

电路与电子技术基础

第六章 集成运算放大器

宋雪萌

songxuемeng@sdu.edu.cn

目录

- 6.1 集成运算放大器的特点
- 6.2 常用模拟信号放大、运算电路
- 6.3 有源滤波器
- 6.4 电压比较器
- 6.5 脉冲振荡电路

目录

6.1 集成运算放大器的特点

6.2 常用模拟信号放大、运算电路

~~6.3 有源滤波器~~

6.4 电压比较器

~~6.5 脉冲振荡电路~~

运算放大器

运算放大器是一种有着广泛应用的电子器件。最早应用于1940年。1960年后，随着集成电路技术的发展，运算放大器逐步集成化，大大降低了成本，获得更广泛的应用。

将整个运算放大器制成在一个小硅片上，就成为**集成运算放大器**，简称**集成运放**或**运放**。

优点：集成运放性能稳定、可靠性高、寿命长、体积小、重量轻、耗电量少等。

运算放大器

用途：主要用于高精度的小信号放大处理。一般可处理直流到几十Mhz的信号，幅度不超过十几伏，电流不超过十几毫安。

运算放大器不适合高电压、大电流或频率很高的场合。

信号的运算电路 → 比例、加、减、对数、指数、积分、微分等运算。

信号的处理电路 → 有源滤波器、精密整流电路、电压比较器，采样、放大、振荡、调制、解调。

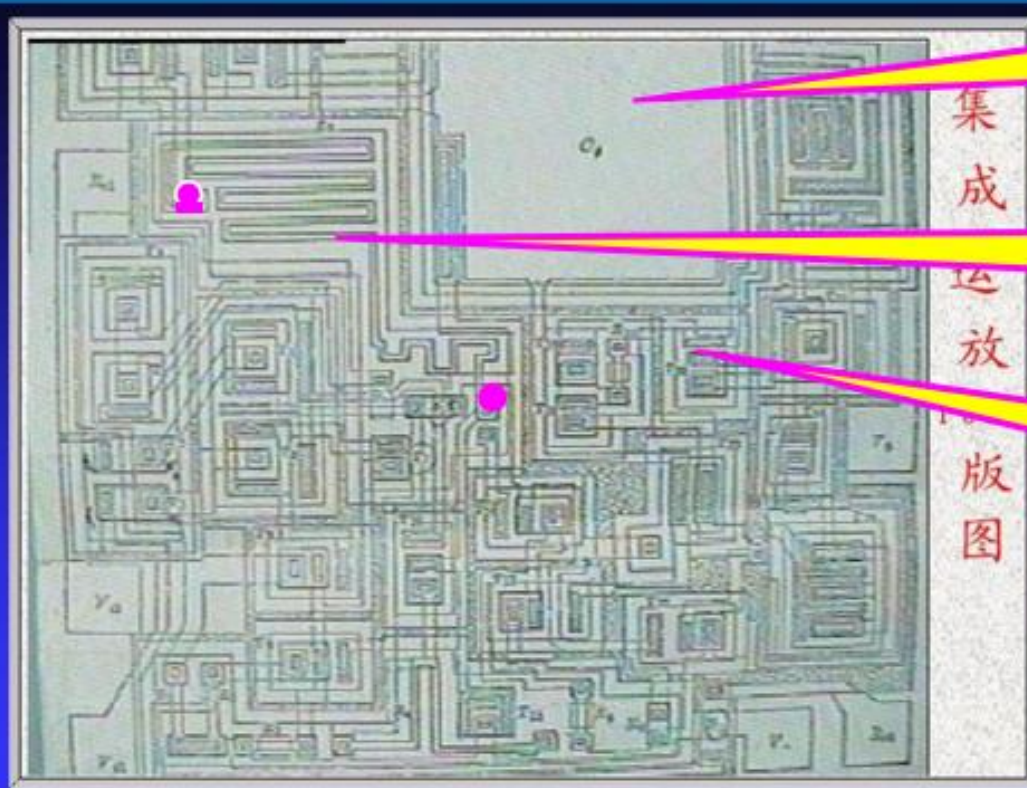
信号的发生电路 → 产生方波、锯齿波等波形。

集成运放特点

- 集成运放是一种**直接耦合**的多级放大器，放大倍数高达 10^4 以上，具有以下特性：
 - 可放大交流信号，也可以放大直流信号
 - 差动输入，有两个输入端，利用对称性，**有效抑制温漂和零漂**
 - **零点漂移**：由于晶体管特性易受温度影响和电源电压不稳定等因素的存在，使得直接耦合放大器的输入信号为零时，输出端也会有缓慢变化的电压输出的现象。
 - **抑制原理**：由于电路**结构对称**，元件参数和特性相同，因而温度变化时，对电压产生相同的变化，从而有效地抑制了温漂和零点漂移。
 - 尽可能用有源器件代替无源器件

有源负载代替无源负载

在集成电路中,晶体管所占硅片面积远小于电阻电容所占硅片面积,所以尽量少做电阻电容,多做管子。

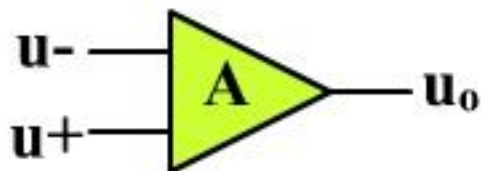


F007密勒补偿电容
(30PF)占的硅片面积

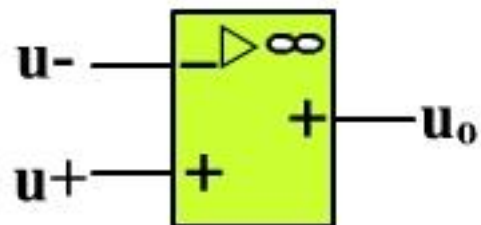
39K电阻占的
硅片面积

一个晶体管占
的硅片面积

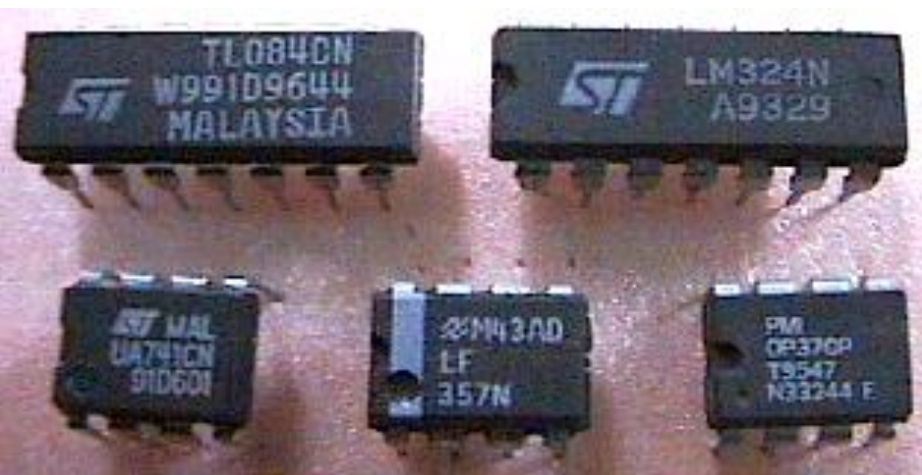
集成运放的符号



习惯符号



国际标准符号



集成运放的符号

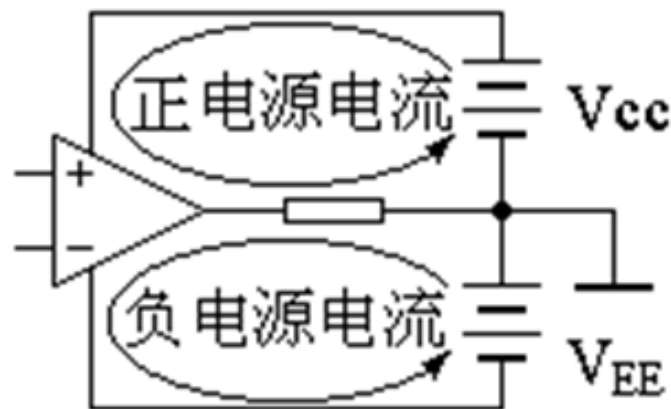
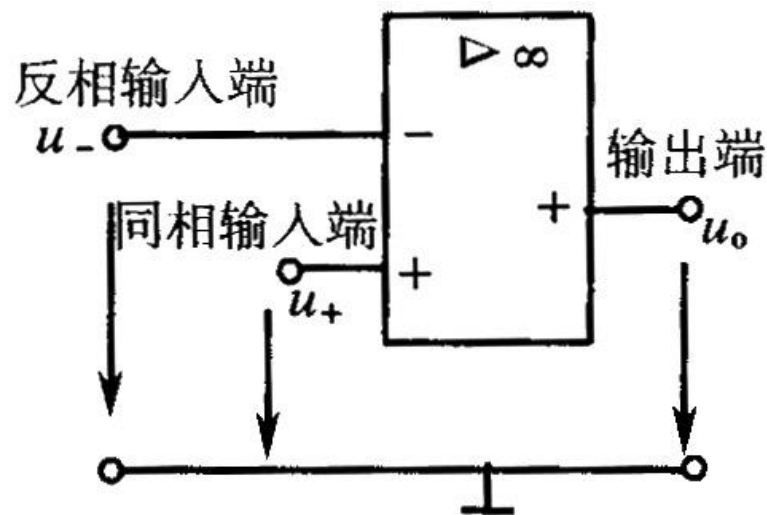
集成运放有两个输入端和一个输出端。反相输入端标“-”号，同相输入端标“+”号。

$$V_o = A_0 (V_{i+} - V_{i-})$$

开环差模电压增益，一般 A_0 非常大，几万倍以上。

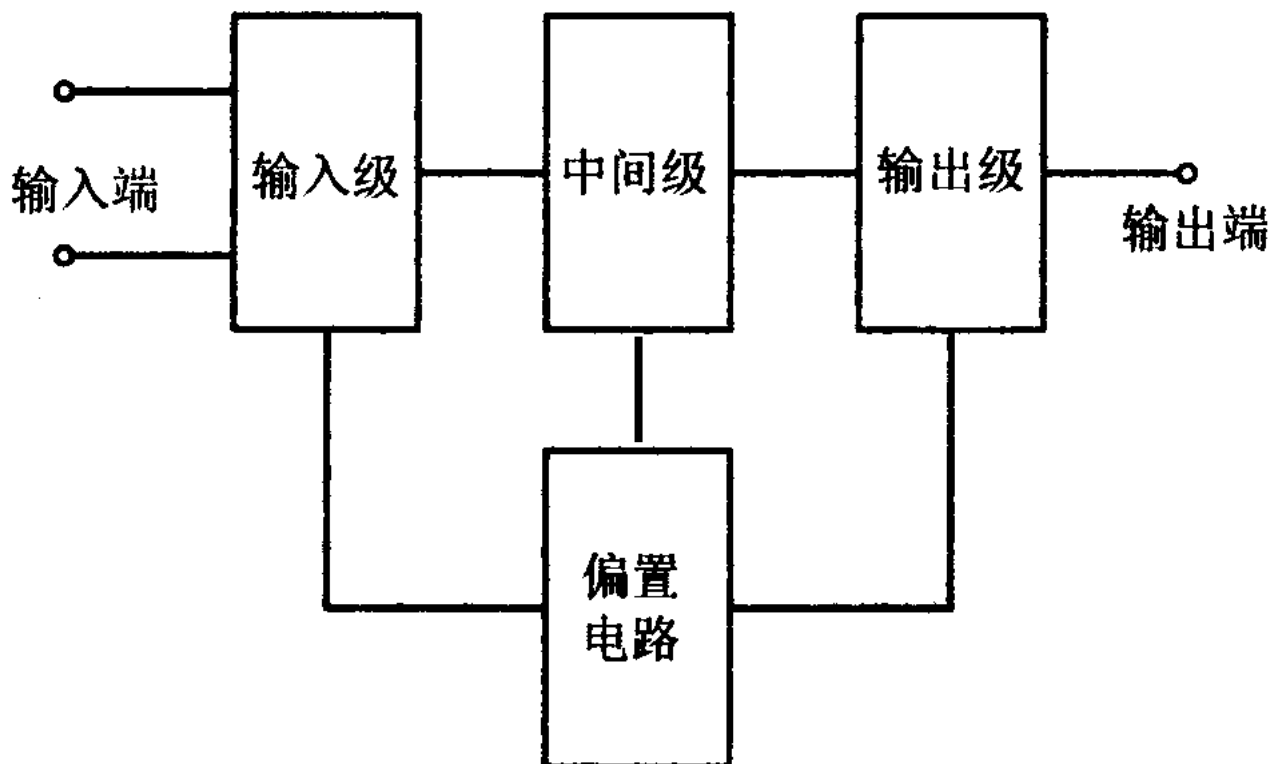
输出电压与反相输入电压相位相反，与同相输入电压相位相同。

此外还有两个端分别接正、负电源供电。有些集成运放还有调零端和相位补偿端。电路中不画出。

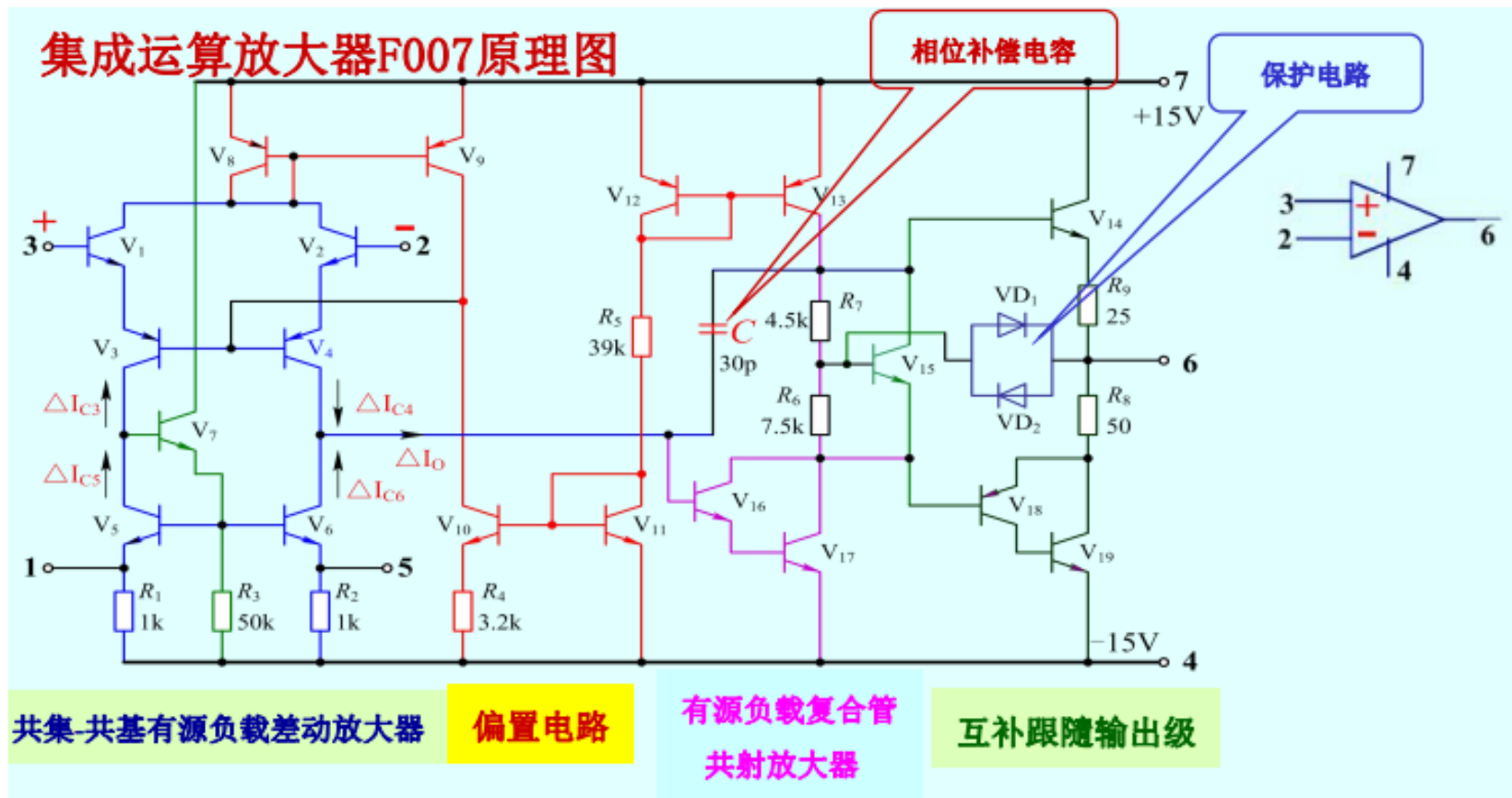


集成运算放大器组成

集成运放通常由**输入放大级**、**中间电压放大级**、**输出级**以及**偏置电路**等四部分组成。

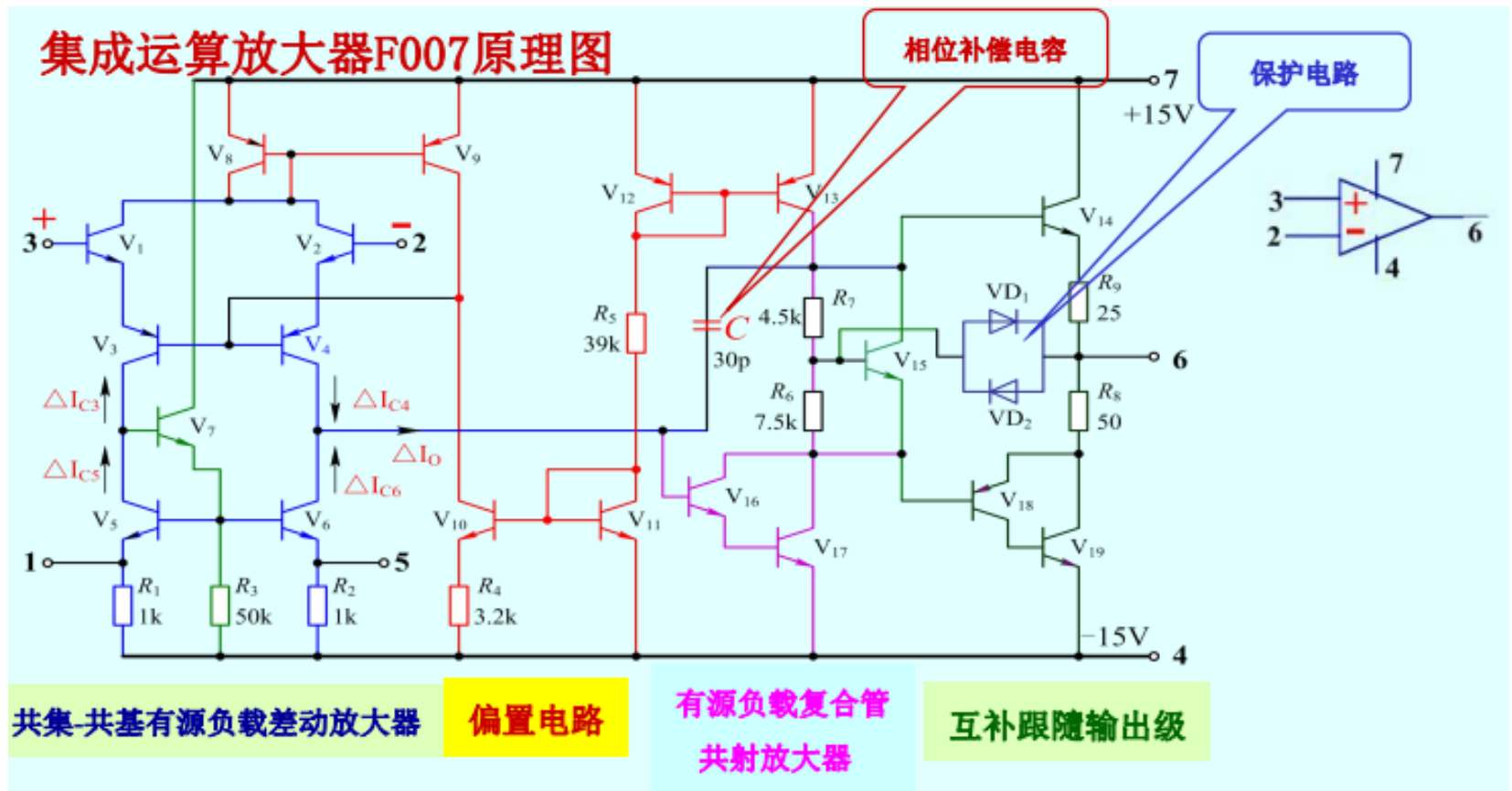


集成运放举例



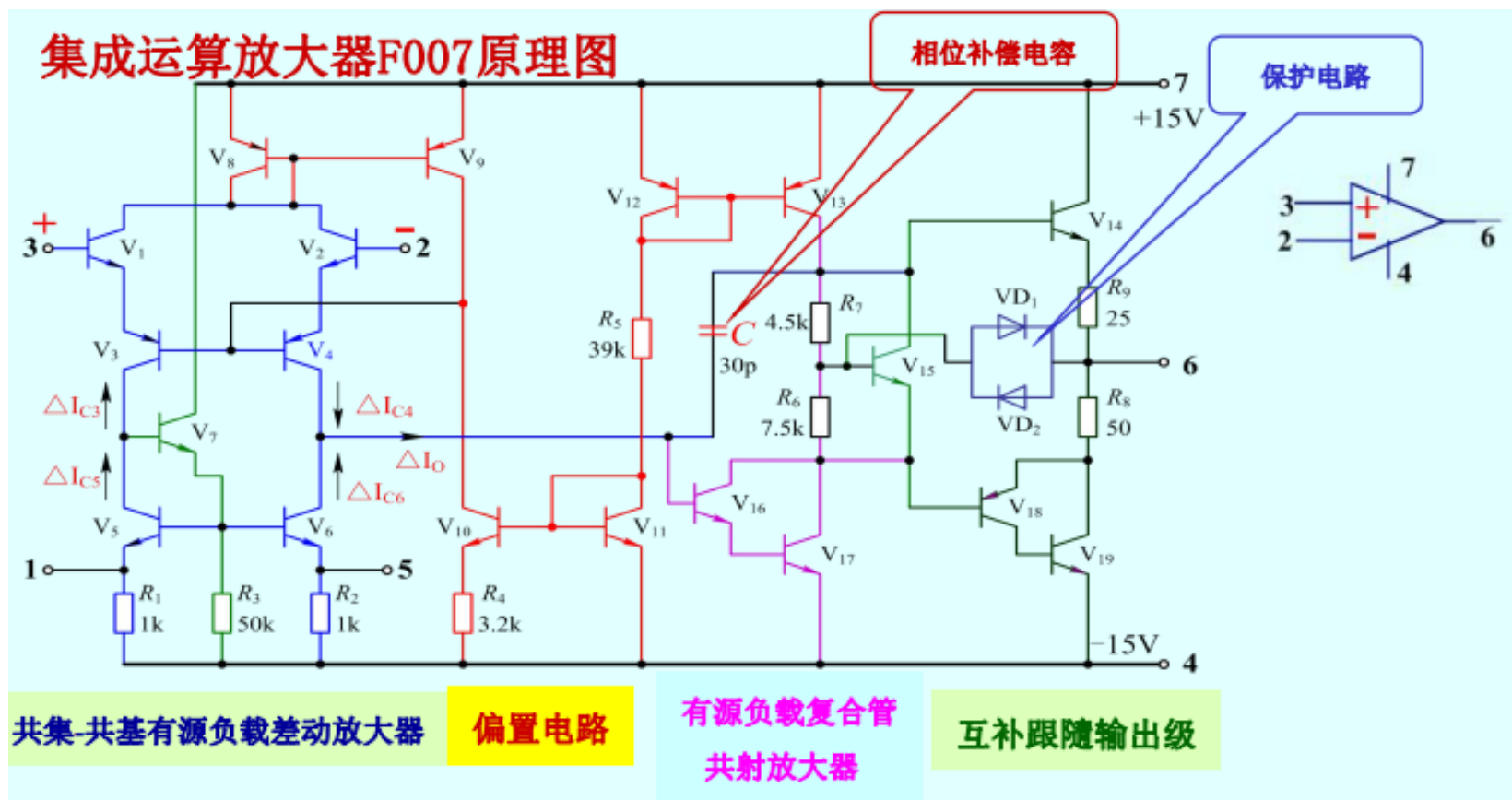
集成运放通常由**输入放大级**、**中间电压放大级**、**输出级**以及**偏置电路**等四部分组成。

集成运放举例



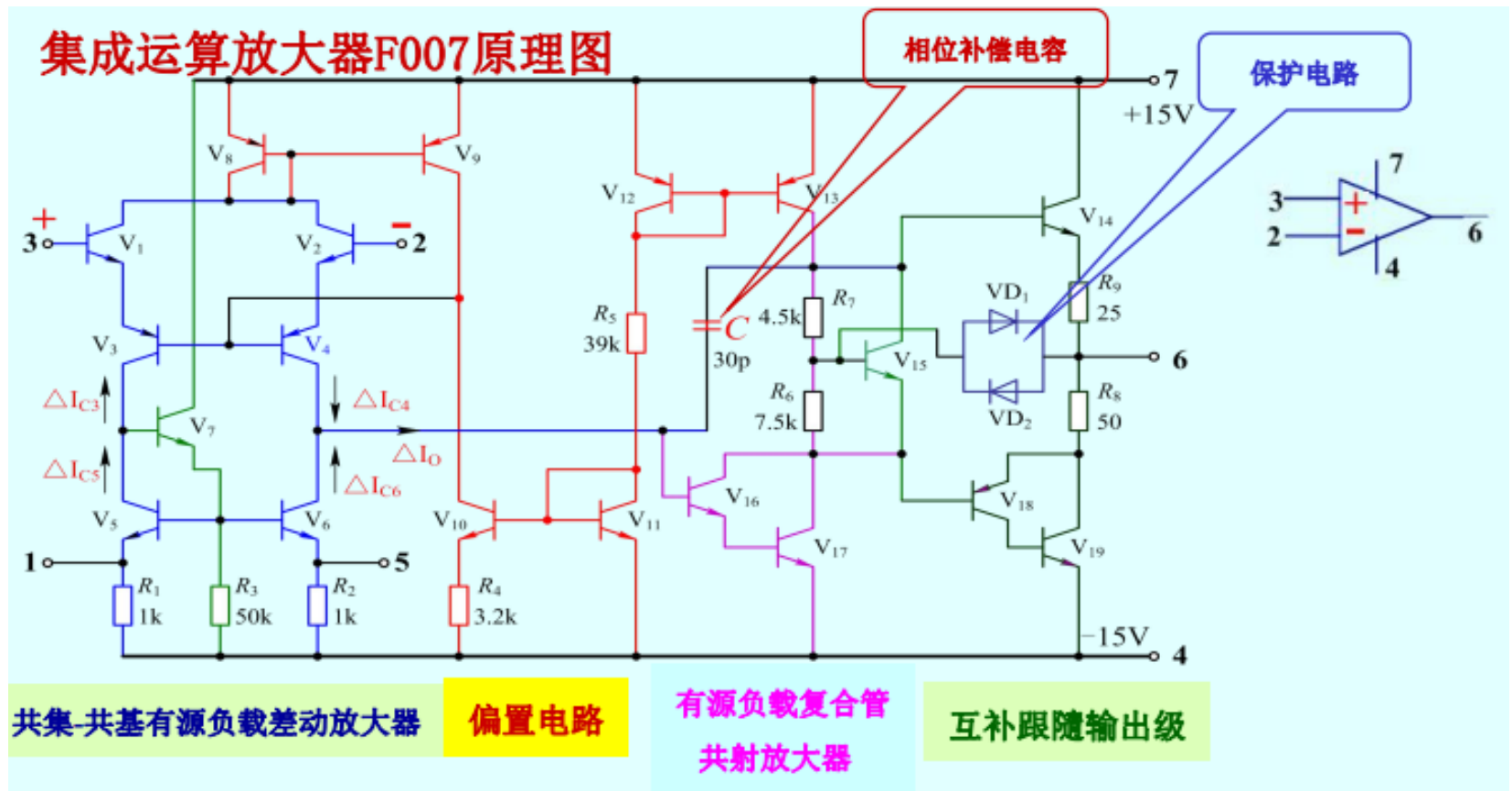
输入级采用差动放大电路，要求输入阻抗高、零点漂移小、抗共模干扰能力强；

集成运放举例



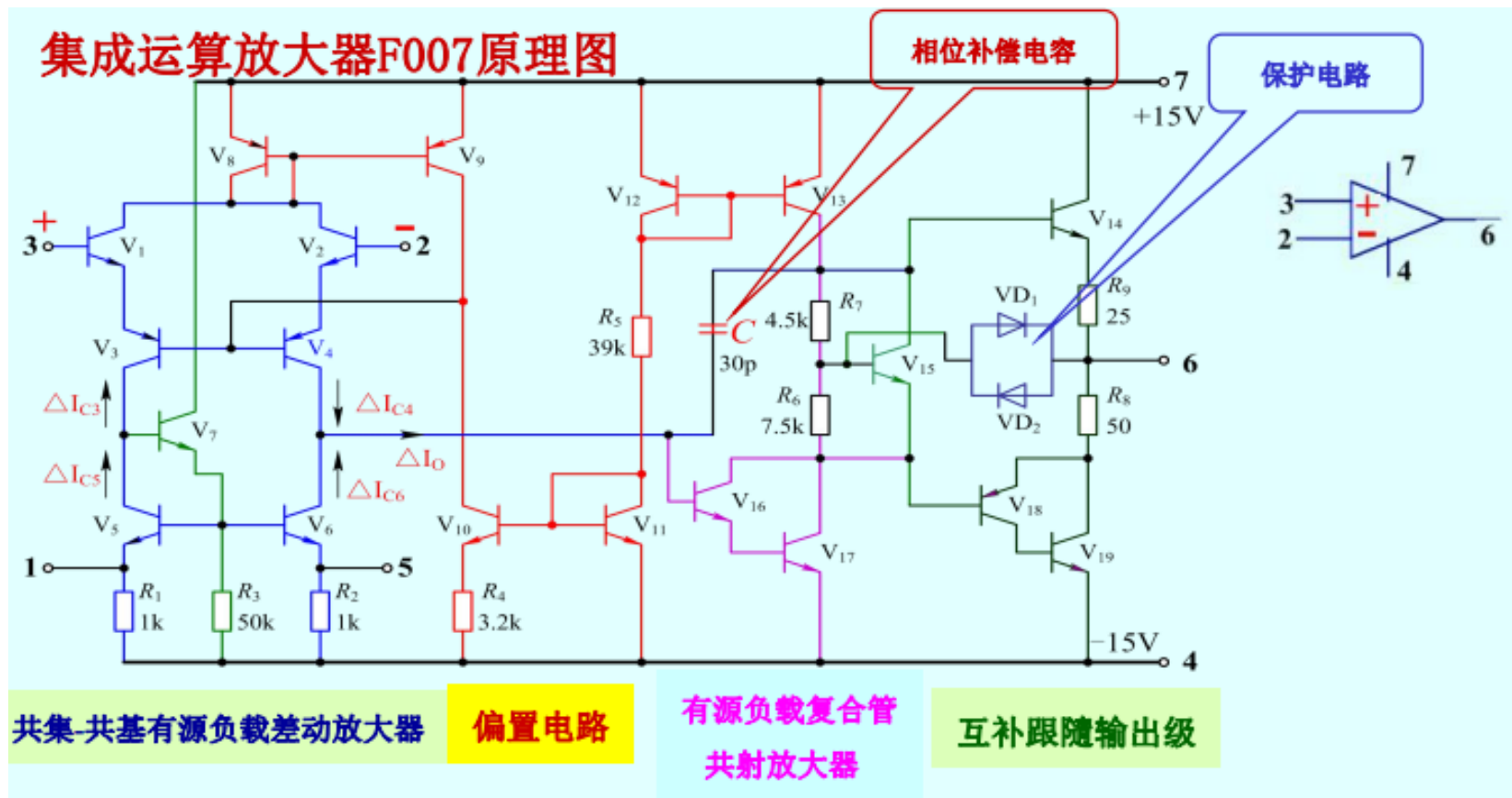
偏置电路一般由**恒流源电路**构成，给上述各级电路提供稳定和合适的偏置电流，决定各级的静态工作点。

