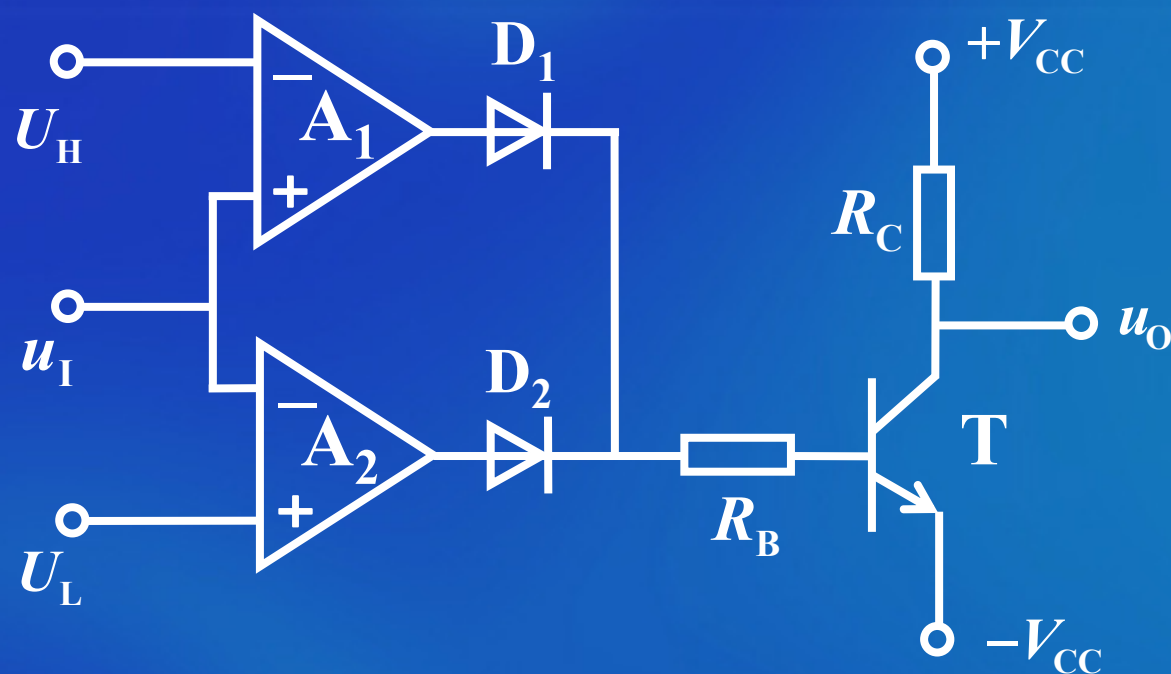
$A_1$  输出低电平

$A_2$  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

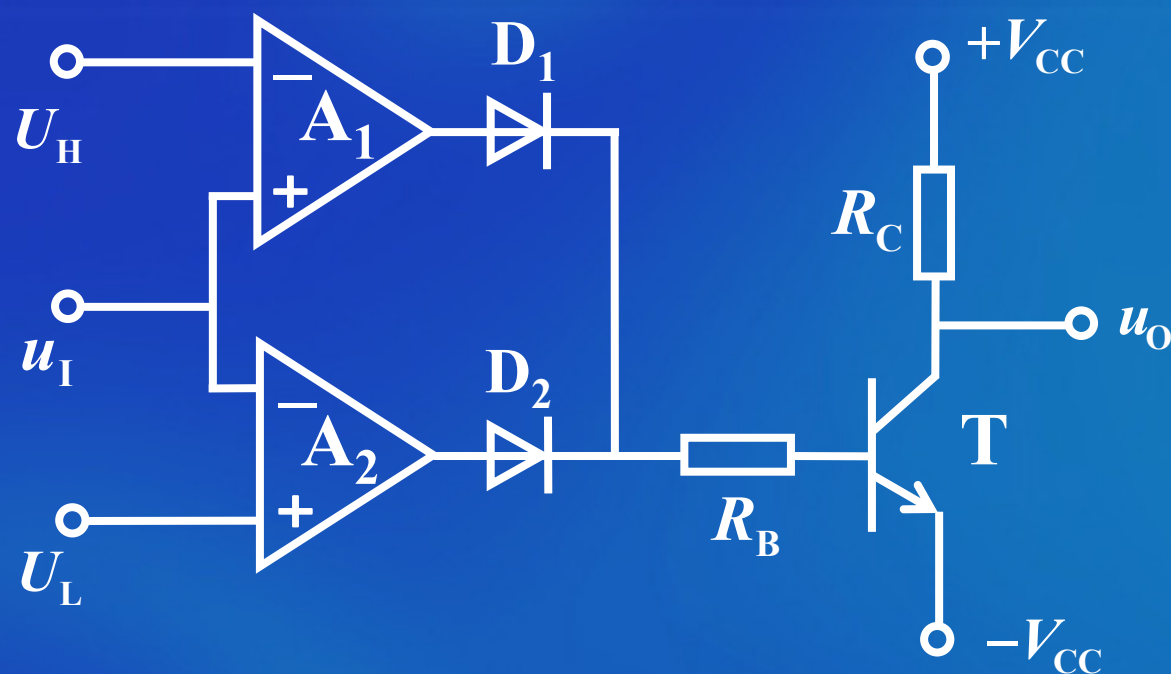
$A_1$  输出低电平

$A_2$  输出低电平

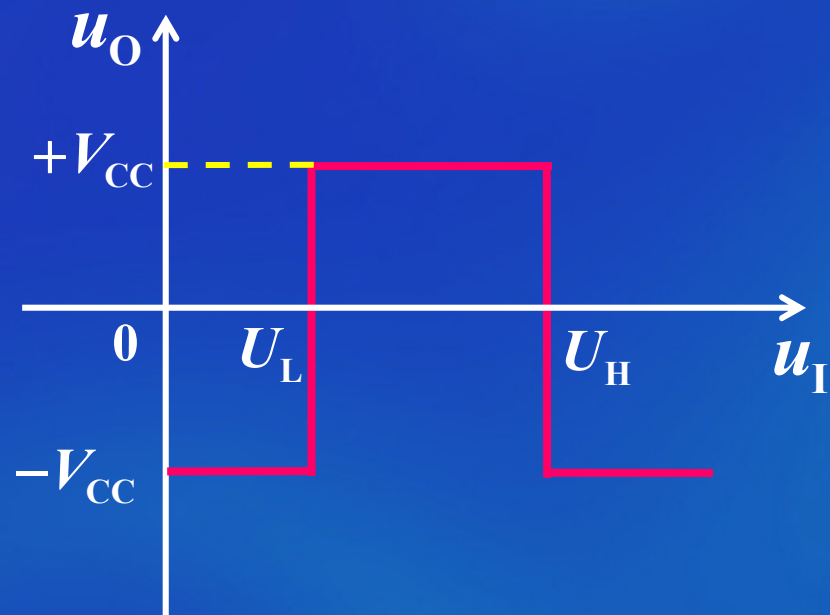
$D_1$  截止,  $D_2$  截止

