

第七章

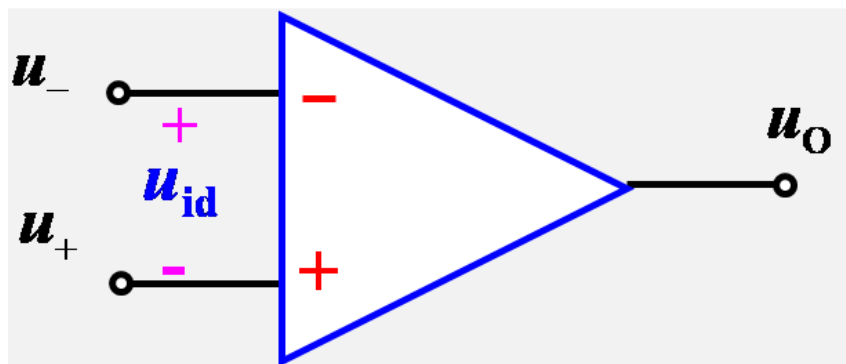
集成运算放大器的应用

本章教学基本要求

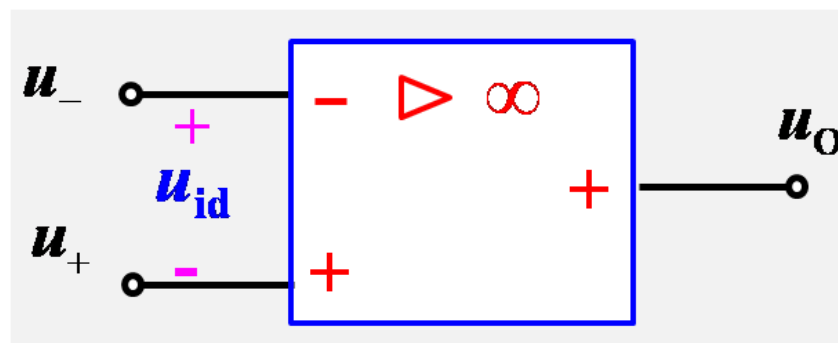
- (1) 掌握理想集成运放概念；**
- (2) 掌握基本应用电路（反/同相放大器）的分析方法；**
- (3) 掌握加法器、减法器的结构、工作原理和分析方法；**
- (4) 了解典型电压比较器的电路组成、工作原理和性能特点。**

§5.8 集成运放的特性及其理想化

一. 电路符号



旧符号



新符号

集成运放的净输入电压： $u_{id} = u_- - u_+$

集成运放的净输入电流： i_- 或 i_+

二. 主要参数

1. 静态参数

(1). 输入失调电压 U_{IO} :

为了使输出电压为零，在输入端所需要加的补偿电压。

(2). 输入失调电压温漂 α_{UIO} $\alpha_{UIO} = \frac{dU_{IO}}{dT}$

(3). 输入失调电流 I_{IO} :

当输出电压等于零时，两个输入端偏置电流之差，即

$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

(4). 输入失调电流温漂 α_{IIO} $\alpha_{IIO} = \frac{dI_{IO}}{dT}$

(5). 输入偏置电流 I_{IB}

输出电压等于零时，两个输入端偏置电流的平均值。

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

(6). 最大共模输入电压 U_{icm}

输入端所能承受的最大共模电压。

(7). 最大差模输入电压 U_{idm}

反相输入端与同相输入端之间能够承受的最大电压。

2. 动态参数

(1). 开环差模电压增益 A_{ud}

(2). 差模输入电阻 r_{id}

(3). 共模抑制比 $K_{CMR}=20\lg |A_{ud}/A_{uc}|$ (dB)

(4). -3 dB带宽

(5). 单位增益带宽 BW_G

开环差模电压增益 A_{ud} 降至1或(0dB)时的频带宽度

(6). 转换速率 S_R

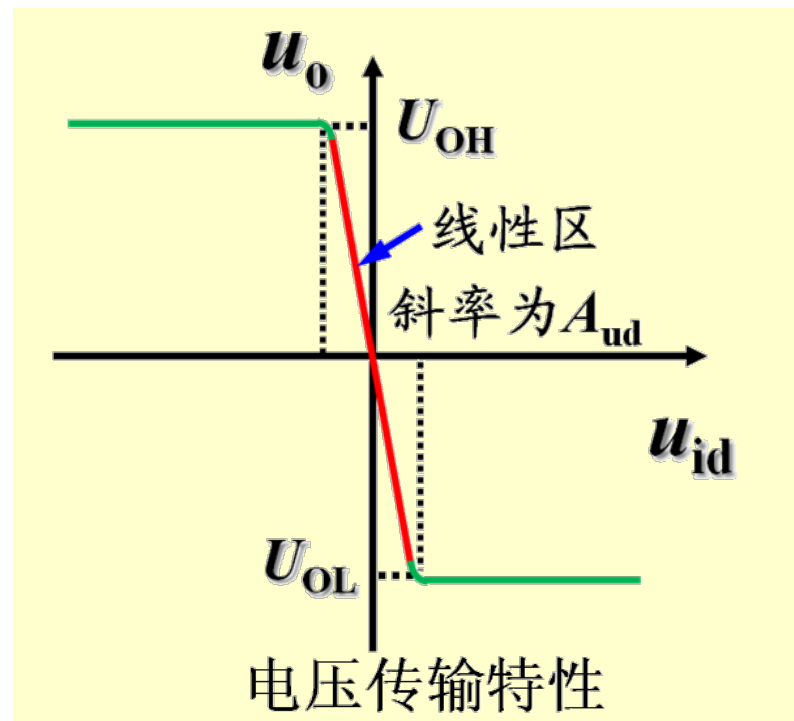
额定负载条件下，输出电压的最大变化率。

三. 工作状态

集成运放的工作状态分为
线性区和**非线性区**。

线性区: 输出电压 u_o 与输入差模电压 $u_{id}=u_- - u_+$ 存在着线性运算关系。即

$$u_o = A_{ud} \cdot u_{id} = A_{ud} (u_- - u_+)$$

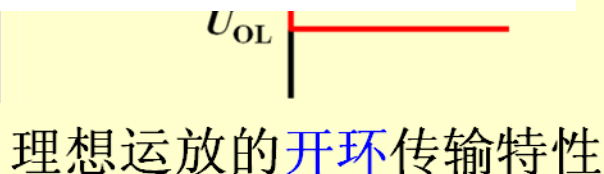


开环差模电压增益 A_{ud} 越大，运放的**线性区域**越小。

由于运放具有开环放大倍数很大，输入电阻高，输出电阻小等特性，在分析时常将其理想化，称为理想运放。

一、理想运放的技术指标

1. 开环差模电压增益 $A_{ud} \rightarrow \infty$;



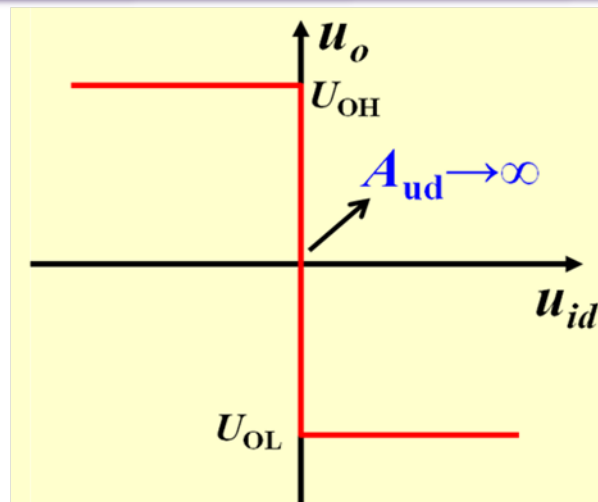
(1) 运放的线性区域很小;

(2) 由图知，运放处于线性区间时， $A_{ud} \rightarrow \infty$ ， $u_{id} = u_- - u_+ = 0$
 $\Rightarrow u_- = u_+$ ，即存在“虚短”现象。

(3) 由图知，运放处于非线性区间时， $u_{id} = u_- - u_+ \neq 0$
 $\Rightarrow u_- \neq u_+$ ，即不存在“虚短”现象。

2. 差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$:

输入端不容许任何电流流入，
即 u_+ 与 u_- 两端点的电流恒为0；



理想运放的开环传输特性

即理想运放在线性和非线性区域都有“虚断”现象：

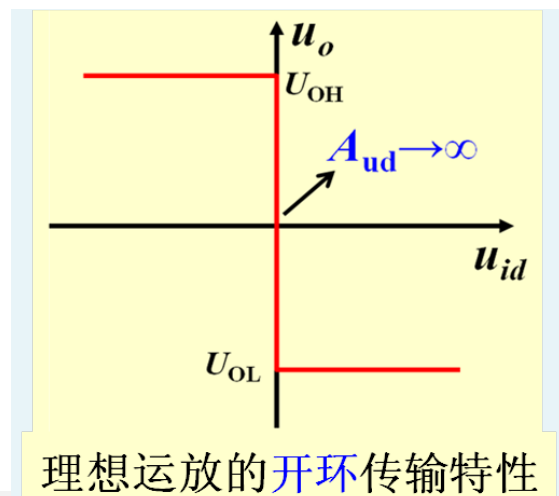
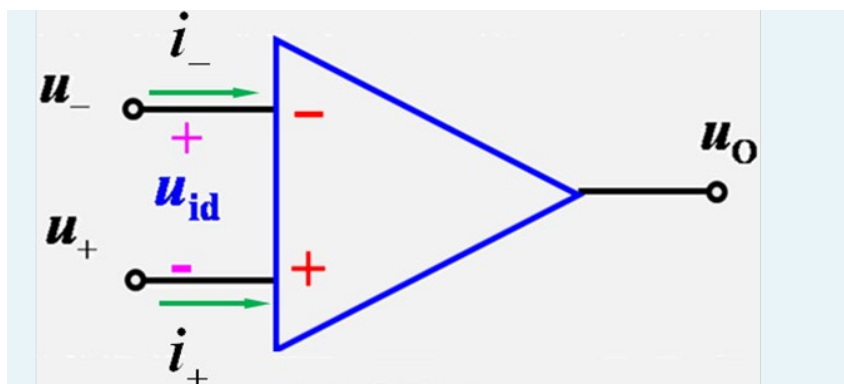
$$i_- = i_+ = 0 \text{ --- 虚断}$$

3. 差模输出电阻 $R_{od} \rightarrow 0$: 输出端是一个完美的电压源，

无论流至放大器负载的电流如何变化，放大器的输出电压恒为一定值；

4. 共模抑制比 $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$: 理想运放只能对 u_+ 与 u_- 两端点电压的差值有反应, 亦即只放大 $(u_- - u_+)$ 的部份。对于两输入信号的相同的部分 (即共模信号) 将完全忽略不计;
5. -3dB 带宽 $\text{BW} \rightarrow \infty$: 对于任何频率的输入信号都将以相同的差动增益放大;
6. 输入失调电流 I_{IO} 、失调电压 U_{IO} 和它们的温漂均 $\rightarrow 0$;
7. 输入偏置电流 $I_{\text{IB}} \rightarrow 0$;
8. 转换速率 $S_{\text{R}} \rightarrow \infty$ 。

二、理想运放工作在线性区时的特点



(1). $\because u_0$ 为有限值, $A_{ud} \rightarrow \infty$, $\therefore u_{id} = u_- - u_+ = 0$, 即

$u_- = u_+$ --- 虚短

(2). $\because R_{id} \rightarrow \infty$, \therefore 两个输入端均没有电流流入, 即

$i_- = i_+ = 0$ --- 虚断

“虚短”和“虚断”是分析理想运放工作在线性区的重要结论。

理想运放工作在非线性区的特点：

1. 开关特性 (“离散” 特性)

(即输出、输入不呈线性关系)

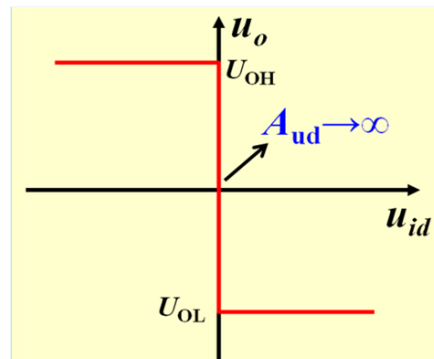
当 $u_- < u_+$ 时, $u_o = U_{oH}$

当 $u_- > u_+$ 时, $u_o = U_{oL}$

不存在 “虚短” 现象

2. $i_+ = i_- \approx 0$

仍存在 “虚断” 现象



理想运放的开环传输特性

通常为了保证运放工作在线性区间(扩大线性区域), 引入深度负反馈。

为保证运放工作在非线性区, 运放开环工作或引入正反馈!



集成运放的应用

线性应用

虚短 $u_+ = u_-$ 虚断 $i_+ = i_- = 0$ 信号运算电路

精密二极管电路：深度负反馈

有源滤波器

非线性应用

虚断 $i_+ = i_- = 0$ 电压比较器

张弛振荡器

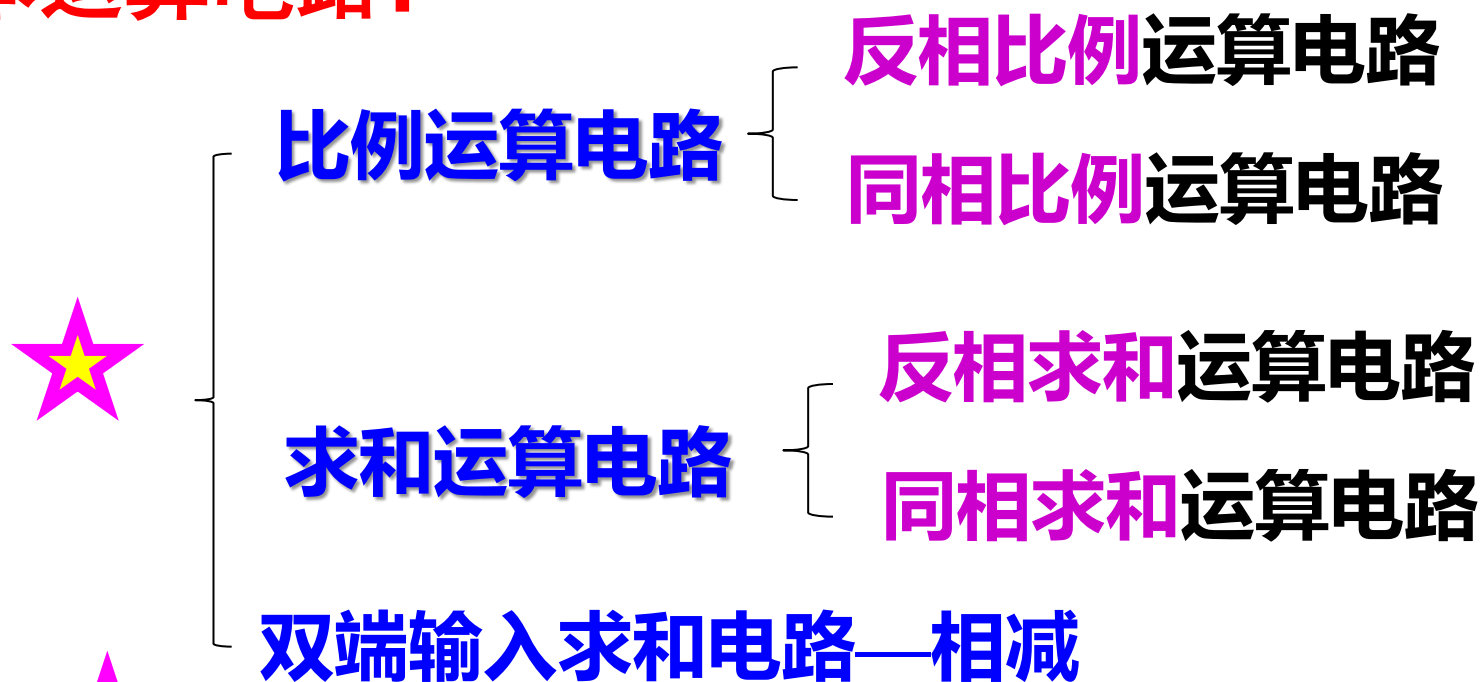
：开环状态或正反馈

确定运放工作区的方法：判断电路中是否有负反馈。

若有负反馈，则运放工作在线性区；

若无负反馈，或有正反馈，则运放工作在线性区。

基本运算电路：



思路：★

(1) 判断反馈类型，

(2) 若为负反馈，则运放处于线性区间，即有“虚短、虚断”。

(3) 标注电流流向，运用“虚短、虚断”列相关 u_o 方程。

§7.1 基本运算电路

一、比例运算电路

1. 反相比例运算电路

(1). 闭环电压增益 A_{uf}

当 u_I 较小时，运放工作在线性区

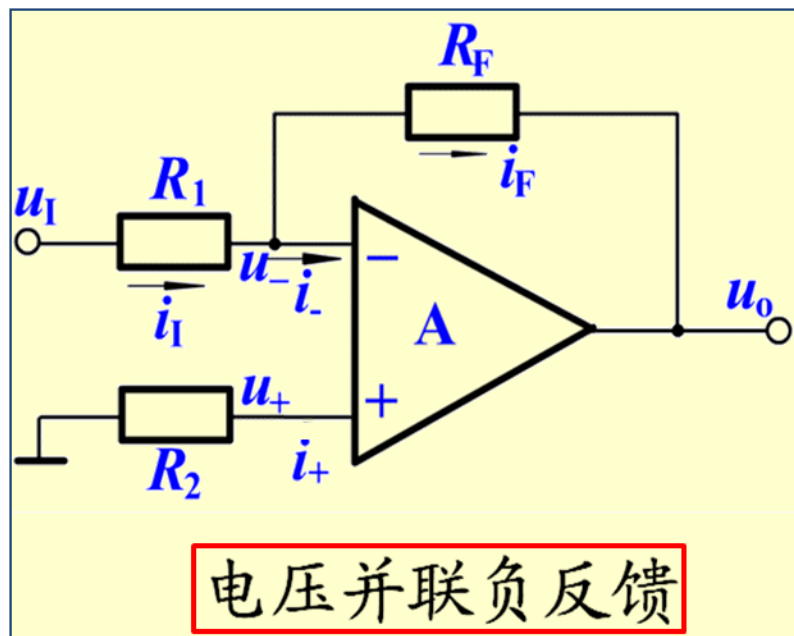
∴ “虚断 ($i_+ = 0$)”， ∴ $u_+ = 0$;