集成运放举例



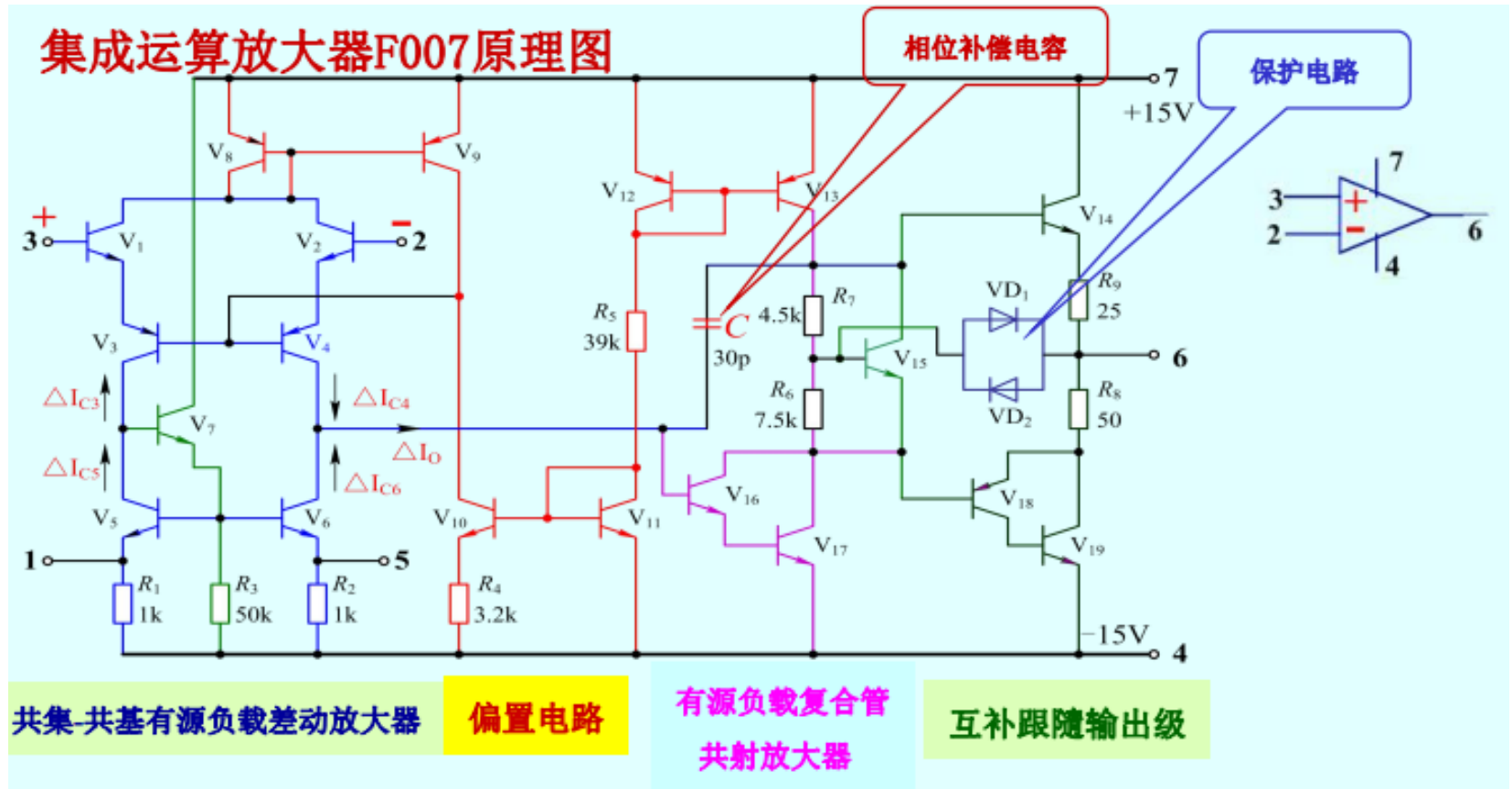
中间级一般由**共发射极放大电路**构成，输入电阻大，主要用于高增益的电压放大；

集成运放举例



输出级与负载相接，要求输出阻抗低、带负载能力强（采用互补对称跟随推挽电路）；

集成运放举例



此外，电路还备有过流保护电路。

集成运放的问题

集成运放是一种高增益的直接耦合放大器。存在的问题：

- 零点漂移问题

- 零点漂移现象是由于晶体管特性易受温度影响和电源电压不稳定等因素的存在，使得直接耦合放大器的输入信号为零时，输出端也会有缓慢变化的电压输出的现象。
- 解决办法：差分放大电路

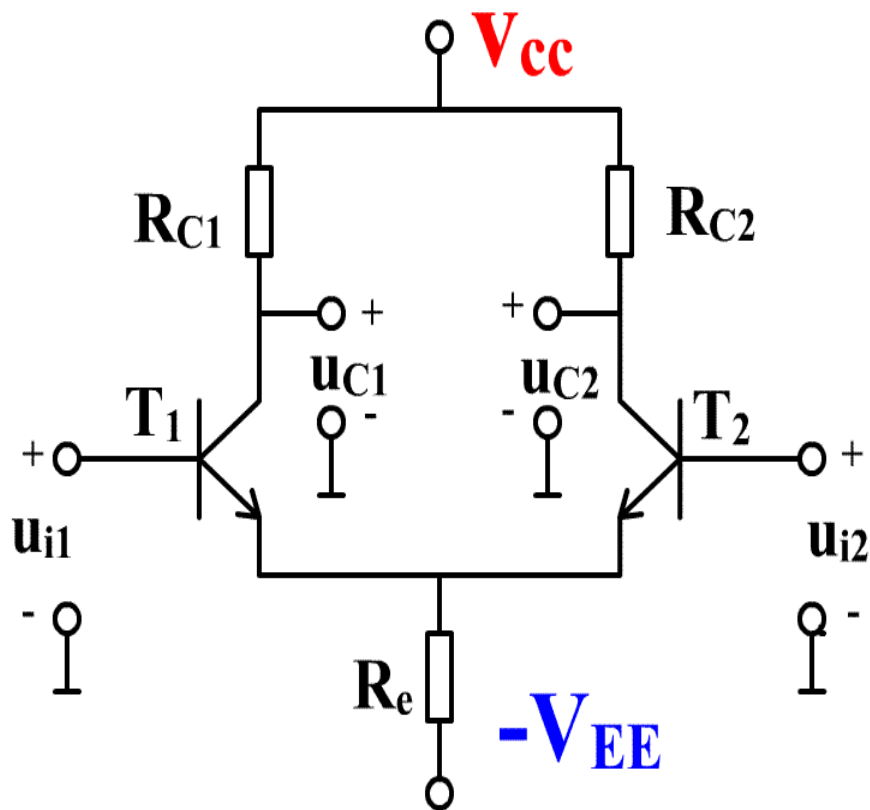
差分放大电路

差分放大电路是由**对称**的两个基本放大电路，通过射极公共电阻耦合构成的。

对称的含义是两个三极管的**特性一致，电路参数对应相等**。

当 $u_{i1}=u_{i2}$ 时， $v_{o1}=u_{c1}-u_{c2}=0$ ；

抑制原理：由于电路**结构对称**，元件参数和特性相同，因而温度变化时 U_{C1Q} 、 U_{C2Q} 始终相等，使 $U_{OQ}=0$ ，从而有效地抑制了温漂和零点漂移。



差分放大电路

由于是线性电路，任意输入信号， u_{i1}, u_{i2} 可分解为两种信号输入情况，即共模信号输入和差模信号输入。

定义输入 u_{i1}, u_{i2} 中相同部分为共模信号 u_c 不同部分为差模信号 u_d

$$u_{i1} = u_c + u_d$$

$$u_{i2} = u_c - u_d$$

$$u_c = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{i1} - u_{i2})$$

$$u_{i1} = u_c + u_d$$

$$u_{i2} = u_c - u_d$$

差模与共模信号

- 在差动放大电路中，两个输入端分别输入**大小相等、相位相反**的信号，把这种信号叫做差模信号，这时的放大倍数叫做**差模增益**。

$$A_d = \frac{u_{od}}{u_d}$$

- 两个输入端分别输入**大小相等，相位相同**的信号，（这实际是上一级由于温度变化而产生的信号，是有害的东西），这种信号叫做**共模信号**，这时的放大倍数叫做**共模增益**。
- 由于差动放大电路的构成特点，电路对共模信号有很强的负反馈，所以共模放大倍数很小。（一般小于1）

$$A_c = \frac{u_{oc}}{u_c}$$

集成运放的主要性能技术指标

1. 输入失调电压 U_{is}

- 对于理想集成运放，当输入电压为零时，输出电压应该为零。但由于制造工艺等原因，实际的集成运放在输入电压为零时，输出电压常不为零（零漂）。

$$U_o = A_0 (U_{i+} - U_{i-} + U_{is})$$

- 为了使输出电压为零，需在输入端加一适当的直流补偿电压，这个输入电压叫做输入失调电压 U_{is} ，其值等于输入电压为零时，输出的电压折算到输入端的电压值。
- U_{is} 一般为毫伏级，它的大小反映了差动输入级的对称程度，失调电压越大，集成运放的对称性越差。

集成运放的主要性能技术指标

2. 输入失调电流 I_{is}

输入失调电流是指输入信号为零时，两个输入端静态电流 I_+ 与 I_- 之差，一般为输入静态偏置电流的十分之一左右。

I_{is} 是由差动输入级两个晶体管的 β 值不一致所引起的。

集成运放的主要性能技术指标

3. 开环电压增益 A_o

开环电压增益是指集成运放在无外接反馈电路时的差模电压放大倍数。反映运放对两个输入端电压差的放大能力。也可用 A_o 的常用对数表示。

一般运放的电压增益都很大，为60—100dB，高增益运放可达140dB(即 10^7)。若运放工作于线性状态，则有：

$$V_o = A_o (V_{i+} - V_{i-}) = A_o \Delta V_i$$

其中 $\Delta V_i = V_{i+} - V_{i-}$ 为运放的差模输入；由于运放的输出电压只能在正负电源的电压之间，一般为 $\pm 5V$ —— $\pm 15V$ 之间，所以，线性工作时，允许的差模输入电压很小，只有毫伏级

集成运放的主要性能技术指标

4. 输入阻抗 r_i 和输出阻抗 r_o 。

输入阻抗 r_i 是指运放开环运用时，从两个输入端看进去的动态阻抗，它等于两个输入端之间的电压 U_i 变化与其引起的输入电流 I_i 的变化之比，即 $r_i = \Delta U_i / \Delta I_i$ ， r_i 越大越好。

输出阻抗 r_o 是指运放开环运用时，从输出端与地端看进去的动态阻抗。一般在几百欧姆之内。

集成运放的主要性能技术指标

5. 共模抑制比CMRR

通常要求差动放大电路有较高的差模增益和很小的共模增益，为此引入共模抑制比 $CMRR$ 。

$$CMRR = 20lg \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

共模抑制比是指集成运放开环运用时，差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比。**CMRR值越大，抗共模干扰能力越强**，一般集成运放的CMRR都可达到80dB，高质量的集成运放可达100dB以上。

集成运放的主要性能技术指标

6. 运放输入偏置电流 I_B

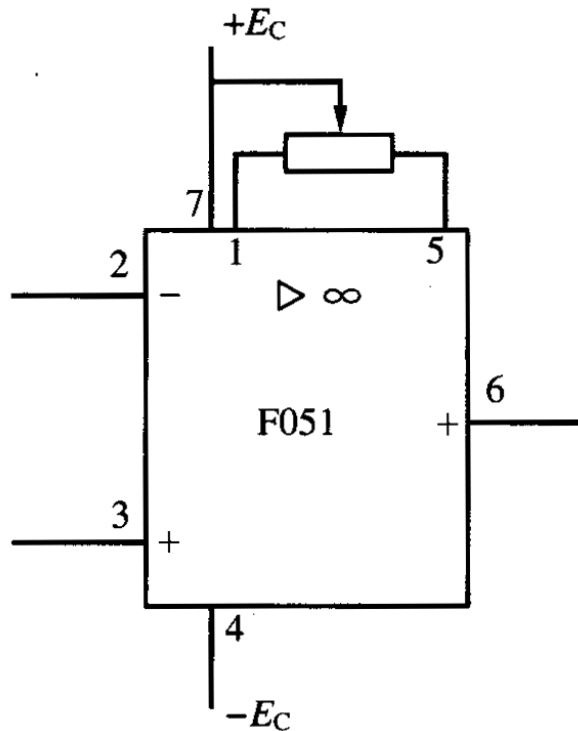
偏置电流就是第一级放大器输入晶体管的基极直流电流。保证放大器工作在线性范围，为放大器提供直流工作点。

其他指标：

转换速率是指放大器在闭环状态下，输入放大信号时，放大器输出电压对时间的最大变化速率。表示大信号时运算放大器的**响应速度**。

静态功耗是指没有输入信号时的功耗，通常约为数十毫瓦，有些低耗运放，静态功耗可低到0.1mW以下，这个指标对于便携式或植入式医学仪器是很重要的。

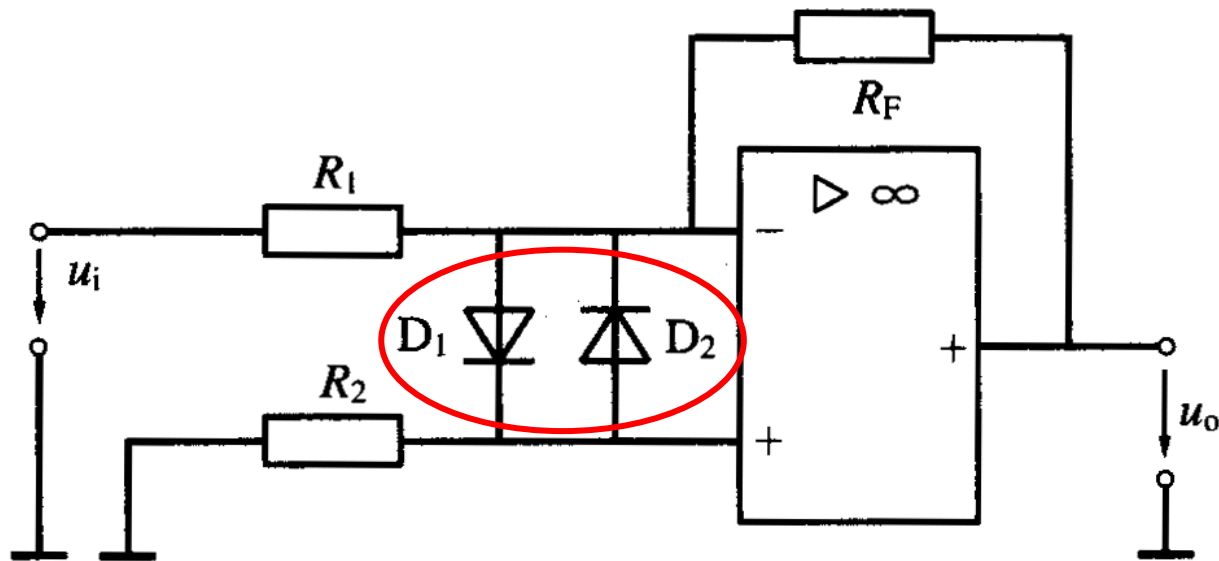
集成运放的注意问题



1. 调零

实际运算放大器，当输入为零时输出并不为零，采用调零技术可使输入为零时输出也为零。

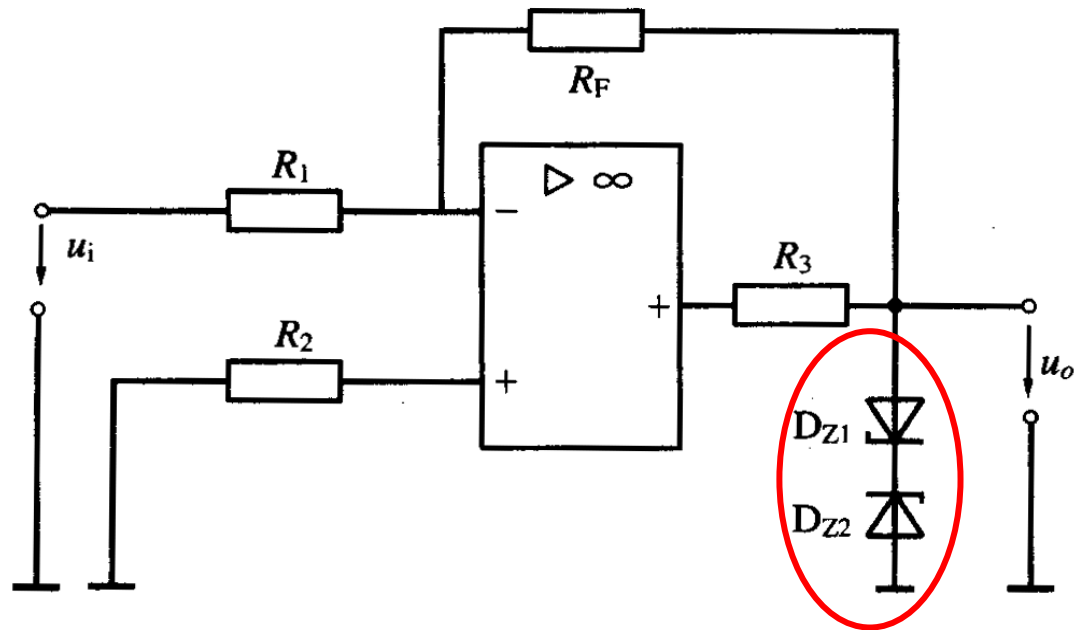
集成运放的注意问题



2. 保护

①输入端保护是当输入端所加的电压过高时会损坏输入级的晶体管。在输入端处接入两个反向并联的二极管，将输入电压限制在二极管的正向压降以下；

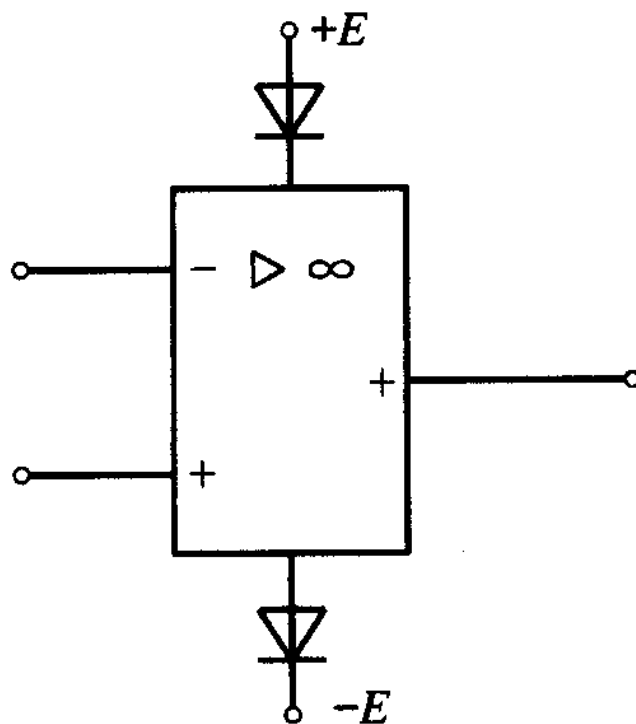
集成运放的注意问题



2. 保护

②输出端保护：为防止输出电压过大，可利用稳压管保护。将两个稳压管反向串联，将输出电压限制一定范围内 $\pm(U_Z + U_D)$ ，其中 U_Z 是稳压管的稳定电压， U_D 是正向管压降；

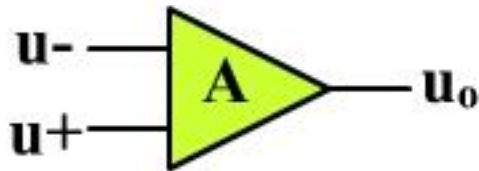
集成运放的注意问题



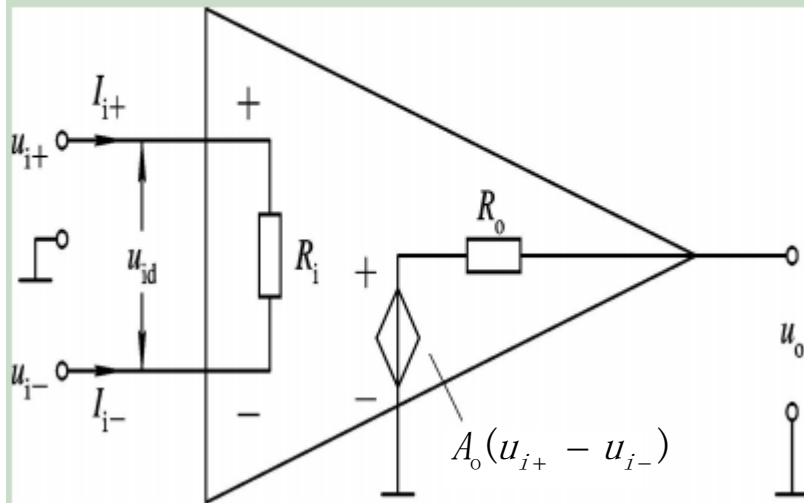
2. 保护

③电源保护。 为防止正、负电源接反，可用二极管进行保护。

集成运放的受控源模型



1. 运算放大器的受控源模型



相当于电压控制电压源(VCVS)

R_i ---运放输入电阻;

R_o ---运放输出电阻(受控源内阻)

u_{i+} ---运放同相端输入电压;

u_{i-} ---运放反相端输入电压;

u_{id} ---运放差模输入电压;

受控源电势:

$$u_o = A_o(u_{i+} - u_{i-}) = A_o u_{id}$$

理想运算放大器

将集成运放看成理想运算放大器，可以简化分析。

理想运算放大器应当满足以下各项条件：

开环差模电压放大倍数 $A_o = \infty$;

差模输入电阻 $r_{id} = \infty$;

输出电阻 $r_o = 0$;

带宽 $BW \rightarrow \infty$;

转换速率 $S_R \rightarrow \infty$;

共模抑制比 $CMRR \rightarrow \infty$.

无干扰和噪声，输入偏置电流，无温漂，失调电流均为0.

