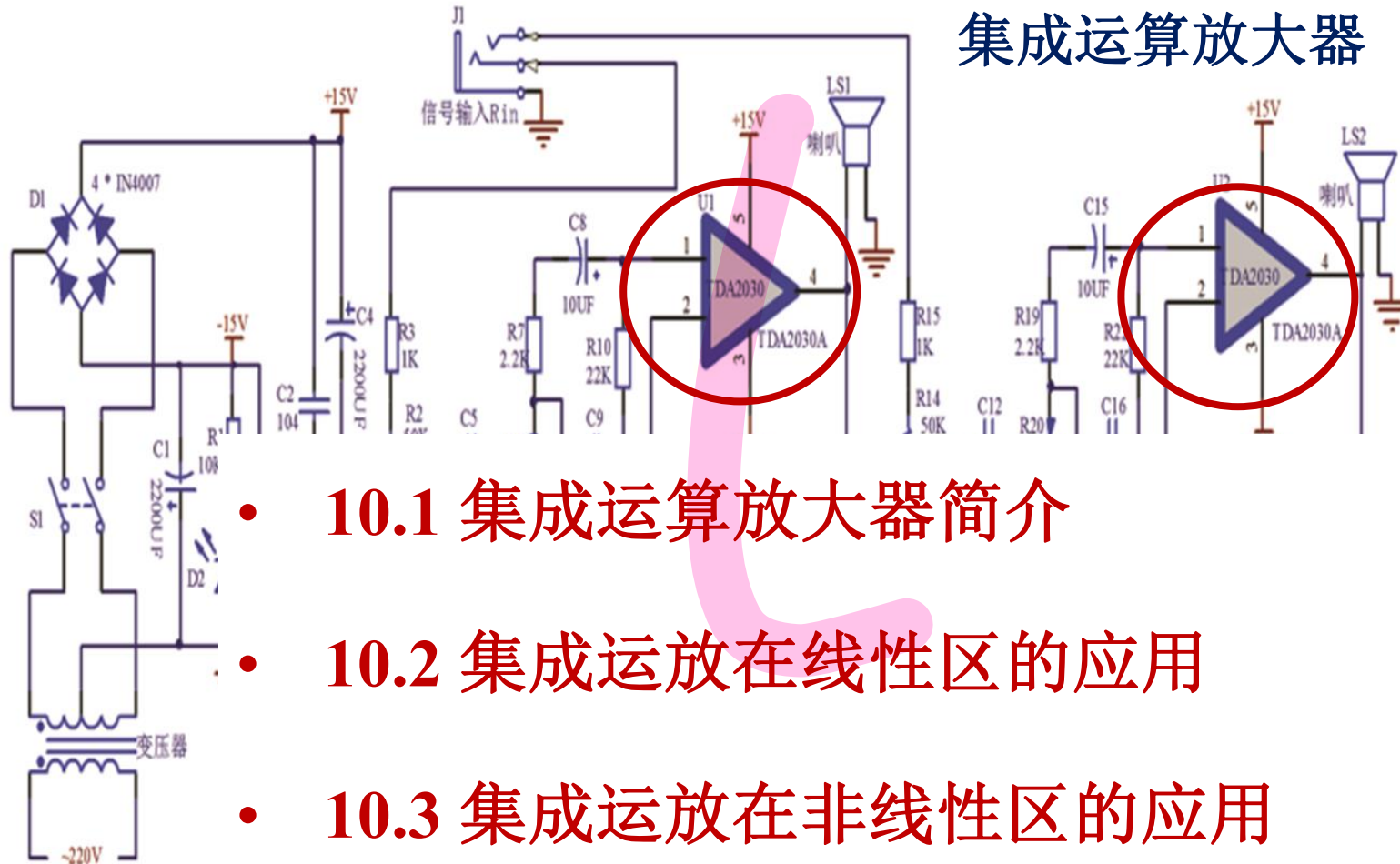




第十章 集成运算放大器及应用

集成运算放大器



- 10.1 集成运算放大器简介
- 10.2 集成运放在线性区的应用
- 10.3 集成运放在非线性区的应用

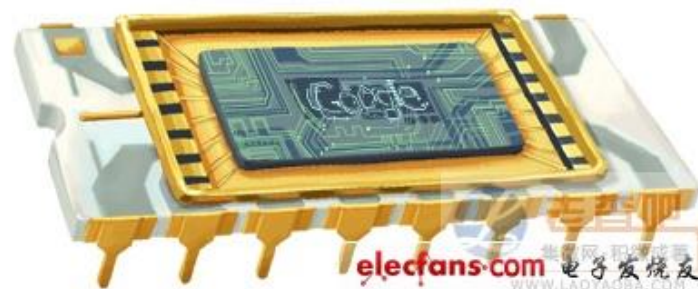
有源音箱电路原理图



集成运算放大器简介

集成电路

把整个电路的各个元件以及相互之间的连接同时制造在一块半导体芯片上，组成一个不可分的整体



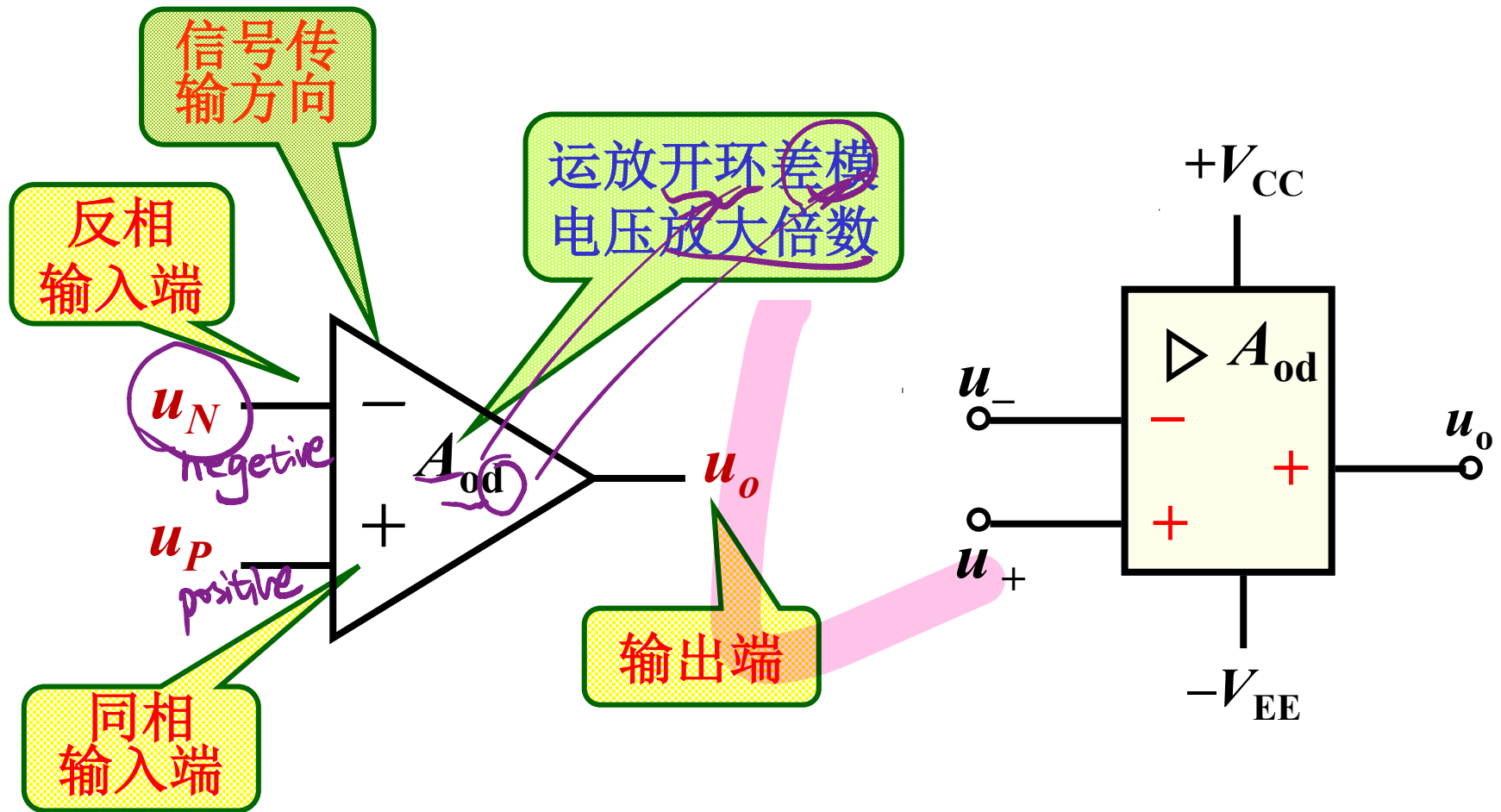
集成运算放大器

简称集成运放

一种集成的具有很高的放大倍数的多级直接耦合放大电路



集成运放的符号





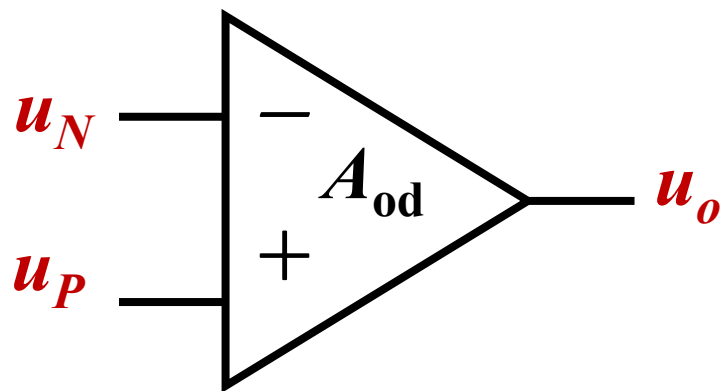
集成运放主要参数

摘自秦曾煌《电子技术》

参数	类 型	通用型	高精度型	高阻型	高速型	低功耗型
	型 号	CF741 (F007)	CF7650	CF3140	CF715	CF3078C
电源电压 $\pm U_{CC}(U_{DD})/V$		± 15	± 5	± 15	± 15	± 6
开环差模电压增益 A_{uo}	很大!	106	134	100	90	92
输入失调电压 U_{IO}/mV		1	$\pm 7 \times 10^{-4}$	5	2	1.3
输入失调电流 I_{IO}/nA		20	5×10^{-4}	5×10^{-4}	70	6
输入偏置电流 I_{IB}/nA		80	1.5×10^{-3}	10^{-2}	400	60
最大共模输入电压 U_{ICM}/V		± 15	+2.6 -5.2	+12.5 -15.5	± 12	+5.8 -5.5
最大差模输入电压 U_{IDM}/V		+30		+8	± 15	± 6
共模抑制比 K_{CMR}/dB	很大!	90	130	90	92	110
输入电阻 $r_i/M\Omega$	很大!	2	10^6	1.5×10^6	1	



理想集成运放



理想化条件:

1. 开环电压放大倍数

$$A_{od} \rightarrow \infty$$

2. 差模输入电阻

$$r_{id} \rightarrow \infty \quad U_d - U_n$$

3. 输出电阻

$$r_o \rightarrow 0$$

4. 共模抑制比

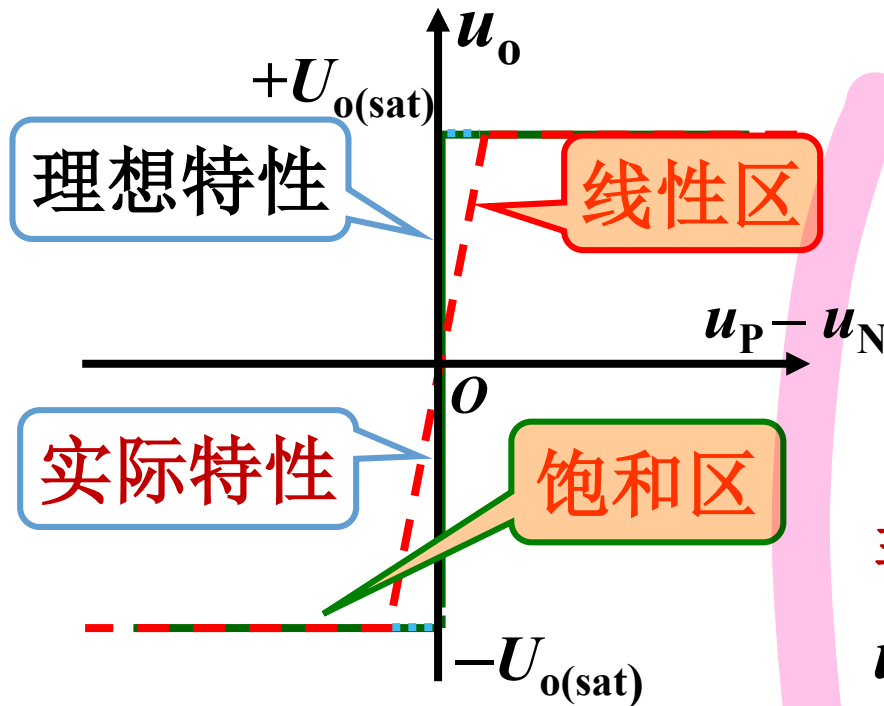
$$K_{CMRR} \rightarrow \infty$$

实际运算放大器的技术指标接近理想化条件，
用理想运算放大器分析电路可使问题大大简化!