∴ “虚短 ($u_- = u_+$)”， ∴ $u_- = 0$ ，即

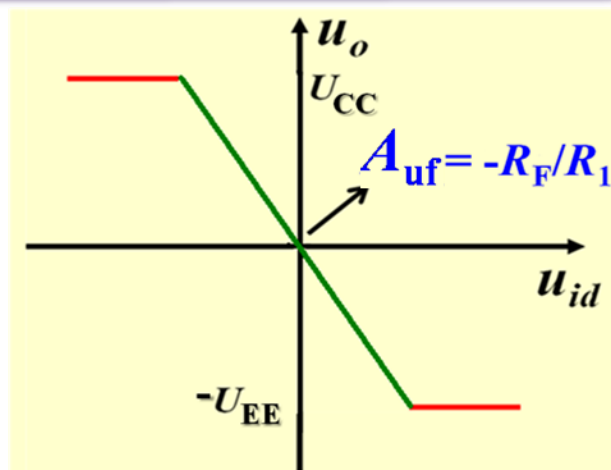
反相输入端的电位 = 0 — “虚地”

∴ $i_I = i_- + i_F = i_F$ ，即 $\frac{u_I - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$

∴ $A_{uf} = \frac{u_o}{u_I} = -\frac{R_F}{R_1}$ — 负常数



当 u_i 较大时，运放工作进入非线性区，输出电压不再随输入电压的增大而增大，而是保持一个定值。故理想反相比例放大电路的闭环传输特性如右图。



理想运放的闭环传输特性

可见，负反馈的引入扩大了理想集成运放的线性区域。

(2). 闭环输入电阻 R_{if}

∵反相输入端“虚地”， ∴此电路的输入电阻 $R_{if}=R_1$ 。
(并联负反馈使输入电阻减小)

(3). 闭环输出电阻 R_{of}

∵理想运放的输出电阻 $R_{od}=0$ ，而电压负反馈使输出电阻减小， ∴此电路的输出电阻为 $R_{of}=0$ 。

2. 同相比例运算电路

(1). 电压增益 A_{uf}

当 u_I 较小时，运放工作在线性区

∴ “虚断 ($i_+ = 0$)”，∴ $u_+ = u_I$;

∴ “虚短 ($u_- = u_+$)”，∴ $u_- = u_I$ ，即

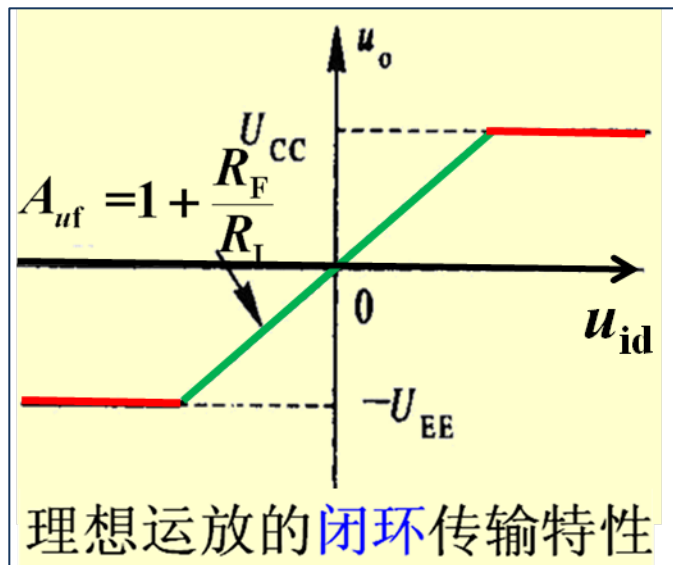
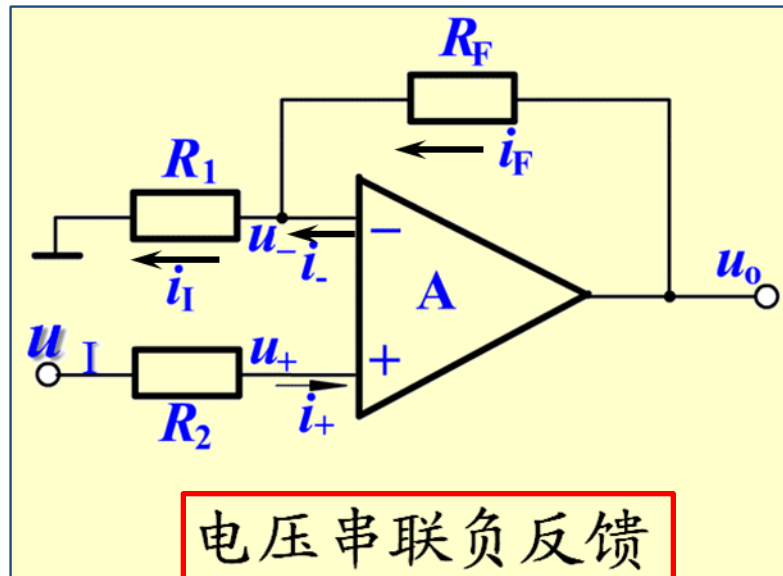
∴ $i_1 = i_- + i_F = i_F$ ，即 $\frac{u_-(u_I) - 0}{R_1} = \frac{u_0 - u_-(u_I)}{R_F}$

∴ $A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ — 正常数

当 u_I 较大时，输出电压保持定

值。故理想同相比例放大电

路的闭环传输特性如右下图。



(2). 闭环输入电阻 R_{if}

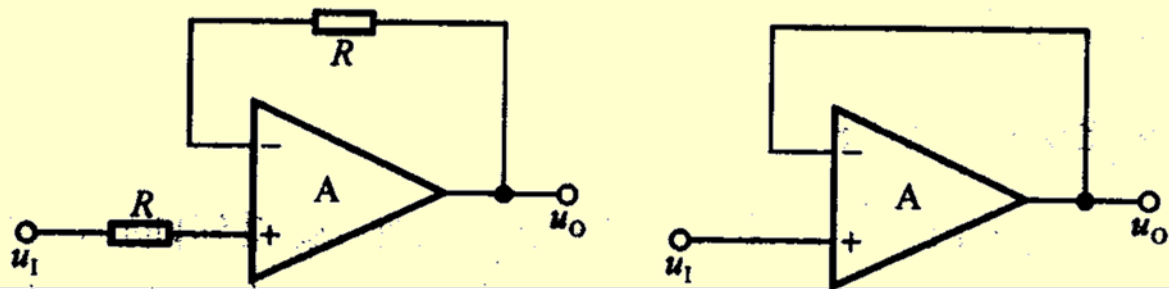
\because 理想运放的输入电阻 $R_{id} = \infty$ ，而串联负反馈会使输入电阻增大， \therefore 闭环 $R_{if} = \infty$ 。

(3). 闭环输出电阻 R_{of}

\because 理想运放的输出电阻 $R_{od} = 0$ ，而电压负反馈使输出电阻减小， \therefore 此电路的输出电阻为 $R_{of} = 0$ 。

同相输入比例运算电路的特例：电压跟随器

当 $R_F = 0$ 或 $R_1 = \infty$ 时， $u_0 = u_I, A_{uf} = 1$



二、求和运算电路

1. 反相求和运算电路

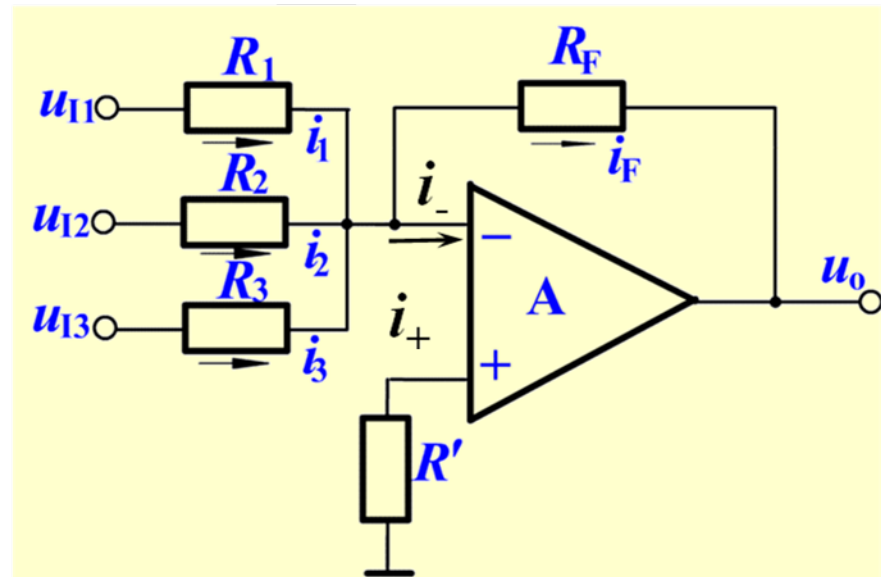
∵ “虚断 ($i_+ = 0$)” , ∴ $u_+ = 0$;

∵ “虚短 ($u_- = u_+$)” , ∴ $u_- = 0$,

又 ∵ $i_1 + i_2 + i_3 = i_- + i_F = i_F$, 即

$$\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} = -\frac{u_O}{R_F}$$

$$\therefore u_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_{I1} + \frac{R_F}{R_2}u_{I2} + \frac{R_F}{R_3}u_{I3}\right)$$

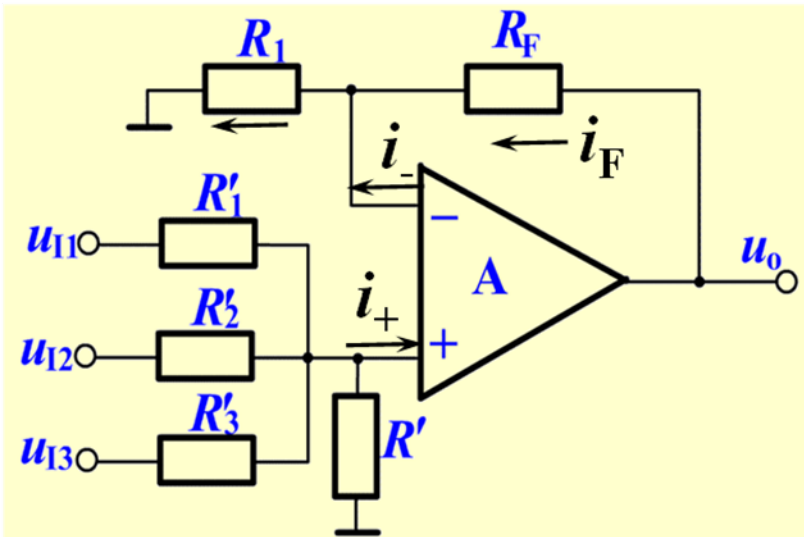


并联电压负反馈

各信号源支路相互独立;

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 时, $u_O = -\frac{R_F}{R}(u_{I1} + u_{I2} + u_{I3})$

2. 同相求和运算电路



串联电压负反馈

又 \because “虚断 ($i_- = 0$)”，

$$\therefore i_{R_1} = i_- + i_F = i_F, \text{ 即 } u_- / R_1 = (u_0 - u_-) / R_F$$

$$\text{解得: } u_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_- = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ \quad \left(\text{“虚短: } u_- = u_+ \text{”} \right)$$

$$= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3} \right)$$

\therefore “虚断 ($i_+ = 0$)”，

$$\therefore i_{R'_1} + i_{R'_2} + i_{R'_3} = i_+ + i_{R'} = i_{R'},$$

$$\text{即 } \frac{u_{I1} - u_+}{R'_1} + \frac{u_{I2} - u_+}{R'_2} + \frac{u_{I3} - u_+}{R'_3} = \frac{u_+}{R'}$$

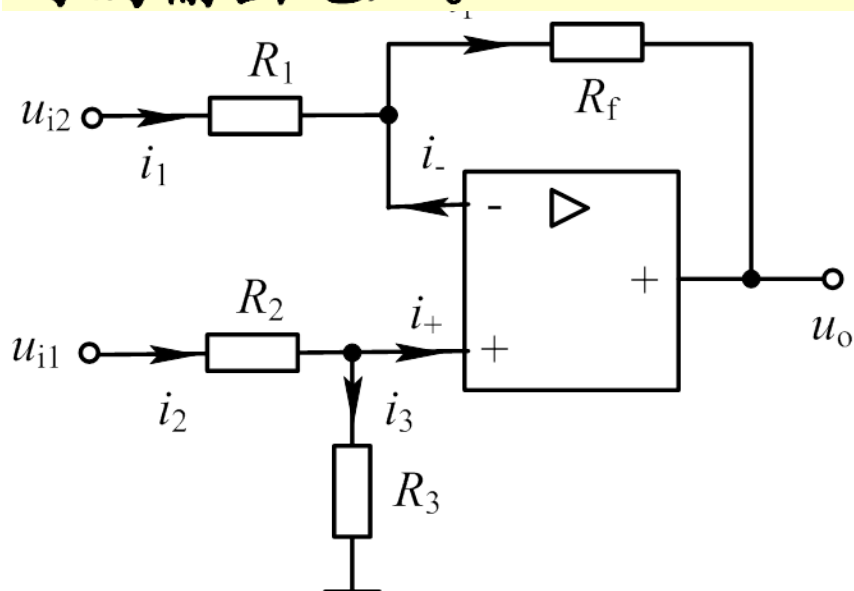
$$\therefore u_+ = \frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3}$$

