



第四章 集成运算 放大器

*integrated operational
amplifier*



第一节 集成运放的组成与性能



集成电路：将整个电路的各个元件做在同一个半导体基片上。

集成电路的优点：

工作稳定、使用方便、体积小、重量轻、功耗小。电路元件制作在一个芯片上，元件参数偏差方向一致，温度均一性好。

集成运算放大器：

将整个运算放大器集成在一个小硅片上
用于模拟计算机中进行各种数学运算
放大、振荡、调制、解调及模拟信号运算和
脉冲信号的产生

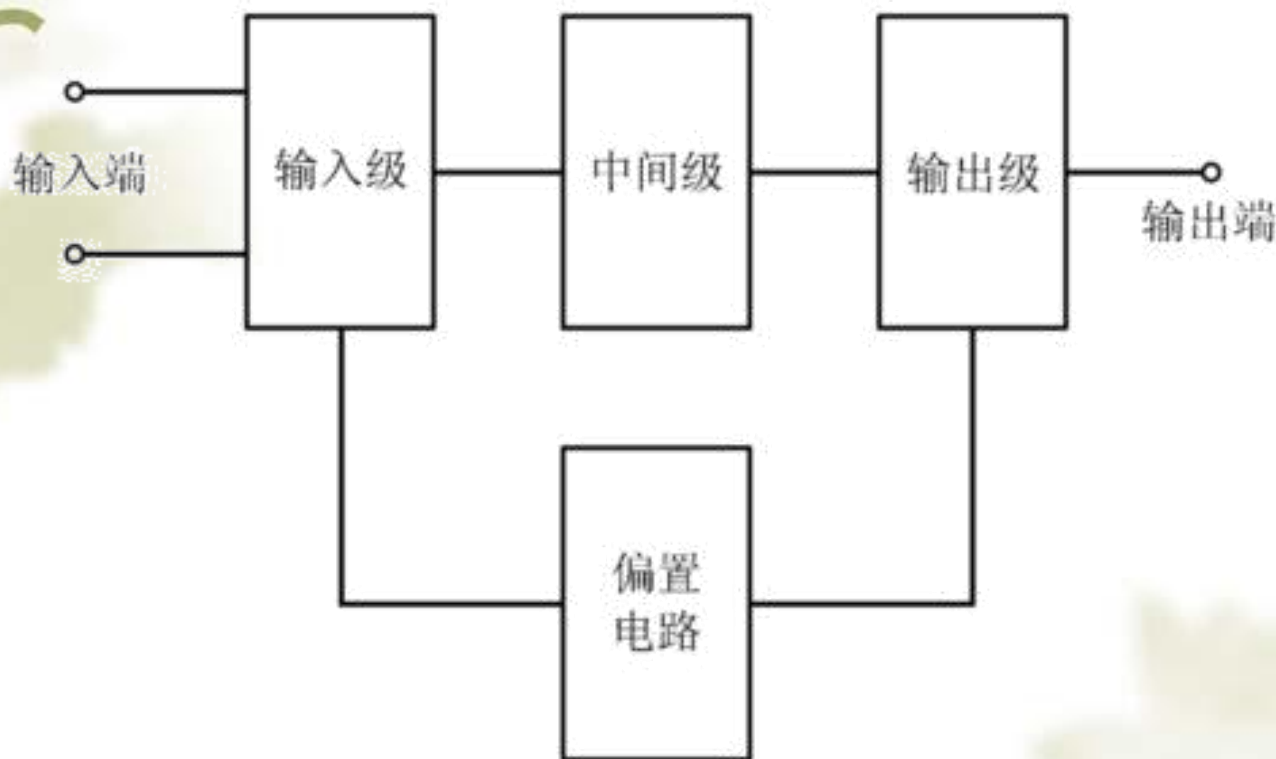


一、集成运放的电路组成

工艺特点：

- (1) 级间采用直接耦合方式，利用对称结构改善电路性能。
- (2) 电阻元件由硅半导体构成，范围在几十到20千欧，精度低。高阻值电阻用三极管有源元件代替或外接。
- (3) 几十 pF 以下的小电容用PN结的结电容构成、大电容要外接。
- (4) 二极管一般用三极管的发射结构成。

组成:

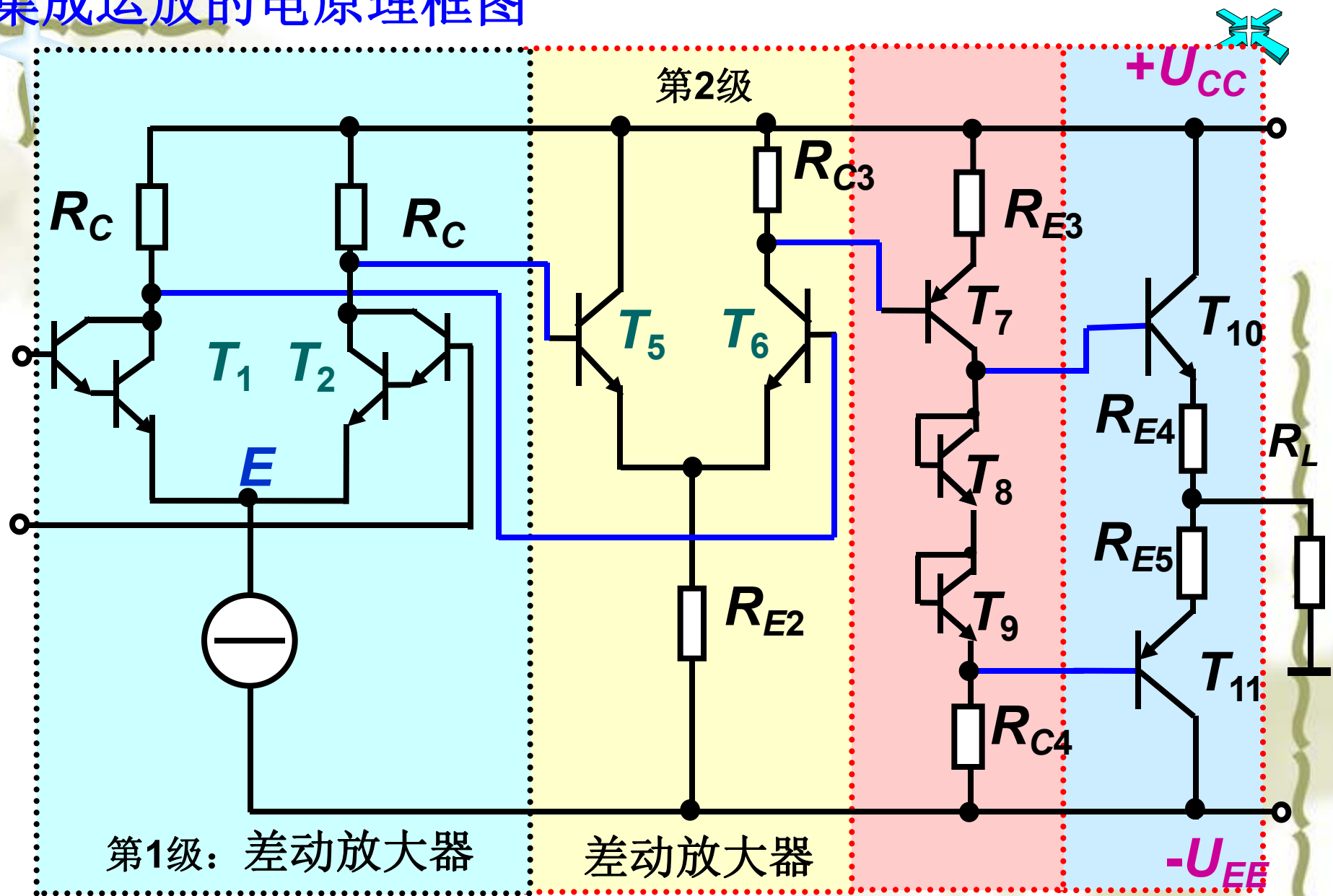


对输入级的要求: 尽量减小零点漂移, 尽量提高 K_{CMRR} , 输入阻抗 r_i 尽可能大。

对中间级的要求: 足够大的电压放大倍数。

对输出级的要求: 主要提高带负载能力, 给出足够的输出电流 i_o 。即输出阻抗 r_o 小。

集成运放的电原理框图



第3级: 单管放大器

第4级: 互补对称射极跟随器

原理框图:

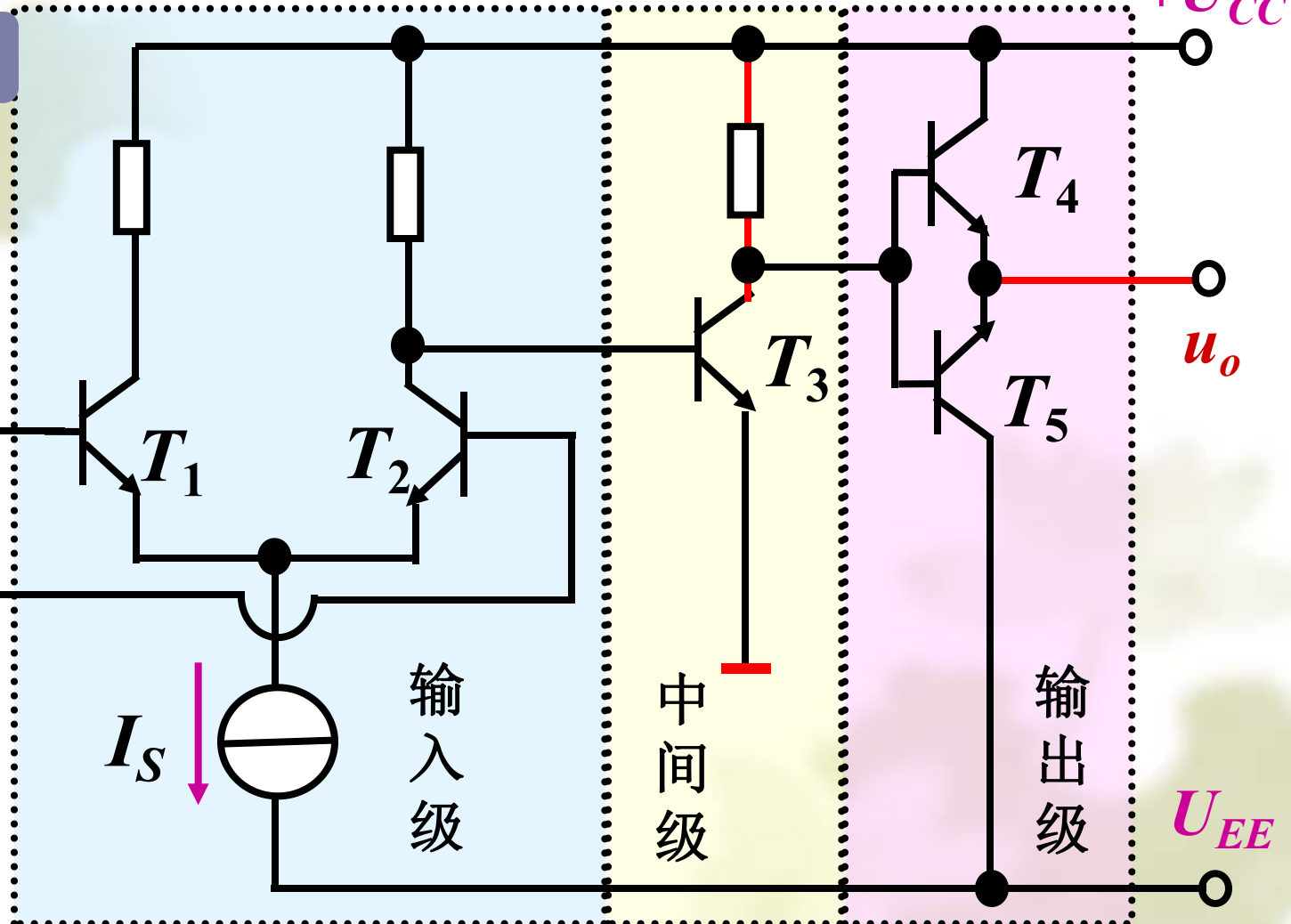
与 u_o 反相

反相
输入端

u_-

u_+
同相
输入端

与 u_o 同相





集成运放的结构

- (1) 输入级和第二级一般采用差动放大器。采用复合三极管或场效应管，以减小输入电流，增加输入电阻。
- (2) 中间级采用四级以上的共发射极放大器。
- (3) 输出级采用互补对称式射极跟随器，以进行功率放大，提高带负载的能力。

二、集成运放的主要性能指标



1. 开环差模电压放大倍数 K_d

无外加反馈回路的差模放大倍数。一般在 $10^5 \sim 10^7$ （或60~100dB）之间。理想运放的 K_d 为 ∞ 。

2. 共模抑制比 $CMRR$

常用分贝作单位，一般100dB以上。

3. 输入阻抗 r_i

$r_i > 1\text{M}\Omega$ ，有的可达100M Ω 以上。

4. 输出阻抗 r_o

r_o = 几 Ω -几十 Ω 。



5. 输入失调电压 U_{is}

反映了运放差动输入级的对称程度，失调电压越大，运放的对称性越差。一般为毫伏级。

6. 输入失调电流 I_{is}

由差动输入级两个晶体管 β 值不一致所引起的。

其他反映运放对称性、零漂等的参数。

三、集成运放的理想模型



运放的特点:

r_i 大: 几十 $k\Omega$ ~ 几百 $k\Omega$

$CMRR$ 很大

r_o 小: 几十 ~ 几百 Ω

A_d 很大: $10^4 \sim 10^7$



理想运放:

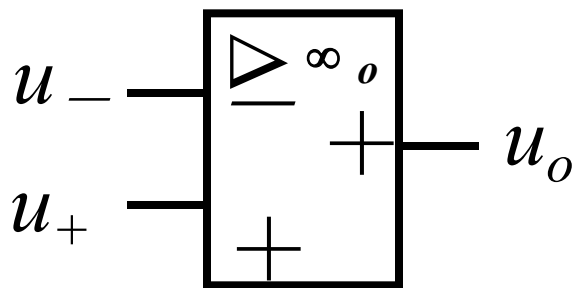
$$r_i \rightarrow \infty$$

$$CMRR \rightarrow \infty$$

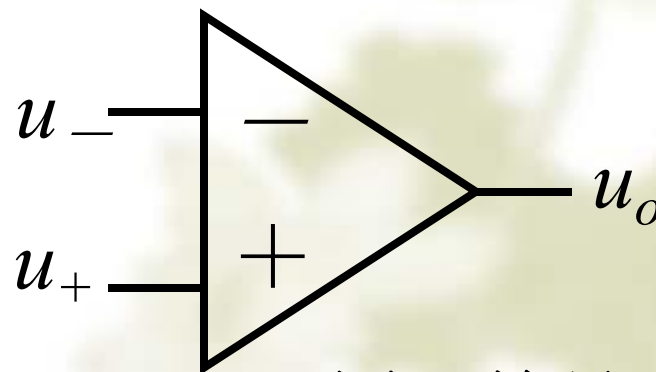
$$r_o \rightarrow 0$$

$$A_d \rightarrow \infty$$

运放符号:



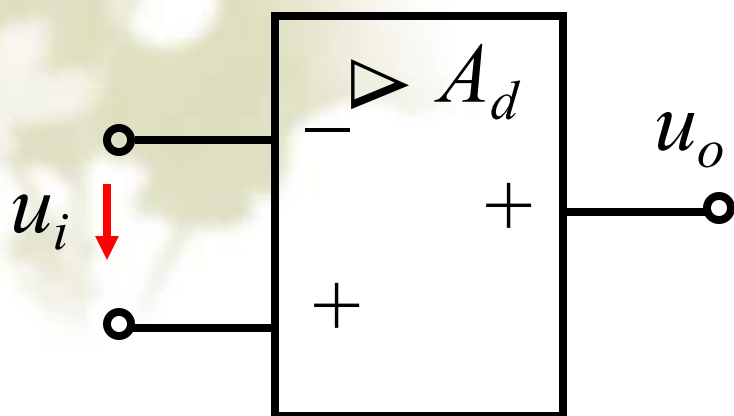
国内符号



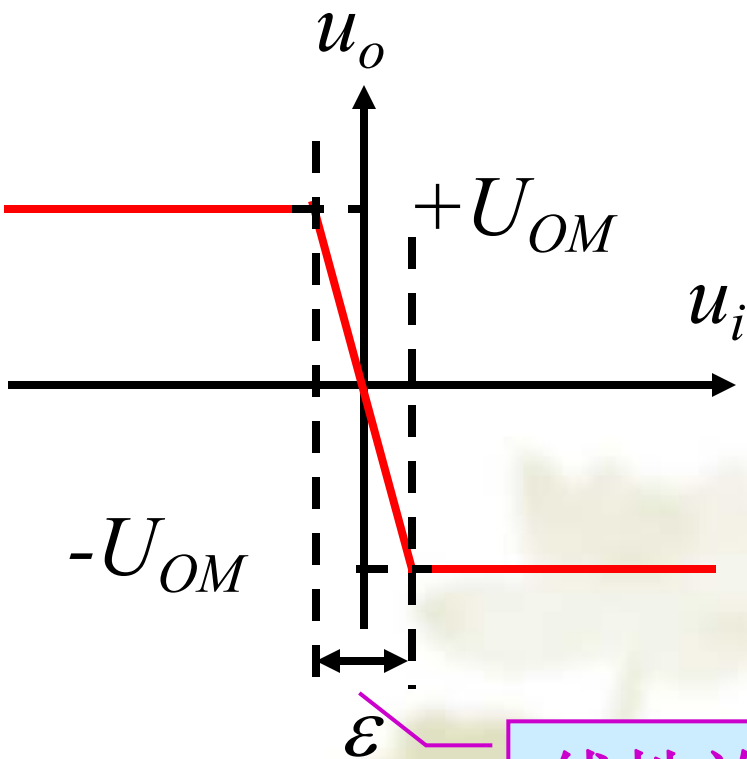
国际符号



1. 理想运放工作在线性区的特点



$$U_{OM} = u_{o\max} \approx E_C$$



线性放大区

例：若 $U_{OM}=12\text{V}$ ， $A_o=10^6$ ，
则 $|u_i| < 12\mu\text{V}$ 时，运放
处于线性区。

A_d 越大，运放的线性范围越小，必须在输出与输入之间加负反馈才能使其扩大输入信号的线性范围。



在分析信号运算电路时对运放的处理

由于运放的开环放大倍数很大，输入电阻高，输出电阻小，为了便于分析，常将其理想化——理想运放。

理想运放的特点

运放工作在线性区的特点

$$A_d \rightarrow \infty$$



$$u_+ - u_- = u_o / A_d$$

虚短

$$u_+ = u_-$$

$$r_i \rightarrow \infty$$



$$I_i = \frac{u_+ - u_-}{r_i} \rightarrow 0$$

虚断

$$r_o \rightarrow 0$$



放大倍数与负载无关。分析多个运放级联组合的线性电路时可以分别对每个运放进行。



理想运放的特点

$$CMRR \rightarrow \infty$$

输入信号为零时，输出电压为零

特性不随温度变化

对于各种实际的集成运放电路，用理想模型进行分析、计算，可以使电路的分析简化，同时不影响结果。

尤其要注重“虚短、虚断”概念的运用。



理想运放工作在线性区的特点

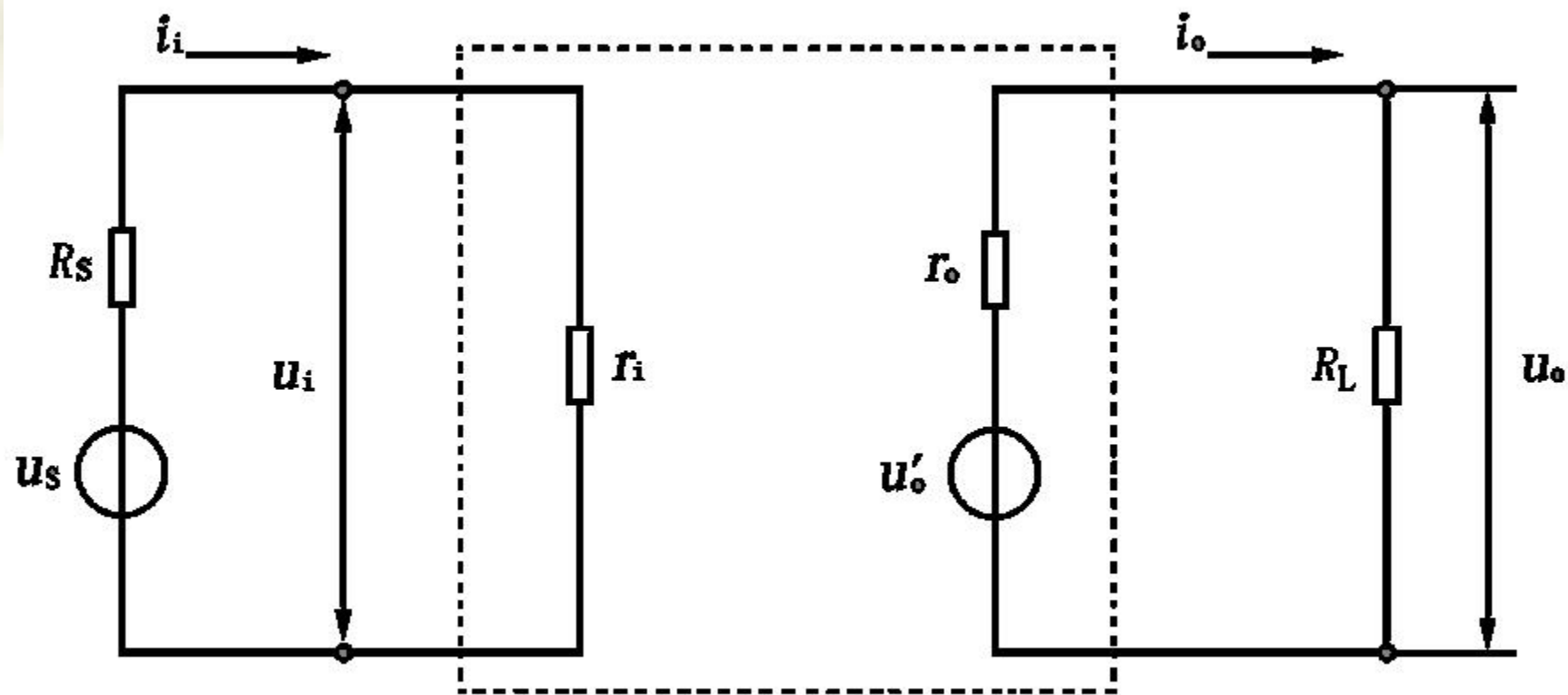
- ((1)) 差模输入电压约等于0，即 $u_+ \approx u_-$ ，称“虚短”
- ((2)) 输入电流约等于0，即 $i_+ = i_- \approx 0$ ，称“虚断”