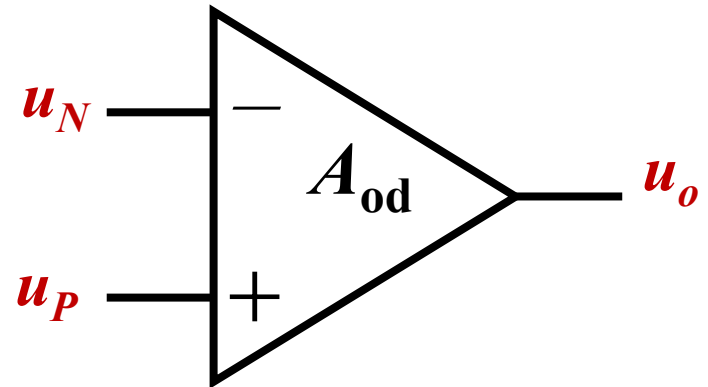
集成运放的两种工作状态

电压传输特性 $u_o = f(u_i)$



线性区:

$$u_o = A_{od} (u_P - u_N)$$



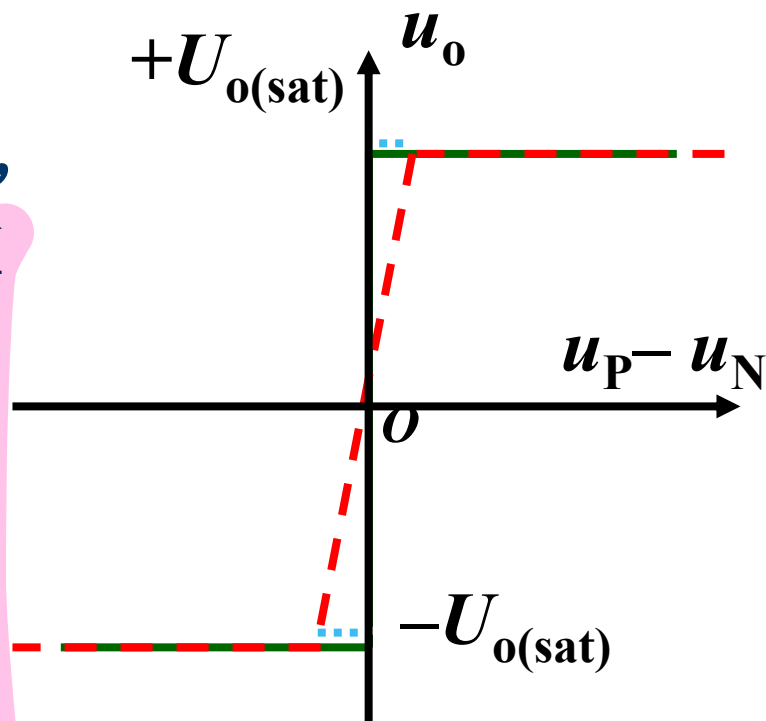
非线性区 (饱和区):

$$u_P > u_N \text{ 时, } u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_P < u_N \text{ 时, } u_o = -U_{o(sat)}$$

例：若 $U_{o(sat)}=12V$ ， $A_{od}=10^6$ ，
则 u_i 满足什么条件时，运放
处于线性区？

$$|u_i| < 12\mu V$$



A_{od} 越大，运放的线性范围越小，必须在运放输出与输入之间加负反馈才能扩大运放输入信号的线性范围

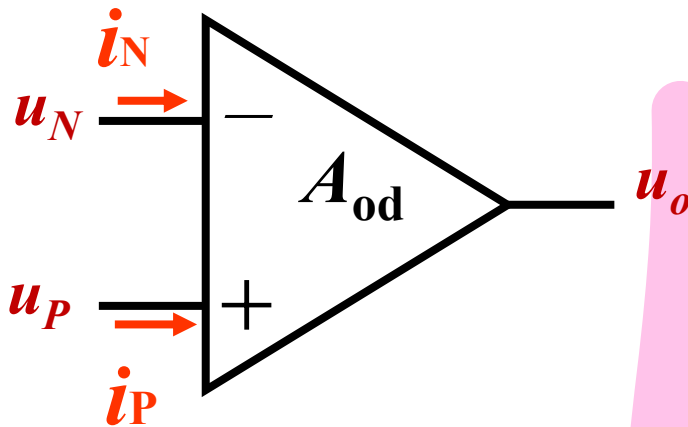
运放在线性区的应用---运算电路

运放在非线性区的应用---电压比较器



运放工作在线性区的特点

为保证运放工作在线性区，
电路都引入了深度负反馈



$$u_o = A_{od}(u_P - u_N)$$

$$A_{uo} \approx \infty$$

运放差模输入电阻

$$u_P \approx u_N \quad \text{虚短路 (虚短)}$$

$$r_{id} \approx \infty$$

$$i_P = i_N \approx 0 \quad \text{虚开路 (虚断)}$$

$$r_o \approx 0$$

放大倍数与负载无关

分析多个运放级联的电路时可不考虑前后级的相互影响



运放在线性区的应用——运算电路

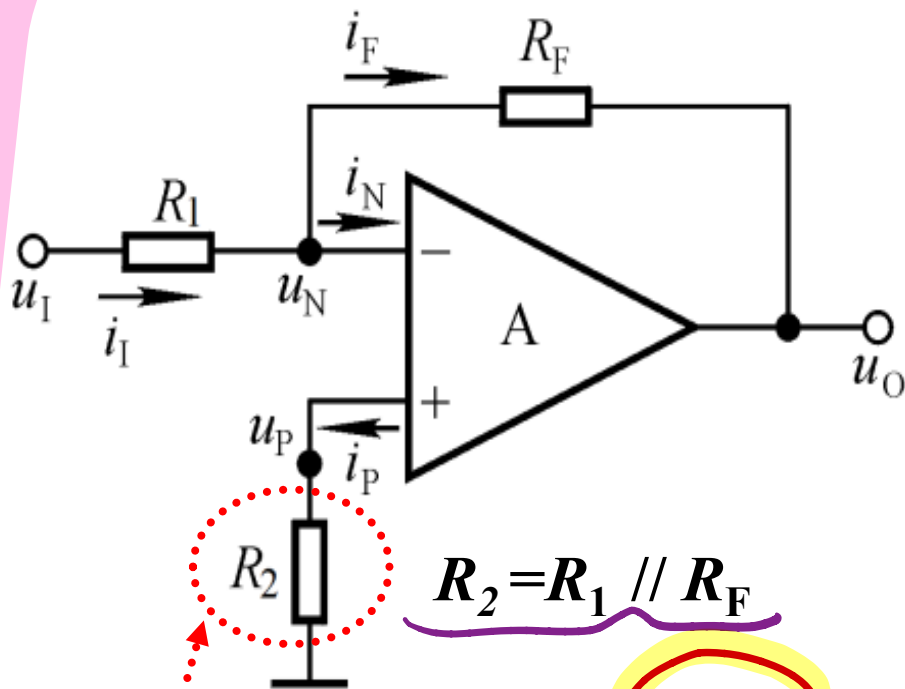
反相比例运算电路

结构特点：

反馈电阻 R_F 跨接在输出端和反相输入端间

信号从反相端输入

同相输入端通过电阻 R_2 接地



平衡电阻

使输入端对地的静态电阻相等
消除静态基级电流对输出的影响



反相比例运算电路

电压放大倍数

整体 feedback $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i}$

虚断 $i_P \approx 0 \rightarrow u_P \approx 0$

虚短 $u_N \approx u_P \approx 0$

虚断 $i_1 \approx i_f$

虚地

闭环

输入电阻

$$R_i \approx R_1$$

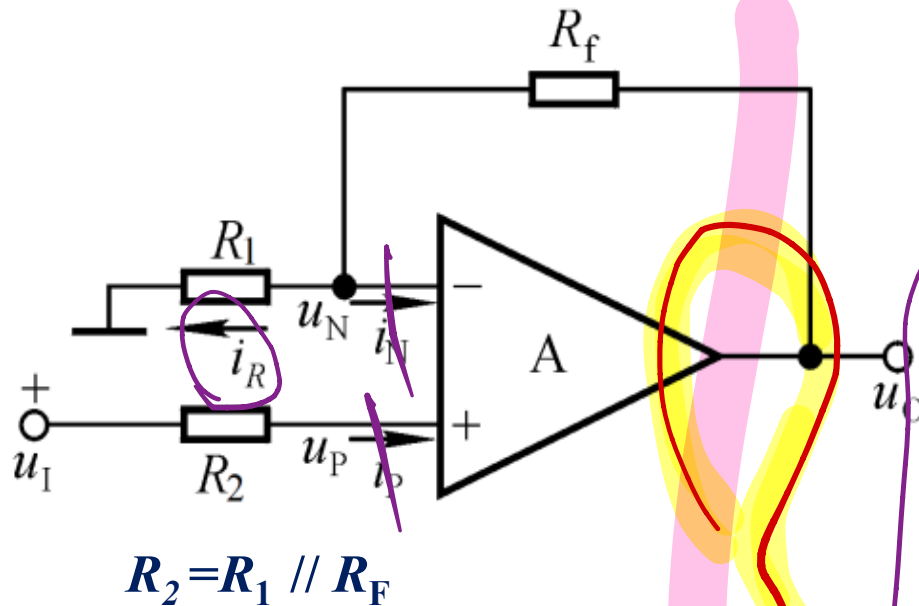
$$\frac{u_I - u_N}{R_1} \approx \frac{u_N - u_O}{R_F}$$

$$u_O \approx -\frac{R_F}{R_1} u_I$$

这是在干什么？



同相比例运算电路



结构特点:

- ✓ 反馈引到反相输入端
- ✓ 信号从同相端输入

电压放大倍数

$$i_N = i_P = 0$$

$$u_N = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O$$

$$u_N = u_P = u_I$$

$$u_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

输入电阻 $R_i = \infty$



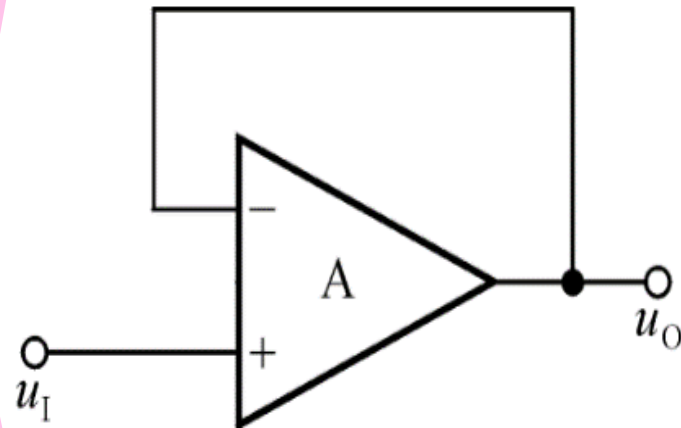
同相比例运算电路的特例

电压跟随器

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

当 $R_F = 0$ 或 $R_1 = \infty$ 时,

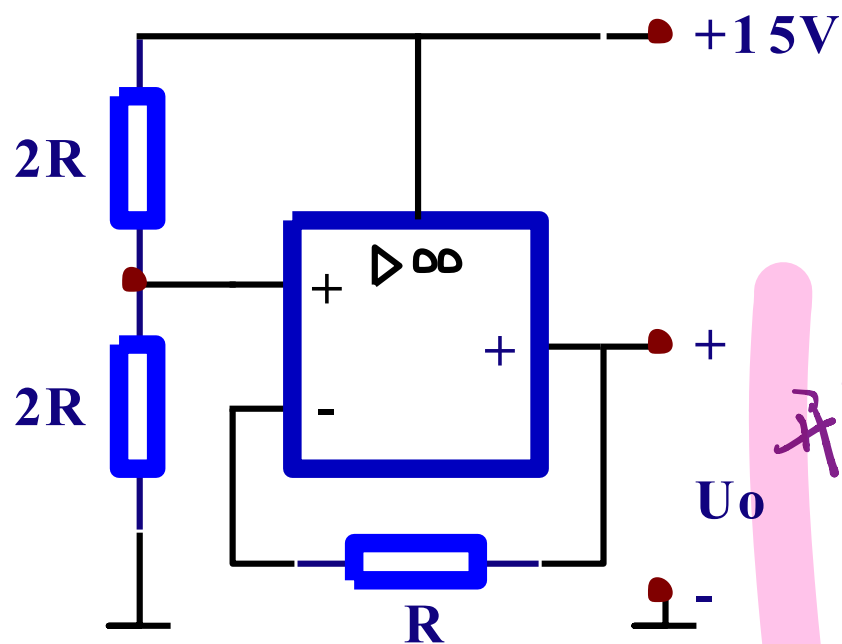
$$A_{uf} = 1$$



$$u_o = u_- = u_+ = u_i$$

作用与分离元件的射极输出器相同，
电压跟随性能更好

例：试计算 U_o



解：电压跟随器

$$U_+ = 15 / 2 = 7.5V$$

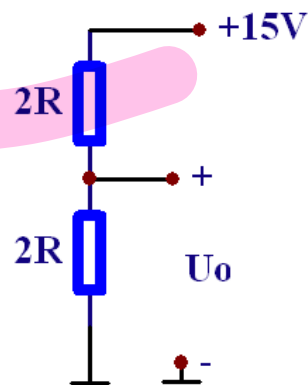
$$U_o = U_+ = 7.5V$$

开路

用两个电阻直接分压可以吗？

当负载 R_L 变化时，其两端电压 u_o 不会随之变化！

电压跟随器

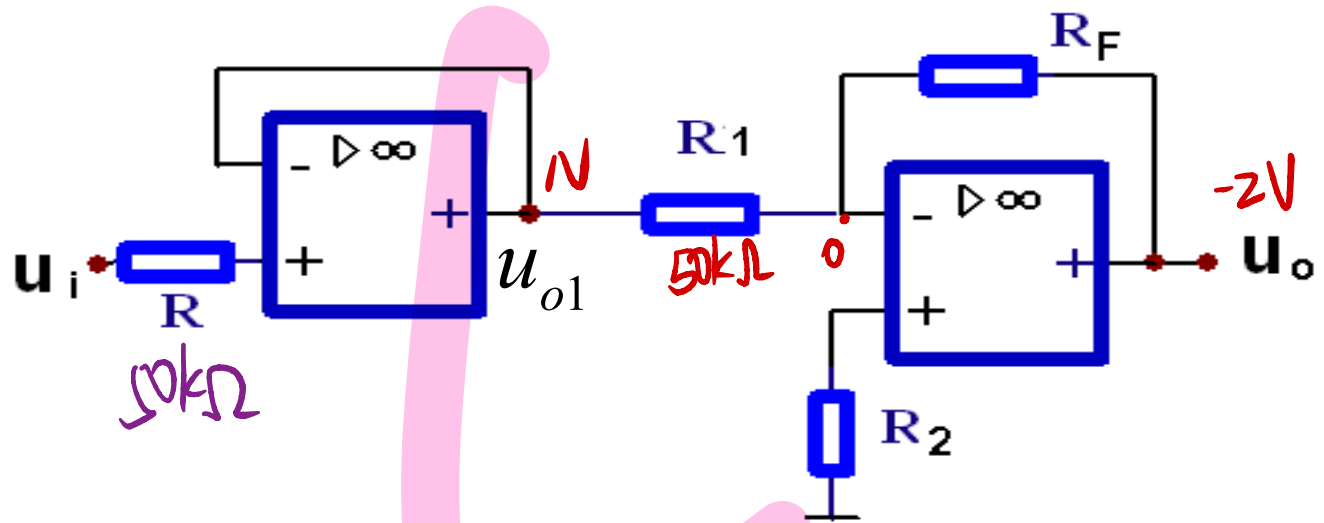


当负载 R_L 变化时， u_o 会随之变化



两级运算电路

例： $R_1=50\text{K}\Omega$, $R_F=100\text{K}\Omega$ ，若输入电压 $u_i=1\text{V}$ ，求输出 u_o 。



解：

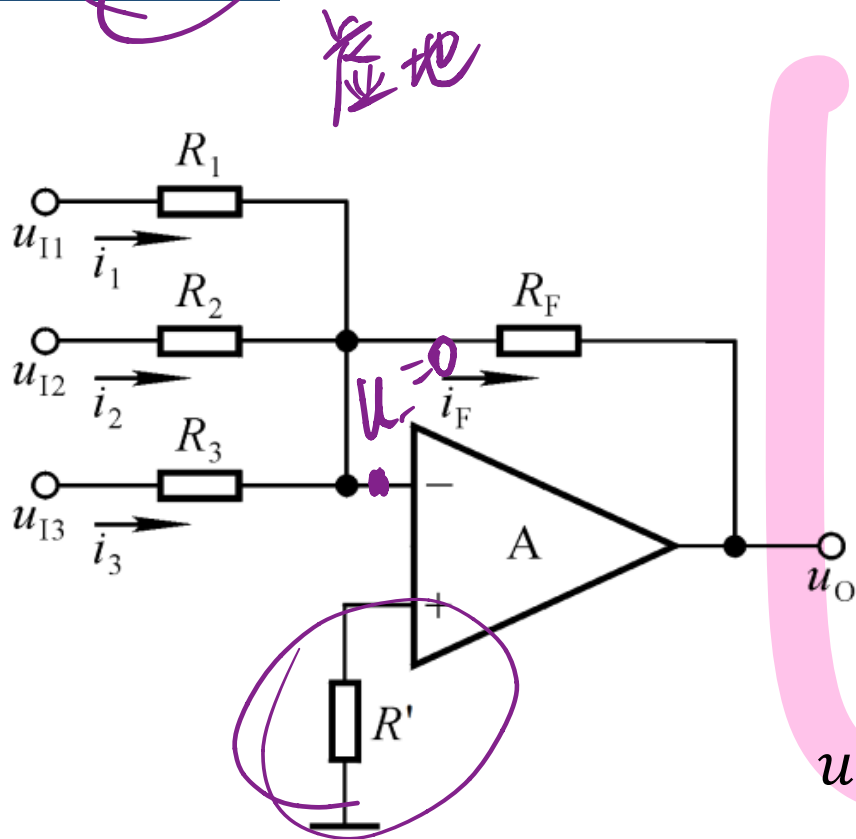
$$u_{o1} = u_i$$

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

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i = -2\text{V}$$



反相输入求和



虚断 $i_1 + i_2 + i_3 = i_F$

虚地

集成运放的输入
之初为虚地 $u_- = 0$

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

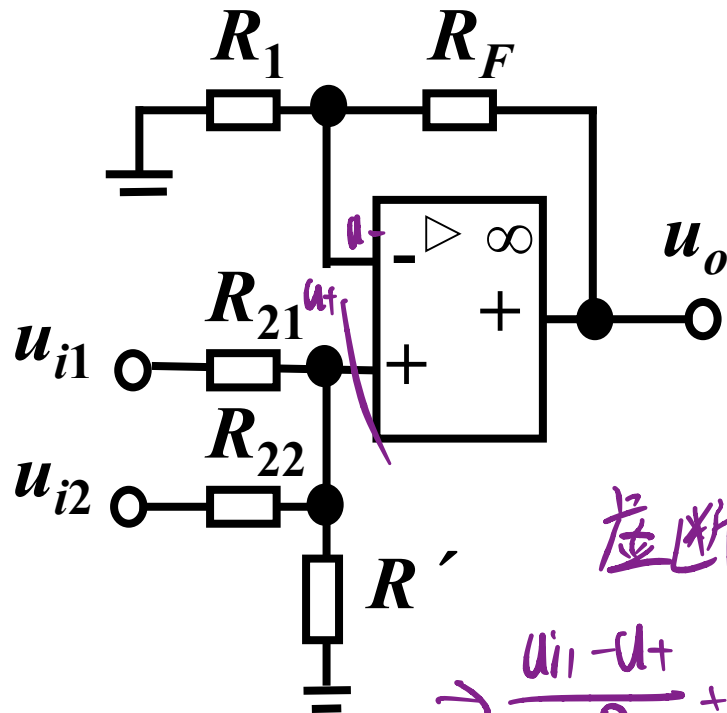
$$u_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_{I1} + \frac{R_F}{R_2}u_{I2} + \frac{R_F}{R_3}u_{I3}\right)$$

$$R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_F$$

实际应用时可适当增加
或减少输入端的个数



同相输入求和



$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+$$

u_+ 与 u_{i1} 和 u_{i2} 的关系?