其中: $R_+ = R'_1 // R'_2 // R'_3 // R'$

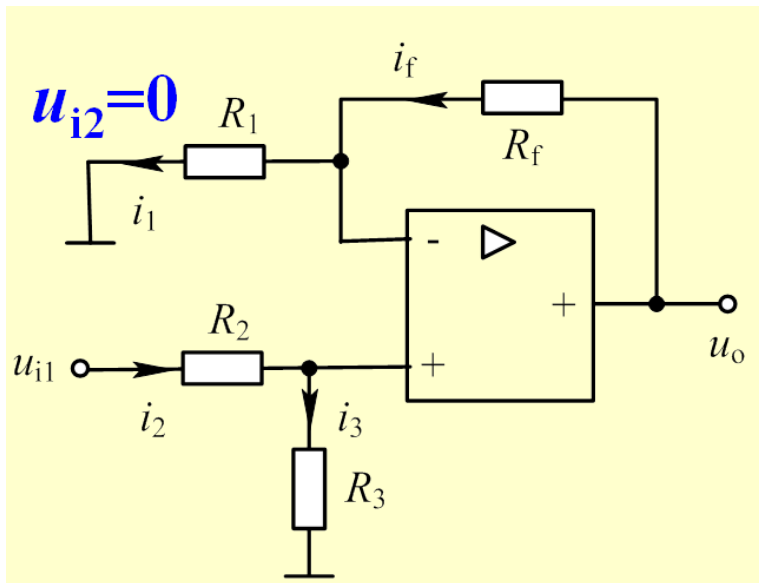
各信号源支路不独立;

3. 双端输入求和电路

利用线性叠加原理：首先求解每个输入信号单独作用时的输出电压，然后将所有结果相加，即得到所有输入信号同时作用时的输出电压。



双端输入电路



(1). 当 $u_{i2}=0$ 时,

$$\because i_2 = i_+ + i_3 = i_3, \text{ 即 } (u_{i1} - u_+) / R_2 = u_+ / R_3$$

$$\therefore u_+ = u_{i1} R_3 / (R_3 + R_2)$$

$$\text{又 } \because i_{R1} = i_- + i_f = i_f, \text{ 即 } u_- / R_1 = (u_o - u_-) / R_f$$

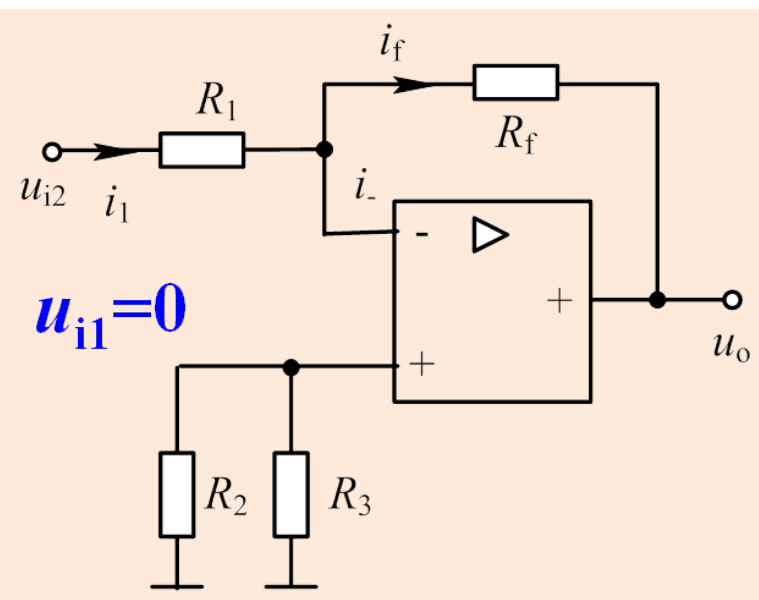
$$\therefore u_{o1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_- = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_+$$

$$= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) u_{i1}$$

(2). 当 $u_{i1}=0$ 时, $u_{o2} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i2}$

$$u_o = u_{o1} + u_{o2}$$

$$= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) u_{i1} - \frac{R_f}{R_1} u_{i2}$$

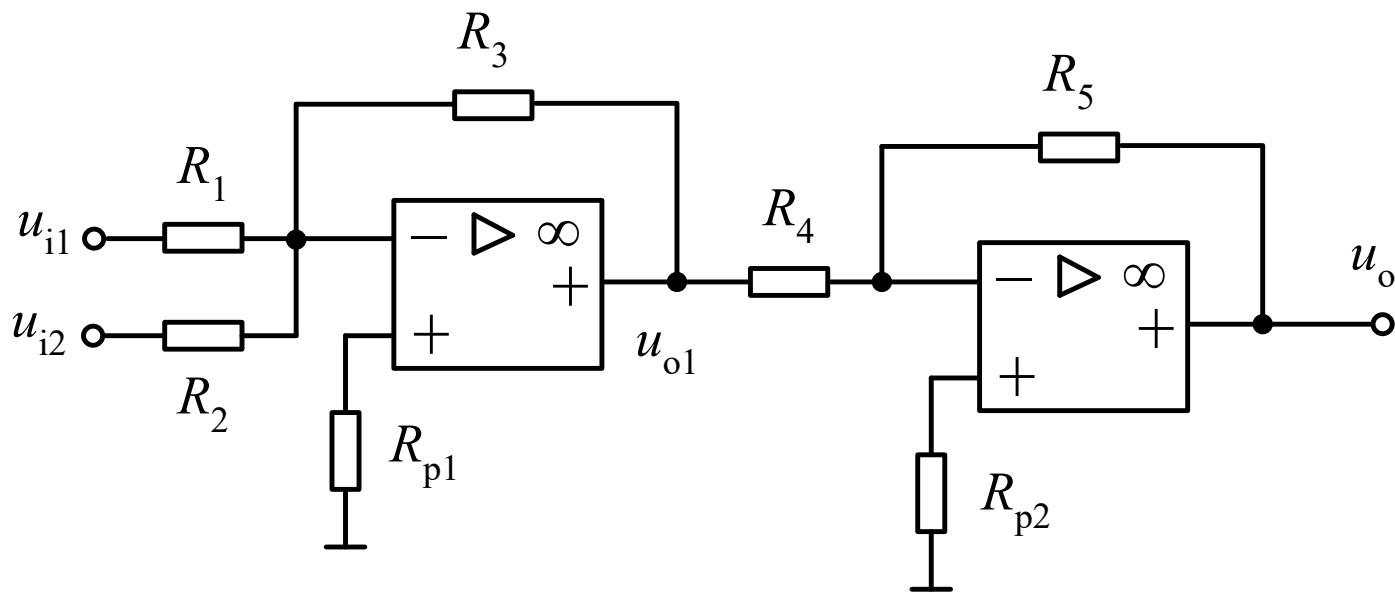


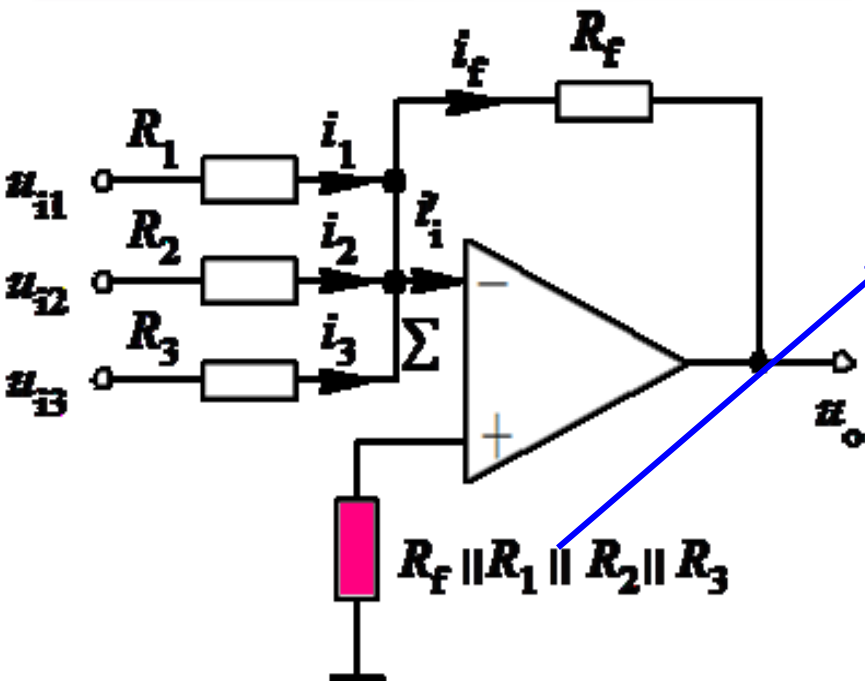
例1. 试设计满足 $u_o = 2u_{i1} + 5u_{i2}$ 的电路。

解: 由反相求和电路和反相比例放大器实现实现:

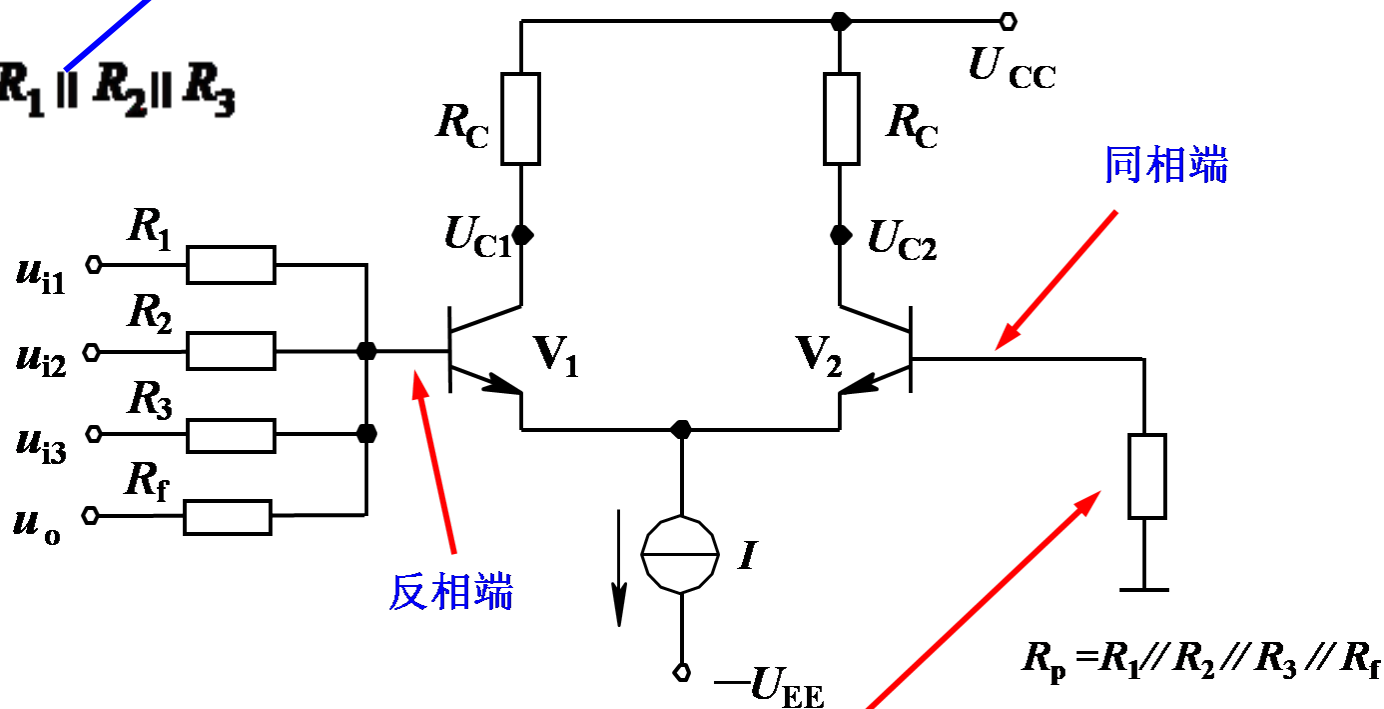
若选 $R_3 = R_4 = R_5 = 10\text{k}\Omega$ 。 $u_o = -u_{o1} = \frac{R_3}{R_1} u_{i1} + \frac{R_3}{R_2} u_{i2}$

根据题意 $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$





当输入全部为0时，确保输出也为0。可消除输入偏流 I_{IB} 产生的误差。



接直流平衡电阻 R_p 使输入级的电路结构对称

例2 试设计一个电路，完成 $u_o = -(2u_{i1} + 3u_{i2})$ 的运算，并要求对 u_{i1} 、 u_{i2} 的输入电阻均 $\geq 100\text{k}\Omega$ 。

解：反相求和
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} - \frac{R_f}{R_2} u_{i2}$$

为满足输入电阻均 $\geq 100\text{k}\Omega$ ，选 $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ，故

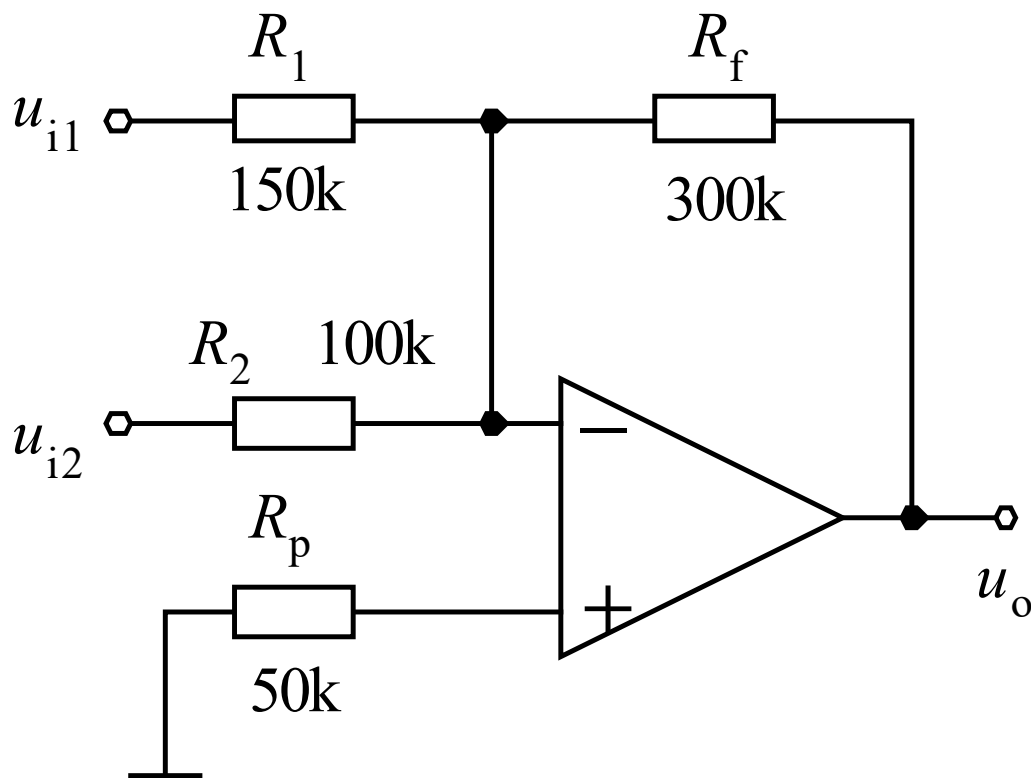
$$\frac{R_f}{R_2} = 3, \frac{R_f}{R_1} = 2$$

所以选 $R_f = 300\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ， $R_1 = 150\text{k}\Omega$ 。