2. 理想运放工作在饱和区的特点

- ((1)) 输出只有两种可能： $+U_{o(sat)}$ 或 $-U_{o(sat)}$

$u_+ \neq u_-$ ，不存在“虚短”现象

- ((2)) $i_+ = i_- \approx 0$ ，仍存在“虚断”现象



第二节 运算放大器的基本电路



一、反相比例运算放大器

作用：将信号按比例放大。

方法：引入深度电压并联负反馈或电压串联负反馈。这样输出电压与运放的开环放大倍数无关，与输入电压和反馈系数有关。



集成运放电路中反馈类型的判别

1. 电压、电流反馈的判别

反馈电路直接从集成运放输出端引出的，是电压反馈；反馈电路从负载电阻的靠近“地”端引出的，是电流反馈。

2. 串联、并联反馈的判别

反馈信号和输入信号分别加在两个输入端上，是串联反馈；反馈信号和输入信号加在同一个输入端上，是并联反馈。



3. 正、负反馈的判别

对于串联反馈，反馈信号和输入信号的极性相同时是负反馈，反馈信号和输入信号的极性相反时是正反馈；

对于并联反馈，净输入电流等于输入电流和反馈电流之差时是负反馈，净输入电流等于输入电流和反馈电流之和时是正反馈。

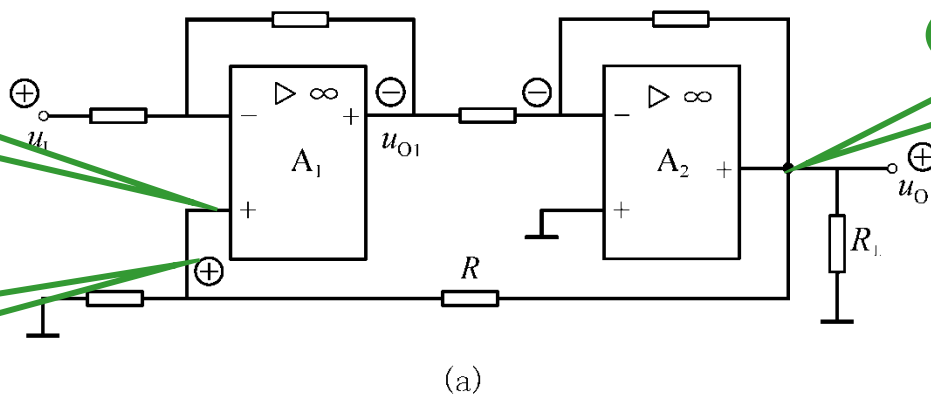


图(a)为电压串联负反馈

串联反馈

电压反馈

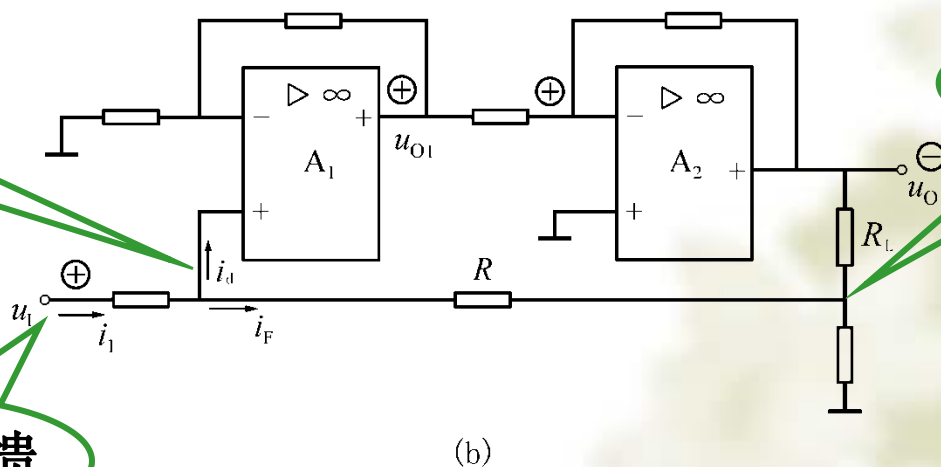
负反馈



负反馈

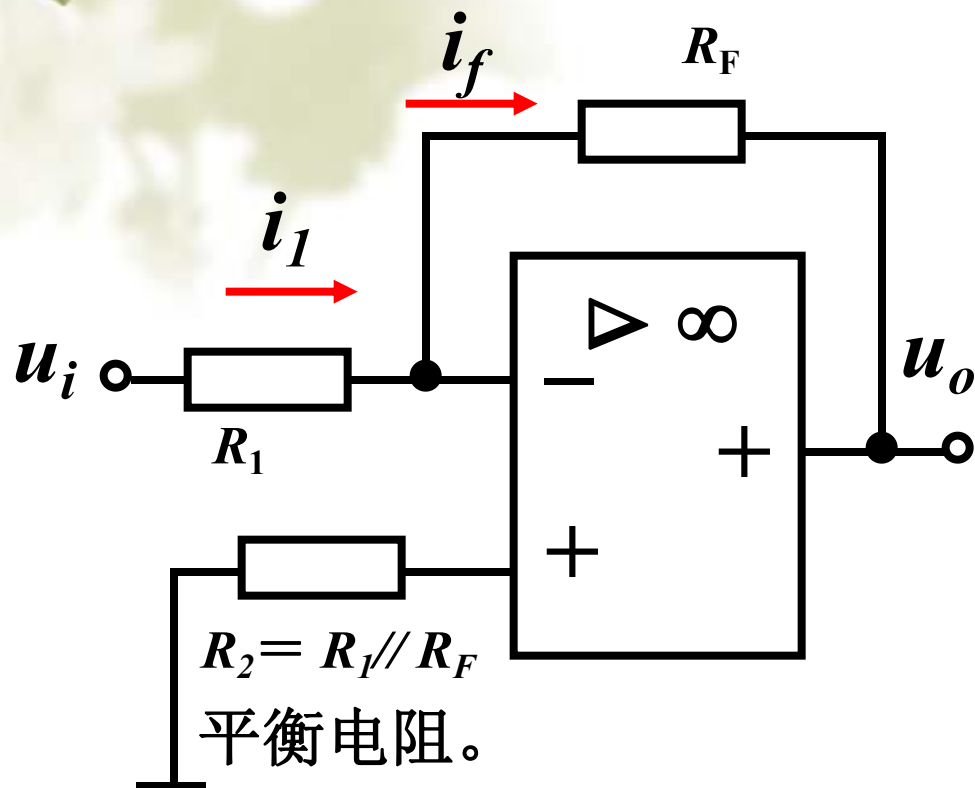
电流反馈

并联反馈



图(b)为电流并联负反馈

1、反相放大器



结构特点：负反馈引到反相输入端，信号从反相端输入。

(1) 放大倍数

虚短

$$u_+ = u_- = 0$$

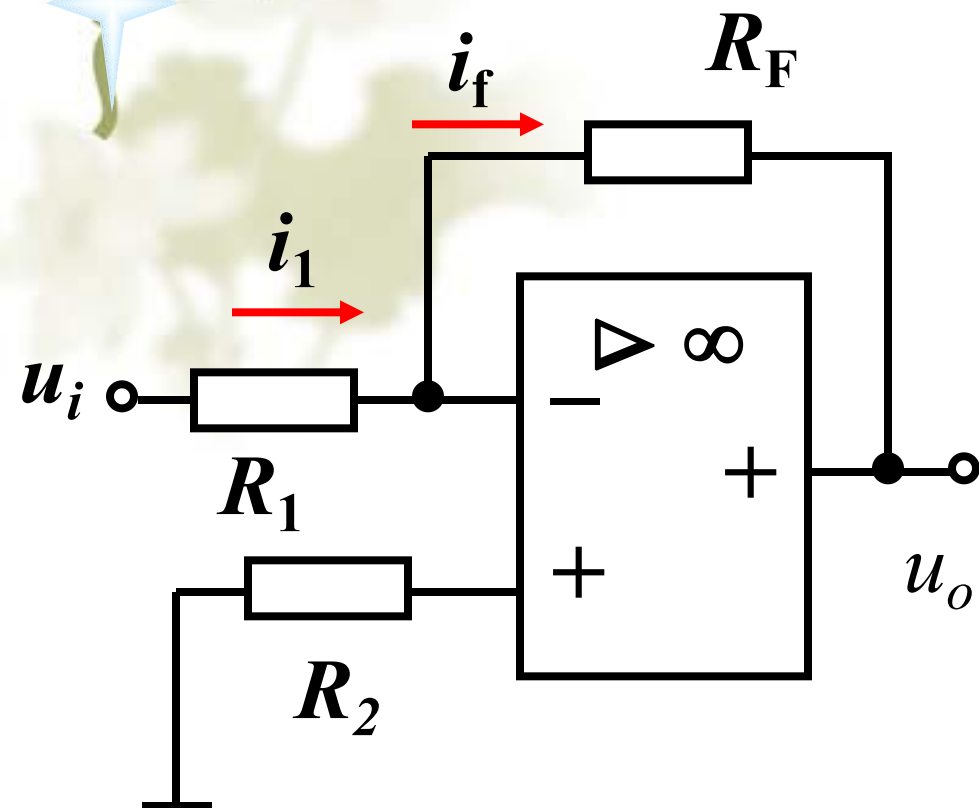
虚断

$$i_1 = i_f$$

$$\Rightarrow \frac{u_i}{R_1} = - \frac{u_o}{R_F}$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = - \frac{R_F}{R_1}$$

——反相器



(2) 电路的输入电阻 $r_i = R_1$

$$R_2 = R_1 // R_F$$

为保证一定的输入电阻，当放大倍数大时，需增大 R_F ，而大电阻的精度差，因此，在放大倍数较大时，该电路结构不再适用。

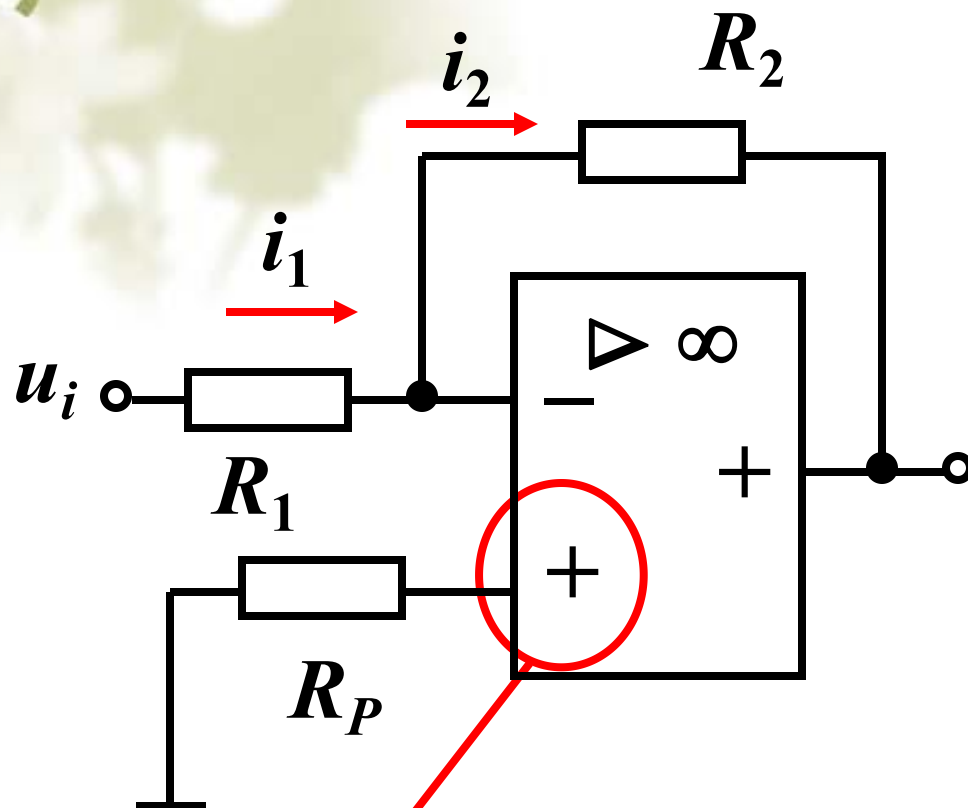


(3) 反馈方式

电压并联负反馈
输出电阻很小！

(4) 共模电压

$$\frac{u_+ + u_-}{2} = 0$$



电位为0，虚地

输出电阻小、共模电压为 0 以及“虚地”是反相输入的特点。

反相放大器的特点:



1. 共模输入电压为0，因此对运放的共模抑制比要求低。
2. 由于电压负反馈的作用，输出电阻小，可认为是0，因此带负载能力强。
3. 由于并联负反馈的作用，输入电阻小，因此对输入电流有一定的要求。
4. 在放大倍数较大时，该电路结构不再适用。

2. 高增益反相放大器

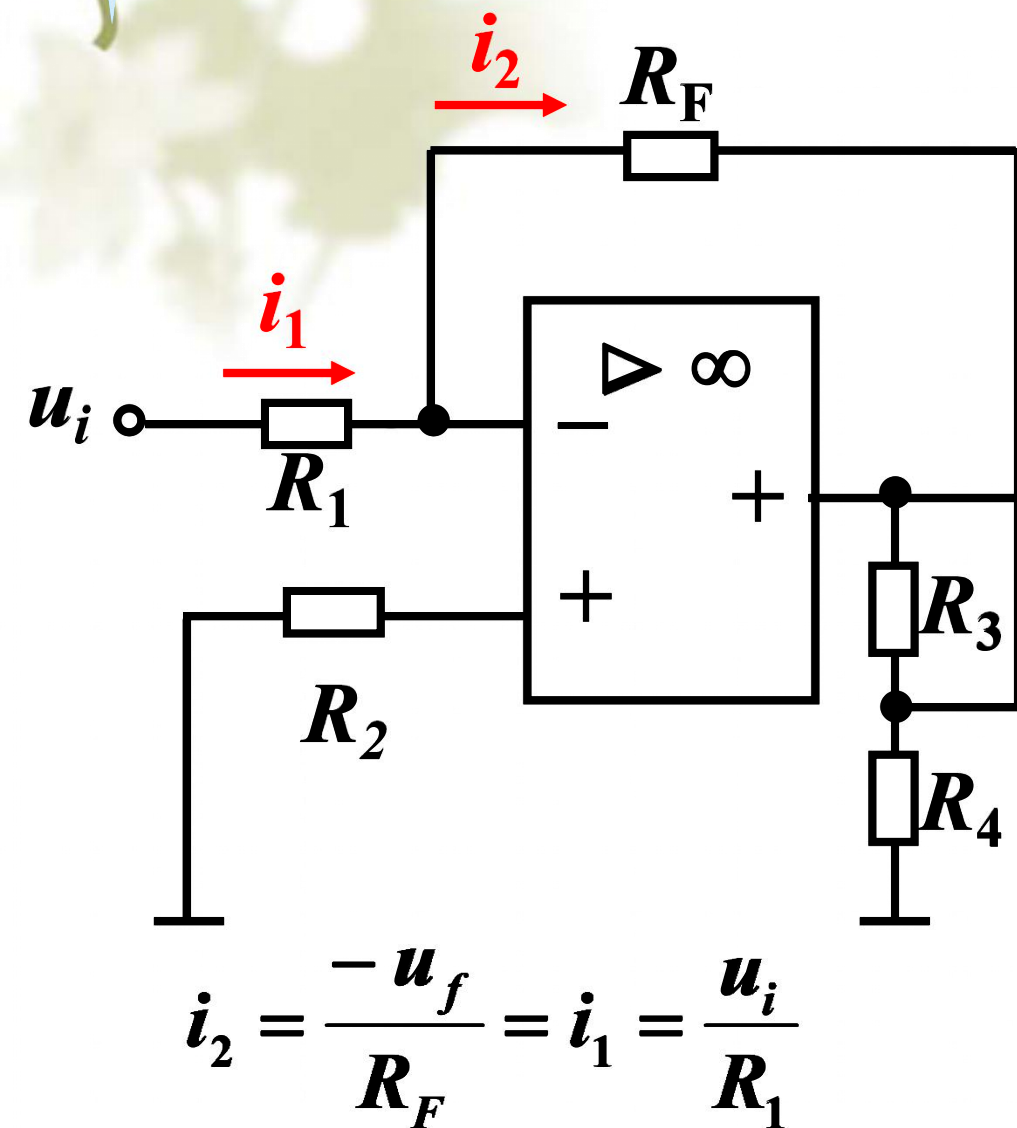
虚短



$$u_+ = u_- = 0$$

虚断

$$i_1 = i_2$$

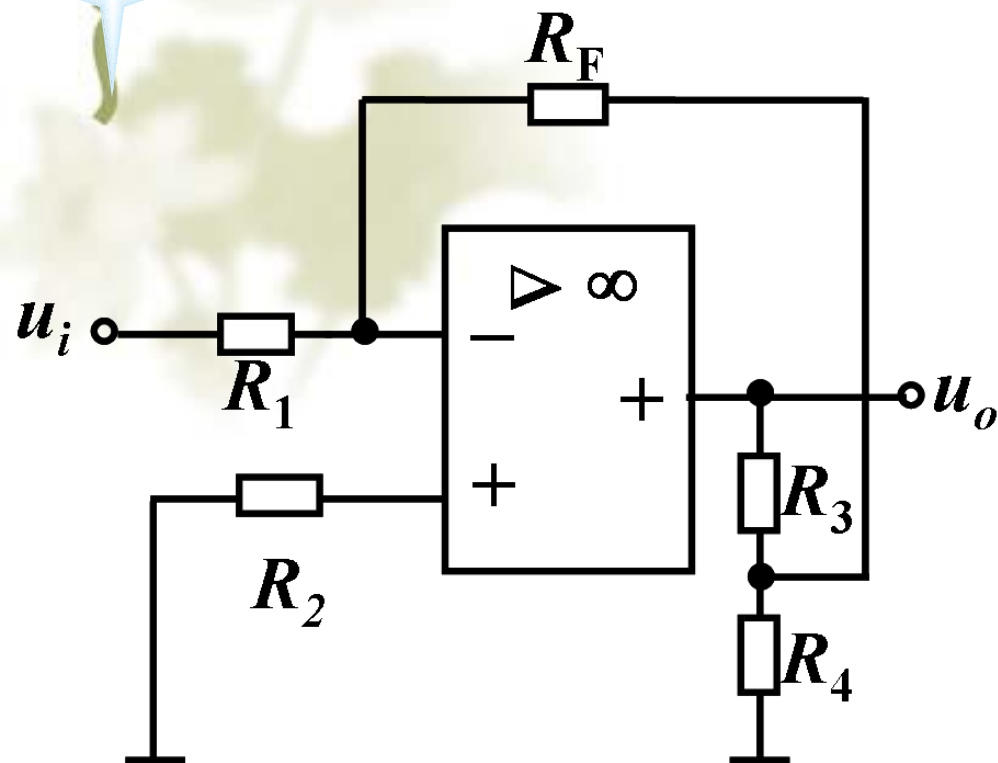


当 $R_F \gg R_4$ 时，

$$u_f = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_o$$

$$u_f = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$i_2 = \frac{-u_f}{R_F} = i_1 = \frac{u_i}{R_1}$$

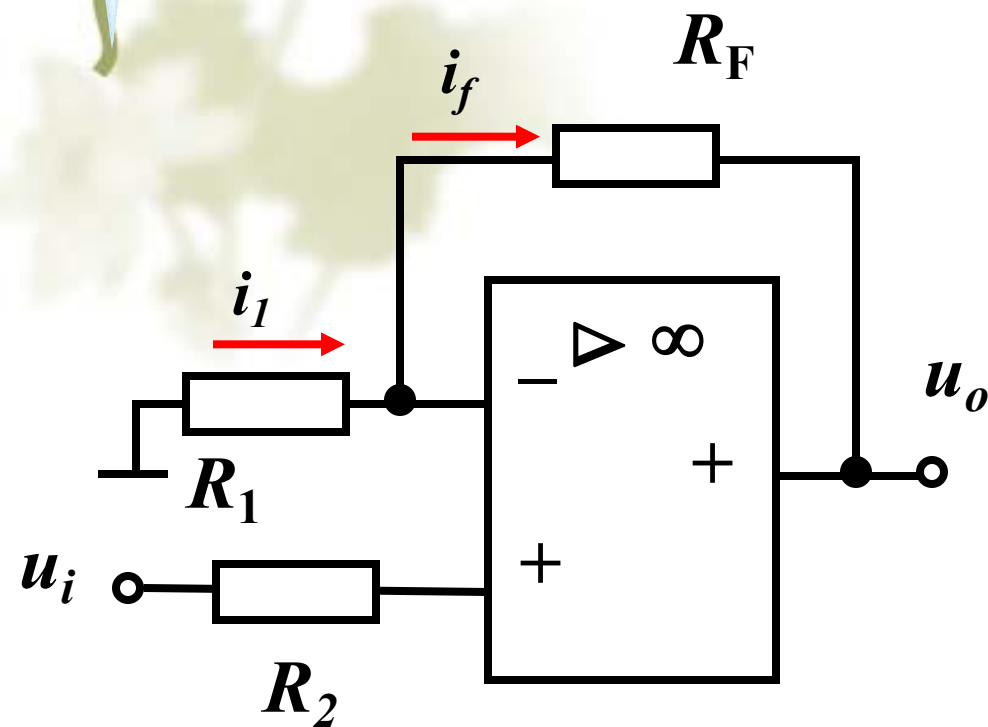


$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) \\ = -\frac{R_F}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right)$$

该电路通过控制反馈深度，能提高放大倍数，避免使用大电阻。

二、同相比例运算放大器



结构特点：负反馈引到反相输入端，信号从同相端输入。

虚短

$$u_- = u_+ = u_i$$

虚断

$$I_i = 0 \Rightarrow i_1 = i_f$$

$$\frac{u_o - u_i}{R_F} = \frac{u_i}{R_1}$$

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

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

反馈方式：电压串联负反馈。输入电阻高。



同相比例电路的特点:

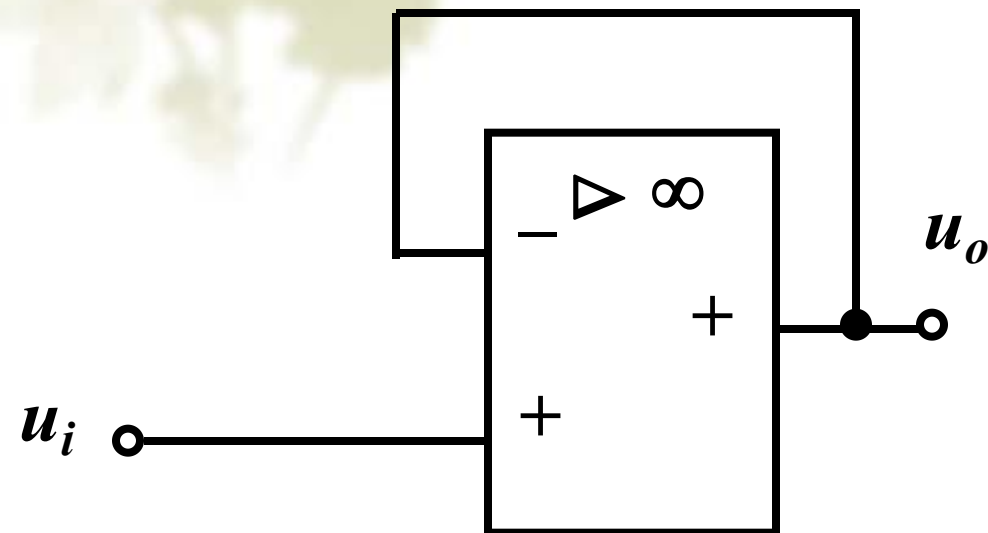
1. 由于电压负反馈的作用，输出电阻小，可认为是0，因此带负载能力强。
2. 由于串联负反馈的作用，输入电阻大。
3. 共模输入电压为 u_i ，因此对运放的共模抑制比要求高。