结点电位法

虚断: $i_+ = i_- = 0$

$$\Rightarrow \frac{u_{i1} - u_+}{R_{21}} + \frac{u_{i2} - u_+}{R_{22}} = \frac{u_+}{R'}$$

$$R_1 // R_F = R_{21} // R_{22} // R'$$

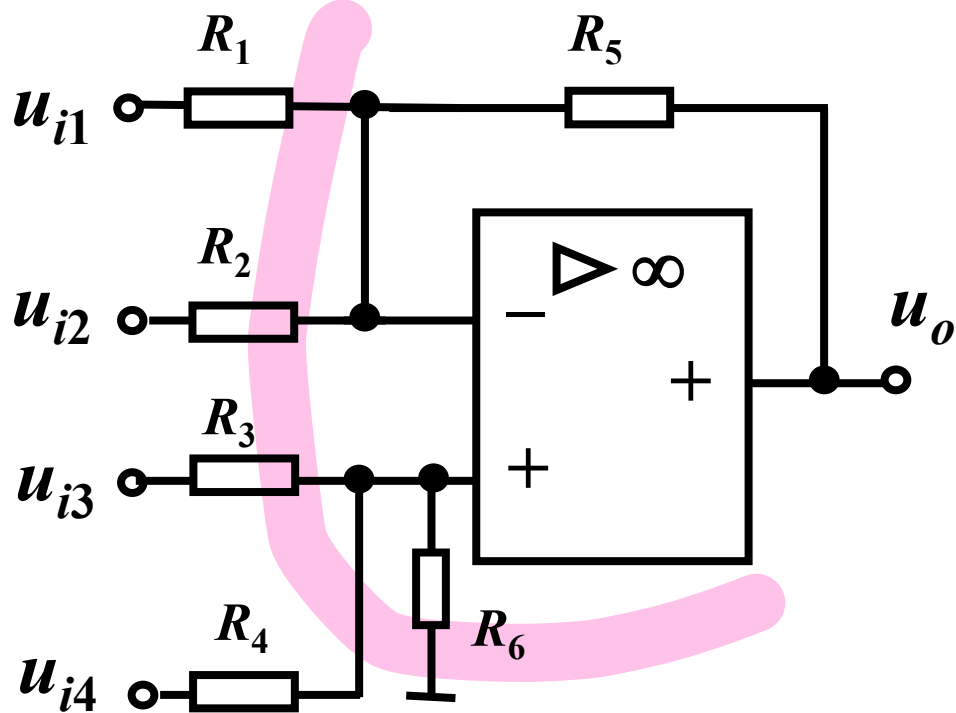
虚短: $u_+ = u_-$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+$$

$$u_+ = \frac{\frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}}}{\frac{1}{R'} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}}$$
$$\frac{u_o}{R_F + R_1} = \frac{u}{R_1}$$



加减运算

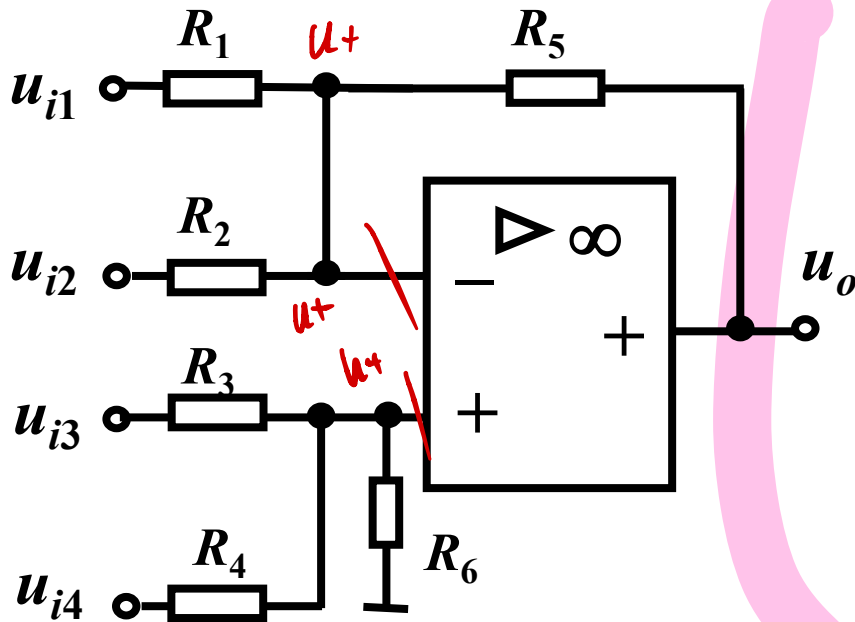


$$R_1 // R_2 // R_5 = R_3 // R_4 // R_6$$

实际应用时可适当增加或减少输入端的个数，以适应不同的需要



加减运算



虚断:

结点电压法

$$u_+ = (R_3 // R_4 // R_6) \left(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$

$$u_- = (R_1 // R_2 // R_5) \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_o}{R_5} \right)$$

虚短: $u_- = u_+$

$$(R_1 // R_2 // R_5) \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_o}{R_5} \right) = (R_3 // R_4 // R_6) \left(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$

$$R_1 // R_2 // R_5 = R_3 // R_4 // R_6$$

$$\frac{u_{i3} - u_+}{R_3} + \frac{u_{i4} - u_+}{R_4} = \frac{u_+}{R_6}$$

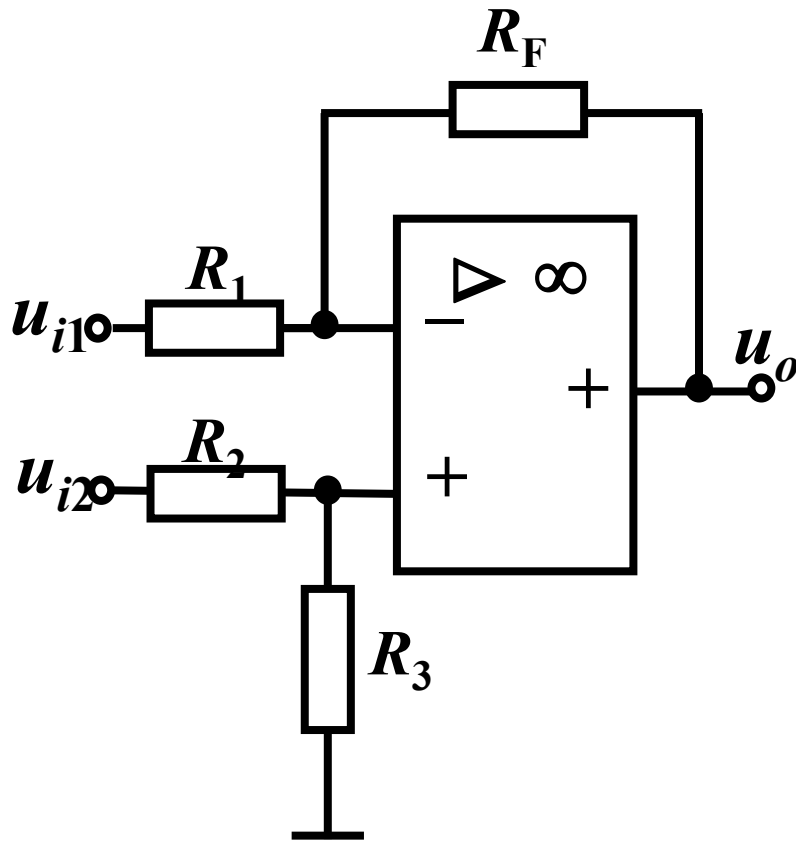
$$\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3} \right) u_+ = \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4}$$

$$u_o = R_5 \left(-\frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$



差分运算电路

叠加定理



$R_1 = R_2$ 和 $R_3 = R_F$ 时

u_{i1} 单独作用: $u_{o1} = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1}$

u_{i2} 单独作用: $u_- = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$

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

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

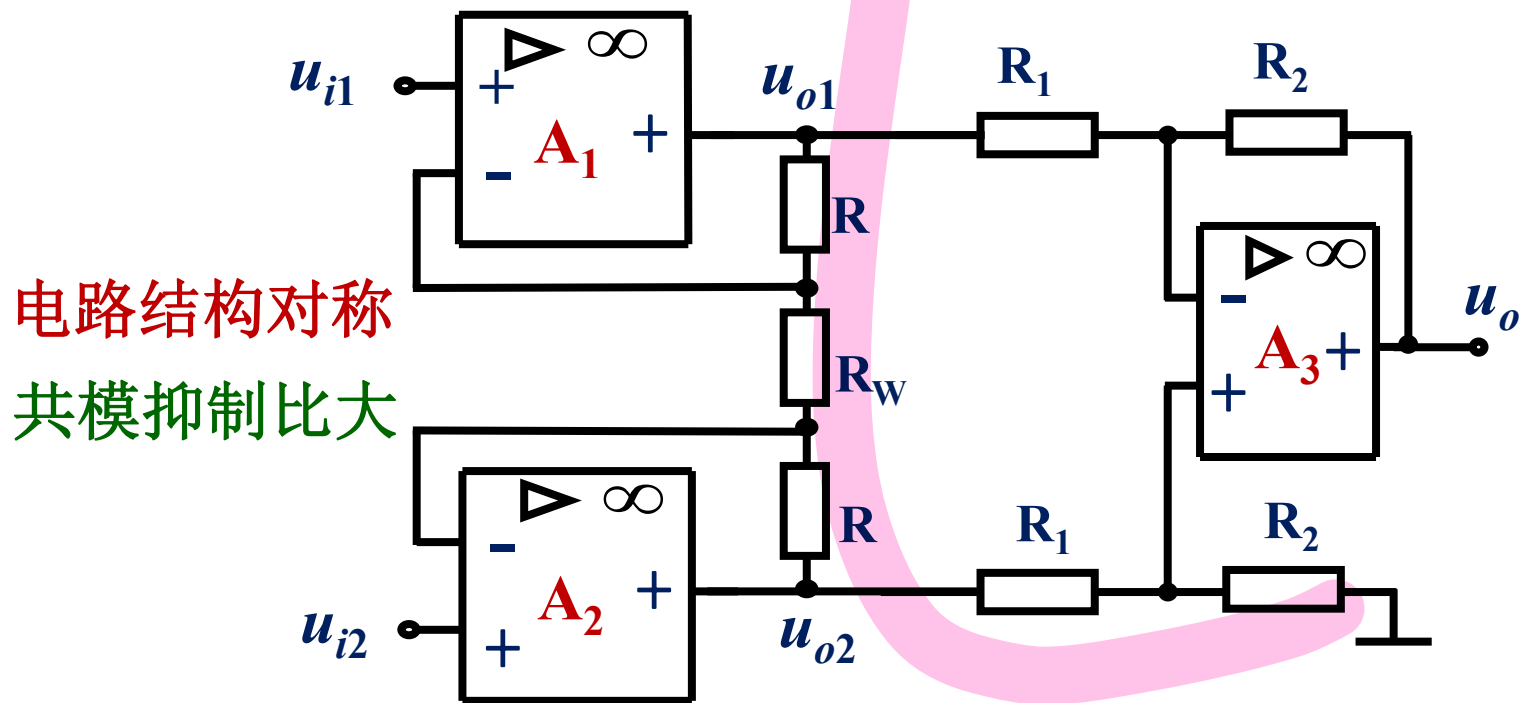
$$= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

