



第9章 信号的运算和处理电路



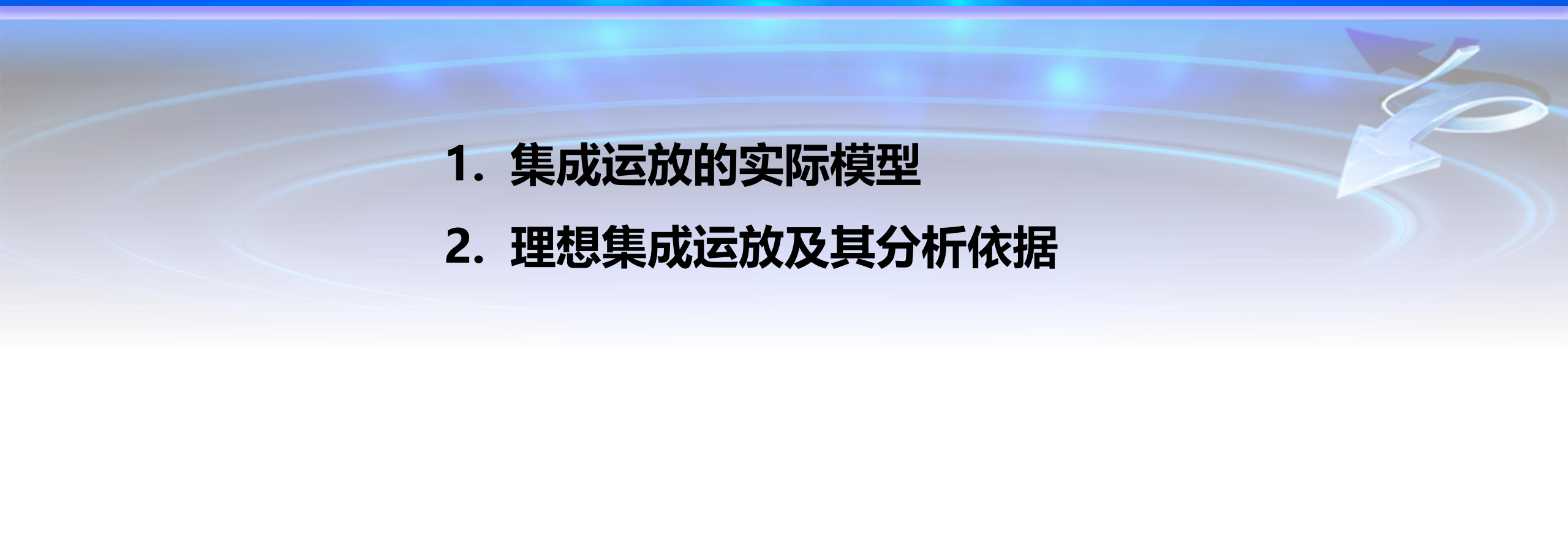


玩转集成运放，感受缤纷世界

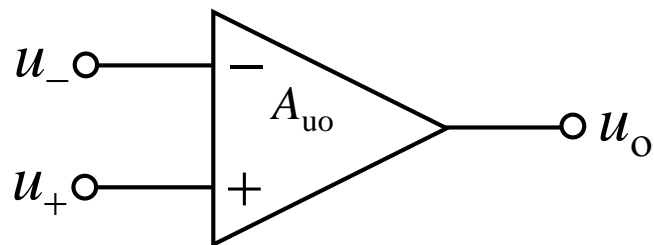
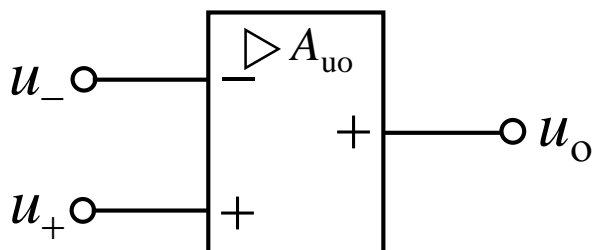
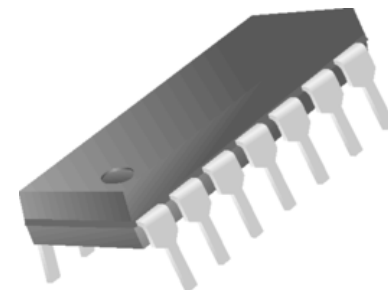
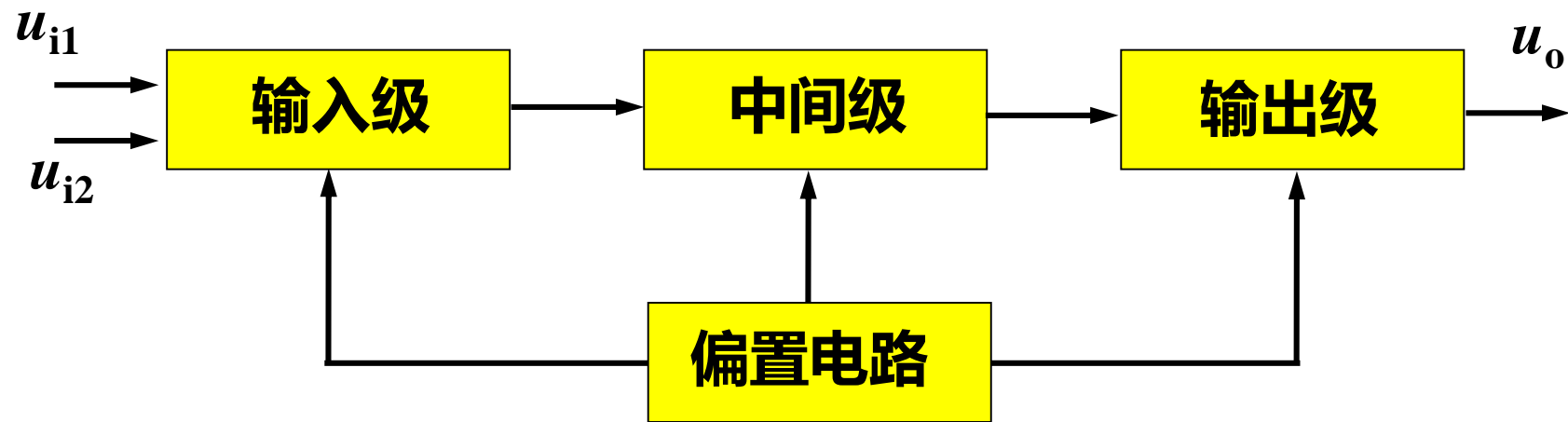


一、集成运放特性建模及分析依据



1. 集成运放的实际模型
 2. 理想集成运放及其分析依据
- 

一、集成运放特性建模及分析依据

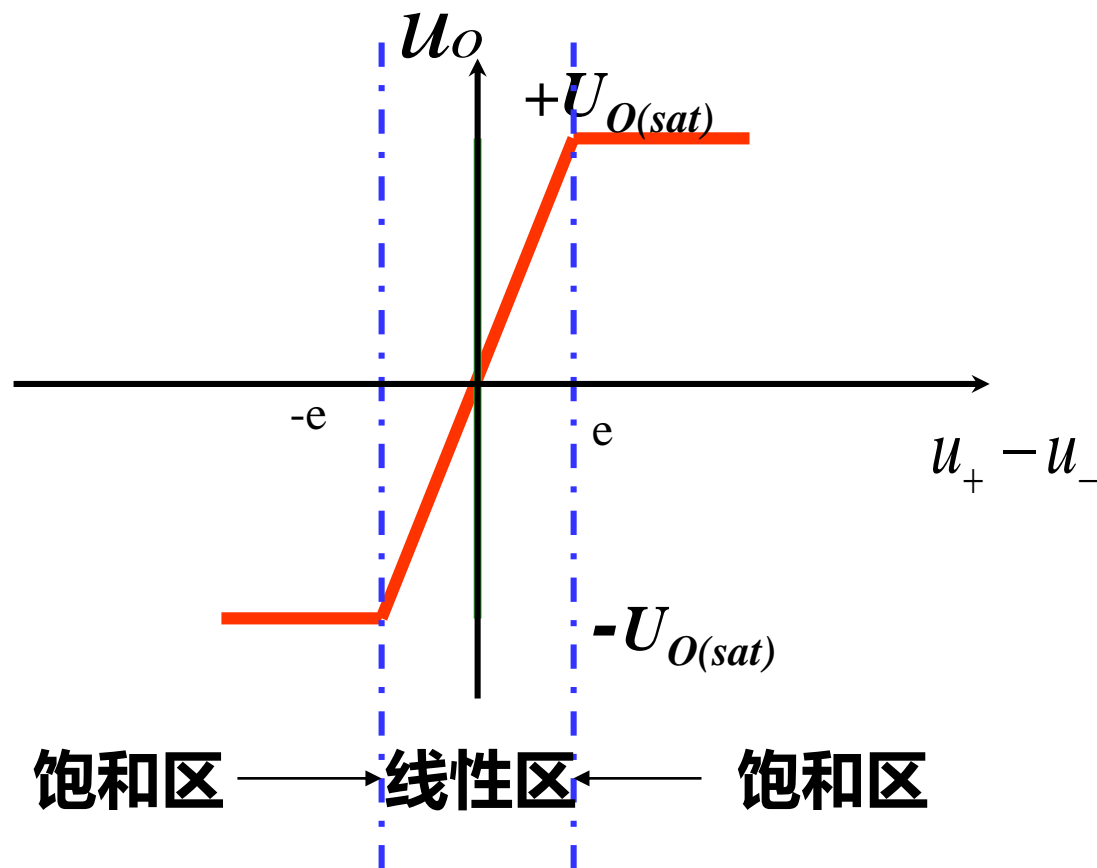


增益高、输入电阻大、输出电阻小，抑制温漂能力强

一、集成运放特性建模及分析依据



集成运放的实际传输特性（正向）



线性区:

$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$$

非线性区:

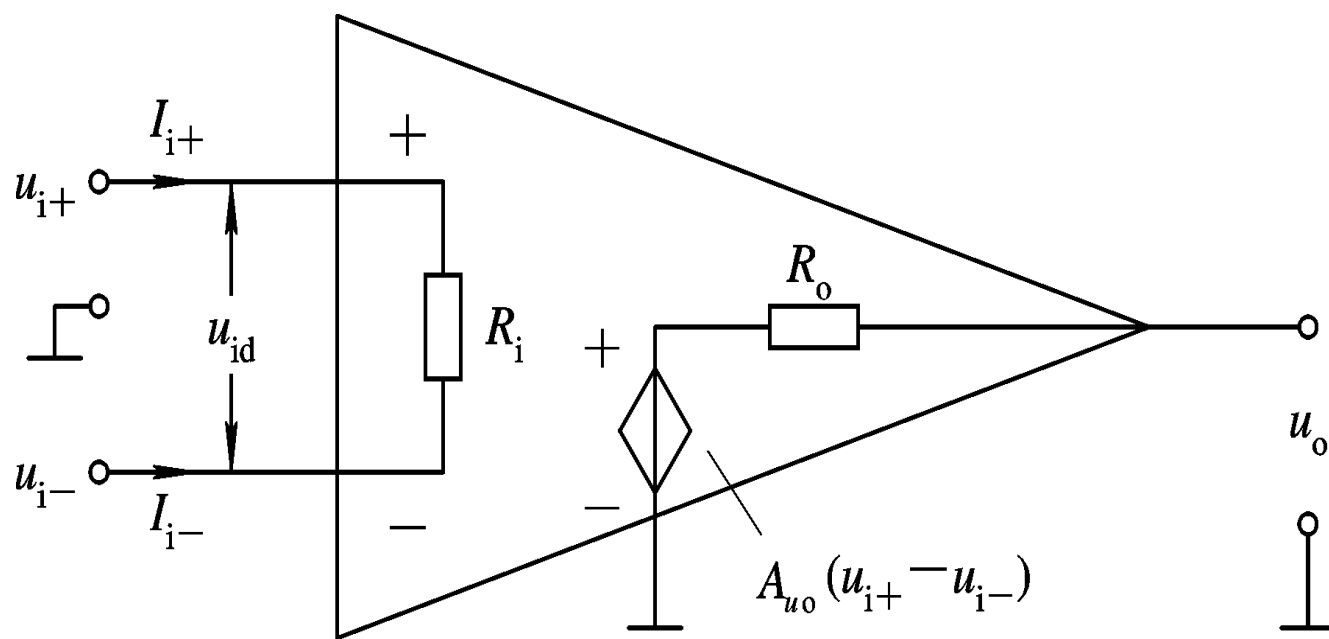
$$u_+ - u_- > e \text{ 时, } u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_+ - u_- < -e \text{ 时, } u_o = -U_{o(sat)}$$

一、集成运放特性建模及分析依据



集成运放的实际模型



$u_{id} = u_{i+} - u_{i-}$: 差模输入电压;

A_{uo} : 开环电压放大倍数;

R_i : 输入电阻;

R_o : 输出电阻。

一、集成运放特性建模及分析依据



集成运放参数理想化

- ① 开环电压增益 $A_{ud}=\infty$;
- ② 差模输入电阻 $R_{id}=\infty$;
- ③ 开环输出电阻 $R_o=0$;
- ④ 开环频带宽度 $BW=\infty$;
- ⑤ 共模抑制比 $K_{CMR}=\infty$;
- ⑥ 转换速率为无限大, 即 $SR=\infty$;
- ⑦ 输入失调电压、电流、温漂为零;
- ⑧ 内部噪声为零;