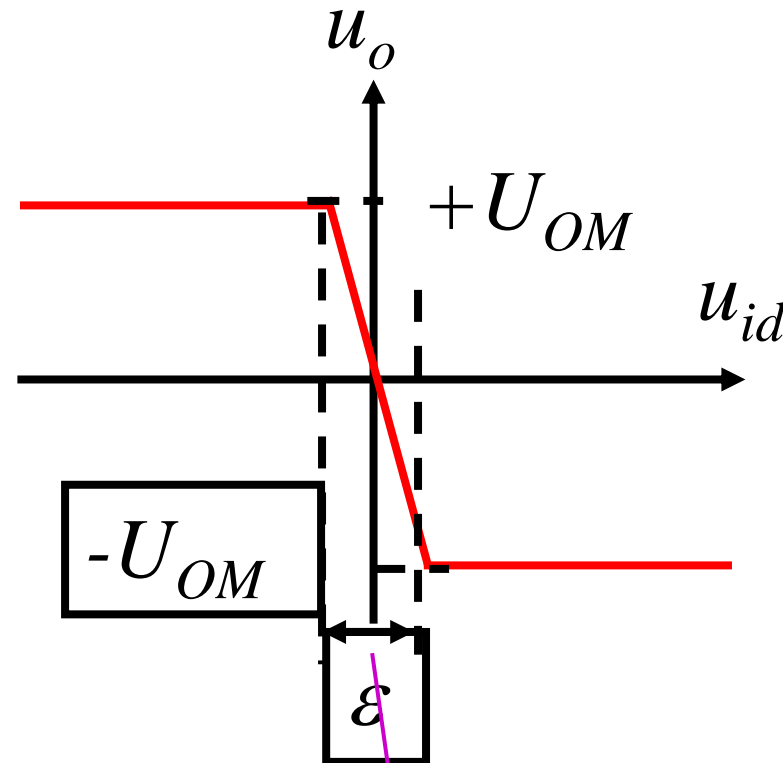
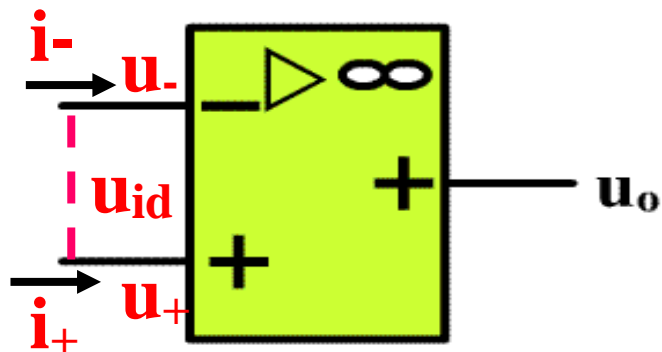
理想运算放大器传输特性

传输特性： 输出电压与输入电压之间的特性曲线

线性区

由于 $A_{uo}=\infty$, 输出电压为有限值,
所以 $u_{id}=u_- - u_+ = u_o / A_{uo} \approx 0$, 即

$u_- = u_+$ 称为“虚短”



线性区³³

理想运算放大器传输特性

传输特性： 输出电压与输入电压之间的特性曲线

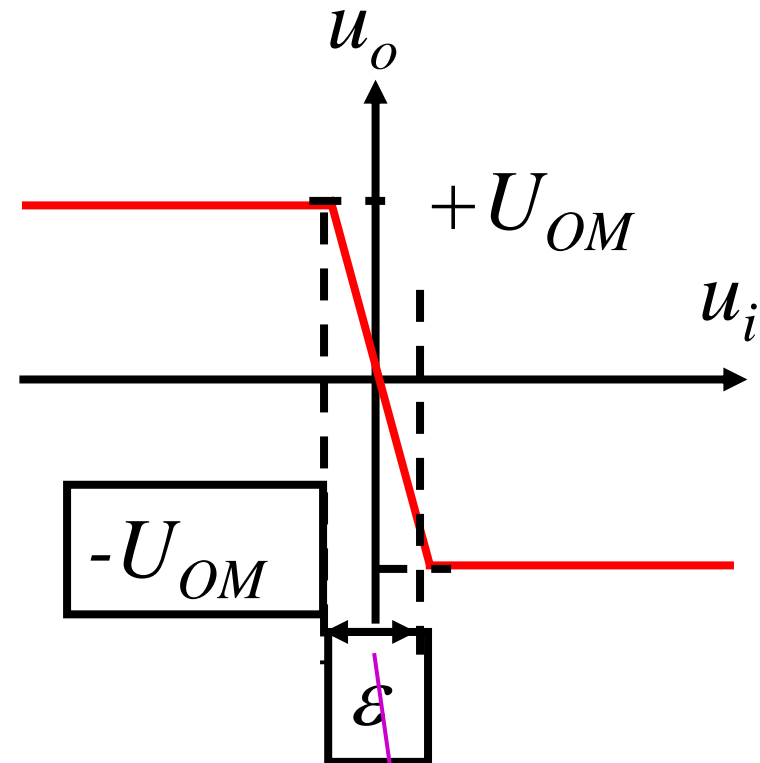
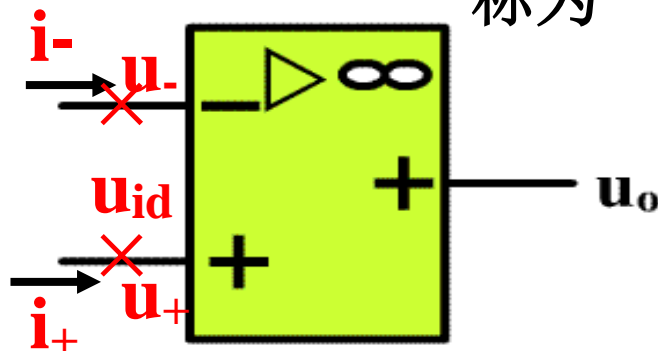
线性区

由于 $A_{uo}=\infty$, 输出电压为有限值,
所以 $u_{id}=u_- - u_+ = u_o / A_{uo} \approx 0$, 即

$u_- = u_+$ 称为“**虚短**”

由于 $r_{id} \rightarrow \infty$, 有 $i_- = i_+ = u_{id} / r_{id} \approx 0$

称为“**虚断**”



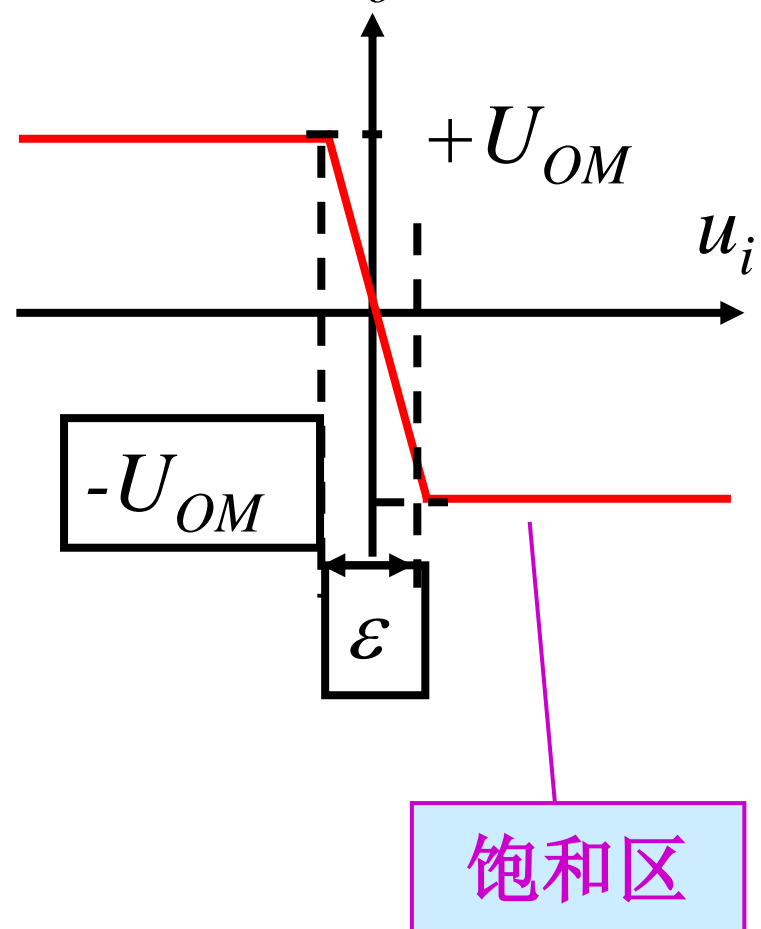
线性区

理想运算放大器传输特性

传输特性： 输出电压与输入电压之间的特性曲线

饱和区

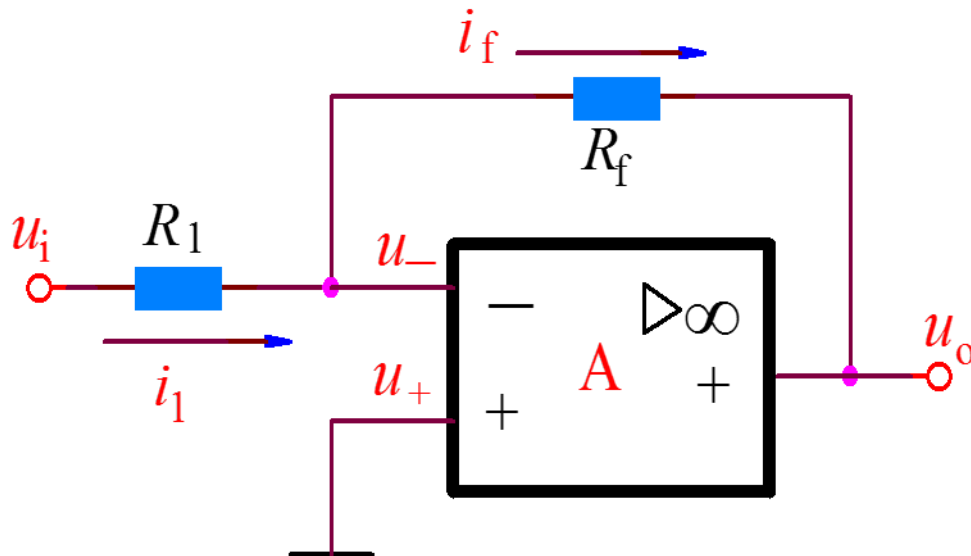
输出电压为运放的正负饱和值 $\pm U_{OM}$ ，该值略低于运放的正负电源的电压值。



理想运放工作在线性区的条件

1、**电路中有负反馈**：即输出经过某种方式接回到**反相输入端**，以保证 $\Delta V_i = 0$ ；（输出返回来削弱输入的作用，即为负反馈，形成闭环）

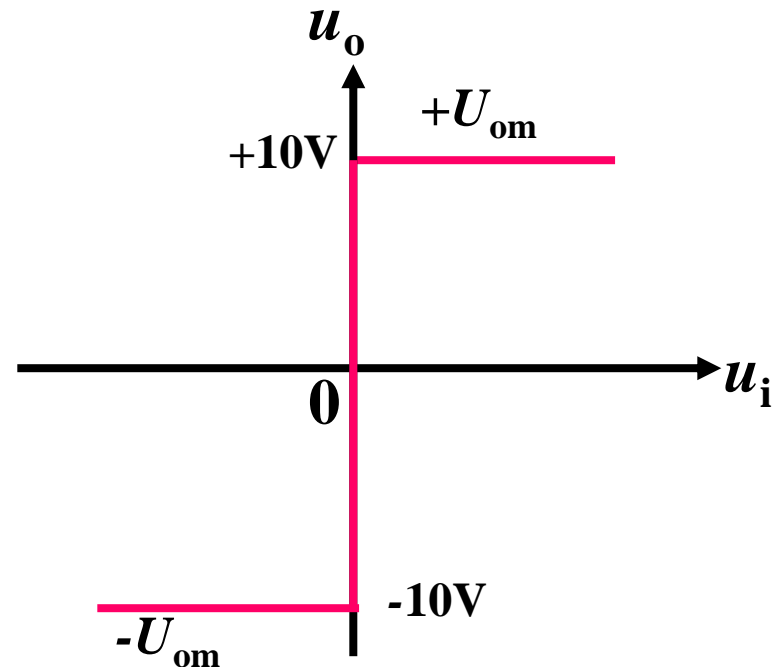
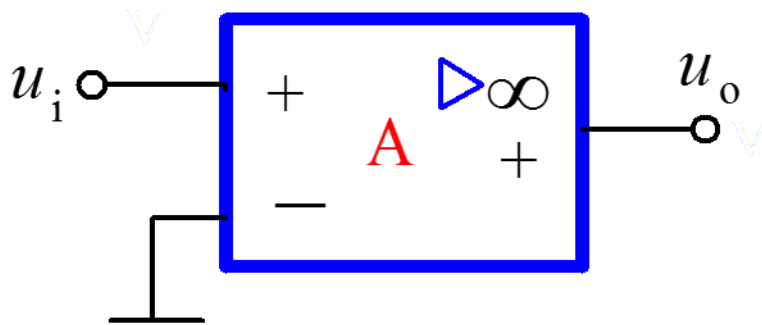
2、**输出电压的幅度不能太大（不高于电源电压）**：运放内部器件由电源供电，其输出不能高于电源电压，若输入信号过大，就使运放饱和而失去线性。



理想运放工作在非线性区的条件

非线性区（正、负饱和状态）

条件：电路开环工作或引入正反馈！



注意

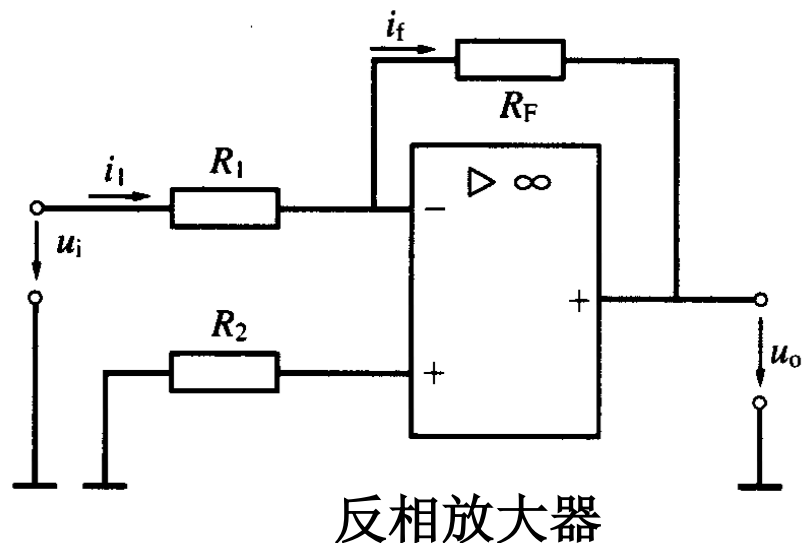
放大、运算都属于线性放大电路。分析这种电路可以采用虚短和虚断。

比较器等非线性放大电路，不能用虚短！

运算放大器的基本应用电路

一. 反相放大器

输入电压 u_i 经电阻 R_1 由反相输入端输入，输出端与反相端之间接一反馈电阻 R_F ，同相输入端与地之间接一平衡电阻 R_2 ，且 $R_2 = R_1 // R_F$ ，以保证运放输入端的对称。



运算放大器的基本应用电路

一. 反相放大器

因 $I_i=0$ ，故 $i_1 \approx i_f$ （虚断）

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1}, i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f}$$
$$\frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

因有 $u_+ \approx u_- = 0$ （虚地），故

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

A_u 为反相放大器的闭环电压放大倍数，**它只与外接电阻 R_1 、 R_F 有关**，与集成运放本身参数无关。

负号表示 u_o 与 u_i 相位相反，所以称**反相放大器**。

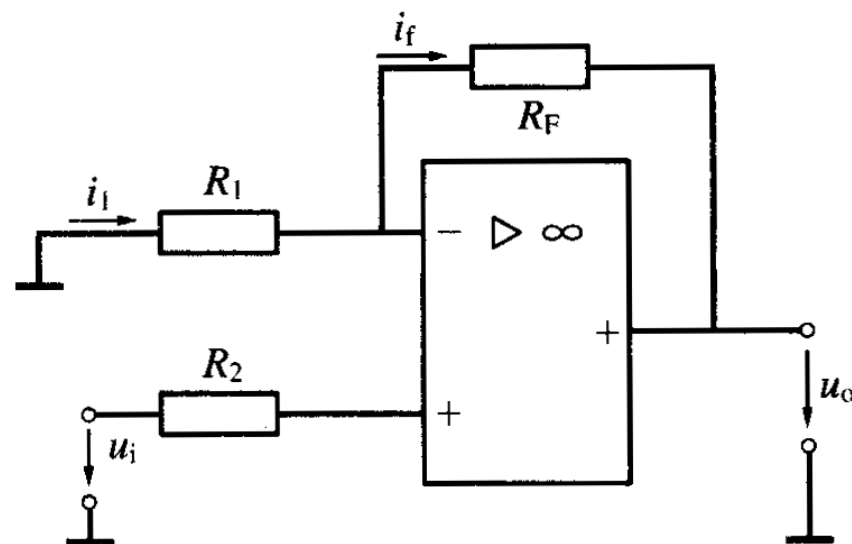
当 $R_F=R_1$ 时， $u_o=-u_i$ 。

因反相输入端为虚地，所以：输入电阻 $r_i=R_1$ ，输出电阻 $r_o=0$
（输出电压不受负载电阻影响）

运算放大器的基本应用电路

二. 同相放大器

将反相放大器中 R_1 端接地， u_i 经 R_2 由同相输入端输入，即可构成同相放大器，实现输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之间的同相比例运算。



同相放大器

运算放大器的基本应用电路

二. 同相放大器

按虚断 $I_i=0$, 故 $i_1 \approx i_f$,

$$i_1 = -\frac{u_-}{R_1}, i_f = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$
$$-\frac{u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

按虚短 $u_+ \approx u_-$, 而 $u_+ = u_i$

$$A_u = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)$$

同相放大器的闭环增益只与外接电阻有关, 稳定, 准确。

$A_u > 0$ 表示 u_o 与 u_i 同相, 且 $A_u \geq 1$ 。

$r_o = 0, r_i \rightarrow \infty$ 。

若 $R_F = 0$ 或 $R_1 = \infty$ 时, $A_u = 1$, 即 $u_o = u_i$ 。电路变成电压跟随器。

运算放大器的基本应用电路

二. 同相放大器

按虚断 $I_i=0$, 故 $i_1 \approx i_f$,

$$i_1 = -\frac{u_-}{R_1}, i_f = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$
$$-\frac{u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

按虚短 $u_+ \approx u_-$, 而 $u_+ = u_i$

$$A_u = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)$$

同相放大器输入阻抗高、输出阻抗低, 而且增益不受信号源内阻的影响。

该电路可以用来进行功率放大, 变换阻抗, 隔离信号源和负载, 缺点: 共模抑制比CMRR不太大。

同相 VS. 反相放大器

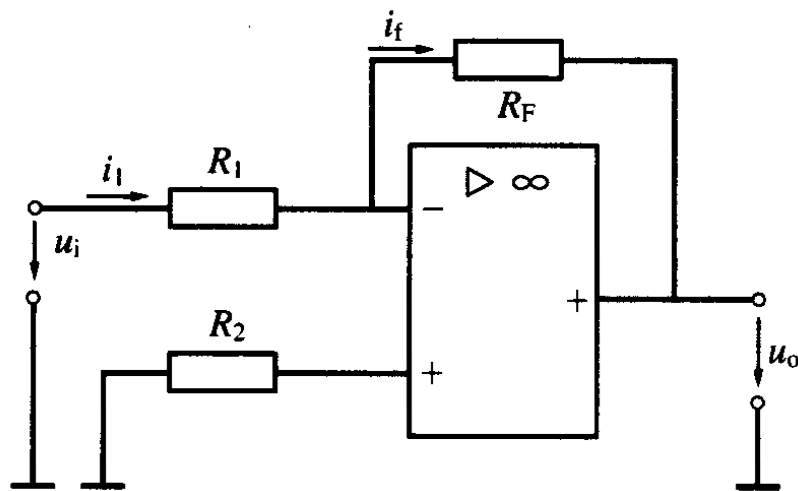


图 4-8 反相放大器

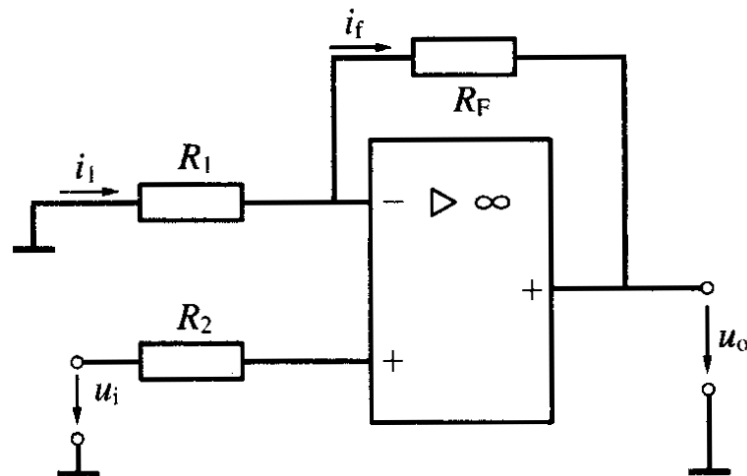


图 4-10 同相放大器

- 输入输出信号**反相**
- $u_{i+}=u_{i-}=0$ **虚地**
- 增益 $A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_F}{R_1}$
- 闭环输入电阻 $R_{if} \approx R_1$
- 闭环输出电阻 $R_{of} \rightarrow 0$

- 输入输出信号**同相**
- $u_{i+}=u_{i-} \neq 0$
- 增益 $A_u = \frac{V_o}{V_i} = (1 + \frac{R_F}{R_1})$
- 闭环输入电阻 $R_{if} \rightarrow \infty$
- 闭环输出电阻 $R_{of} \rightarrow 0$

同相 VS. 反相放大器

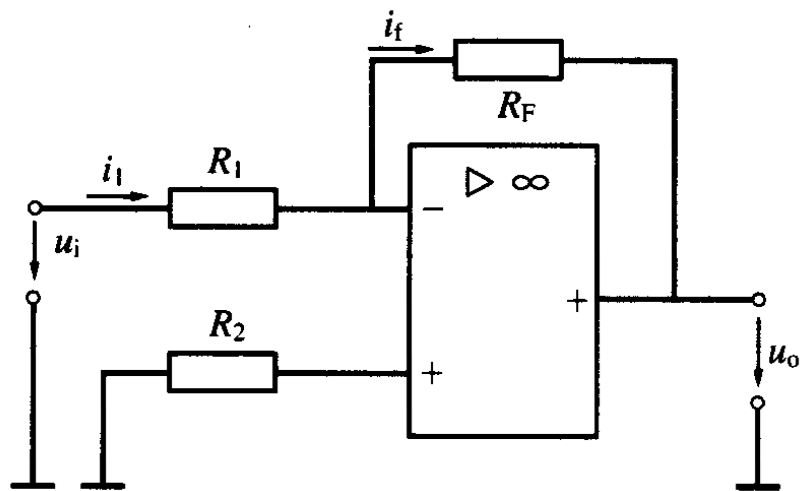


图 4-8 反相放大器

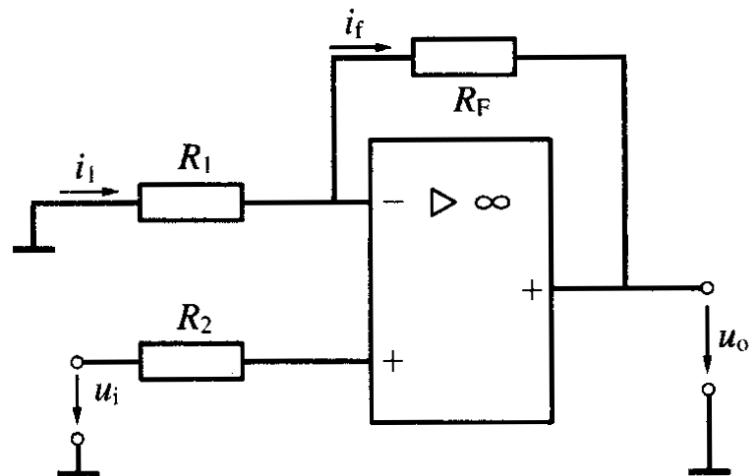
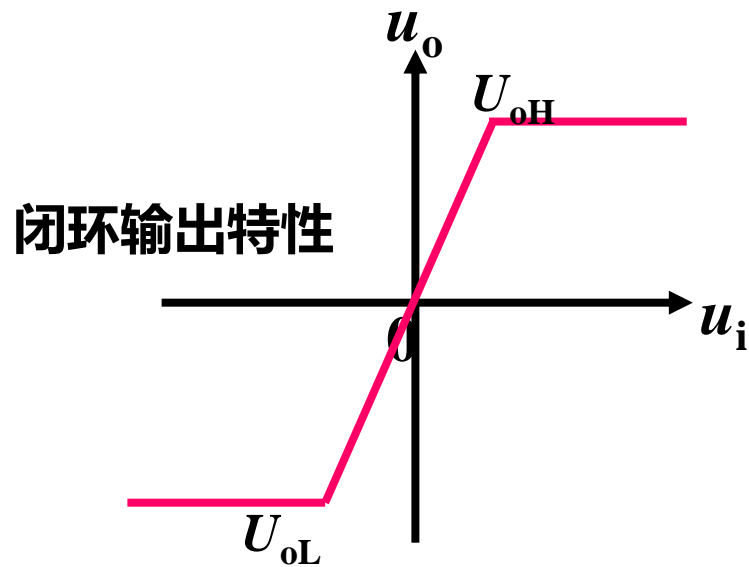
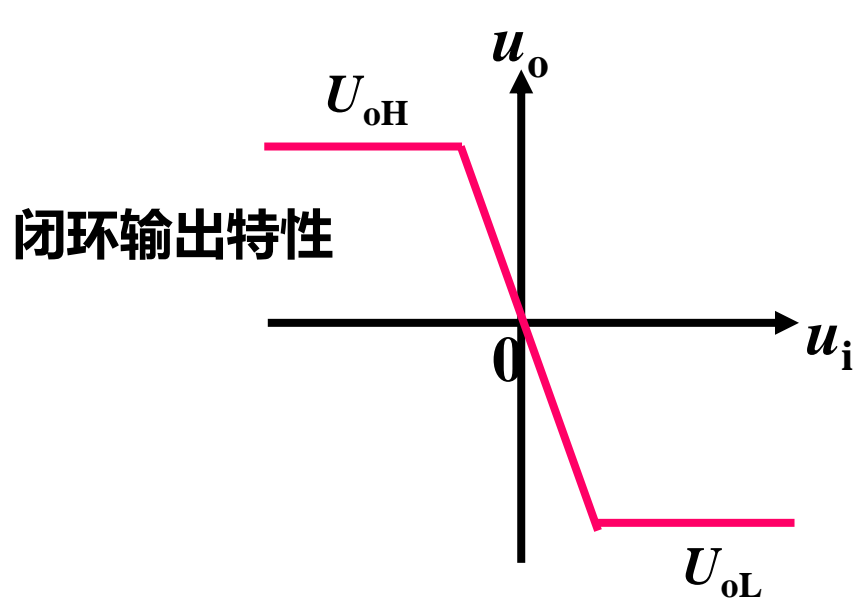


图 4-10 同相放大器



运算放大器的基本应用电路

三. 减法器

信号电压从双端输入，可实现减法运算。

当 u_{i1} 单独作用时，

$$u_{o1} = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

当 u_{i2} 单独作用时，

$$\begin{aligned} u_{o2} &= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ \\ &= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} \end{aligned}$$

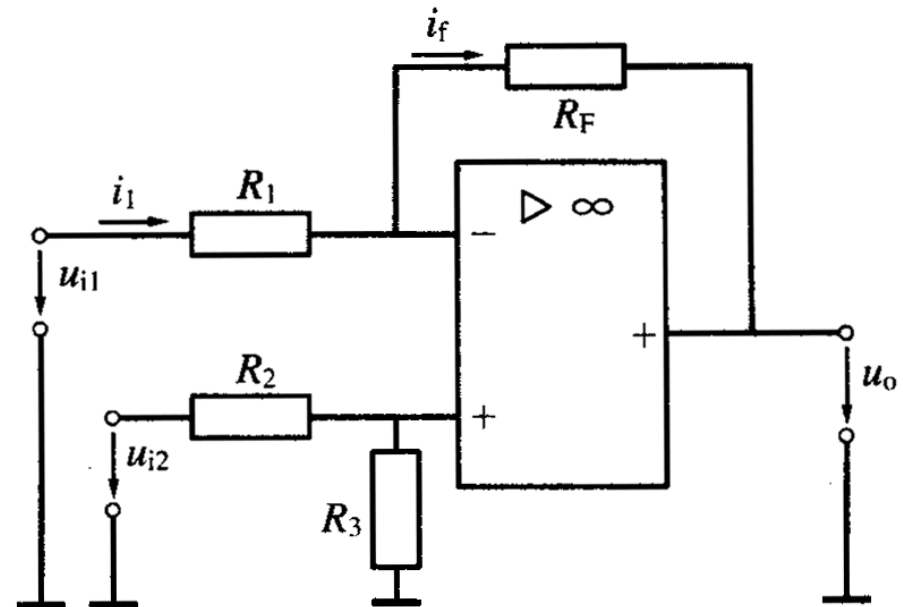


图 4-12 差分放大器

$$u_o = u_{o1} + u_{o2} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

运算放大器的基本应用电路

三. 减法器

信号电压从双端输入，可实现减法运算。

当 $R_1=R_2$, $R_3=R_F$ 时,

$$u_o = \frac{R_F}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

$R_1=R_2=R_3=R_F$, 则

$$u_o = u_{i2} - u_{i1}。$$

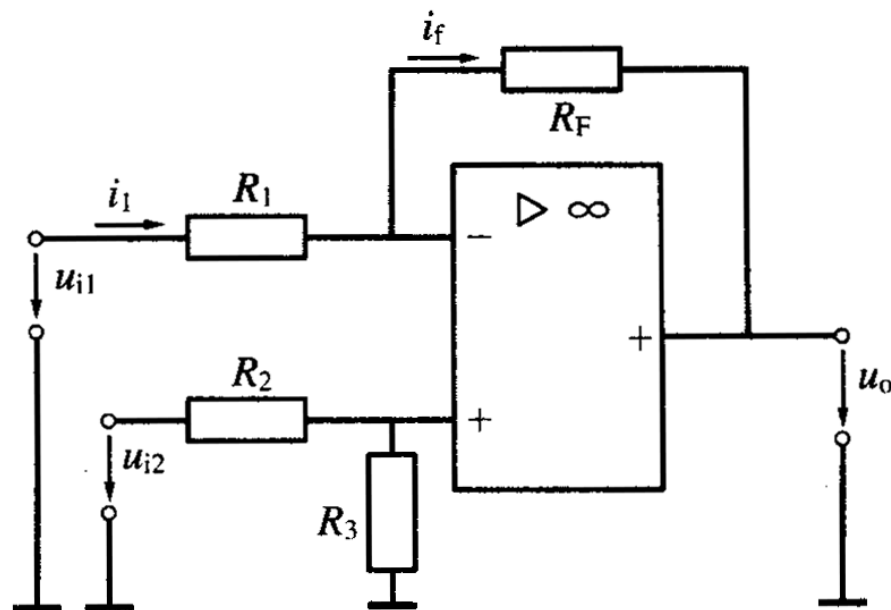


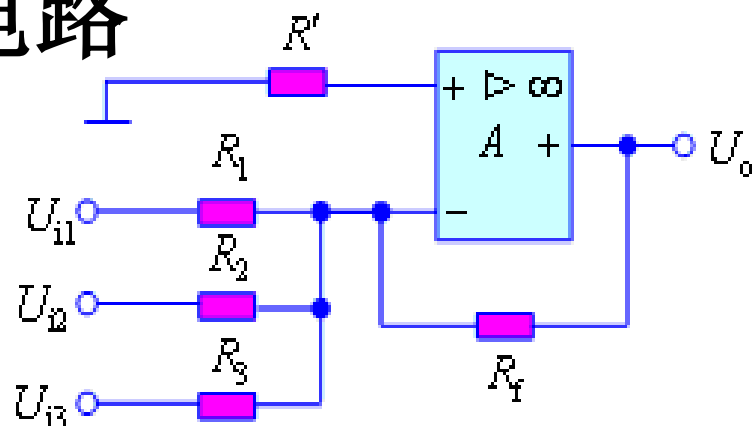
图 4-12 差分放大器

$u_{i2}=0$ （接地）时，减法器等效为反相比例放大器。

运算放大器的基本应用电路

四. 加法运算电路 (反相加法器)