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



三运放构成的测量放大电路

测量放大电路用于放大从测量电路或传感器送来的微弱信号，对电路的主要要求是输入电阻高和共模抑制比大。



电路结构对称

共模抑制比大

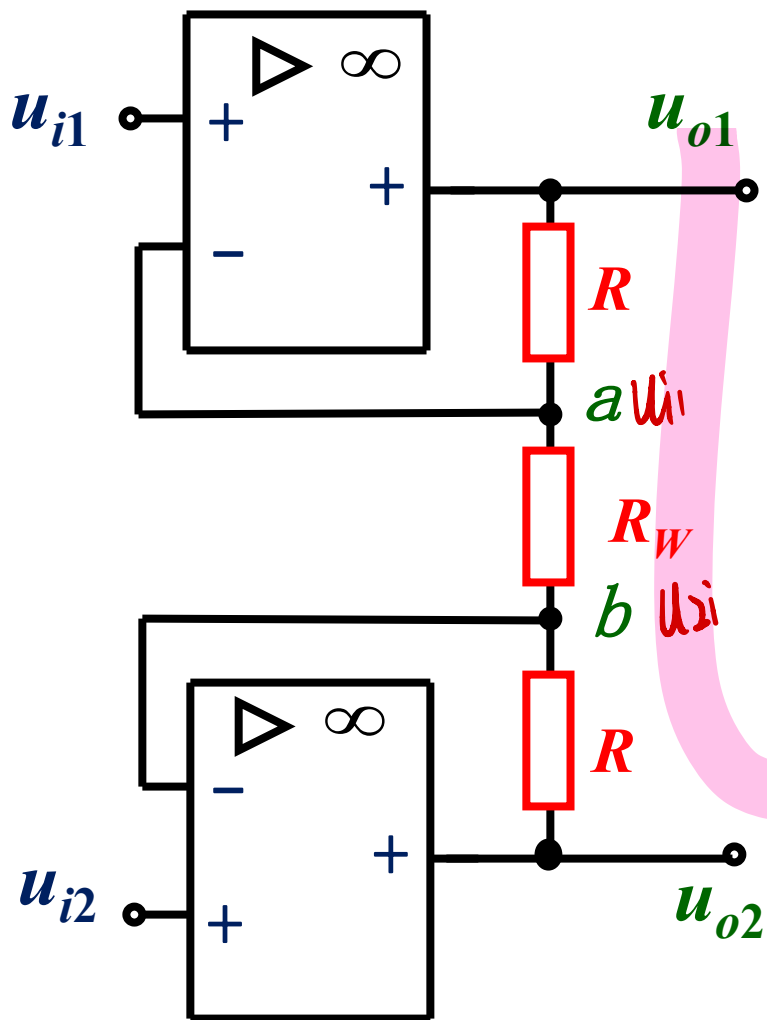
两个同相输入运算电路

输入电阻高

对被测电路的影响小

差分运算电路

放大差模信号



虚短

$$u_a = u_{i1}$$

$$u_b = u_{i2}$$

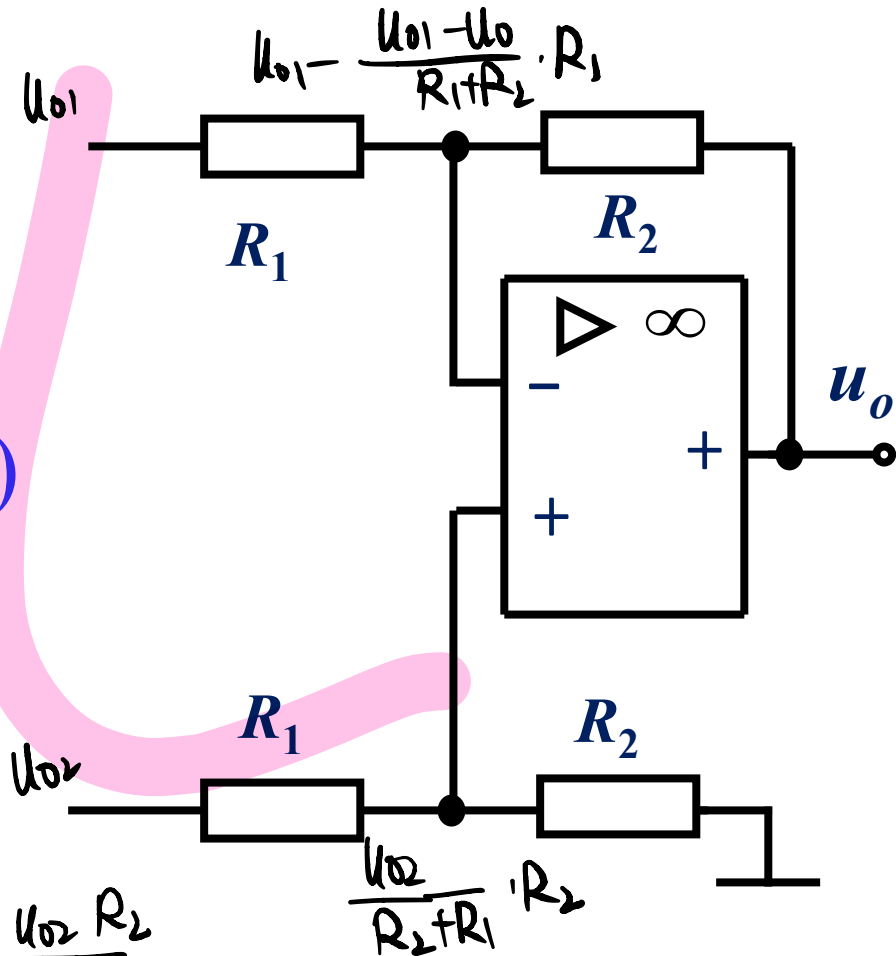
虚断

$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_w} = \frac{u_a - u_b}{R_w}$$

$$u_{o2} - u_{o1} = \frac{2R + R_w}{R_w} (u_{i2} - u_{i1})$$



$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1})$$

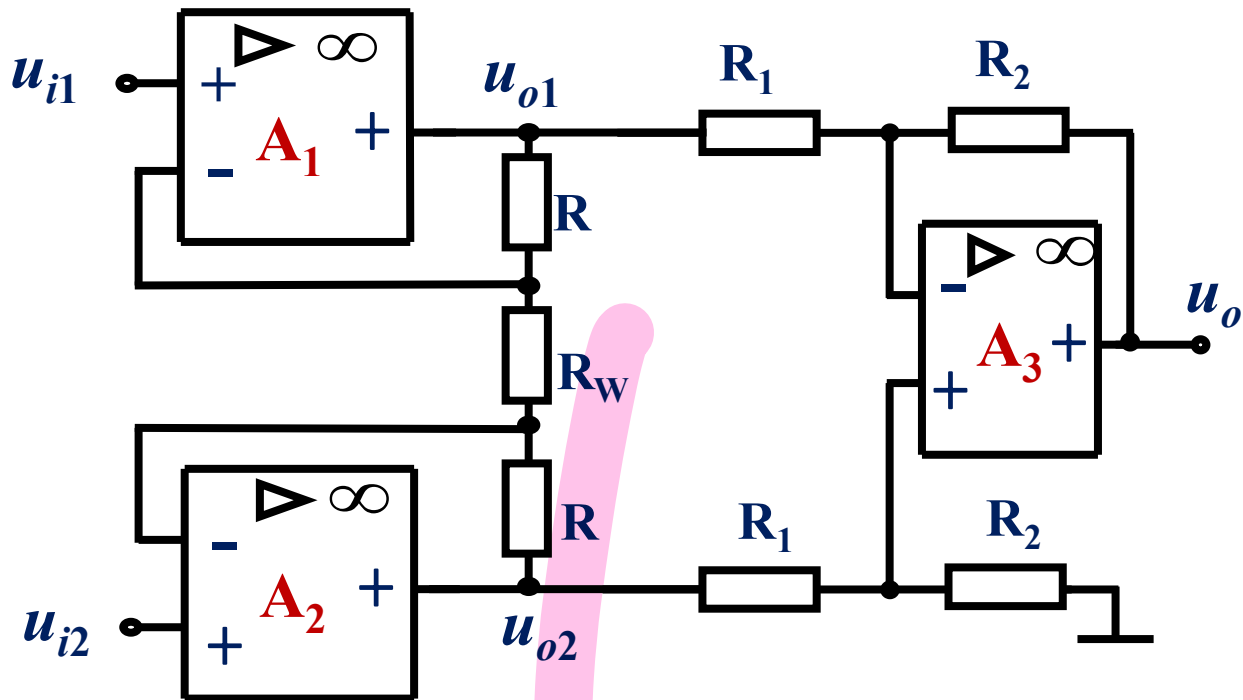


$$u_{o1} = \frac{u_{o1} - u_o}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{u_{o2} R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\cancel{R_1} u_{o1} + R_2 u_{o1} = \cancel{u_{o1} R_1} - \underline{u_o R_1} + u_{o2} R_2$$