同相比例运算放大器的特例



——电压跟随器

结构特点：输出电压全部引到反相输入端，信号从同相端输入。

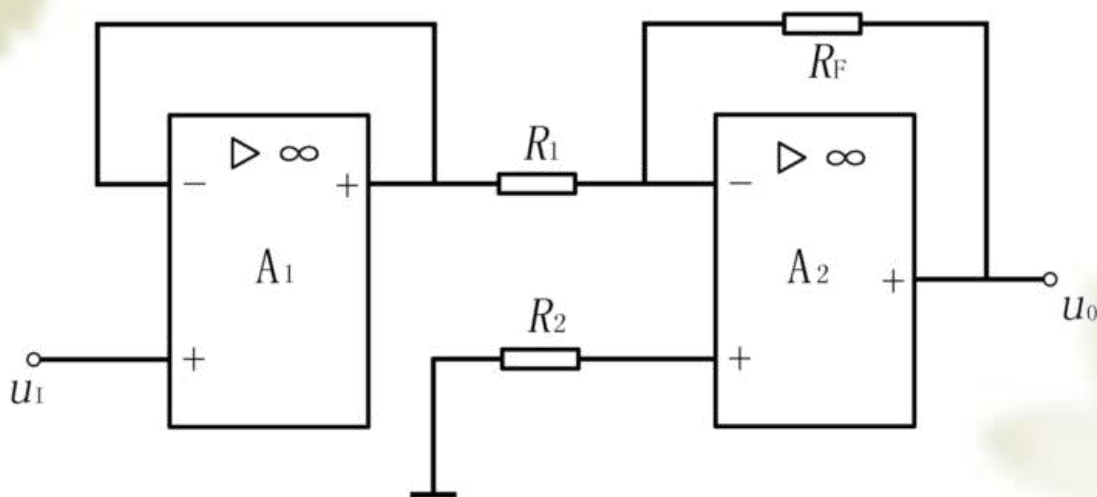


$$u_o = u_- = u_+ = u_i$$

此电路是电压串联负反馈，输入电阻大，输出电阻小，在电路中作用与分立元件的射极输出器相同，但是电压跟随性能好。



例4-2 在如图所示的运放电路中，当 $R_F = 2R_1$ ， $u_i = -2V$ 时，试求输出电压 $u_o = ?$



解：放大电路由

A_1 是电压跟

A_2 是反相比

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

$$= -2V$$

$$= -\frac{2R_1}{R_1} \cdot (-2) = 4V \text{ 有}$$



三、加减运算放大器

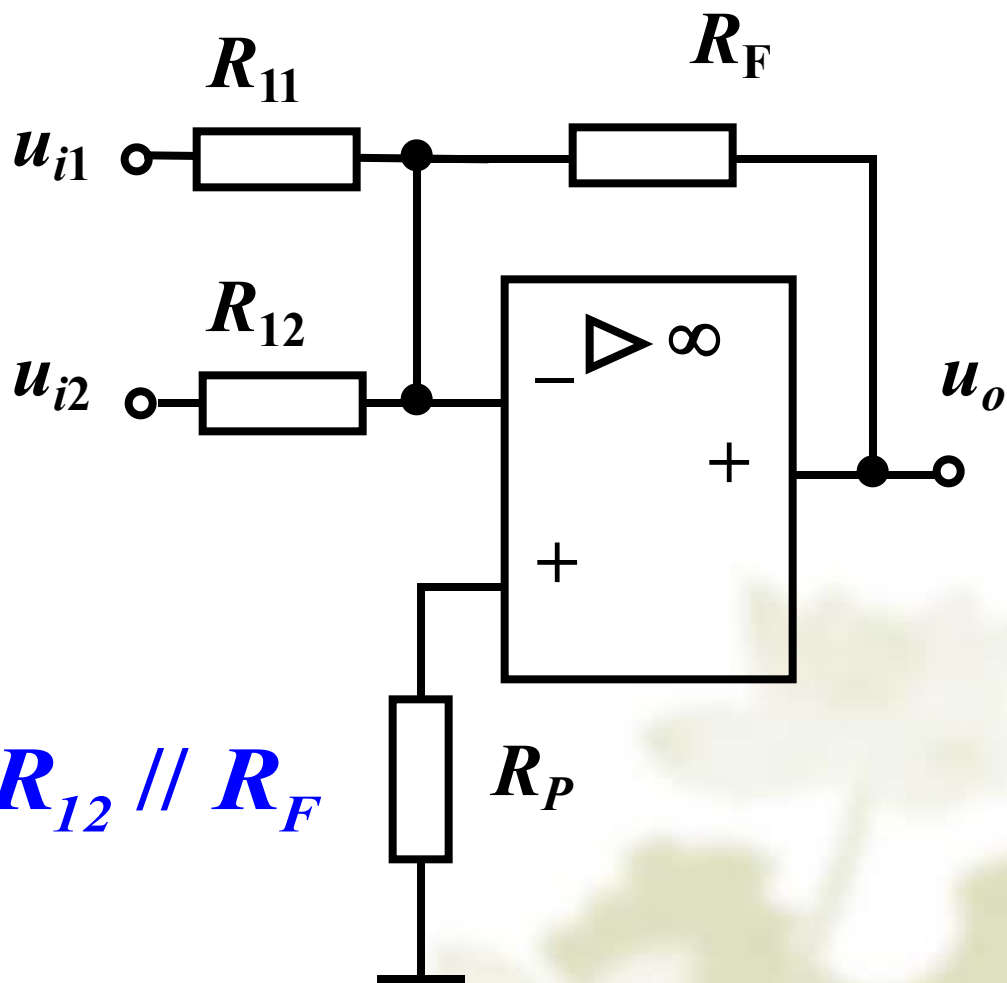
作用: 将若干个输入信号之和或之差按比例放大。

类型: 同相求和、反相求和。

方法: 引入深度电压并联负反馈或电压串联负反馈。

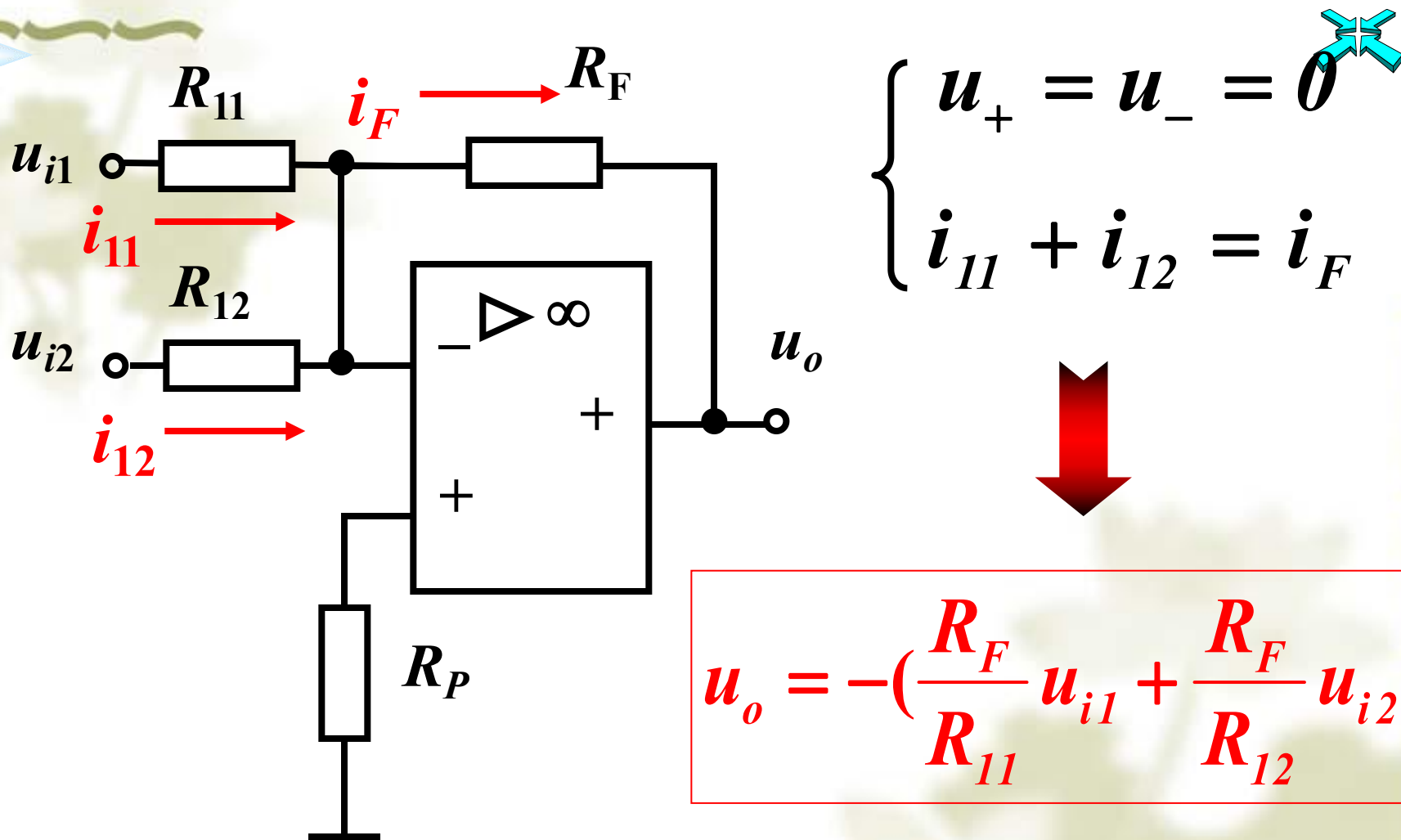
输出电压只与输入电压和反馈系数有关。

1、反相加法运算



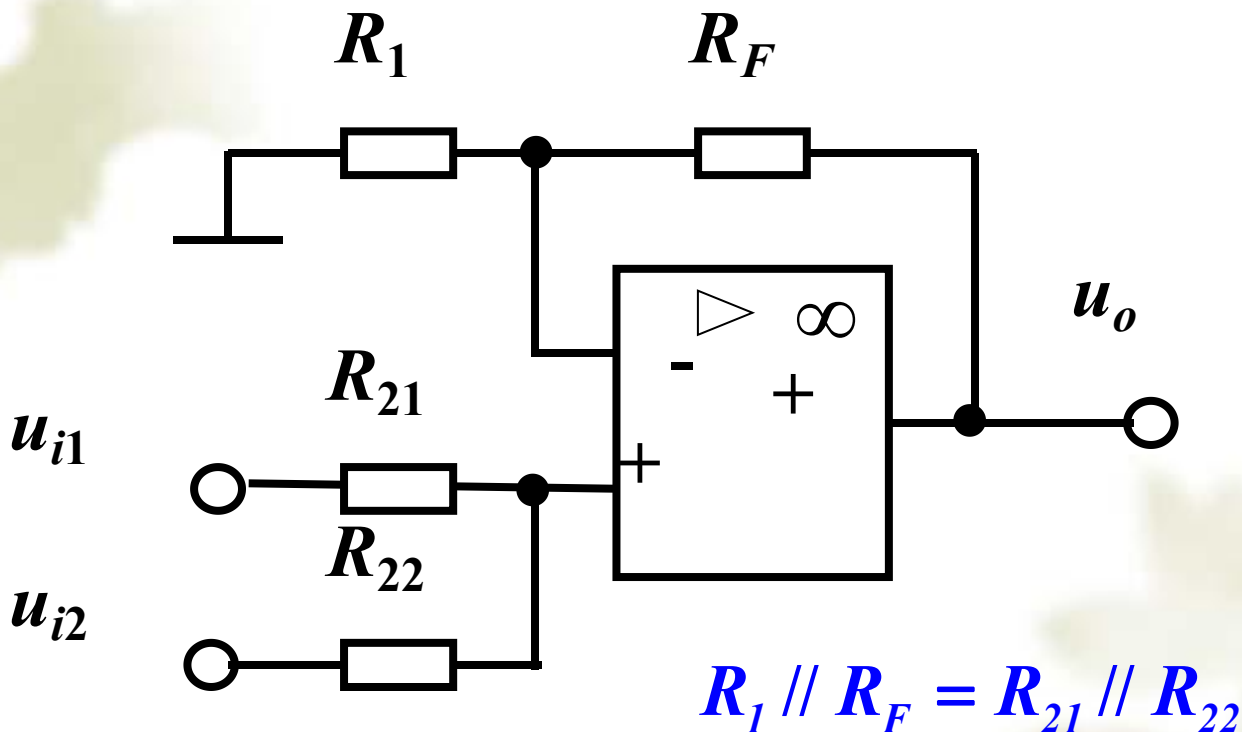
$$R_P = R_{11} // R_{12} // R_F$$

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。

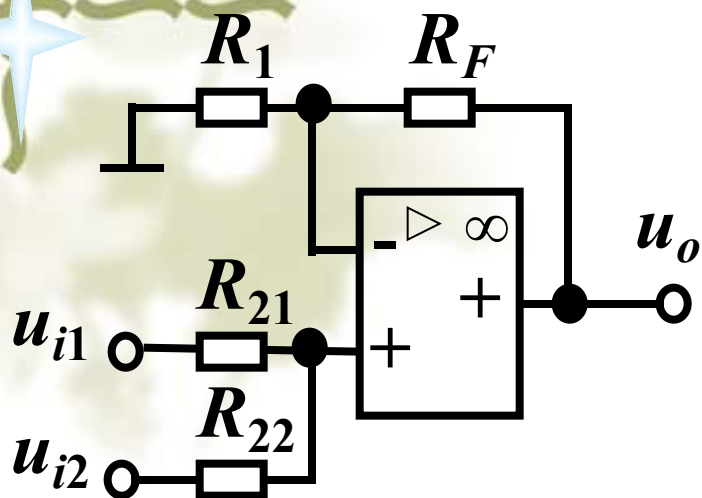


调节反相求和电路的某一路信号的输入电阻，不影响其它信号的放大倍数，调节方便。

2、同相求和运算



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。



此电路如
则输出为:

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

u_+ 与 u_{i1} 和 u_{i2}
的关系如何?

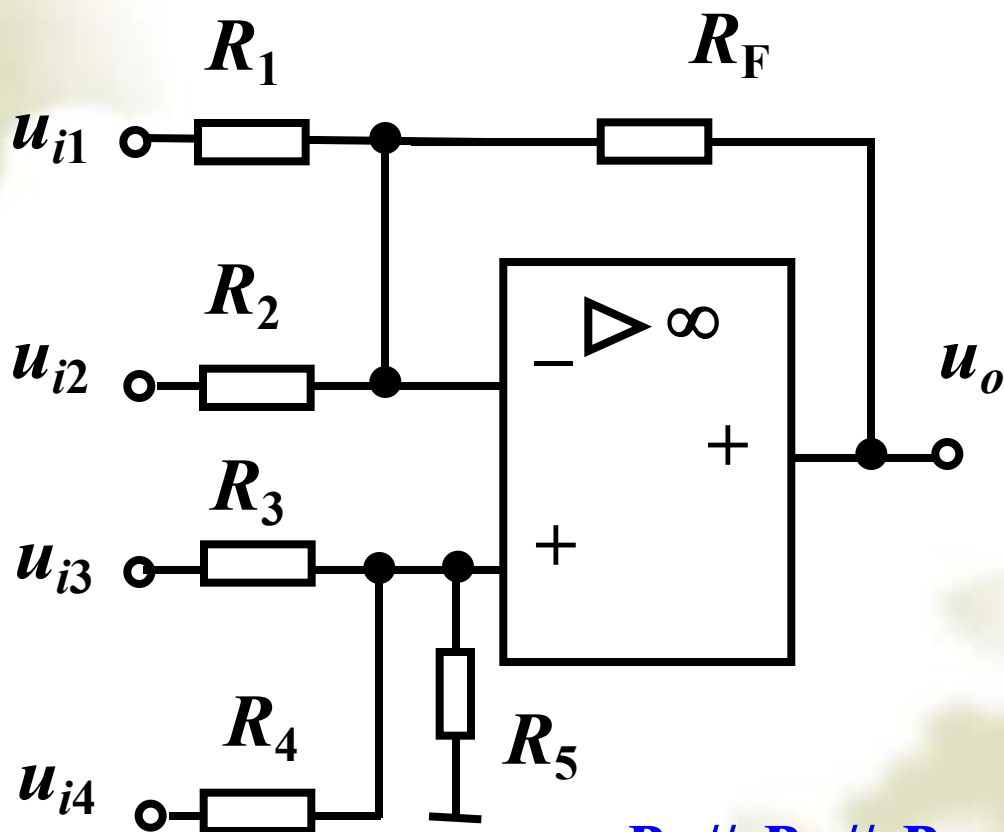
流入运放输入端的电流为0 (虚断)

$$\rightarrow u_+ = \frac{R_{22}}{R_{21} + R_{22}} u_{i1} + \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{22}} u_{i2}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} u_{i1} + \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} u_{i2} \right)$$

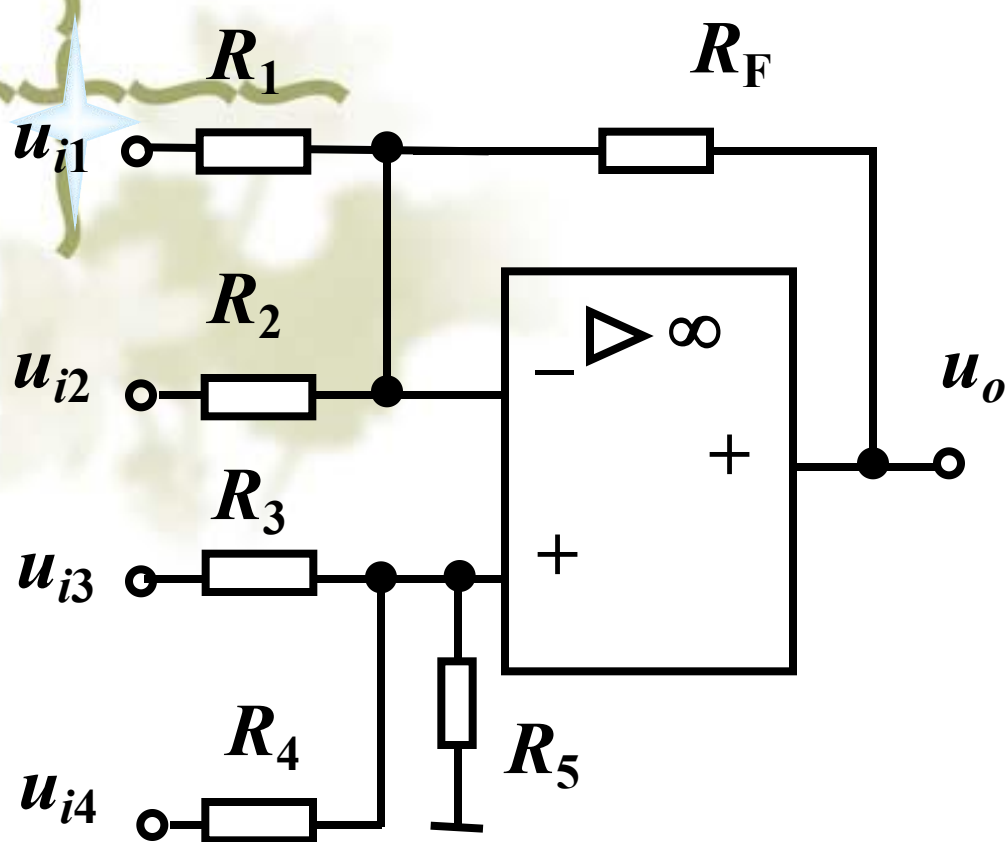
注意: 同相求和电路的各输入信号的放大倍数互相影响, 不能单独调整。

3、加减运算电路



$$R_1 \parallel R_2 \parallel R_F = R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$$

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。



虚断

$$\frac{u_{i3} - u_+}{R_3} + \frac{u_{i4} - u_+}{R_4} = \frac{u_+}{R_5}$$

虚短

$$u_- = u_+$$

$$\frac{u_{i1} - u_-}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_-}{R_2} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

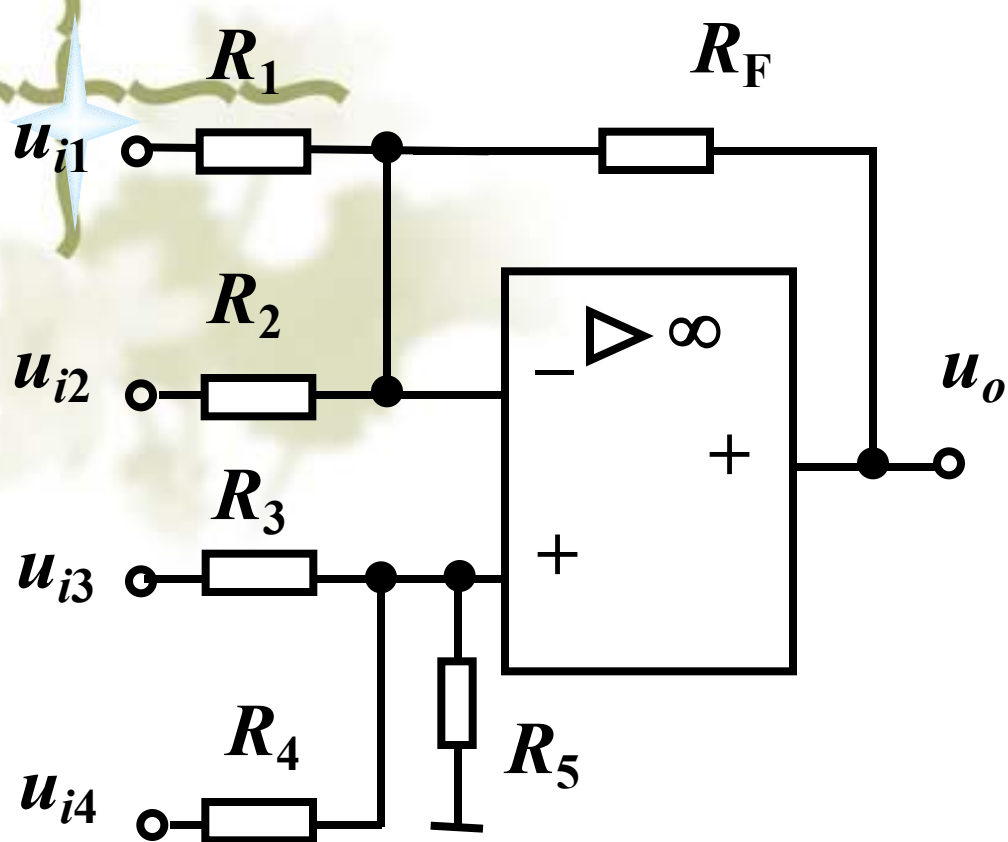
虚断

$$\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} = \frac{u_+}{R_5} + \frac{u_+}{R_3} + \frac{u_+}{R_4}$$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_o}{R_F} = \frac{u_-}{R_F} + \frac{u_-}{R_1} + \frac{u_-}{R_2}$$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_o}{R_F} = \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4}$$

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



$$\frac{u_{i3} - u_+}{R_3} + \frac{u_{i4} - u_+}{R_4} = \frac{u_+}{R_5}$$

虚短

$$u_- = u_+$$

$$\frac{u_{i1} - u_-}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_-}{R_2} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

虚断

$$u_o = R_F \left[-\frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) u_+ \right]$$

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

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

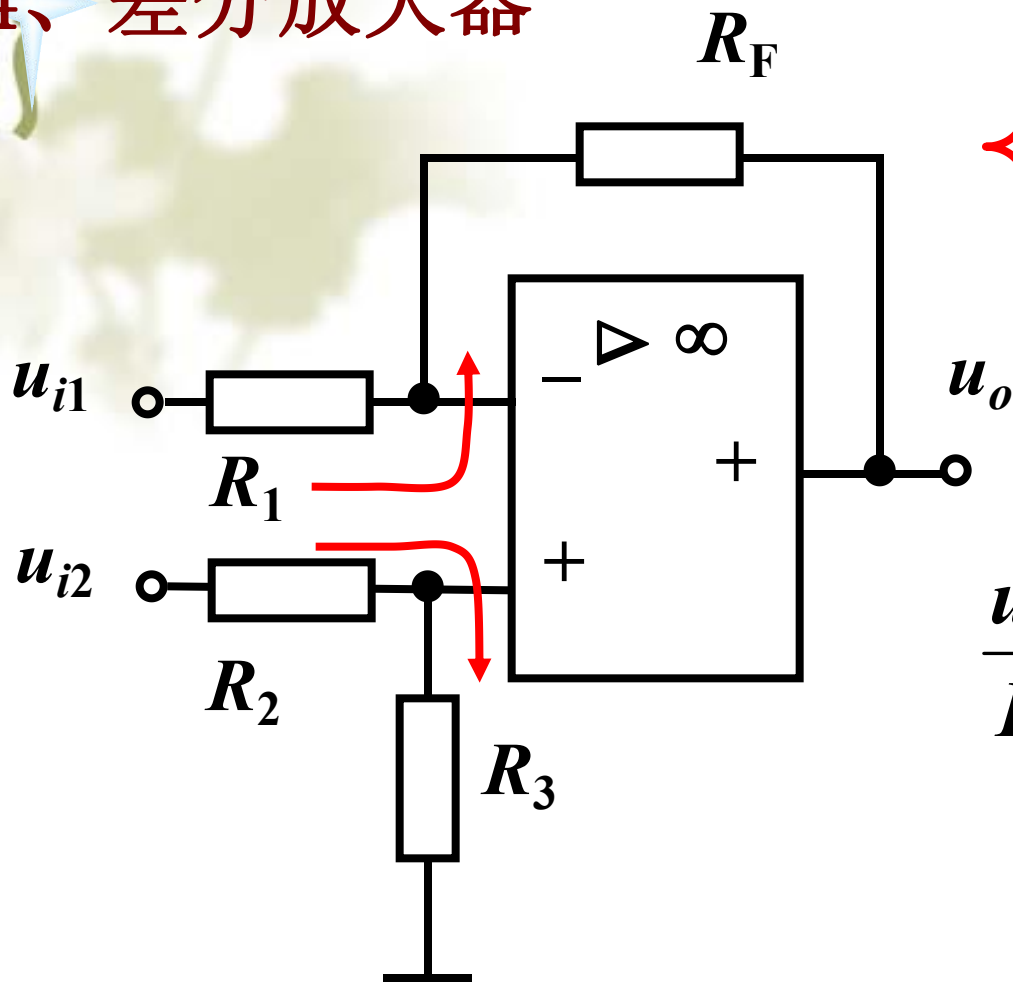

$$u_o = R_F \left(-\frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$

输出电压等于各输入电压按不同比例相加或相减。

如果 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 取不同的值，需按权重进行加减法。

如果 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，可以实现普通的加减运算。即 $u_o = (u_{i3} + u_{i4}) - (u_{i1} + u_{i2})$

4、差分放大器



$$\frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F} \quad \text{✗}$$

$$\frac{u_{i2} - u_+}{R_2} = \frac{u_+}{R_3}$$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_o}{R_F} = \frac{u_-}{R_F} + \frac{u_-}{R_1}$$

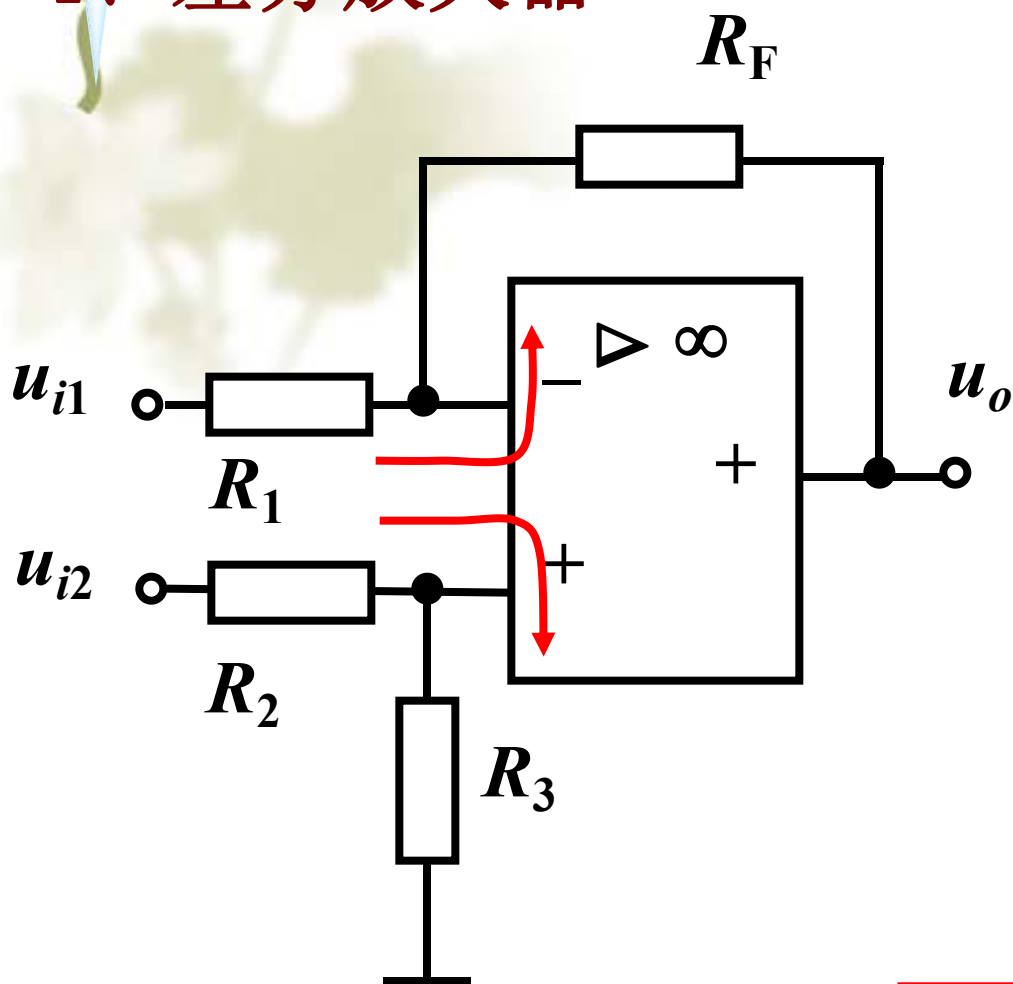
$$\frac{u_{i2}}{R_2} = \frac{u_+}{R_3} + \frac{u_+}{R_2}$$

$$u_+ = u_-$$

$$R_1 = R_2, \quad R_3 = R_F$$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_o}{R_F} = \frac{u_{i2}}{R_2}$$