主要条件

条件较难满足,
可采用专用运放来近似满足。



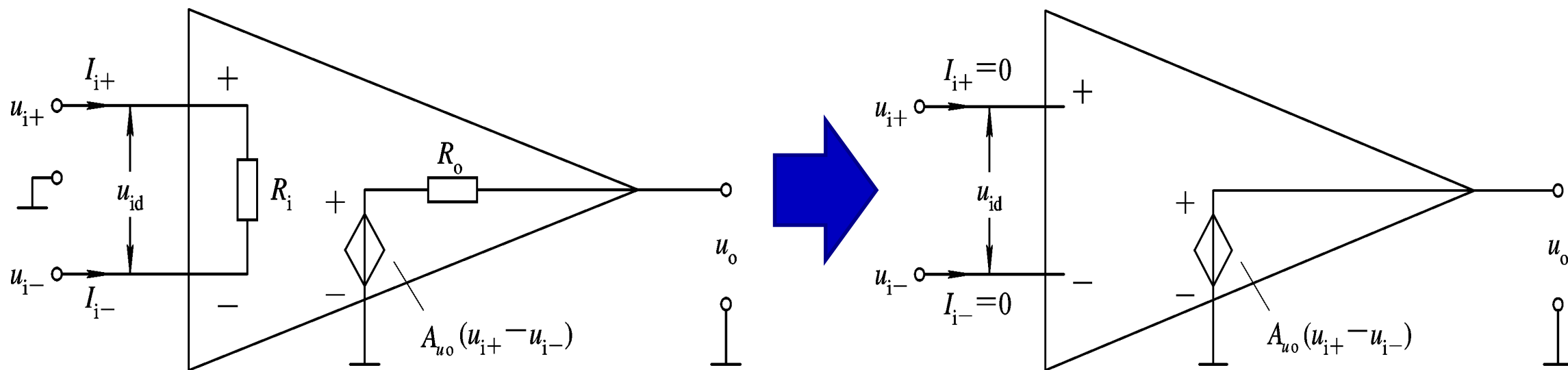
1. 理想集成运放具有以下特点()。

- ☒ A 开环差模增益 $A_{ud}=\infty$,差模输入电阻 $R_{id}=\infty$,输出电阻 $R_o=0$
- ☐ B 开环差模增益 $A_{ud}=0$,差模输入电阻 $R_{id}=\infty$,输出电阻 $R_o=\infty$
- ☐ C 开环差模增益 $A_{ud}=0$,差模输入电阻 $R_{id}=\infty$,输出电阻 $R_o=0$
- ☐ D 开环差模增益 $A_{ud}=\infty$,差模输入电阻 $R_{id}=\infty$,输出电阻 $R_o=\infty$

一、集成运放特性建模及分析依据



集成运放理想模型



- 同相端与反相端呈开路状态。
- 输出电阻 $R_o=0$ ，所以 $u_o=A_{uo}(u_+-u_-)$ ，与负载无关。

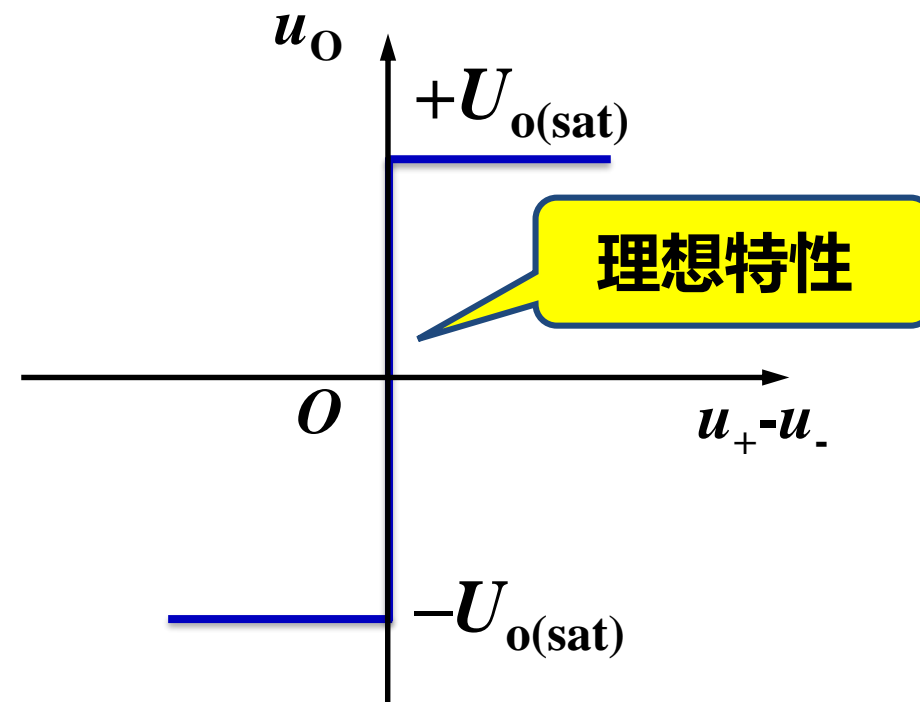
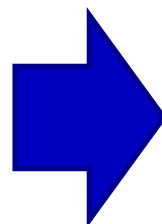
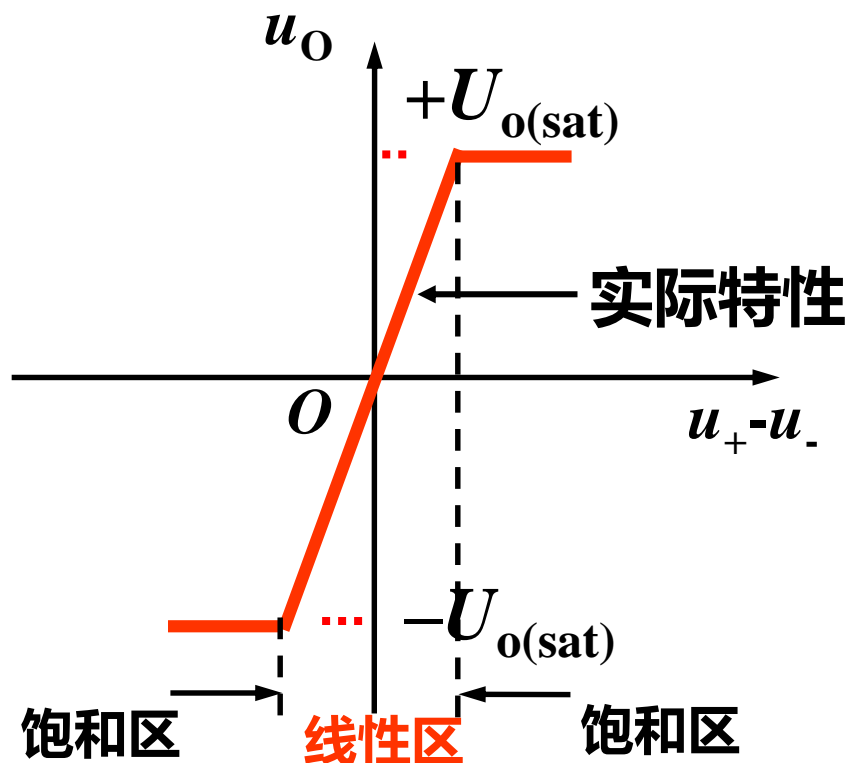
集成运放理想模型

- 由于实际集成运放的性能参数与理想运放十分接近，所以在分析计算时用理想运放代替实际运放所引起的误差并不大，在工程计算中是允许的，并且可以使问题的分析和计算大为简化。
- 只有在分析误差时，才考虑运放的具体参数。

一、集成运放特性建模及分析依据



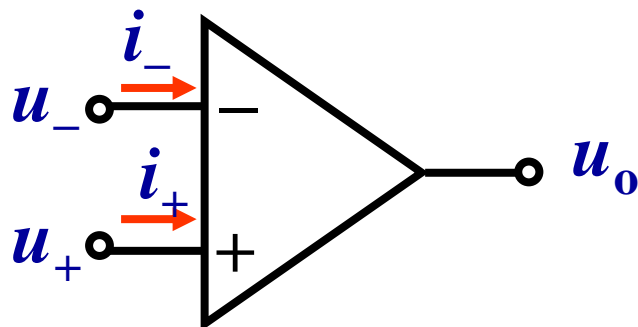
理想运放传输特性



一、集成运放特性建模及分析依据



理想运放线性区特点



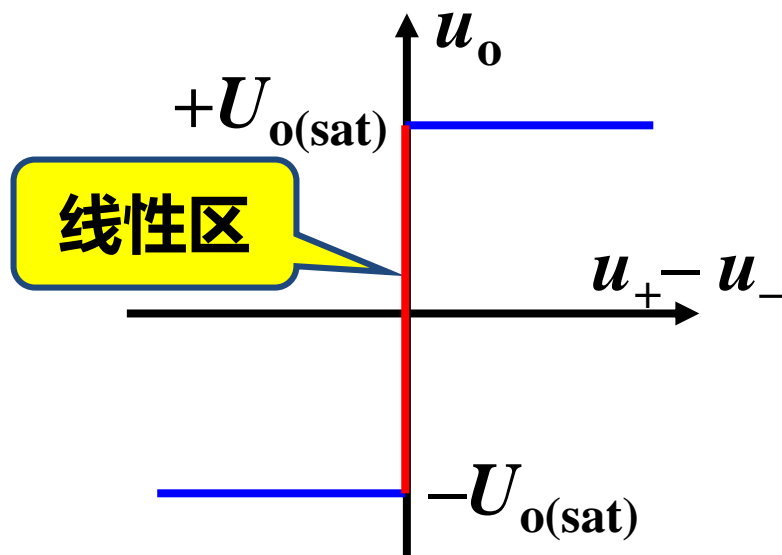
$$u_o = A_{uo} (u_+ - u_-)$$

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

$$u_+ - u_- = u_o / A_{uo} \approx 0$$

$$u_+ = u_-$$

虚短



$$i_+ = i_- = u_i / R_i$$

$$R_{id} = R_{ic} = \infty$$

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

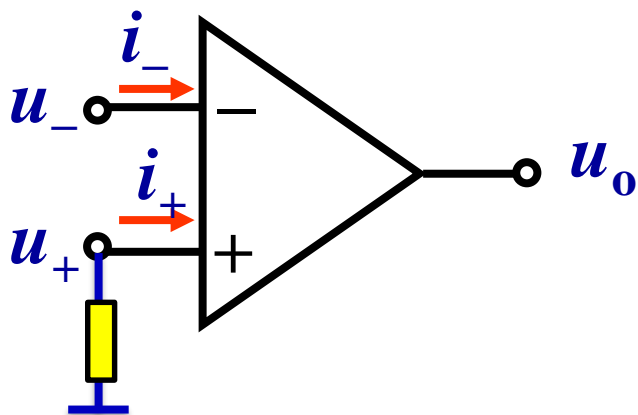
$$i_+ = i_- \approx 0$$

虚断

一、集成运放特性建模及分析依据



理想运放线性区特点



由虚断可知: $u_+ = 0$

由虚短有: $u_+ = u_-$

故: $u_- = 0$

虚地

“虚地”是反相输入式放大电路的重要特点。

- “虚短”和“虚断”是集成运放线性应用的两个重要的分析依据
- “虚短”和“虚断”并不意味着集成运放没有输入

一、集成运放特性建模及分析依据



理想运放线性应用电路特点

□ 线性区窄

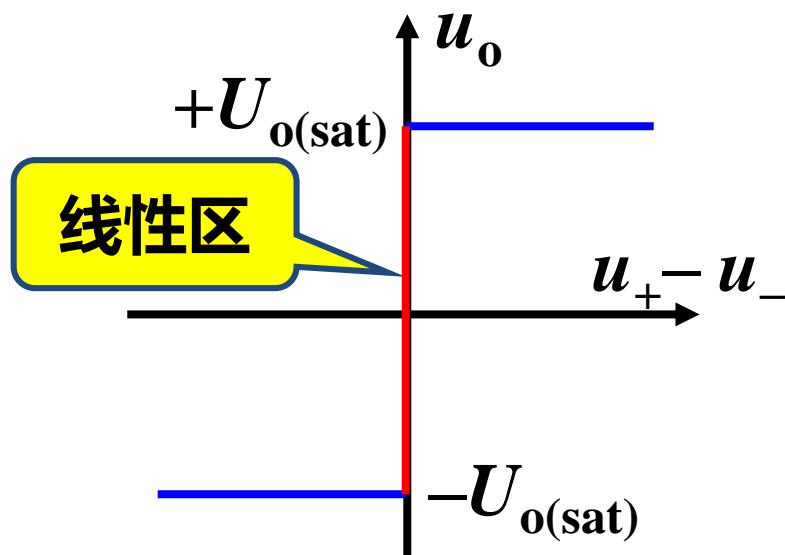
例如：F007 的 $U_{oM} = \pm 14 \text{ V}$, $A_{od} \approx 2 \times 10^5$, 线性区内输入电压范围:

$$u_+ - u_- = \frac{U_{oM}}{A_{od}} = \frac{\pm 14 \text{ V}}{2 \times 10^5} = \pm 70 \mu\text{V}$$