三运放构成的测量放大电路

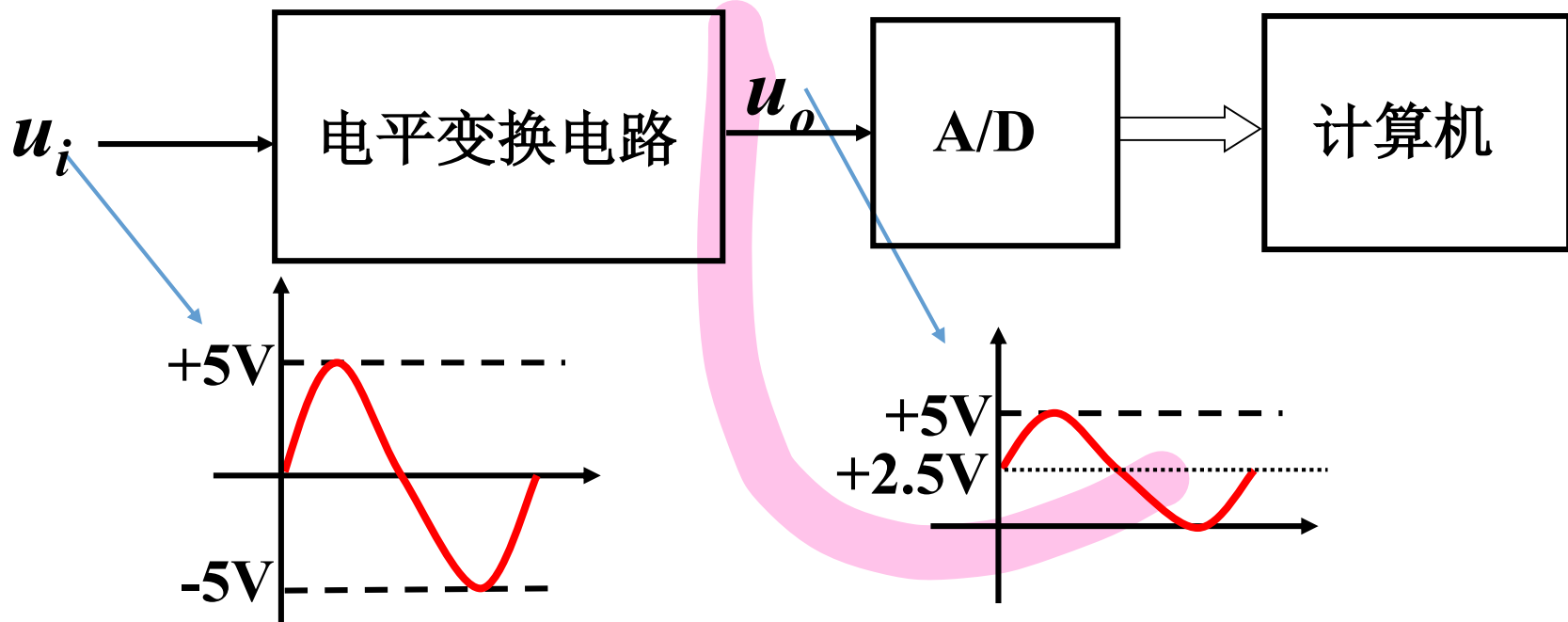


$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1})$$



电平变换电路

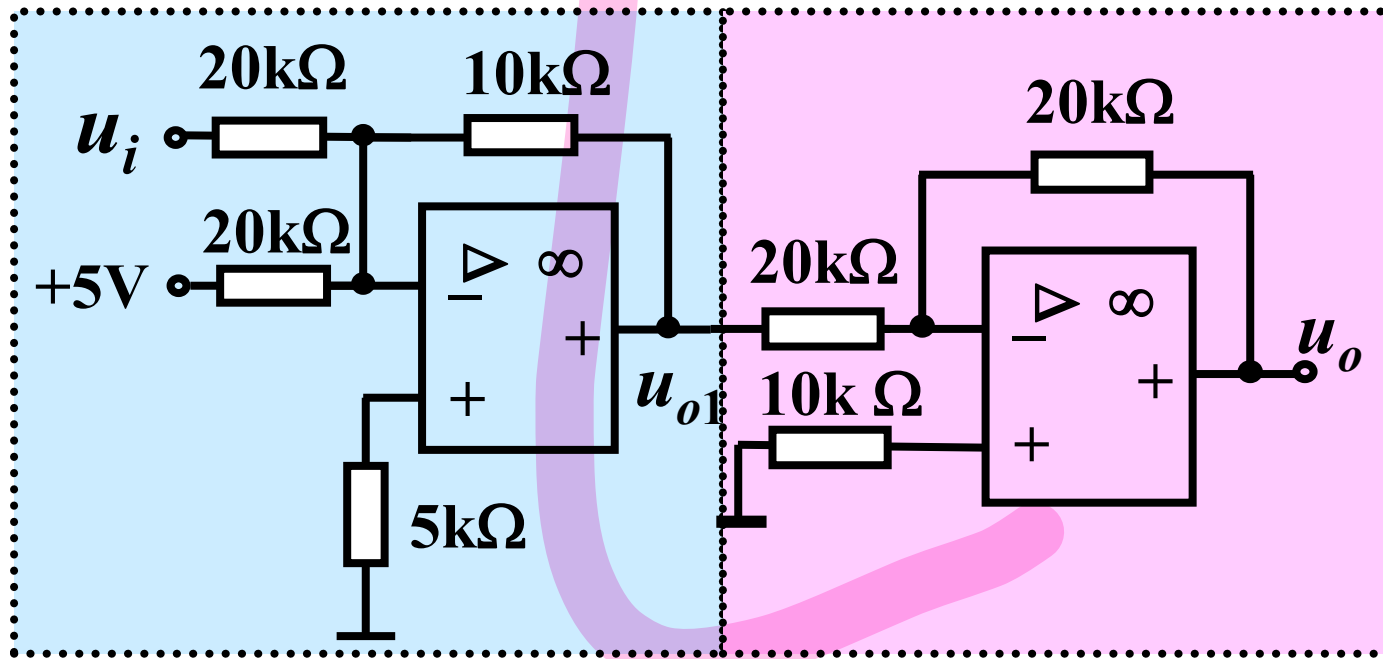
A/D变换器要求其输入电压的幅度为 $0 \sim +5\text{V}$ ，现有信号变化范围为 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$ 。试设计一电平变换电路，将其变化范围变为 $0 \sim +5\text{V}$ 。



$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$



$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$
$$= 0.5(u_i + 5) \quad \text{V}$$



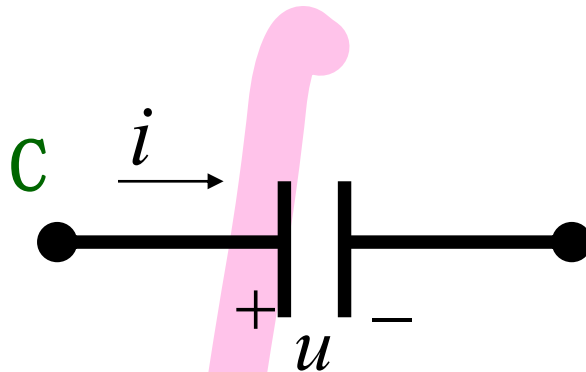
$$u_{o1} = -\frac{10}{20} \times (u_i + 5) = -0.5(u_i + 5)$$

$$u_o = -\frac{20}{20} \times u_{o1} = 0.5(u_i + 5)$$



微分运算电路与积分运算电路

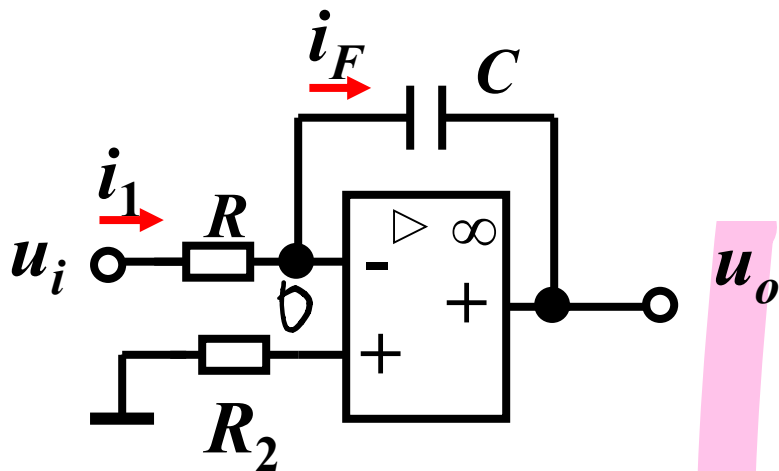
复习：电容器上的电容量, 电流, 电压的关系



$$i = C \frac{du}{dt} \quad u = \frac{1}{C} \int i dt$$



积分运算电路



$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{u_i}{R} \\ i_F &= -C \frac{du_o}{dt} \end{aligned} \right\}$$

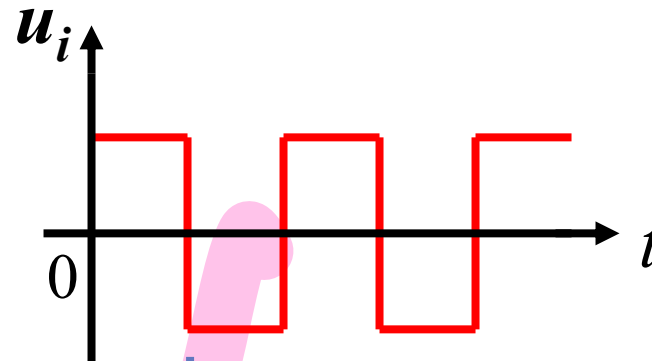
$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

应用:

1. 在电子开关中用于延迟
2. 波形变换
3. A/D转换中，将电压量变为时间量
4. 移相



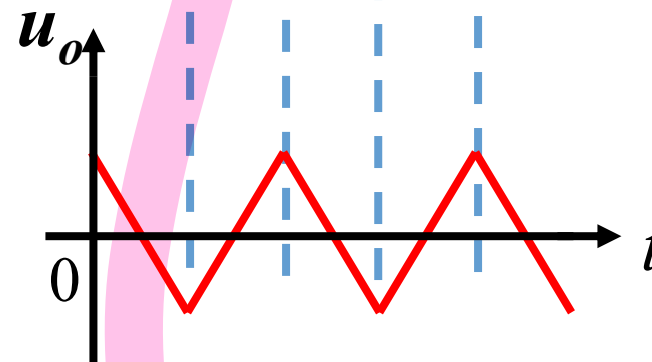
输入方波



波形变换

输出?

三角波

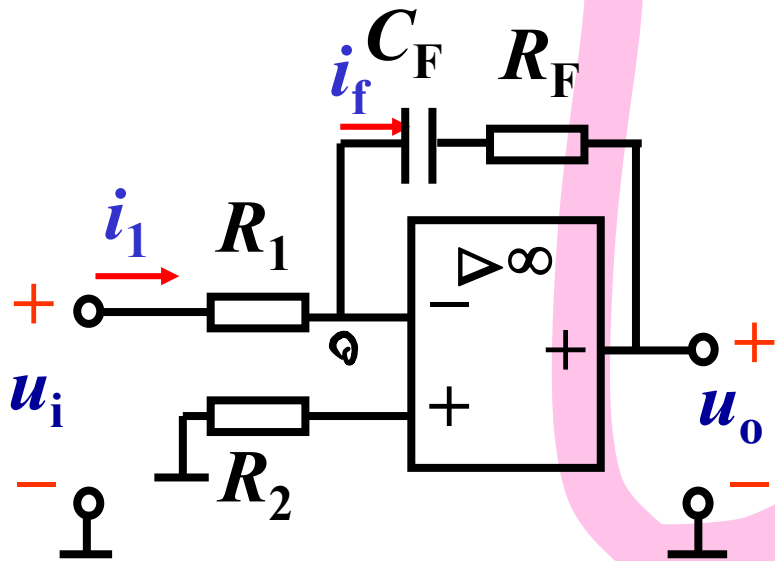


如果输入是正弦波，输出波形怎样？

移相



比例-积分运算电路



$$i_1 = i_f$$

$$u_o = -(R_F i_f + u_C)$$

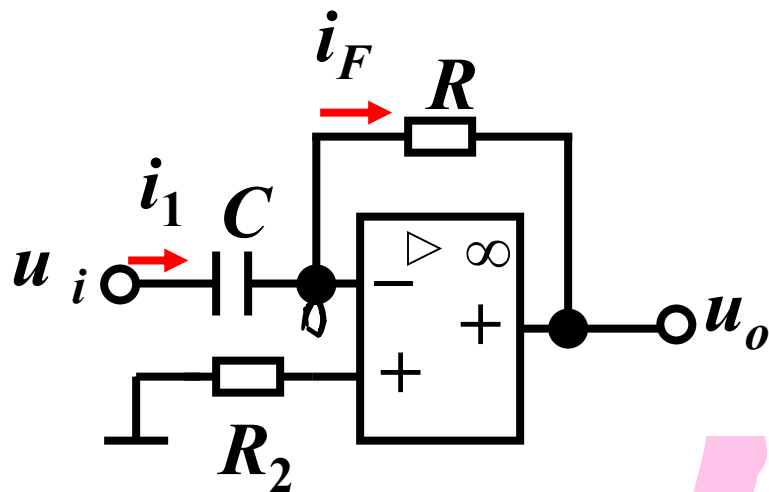
$$= -(R_F i_1 + \frac{1}{C_F} \int i_1 dt)$$

$$= -(\frac{R_F}{R_1} u_i + \frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt)$$

自动控制系统中的 PI 调节器



微分运算电路



$$i_F = -\frac{u_o}{R}$$

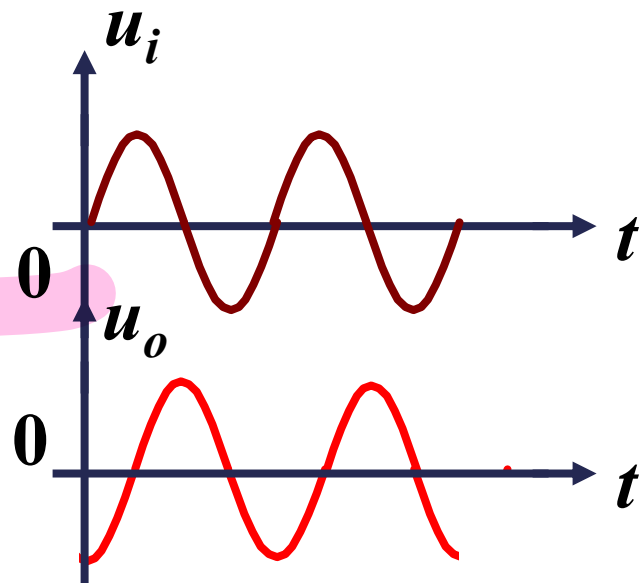
$$i_1 = C \frac{du_i}{dt}$$

$$i_1 = i_F$$

$$\Rightarrow u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$

若输入 $u_i = \sin \omega t$

$$\begin{aligned} \text{则 } u_o &= -RC\omega \cos \omega t \\ &= RC\omega \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