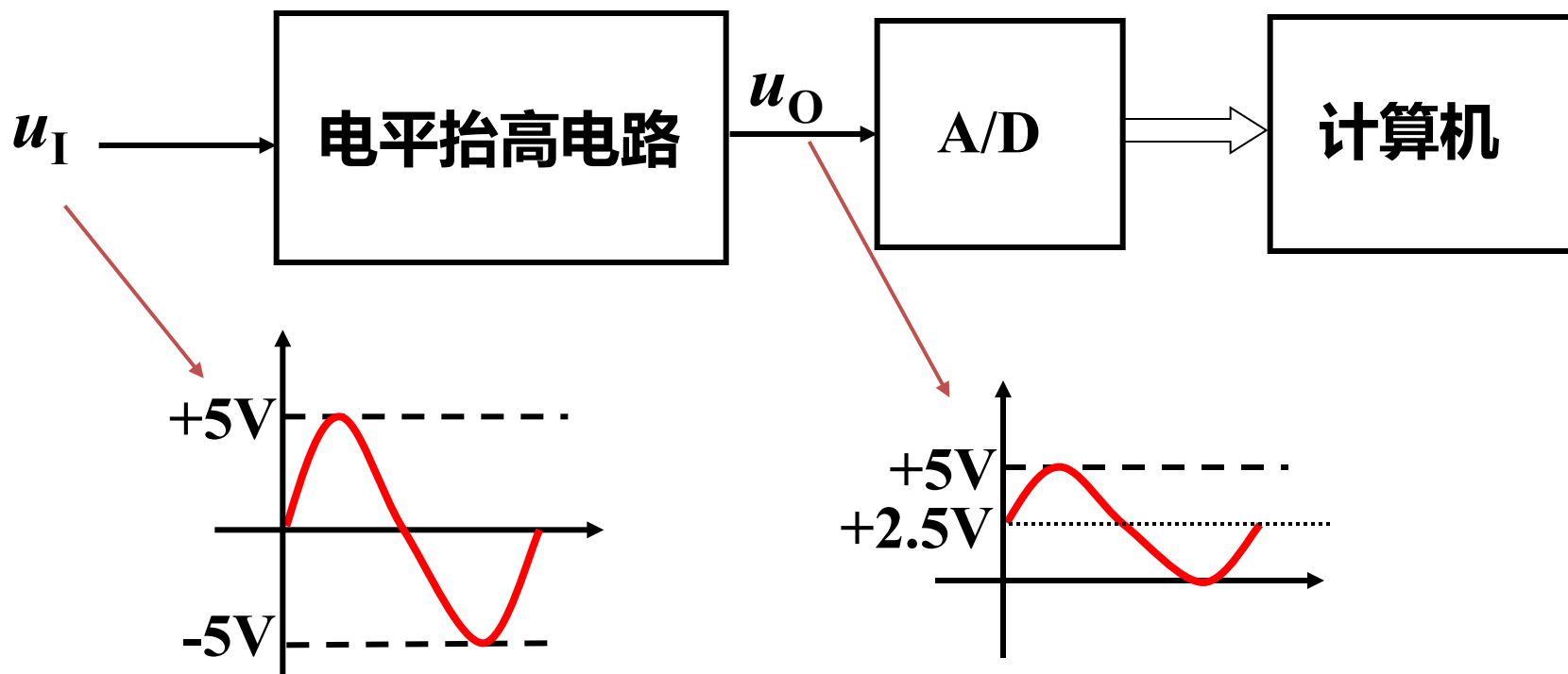
$$R_f=300\text{k}\Omega, R_2=100\text{k}\Omega, R_1=150\text{k}\Omega。$$

在同相输入端和地之间接入一直流平衡电阻 R_p ，并令

$R_p=R_1\parallel R_2\parallel R_f=50\text{k}\Omega$ ，如图所示。

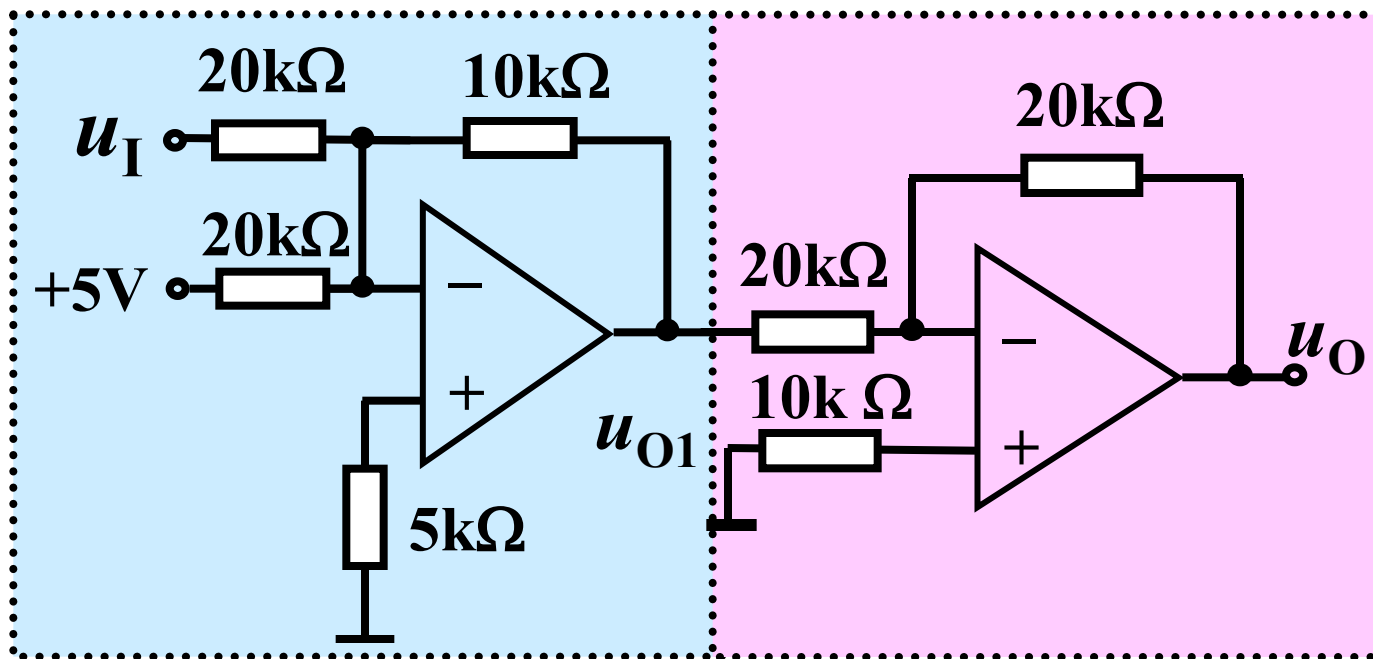


例3 A/D变换器要求其输入电压的幅度为0 ~ +5V，现有信号变化范围为-5V~+5V。试设计一电平抬高电路，将其变化范围变为0~+5V。



$$u_O = 0.5u_I + 2.5V = 0.5(u_I + 5)V$$

$$u_O = 0.5u_I + 2.5V = 0.5(u_I + 5)V$$



$$u_{O1} = -\frac{10}{20} \times (u_I + 5) = -0.5(u_I + 5) \quad ; \quad u_O = -\frac{20}{20} \times u_{O1} = 0.5(u_I + 5)$$

§ 7.2 电压比较器

1. 概念:

是一个用来比较输入电压与基准电压的大小的电路。

2. 种类: 单门限比较器、迟滞比较器和窗口比较器。

3. 用途: 数模转换、数字仪表、自动控制和自动检测等技术领域, 以及波形产生及变换等场合。

电压比较器可由通用运放构成, 也可用专用芯片 (即电压比较器芯片) 实现。

电压比较器是集成运放在非线性区间(即输出、输入不呈线性关系)的应用。运放工作在开环状态或引入正反馈(增益高)。

理想运放在非线性区的特点:

1. 开关特性 (“离散” 特性)

(即输出、输入不呈线性关系)

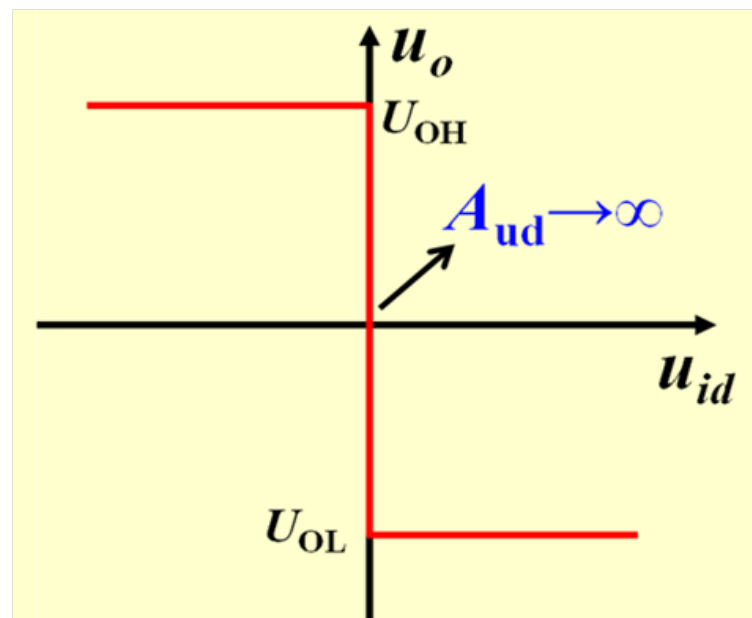
当 $u_- < u_+$ 时, $u_o = U_{oH}$

当 $u_- > u_+$ 时, $u_o = U_{oL}$

不存在 “虚短” 现象

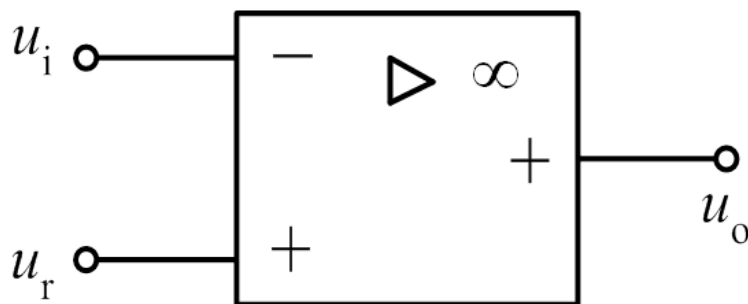
2. $i_+ = i_- \approx 0$

仍存在 “虚断” 现象

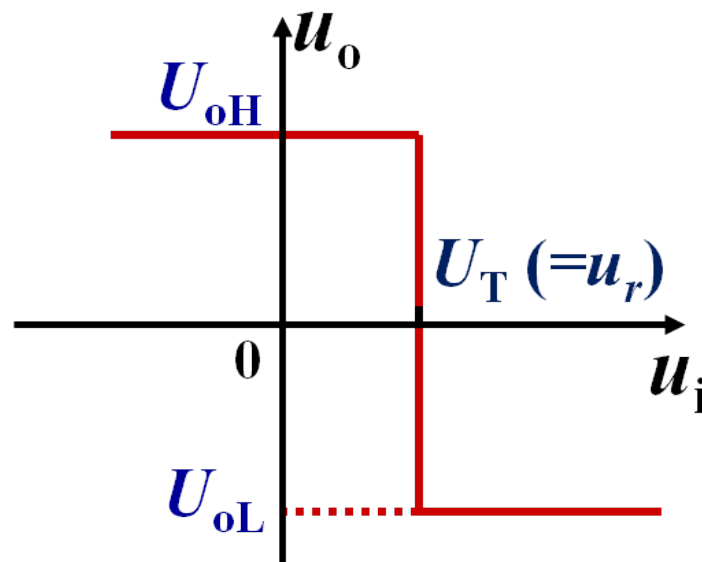


理想运放的开环传输特性

电压比较器：



电压比较器的符号



电压传输特性

电压比较器的描述方法：

电压传输特性 $u_o = f(u_i)$

当 $u_- < u_+$, 即 $u_i < u_r$ 时, $u_o = U_{oH}$,

当 $u_- > u_+$, 即 $u_i > u_r$ 时, $u_o = U_{oL}$

电压比较器的主要指标：

- (1). **阈值电压 $U_T (=u_r)$ ：**输出电压 u_o 从一种电平跳到另一种电平的**临界条件** ($u_+ = u_-$) 所对应的输入电压

(2).高电平(U_{oH})和低电平(U_{oL}):

$U_{oH} \approx 3.4V$ 、 $U_{oL} \approx 0.4V$ (电压比较器芯片) ;

通用
运放

① 不加限幅电路: $U_{oH} \sim U_{CC}$, $U_{oL} \sim -U_{EE}$

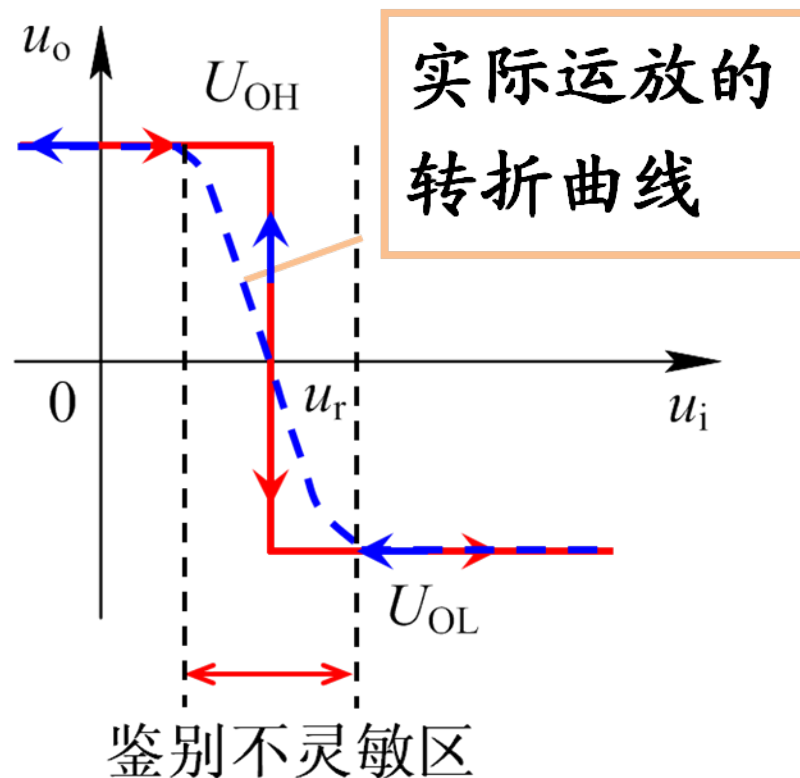
② 外加限幅电路决定;

(3). 鉴别灵敏度

$A_{ud} \uparrow \rightarrow$ 不灵敏区 $\downarrow \rightarrow$ 鉴别灵敏度 \uparrow 。

(4). 转换时间

高电平、低电平间转换所需时间。转换时间越短，比较的速度越快。



电压比较器的传输特性三要素：



(1) 输出高电平 U_{oH} 和输出低电平 U_{oL}

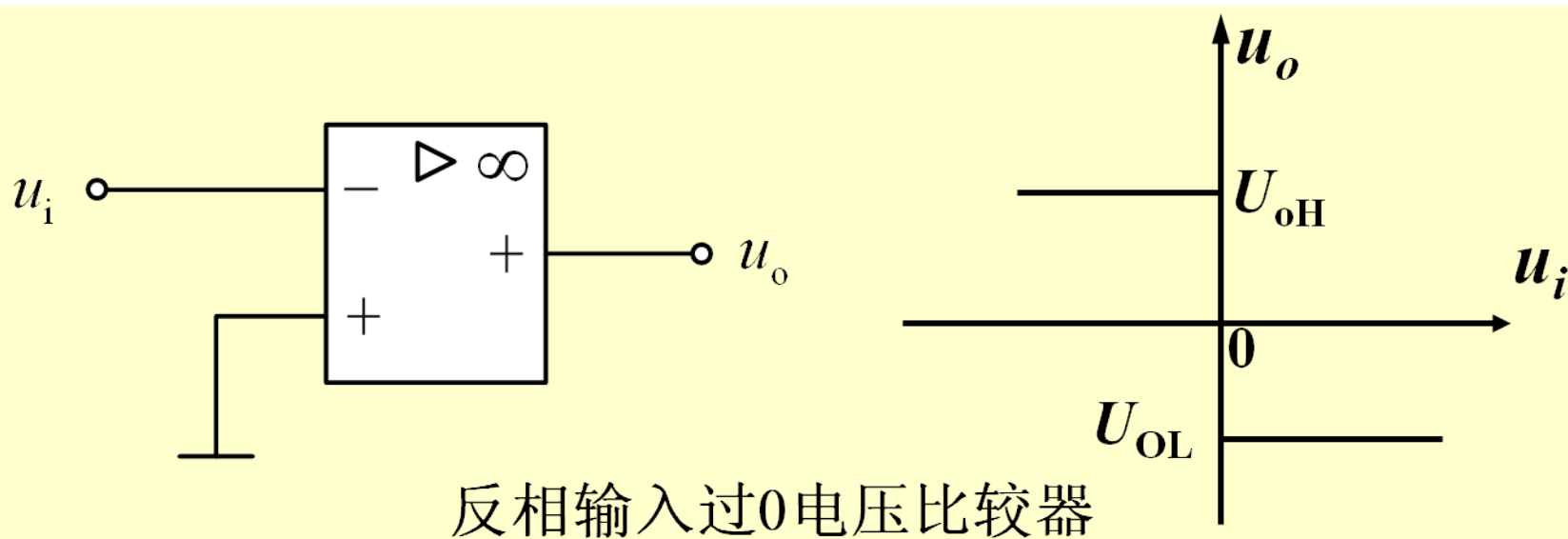
(2) 阈值电压 U_T

求解方法： $u_+ = u_-$ 时的输入电压 u_i 就是阈值电压 U_T

(3) 输入电压过阈值电压时输出电压跃变的方向

一、单门限比较器--只有一个阈值电压 (比较器工作在开环状态)