晶体管 T 截止

输出电压  $u_O = +V_{CC}$



## 传输特性

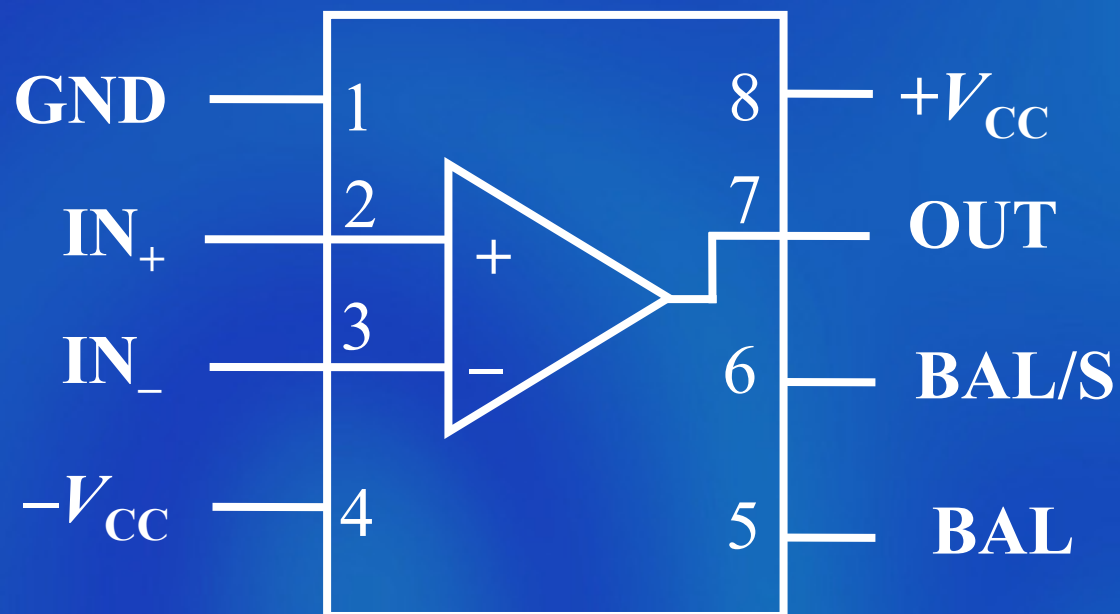


窗口比较器的主要应用

用于工业控制系统，测量温度、压力、液面等的范围。

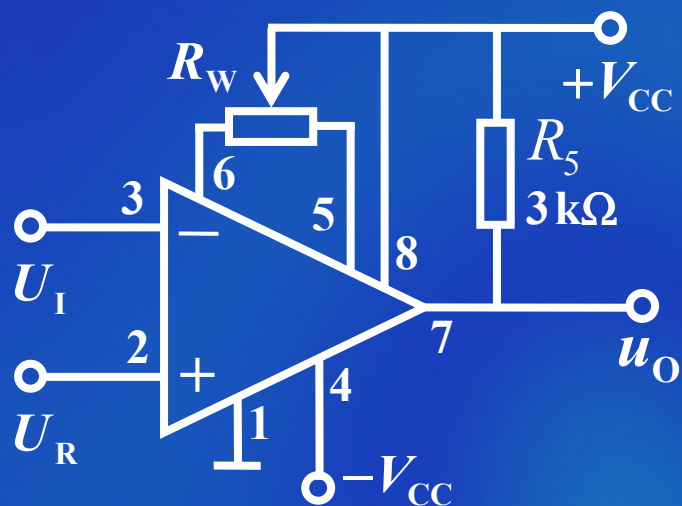
## 7.4.3 集成电压比较器

### LM111系列的封装形式和引脚排列

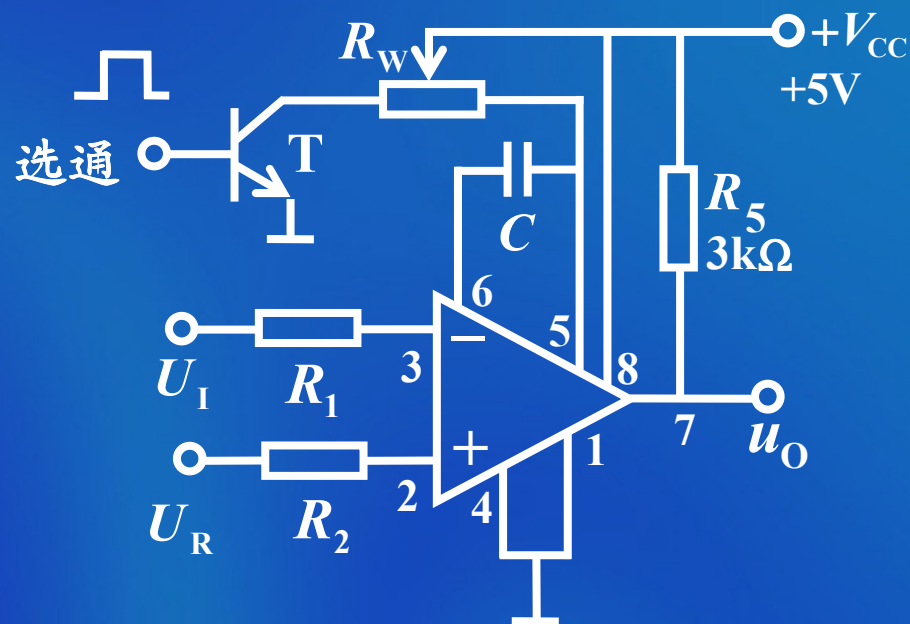