□ 开环增益不稳定

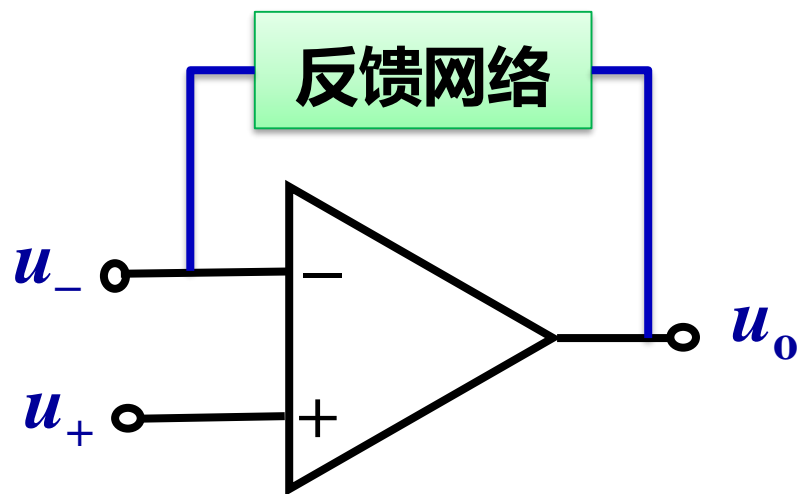
□ 频带窄

引入负反馈



一、集成运放特性建模及分析依据

理想运放线性应用电路特点



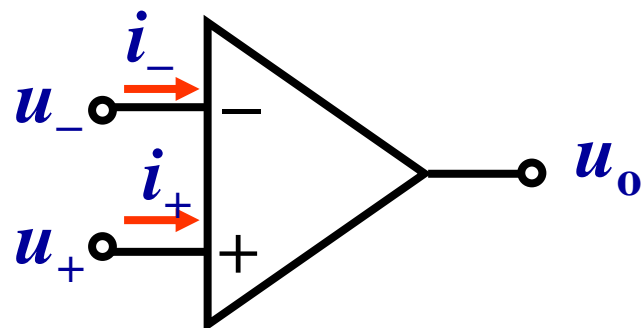
将反馈信号引向反相输入端，使反馈信号抵消部分输入信号，保证在输入信号较大时， u_{id} 仍然很小，在传输特性的线性范围内，从而使集成运算放大器工作在线性区。同时，扩展带宽，改变输入、输出电阻。

负反馈是判断是否为线性应用的主要电路标志

一、集成运放特性建模及分析依据



理想运放非线性区（饱和区）特点

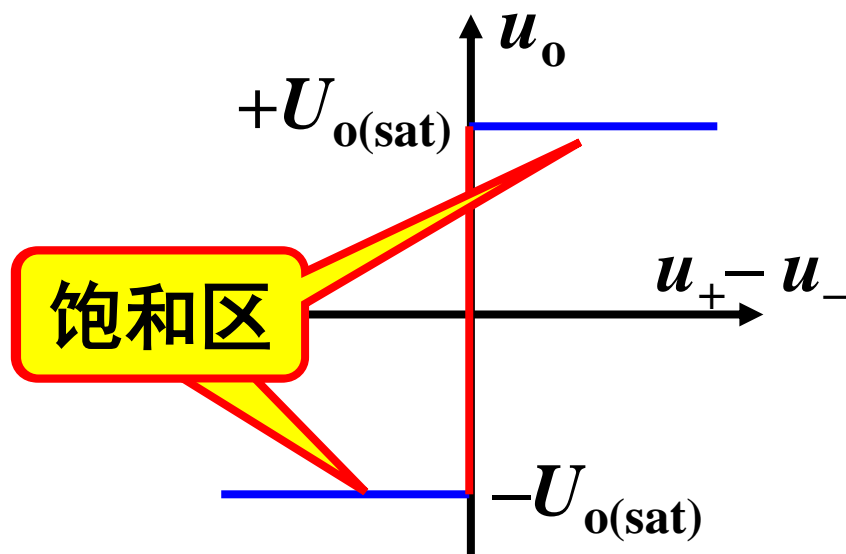


当 $u_+ > u_-$ 时, $u_o = +U_{o(sat)}$
当 $u_+ < u_-$ 时, $u_o = -U_{o(sat)}$

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

无虚短

有虚断

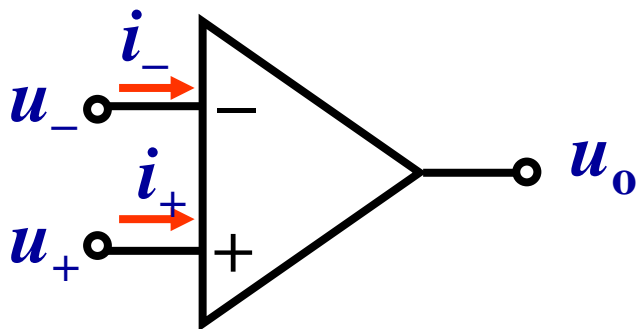


非线性应用中的集成运放通常工作在开环状态或引入正反馈。

一、集成运放特性建模及分析依据

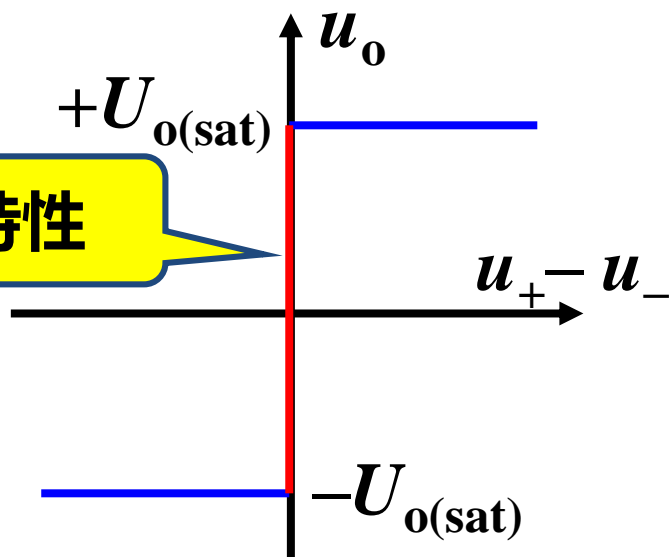


结论

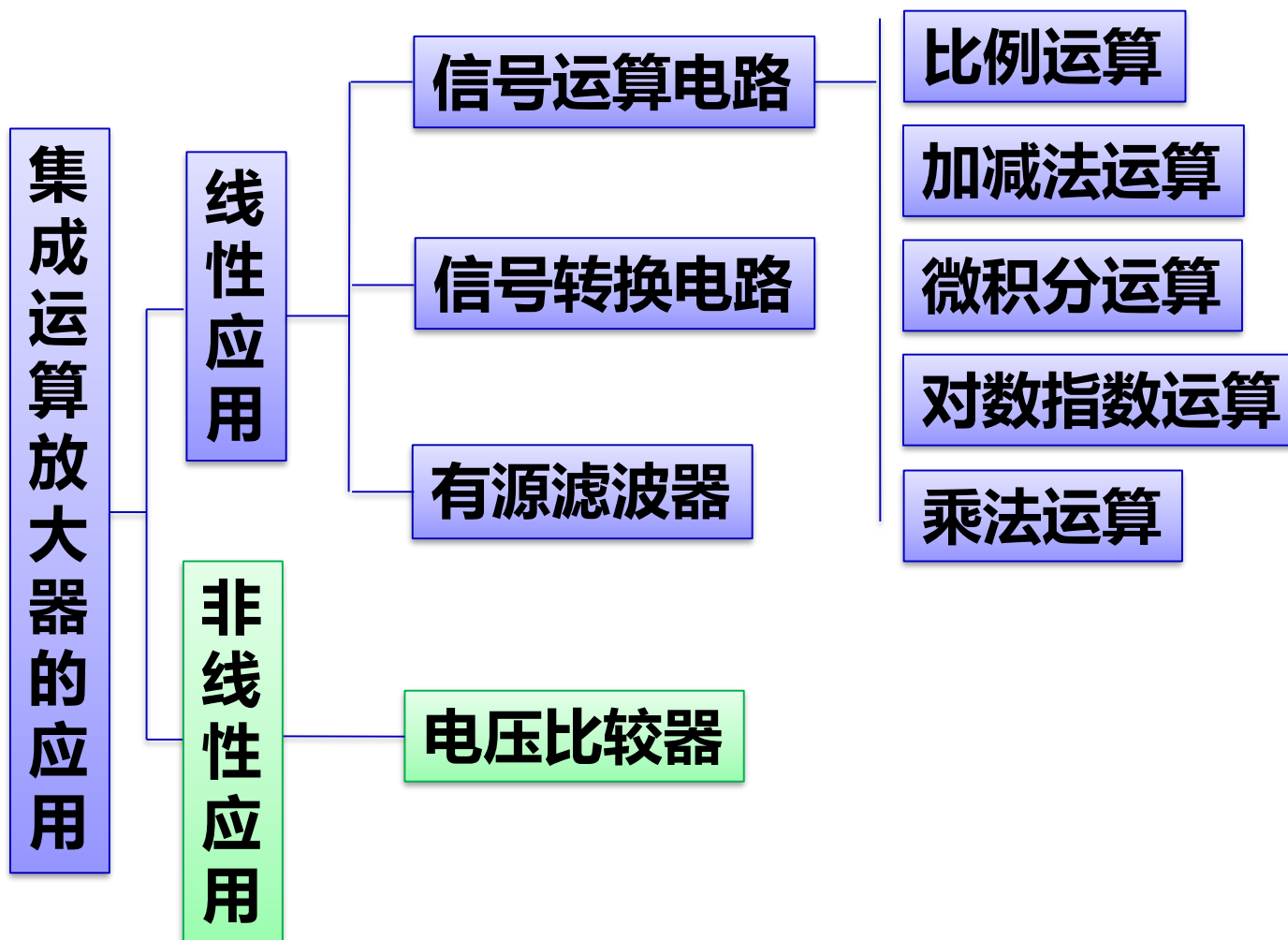
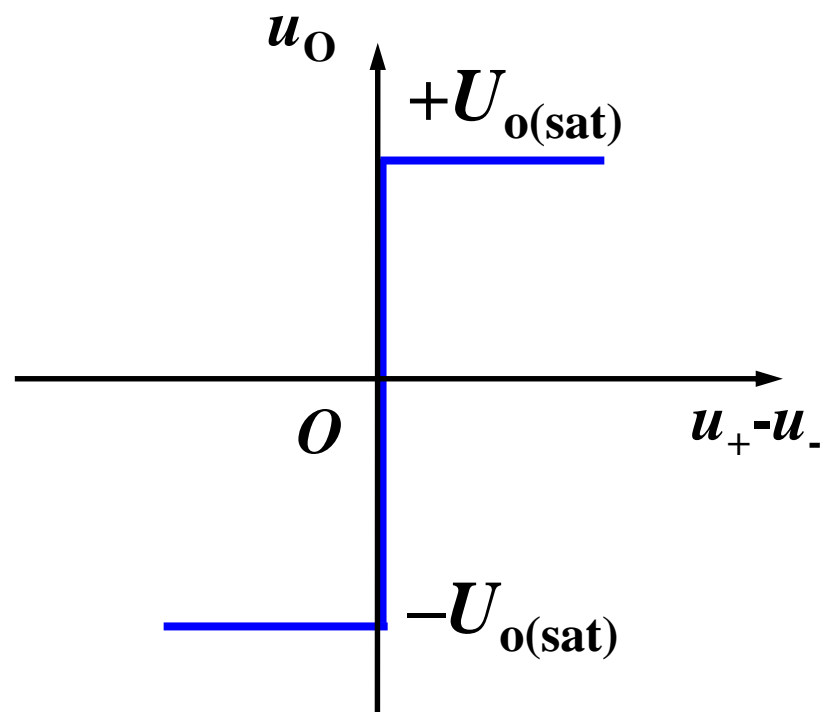


- 在分析各种应用电路时，必须首先**判断运放的工作区域**
- 线性应用：**有虚断、有虚短**
- 非线性应用：**有虚断、无虚短**
- 输出电压与负载无关。分析多个运放构成的多级电路时可以分别对每个运放进行分析。
- 分析目标：**传输特性**（输入与输出信号关系特性）