4、差分放大器



$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_o}{R_F} = \frac{u_{i2}}{R_2}$$

$$\frac{u_o}{R_F} = \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{u_{i1}}{R_1}$$

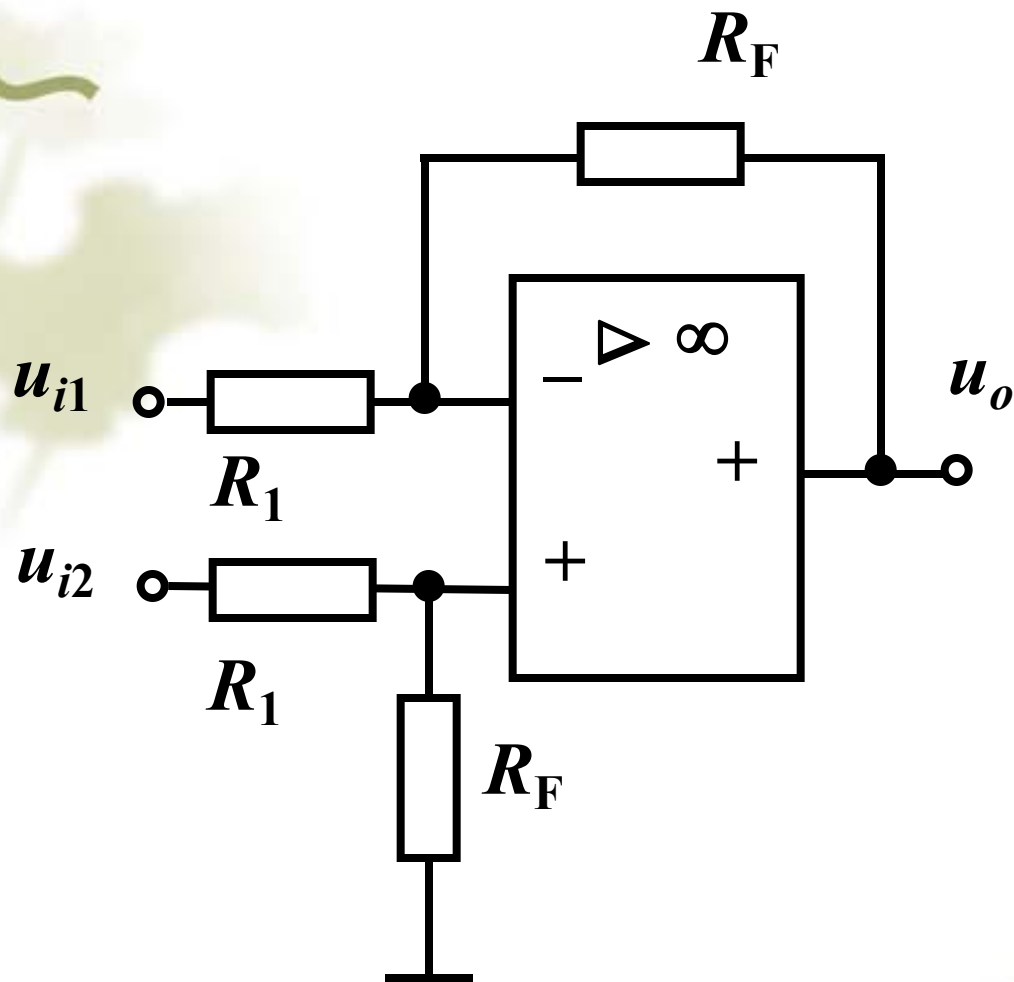
解出：

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

当 $R_1=R_2=R_3=R_F$ 时，

$$u_o = u_{i2} - u_{i1}$$

输出电压等于两输入端电压之差 —— 实现减法运算



差动放大器放大了两个信号的差，但是它的输入电阻不高 ($=2R_1$)，这是由于反相输入造成的。



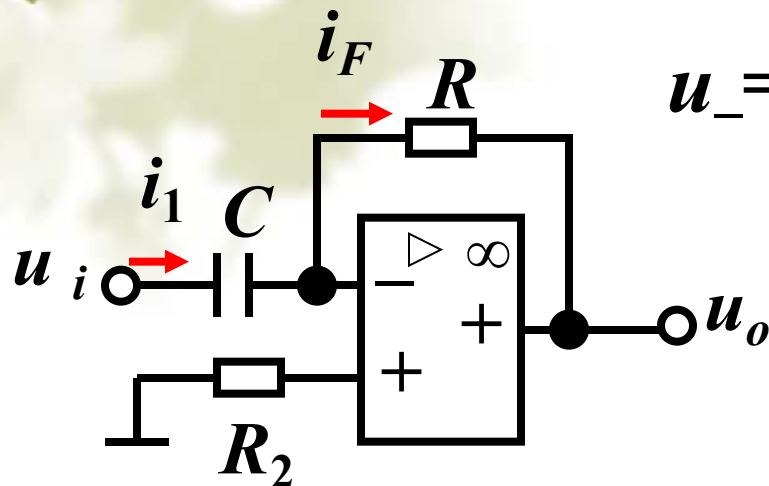
比例运算电路与加减运算电路小结

1. 它们都引入电压负反馈，因此输出电阻都比较小。
2. 关于输入电阻：反相输入的输入电阻小，同相输入的输入电阻高。
3. 同相输入的共模电压高，反相输入的共模电压小。

四、微分运算电路与积分运算电路



1、微分运算



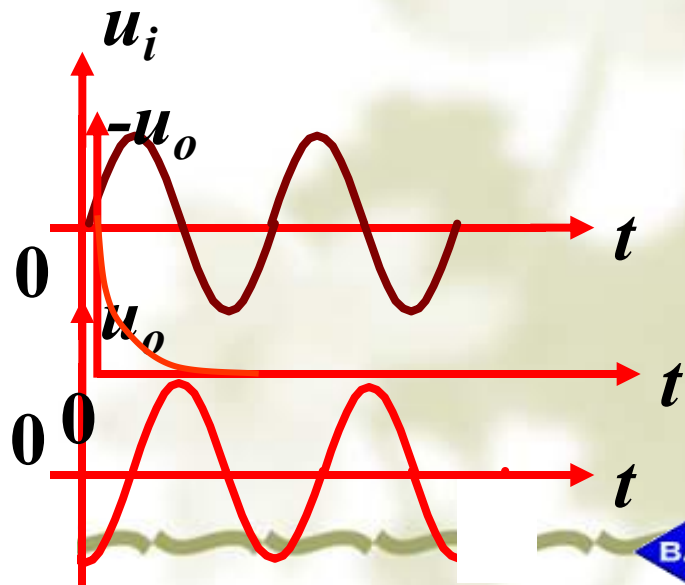
$$u_- = u_+ = 0$$

$$\begin{cases} i_F = -\frac{u_o}{R} \\ i_1 = C \frac{du_i}{dt} \\ i_1 = i_F \end{cases}$$

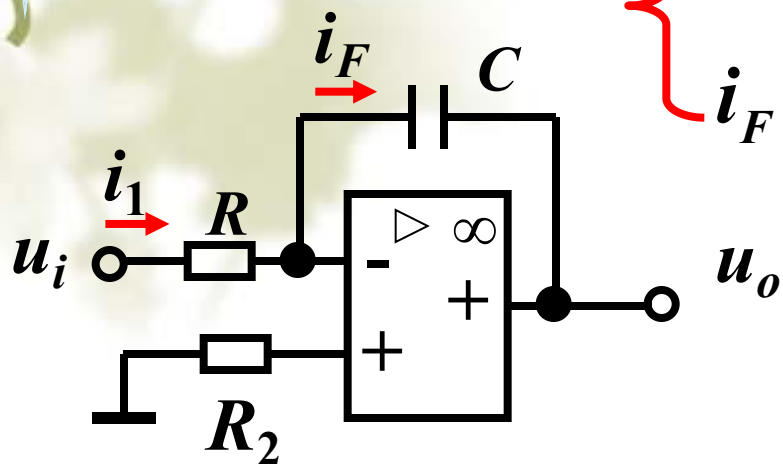
$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$

若输入: $u_i = \sin \omega t$

则: $u_o = -RC \cos \omega t$
 $= RC \sin(\omega t - 90^\circ)$



2、积分运算

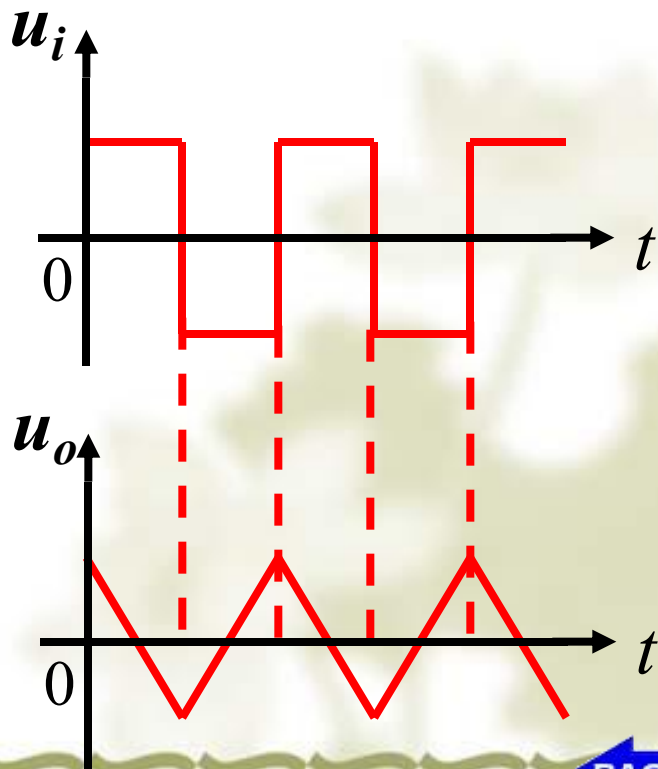


$$\left\{ \begin{aligned} i_1 &= \frac{u_i}{R} \\ i_F &= -C \frac{du_o}{dt} \end{aligned} \right.$$

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

应用举例1:

输入方波，输出是三角波。



积分电路的主要用途：



1. 在电子开关中用于延迟。
2. 波形变换。例：将方波变为三角波。
3. A/D转换中，将电压量变为时间量。
4. 移相。
5. 在医疗电子仪器中常用于对呼吸流速等进行积分处理，求得呼吸流量、血液流量等生理参数。