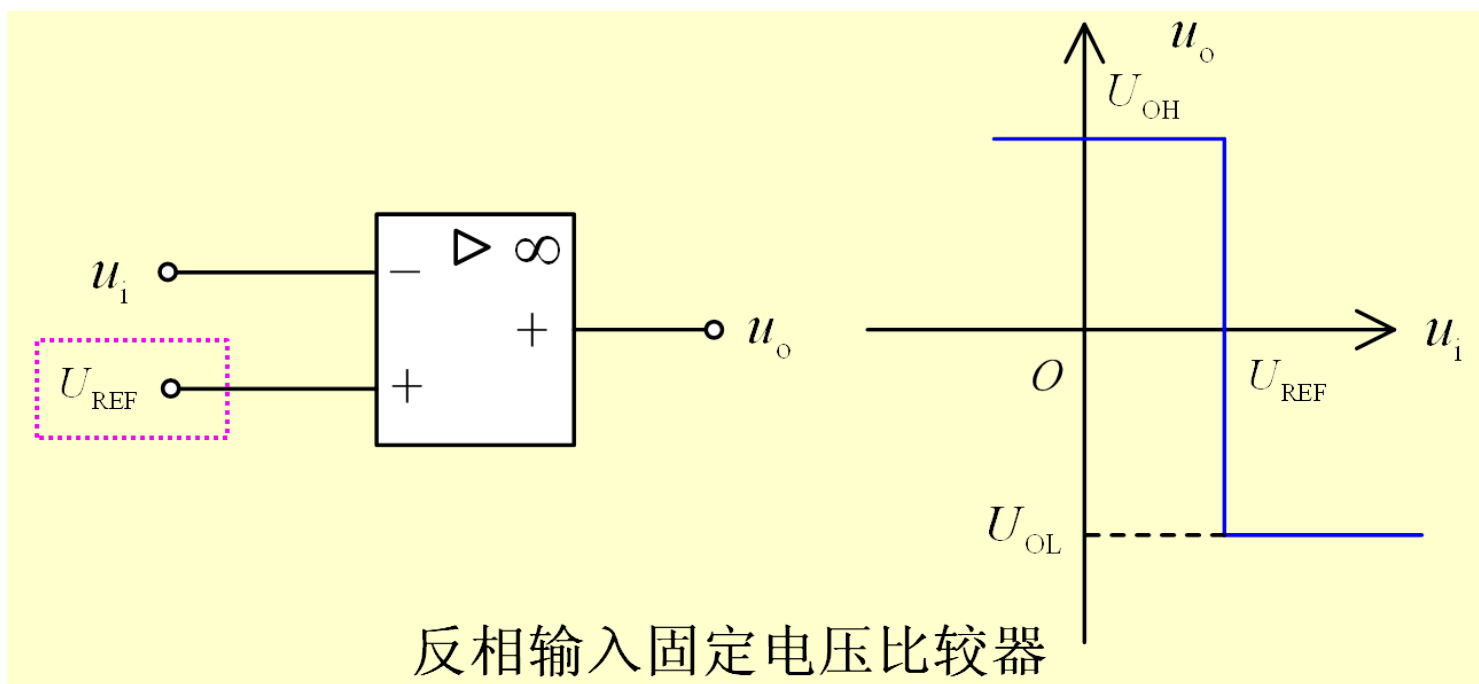
1. 过零比较器



① $U_T=0$;

② 当 $u_i > 0$ 时, $u_o=U_{OL}$; 当 $u_i < 0$ 时, $u_o=U_{OH}$;

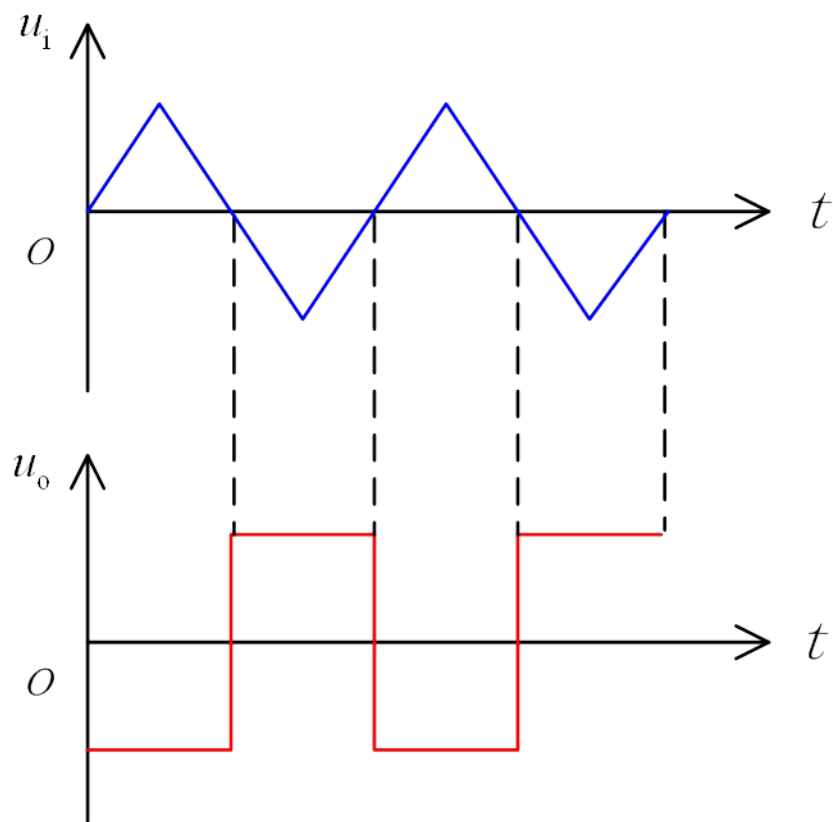
2. 固定电压比较器



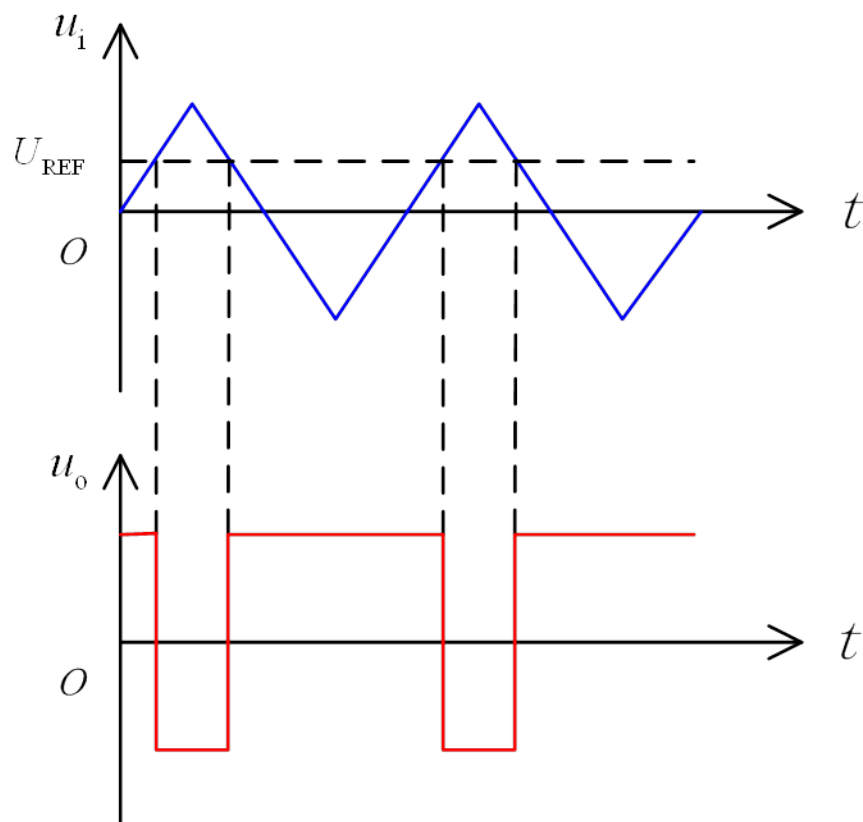
① $U_T = U_{REF}$;

② 当 $u_i > U_{REF}$ 时, $u_o = U_{OL}$; 当 $u_i < U_{REF}$ 时, $u_o = U_{OH}$;

用单门限比较器实现波形变换

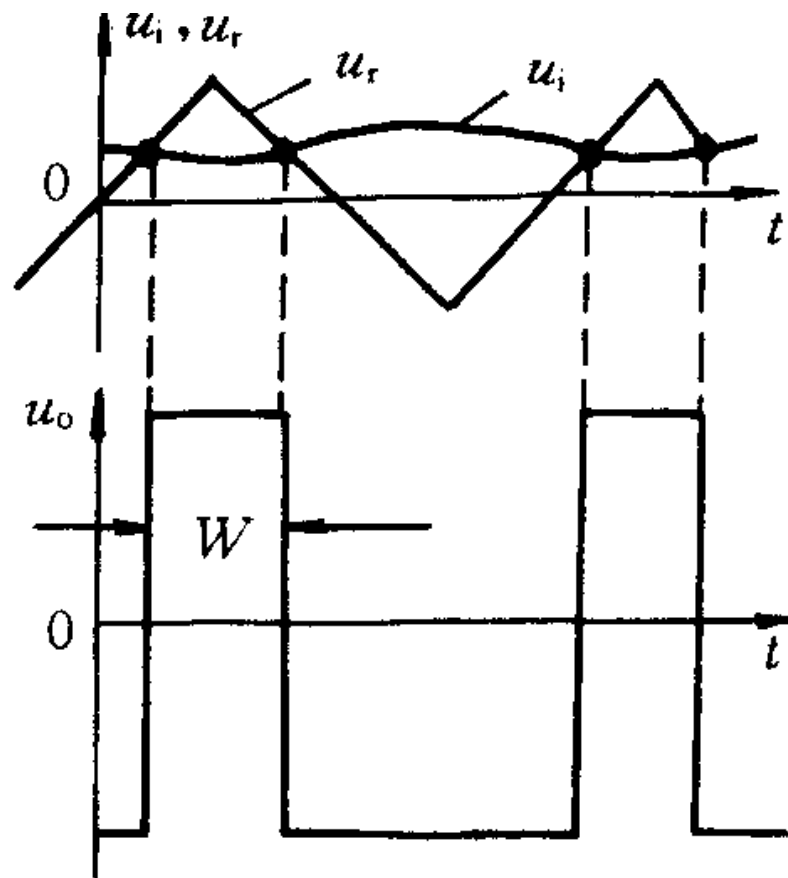
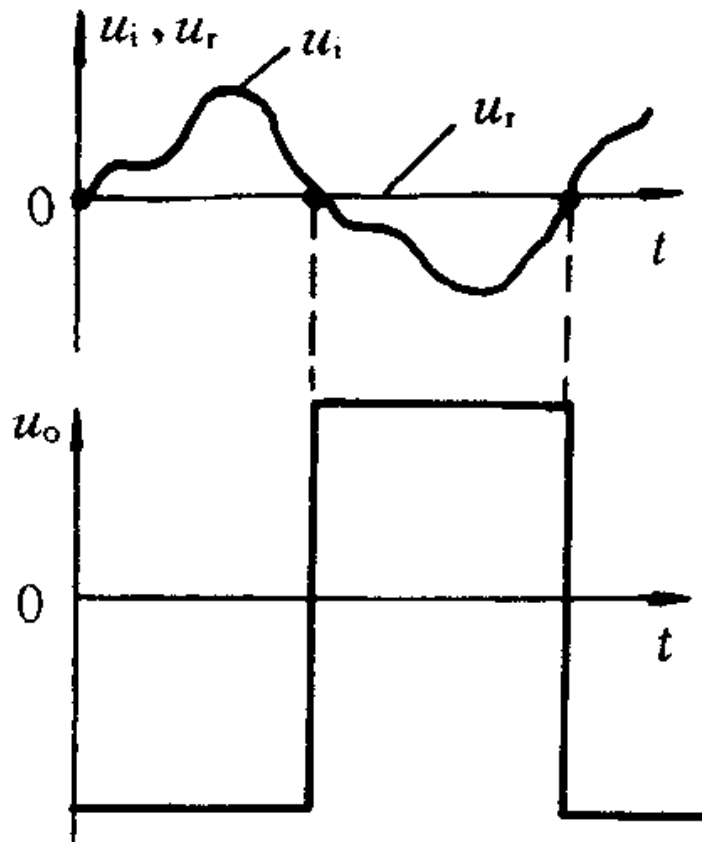


(a) 三角波变换为方波

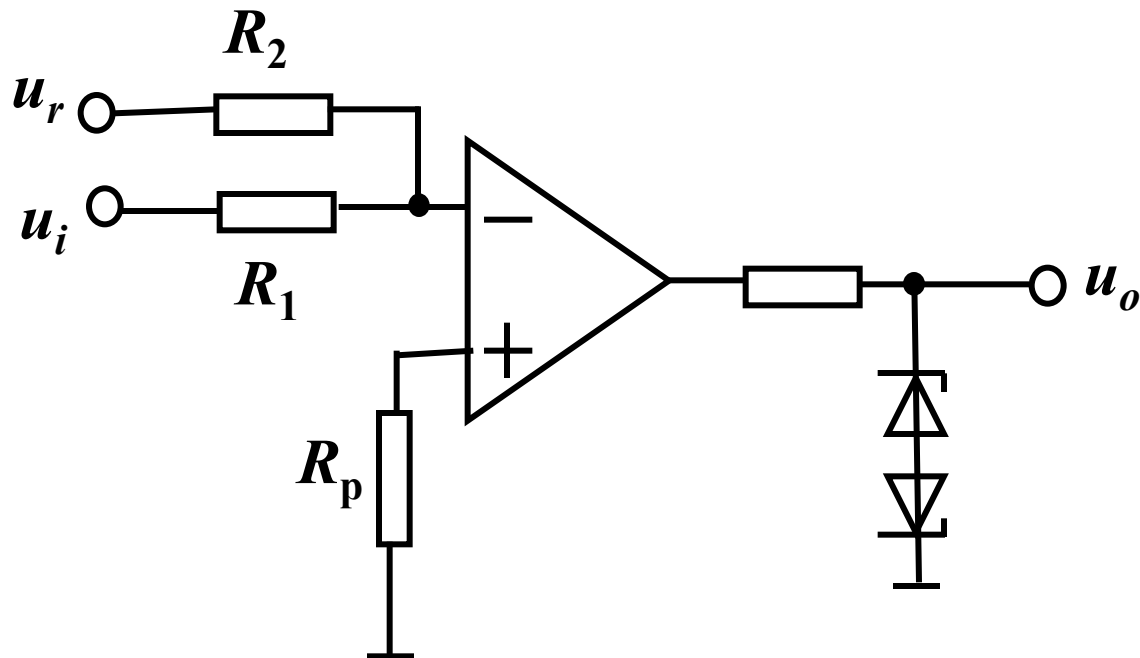


(b) 三角波变换为矩形波

用单门限比较器实现波形整形



例 画出下面电路的传输特性。



由虚断 $i_- = 0$ 得, $u_- = u_r \frac{R_1}{R_1 + R_2} + u_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, $u_+ = 0$