理想特性



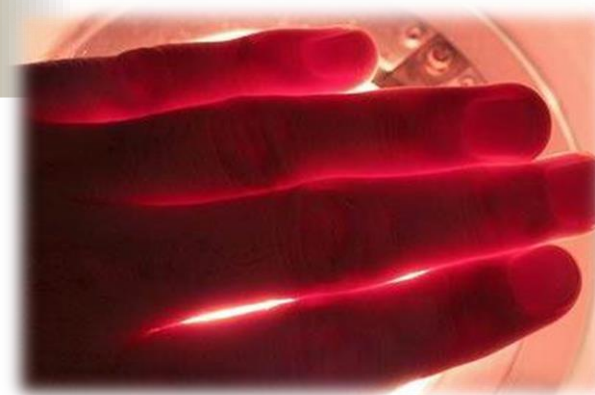
集成运放的应用

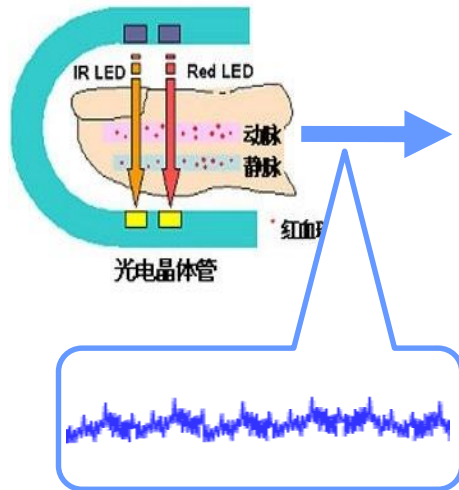


案例



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY





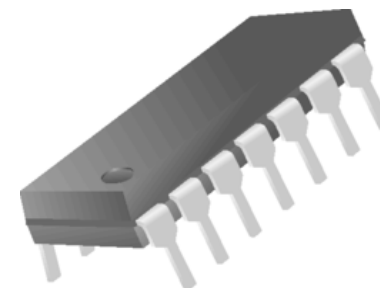
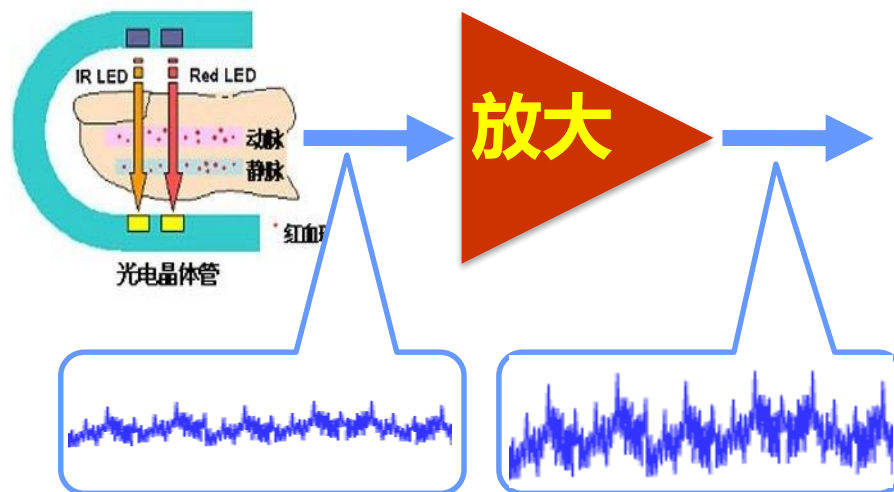
集成运放应用



案例



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

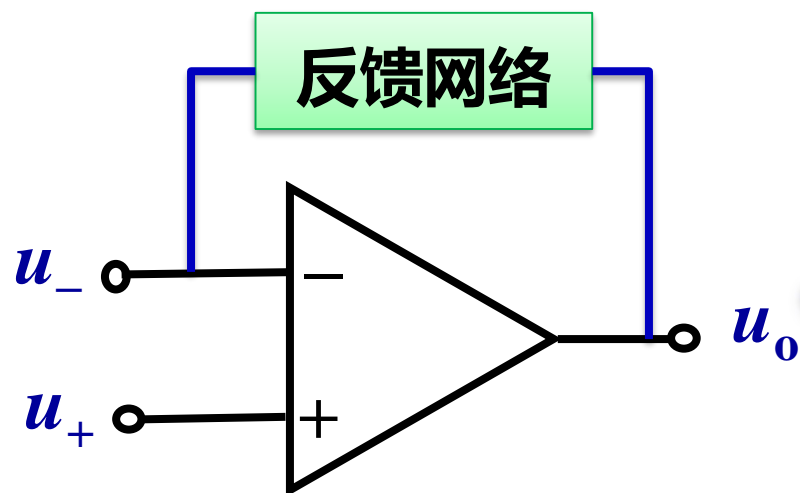


集成运算放大器

二、信号运算电路

1. 比例运算
2. 加减运算
3. 微积分运算
4. 其他信号运算

二、运算电路——比例运算



引入深度负反馈

$$A_f \approx \frac{1}{F}$$

输出电压和输入电压的关系基本决定于反馈网络的结构与参数，而与运算放大器本身的参数关系不大。

改变输入电路和反馈电路的结构形式，就可以实现不同的线性应用。

二、运算电路——比例运算



集成运算放大器的线性应用

比例运算电路

加减法运算电路

微积分运算电路

对数指数运算电路

乘法运算电路

电压-电流转换电路

电流-电压转换电路

有源滤波器

精密整流电路

◆ 分析目的: $u_O = f(u_I)$

◆ 分析方法: “虚短” 和 “虚断”
是基本出发点。

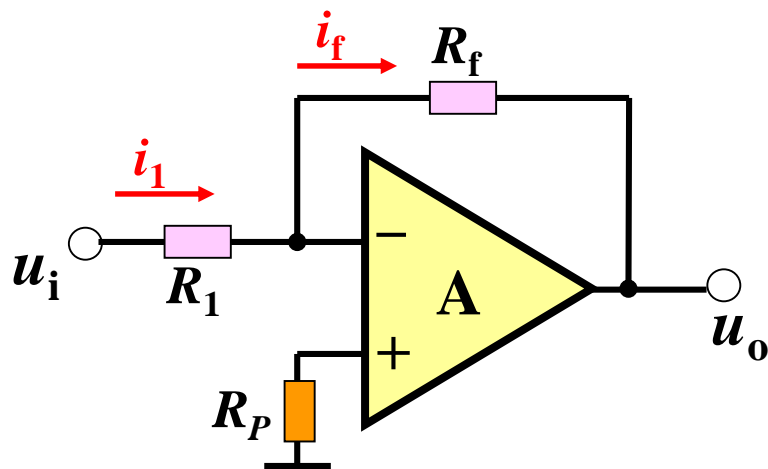
◆ 理想运放模型, 分析误差时考虑运放的具体参数。

二、运算电路——比例运算



该电路引入的反馈为 ()

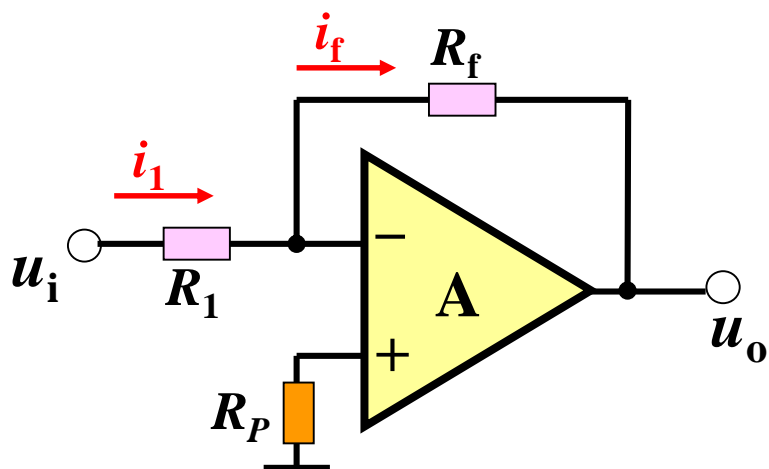
- A 电压串联负反馈
- ☒ B 电压并联负反馈
- C 电流串联负反馈
- D 电流并联负反馈
- E 正反馈



二、运算电路——比例运算



反相比例运算电路



平衡电阻 R_p

$$R_p = R_1 // R_f$$

引入电压并联负反馈

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

“虚地”

$$i_1 = i_f$$

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$$

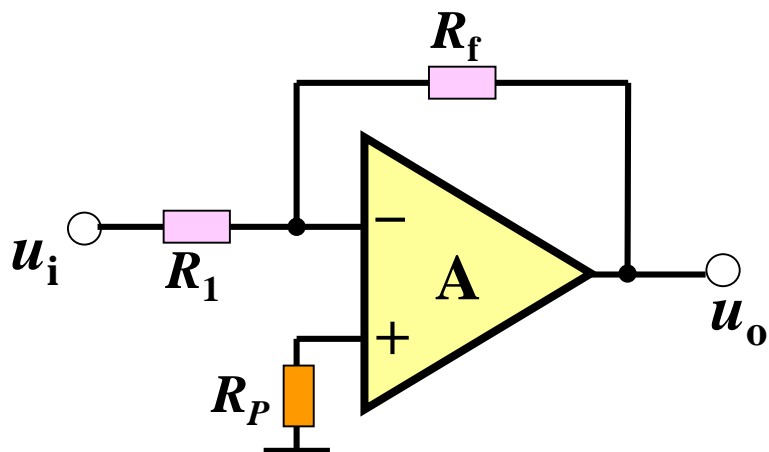
$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

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

电路的输入和输出电阻

$$R_{if} = R_1 \quad R_{of} \rightarrow 0$$

反相比例运算电路



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

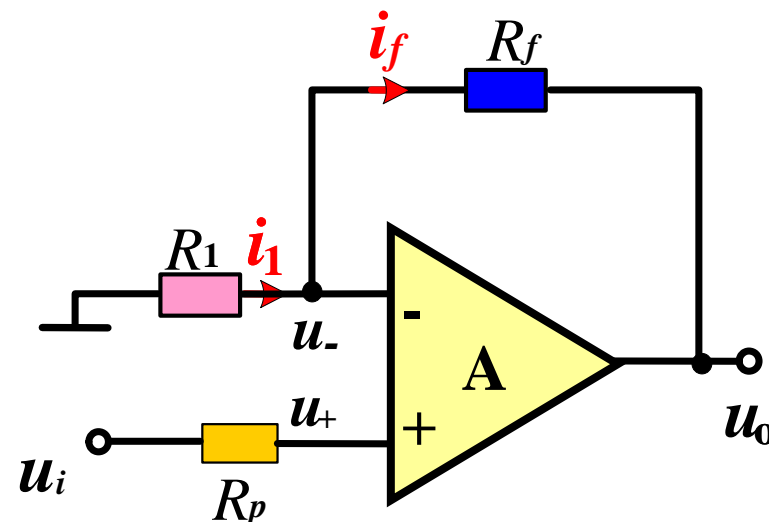
- u_o 与 u_i 极性相反
- A_{uf} 只与 R_1 、 R_f 有关，与运放本身参数无关
- $|A_{uf}|$ 可大于 1，也可等于 1 或小于 1
- 输入电阻较小，对信号源的负载能力有一定的要求。
- 输出电阻小，带负载能力强。
- 存在“虚地”， $u_{IC} = 0$ ，对放大器 K_{CMR} 的要求低

二、运算电路——比例运算



该电路引入的反馈为 ()

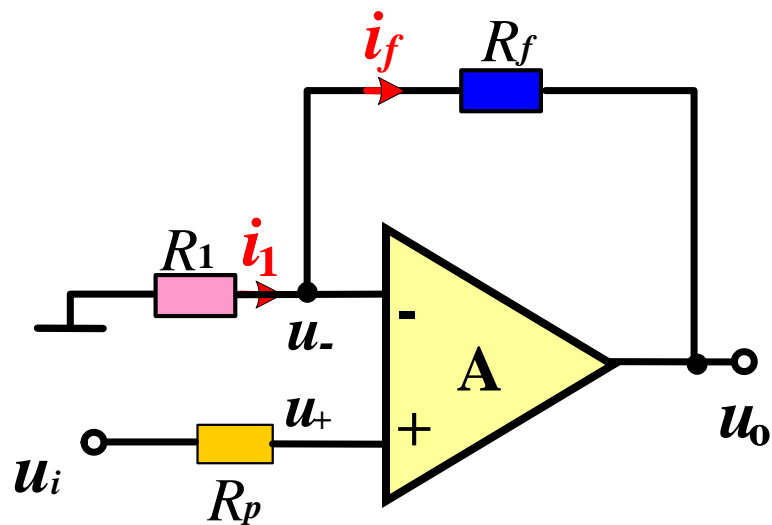
- ☒ A 电压串联负反馈
- ☐ B 电压并联负反馈
- ☐ C 电流串联负反馈
- ☐ D 电流并联负反馈
- ☐ E 正反馈



二、运算电路——比例运算



同相比例运算电路



① 电路引入了电压串联负反馈

② 电压放大倍数是多少？

虚短: $u_- = u_+ = u_i$
虚断: $i_1 = i_f$

$\Rightarrow \frac{0 - u_i}{R_1} = \frac{u_i - u_o}{R_f}$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

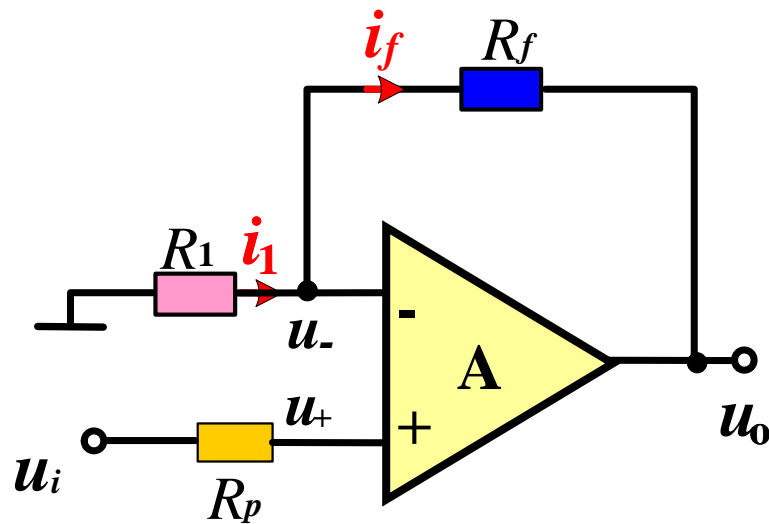
R_P 为多少?