五、对数与反对数运算电路



1、对数运算电路

二极管PN结的正向电流为

$$i_D = I_S e^{u_D / U_T}$$

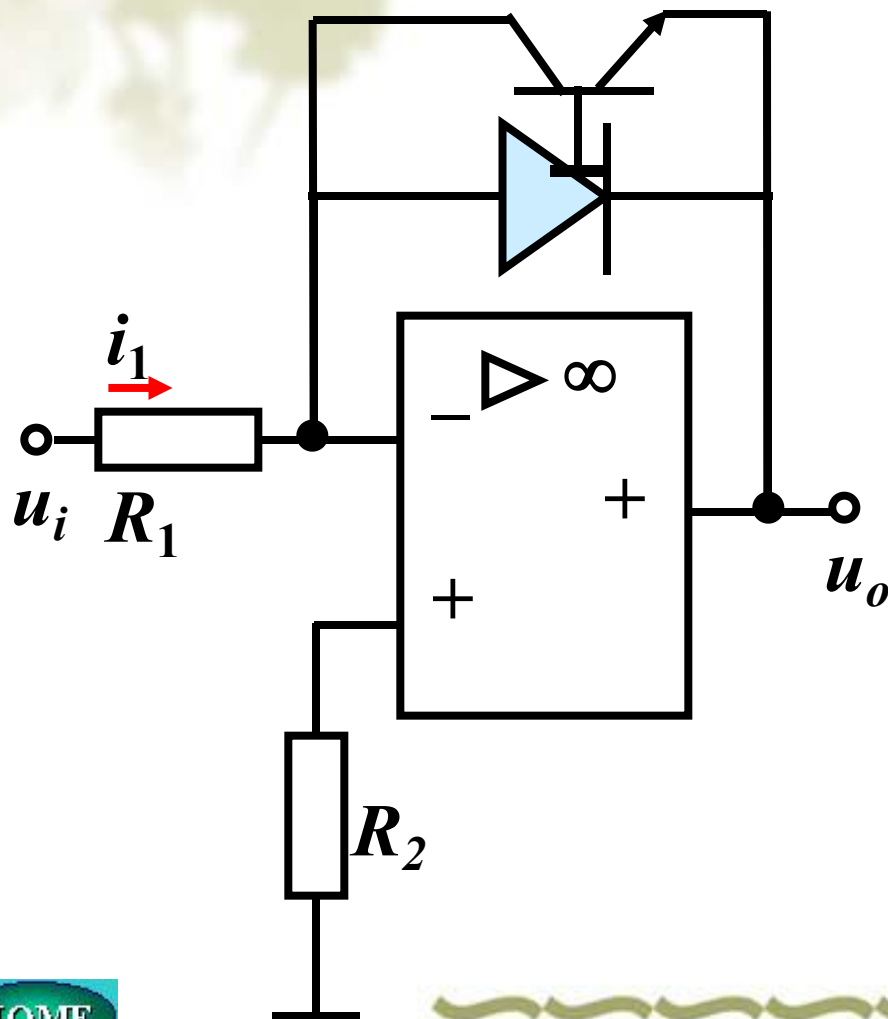
$$U_T = 26mV, i_1 = u_i / R_1$$

理想运放时, $i_1 = i_D$

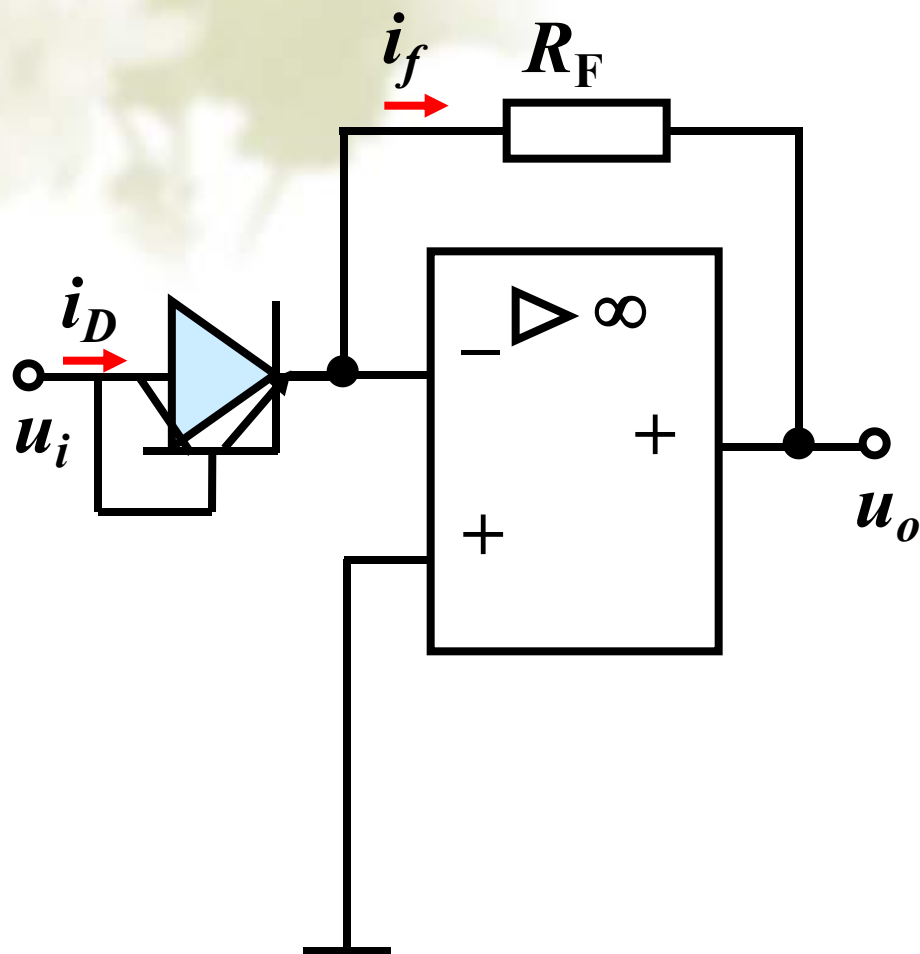
$$\frac{u_i}{R_1} = I_S e^{u_D / U_T}$$

两边取对数

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



2、反对数运算电路



$$i_D = I_S e^{u_D / U_T}$$

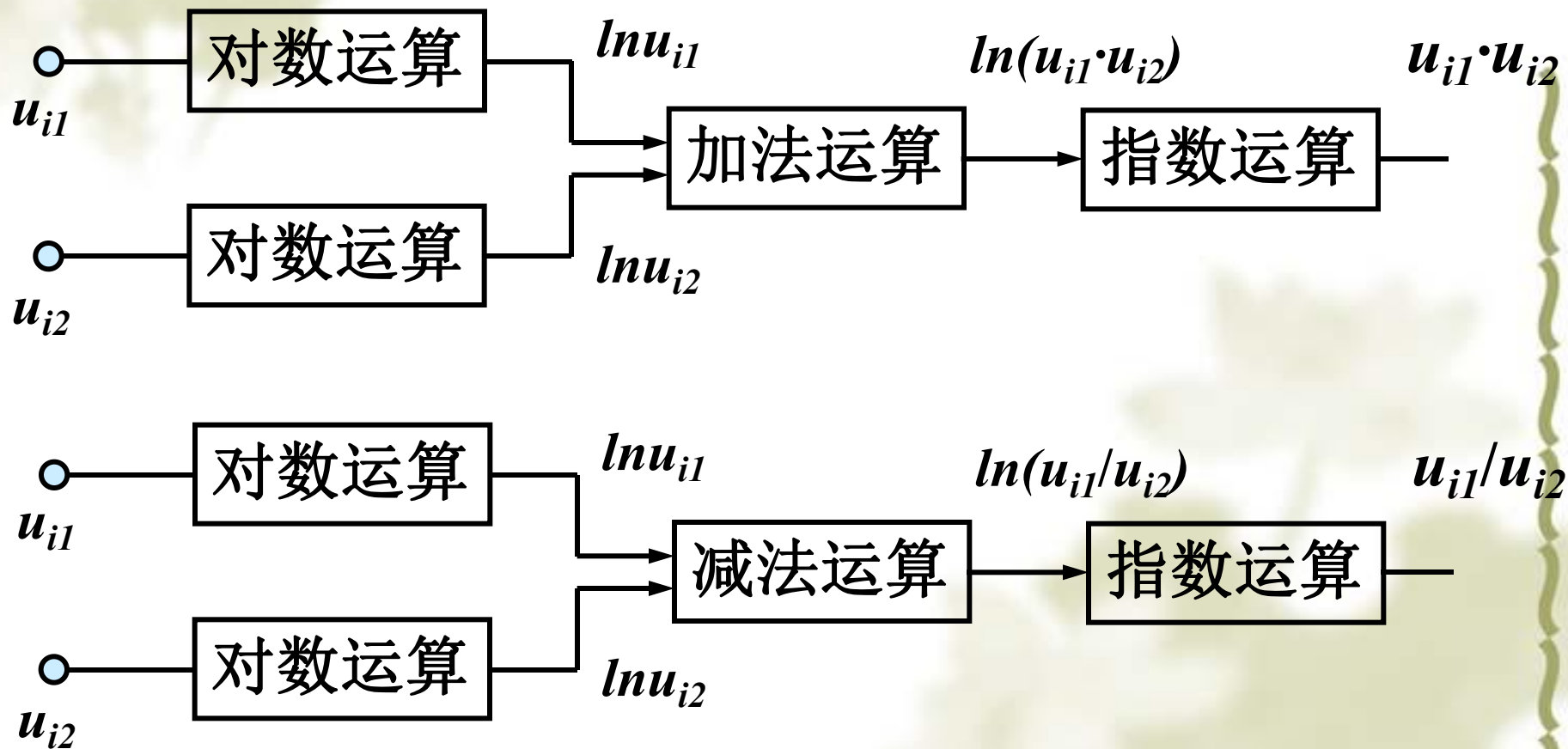
$$i_f = -u_o / R_F$$

理想运放时,

$$i_D = i_f, \quad u_D = u_i$$

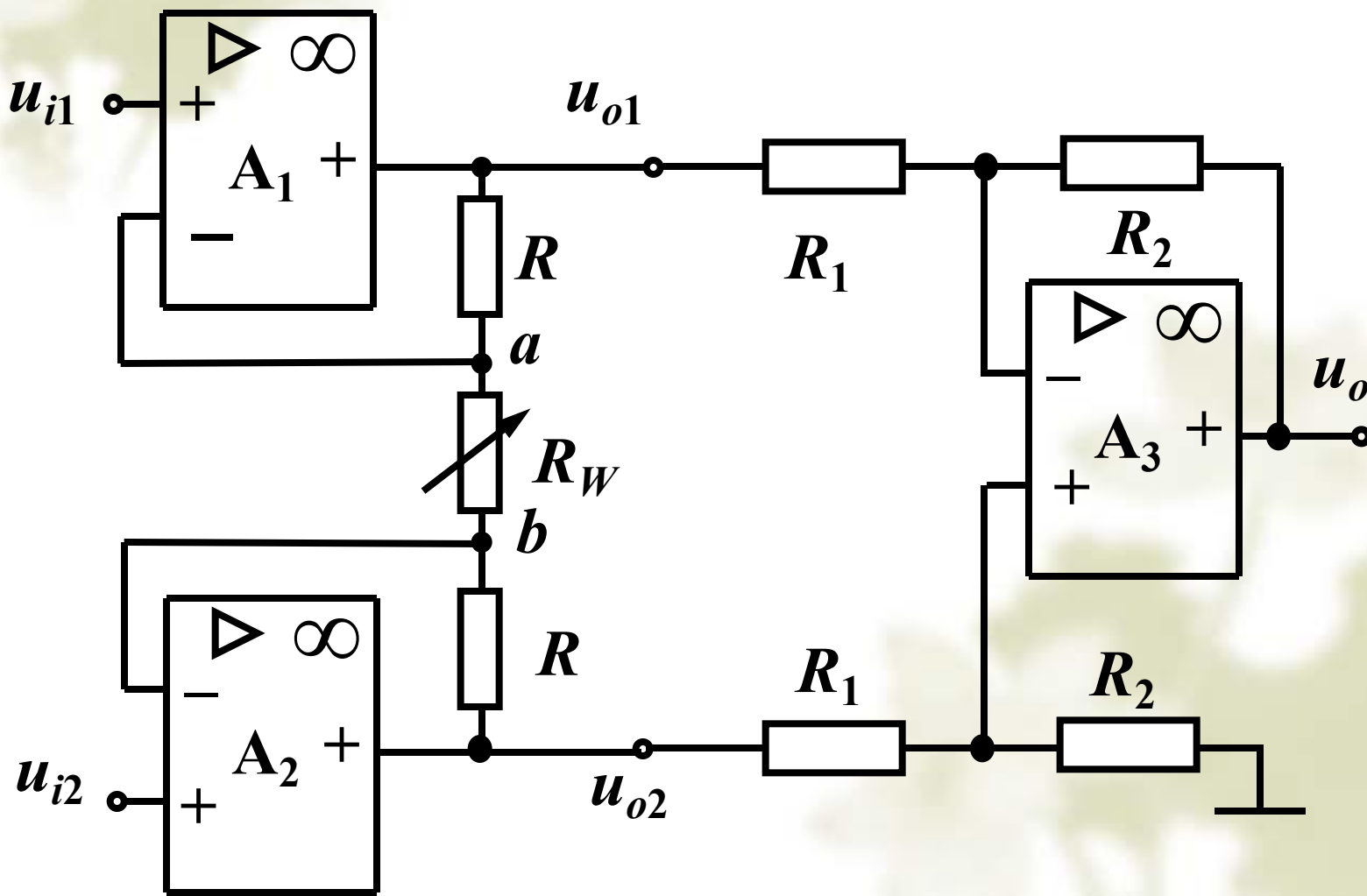
$$u_o = -I_S R_F e^{u_i / U_T}$$

3、乘除法运算电路

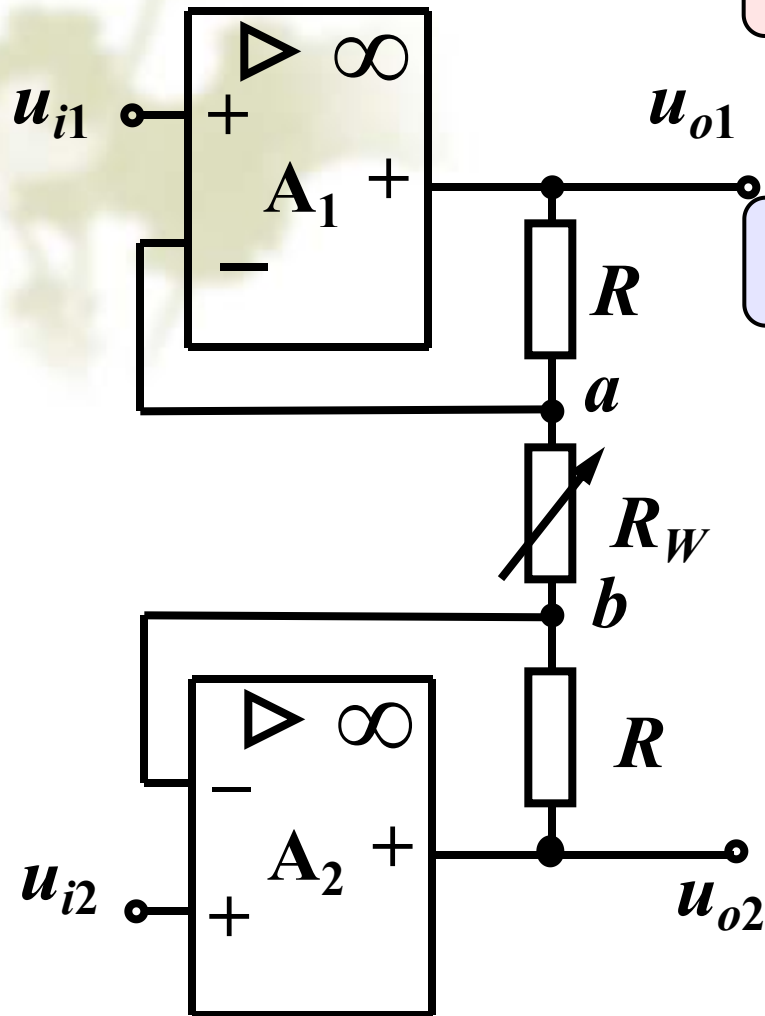


第三节 集成运放在信号测量及处理方面的应用

一、测量放大器 同相并联型差分放大器



虚短



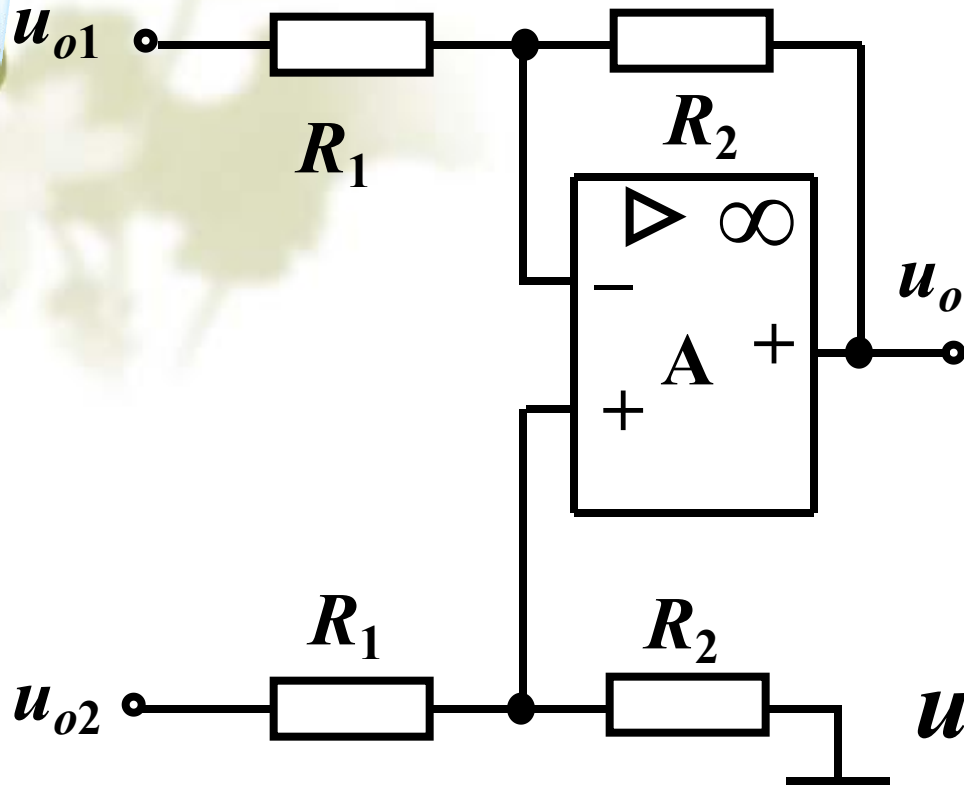
虚断

$$u_a = u_{i1} \quad u_b = u_{i2}$$

$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_W} = \frac{u_a - u_b}{R_W} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_W}$$

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

$$\frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1})$$



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

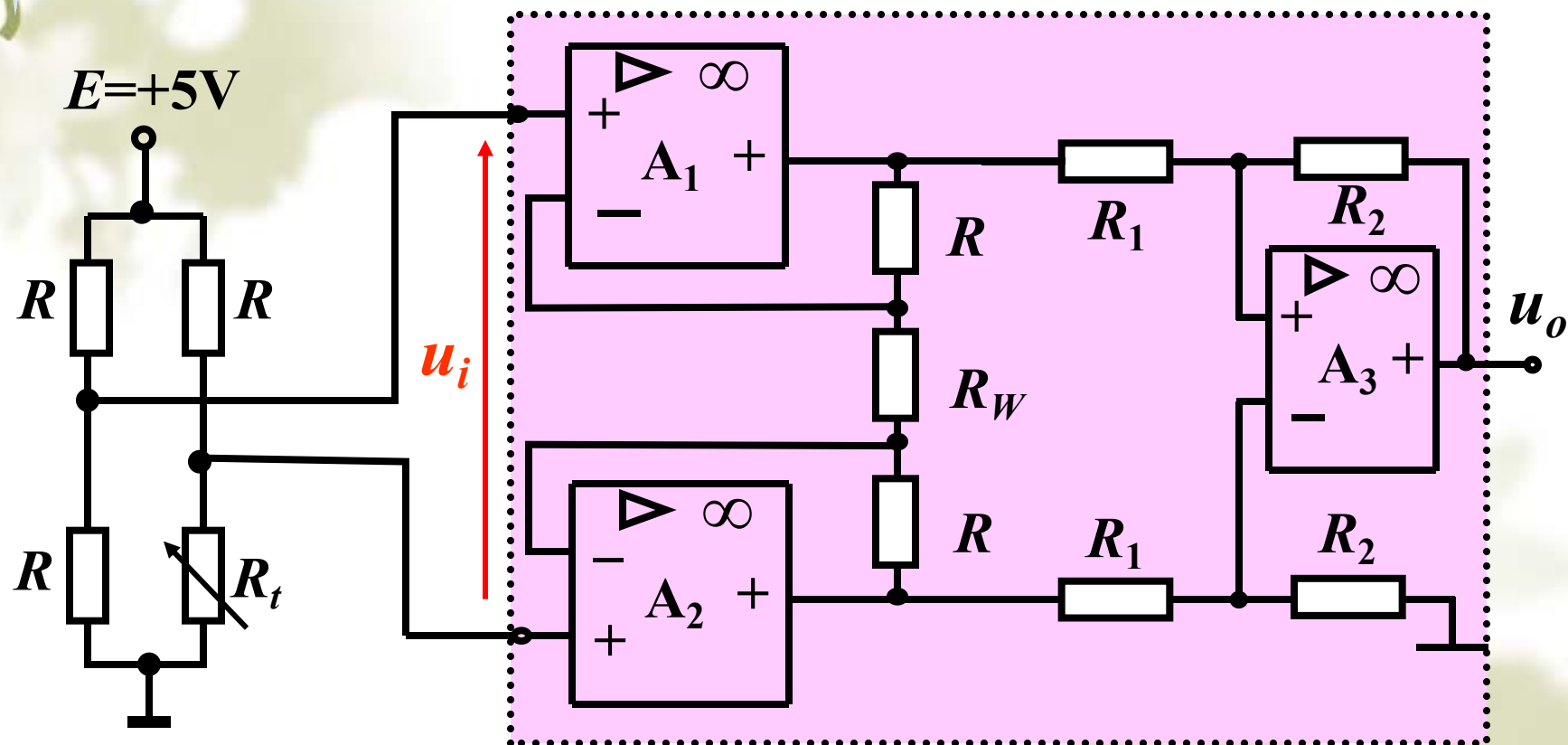
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_w}{R_w} (u_{i2} - u_{i1})$$



$$A = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{2R + R_W}{R_W} \right) = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R}{R_W} \right)$$

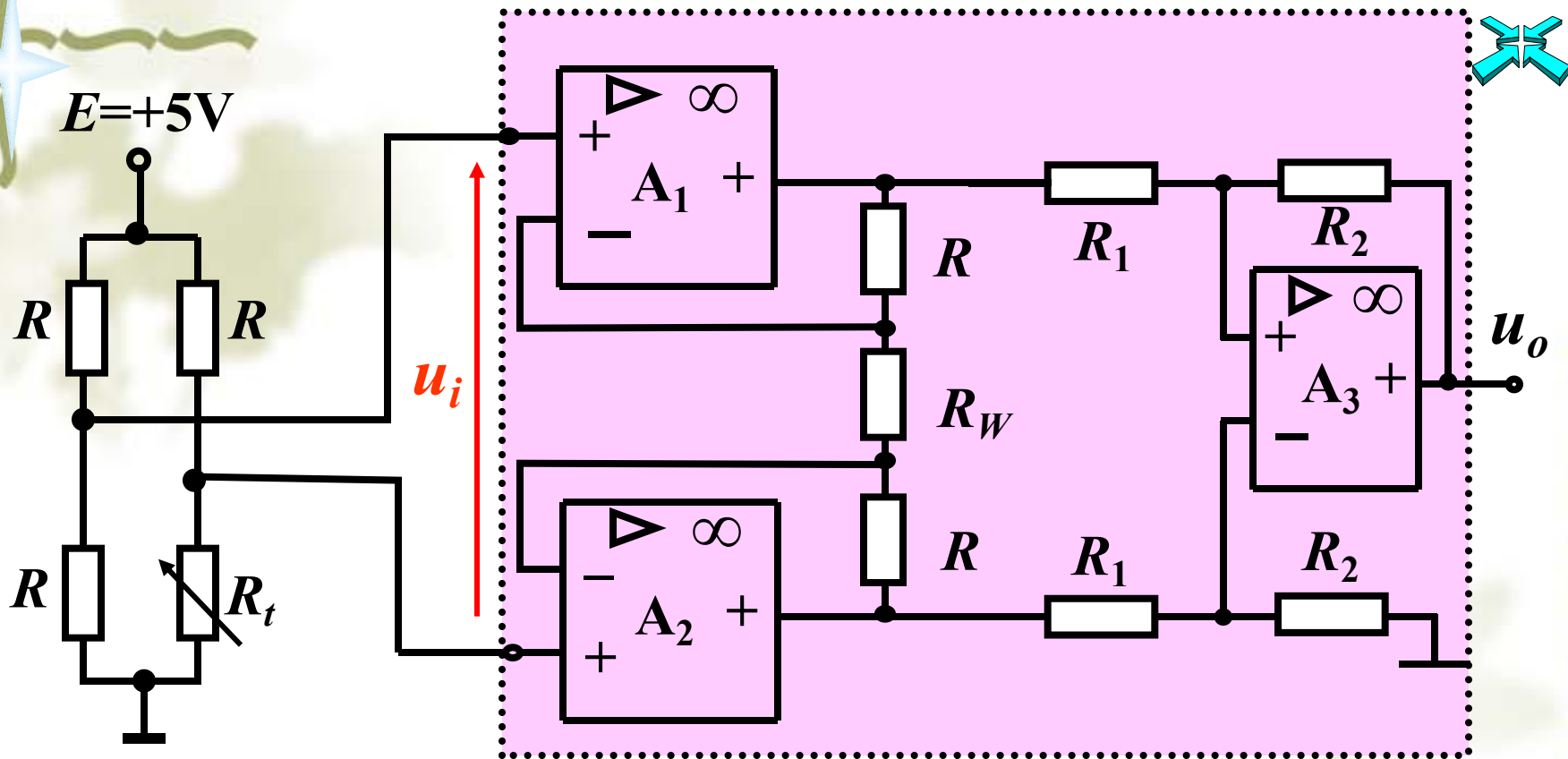
- 三运放电路是差动放大器，放大倍数可变。
- 由于输入均在同相端，此电路的输入电阻高。
- 电路的共模抑制比主要取决于 A_1 和 A_2 的对称性和各电阻值的匹配精度。如果 A_1 和 A_2 对称，且各电阻值的匹配误差为 $\pm 0.001\%$ ，那么电路的共模抑制比可达100dB以上。

例1: 由三运放放大器组成的温度测量电路。



R_t : 热敏电阻

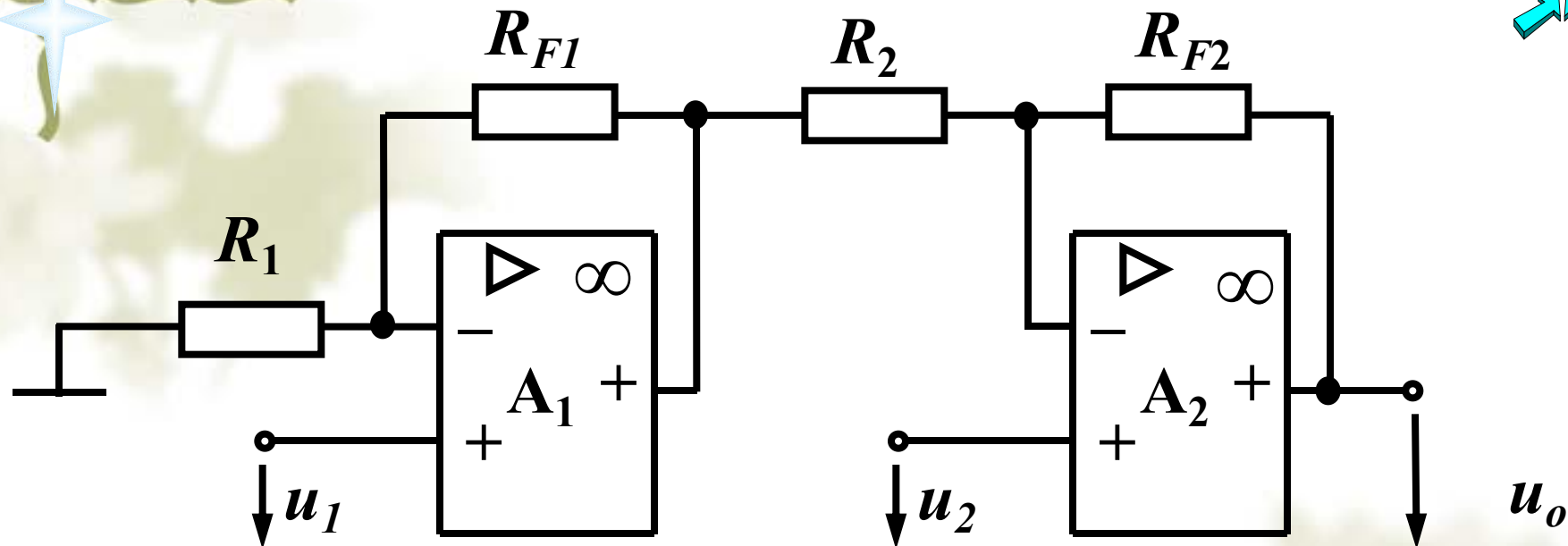
同相并联型差分放大器



$$R_t = f(T^{\circ}\text{C}) \quad u_i = \frac{R_t}{R_t + R} E - \frac{E}{2} = \frac{R_t - R}{2(R_t + R)} E$$

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{2R + R_w}{R_w} u_i = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{2R + R_w}{R_w} \times \frac{R_t - R}{2(R_t + R)} E$$

2. 同相串联型差分放大器-心电放大器



$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_{F1}}{R_1}\right)u_1$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_2}\right)u_2 - \frac{R_{F2}}{R_2}u_{o1}$$

$$\text{当 } \frac{R_1}{R_{F1}} = \frac{R_{F2}}{R_2}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_2}\right)(u_2 - u_1)$$

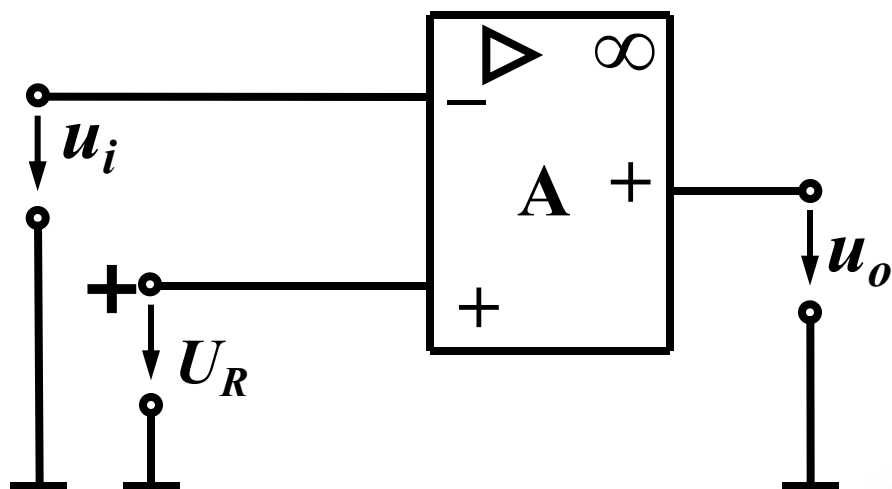
$$A = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_2}\right)$$

二、电压比较器



电压比较器的作用

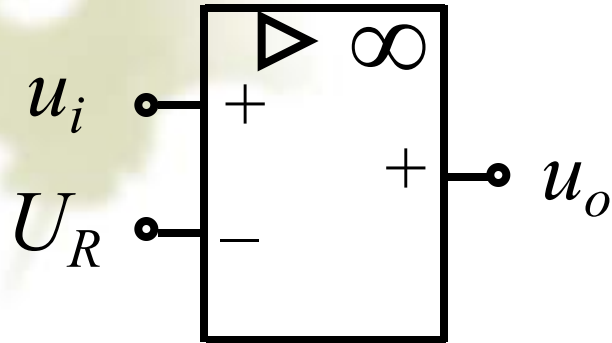
对两个输入电压进行比较，并根据比较结果输出高、低两个电平的电压，以满足后面连接的数字电路对1和0两个逻辑电平的要求。



U_R : 参考电压

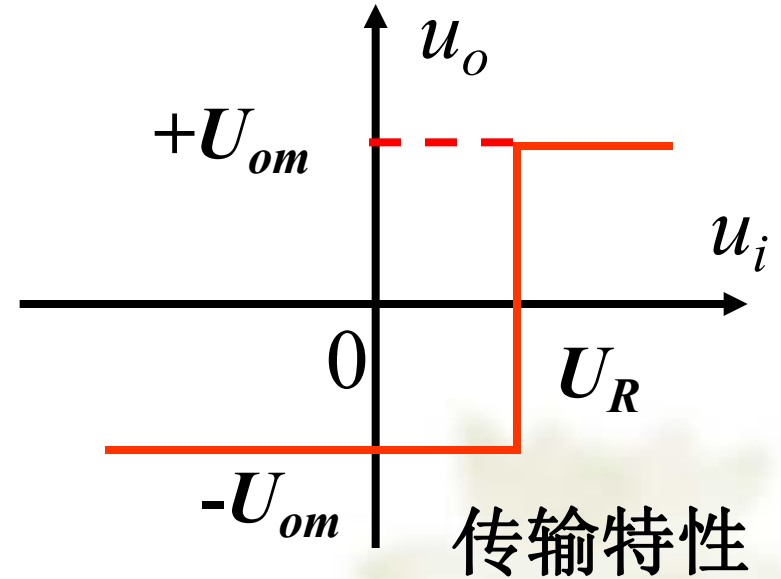
u_i : 被比较信号

1、若 u_i 从同相端输入



U_R : 参考电压

u_i : 被比较信号



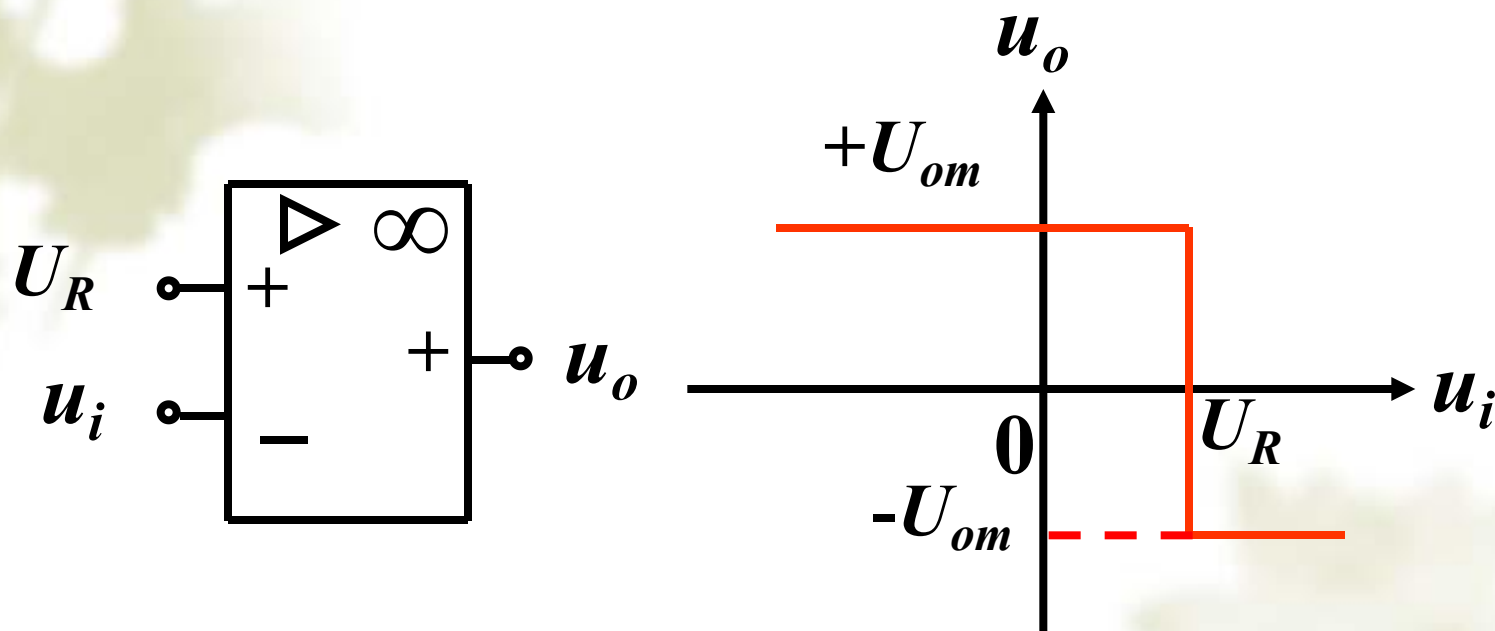
特点：运放处于开环状态。

当 $u_i > U_R$ 时， $u_o = +U_{om}$

当 $u_i < U_R$ 时， $u_o = -U_{om}$



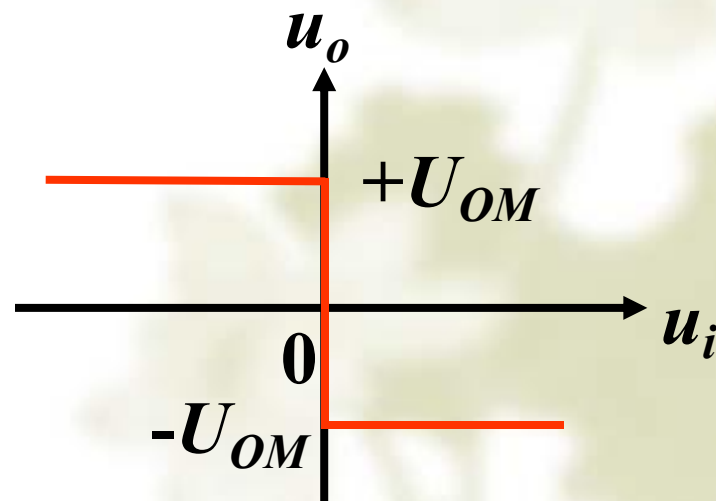
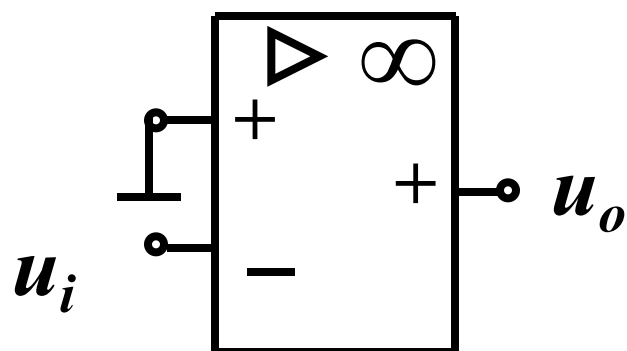
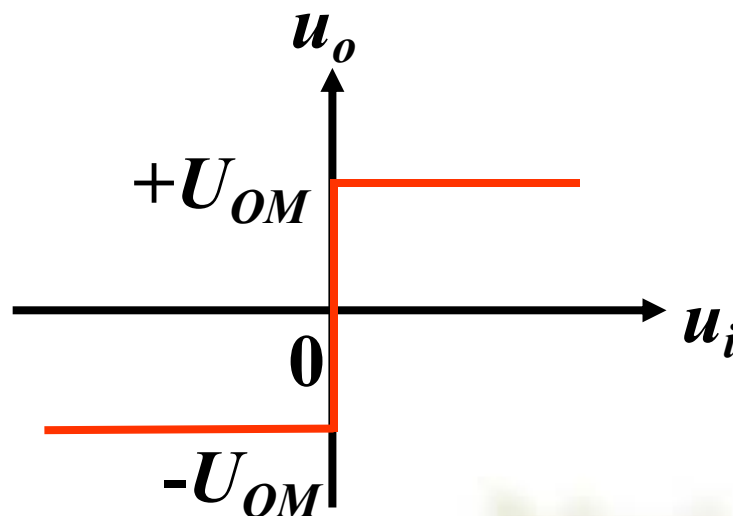
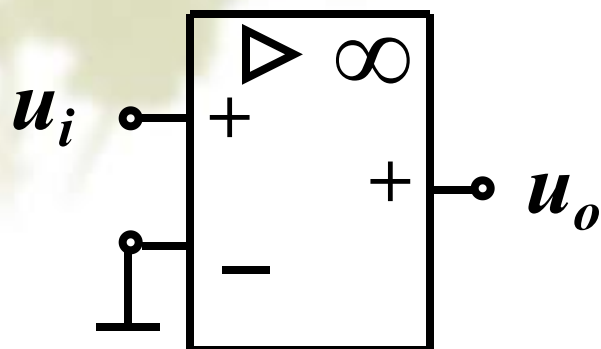
2、若 u_i 从反相端输入