当 $u_- > u_+$ 时, 输出 U_{OL}

当 $u_- < u_+$ 时, 输出 U_{OH}

也就是说，当

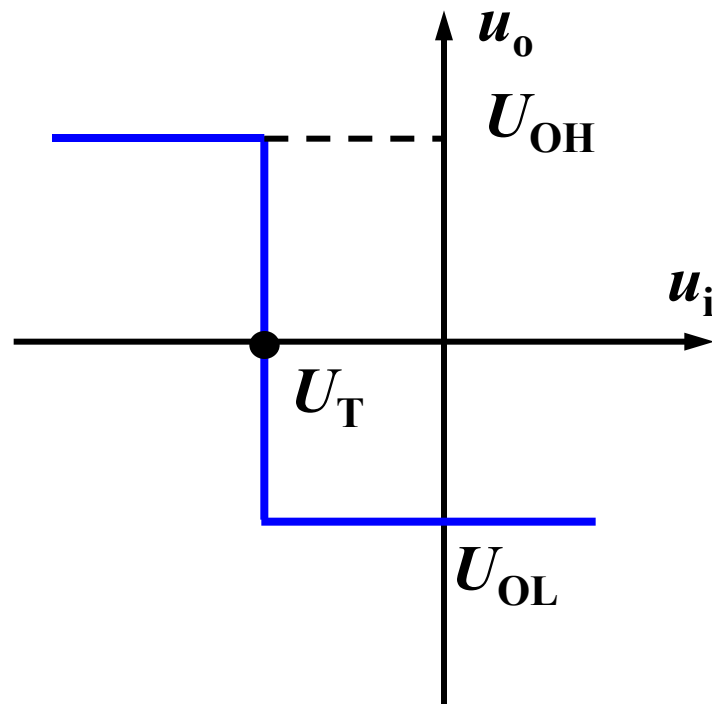
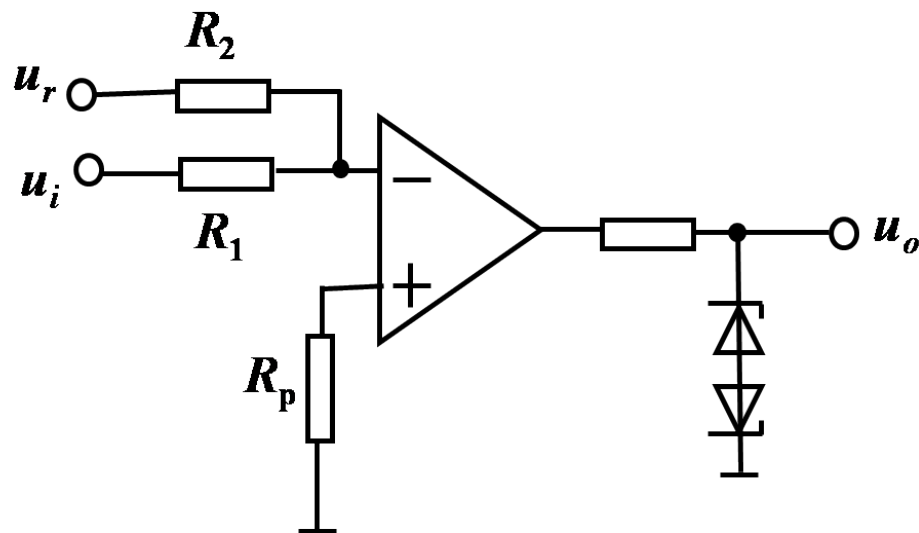
$$u_- = u_+$$

$$\text{即 } u_r \frac{R_1}{R_1 + R_2} + u_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0$$

时，输出发生转折。

故与输入 u_i 比较的
门限电压为：

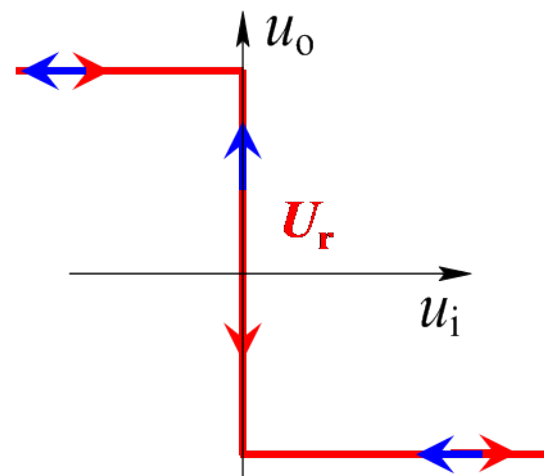
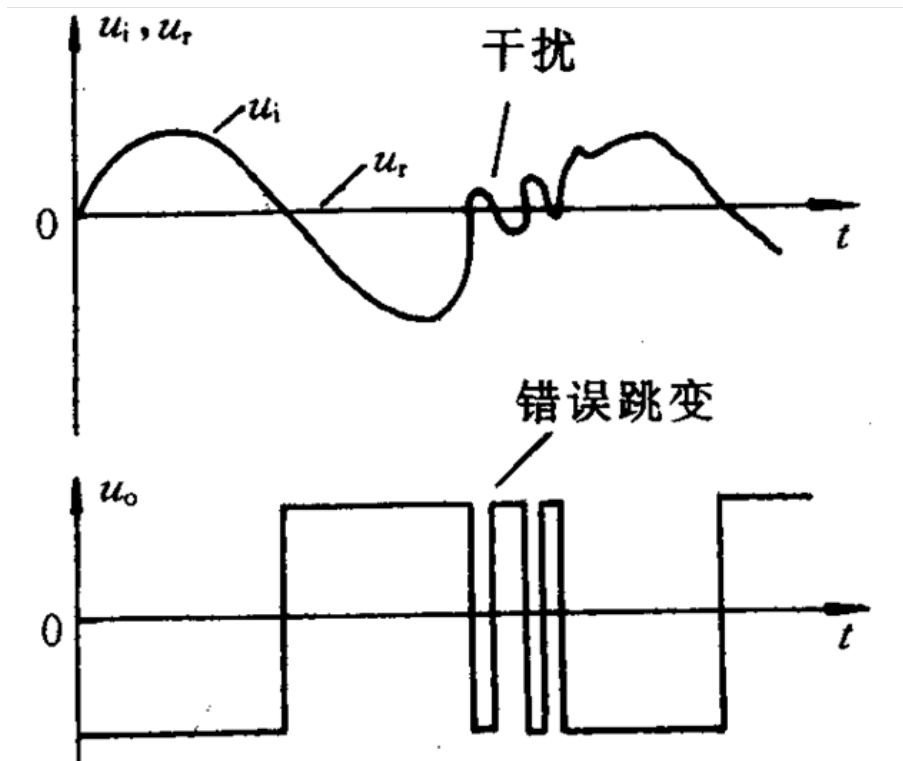
$$U_T = u_i = -\frac{R_1}{R_2} u_r$$



二、迟滞比较器--具有滞回特性

(引入了正反馈,由于回差的存在提高了抗干扰能力)

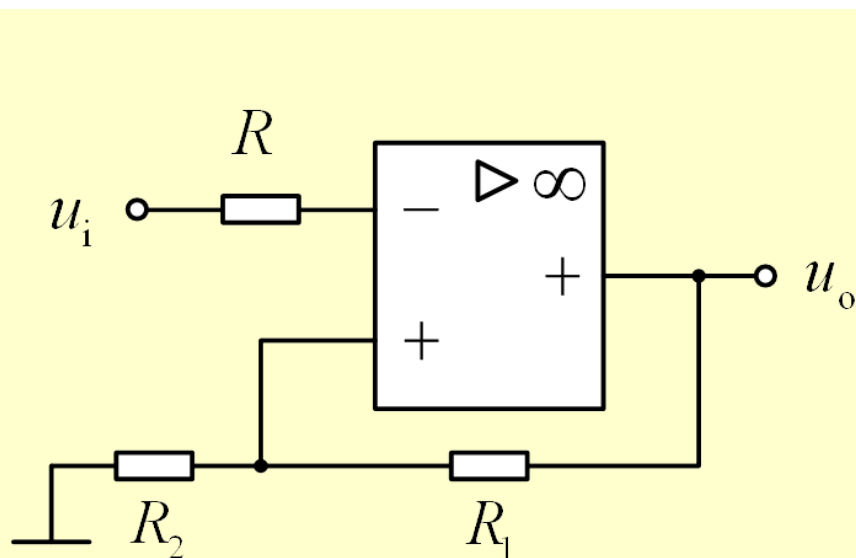
单门限比较器应用中存在的问题：抗干扰能力差



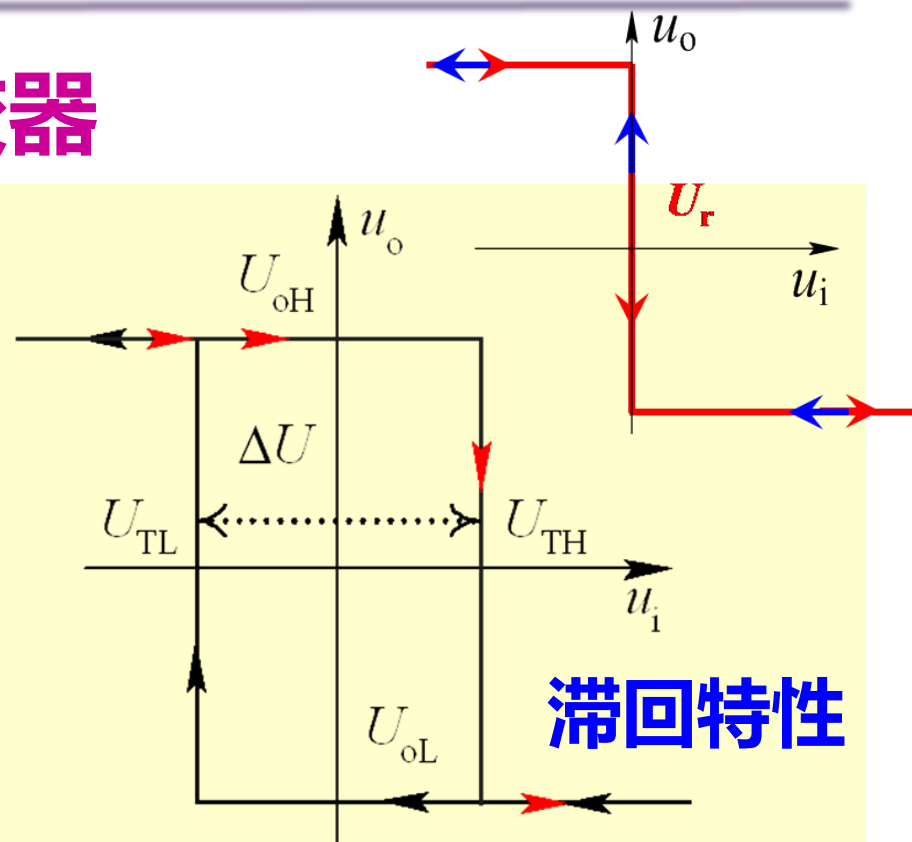
迟滞比较器电路及传输特性

特点：在比较器中引入**正反馈**→ $A_{ud} \uparrow$
→ **鉴别灵敏度**↑ → **转换速度**↑ → **改善了输出波形的边缘，同时具有较强的抗干扰能力。**

1). 反相输入的迟滞比较器



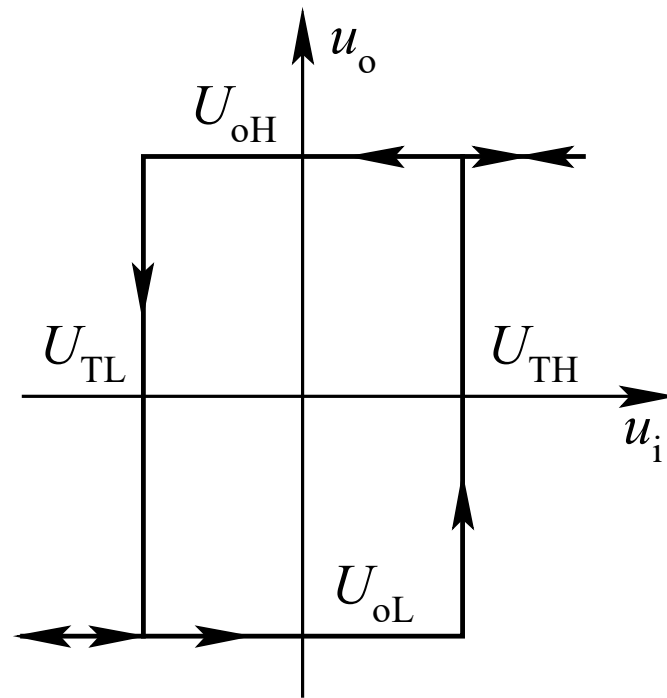
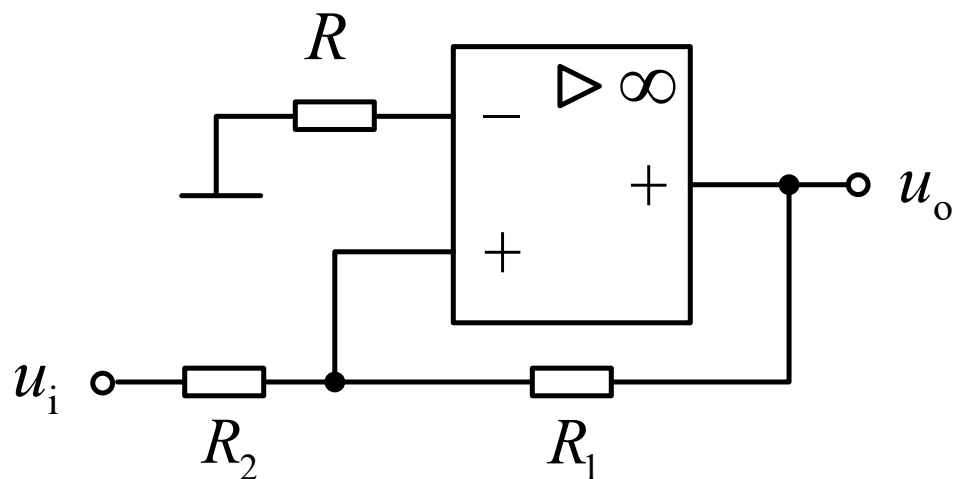
电压串联**正**反馈



阈值电压: $u_+ = U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_o$ 回差: $\Delta U = U_{TH} - U_{TL}$

下限阈值: $U_{TL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{oL}$ 上限阈值: $U_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{oH}$