A $R_1 + R_f$

B R_1

C R_f

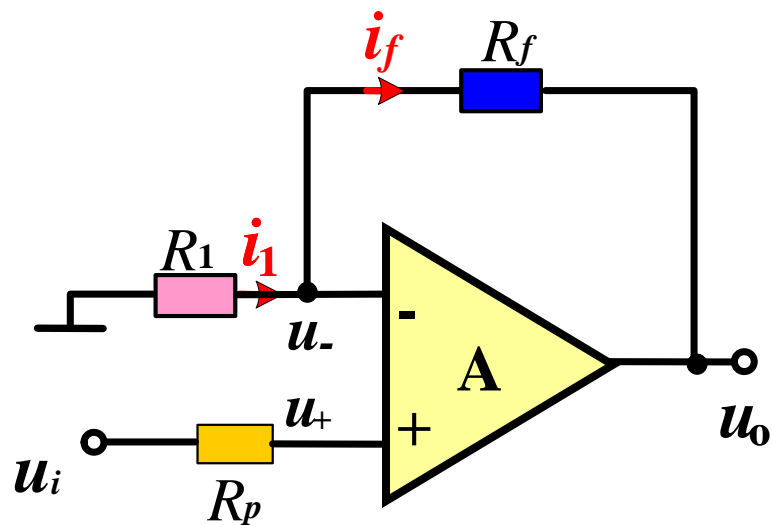
Ⓓ $R_1 // R_f$



二、运算电路——比例运算



同相比例运算电路



③ R_p 为 $R_p = R_1 // R_f$

④ 放大器共模抑制比 $K_{CMR} \neq \infty$ 时会影响运算精度吗？为什么？

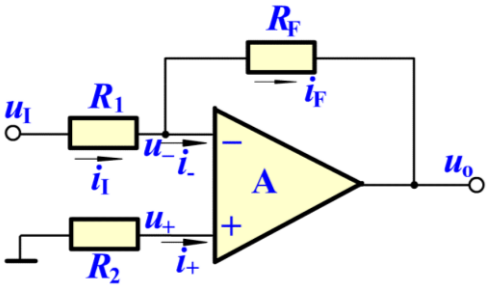
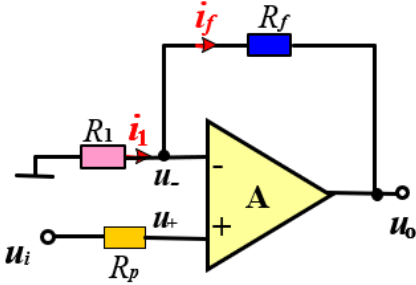
共模输入为 u_i ，若 K_{CMR} 不理想，则输出信号中将存在共模输出，影响精度。

⑤ 电路的输入和输出电阻是多少？

$$R_i = \infty, \quad R_o = 0$$

二、运算电路——比例运算



	反相输入比例	同相输入比例
电路组成	 $R_2 = R_1 // R_F$	 $R_p = R_1 // R_F$
电压放大倍数	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_F}{R_I}$ <p>u_O 与 u_I 反相, A_{uf} 可大于、小于或等于 1</p>	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_F}{R_I}$ <p>u_O 与 u_I 同相, 放大倍数可大于或等于 1</p>
R_{if}	$R_{if} = R_1$ 不高	$R_{if} = (1 + A_{od}) R_{id}$ 高
R_o	低	低
性能特点	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 电压并联负反馈; ❑ 有“虚地”, 共模输入为零 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 电压串联负反馈; ❑ 无“虚地”, 共模输入大

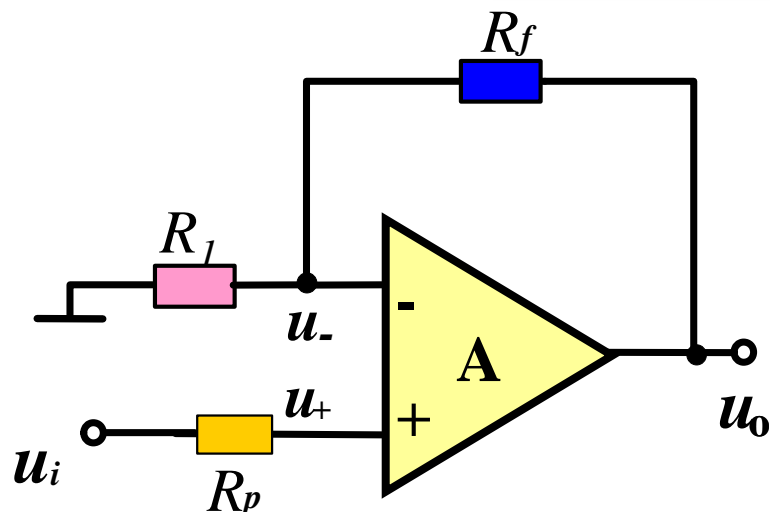
二、运算电路——比例运算



$$R_i = \infty$$

$$R_o = 0$$

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



电压跟随器

$$u_o = u_- = u_i$$

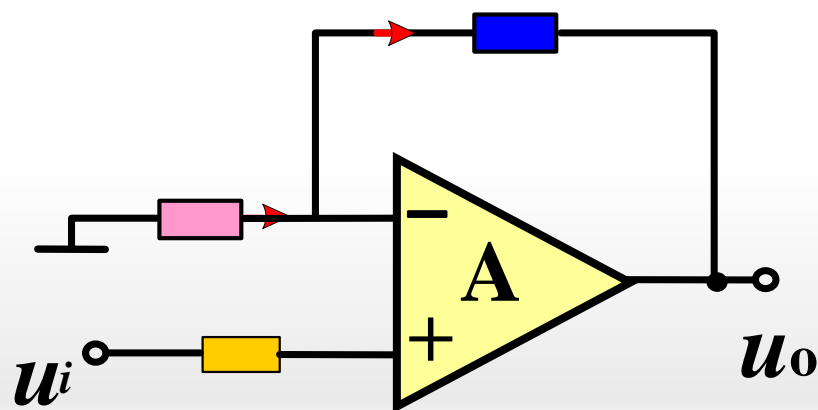
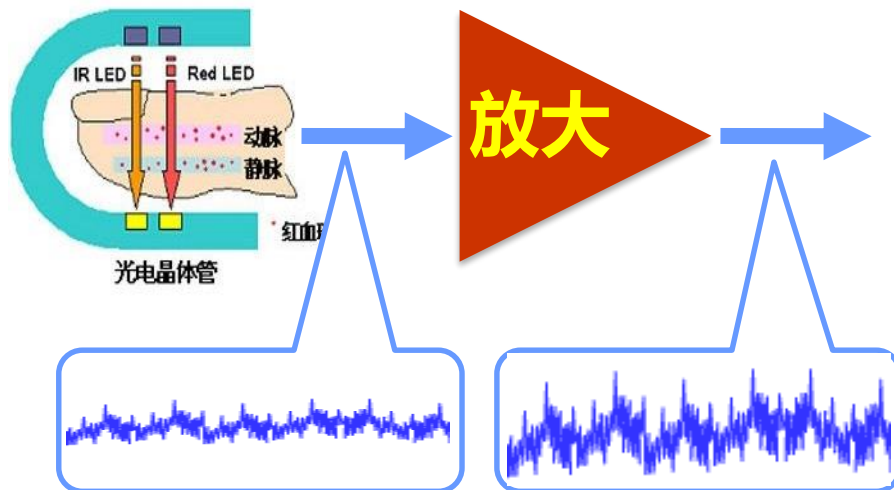
$$A_{uf} = 1$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$R_o \rightarrow 0$$

由运放构成的电压跟随器**输入电阻高、输出电阻低**，其跟随性能比射极跟随器更好。

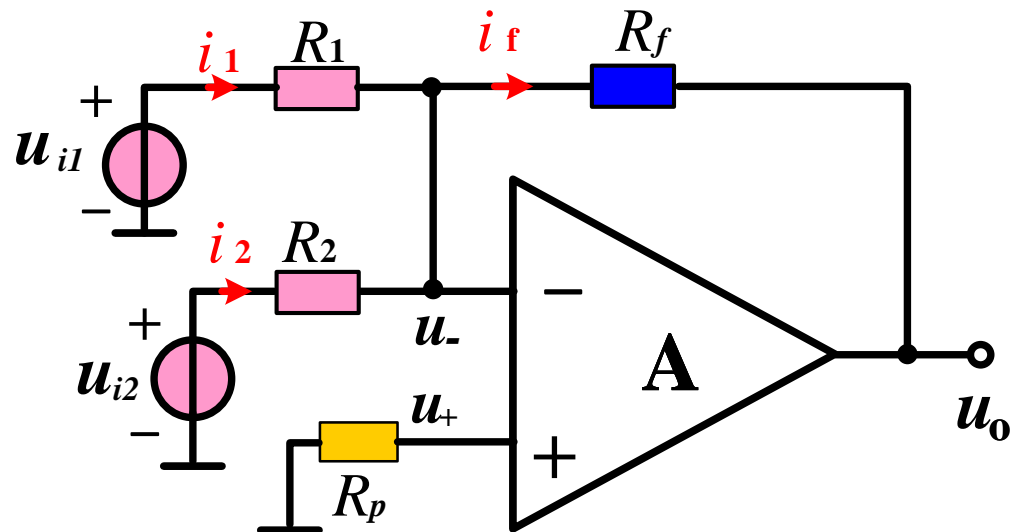
二、运算电路——比例运算



二、运算电路——加减运算



加法运算电路——反相加法



思路一：节点电流法

思路二：叠加法

$$\begin{aligned} \text{令 } u_{i2}=0 \quad \text{则 } u_{o1} &= -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} \\ \text{令 } u_{i1}=0 \quad \text{则 } u_{o2} &= -\frac{R_f}{R_2} u_{i2} \end{aligned}$$

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

$$\text{当 } R_1 = R_2 = R \text{ 时, } u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2})$$

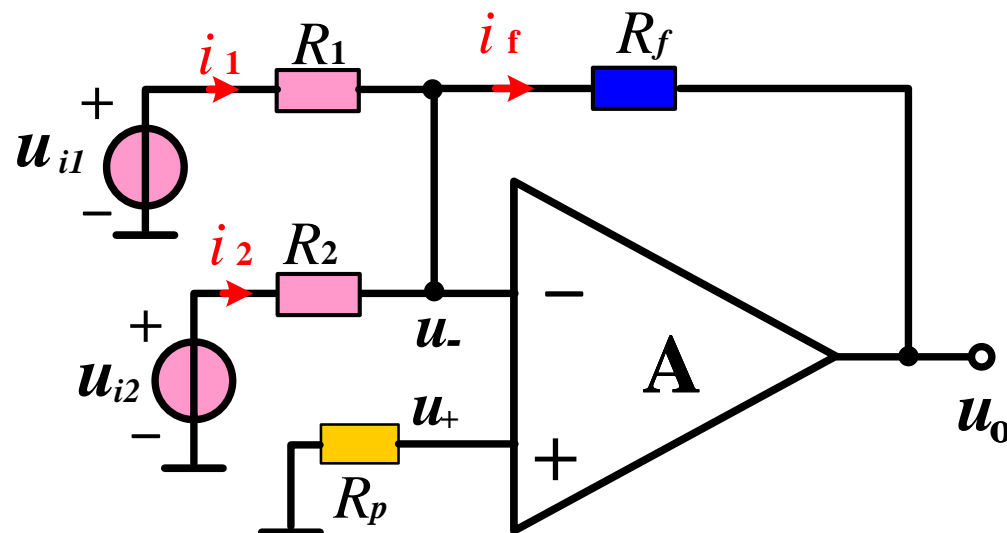
R_p为多少?