当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = +U_{om}$

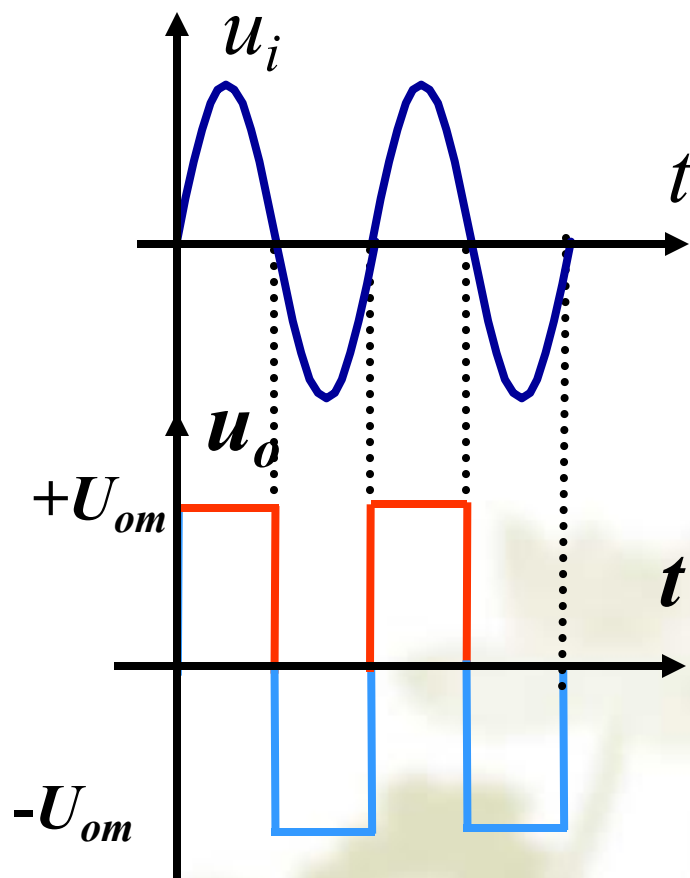
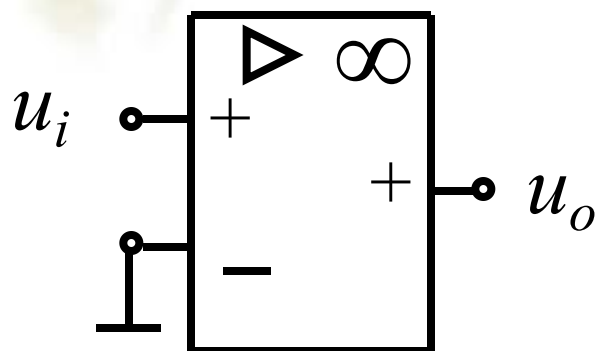
当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = -U_{om}$

3、过零比较器: ($U_R = 0$ 时)





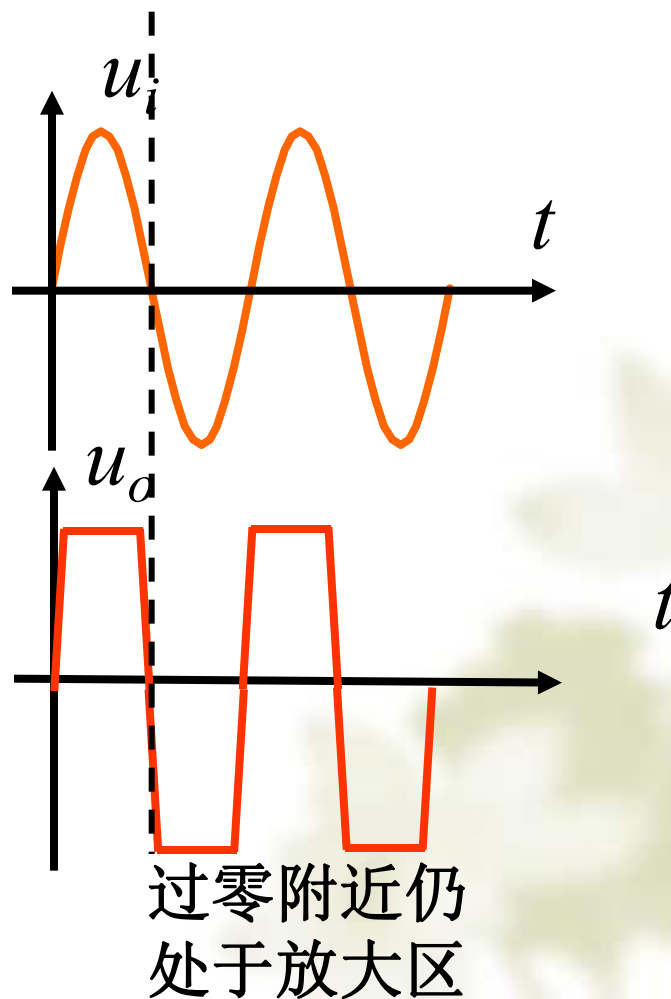
例：利用电压比较器将正弦波变为方波。



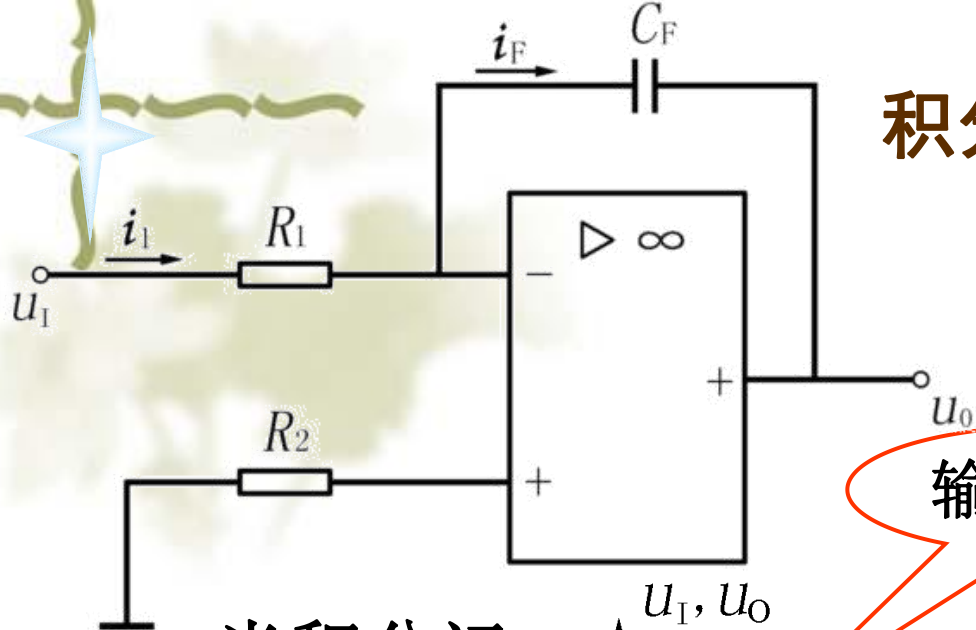


比较器的特点

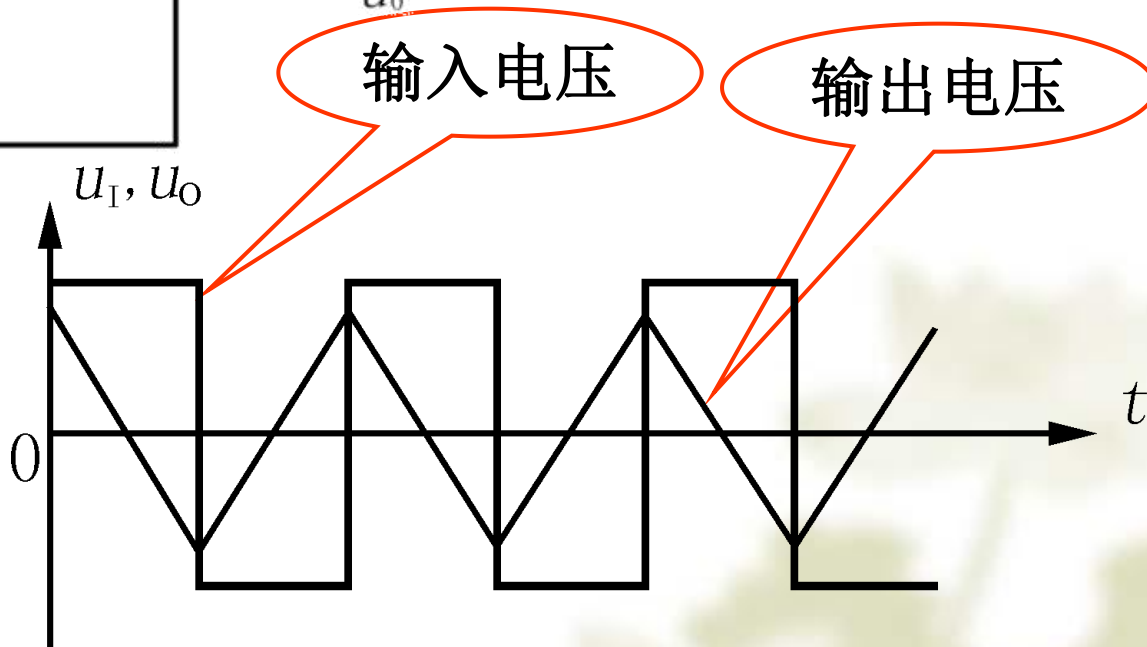
1. 电路简单。
2. 当 A_o 不够大时，输出边沿不陡。
3. 容易引入干扰。



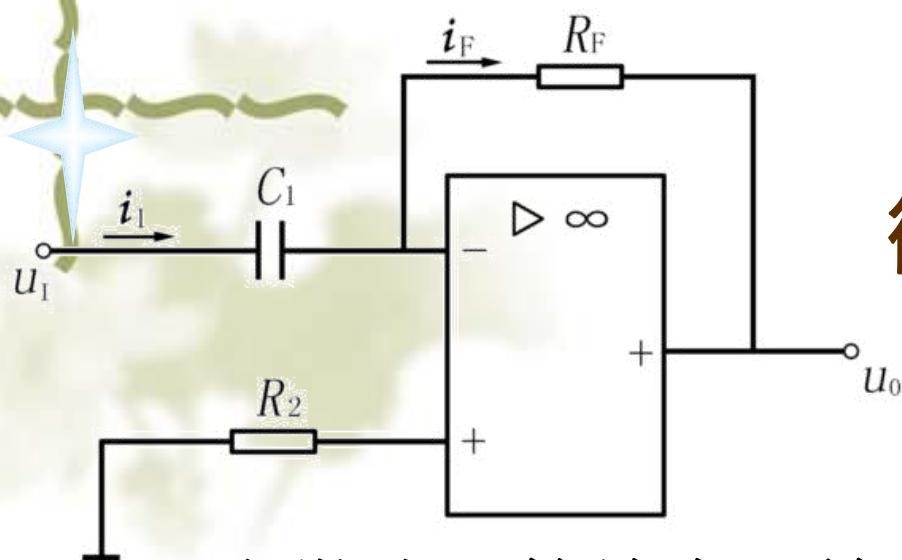
积分运算电路



当积分运算放大器输入信号为矩形波时，输出端可得到三角波。

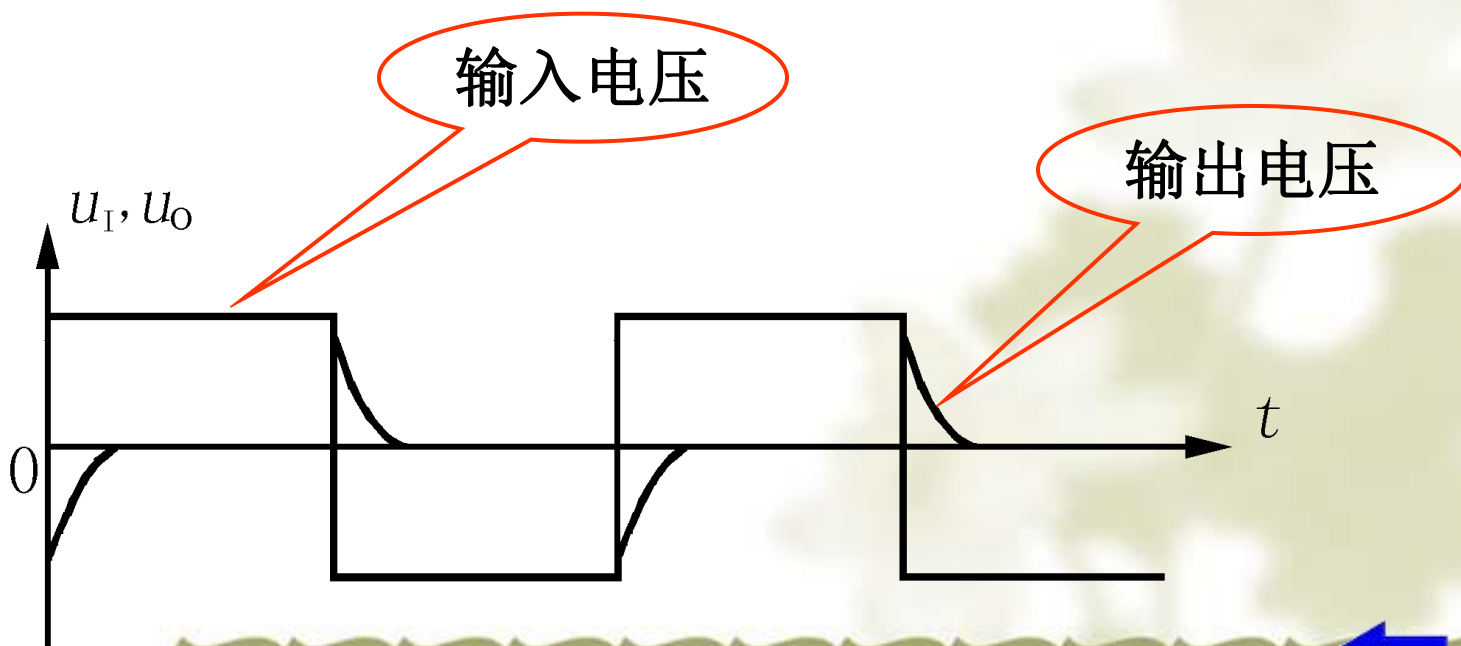


该电路用于有直流成分的输入电压时，积分时间不能太长，以免输出电压达到饱和。



微分运算电路

当微分运算放大器输入信号为矩形波时，输出端可得到尖脉冲。

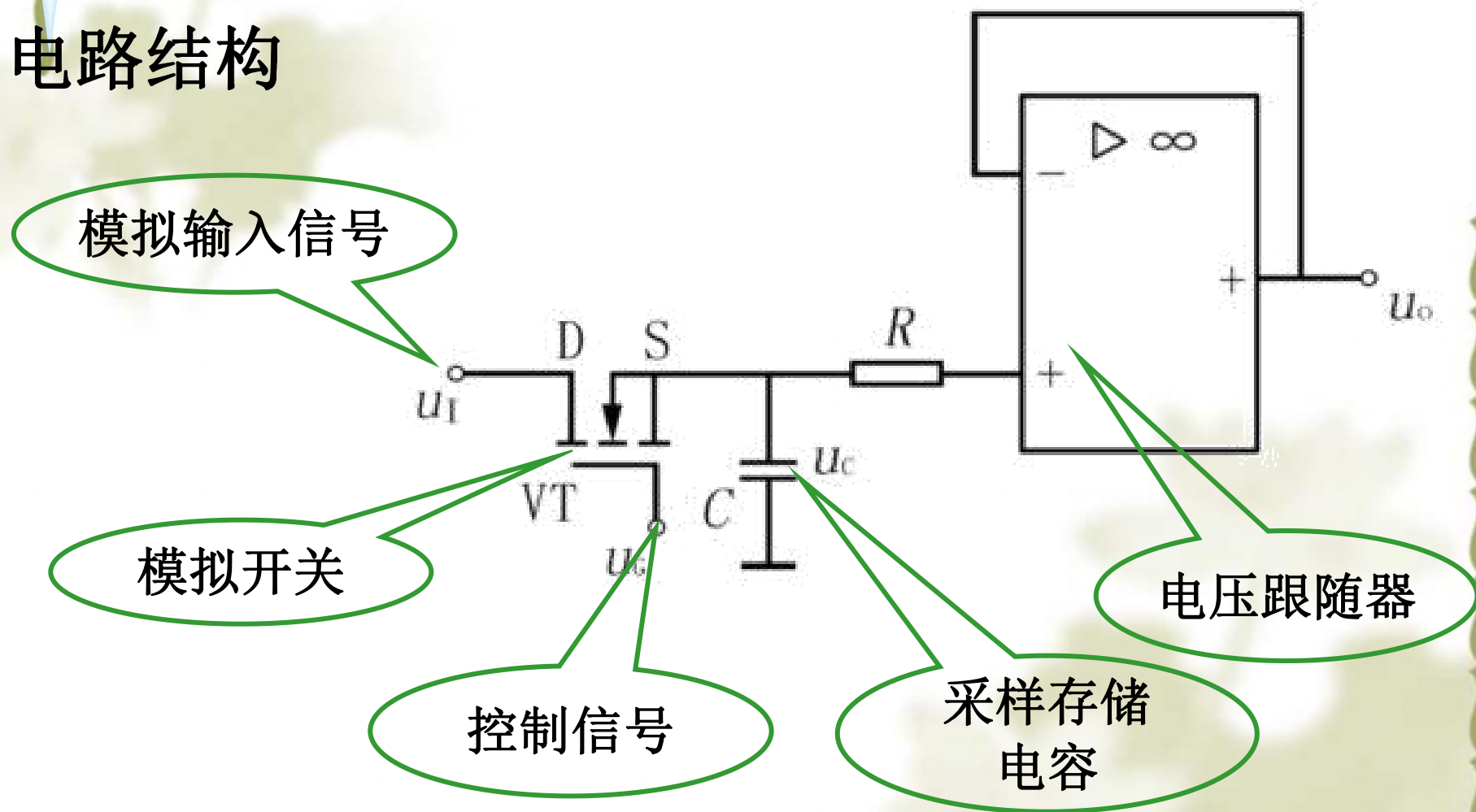




三、采样保持电路

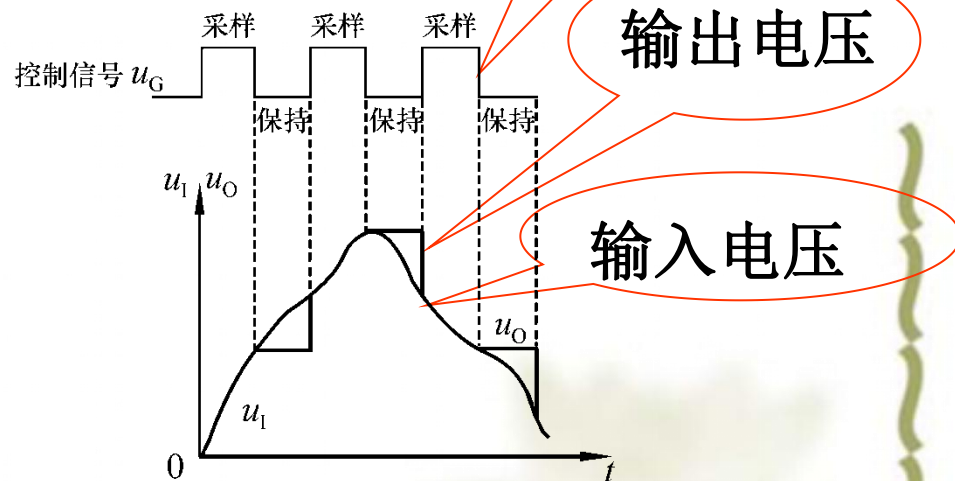
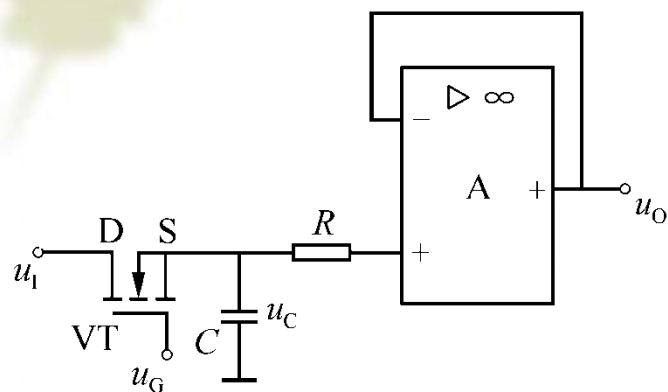
在数据采集处理系统中常常要将模拟量转换成数字量。在模拟-数字转换之前，要对模拟信号进行定期的瞬时采样，并在两次采样之间保持前一次的采样值，实现这种功能的电路称为采样保持电路(sample and hold circuit)。

电路结构



用于数据采集、模数转换、数字电路、计算机控制等。

工作原理



- ① 采样状态: u_G 为高电平, 场效应管导通, u_I 对存储电容 C 充电, $u_O = u_C = u_I$ 。
- ② 保持状态: u_G 为低电平, 场效应管截止, 输出电压保持前面采样的值不变。

采样速度愈高, 输出愈接近模拟信号的变化情况。

常用滤波电路(*Filter*)



什么是滤波

在通过传感器获得的信号中，常常混淆有许多其他频率的干扰。由于这些干扰的存在，有时得不到正确的测量值，甚至有时有用的信号被淹没在干扰噪声中。为了突出有用信号，抑制噪声干扰，我们就要对传感器获得的信号进行滤波。

滤波器：一种使有用的信号能顺利通过，无用信号被消除或衰减的电路。被滤除（或被衰减）的信号频带称为**阻带**，被传输的信号频带称为**通带**。

滤波的实质：就是对信号进行频率选择，完成滤波功能的装置称为滤波器。当信号通过滤波器时，信号中某些频率成分得以通过，其他频率成分的信号受到衰减或抑制。信号通过滤波器的过程，就称为对信号进行滤波。

按结构形式上分

C型滤波器

L型滤波器

T型滤波器

π 型滤波器

按组成器件分

有源滤波器

无源滤波器



按带通带阻在频谱中的
相对位置分

低通滤波器

高通滤波器

带通滤波器

带阻滤波器

按信号性质分

模拟滤波器

数字滤波器

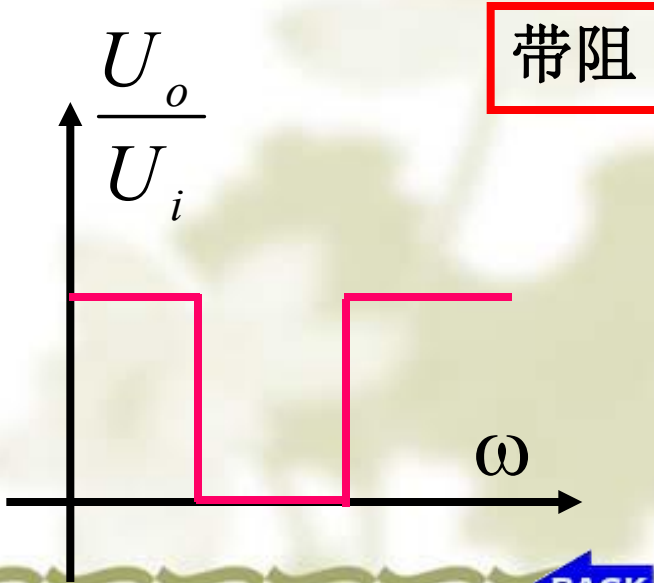
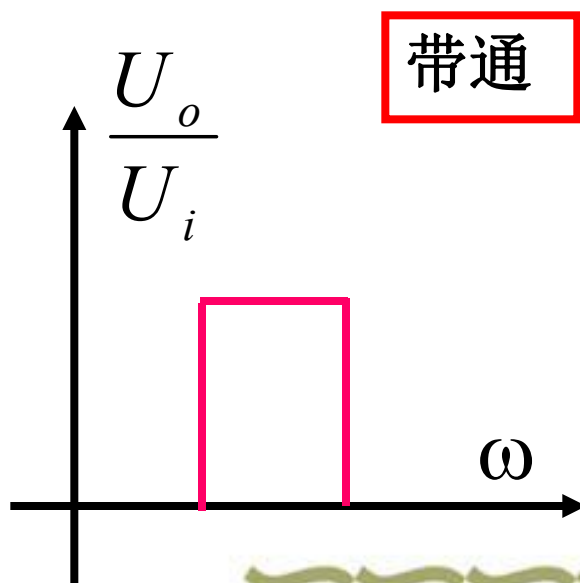
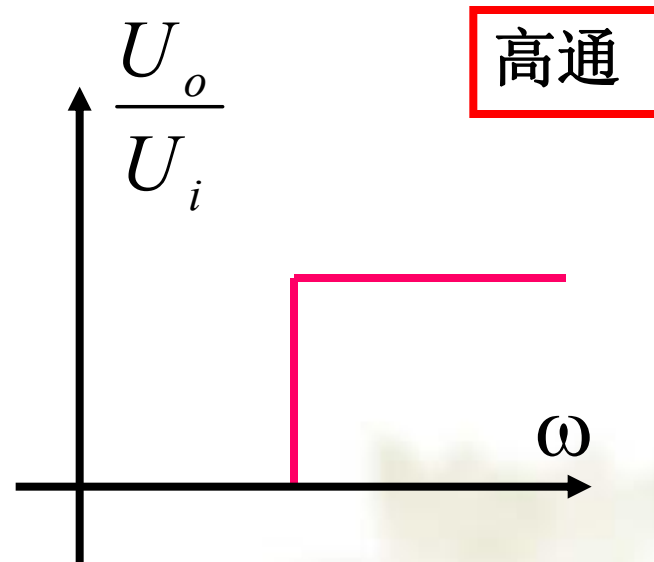
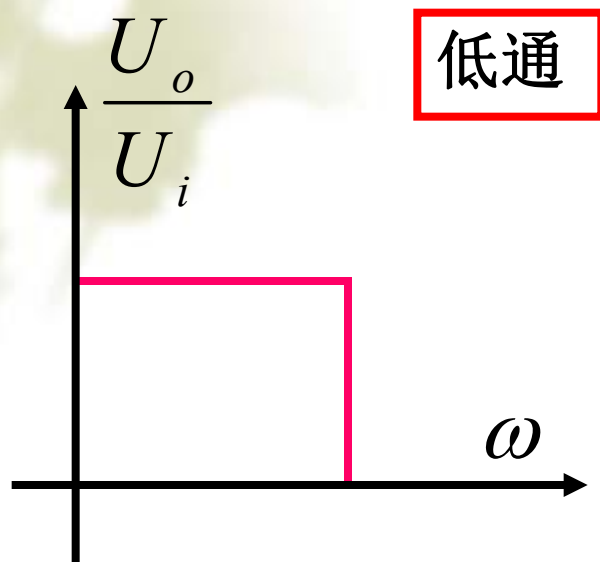
按阶数分

一阶，二阶

...