相比反相放大器，多了几条输入。



反相输入求和电路

$$U_- = U_+ = 0 \quad \text{虚地}$$

$$I_{i1} + I_{i2} + I_{i3} = \frac{U_{i1} - U_-}{R_1} + \frac{U_{i2} - U_-}{R_2} + \frac{U_{i3} - U_-}{R_3} = \frac{U_- - U_o}{R_f}$$

$$U_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} U_{i1} + \frac{R_f}{R_2} U_{i2} + \frac{R_f}{R_3} U_{i3}\right)$$

1) 当 $R_1=R_2=R_3=R$ 时,

$$U_o = -\frac{R_f}{R} (U_{i1} + U_{i2} + U_{i3})$$

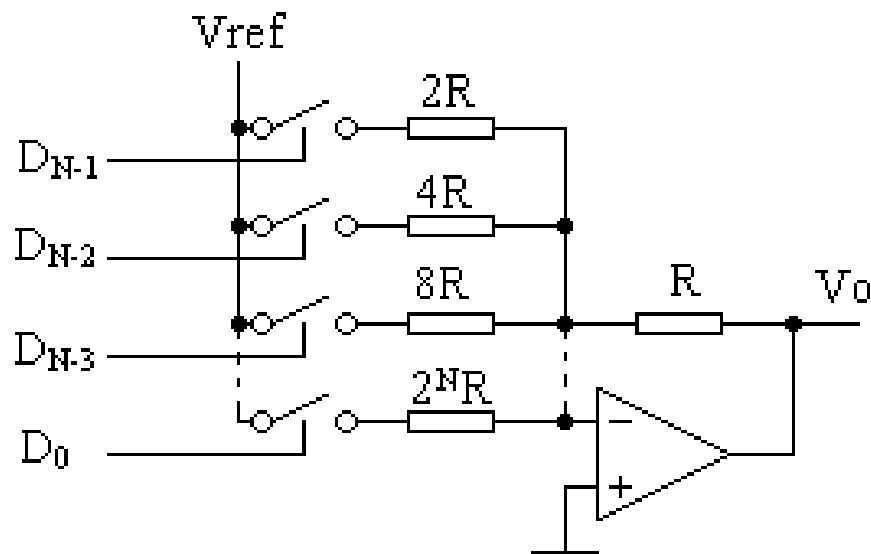
改变某一输入回路的电阻时，仅改变输出电压与该路输入电压之间的比例，对其它各路无影响，**调节灵活方便**。48

运算放大器的基本应用电路

四. 加法运算电路应用

数字-模拟转换器 (D/A) 可以将二进制数字量转换为模拟电压或电流信号。一种常用的方法是按二进制的权值规律产生权值电流，然后将这些权值电流按二进制数字的要求选择叠加，形成模拟信号。常用反相加法器实现。

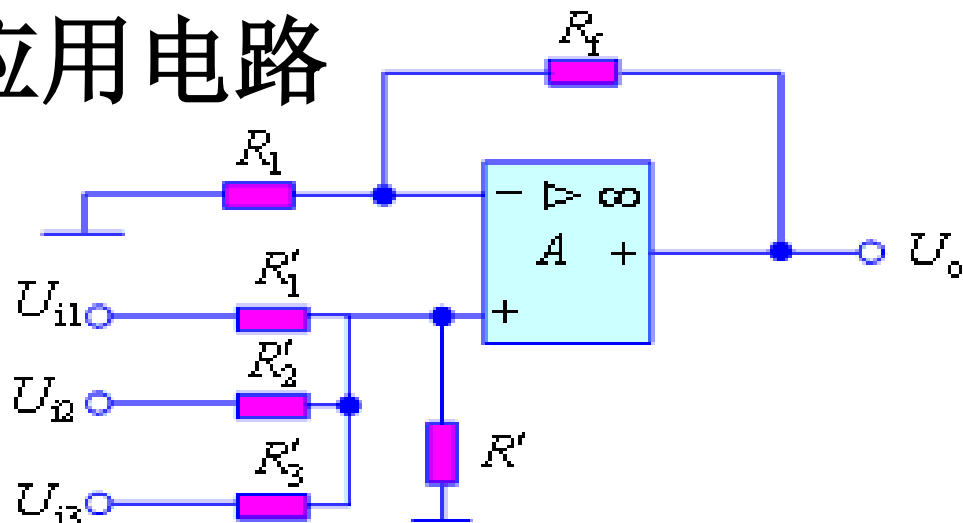
例如8位二进制数字 $D_7D_6\dots D_0$ 由高到低各位权值分别为128、64、32、16、8、4、2、1， $10000001B = D_7 \times 128 + D_0 \times 1 = 129D$ ，如果设置128mA、64mA...1mA的权值电流，分别用 $D_7D_6\dots D_0$ 选通这些权值电流叠加，便可实现D/A转换。



每一个数字量的1/0可用一条导线的电压高低表示，它们可以控制模拟开关（一种高速半导体开关）的通断。

运算放大器的基本应用电路

四. 加法运算电路 (同相加法器)



同相输入求和电路

$$I_f = I_{R_1} \quad U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o$$

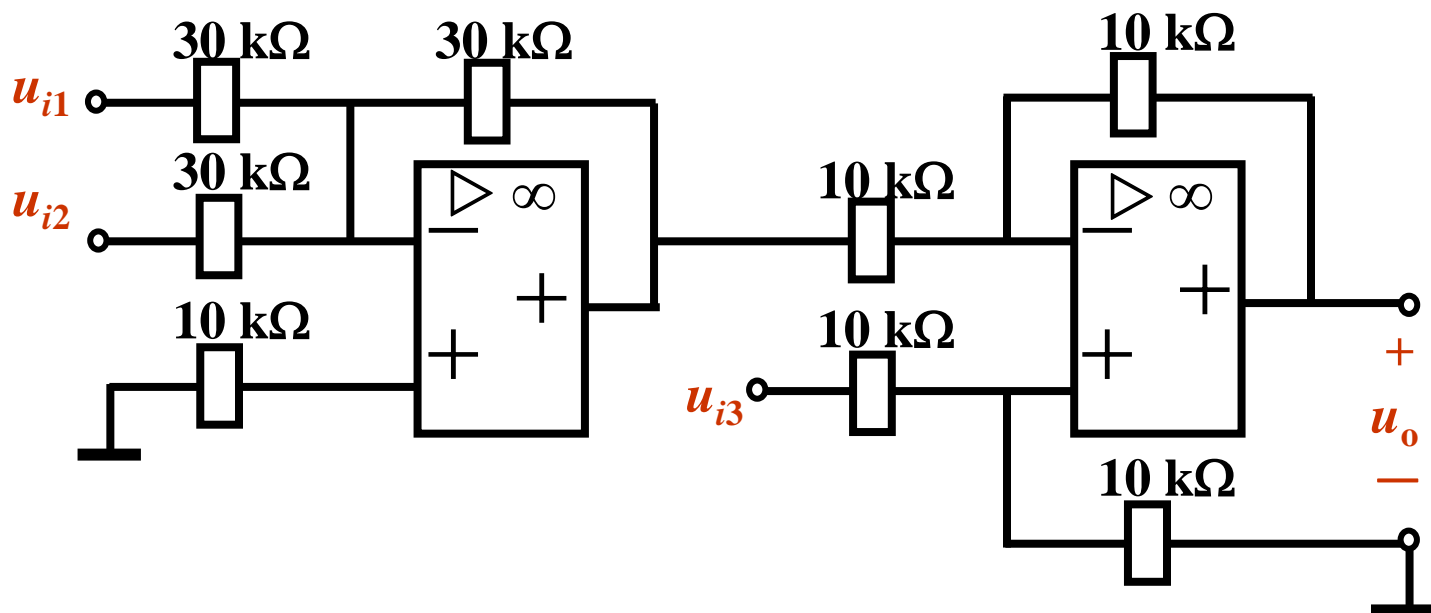
$$I_{i1} + I_{i2} + I_{i3} = \frac{U_{i1} - U_+}{R'_1} + \frac{U_{i2} - U_+}{R'_2} + \frac{U_{i3} - U_+}{R'_3} = \frac{U_+}{R'}$$

$$U_+ = \frac{R_+}{R'_1} U_{i1} + \frac{R_+}{R'_2} U_{i2} + \frac{R_+}{R'_3} U_{i3} \quad R_+ = R'_1 // R'_2 // R'_3 // R'$$

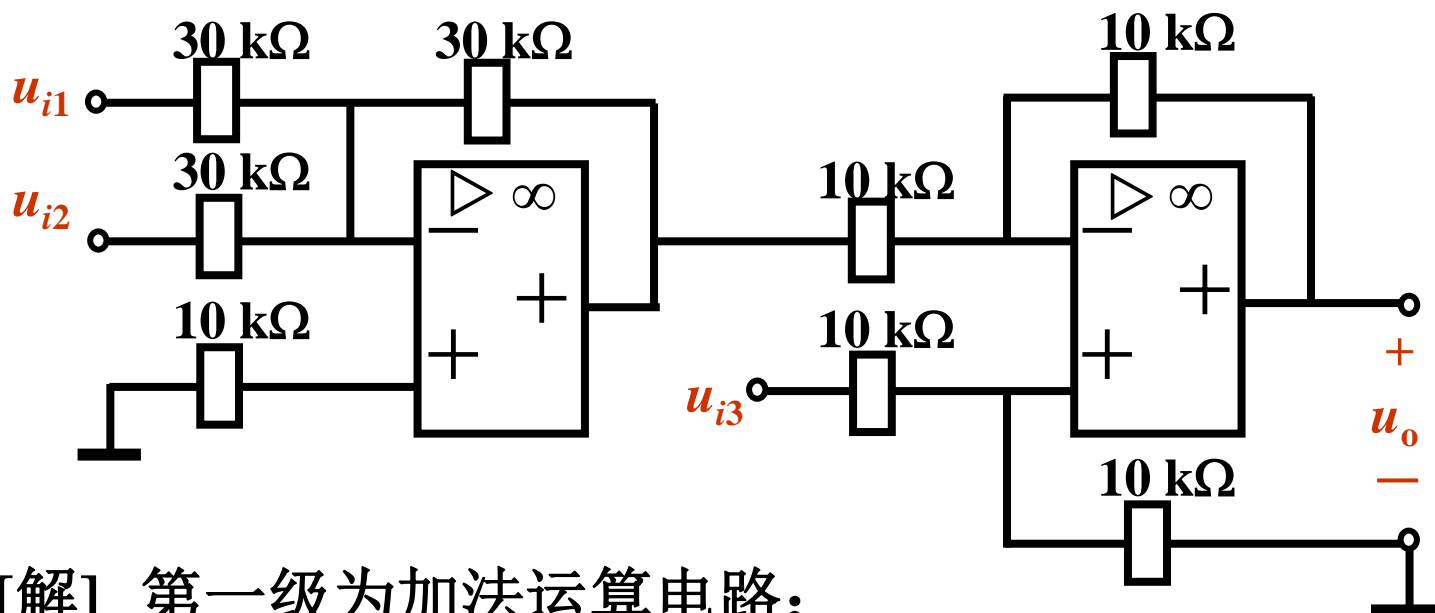
$$\text{令 } U_+ = U_- \text{ 得, } U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_+}{R'_1} U_{i1} + \frac{R_+}{R'_2} U_{i2} + \frac{R_+}{R'_3} U_{i3}\right)$$

改变某一输入回路的电阻时, 其他支路的比例关系也有改变, 调节麻烦。

[例] 如图为两级运放组成的电路，已知 $u_{i1}=0.1\text{ V}$ ， $u_{i2}=0.2\text{ V}$ ， $u_{i3}=0.3\text{ V}$ ，求 u_o 。



[例] 如图为两级运放组成的电路，已知 $u_{i1}=0.1\text{ V}$ ， $u_{i2}=0.2\text{ V}$ ， $u_{i3}=0.3\text{ V}$ ，求 u_o 。



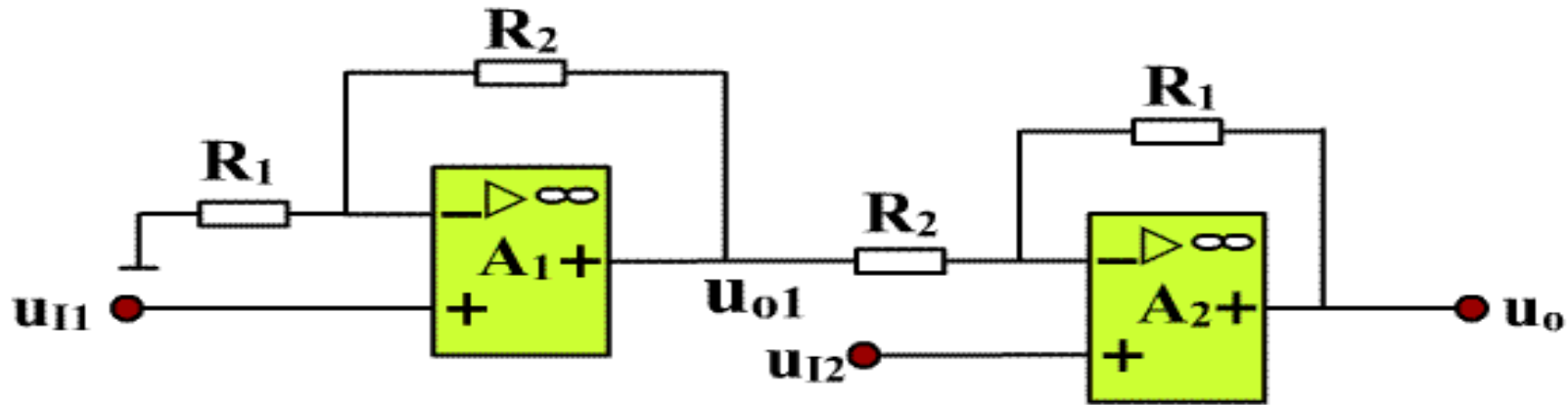
[解] 第一级为加法运算电路：

$$u_{o1} = -\left(\frac{R_{F1}}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_{F1}}{R_{12}} u_{i2} \right) = -0.3\text{ V}$$

第二级为减法运算电路：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_3} \right) \frac{R_5}{R_4 + R_5} u_{i3} - \frac{R_{F2}}{R_3} u_{o1} = 0.6\text{ V}$$

例：电路如图，求 u_o ？



解：

A1组成同相比值运算电路

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{i1}$$

由于是理想运放， u_{o1} 即为A₂输入信号。A₂组成差分运算电路

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{R_1}{R_2} u_{o1} + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{i2} \\ &= -\frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{i1} + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{i2} \\ &= -\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{i1} + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{i2} \\ &= \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) (u_{i2} - u_{i1}) \end{aligned}$$

运算放大器的基本应用电路

五. 积分运算电路

反相放大器中的负反馈
电阻用电容代替

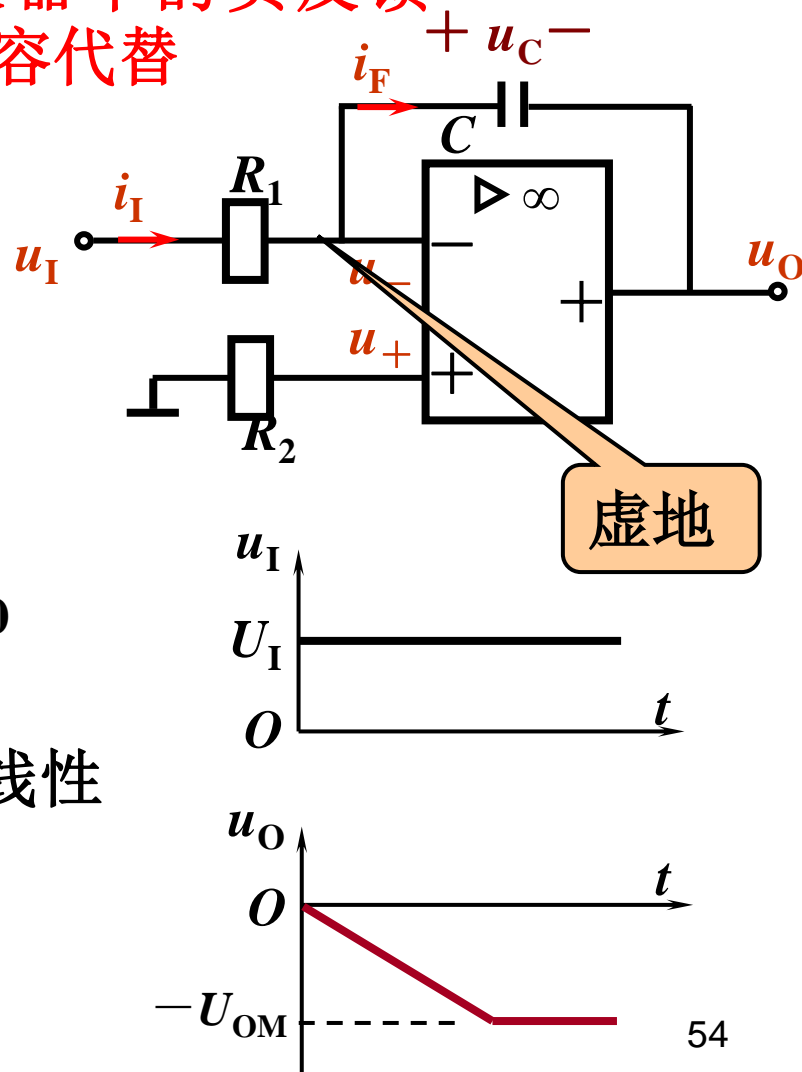
$$u_+ = u_- = 0 \quad i_I = i_F$$

$$\frac{u_I}{R_1} = C \frac{du_C}{dt} \quad u_O = -u_C$$

$$u_O = -\frac{1}{R_1 C} \int u_I dt + u_{O/t=0}$$

①当 u_I 为阶跃电压时, u_O 随时间线性积分到负饱和值为止。

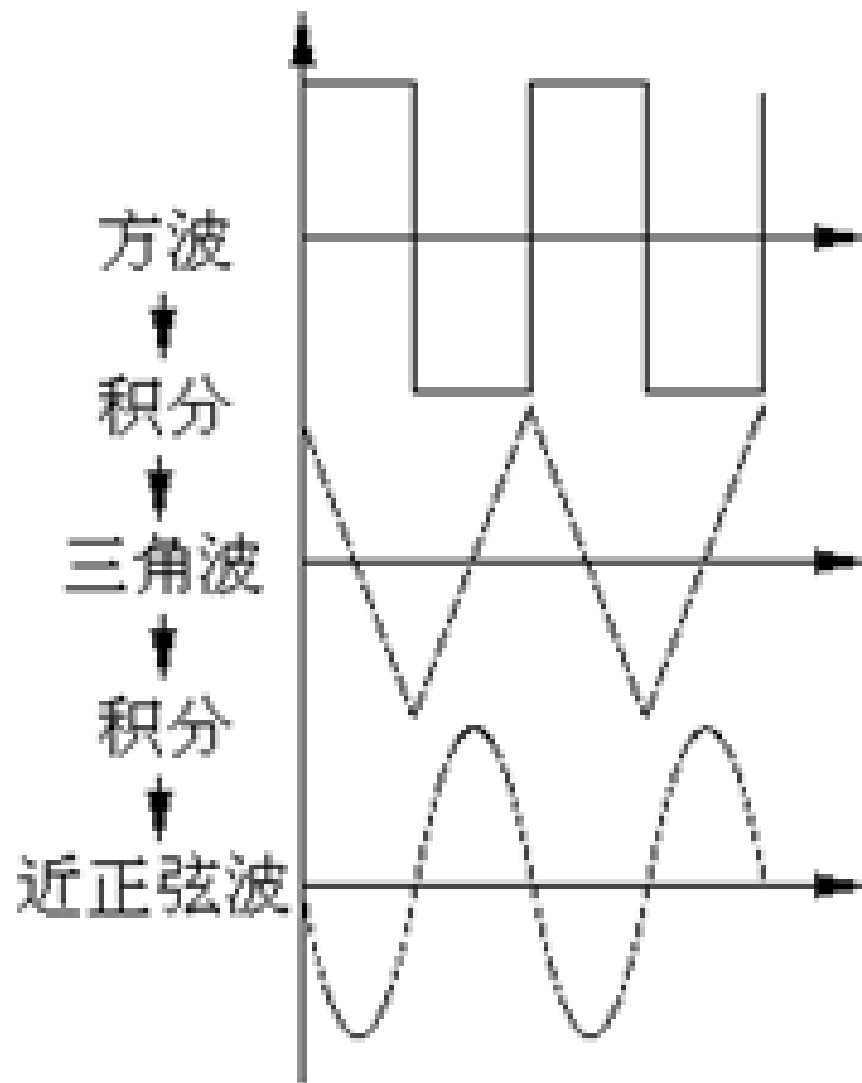
②平衡电阻: $R_2 = R_1$



运算放大器的基本应用电路

五. 积分运算电路

输入一个不含直流的方波可得到三角波输出，如果输入一个不含直流的三角波，输出波形接近正弦波，如图所示，说明积分器能平滑波形。



运算放大器的基本应用电路

六. 微分运算电路

积分电路的RC交换位置

$$u_+ = u_- = 0 \quad i_F = i_C$$

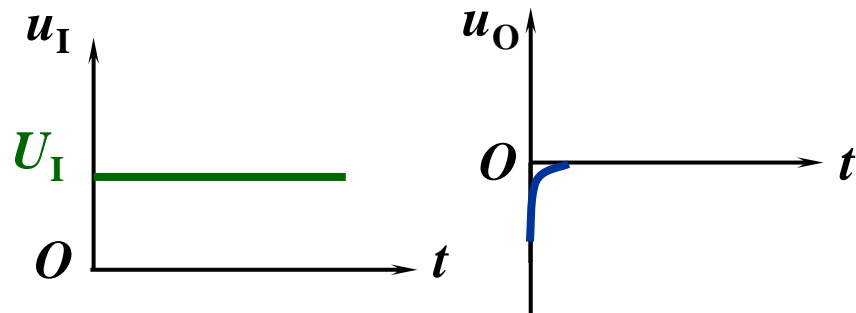
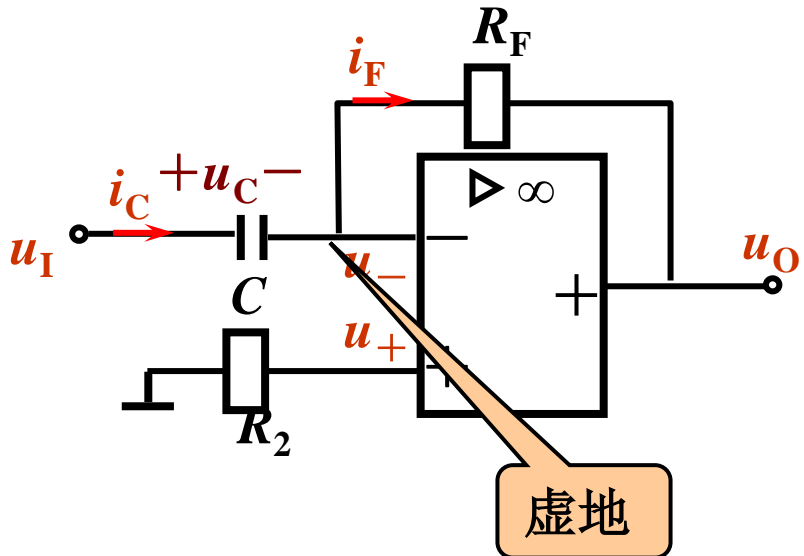
$$-\frac{u_O}{R_F} = C \frac{du_C}{dt}$$

$$u_O = -R_F C \frac{du_C}{dt}$$

$$u_O = -R_F C \frac{du_I}{dt}$$

① 当 u_I 为阶跃电压时， u_O 为尖脉冲电压。

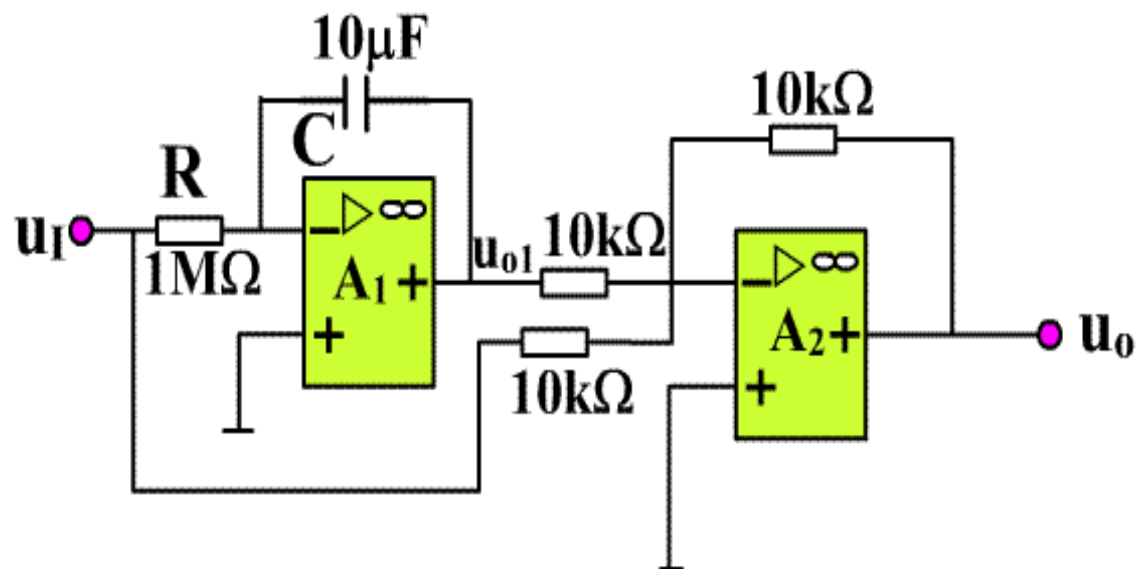
② 平衡电阻： $R_2 = R_F$



例: 电路如图, (1) 写出输入与输出关系

(2) 若 $u_I = +1V$, 电容初始电压为零

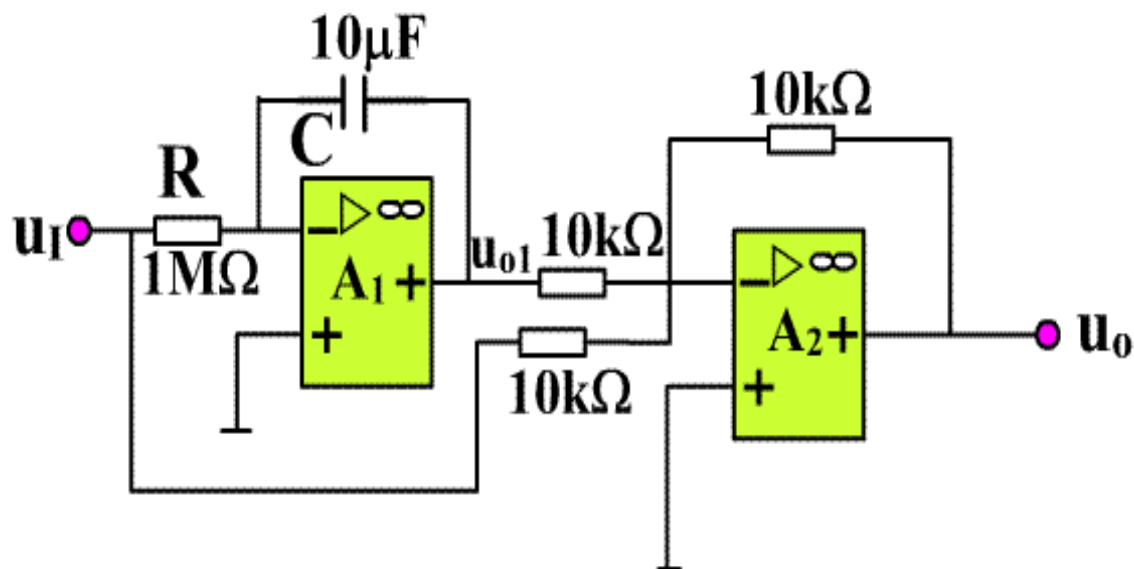
求: 输出电压变为 $0V$ 所需时间



例: 电路如图, (1) 写出输入与输出关系

(2) 若 $u_I = +1V$, 电容初始电压为零

求: 输出电压变为 $0V$ 所需时间



解: (1) A_1 积分器

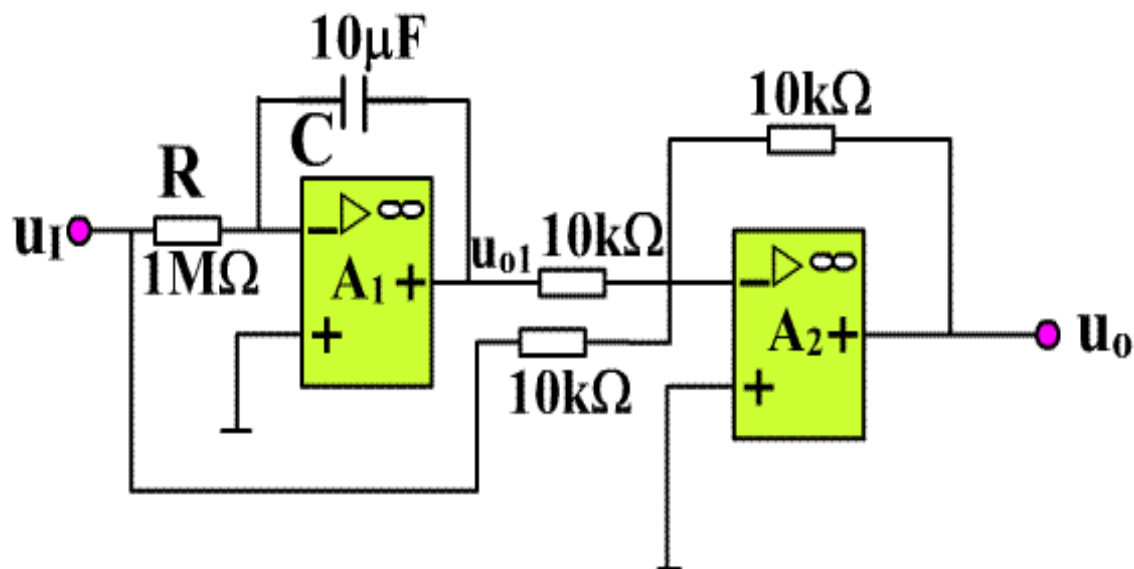
A_2 反相加法器

$$u_{o1} = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} u_I dt + u_c|_{t_0=0} \quad u_o = -u_{o1} - u_I$$