A $R_p = R_1 // R_2$

B $R_p = R_1 + R_2 + R_F$

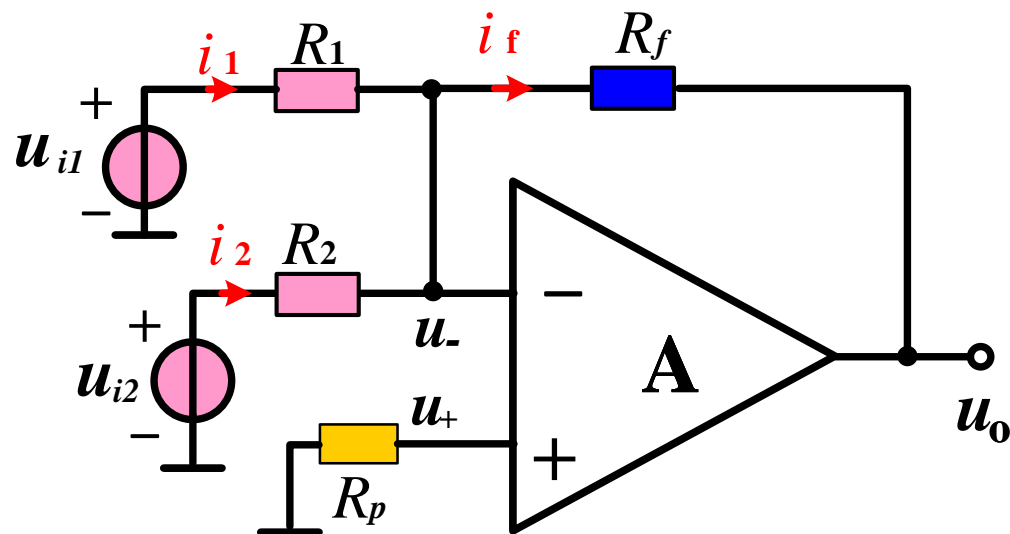
(C) $R_p = R_1 // R_2 // R_F$

D $R_p = R_1 + R_2$



二、运算电路——加减运算

加法运算电路——反相加法



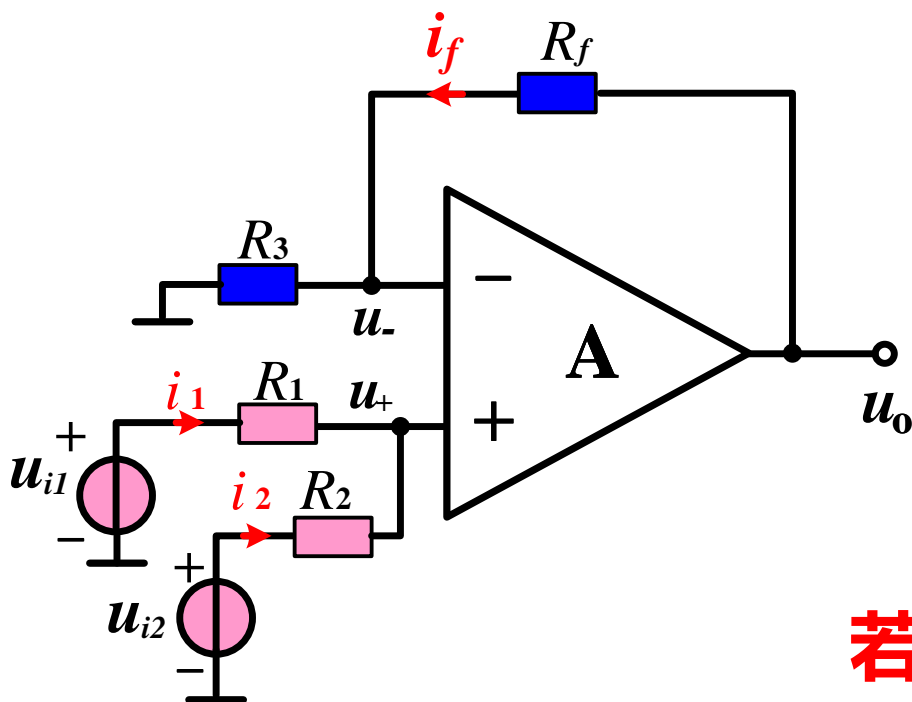
$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2}\right)$$

- 从不同信号源看进去的输入电阻不同；
- 存在“虚地”，运算精度受器件性能影响较小；
- 改变某一电路的输入电阻，可调节电路的比例关系，而不影响其它路的比例关系，调节方便；
- 可方便的扩展到多个输入电压的相加。

二、运算电路——加减运算



加法运算电路——同相加法



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

则 $u_o = (1 + \frac{R_f}{R_3}) u_+$

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

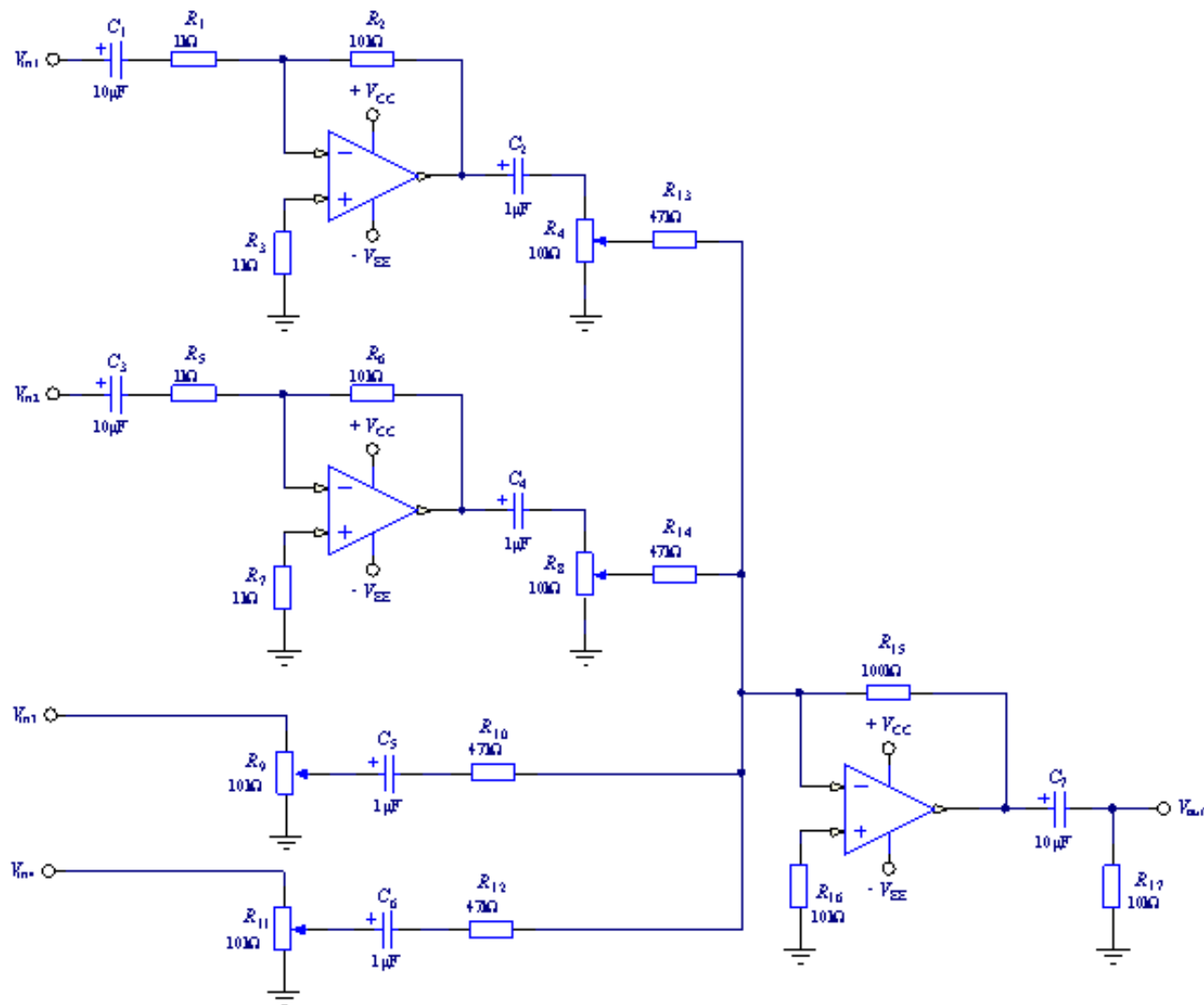
若满足: $R_1 // R_2 = R_3 // R_f$ $u_o = R_f (\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2})$

它的调节不如反相求和电路灵活，而且它的共模输入信号大，因此它的应用不很广泛。

二、运算电路——加减运算



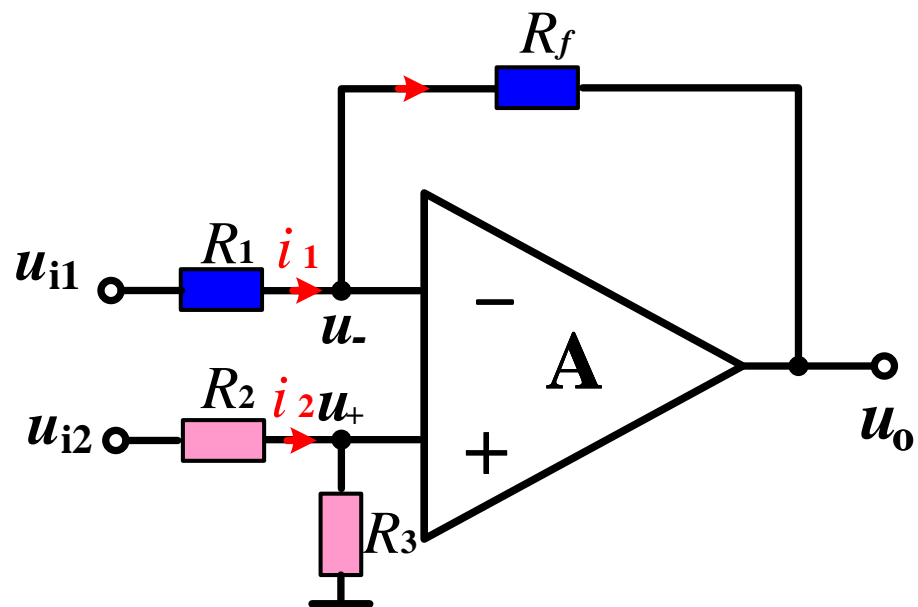
运放混音器



二、运算电路——加减运算



减法运算电路（差分放大器）



$$R_3 // R_2 = R_f // R_1$$

$$u_{i2}=0 \Rightarrow \text{反相比例} \Rightarrow u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

$$u_{i1}=0 \Rightarrow \text{同相比例} \Rightarrow u_{o2} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot u_{i2}$$

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

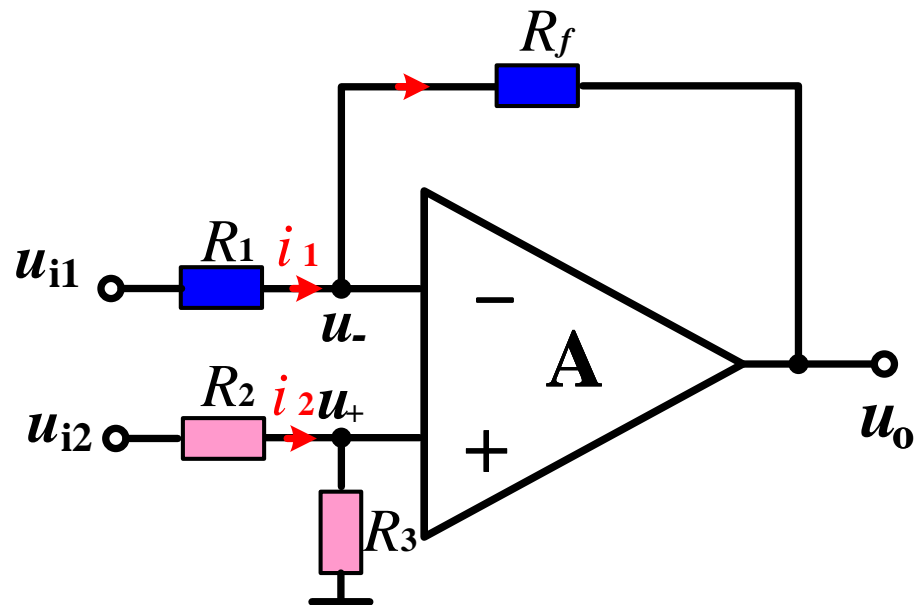
$$\text{当 } \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_f}{R_1} \quad R_1 = R_2 ; R_f = R_3$$

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

二、运算电路——加减运算



减法运算电路（差分放大器）



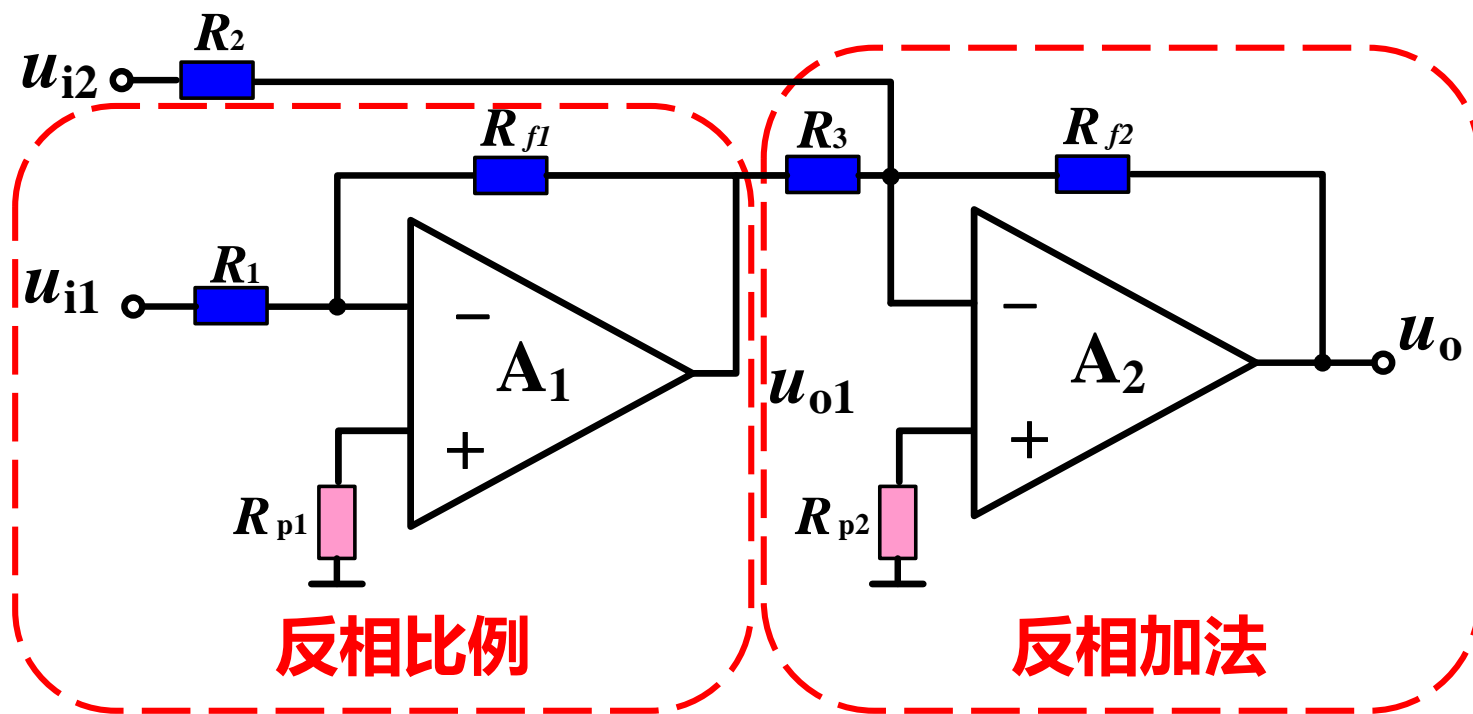
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})$$