# LM111系列典型应用电路

## 基本应用电路

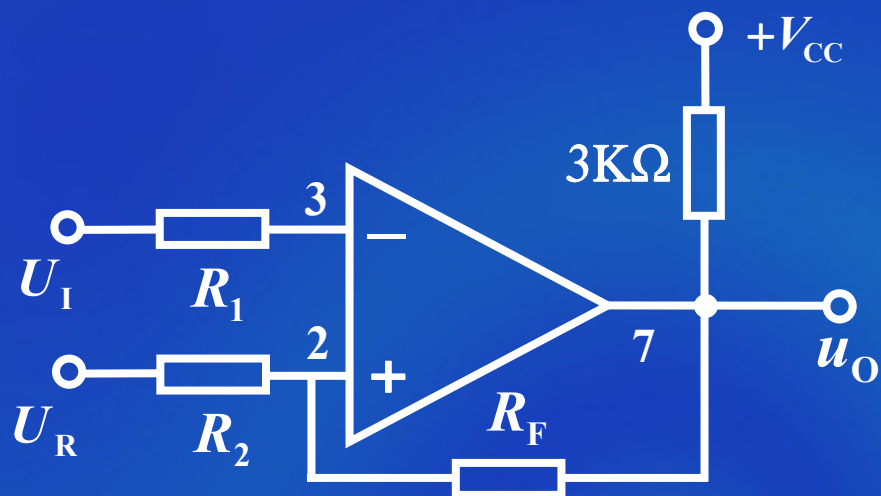


## 具有选通的接法

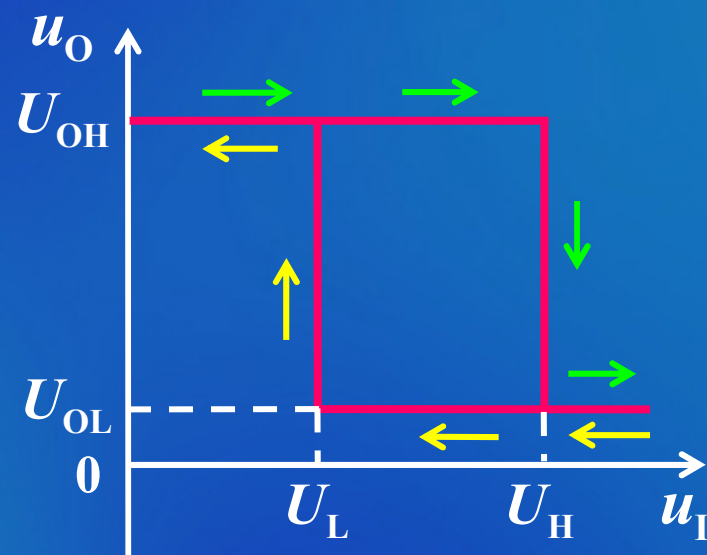


## LM111系列实现的施密特电路

电路



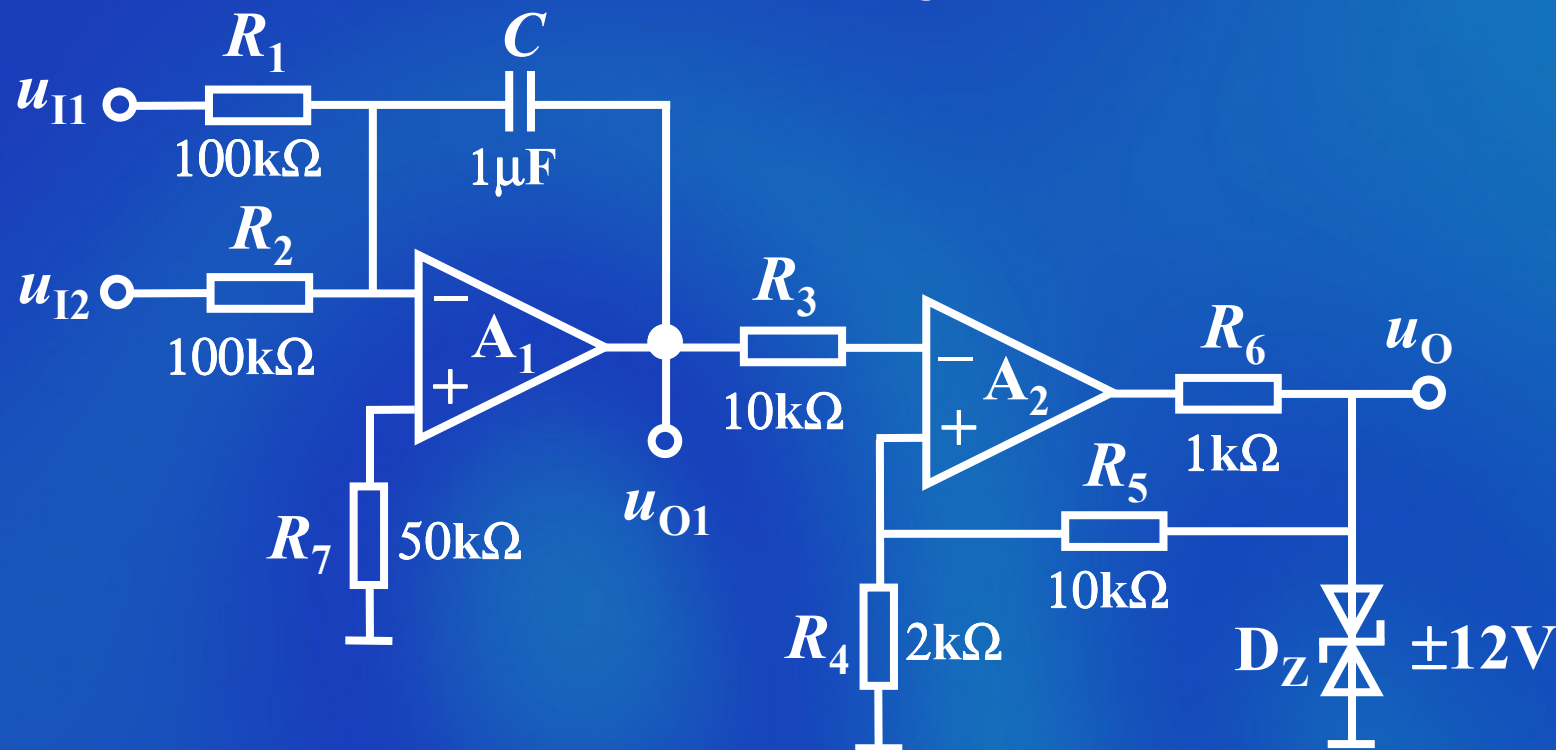
传输特性



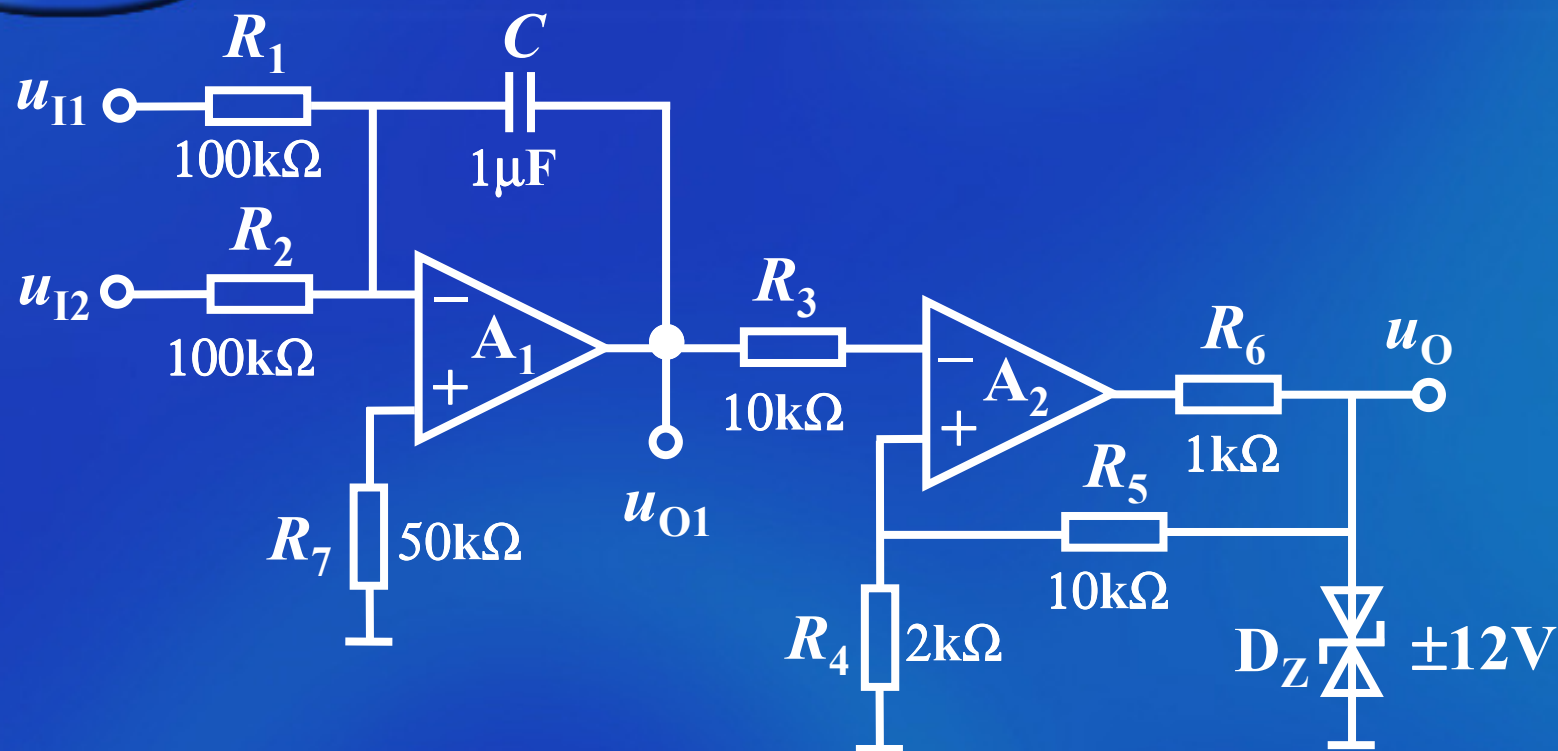