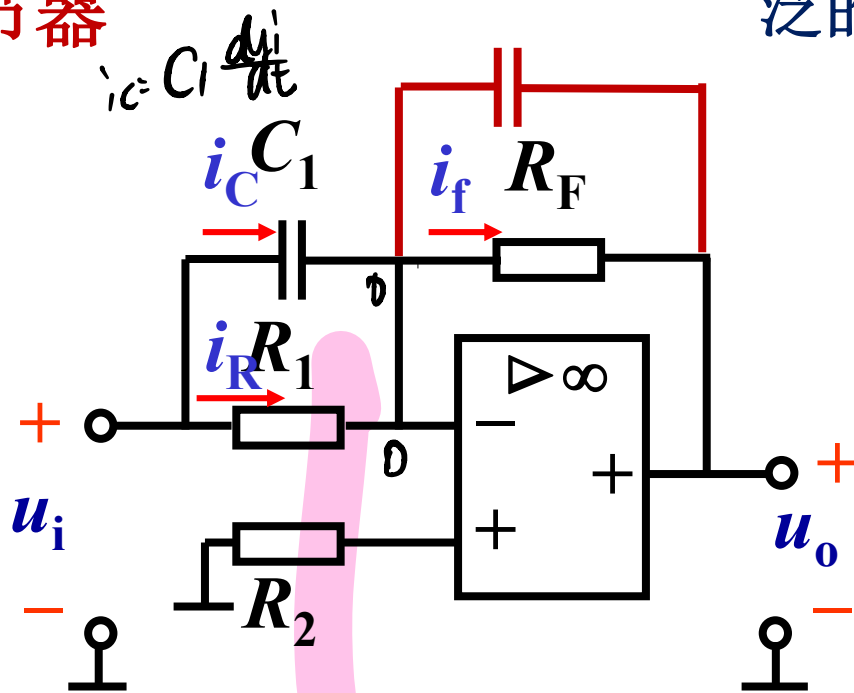




比例-积分-微分运算电路

PID调节器

工程中应用最为广泛的控制调节器



$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_i + R_F C_1 \frac{du_i}{dt}\right)$$

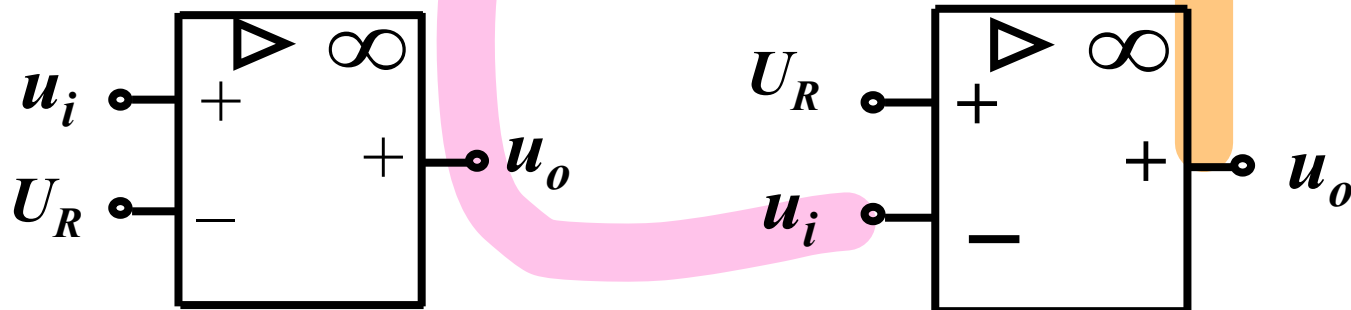


集成运放在非线性区的应用

电压比较器 比较输入电压和参考电压的大小

工作于非线性区 输出电压为: $u_o = \pm U_{o(sat)}$

简单比较器



U_R : 参考电压

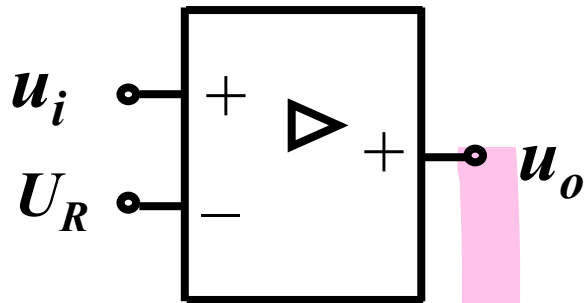
u_i : 比较信号

u_i 从同相端输入

u_i 从反相端输入

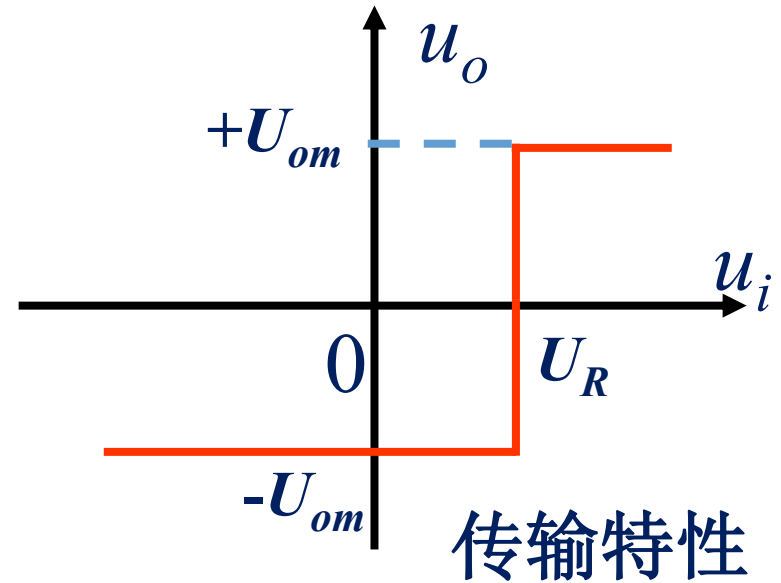


u_i 从同相端输入



U_R : 参考电压

u_i : 比较信号

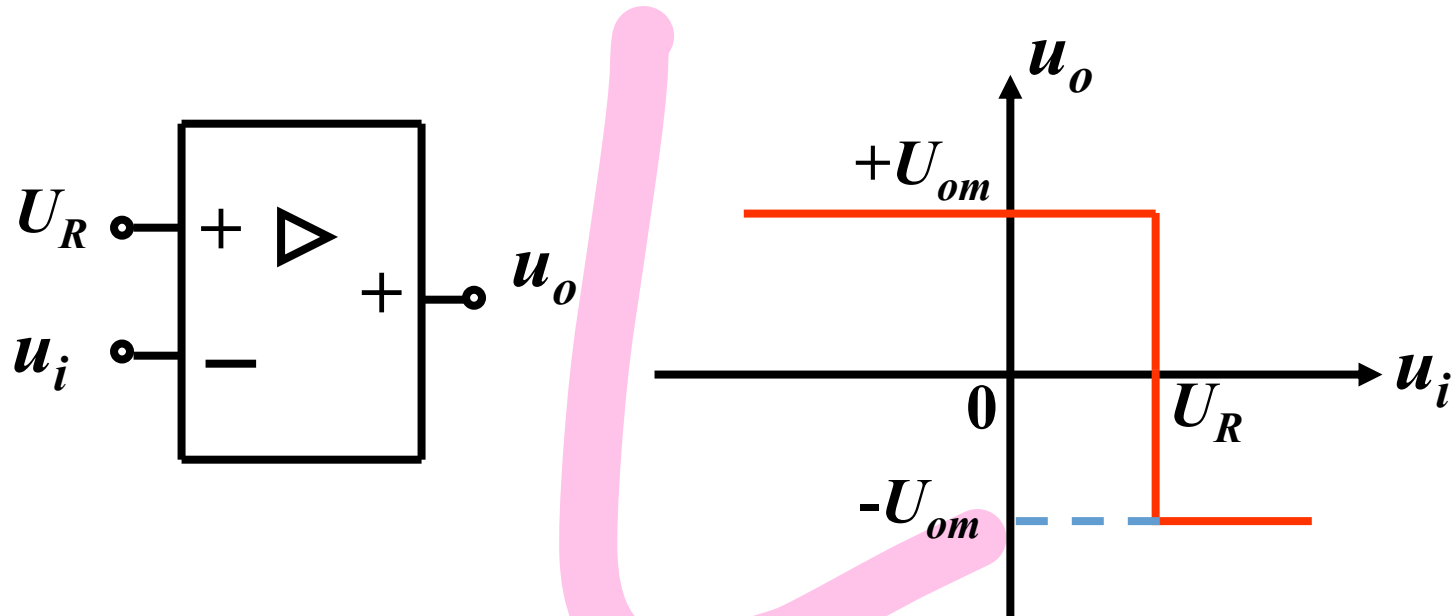


当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = +U_{om}$

当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = -U_{om}$



u_i 从反相端输入

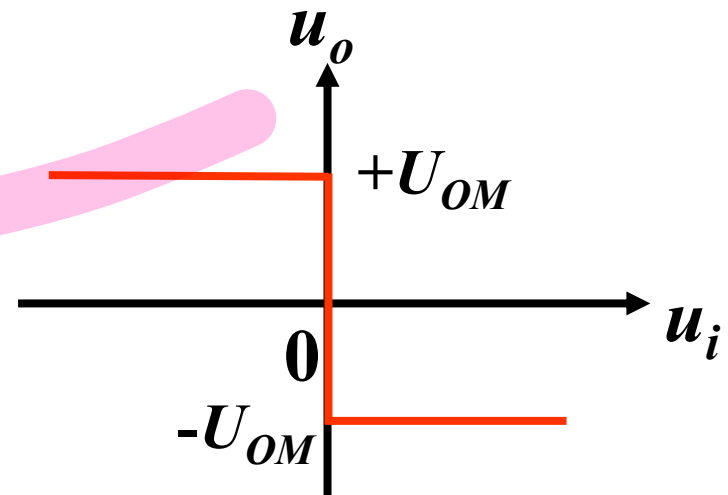
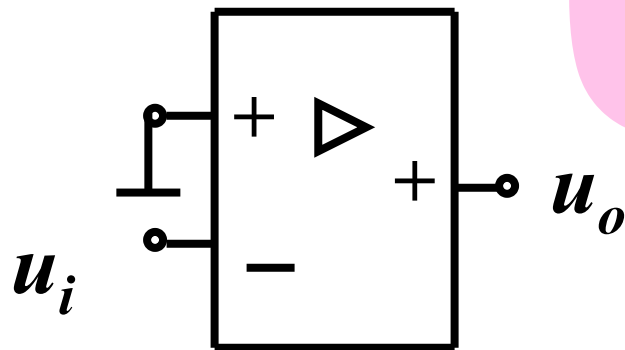
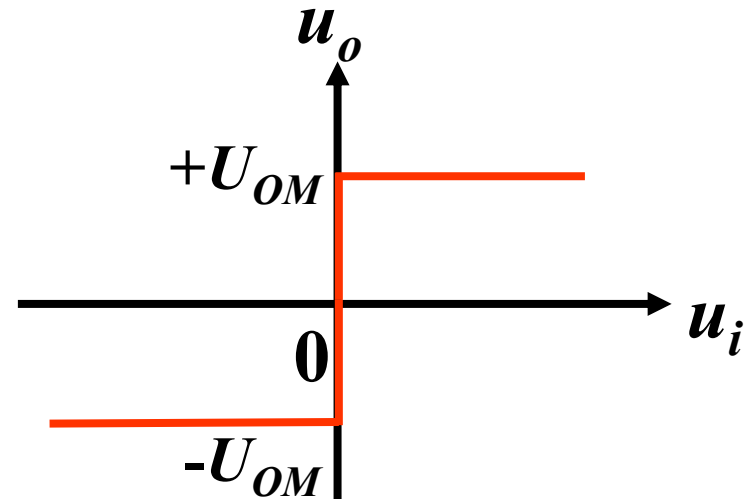
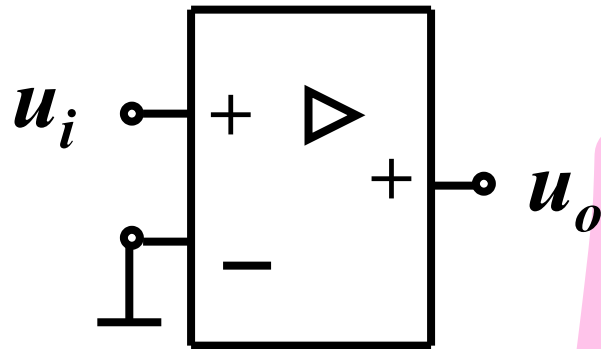