- 元件少，成本低；
- 电路存在共模输入，集成运放的 K_{CMR} 对运算精度有影响；
- 阻值的计算和调整不方便；
- 每个信号源的输入电阻都较小；

二、运算电路——加减运算



双运放减法运算电路



$$u_{o1} = -\frac{R_{f1}}{R_1} u_{i1}$$

$$\begin{aligned} u_o &= -\left(\frac{R_{f2}}{R_3} u_{o1} + \frac{R_{f2}}{R_2} u_{i2}\right) \\ &= R_{f2} \left(\frac{R_{f1}}{R_1 R_3} u_{i1} - \frac{1}{R_2} u_{i2}\right) \end{aligned}$$

若 $R_1 = R_{f1}, R_2 = R_3 = R$

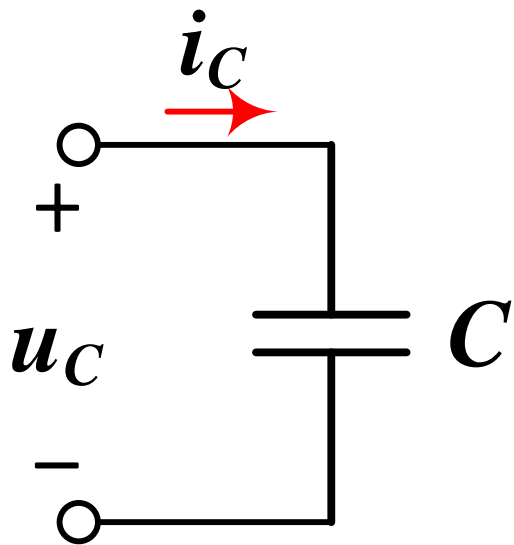
$$u_o = \frac{R_{f2}}{R} (u_{i1} - u_{i2})$$

两运放均存在“虚地”，运算精度较高

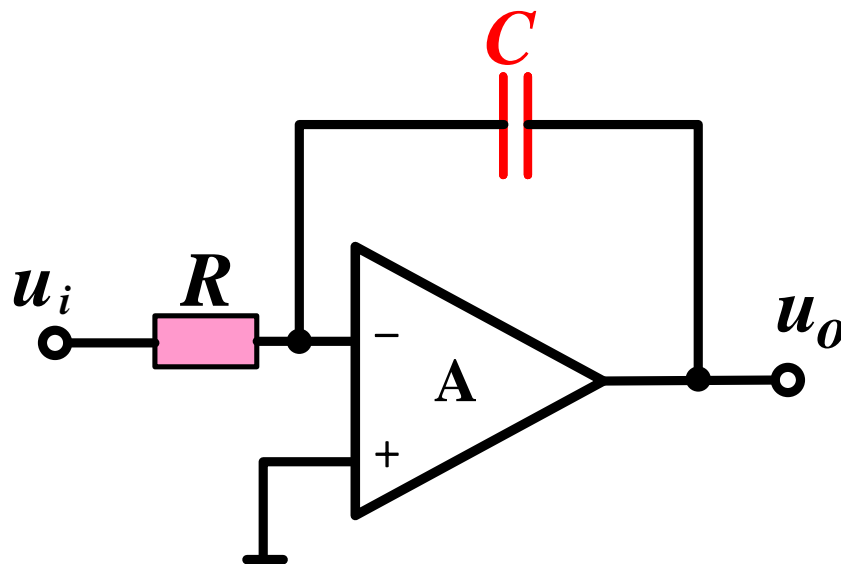
二、运算电路——微积分运算



积分电路在电子测量、控制系统和波形发生和信号变换中起着重要作用。



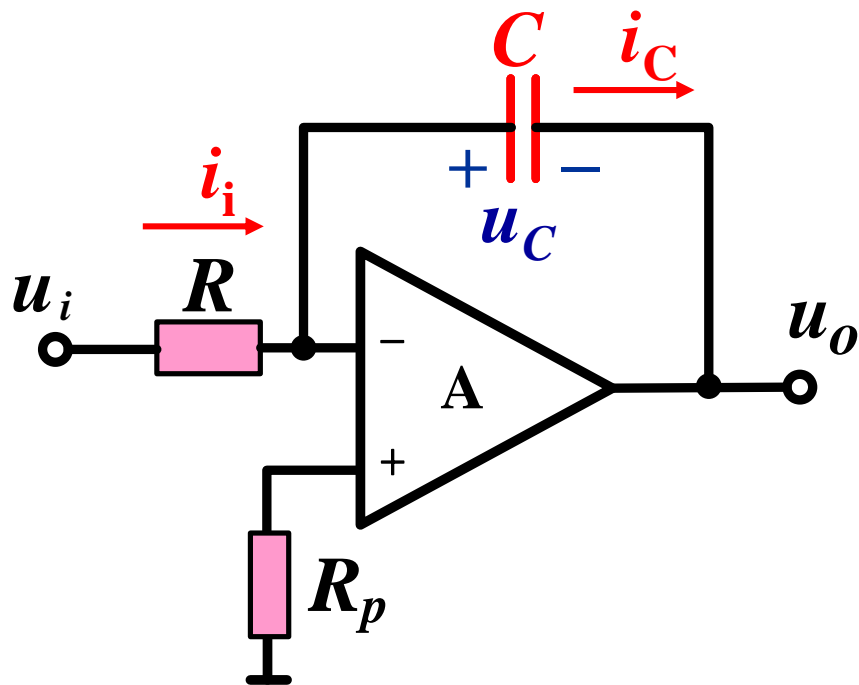
$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$



二、运算电路——微积分运算



反相积分运算电路



$$i_i = i_c \quad i_i = \frac{u_i}{R}$$

$$i_c = C \frac{du_C}{dt} \quad u_C = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

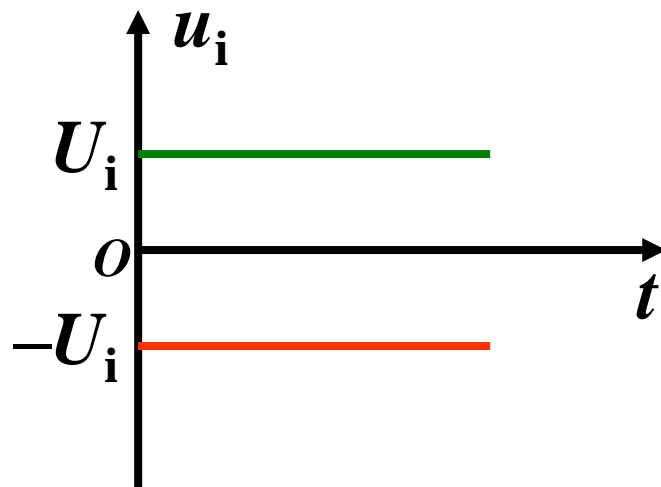
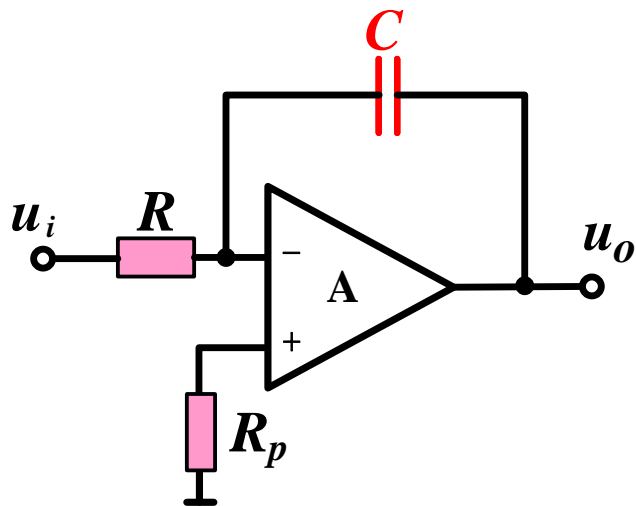
$$u_o = -u_C$$

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

当电容 C 的初始电压为 $u_C(t_0)$ 时，则有

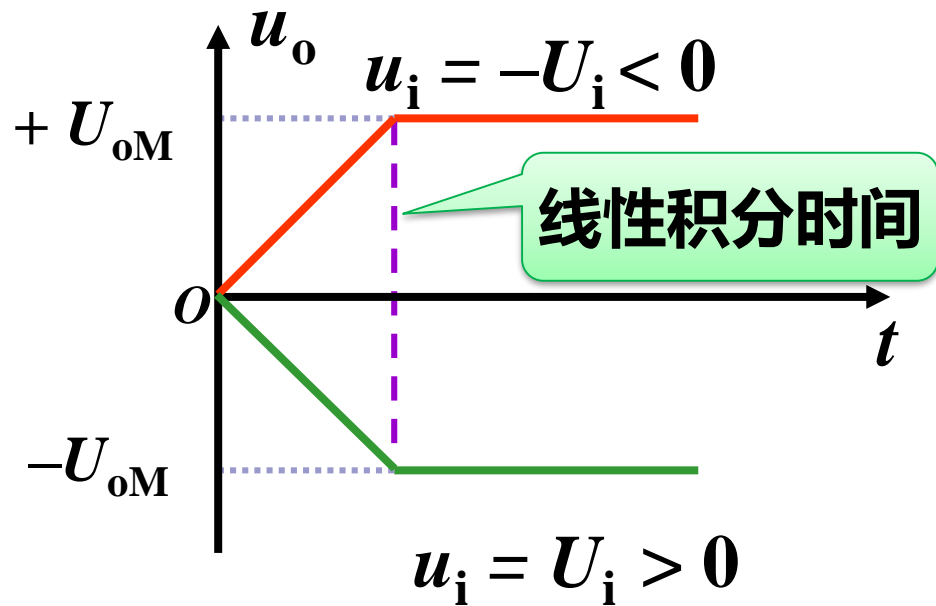
$$u_o = -\left[\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_C(t_0) \right] = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_o(t_0)$$

二、运算电路——微积分运算



若输入一阶跃信号, $u_i = U_i$ 或 $u_i = -U_i$ 时

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



$$0 \leq t \leq \left| \frac{\pm U_{om}}{U_i} \right| RC$$

延时

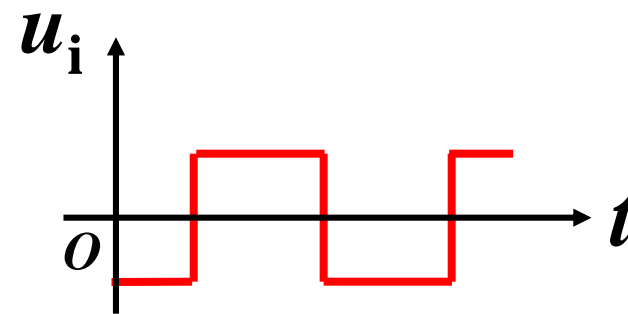
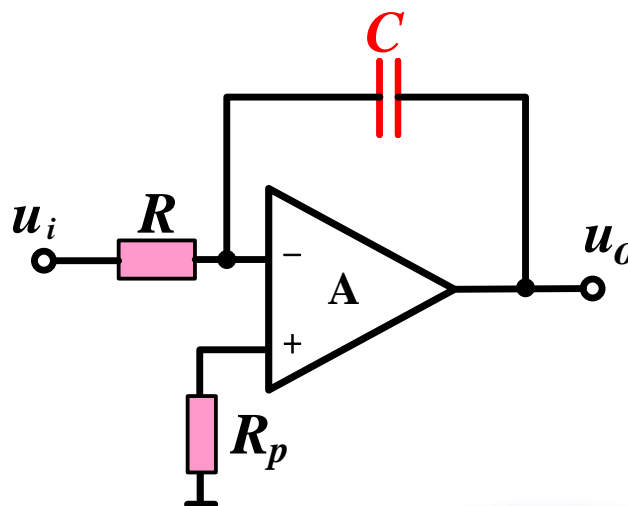
对于基本积分电路，其输入为矩形波，则输出 u_o 的波形为（ ）。