例 1 电路如图所示，已知集成运  $A_1$ 、 $A_2$  的性能理想。

(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  $-12V$ 。

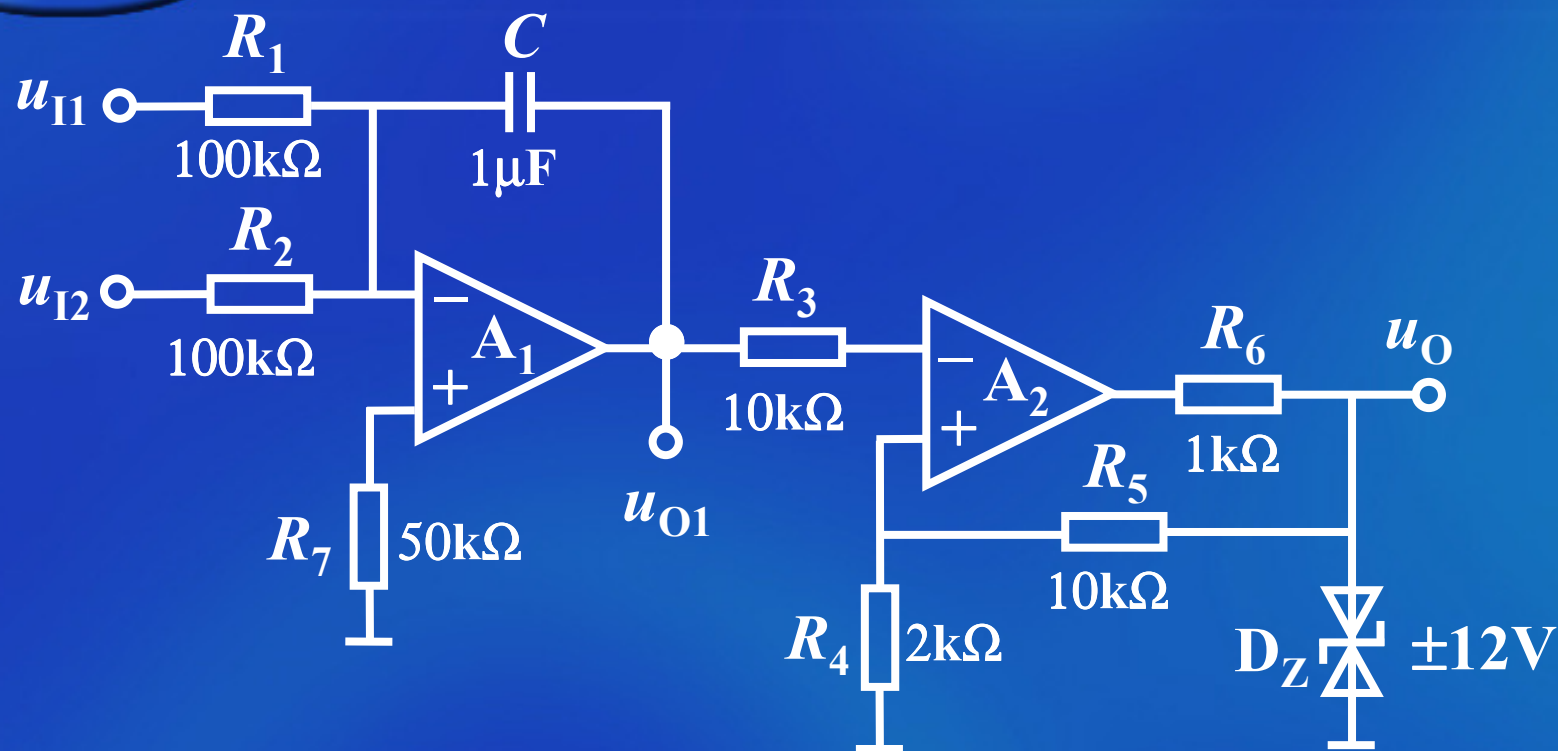






(3) 从 $u_O$ 翻转到 $-12V$ 的时刻起 $u_{I1}=-10V$ ,  $u_{I2}=15V$ , 又经过多长时间 $u_O$ 再次翻回 $12V$ 。