当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = +U_{om}$

当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = -U_{om}$

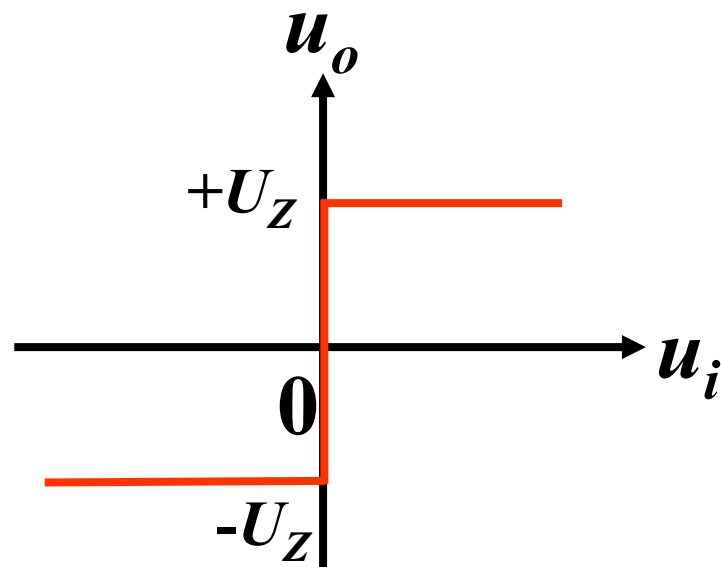
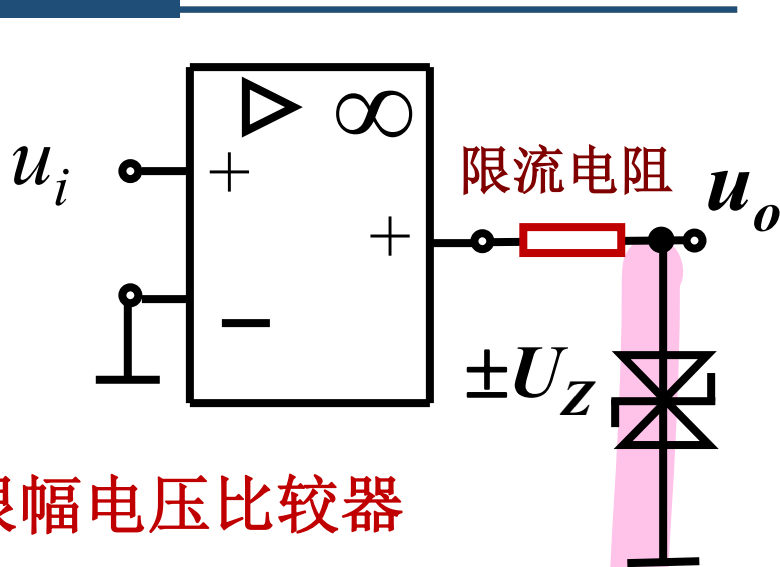


过零比较器: ($U_R=0$ 时)





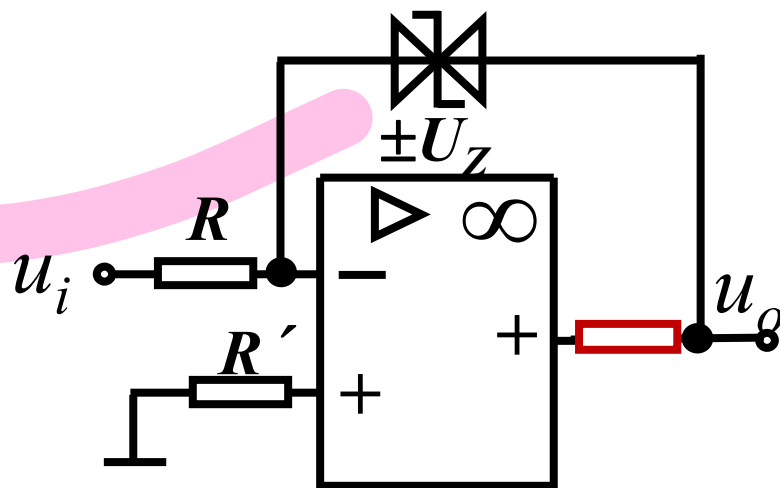
利用稳压管将输出电压限定在某一特定值



限幅电压比较器

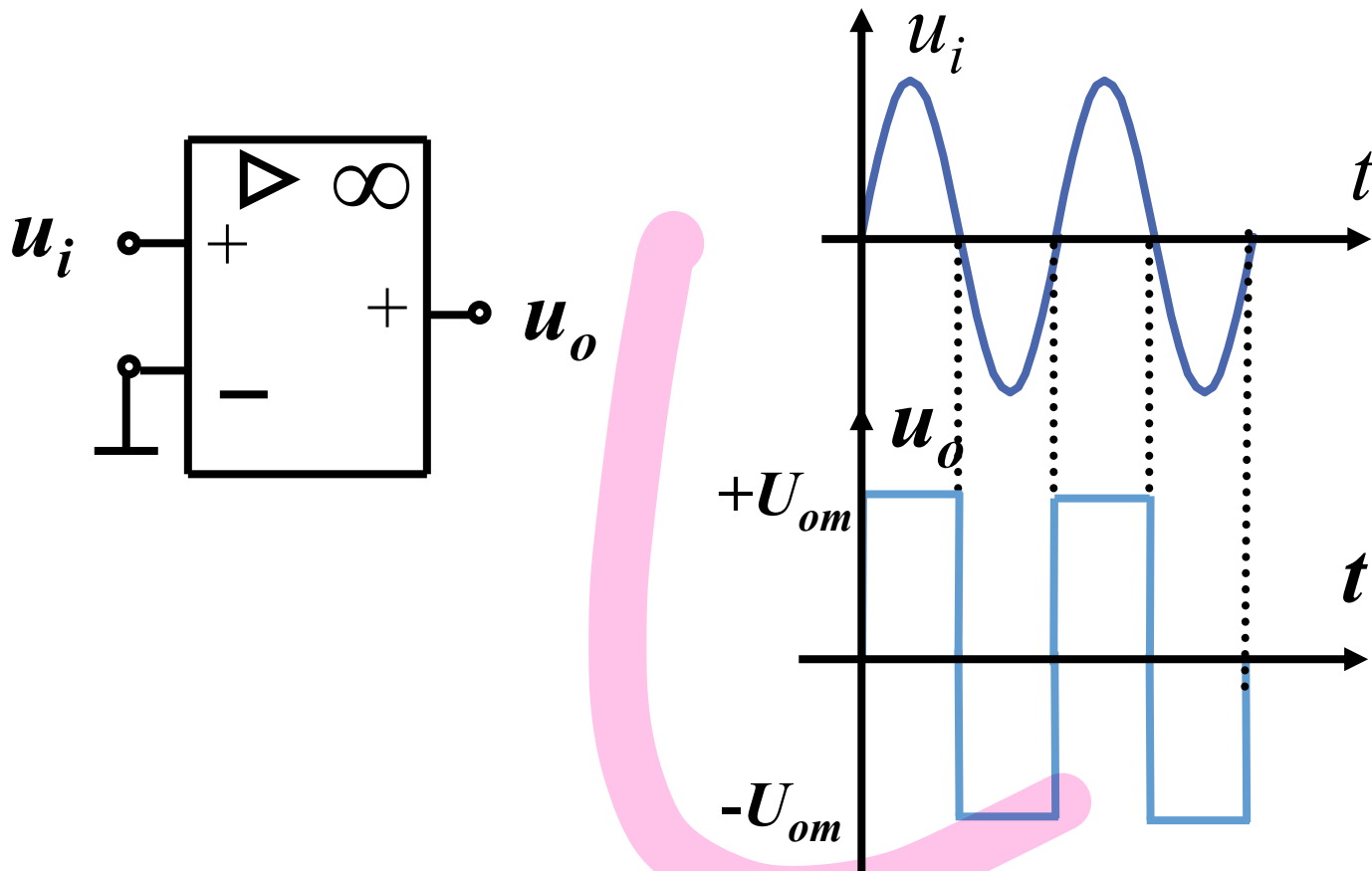
另一种形式限幅形式

—— 将双向稳压管接在负反馈回路上





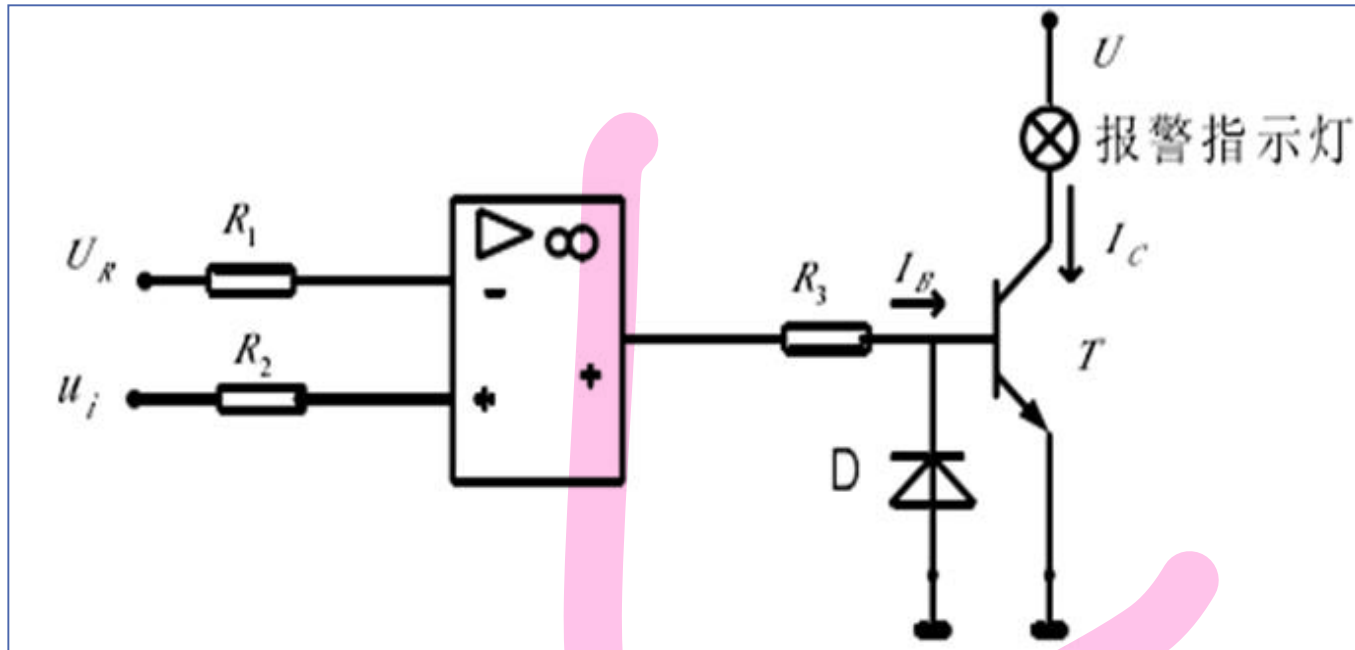
电压比较器应用：波形变换



将正弦波变为方波



电压比较器应用：监控报警装置



U_R 为参考电压， u_i 为由传感器检测的电压值

当 u_i 超过正常值时，报警灯亮



综合应用电路：火灾报警电路

u_{i1} , u_{i2} 分别来自两个温度传感器. 它们安装在室内同一处: 一个安装在塑料壳内, 另一个安装在金属板上.

无火情时, $u_{i1} = u_{i2}$ 声光报警电路不响不亮

一旦发生火情, 安装在金属板上的传感器因金属板导热快而温度升高快, 另一个升高慢, 于是产生差值电压, 当差值达到一定数值时, 电路报警。

试设计相应的电路