高阶

四种典型的频率特性





各种滤波器的用途

低通滤波器(**LPF**)——削弱高次谐波或频率较高的干扰和噪声（**低频、直流信号可通过**）

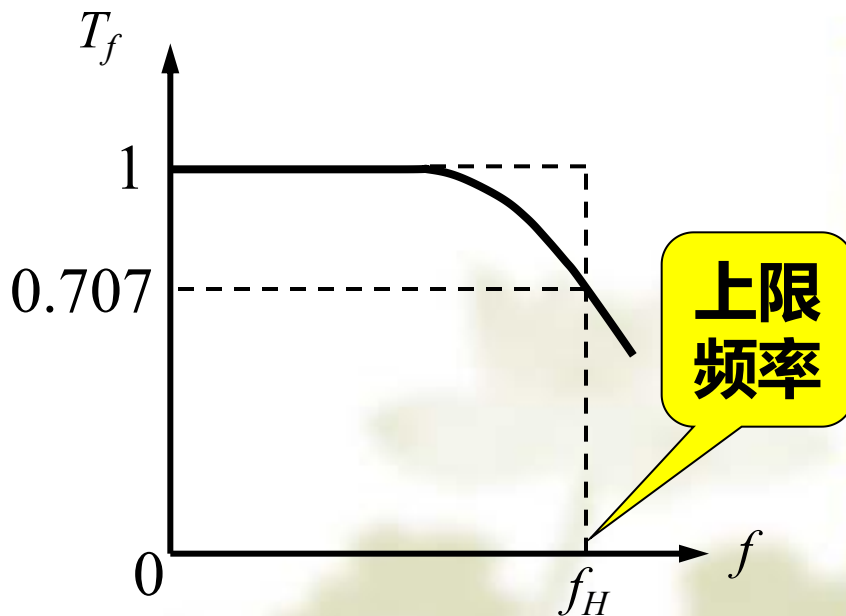
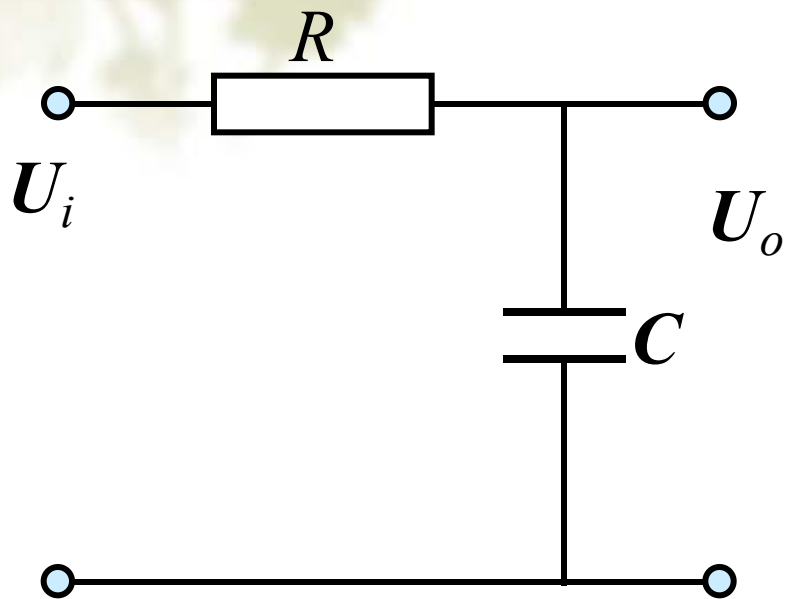
高通滤波器(**HPF**)——削弱低频、直流分量（**高频信号可通过**）

带通滤波器(**BPF**)——突出有用频段的信号；

带阻滤波器(**BEF**)——抑制某一频段的干扰信号；

低通滤波器

对低频信号几乎无衰减地传输，
但阻止高频信号通过



$$T_f = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$f_0 = f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$T_f = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}}$$

$$\varphi = -\arctg(f/f_H)$$

滤波特点分析

$$T_f = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}}$$



- ❖ 当信号频率很低 ($f/f_H \ll 1$) , $T_f=1$, 信号低频成分无损耗, 无相移传输。
- ❖ 当 $f/f_H \gg 1$ 时, $T_f=f/f_H$, 高频成分被衰减, T_f 与 f 成反比。
- ❖ 当 $f=f_H$ 时, 即信号频率等于上限频率时,

$$T_f = 1/\sqrt{2} = 0.707$$

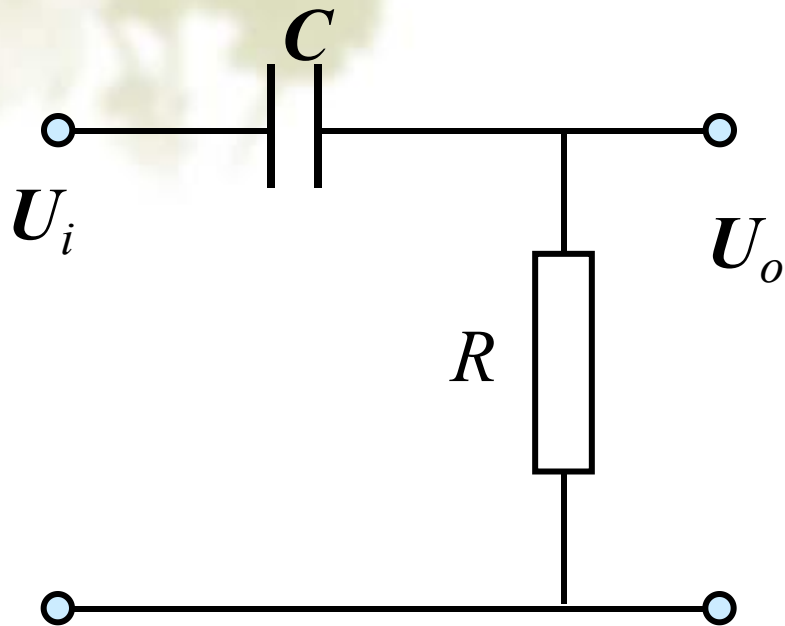
$$\varphi = -\arctg(f/f_H) \quad \text{相位落后 } \pi/4。$$

相关参数的确定:

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

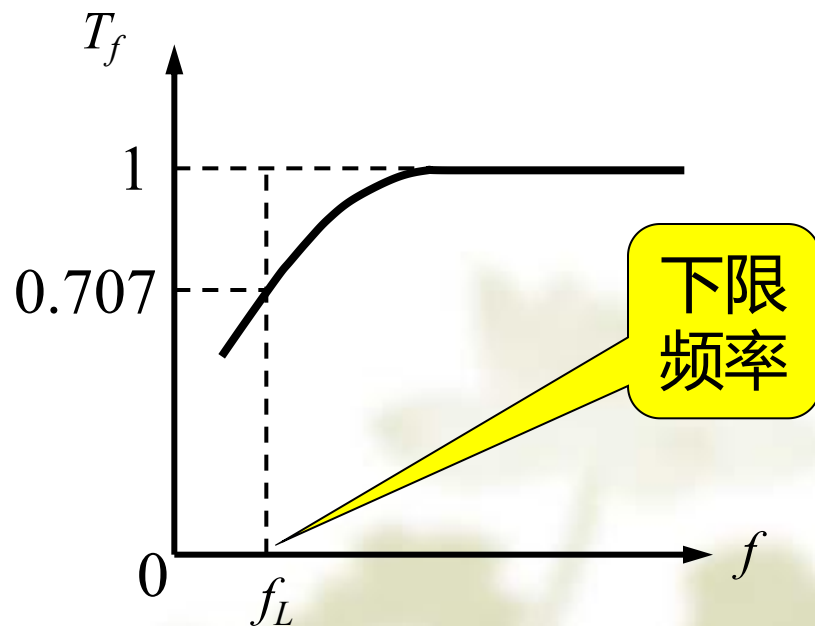
高通滤波器

对高频信号几乎无衰减地传输，
但阻止低频信号通过。



$$T_f = \frac{U_o}{U_i} = \frac{j\omega / \omega_L}{1 + j\omega / \omega_L}$$

$$f_0 = f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$



$$T_f = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$$

$$\varphi = \arctg(f_L / f)$$

滤波特点分析

$$T_f = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$$



- ❖ 当频率很低时，低频成分被衰减， T_f 与 f 成正比。
- ❖ 当频率很高时，高频成分能顺利通过，且相位也不改变。
- ❖ f_L 为下限频率，当 $f = f_L$ 时，

$$T_f = 1 / \sqrt{2} = 0.707$$

$$\varphi = \arctg(f_L / f) \quad \text{相位超前 } \pi / 4。$$

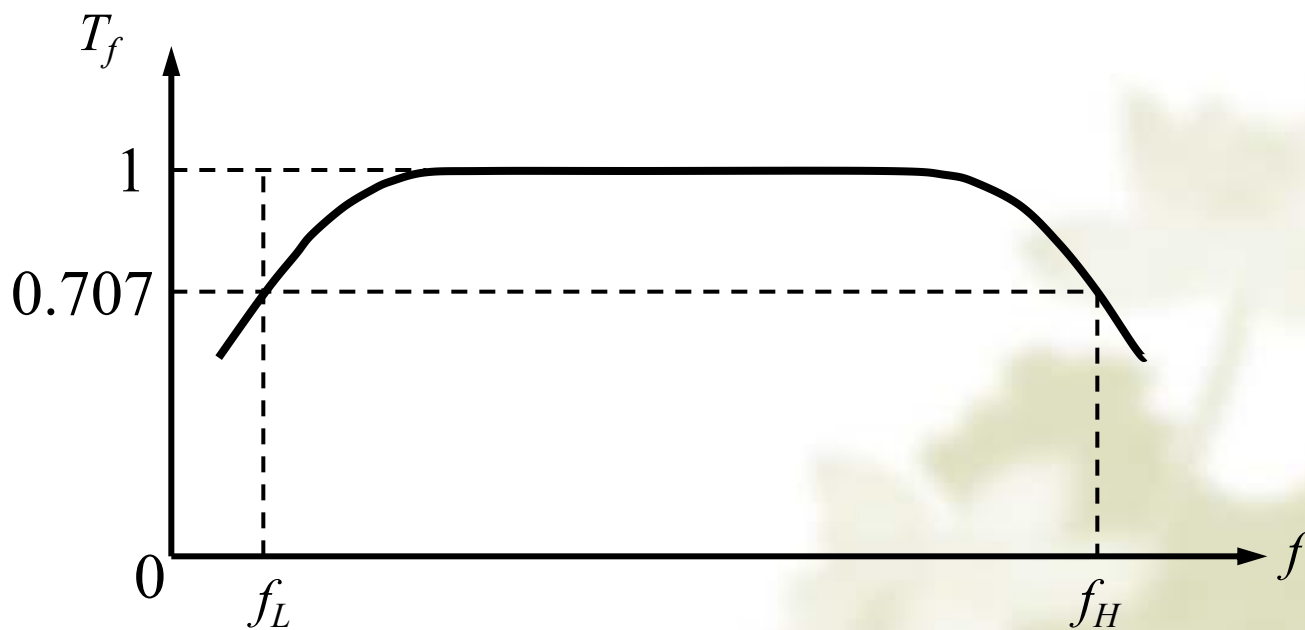
相关参数的确定：

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

带通滤波器



对规定频带内的信号可以无衰减地传输，而对低于或高于该频带的信号有很大的衰减。



带宽B和品质因数Q值

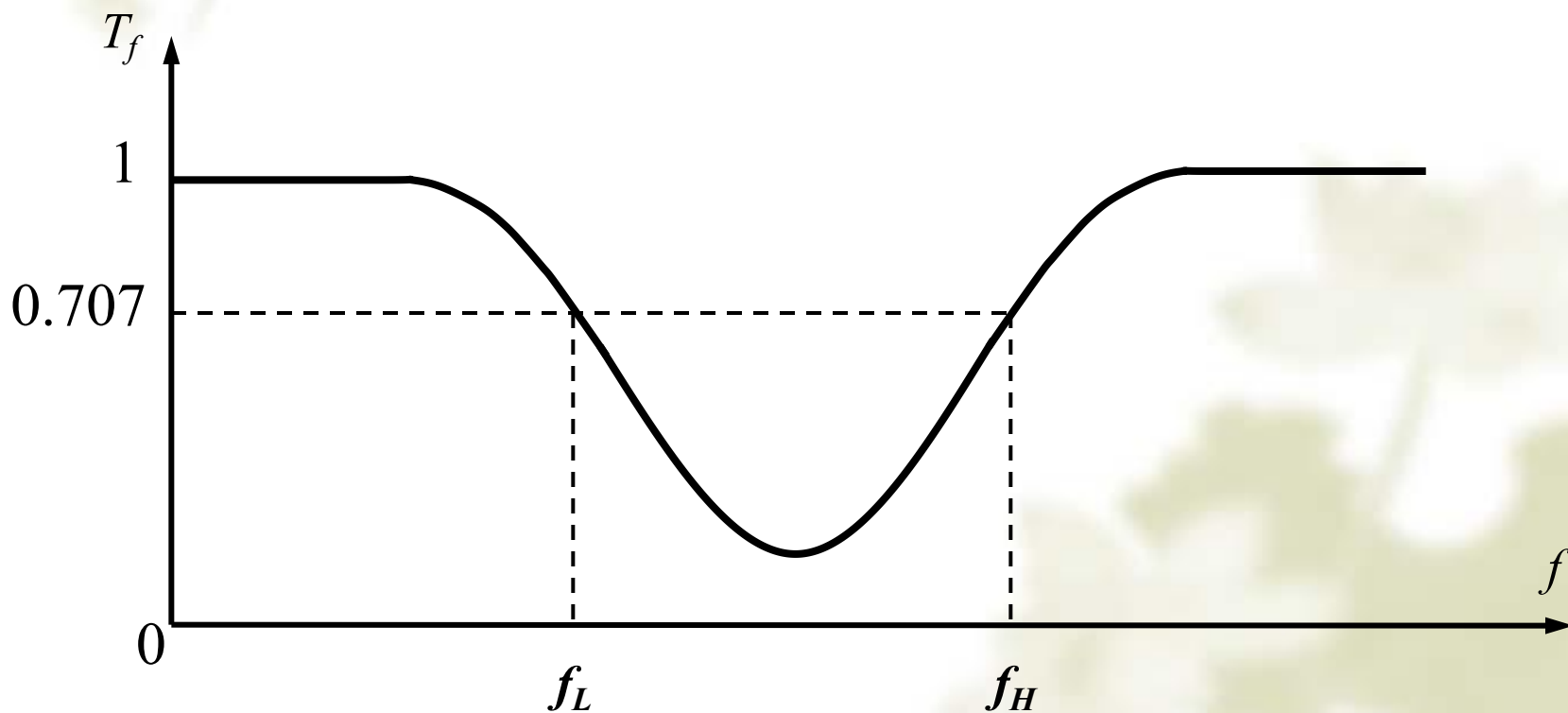


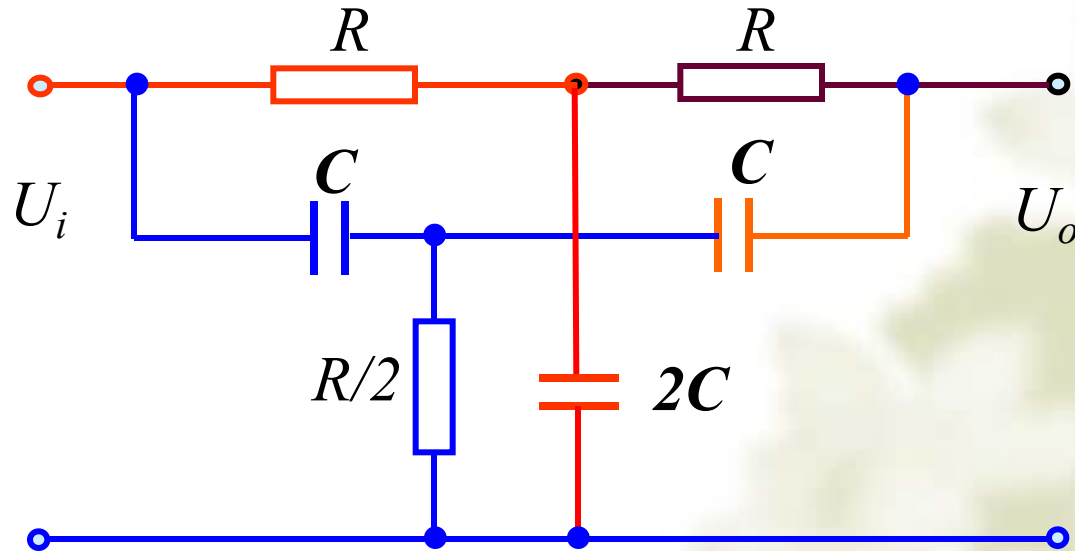
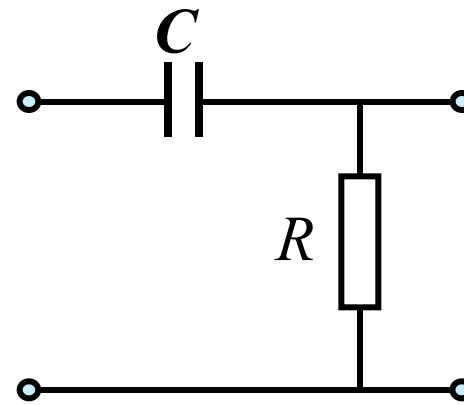
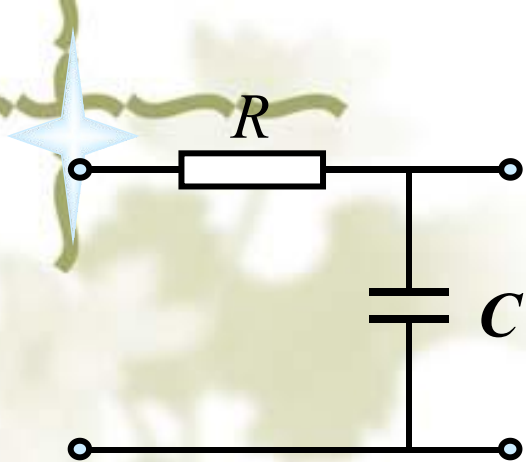
- ❖ 上下两截止频率之间的频率范围称为**滤波器带宽**，或**-3dB**带宽，单位为**Hz**。带宽决定着滤波器分离信号中相邻频率成分的能力—**频率分辨力**。在电工学中，通常用**Q**代表谐振回路的品质因数。
- ❖ 对于带通滤波器，通常把中心频率**f₀**和带宽 **B**之比称为**滤波器的品质因数Q**。例如一个中心频率为**500Hz**的滤波器，若其中**-3dB**带宽为**10Hz**，则称其**Q**值为**50**。**Q**值越大，表明滤波器频率分辨力越高。

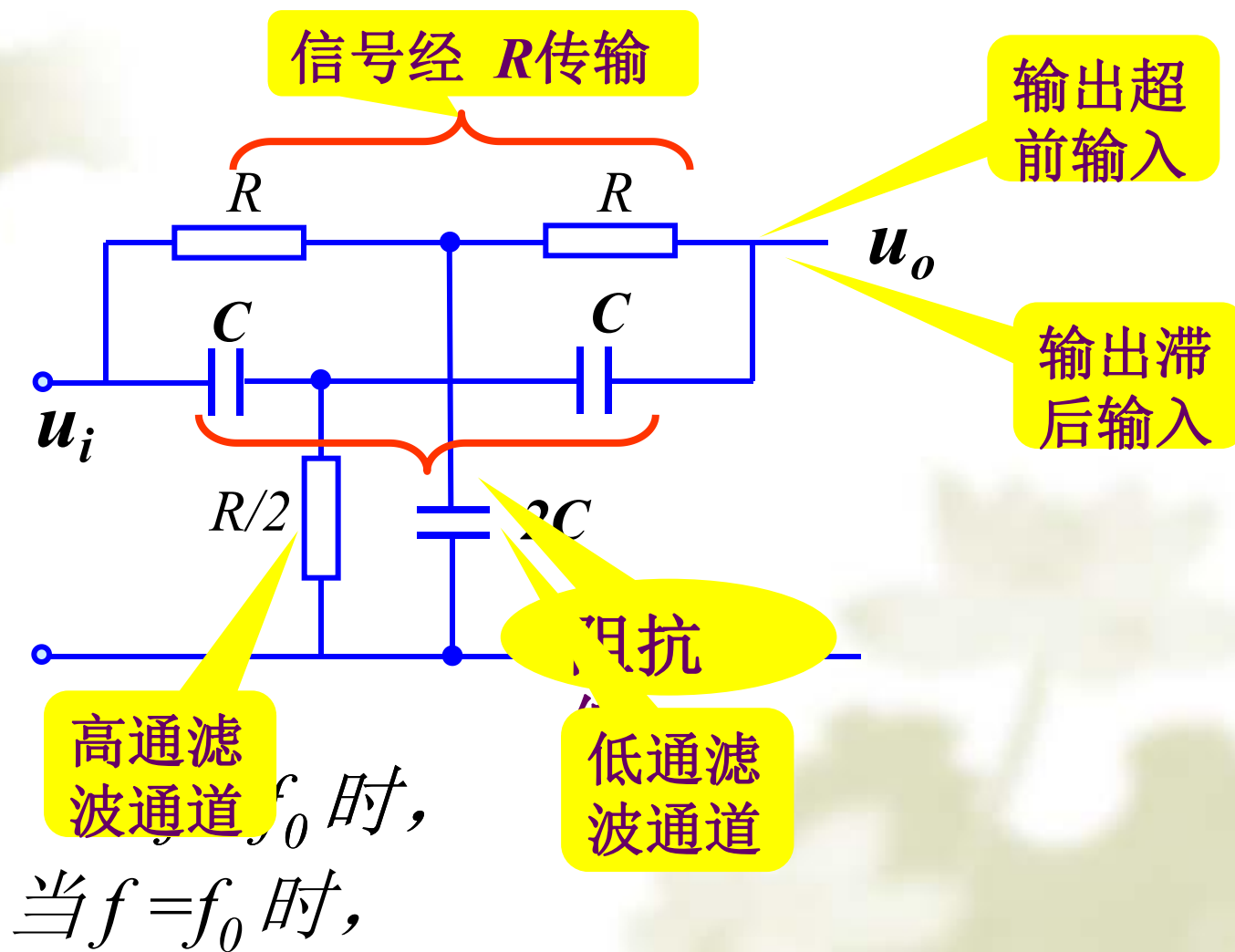
带阻滤波器



只阻止所规定频段的信号，低于或高于该频段的信号都能通过。







四、有源滤波器



无源滤波器：由电阻、电容和电感等无源元件组成的滤波器。

有源滤波器：含有运算放大器等有源器件的滤波器。
体积小、滤波性能好、可放大信号。

有源滤波器的主要参数

通带增益 A_o ；通带宽度 BW ；特征角频率 ω_n
(ω_c)；等效品质因数 Q ；中心角频率 ω_o 。



有源滤波器的优点：

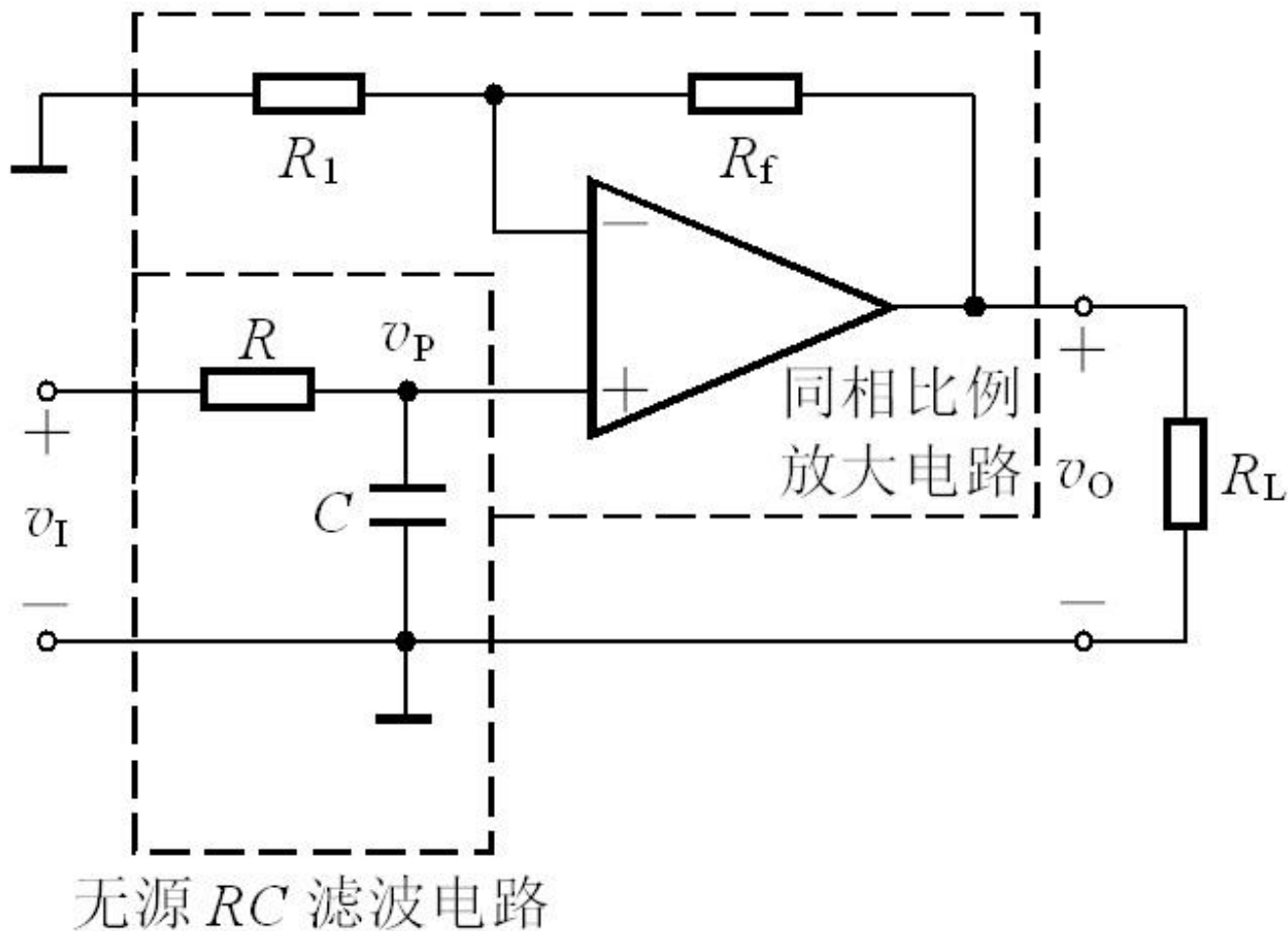
1. 不使用电感元件，体积小重量轻。
2. 只需把几个低阶滤波电路串起来就可构成高阶滤波电路，无需考虑级间影响。
3. 除滤波外，还可放大信号，放大倍数容易调节。