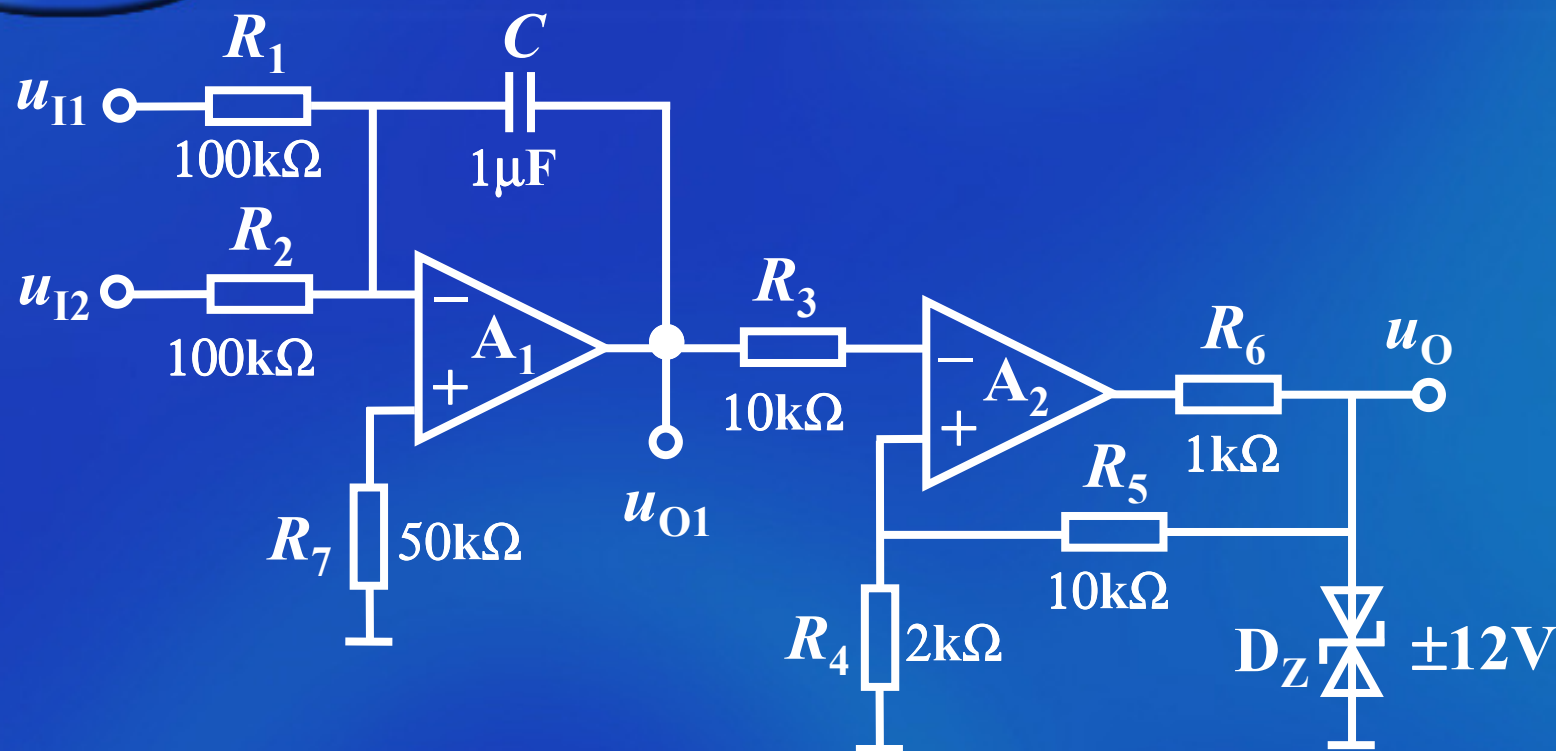
(4) 画出 $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$ 、 $u_{O1}$ 与 $u_O$ 的波形。



解（1）由图可知，运放 $A_1$ 组成了积分电路。故

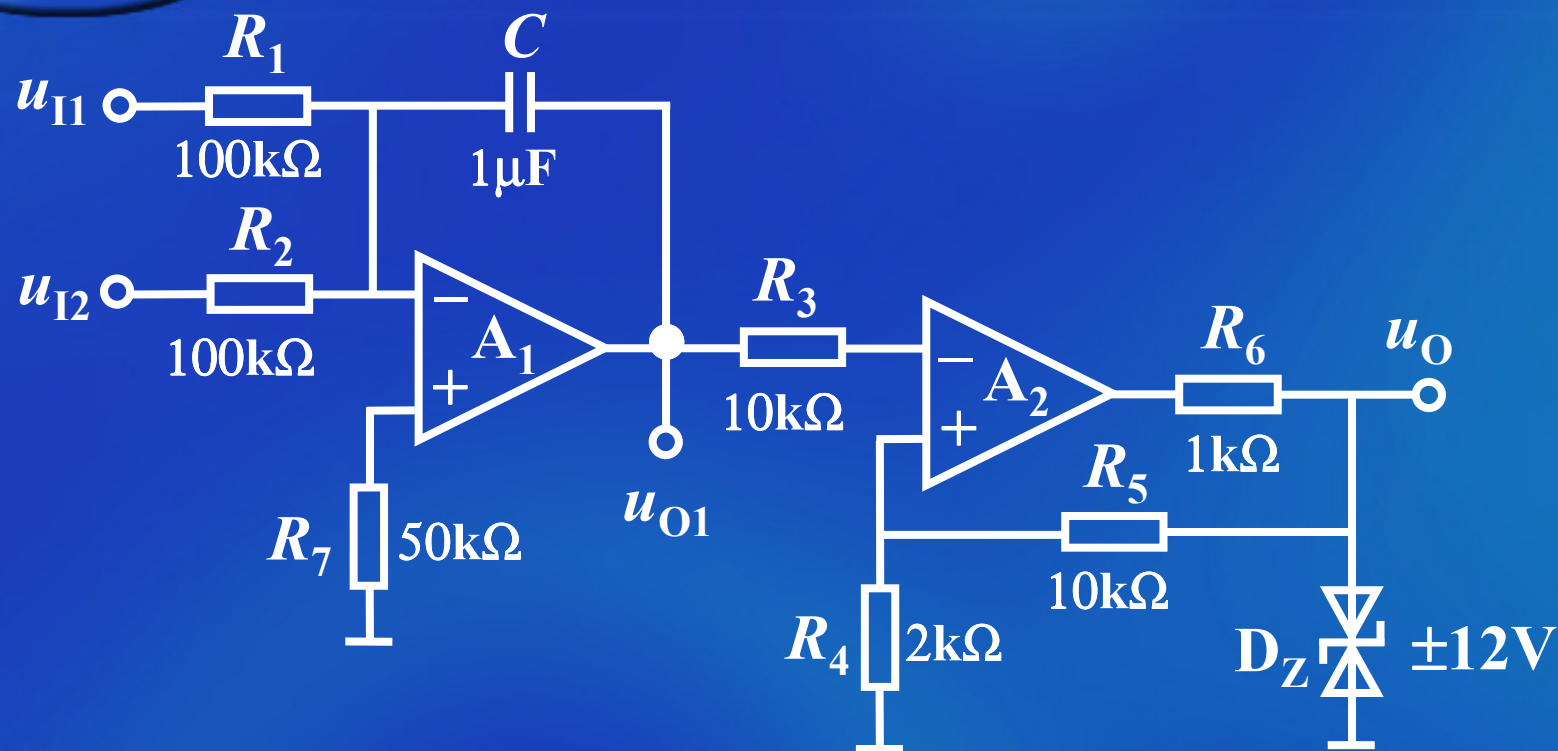
$$u_{O1} = -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^t u_{I1} dt - \frac{1}{R_2 C} \int_{-\infty}^t u_{I2} dt$$