2). 同相输入迟滞比较器



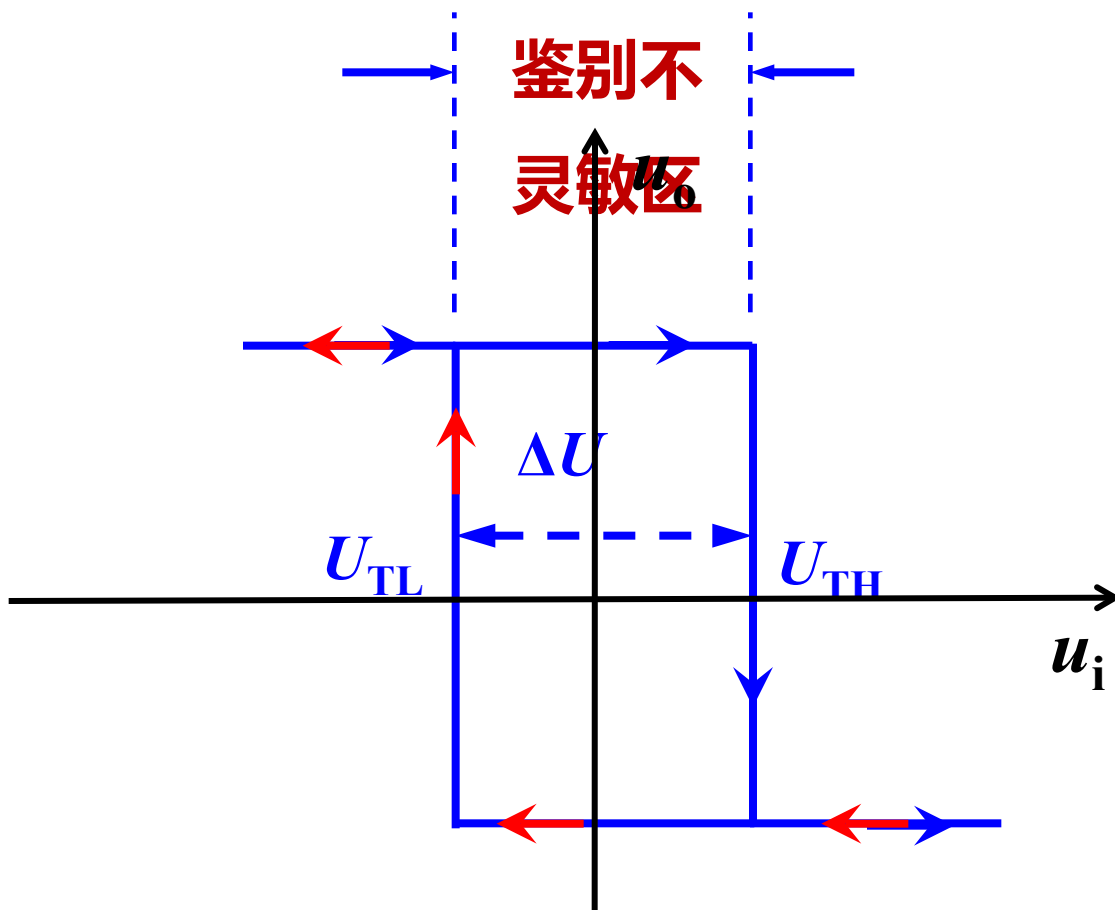
(b) 传输特性

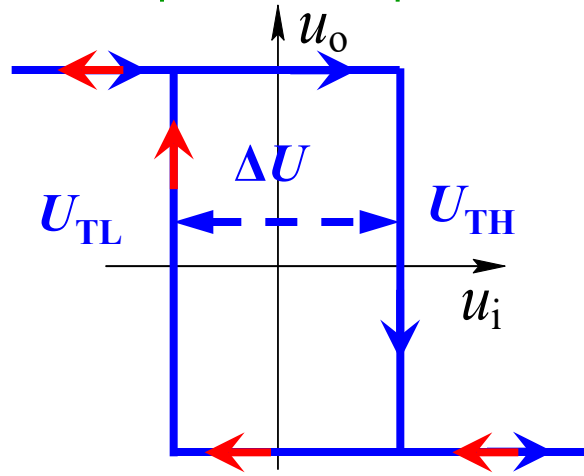
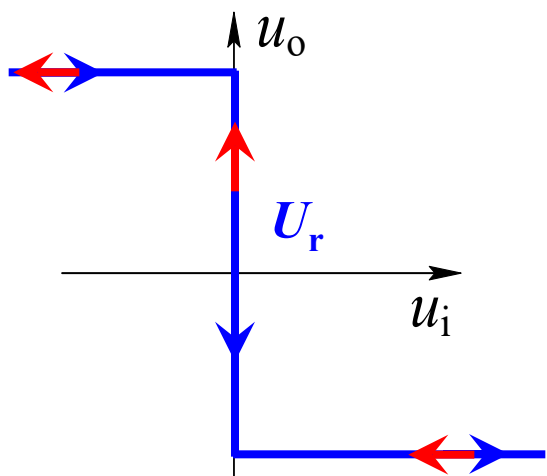
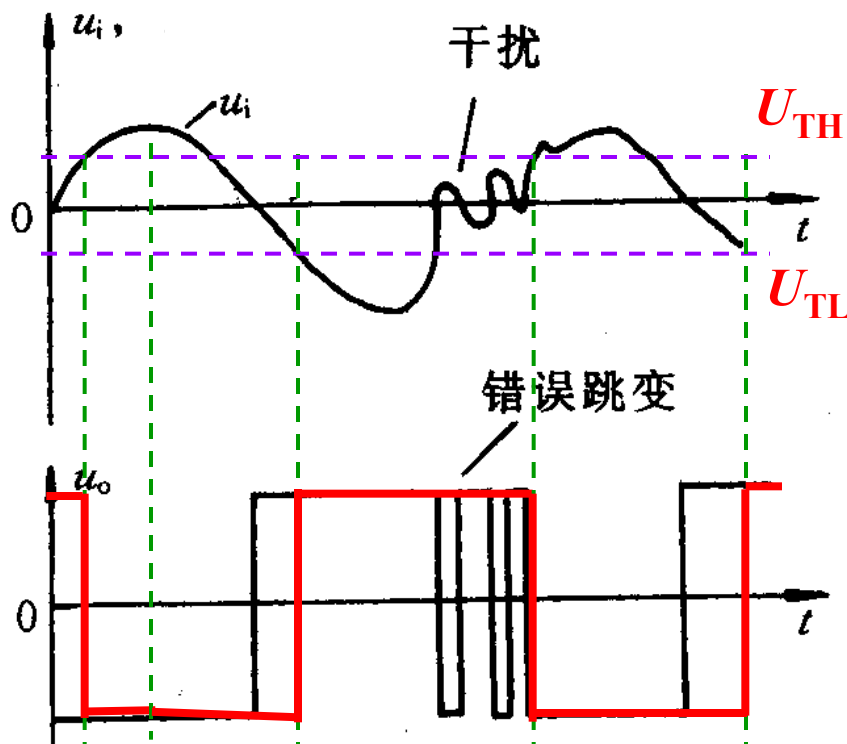
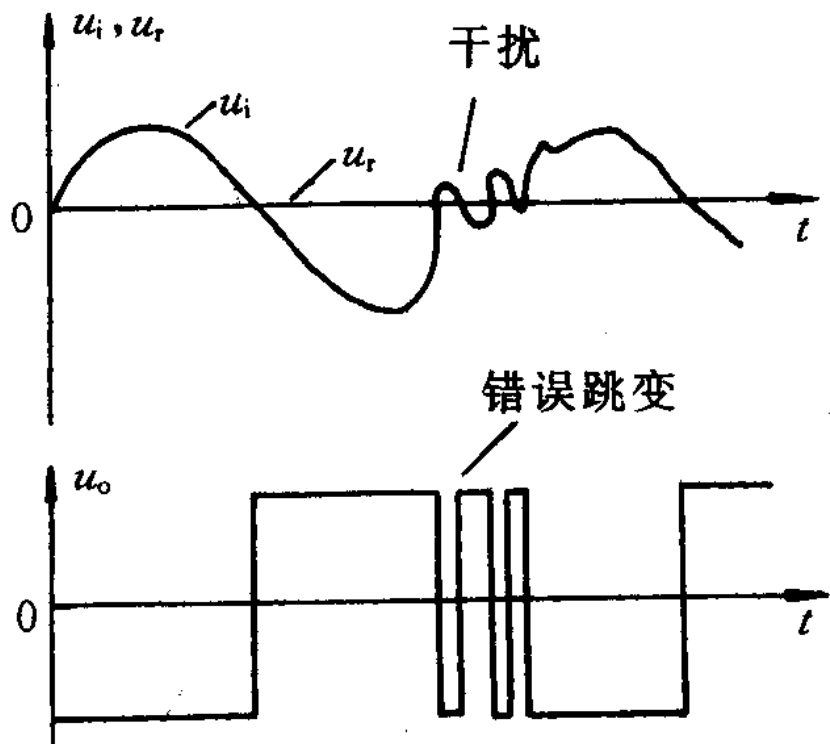
$$U_{TL} = -\frac{R_2}{R_1} U_{oH}$$

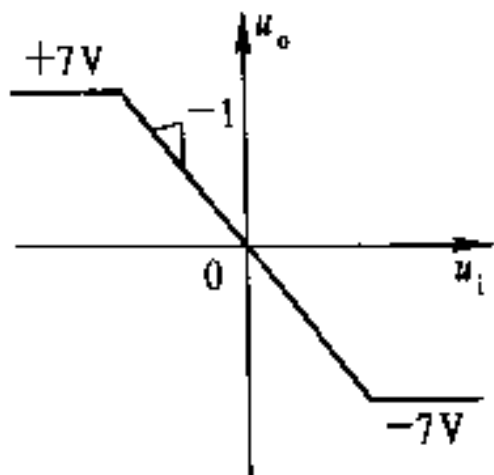
$$U_{TH} = -\frac{R_2}{R_1} U_{oL}$$

迟滞比较器传输特性归纳：

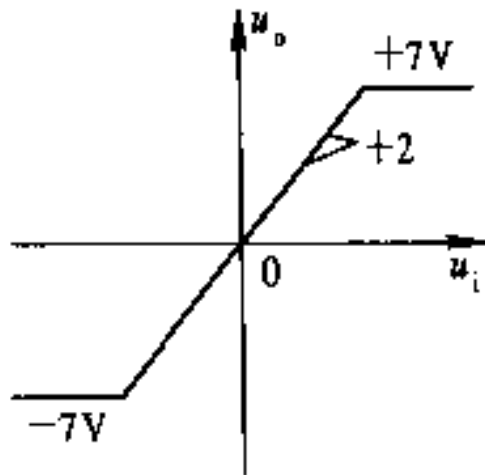
输入电压的变化方向不同，阈值电压也不同，但输入电压单调变化时，输出电压只跃变一次。







(a)



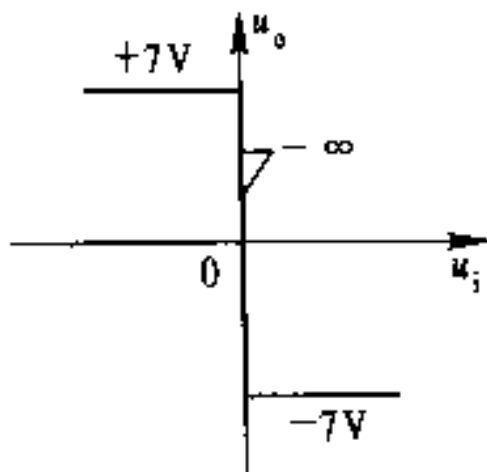
(b)

(a) 反相比例放大器

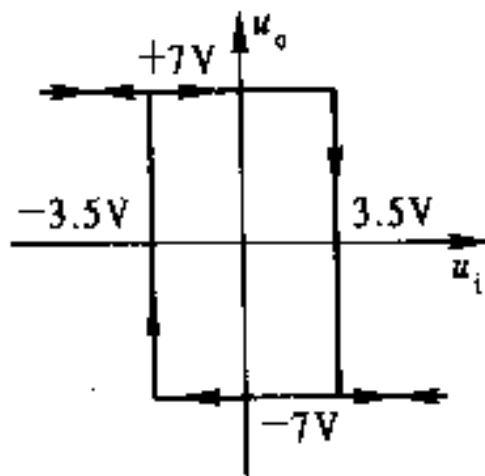
(b) 同相比例放大器

(c) 过零电压比例器

(d) 迟滞电压比例器



(c)

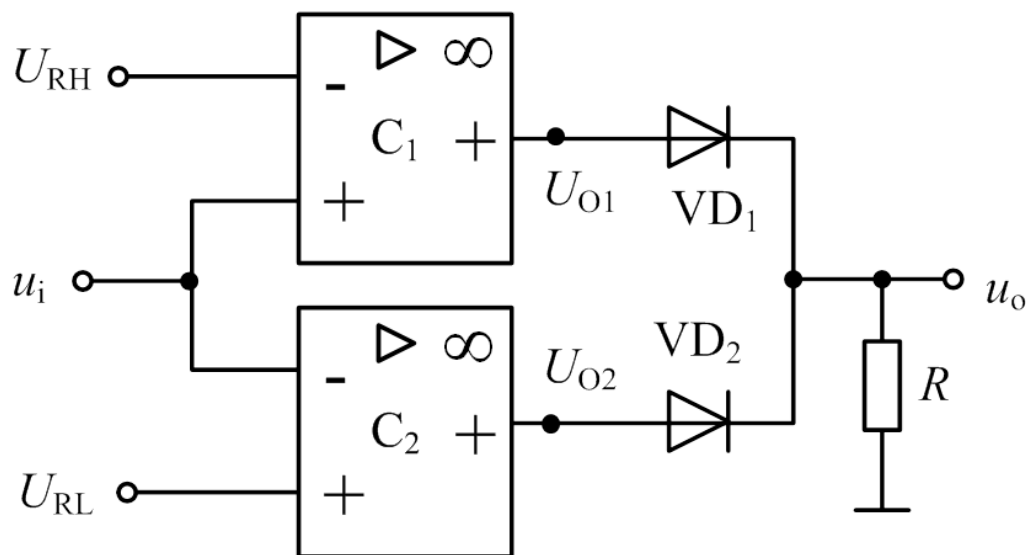


(d)

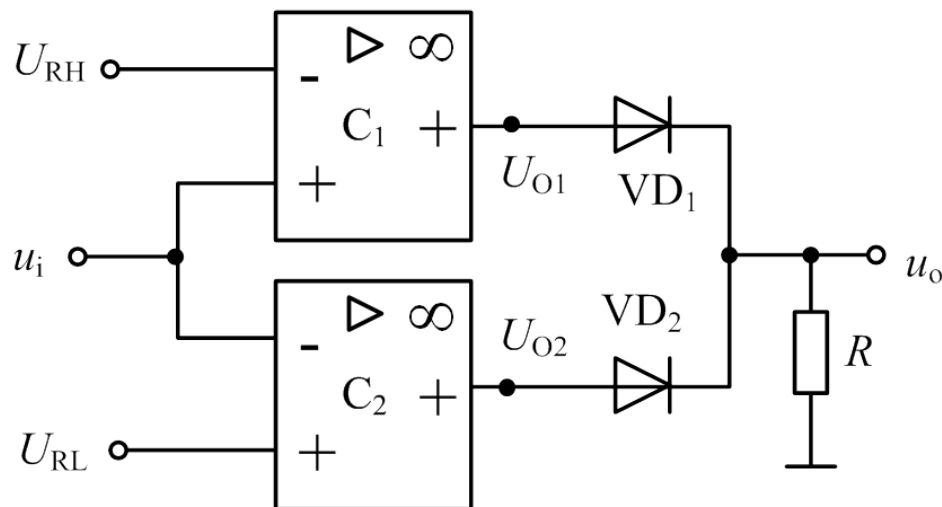
三、窗口比较器

(有两个阈值电压, 输入电压单调变化时输出电压跃变两次)

用于判断输入电压 u_i 是否处于两个已知电平之间的电压比较器



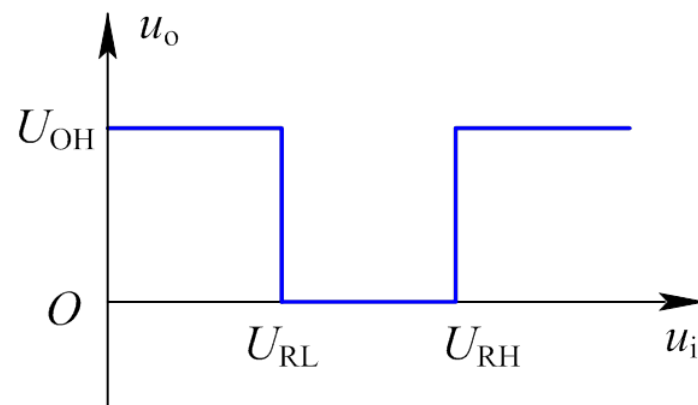
包含2个单门限比较电路



包含2个单门限比较电路

假定 $U_{RH} > U_{RL}$

- ① 当 $u_i < U_{RL}$ 时, U_{O1} 为低电平, U_{O2} 为高电平; VD_1 截止, VD_2 导通, $u_o \approx U_{OH}$;
- ② 当 $U_{RL} < u_i < U_{RH}$ 时, U_{O1} 和 U_{O2} 均为低电平, VD_1 和 VD_2 同时截止, $u_o = 0$;
- ③ 当 $U_{RH} < u_i$ 时, U_{O1} 为高电平, U_{O2} 为低电平; VD_1 导通, VD_2 截止, $u_o \approx U_{OH}$ 。