例: 电路如图, (1) 写出输入与输出关系

(2) 若 $u_I = +1V$, 电容初始电压为零

求: 输出电压变为 $0V$ 所需时间



解: (2) 因 $u_c|_{t_0=0} = 0$. $u_I = +1V$ 则 $u_O = \frac{u_I}{RC} t_1 - u_I = 0$

所以 $t_1 = RC = [1 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-6}]s = 10s$

运算放大器的基本应用电路

七. 对数运算电路

反相放大器中的负反馈电阻用二极管代替

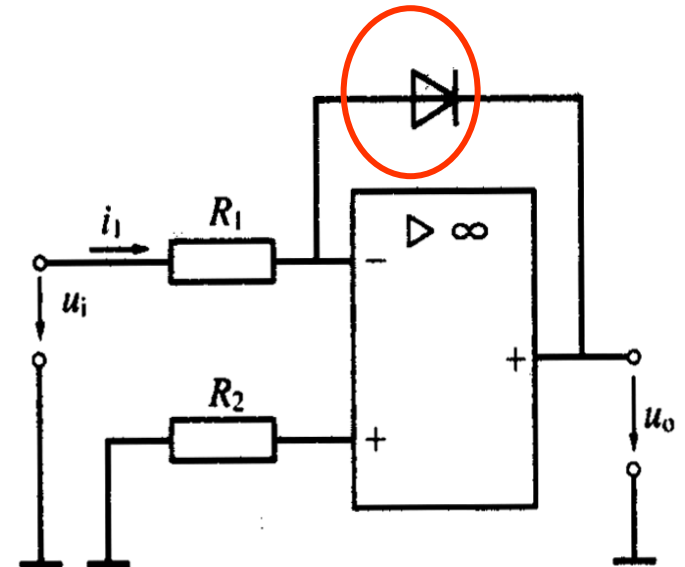
二极管PN结的正向电流为: $i_D = I_S e^{u_D/U_T}$ $U_T = 26\text{mV}$

$i_1 = u_i/R_1$, 理想运放, $i_1 = i_D$, 因此

$$\frac{u_i}{R_1} = I_S e^{u_D/U_T}$$

两边取对数, 又 $u_o = -u_D$, 则

$$u_o = -u_D = -U_T \ln \frac{u_i}{R_1 I_S}$$



电路的输出电压与输入电压的**对数**成比例关系。

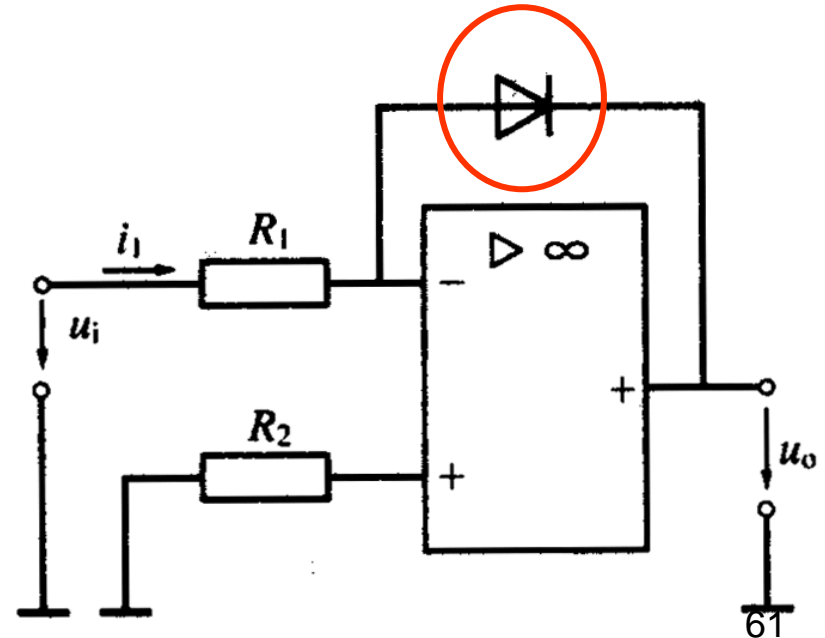
运算放大器的基本应用电路

七. 对数运算电路

实际电路中，因二极管大电流时误差很大，常用**三极管的发射结代替二极管**。该电路只适用于 $u_i > 0$ 的情况，若 $u_i < 0$ ，则需将二极管两极对调连接。

主要缺点

受温度影响很大，
小电流和大电流时误差较大。



运算放大器的基本应用电路

八. 反对数运算电路

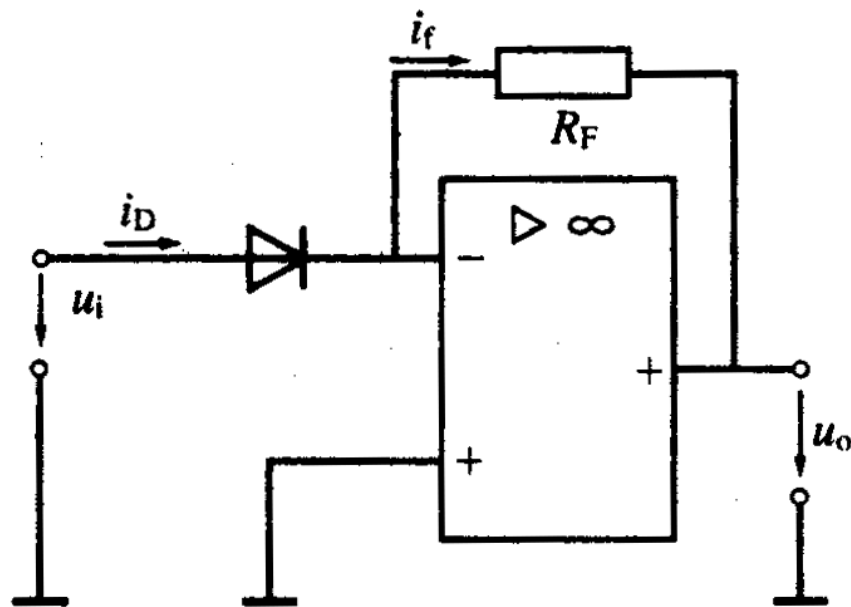
反对数运算是对数运算的逆运算，又叫指数运算。

将对数运算电路中的二极管与输入电阻交换位置即可。

因为: $i_D = I_S e^{u_D / U_T}$

$$i_D = i_f, u_D = u_i$$

所以: $u_o = -I_S R_F e^{u_i / U_T}$



电路的输出电压与输入电压的反对数成比例。

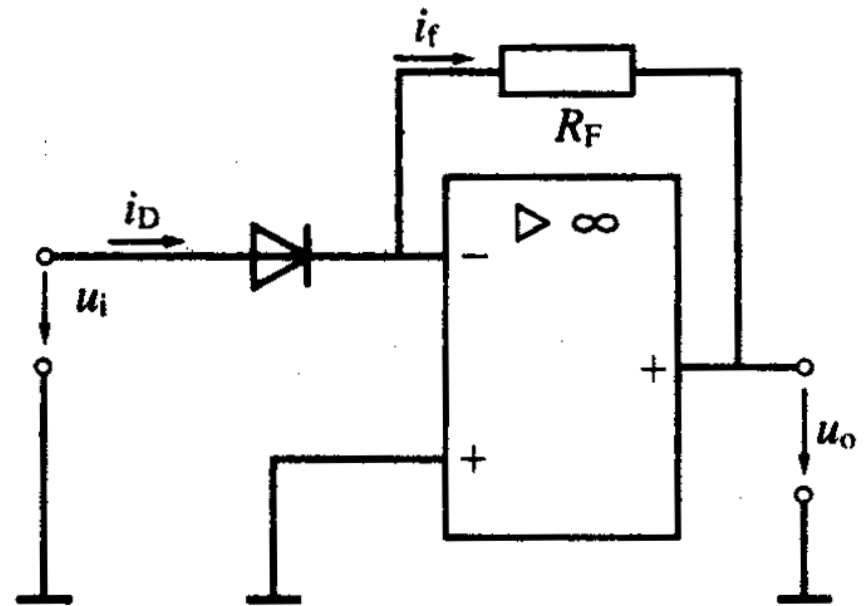
运算放大器的基本应用电路

八. 反对数运算电路

$$u_o = -I_S R_F e^{u_i / U_T}$$

实际电路中, 因二极管大电流时误差很大, 常用**三极管代替二极管**。当 $u_i < 0$ 时, 应使二极管反向连接, 三极管用PNP型。

实际电路中, 绝对温度 T 、反向饱和电流 I_S 都与环境温度有关, 是影响输出电压稳定的主要因素。为减小它们对 u_o 的影响, 实际设计的电路要比上述电路复杂。

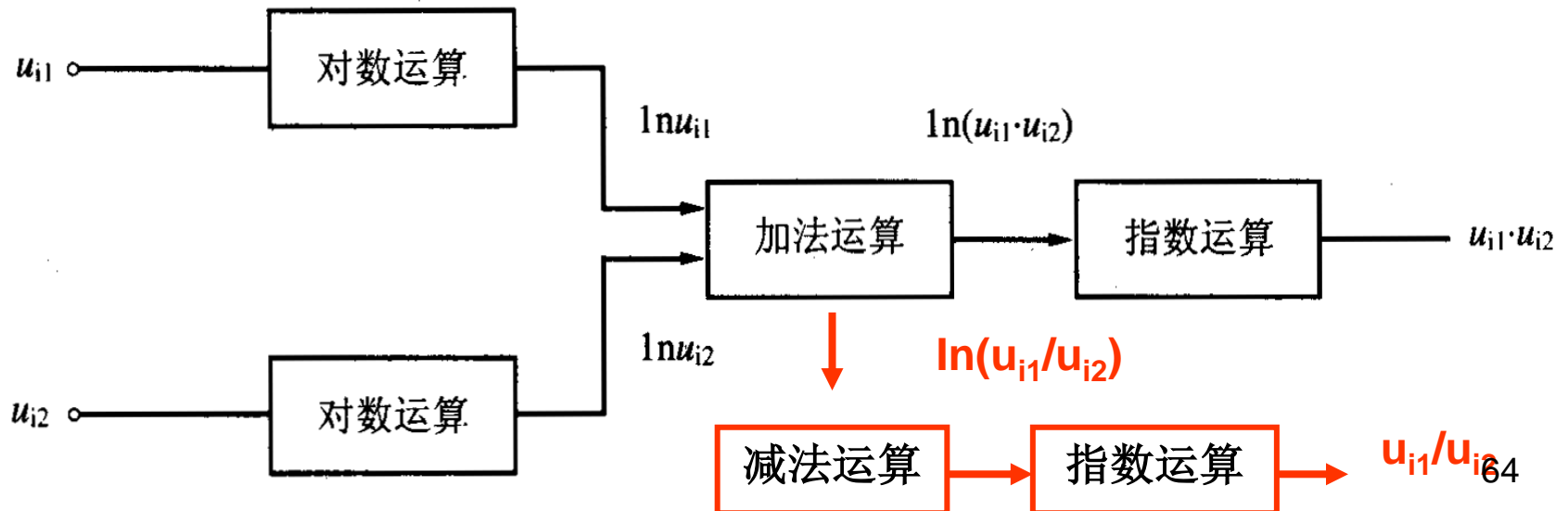


运算放大器的基本应用电路

九. 乘除法运算电路

将对数、反对数、加法、减法等运算电路按数学规律组合，可得信号的乘法、除法、乘方等运算电路。

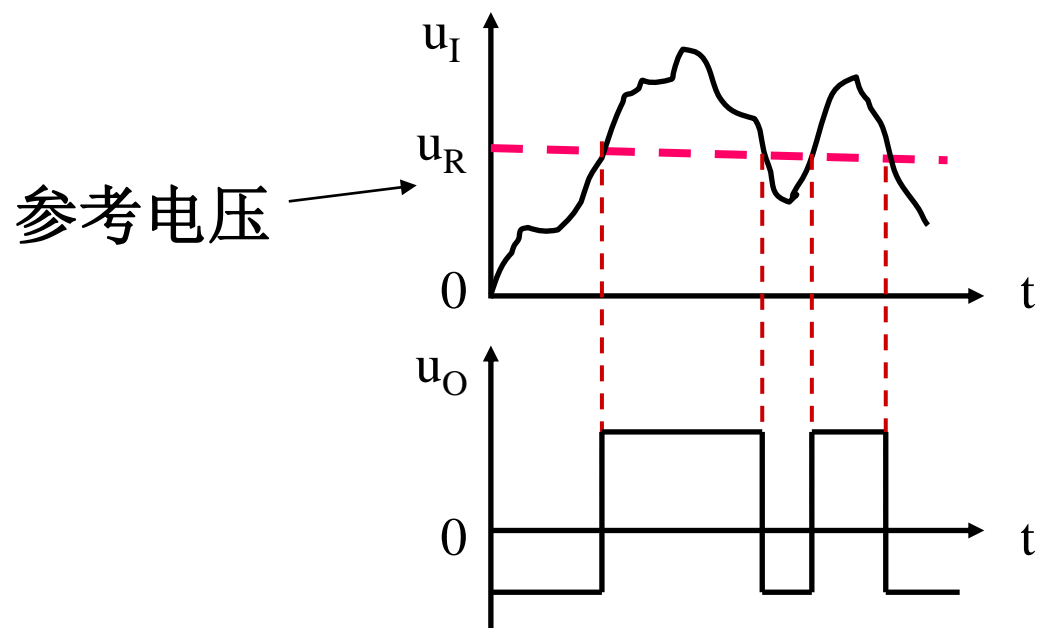
乘法器可用于通讯领域的模拟信号处理，如调制、解调、混频、自动增益控制等，也可专门用作模拟乘法器。



电压比较器

功能：比较两个电压的大小 (用输出电压的高或低电平，表示两个输入电压的大小关系)；

用途：可用作模拟电路和数字电路的接口，还可以用作电平检测、波形产生，整形和变换电路等。



利用电压比较器进行电平检测波形示意图

电压比较器

电压比较器的基本特点：

开环或正反馈 无负反馈

开关特性 开环增益很大（趋于 ∞ ），比较器只有两个输出状态：高电平和低电平

非线性 （饱和区）输出与输入不成线性关系

虚短不存在 虚断、无内阻仍然存在

常用的电压比较器：

1. 常用的运算放大器均可用做电压比较器
2. 专用电压比较器：LM339、LM393等

电压比较器的类型

常用的电压比较器有：

零电平比较器(过零比较器)

非零电平比较器(单限比较器)

迟滞比较器(滞回比较器)

窗口比较器(双限比较器)

} 简单比较器

电压比较器的性能指标

(1) 阈值电压：比较器输出发生跳变时的输入电压称之为阈值电压或门限电平。

(2) 输出电平：输出电压的高电平和低电平。

(3) 灵敏度：输出电压跳变的前后，输入电压之差值。其值越小，灵敏度越高。灵敏度越高，抗干扰能力就越差。零电平和非零电平比较器的灵敏度取决于运放从一个饱和状态转换到另一个饱和状态所需输入电压的值，而迟滞比较器的灵敏度等于两个阈值电压之差值。因而，迟滞比较器的抗干扰能力强。

(4) 响应时间：输出电压发生跳变所需时间称为响应时间。

电压比较器的分析方法

按理想情况分析

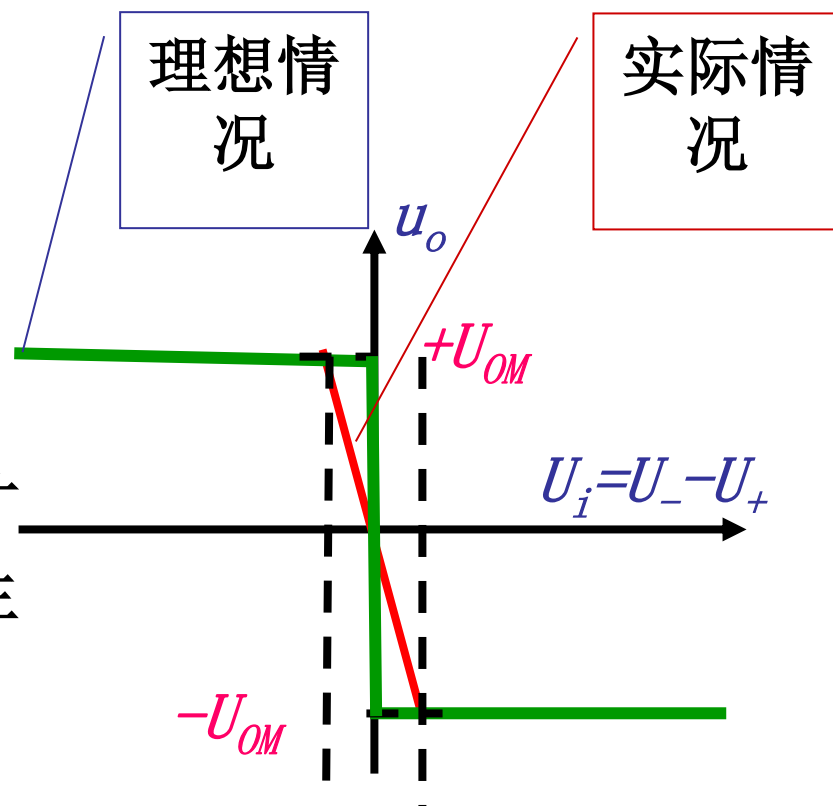
若 $U_- > U_+$ 则 $U_o = -U_{OM}$;

若 $U_- < U_+$ 则 $U_o = +U_{OM}$ 。

只有当 $U_- = U_+$ 时，输出状态才发生跳变；反之，若输出发生跳变，必发生在 $U_- = U_+$ 时刻。

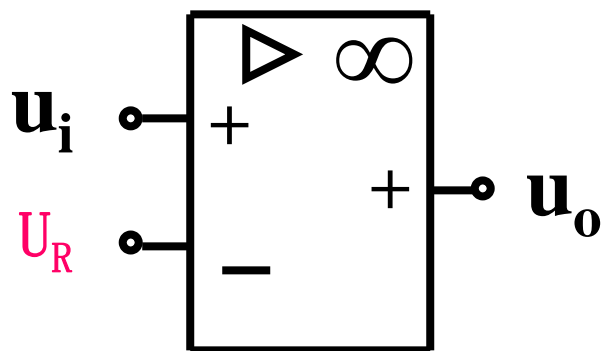
虚断（运放输入端电流=0）

注意：此时不能用虚短！



一. 非零电平比较器

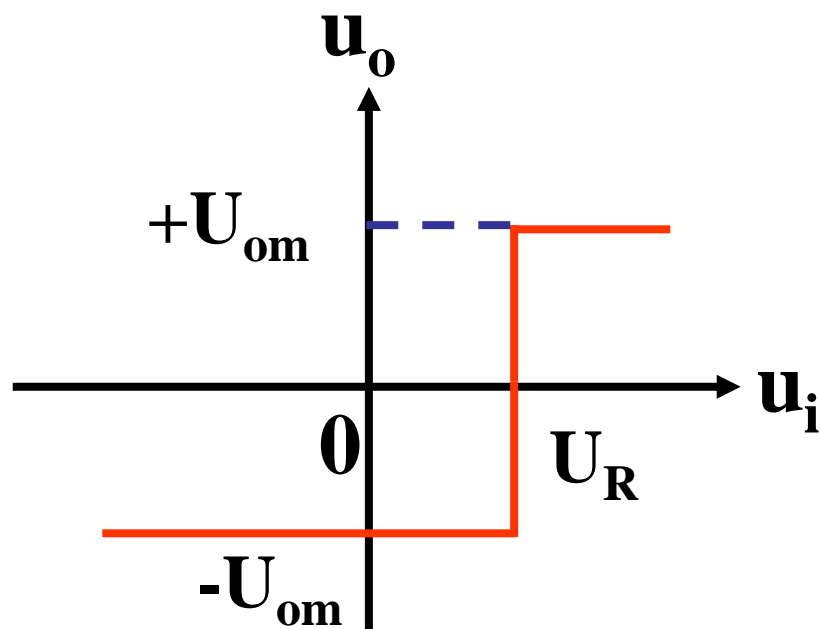
若 u_i 从同相端输入
(同相电压比较器)



U_R 为参考电压

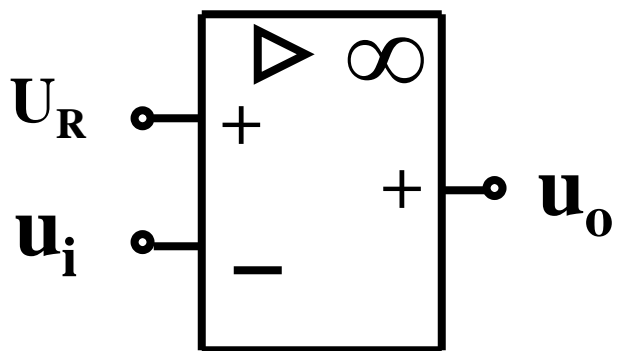
当 $u_i > U_R$ 时 , $u_o = +U_{om}$

当 $u_i < U_R$ 时 , $u_o = -U_{om}$



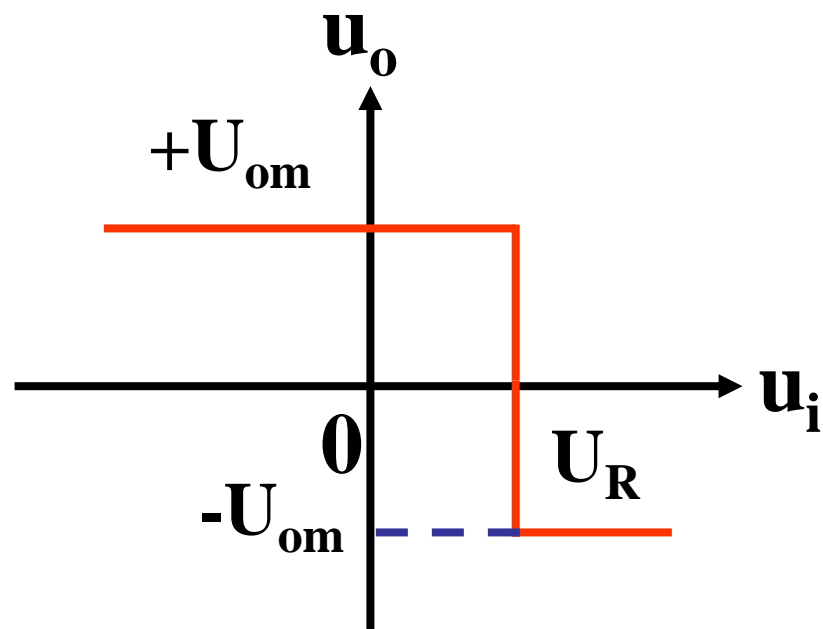
一. 非零电平比较器

若 u_i 从反相端输入
(反相电压比较器)