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



(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

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



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

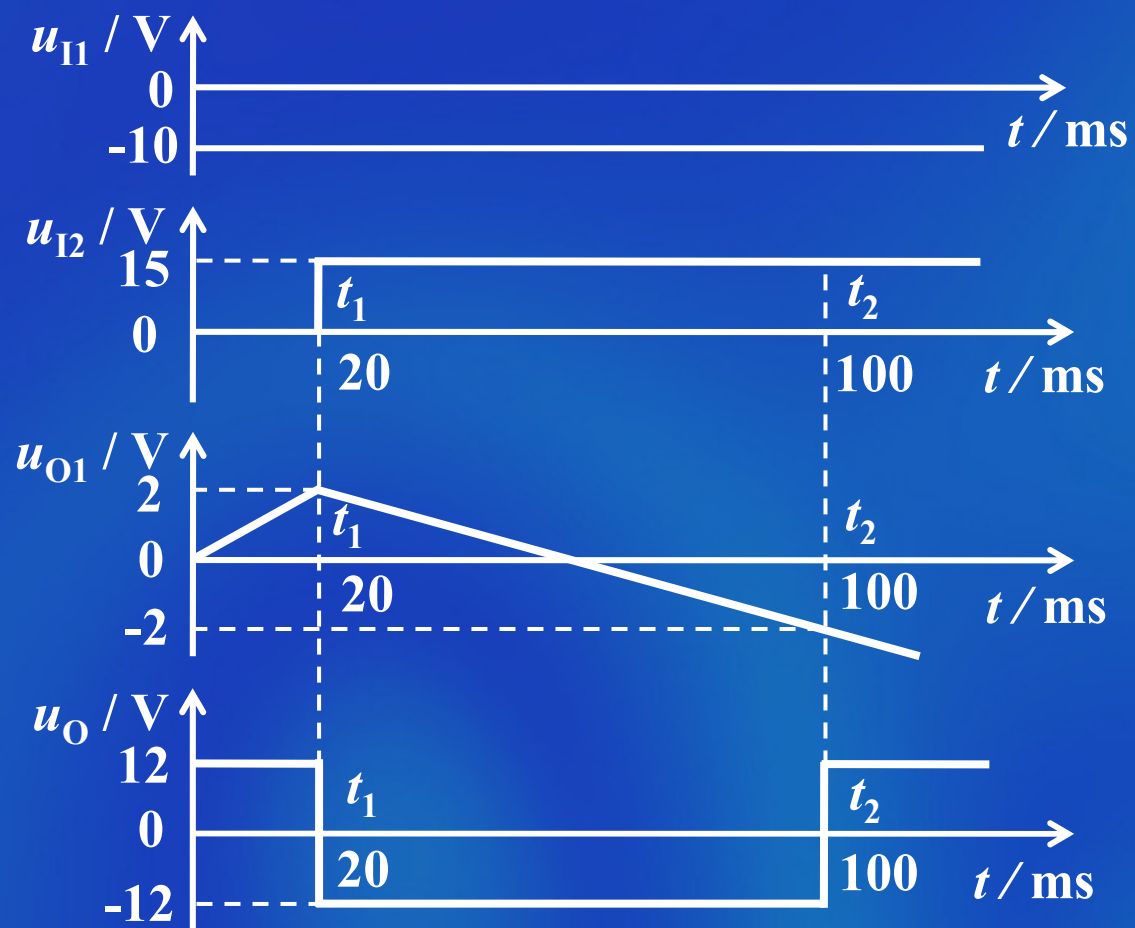
令  $u_{O1}(t_2) = -10 \int_{t_1}^{t_2} (u_{I1} + u_{I2}) dt + u_{O1}(t_1) = -2V$