7.3 弛张振荡器

弛张振荡器又称多谐振荡器，主要用来产生非正弦波输出讯号，如方波或三角波。由滞回比较器和RC定时电路构成，无需外加激励信号，只要接通电源就可输出。

弛张振荡器即方波-三角波产生器。对于方波信号发生器，其状态有时维持不变，而有时则发生突跳。为区别于正弦振荡器，人们将这种有张有弛的信号发生器称之为弛张振荡器。

弛张振荡器必须是一个正反馈电路，它由两部分组成：一部分是状态记忆电路；另一部分是定时电路，可以周期性的把储存于电容或电感中的能量释放出来，使得输出讯号波形瞬间改变。

其中带正反馈的运放构成迟滞比较器

假定输出为高电平(U_{oH}),

RC构成积分器即定时电路

此时, 运放同相端电压 U_+ 为

$$U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z = U_{TH}$$

且电容初始电压 $u_{C(0)}=0$,

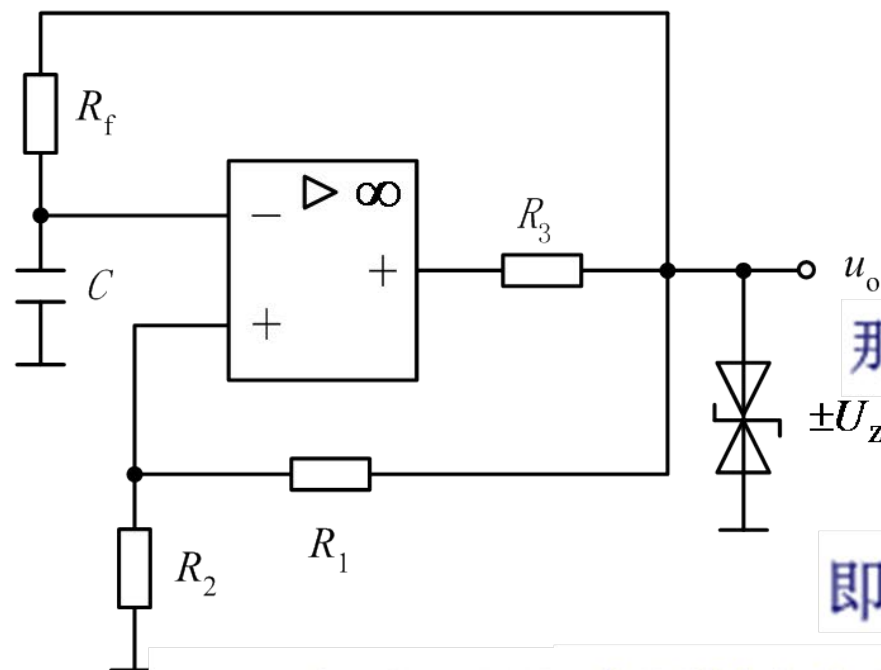
那么电容被充电, $u_{C(t)}$ 以指数规律上升,

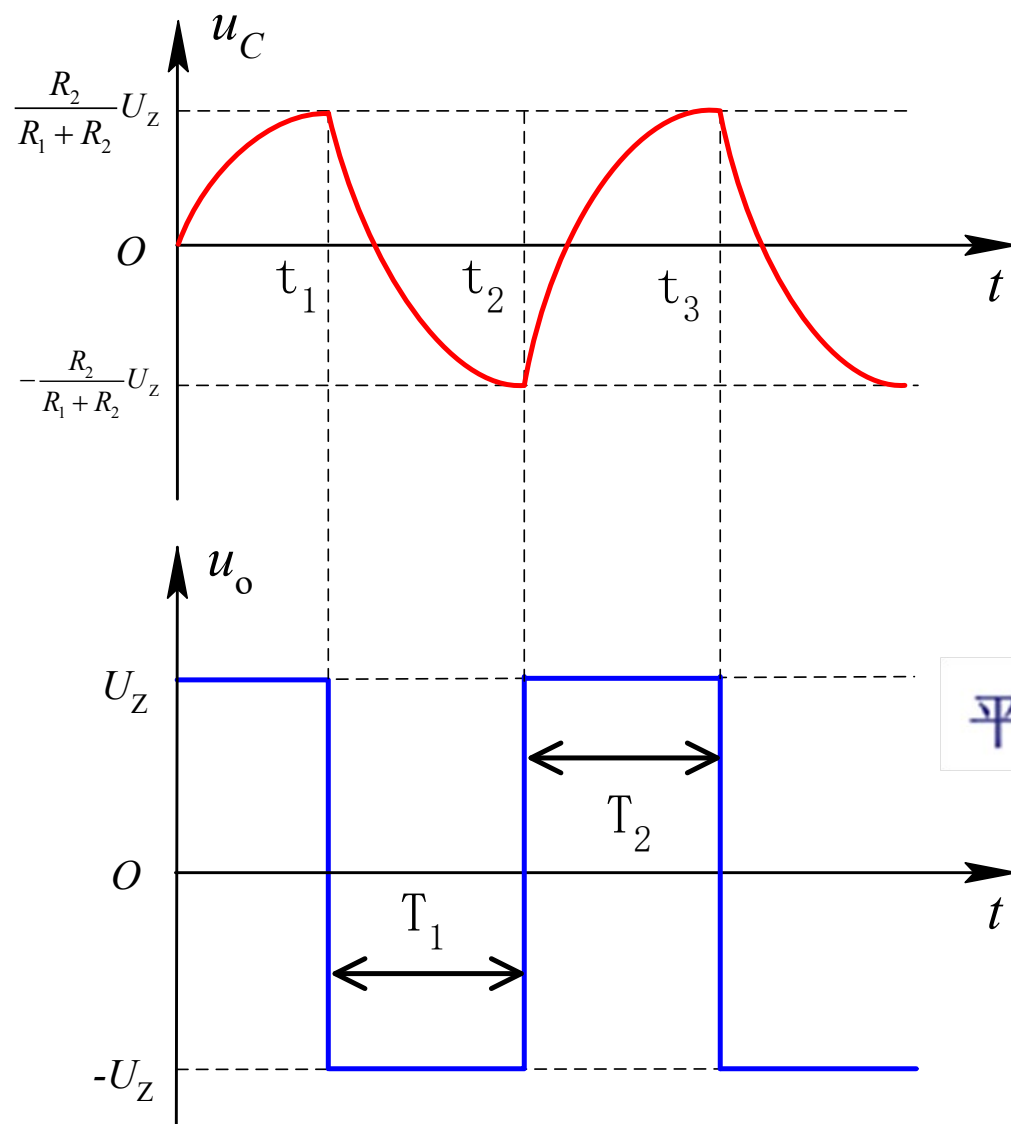
当 u_C 上升到 U_{TH} 时,

即 $U_- = U_+$, 则输出状态要发生翻转,

即由高电平跳变到低电平 U_{oL} 。一旦 U_o 变为低电平,

运放同相端电压 U_+ 为 $U_+ = \frac{-R_2}{R_1 + R_2} U_Z = U_{TL}$, 电容开始放电,



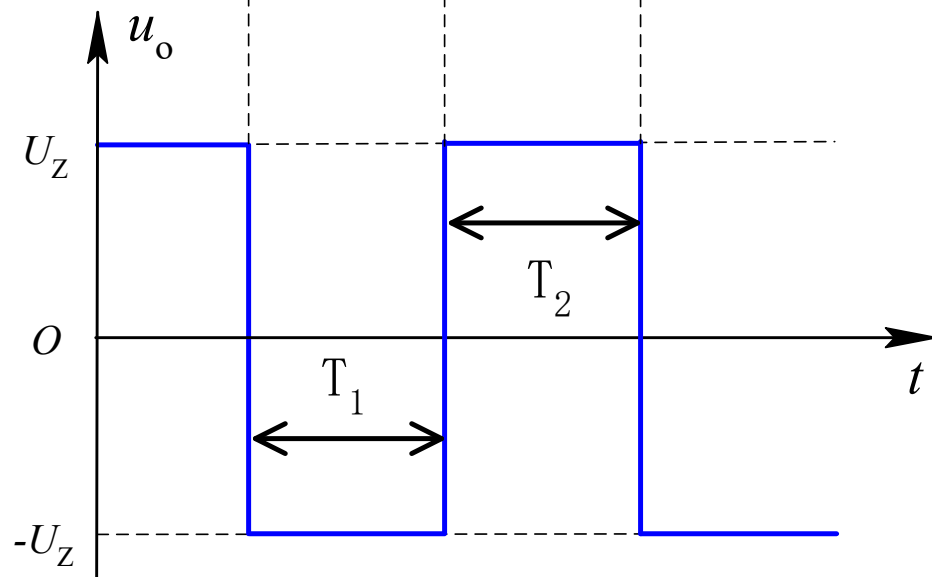
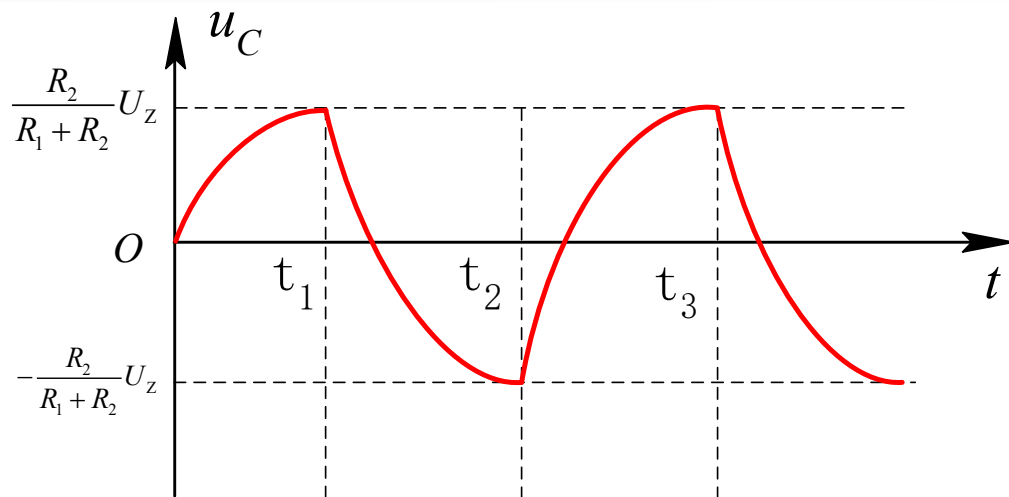
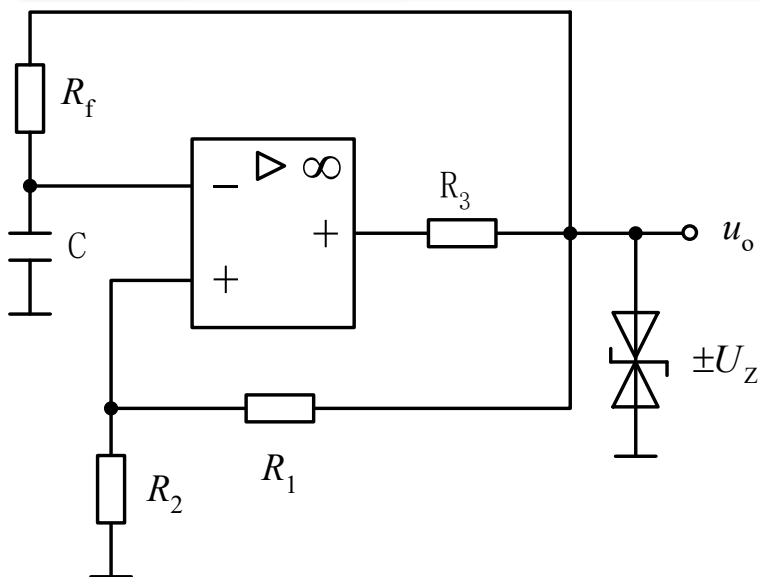


u_C 以指数规律下降,

当 u_C 下降到 U_{TL} 时,

输出又从低电平跳变到高电

平。周而复始,运放输出为方波



$$T_1 = \tau_{\text{放电}} \ln \frac{u(\infty) - u(t_1)}{u(\infty) - u(t_2)}$$

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

$$T_2 = R_f C \ln \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$q = \frac{T_2}{T} = 50\% \quad f_o = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_f C \ln \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

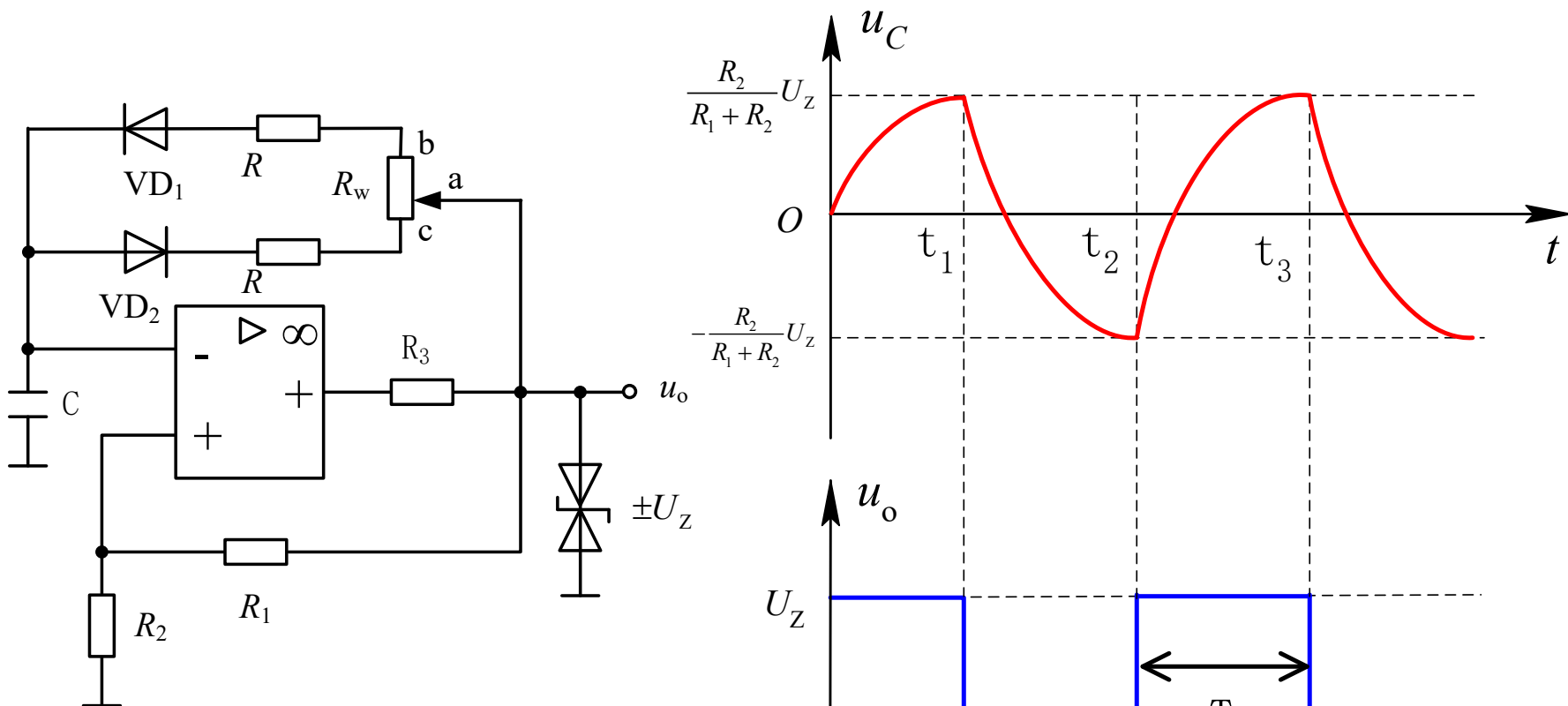


图7.3.3 占空比可调的弛张振荡器

$$\tau_{\text{ch}} = (R + R_{\text{wab}})C$$

$$\tau_{\text{dch}} = (R + R_{\text{wac}})C$$

$$q = \frac{T_2}{T_1} = \frac{(R + R_{\text{wab}})C}{(R + R_{\text{wac}})C}$$

作业：

✚ 7.1

✚ 7.4

✚ 7.8

✚ 7.19

✚ 7.20