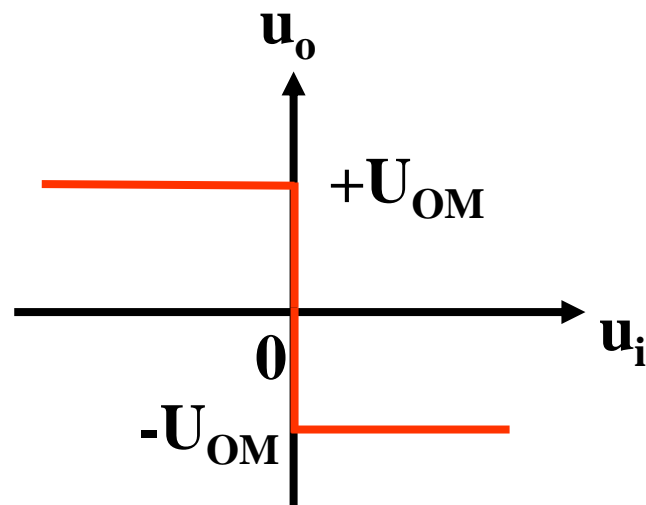
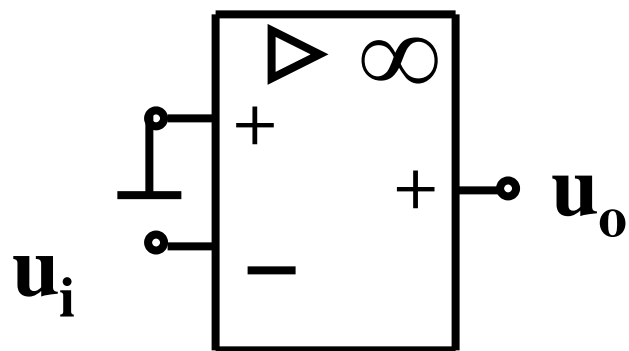
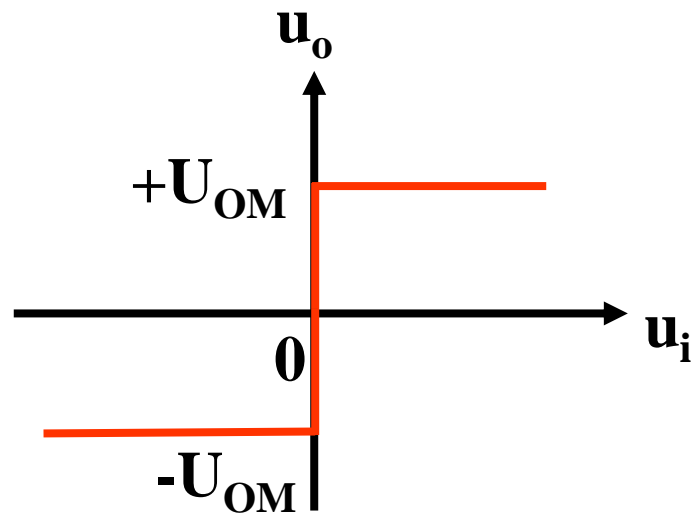
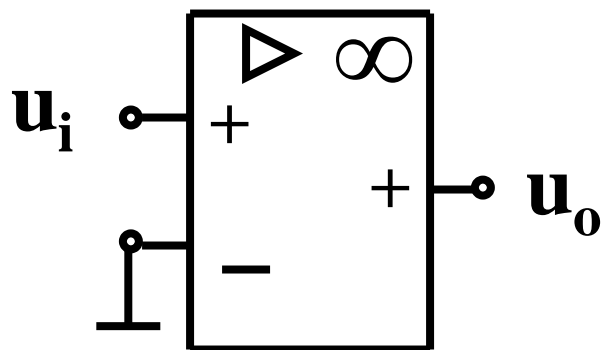
当 $u_i < U_R$ 时 , $u_o = +U_{om}$

当 $u_i > U_R$ 时 , $u_o = -U_{om}$

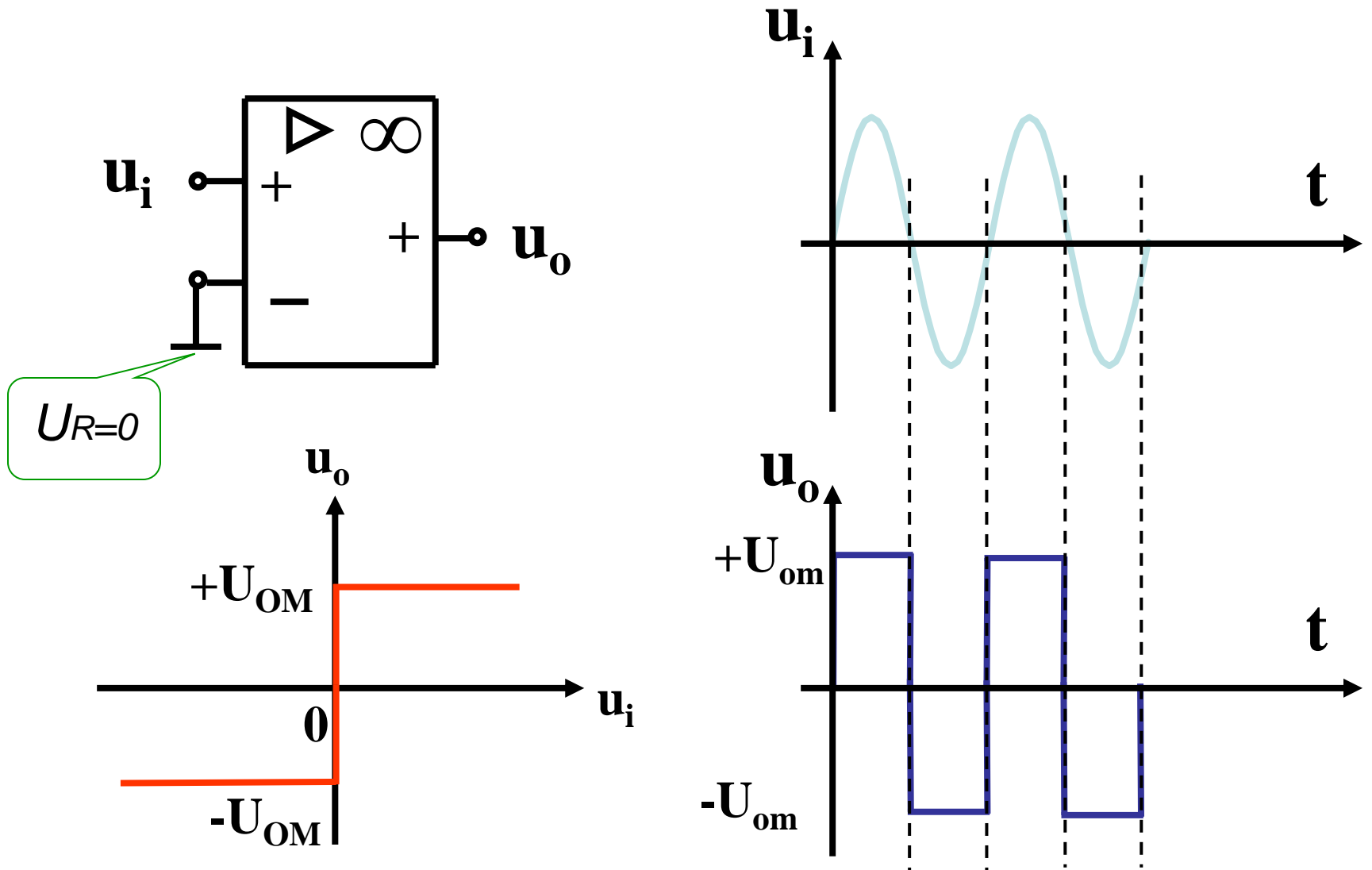


二. 零电平比较器

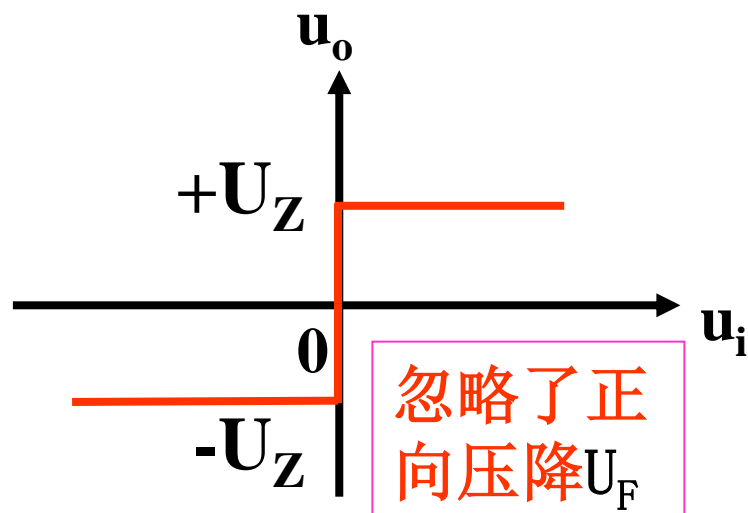
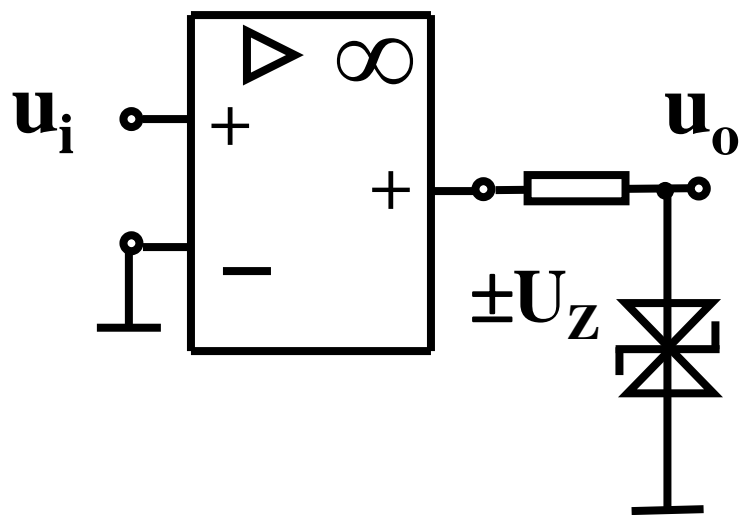
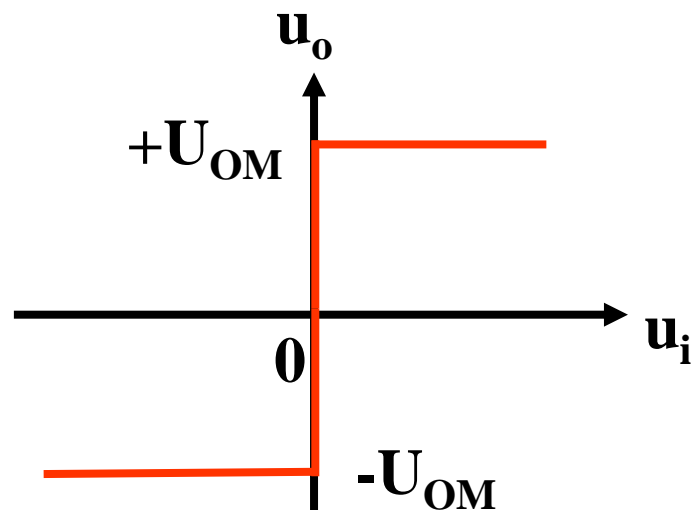
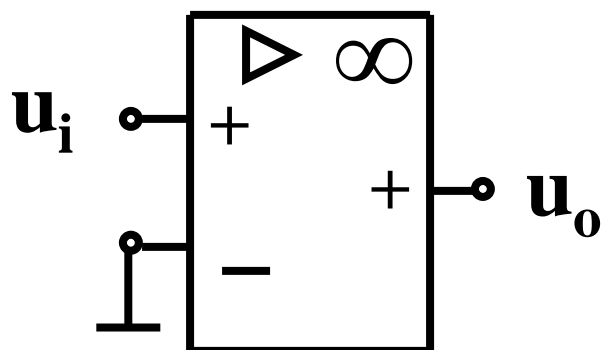
当 $U_R = 0$ 时



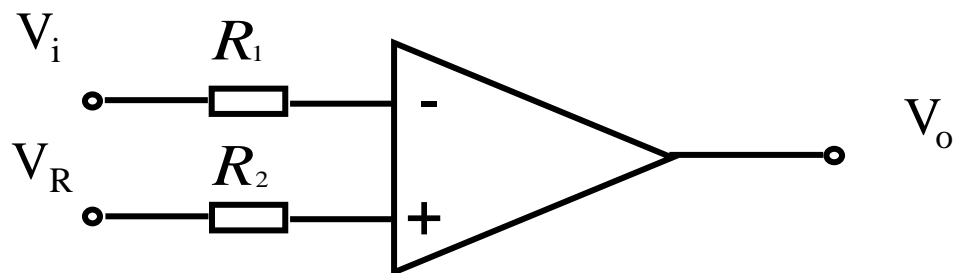
例 利用电压比较器将正弦波变为方波。



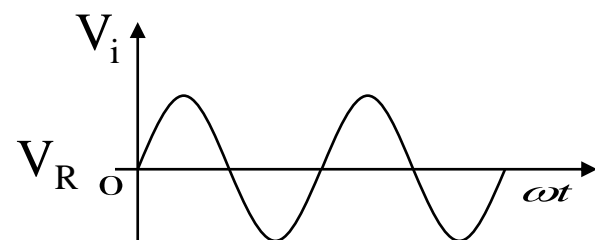
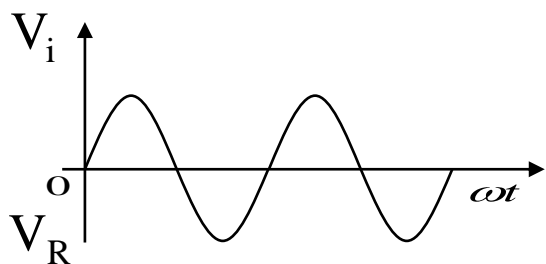
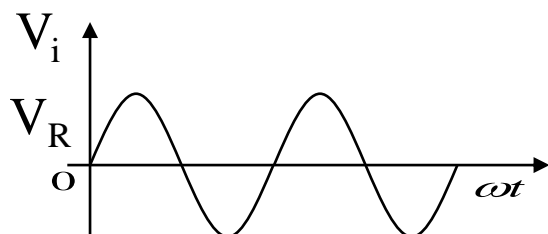
用稳压管稳定输出电压



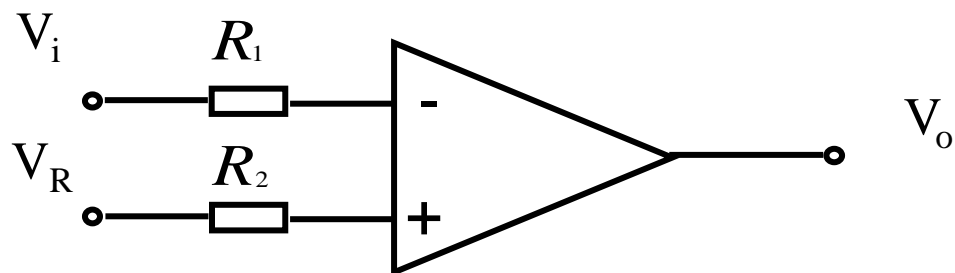
例 电路如图所示，输入 V_i 为正弦波，试画输出波形。



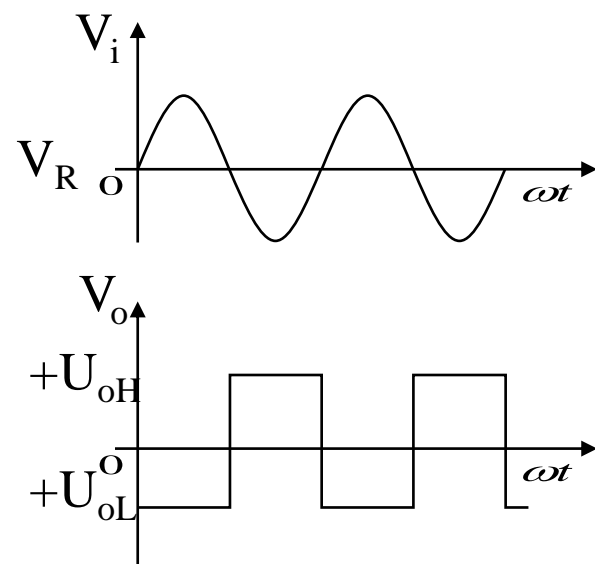
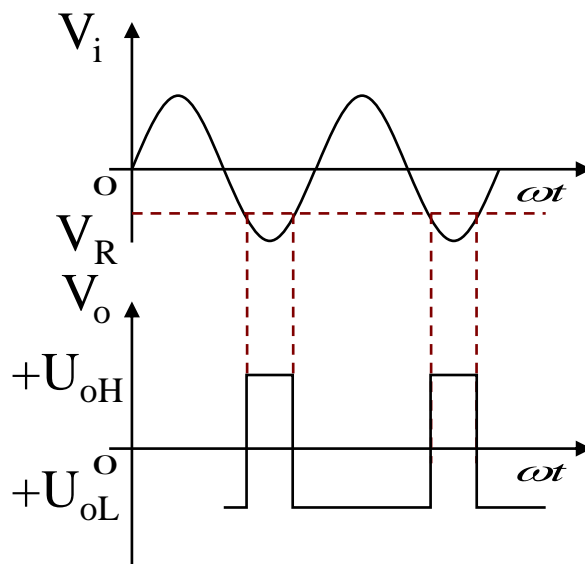
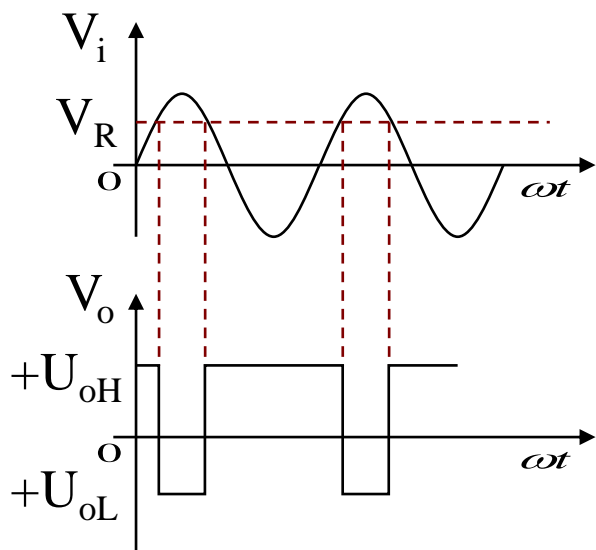
解：输出波形与 V_R 有关，当 $V_R=0$ 时，输出为方波。



例 电路如图所示，输入 V_i 为正弦波，试画输出波形。



解：输出波形与 V_R 有关，当 $V_R=0$ 时，输出为方波。



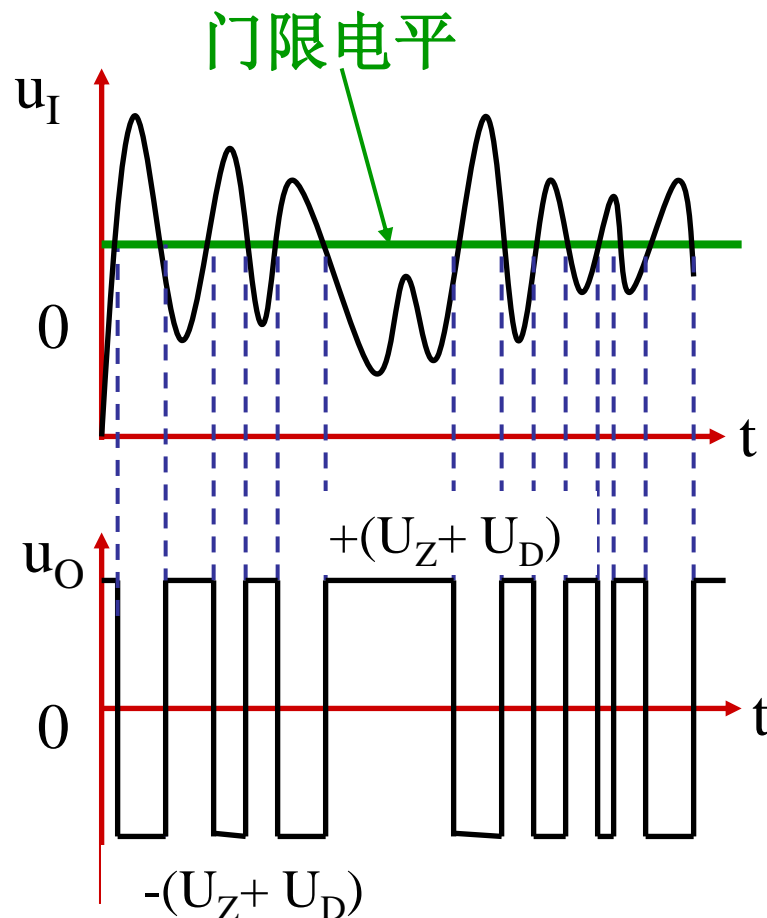
三. 迟滞比较器（滞回比较器、滞环比较器、施密特触发器）

单限比较器的优缺点：

优点：电路结构简单，灵敏度高。

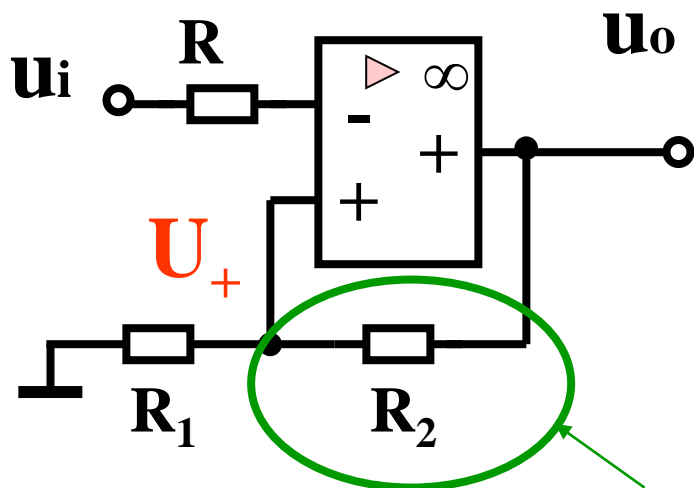
缺点：抗干扰能力差。

如果输入电压因受干扰或噪声的影响，单限比较器的输出端电压将会在高、低两种电平之间频繁地反复跳变，使电路不能稳定工作。波形示意图如右所示：



三. 迟滞比较器（下行）

反相滞回比较器



特点：电路中使用正反馈和 u_o 相连，而 u_o 有两个值，所以对应的 U_+ 就有两个值。故阈值电压就有两个值。

1、因有正反馈，故输出饱和。

$$u_o = A_u (u_+ - u_-)$$

2、当 $u_i \rightarrow -\infty$ ， u_o 正饱和 ($u_o = +U_{OM}$)：

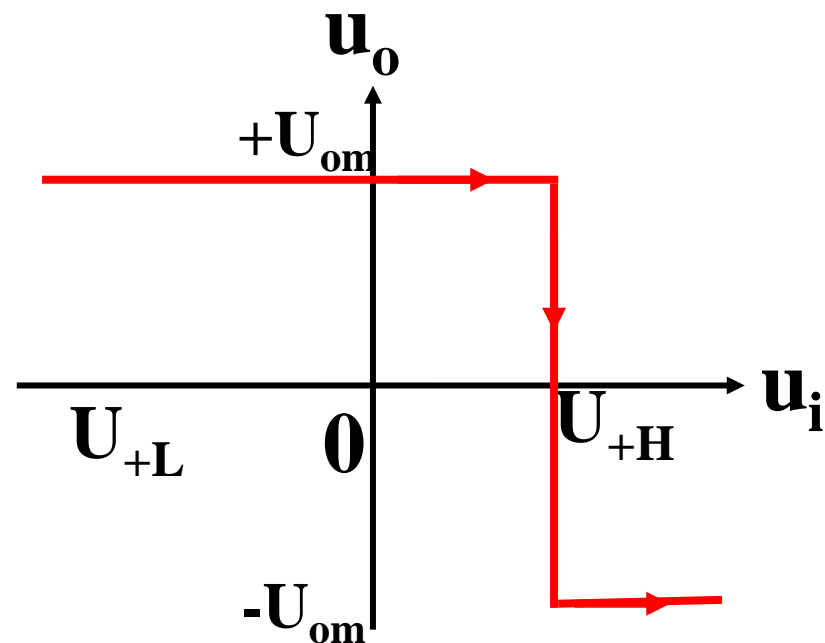
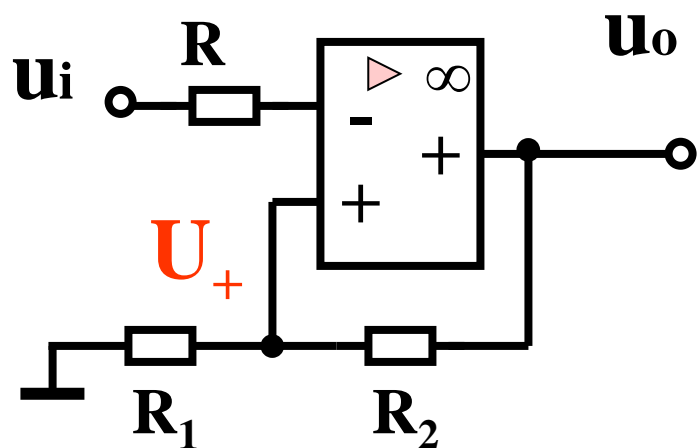
$$U_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = U_{+H}$$

3、当 $u_i \rightarrow +\infty$ ， u_o 负饱和 ($u_o = -U_{OM}$)：

$$U_+ = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = U_{+L}$$

三. 迟滞比较器（下行）

反相滞回比较器



$$U_+ = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = \begin{cases} U_{+H} \\ U_{+L} \end{cases}$$

初始: $u_i < 0$, $u_o = +U_{OM}$, $U_+ = U_{+H}$

设 $u_i \uparrow$, 当 $u_i > U_{+H}$,

u_o 从 $+U_{OM} \rightarrow -U_{OM}$

三. 迟滞比较器（下行）

反相滞回比较器

$$U_+ = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = \begin{cases} U_{+H} \\ U_{+L} \end{cases}$$

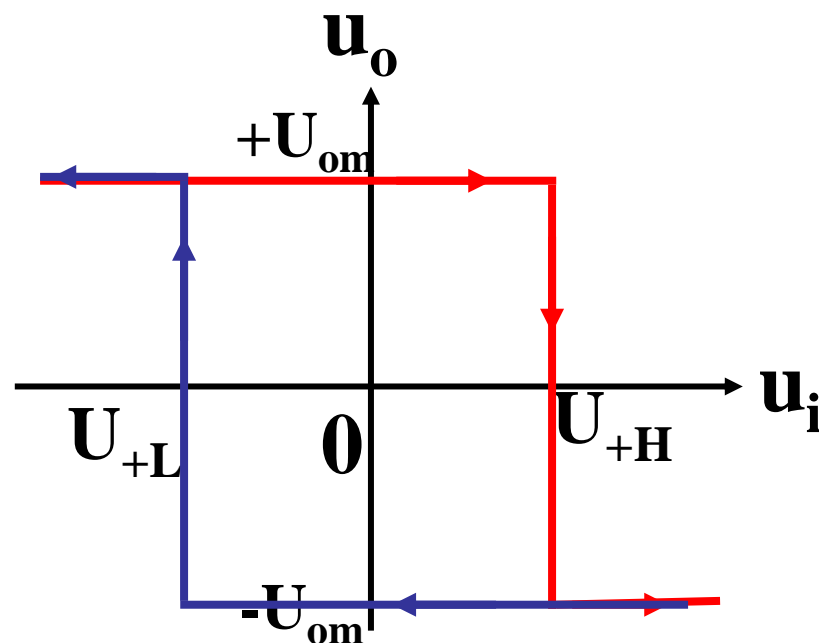
初始: $u_i < 0$, $u_o = +U_{OM}$, $U_+ = U_{+H}$

设 $u_i \uparrow$, 当 $u_i > U_{+H}$,

u_o 从 $+U_{OM} \rightarrow -U_{OM}$

这时, $u_o = -U_{OM}$, $U_+ = U_{+L}$

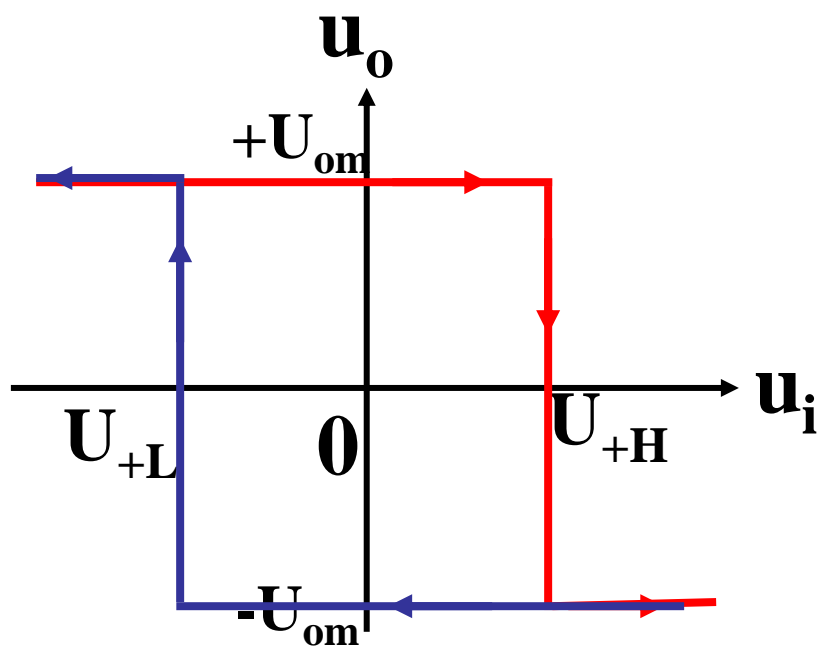
设 $u_i \downarrow$, 当 $u_i < U_{+L}$, u_o 从 $-U_{OM} \rightarrow +U_{OM}$