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

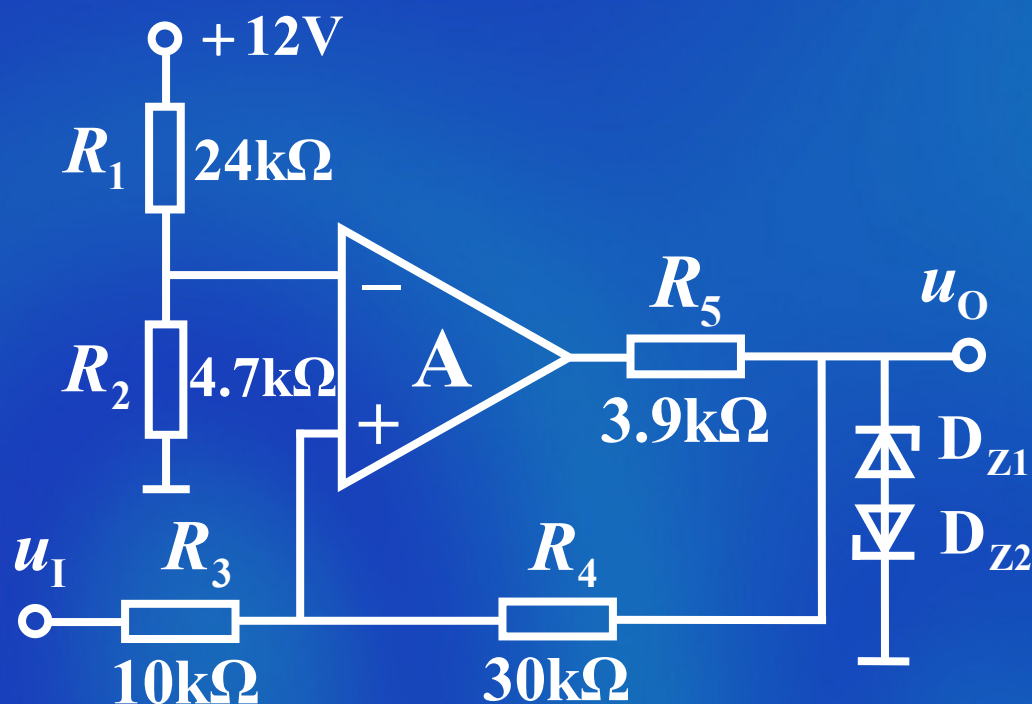
解得  $t_2 - t_1 = 80ms$

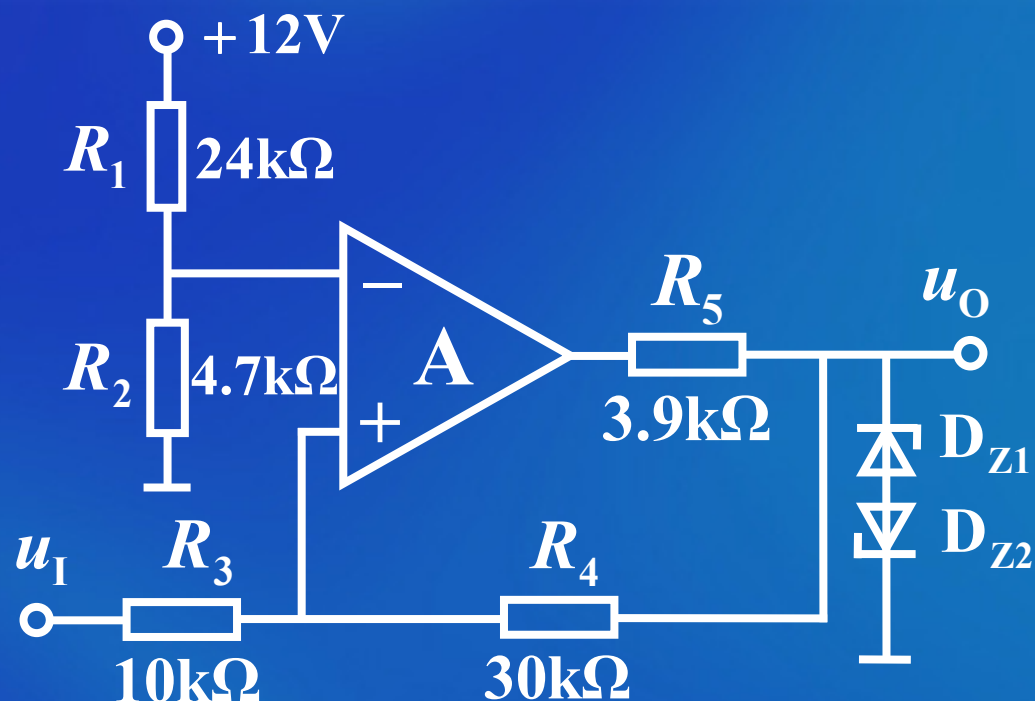


# (4) $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$ 、 $u_{O1}$ 与 $u_O$ 的波形图



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

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

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

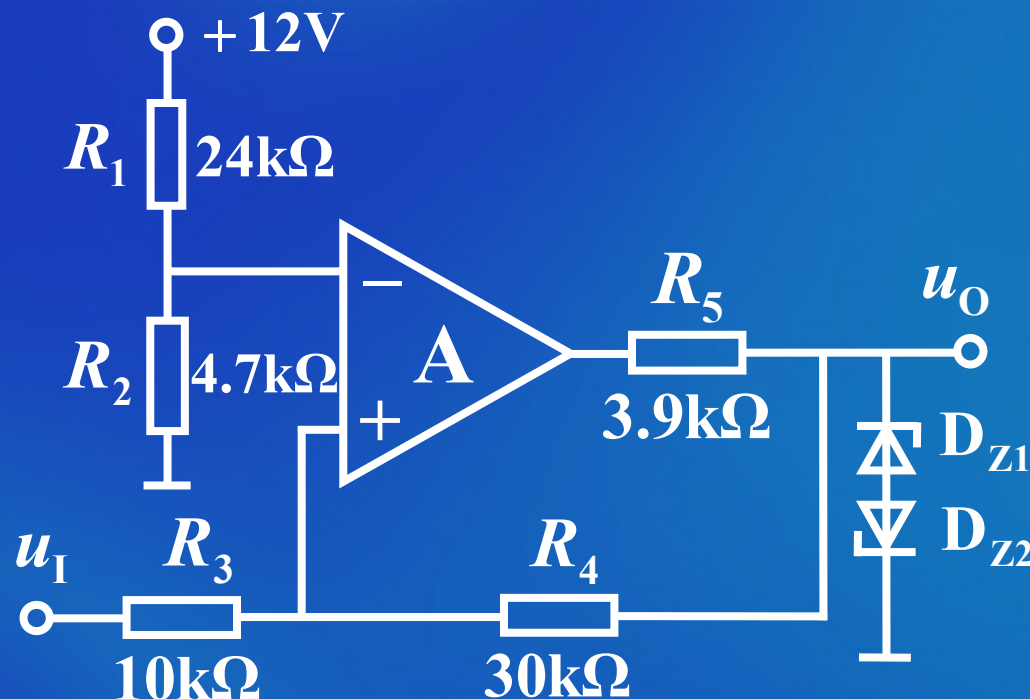
## (b) 运放反相输入端电压

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

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 $U_{omin}$ ；