有源滤波器的缺点：

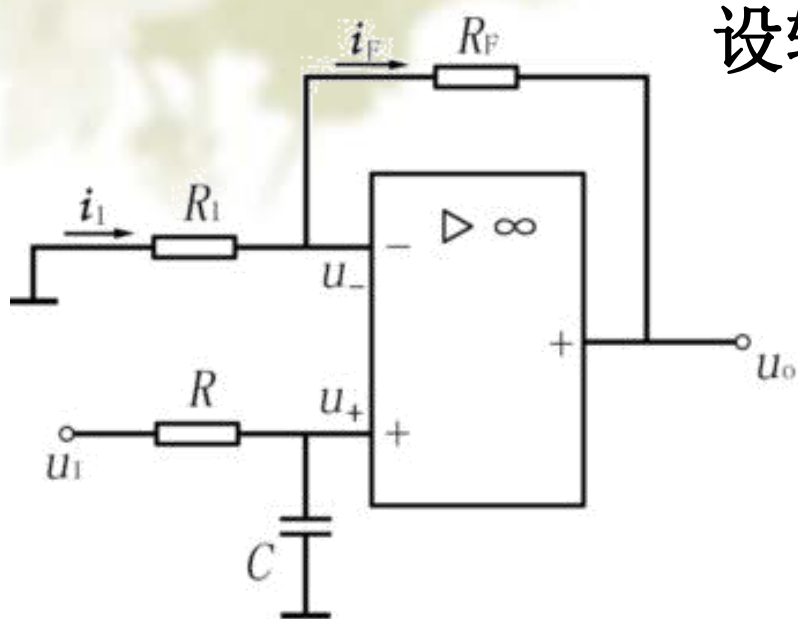
1. 不宜用于高频。
2. 不宜在高电压、大电流情况下使用。
3. 使用时需外接直流电源。



1. 有源低通滤波器



$$f_H = 1 / 2\pi RC$$



设输入为正弦波信号，则有

$$\dot{U}_+ = \dot{U}_C = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i$$

由同相比例运算放大器可得

$$\dot{U}_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \dot{U}_+$$

式中 $\omega_H = \frac{1}{RC}$
称为上截止角频率

故

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\omega RC} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}}$$



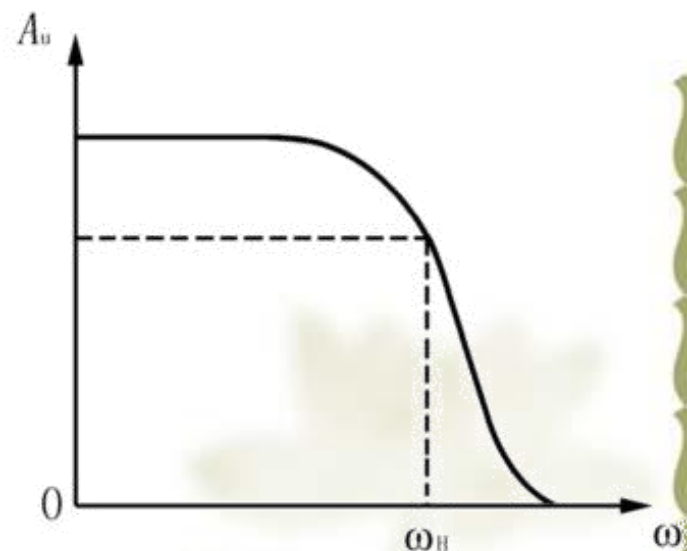
电压增益的模为

$$|A_u| = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2}} = \frac{|A_{u0}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2}}$$

当 $\omega = 0$ 时, $|A_u| = |A_{u0}| = 1 + \frac{R_F}{R_1}$

当 $\omega = \omega_H$ 时, $|A_u| = \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{u0}|$

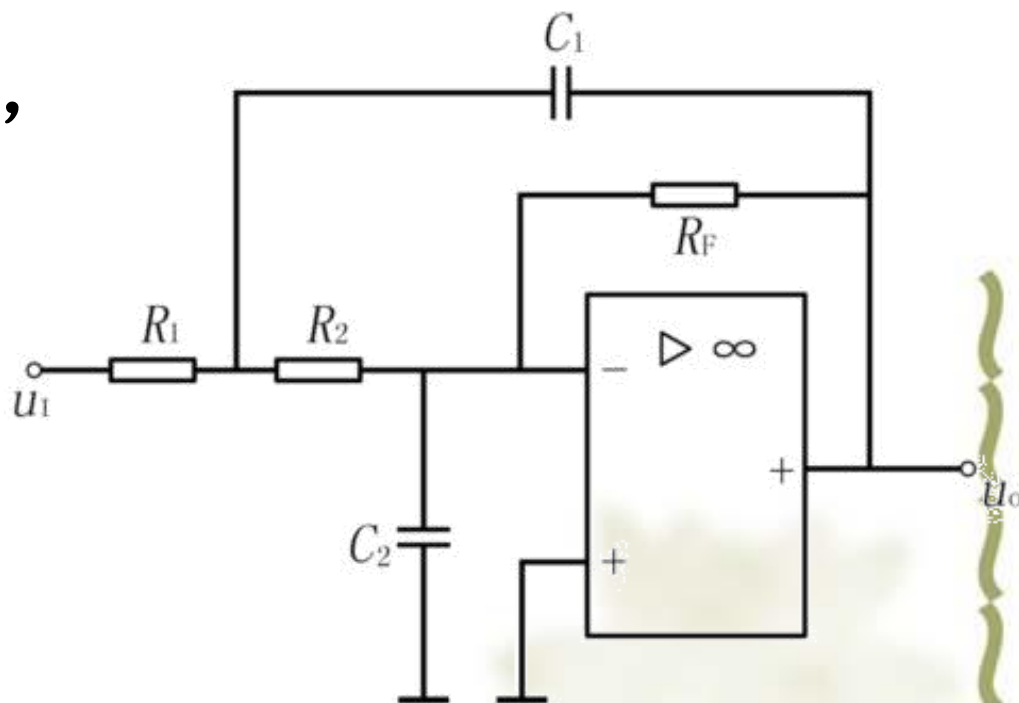
当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $|A_u| = 0$



电路使频率小于 ω_H 的信号通过, 抑制大于 ω_H 的信号, 称为有源低通滤波器。



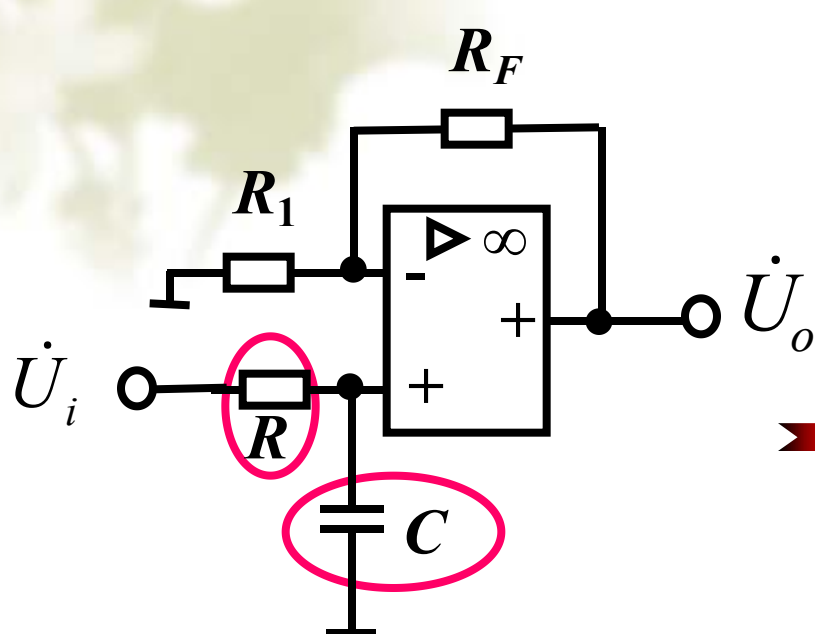
只经过一对 RC 滤波，
称为一阶滤波器；为了
改善滤波效果，使 $\omega >$
 ω_H 的信号衰减得更快些，
可由两对 RC 构成（**无限
增益多路负反馈**）二阶
有源低通滤波器。



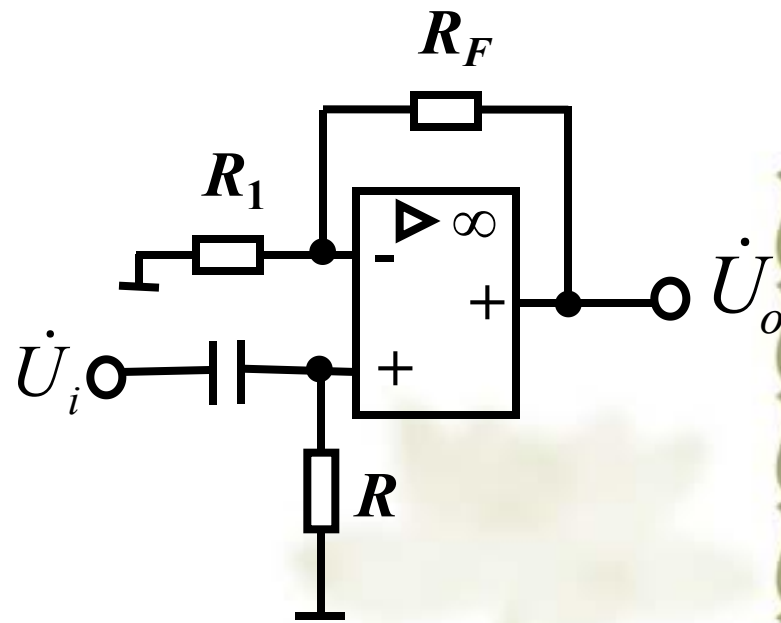
当 $\omega > \omega_H$ 时，信号受到两方面抑制：

- ① 电容 C_2 阻抗减小，高频信号被旁路；
- ② 电容 C_1 阻抗减小，高频信号负反馈增强。

如何组成高通滤波器？



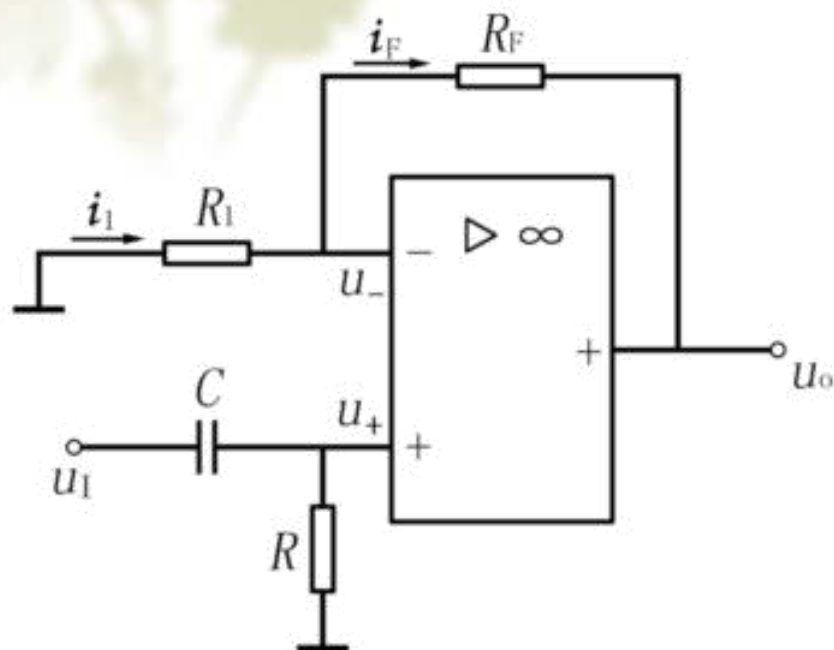
低通滤波器



高通滤波器

将低通滤波器中的 R 、 C 对调，低通滤波器就变成了高通滤波器。

2. 有源高通滤波器



式中 $\omega_L = \frac{1}{RC}$ 故
称为下截止角频率

设输入为正弦波信号，则有

$$\dot{U}_+ = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i$$

由同相比例运算放大器可得

$$\dot{U}_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \dot{U}_+$$

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 - j \frac{\omega_L}{\omega}}$$



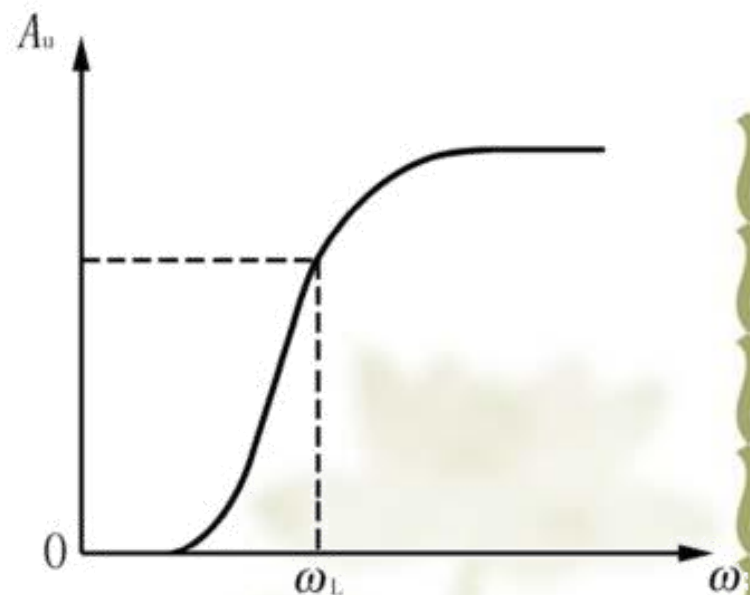
电压增益的模为

$$|A_u| = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_L}{\omega}\right)^2}} = \frac{|A_{u0}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_L}{\omega}\right)^2}}$$

当 $\omega = 0$ 时, $|A_u| = 0$

当 $\omega = \omega_L$ 时, $|A_u| = \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{u0}|$

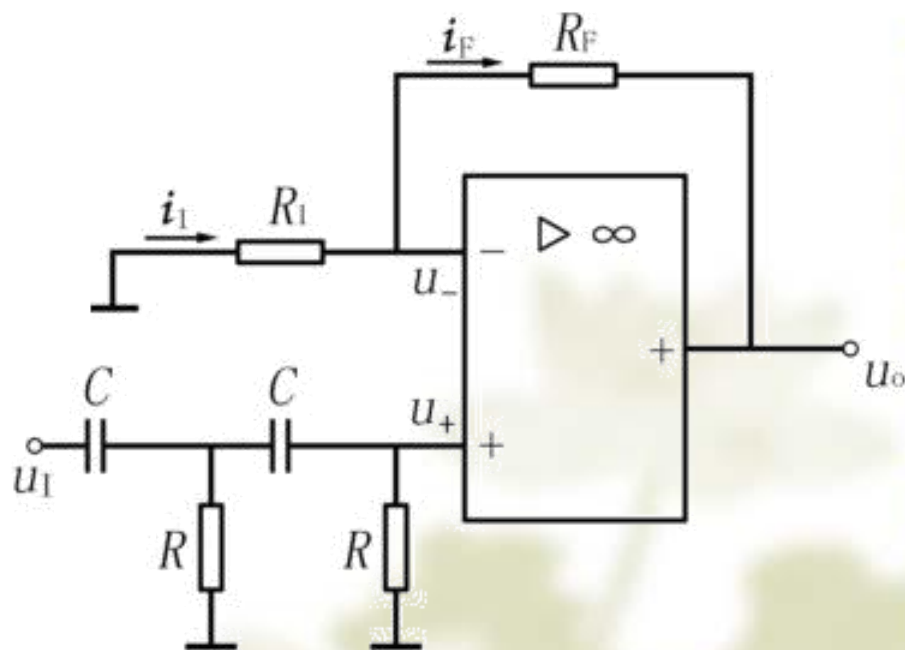
当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $|A_u| = |A_{u0}|$



电路使频率大于 ω_L 的信号通过, 抑制小于 ω_L 的信号, 称为有源高通滤波器。

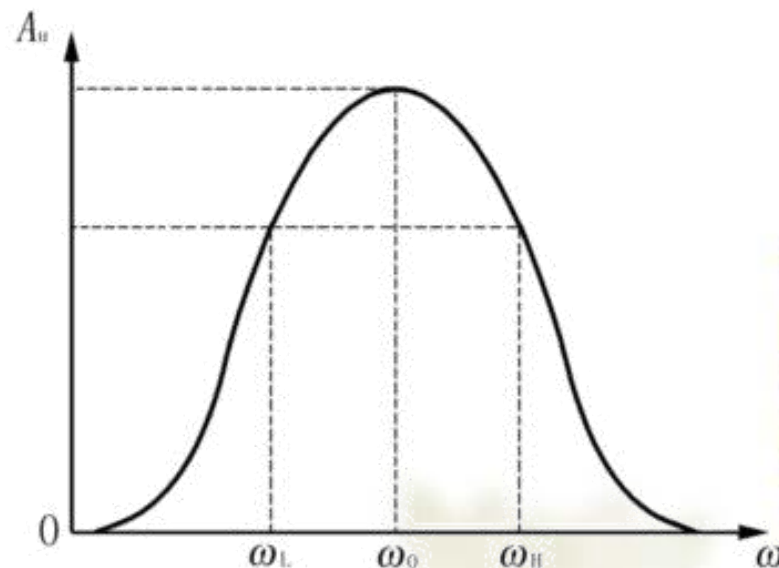
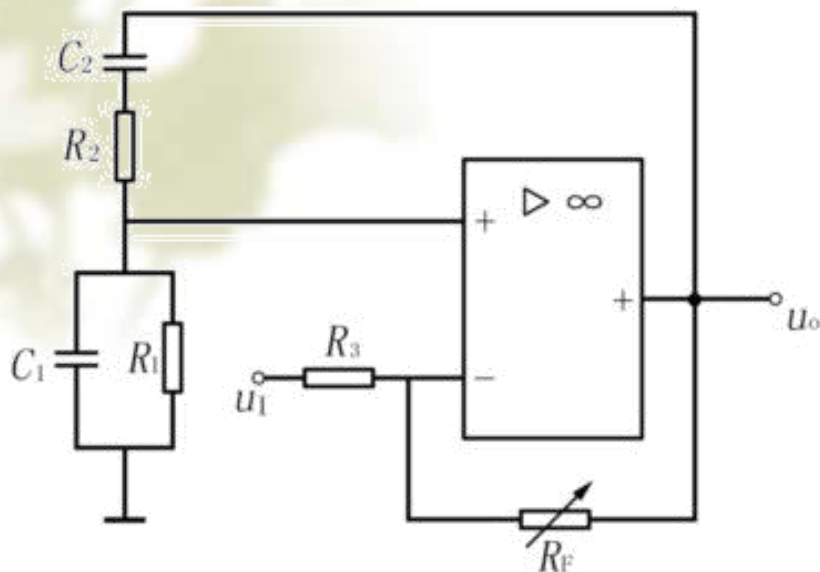


为了改善滤波效果，
使 $\omega < \omega_L$ 的信号衰减得更
快些，可由两对 RC 构成
(压控电压源) 二阶有源
高通滤波器。





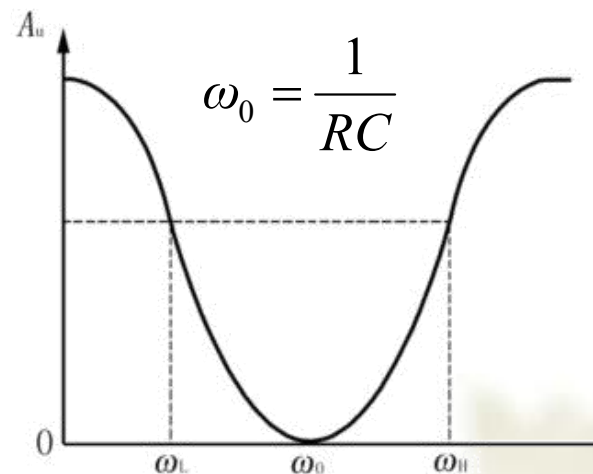
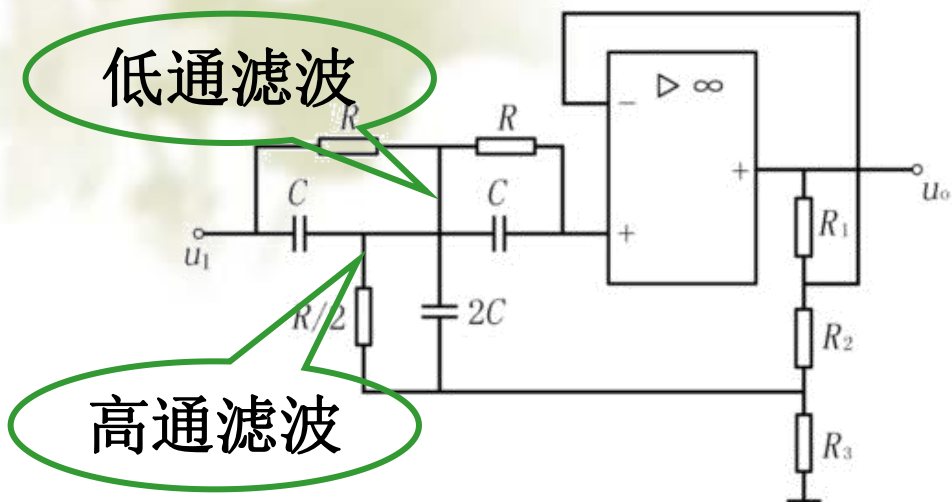
3. 有源带通滤波器



R_1C_1 和 R_2C_2 构成串并联谐振回路，连接于输出端和同相输入端之间。当输入信号角频率趋近谐振角频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$ 时，电路形成较强的正反馈，输出电压大；其他频率信号不形成正反馈，输出电压小，因而可实现带通滤波作用。



4. 有源带阻滤波器



- ① 当输入信号 $\omega > \omega_0$ ，信号经高通滤波通道传输到同相输入端；
- ② 当输入信号 $\omega < \omega_0$ ，信号经低通滤波通道传输到同相输入端；
- ③ 当输入信号 $\omega = \omega_0$ ，信号经两个滤波通道传输到同相输入端的信号相位相反，相互抵消。

习 题



4 集成运算放大器

P86: 4-2, 4-3, 4-8