三、迟滞比较器（下行）

反相滞回比较器

传输特性



U_{+H} 上门限电压

U_{+L} 下门限电压

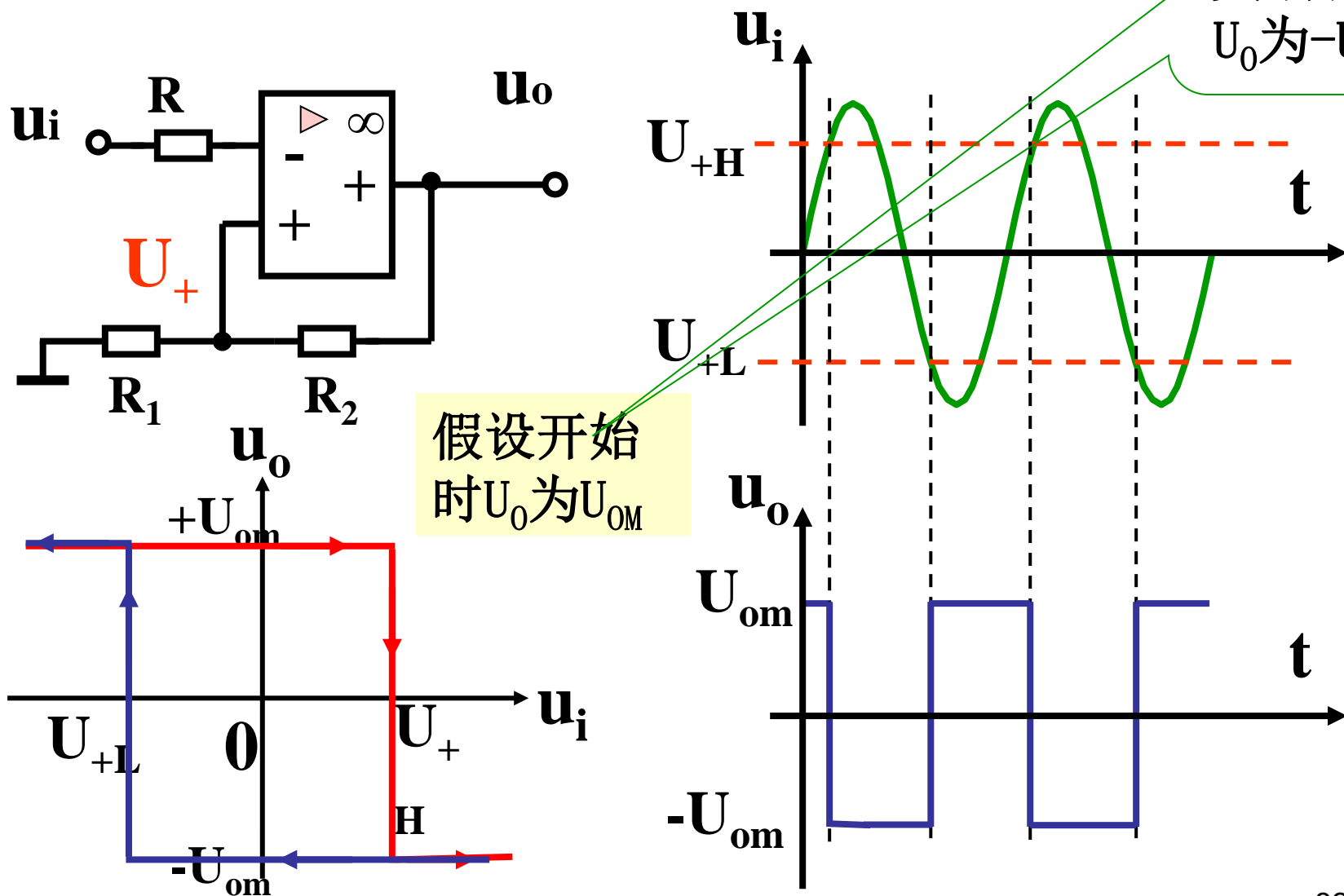
$U_{+H} - U_{+L}$ 称为回差

$$U_{+H} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om}$$

$$U_{+L} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om}$$

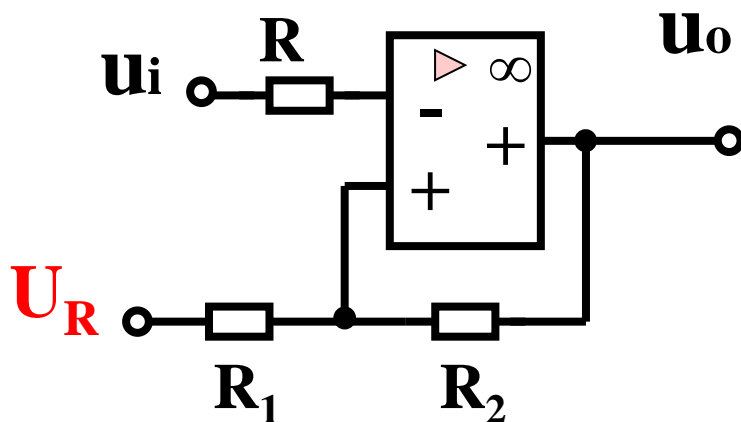
例: 设输入为正弦波, 画出输出的波形。

想想: 假设开始时 U_0 为 $-U_{OM}$



三. 迟滞比较器（下行）

加上参考电压后,

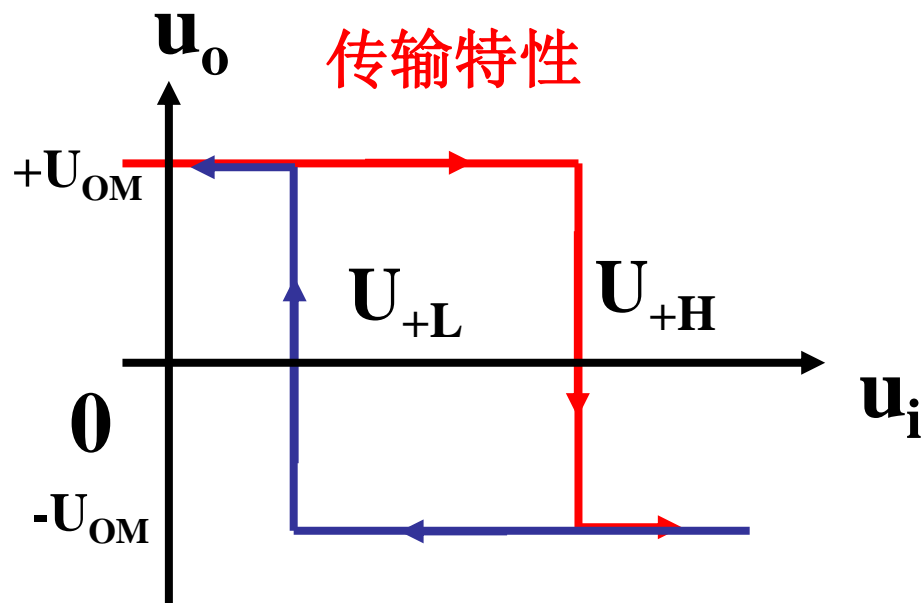
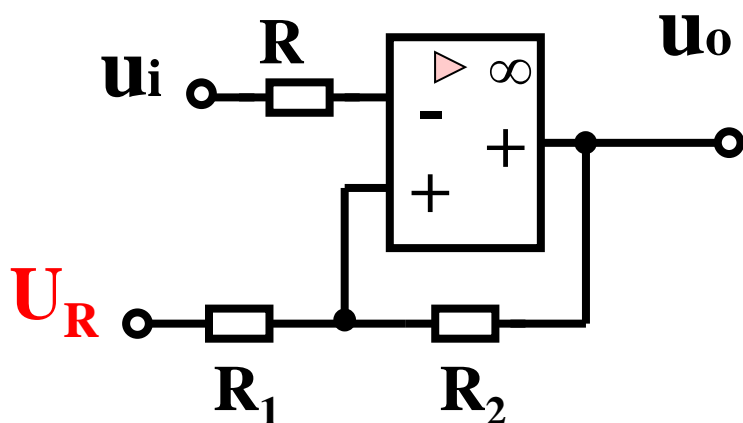


$$\frac{U_R - U_+}{R_1} = \frac{U_+ - U_0}{R_2}$$

$$U_+ = \frac{R_2 U_R + R_1 U_0}{R_1 + R_2}$$

三. 迟滞比较器（下行）

加上参考电压后,

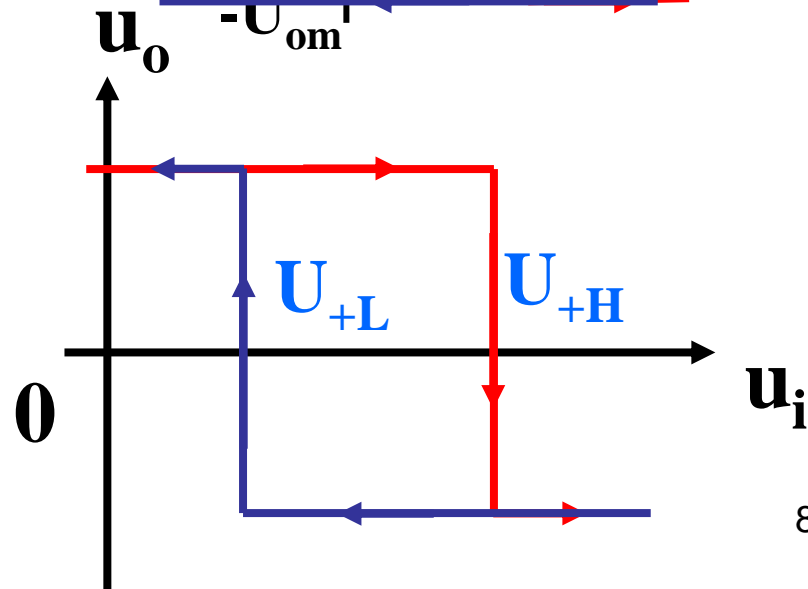
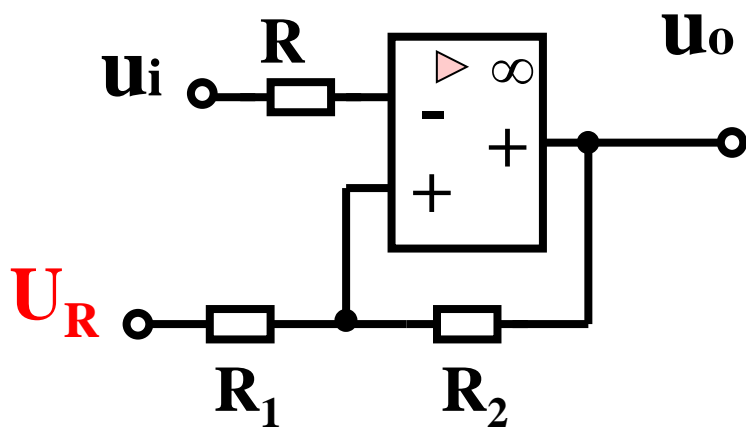
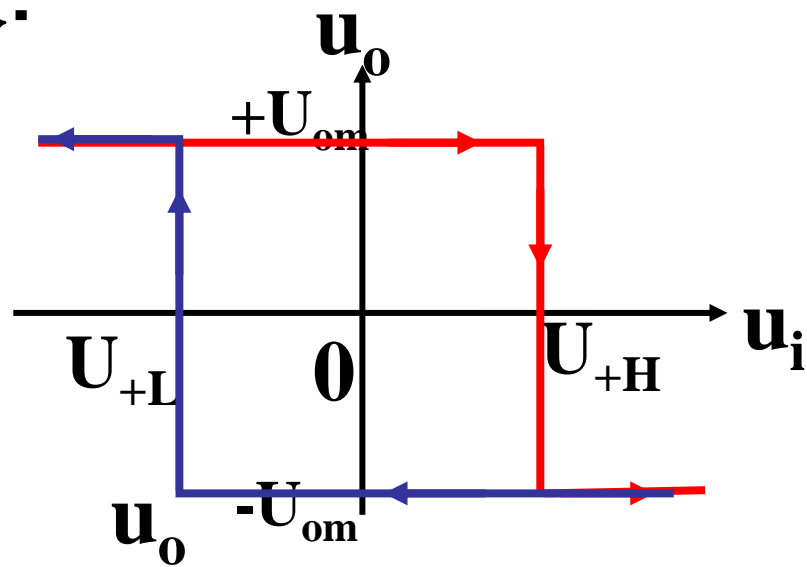
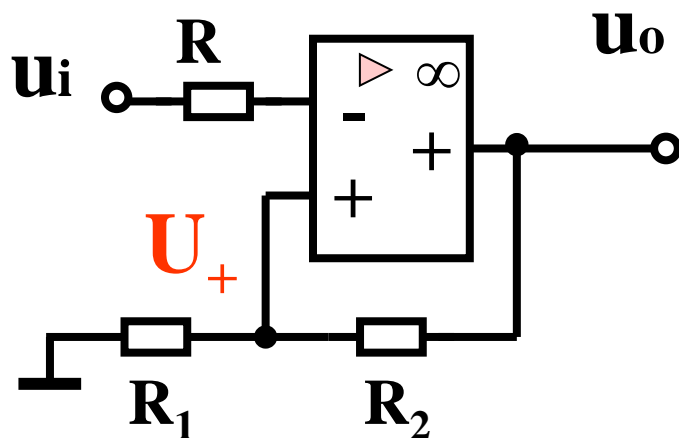


$$U_{+H} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R$$

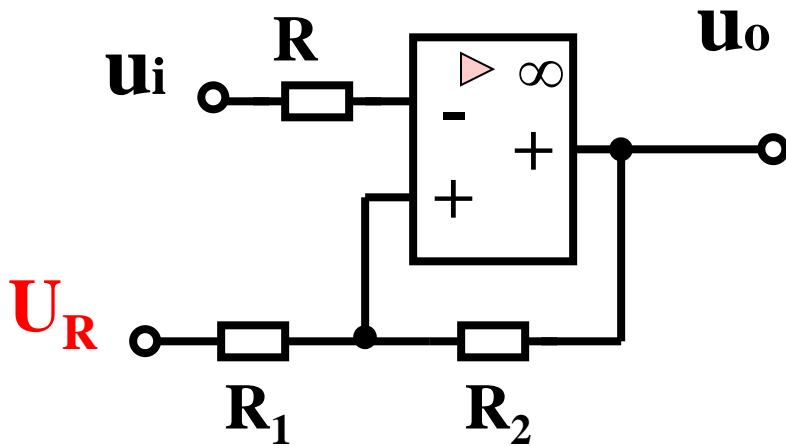
$$U_{+L} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R$$

三. 迟滞比较器（下行）

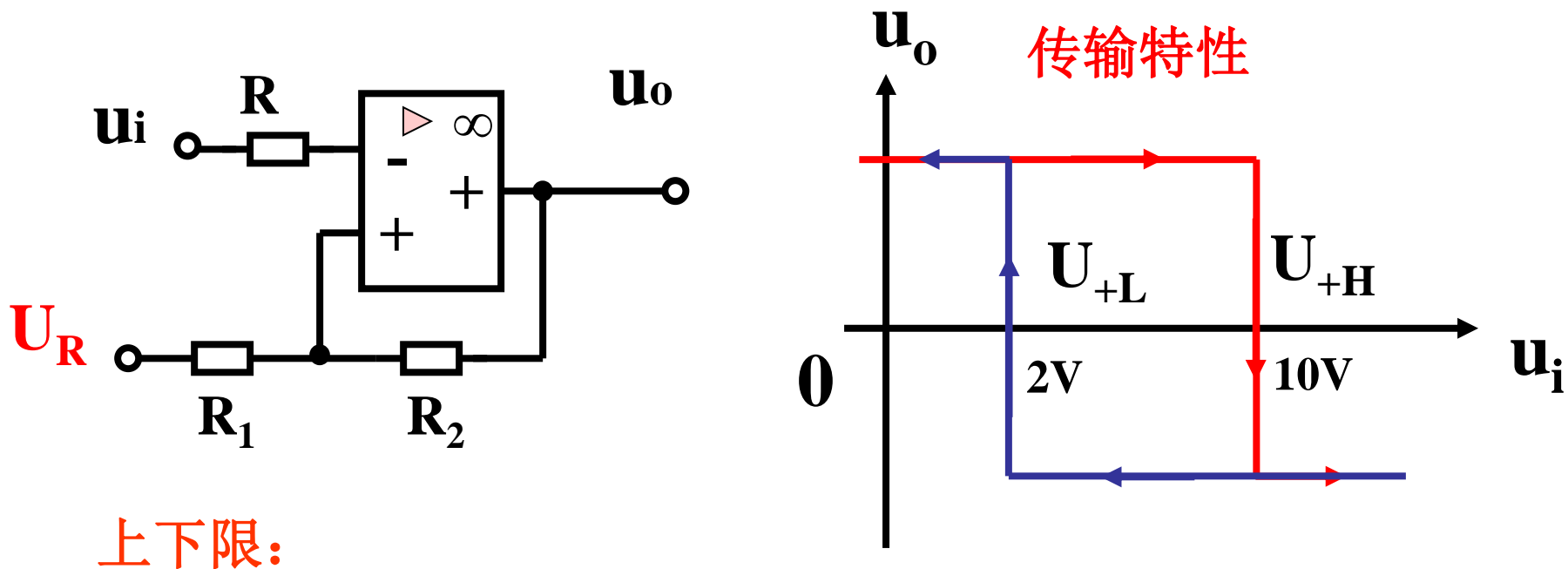
两种电路传输特性的比较:



例： $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=20\text{k}\Omega$, $U_{OM}=12\text{V}$, $U_R=9\text{V}$ 当输入 u_i 为如图所示的波形时，画出输出 u_o 的波形。



例： $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=20\text{k}\Omega$, $U_{OM}=12\text{V}$, $U_R=9\text{V}$ 当输入 u_i 为如图所示的波形时，画出输出 u_o 的波形。

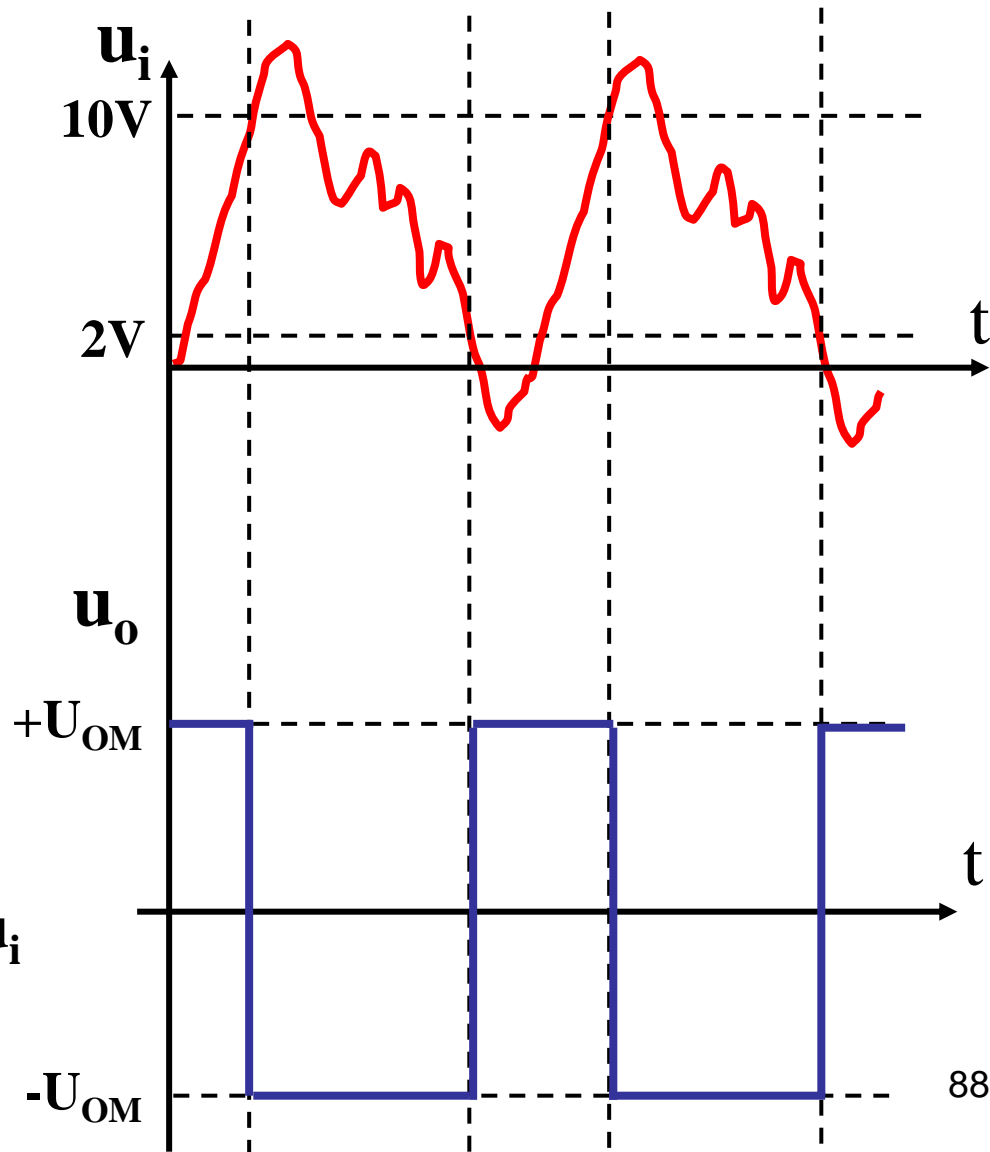
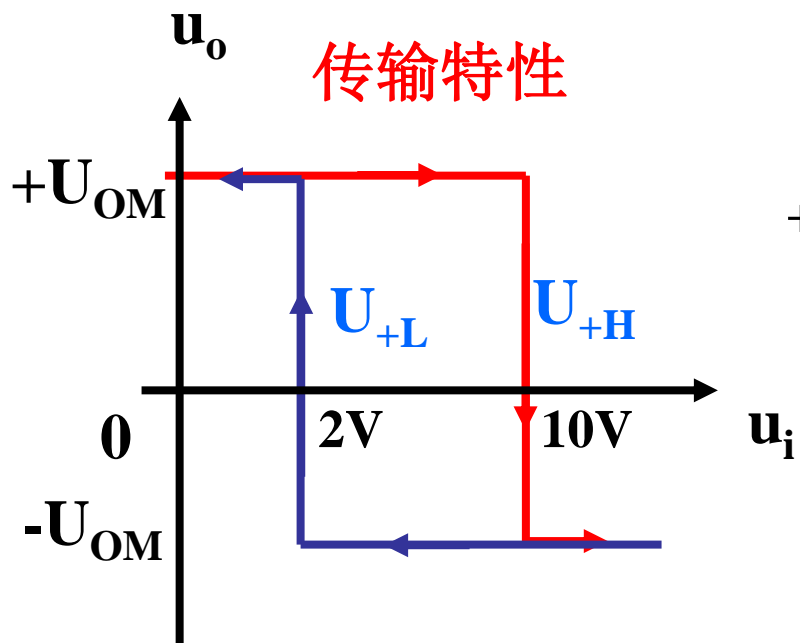
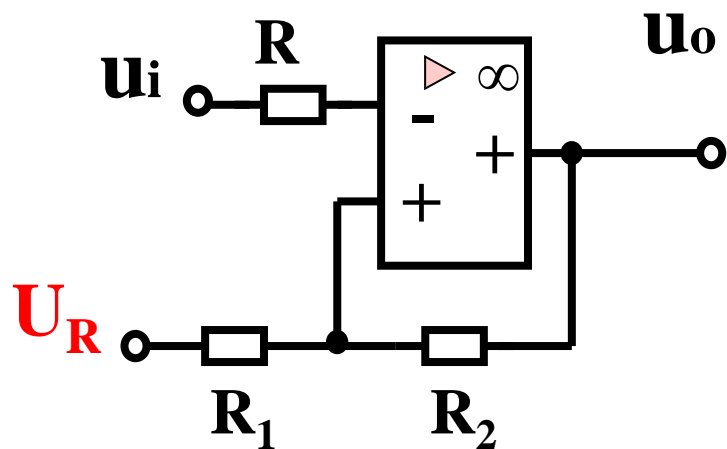