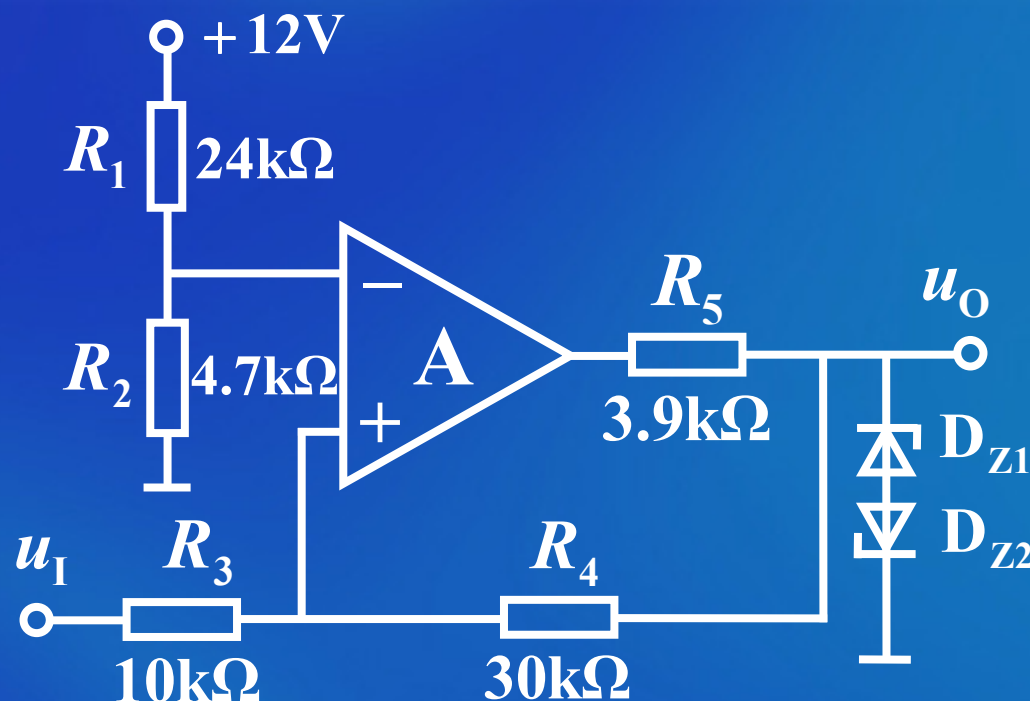


当同相输入端的电压  $u_+$  略高于  $U_R$  时，比较器翻转，输出电压  $u_O$  为  $U_{omax}$ 。

设此时的输入电压为  $U_H$

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

$$U_H = 5.3V$$





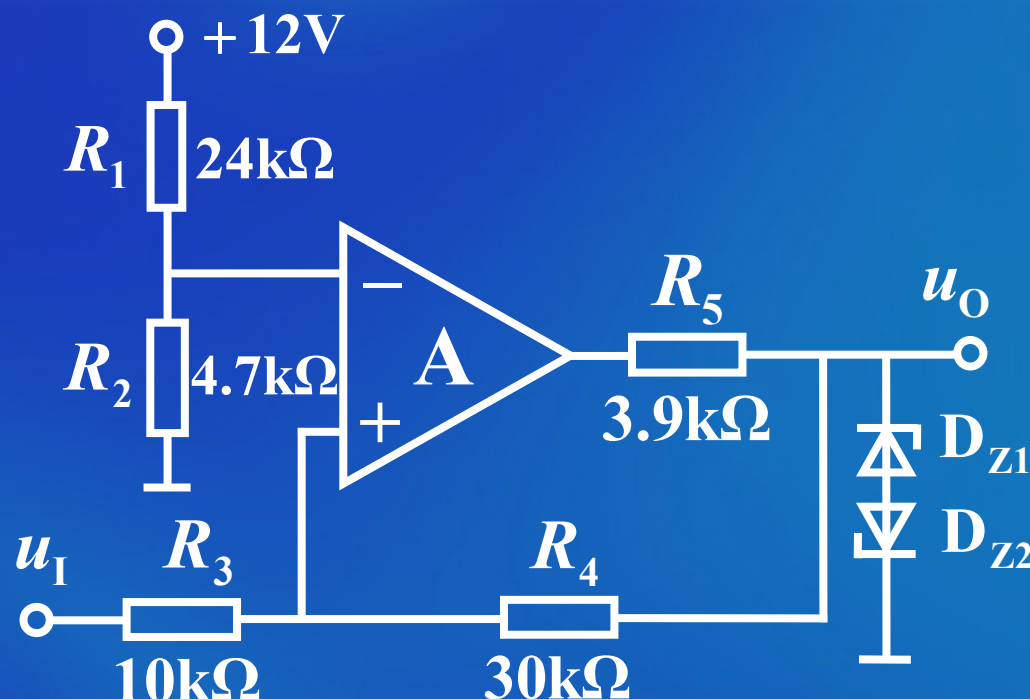
当  $u_I$  由 +6V 向 -6V 方向变化时，如果  $u_+$  高于  $U_R$ ，输出电压  $u_O$  为  $U_{omax}$ ；

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  $U_L$

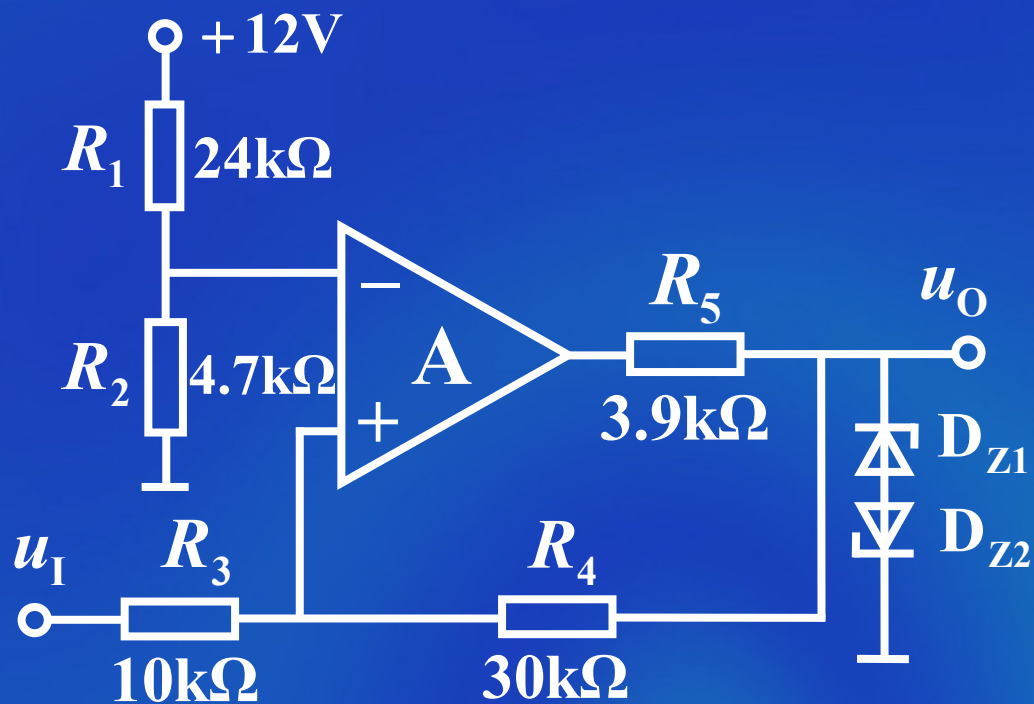
$$\text{由 } u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_L + \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{omax} = U_R \text{ 得}$$

$$U_L = 1.3V$$





由此可画出电路的传输特性



传输特性