上下限：

$$U_{+H} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R = 10\text{V}$$

$$U_{+L} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R = 2\text{V}$$

三. 迟滞比较器（下行）

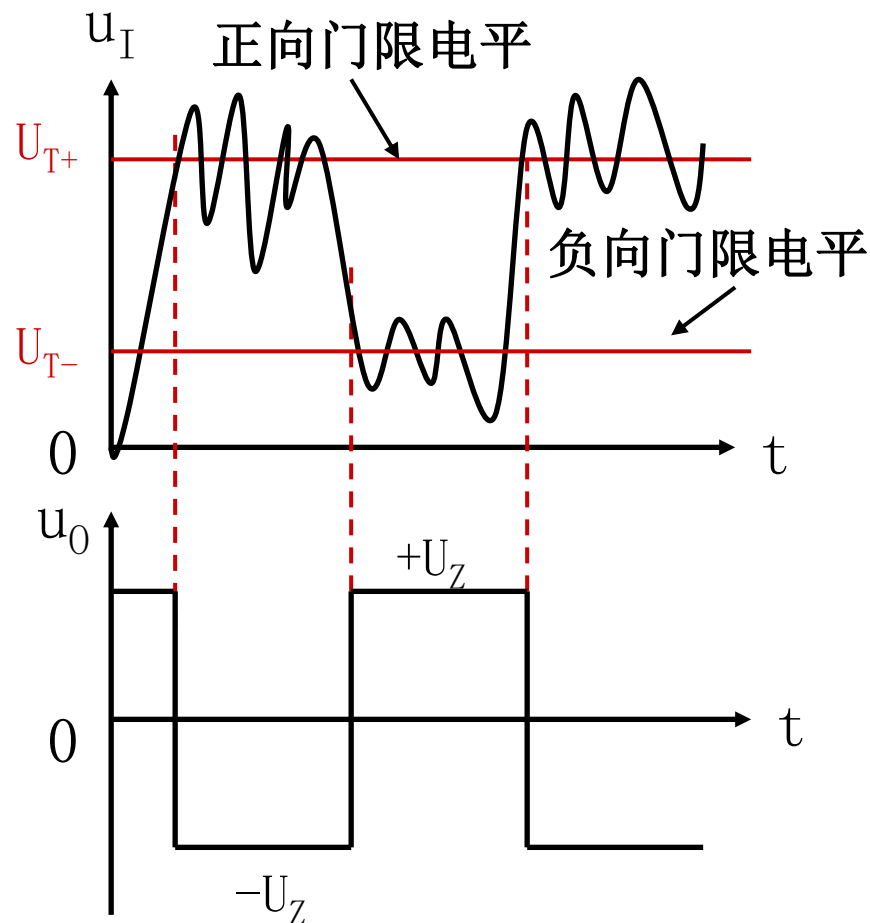


三. 迟滞比较器（下行）

主要优点

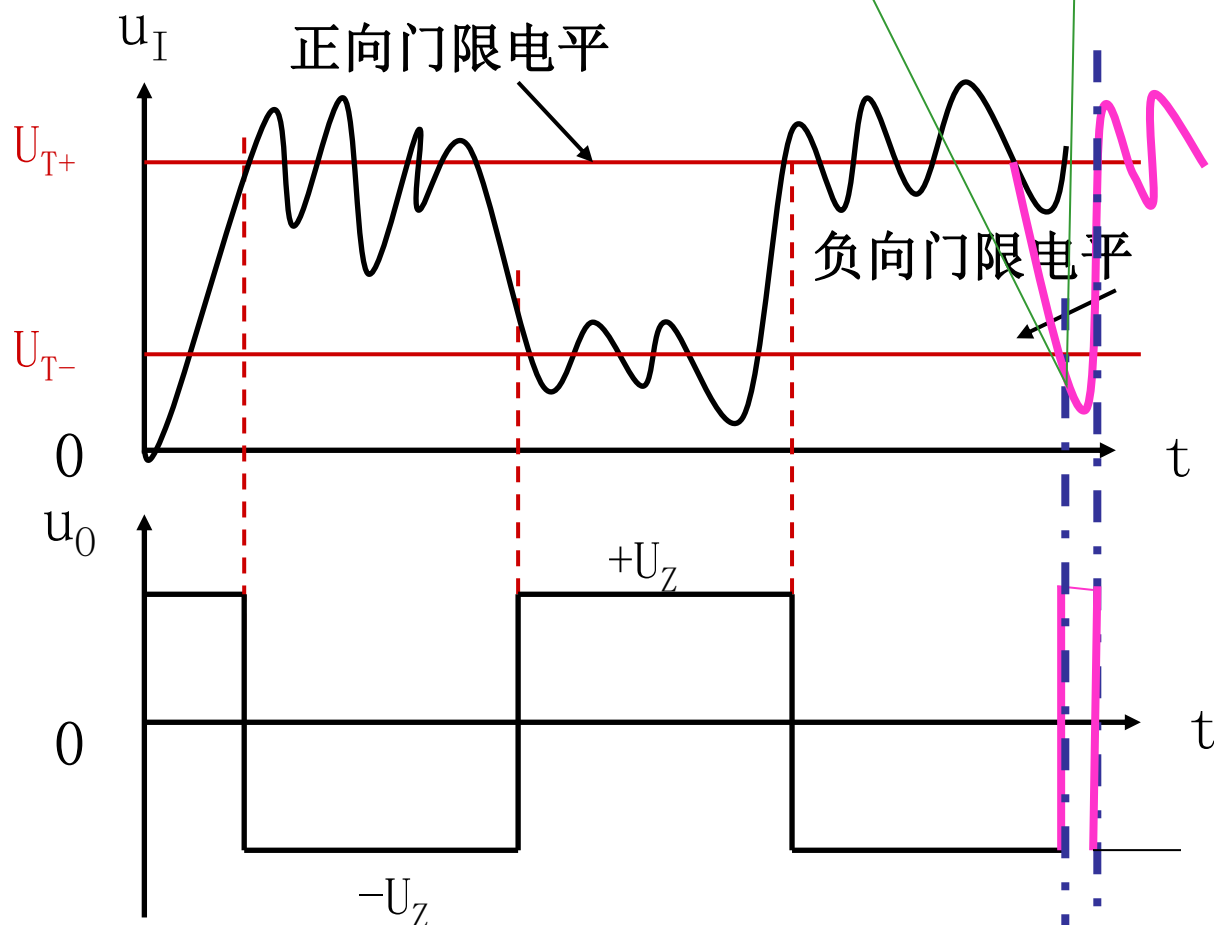
滞回比较器可以组成矩形波、锯齿波等非正弦信号发生电路，也可以实现波形变换。

与单限比较器相比，滞回比较器抗干扰能力强。 波形示意图如右所示：

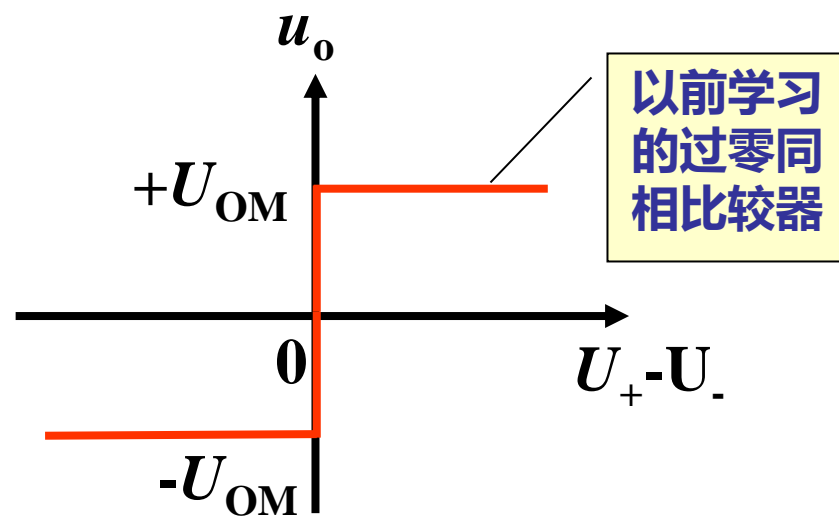
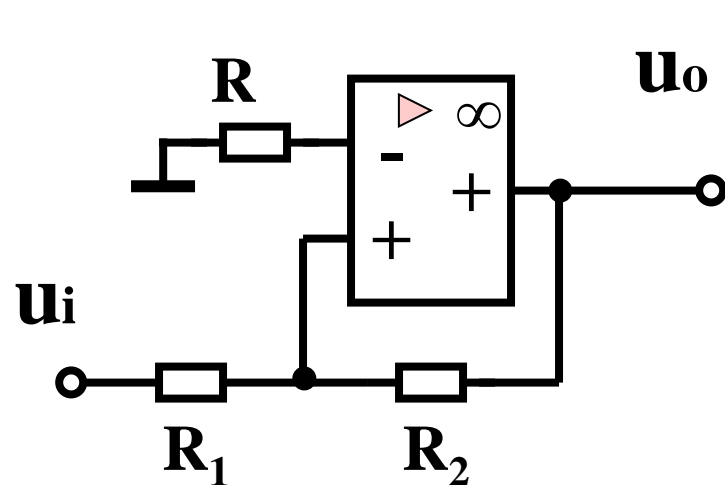


三. 迟滞比较器（下行）

干扰太大，滞回功能会失效

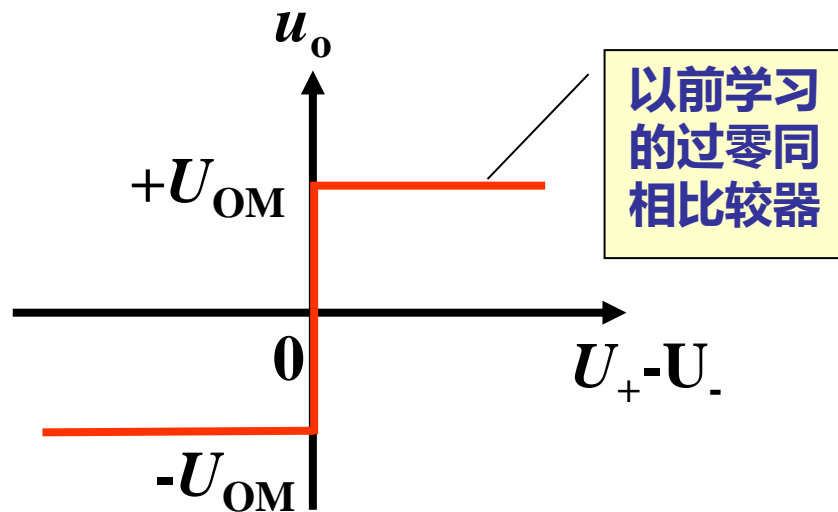
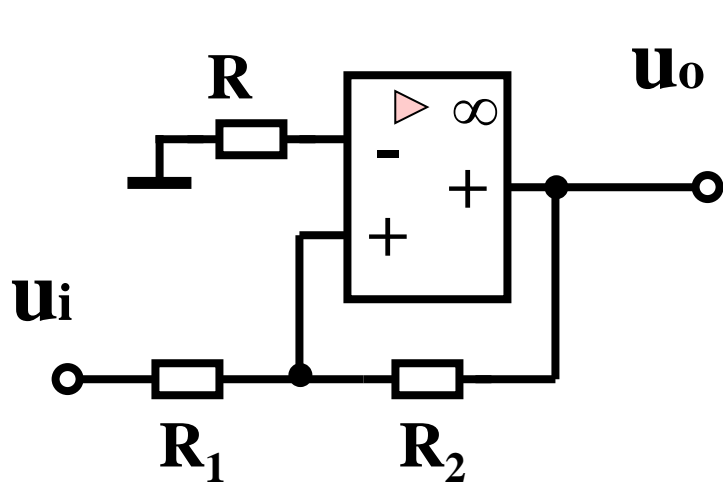


三. 迟滞比较器（上行） **（同相滞回比较器）**



- $u_i \rightarrow +\infty$ 时, $u_o = +U_{OM}$
- $u_i \rightarrow -\infty$ 时, $u_o = -U_{OM}$

三. 迟滞比较器（上行） （同相滞回比较器）



当 $u_o = -U_{OM}$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} u_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} \stackrel{\text{令}}{=} 0$$

$$u_i = U_{+H} = \frac{R_1}{R_2} U_{om}$$

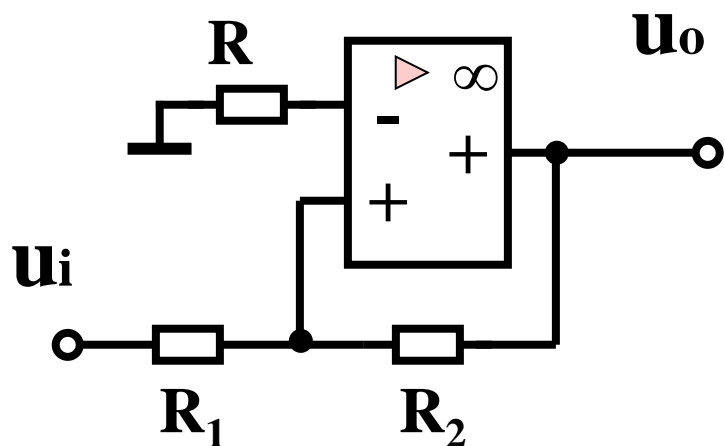
当 $u_o = +U_{OM}$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} u_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} \stackrel{\text{令}}{=} 0$$

$$u_i = U_{+L} = -\frac{R_1}{R_2} U_{om}$$

三. 迟滞比较器（上行） **（同相滞回比较器）**

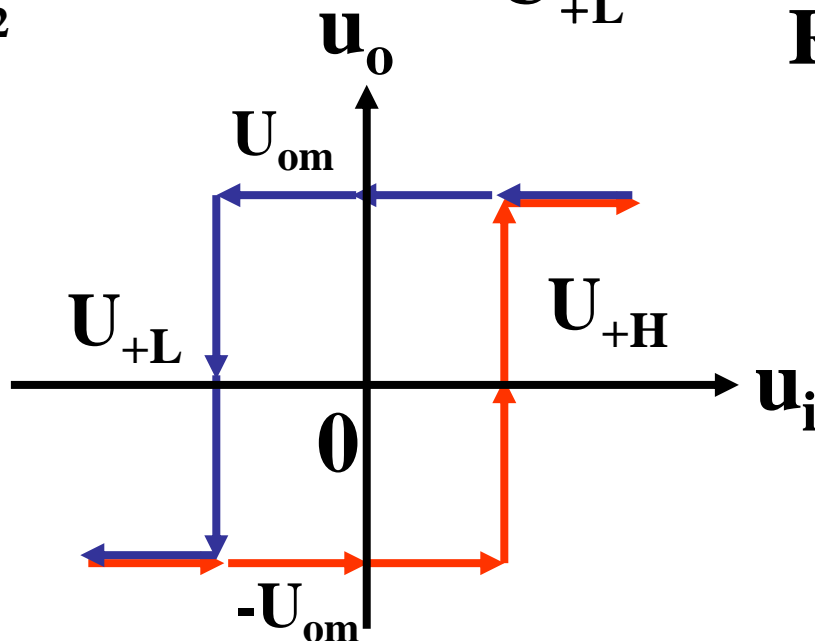
上下门限电压



$$U_{+H} = \frac{R_1}{R_2} U_{om}$$

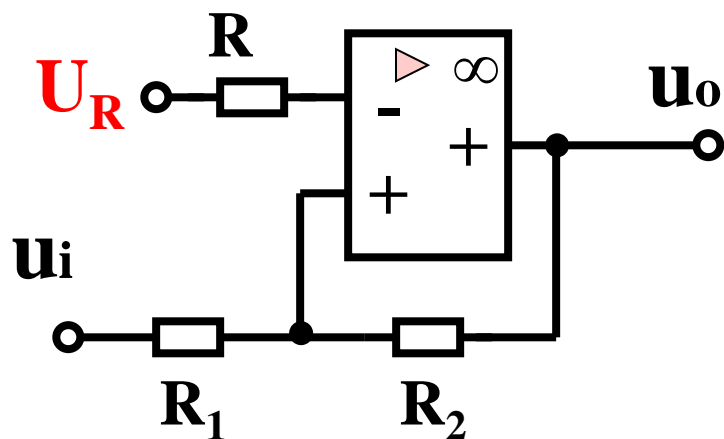
$$U_{+L} = -\frac{R_1}{R_2} U_{om}$$

传输特性曲线



加上参考电压后的迟滞比较器(上行)

上下门限电压



$$U_{+H} = \frac{R_1}{R_2} U_{om} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_R$$

$$U_{+L} = -\frac{R_1}{R_2} U_{om} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_R$$

当 $u_o = -U_{OM}$

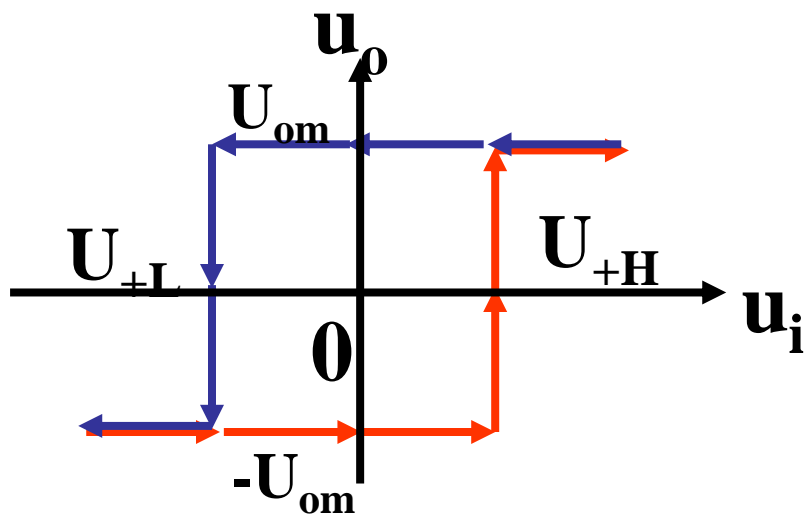
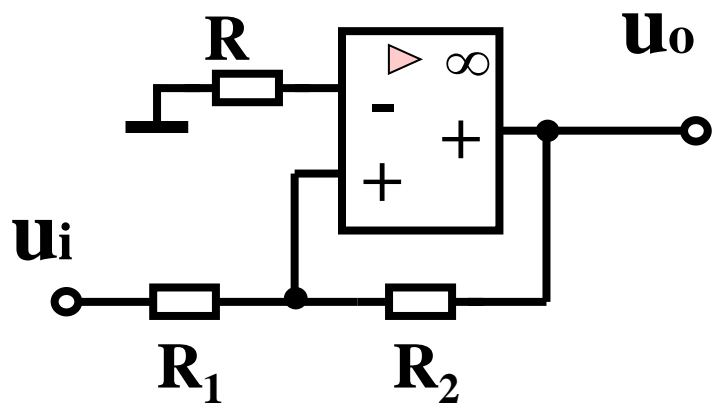
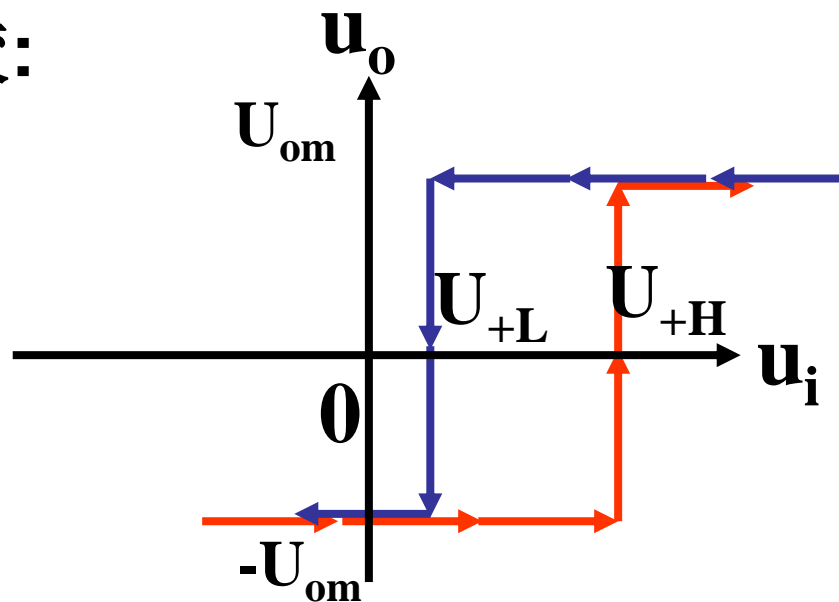
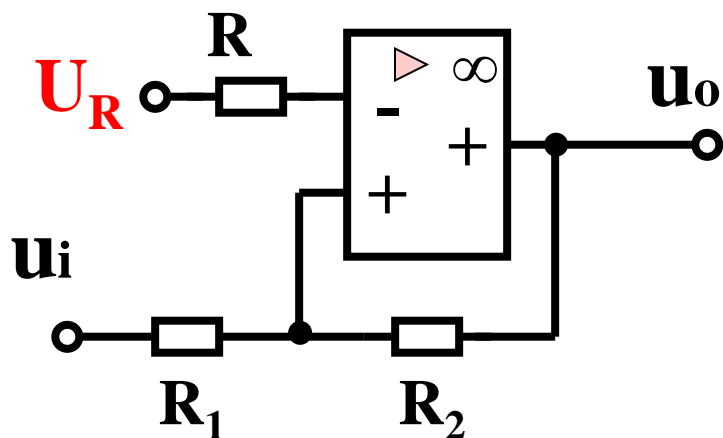
$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} u_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = U_R$$

当 $u_o = +U_{OM}$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} u_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{om} = U_R$$

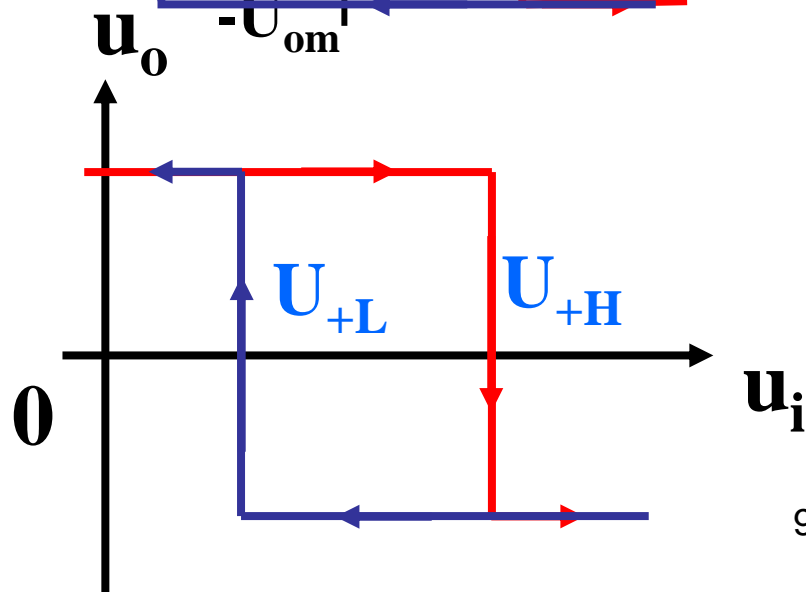
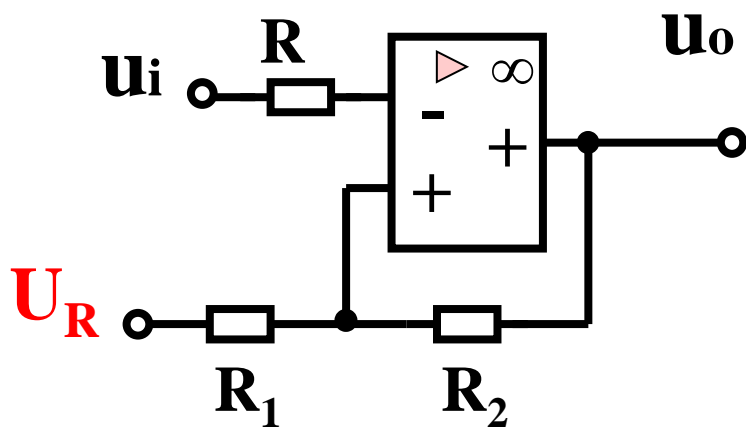
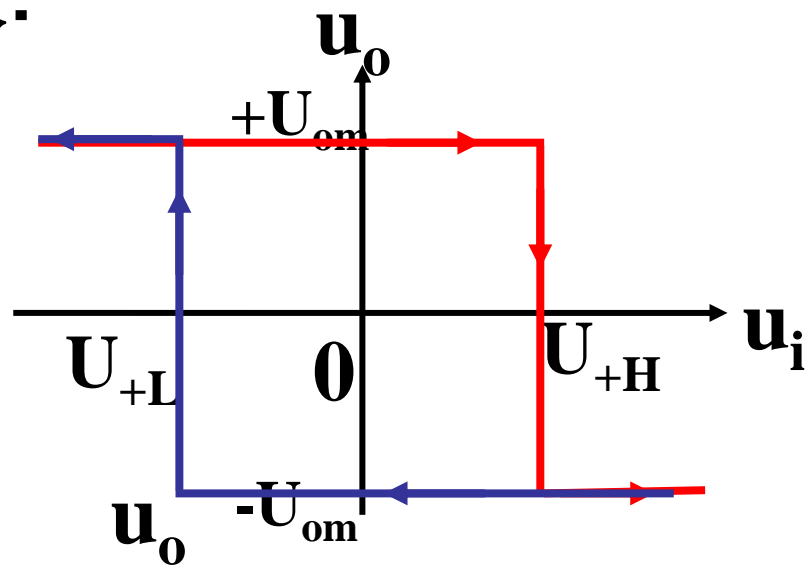
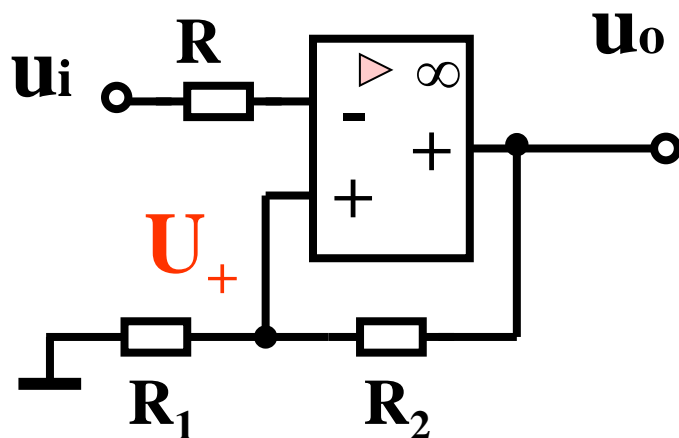
三. 迟滞比较器（上行）

两种电路传输特性的比较:



三. 迟滞比较器（下行）（回顾）

两种电路传输特性的比较:



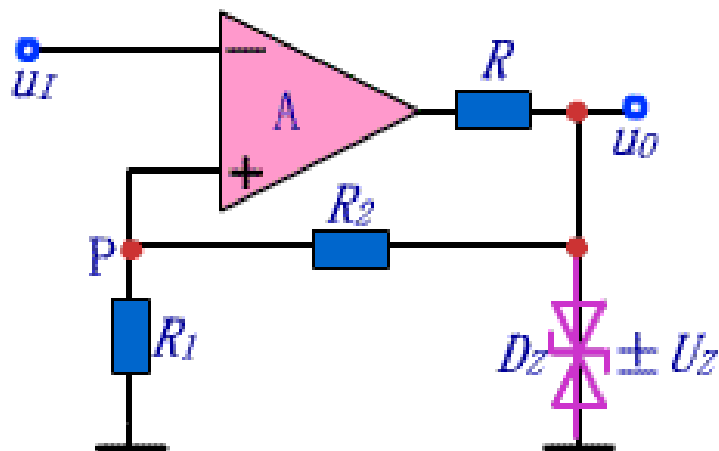
三. 迟滞比较器（上行）



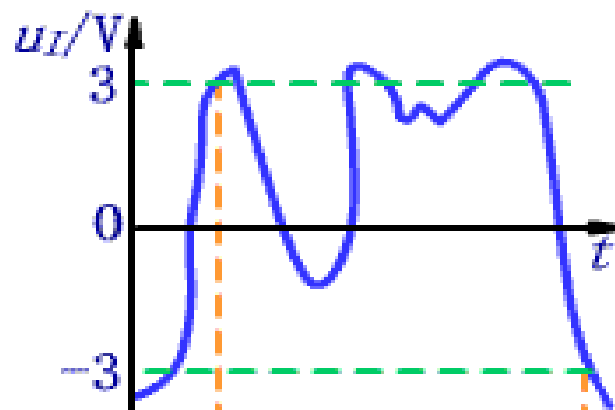
注意： 为了正确画出电压传输特性，必须求出以下三个要素：

- 输出电压高电平 U_{OH} 和低电平 U_{OL} 的数值；
- 阈值电压的数值 U_H (U_{+H} 、 U_{+L})；
- 当 u_i 变化且经过 U_H 时， u_o 跃变。跃变的方向决定于同相比较器还是反相比较器。

例：在左图（a）所示电路中，已知 $R_1=50\text{k}\Omega$ ， $R_2=100\text{k}\Omega$ ，稳压管的稳定电压 $U_Z=\pm 9\text{V}$ ，输入电压 u_I 的波形如右图（a）所示，试画出输出电压 u_O 的波形。



(a) 滞回比较器电路



(a) 输入电压波形

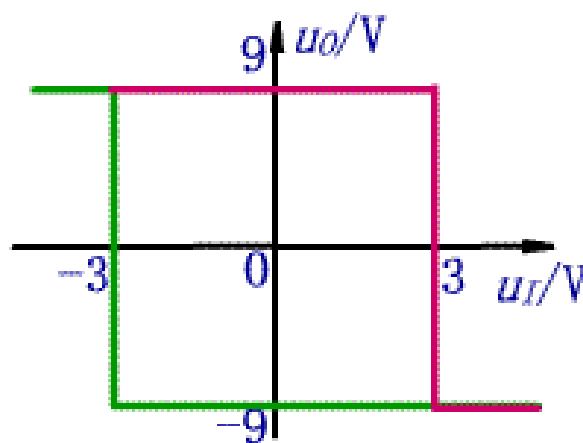
解：输出高电平和低电平分别为 $U_Z = \pm 9V$ ，阈值电压

$$\pm U_T = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z = \left[\frac{50}{50 + 100} (\pm 9) \right] V = \pm 3V$$

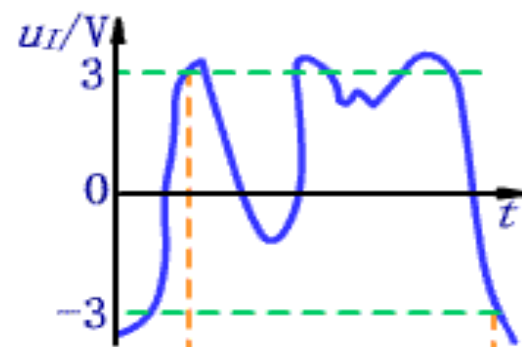
画出电压传输特性如图 (c) 所示。根据电压传输特性便可画出 u_o 的波形，如图 (b) 所示。从波形可以看出， u_I 的变化在 $\pm U_T$ 之间时， u_o 不变，表现出一定的抗干扰能力。

两个阈值电压的差值愈大，电路的抗干扰能力愈强，但灵敏度变差；因此应根据具体需要确定差值的大小。

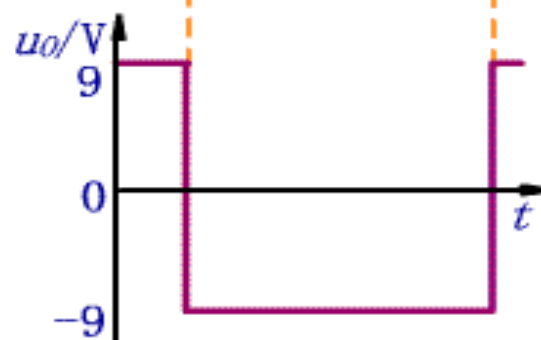
三要素法：



(c) 电压传输特性



(a) 输入电压波形



(b) 输出电压波形

例7.2.3

小结

- 集成运算放大器的组成
 - 差分输入放大电路（抑制零漂）
- 理想运算放大器
 - 线性区（满足虚短，虚断，条件：负反馈）
 - 饱和区（正负饱和，最大输出电压小于正负电源电压，满足虚断，不满足虚短，条件：开环或者正反馈）
- 理想运算放大器应用
 - 同相比例放大器（负反馈，同相输入端输入信号）
 - 反向比例放大器（负反馈，反相输入端输入信号）
 - 单门限比较器（过零比较器，灵敏度高，抗干扰能力差）
 - 双门限比较器（迟滞比较器，灵敏度低，抗干扰能力强）