A 矩形波

B 正弦波

C 锯齿波

D 正负尖脉冲

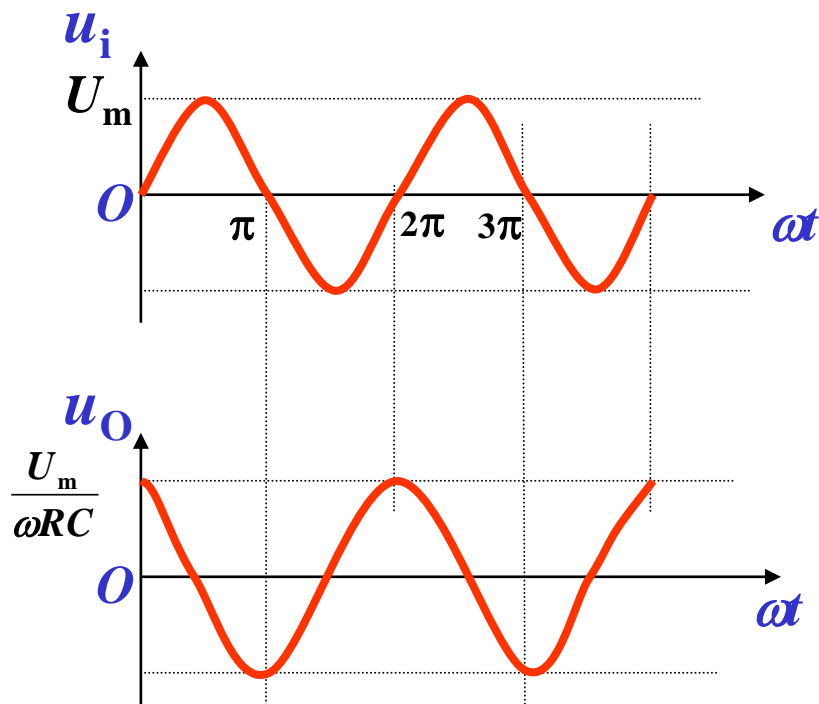
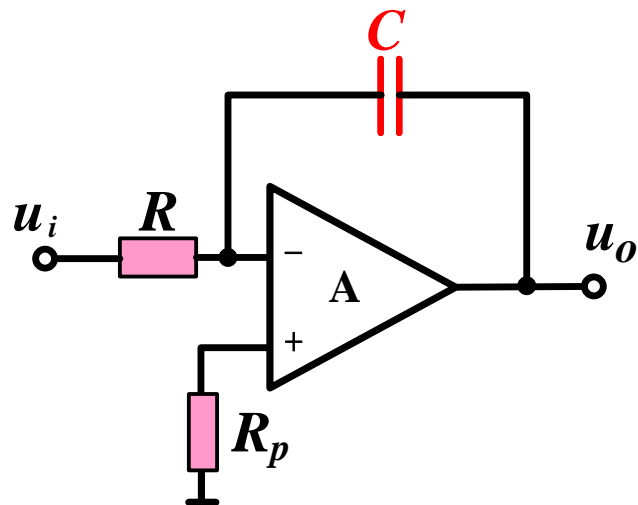


波形变换

二、运算电路——微积分运算



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



$$u_i = U_m \sin \omega t$$

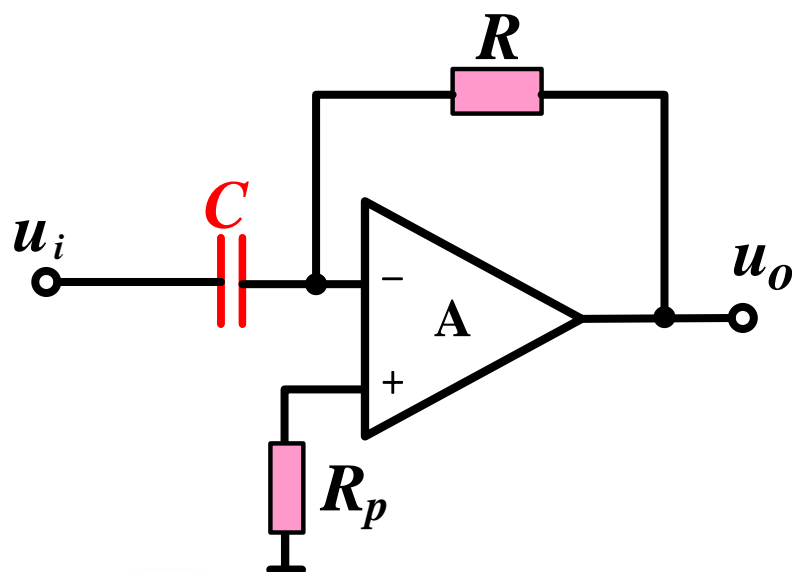
$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{1}{RC} \int U_m \sin \omega t dt \\ &= \frac{U_m}{\omega RC} \cos \omega t \\ &= \frac{U_m}{\omega RC} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

移相

模/数转换、信号发生、信号调制、数学模拟运算等。

二、运算电路——微积分运算

反相微分运算电路

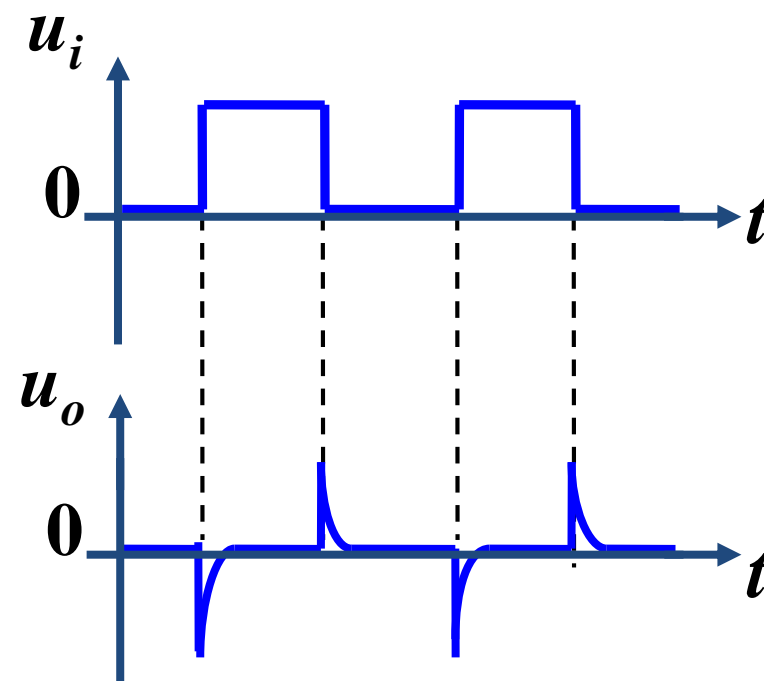
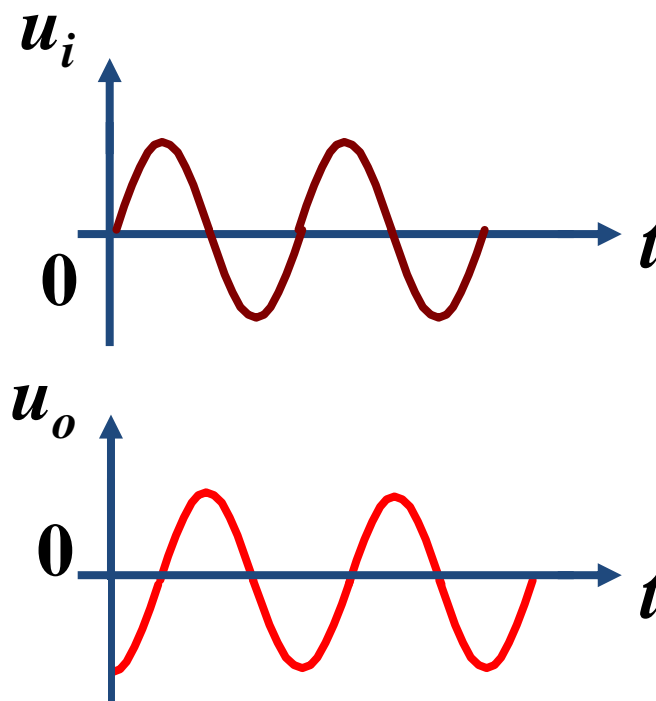


移相

波形变换

$$C \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_o}{R} \quad u_c = u_i$$

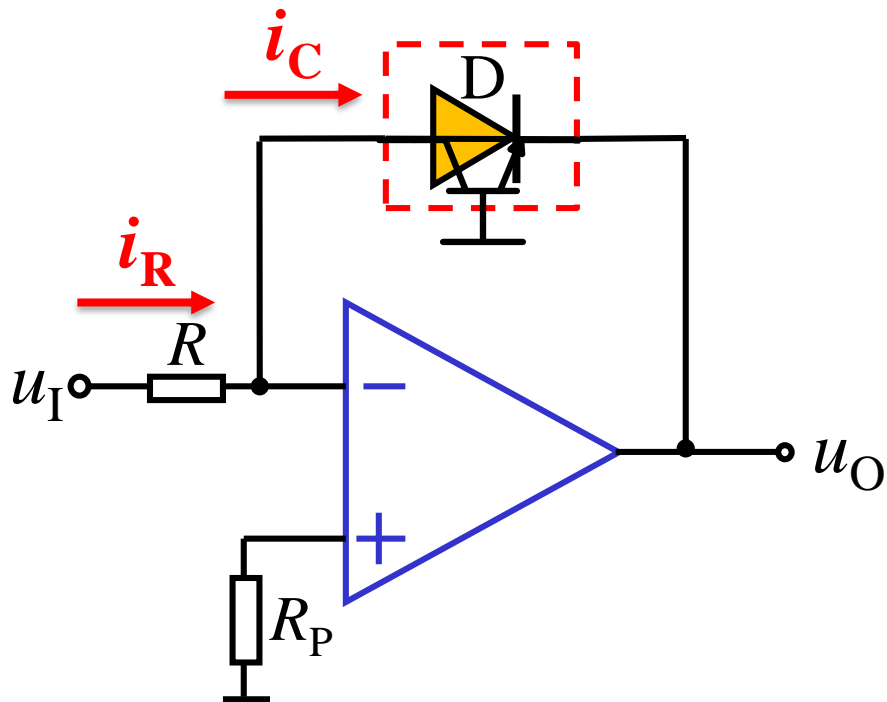
$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$



二、运算电路——其它信号运算电路



对数运算电路



$$i_C = i_R = \frac{u_I}{R}$$

$$i_C \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$

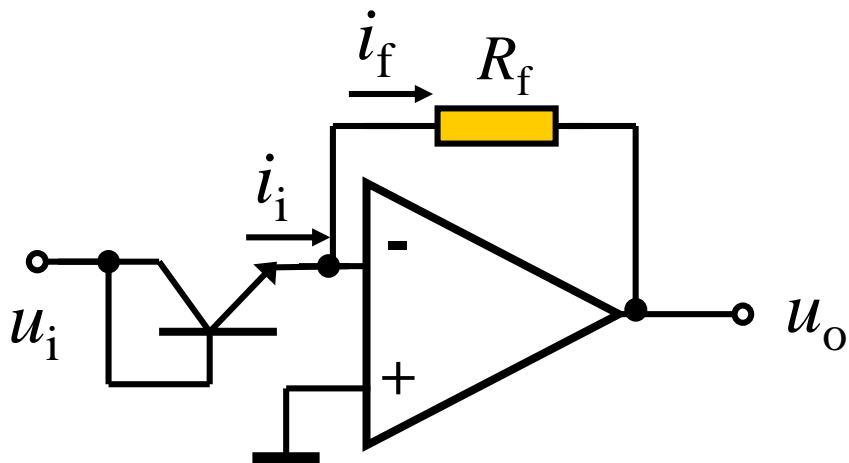
$$u_O = -u_{BE}$$

$$u_O = -U_T \ln \frac{u_I}{I_S R}$$

二、运算电路——其它信号运算电路



指数运算电路



利用运算法则得 $i_f = i_i = I_s e^{\frac{u_i}{U_T}}$

$$u_o = -i_f R_f$$

整理得

$$u_o = -I_s R_f e^{\frac{u_i}{U_T}}$$

缺点： u_i 必须大于0，动态范围小。

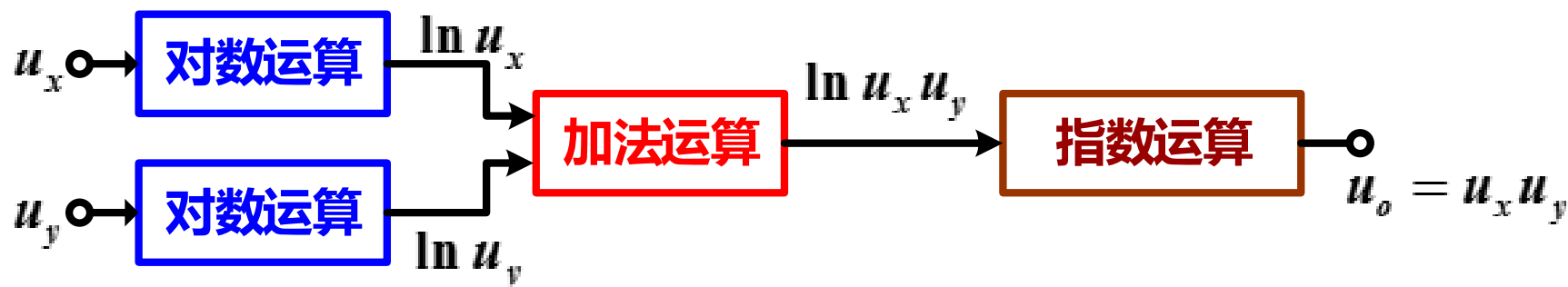
运算精度受温度影响大。

二、运算电路——其它信号运算电路

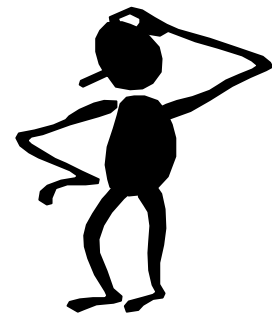


由对数和指数运算电路实现乘法或除法运算电路

乘法: $u_x u_y = e^{\ln u_x u_y} = e^{(\ln u_x + \ln u_y)}$



除法: $u_x / u_y = e^{\ln(u_x/u_y)} = e^{(\ln u_x - \ln u_y)}$

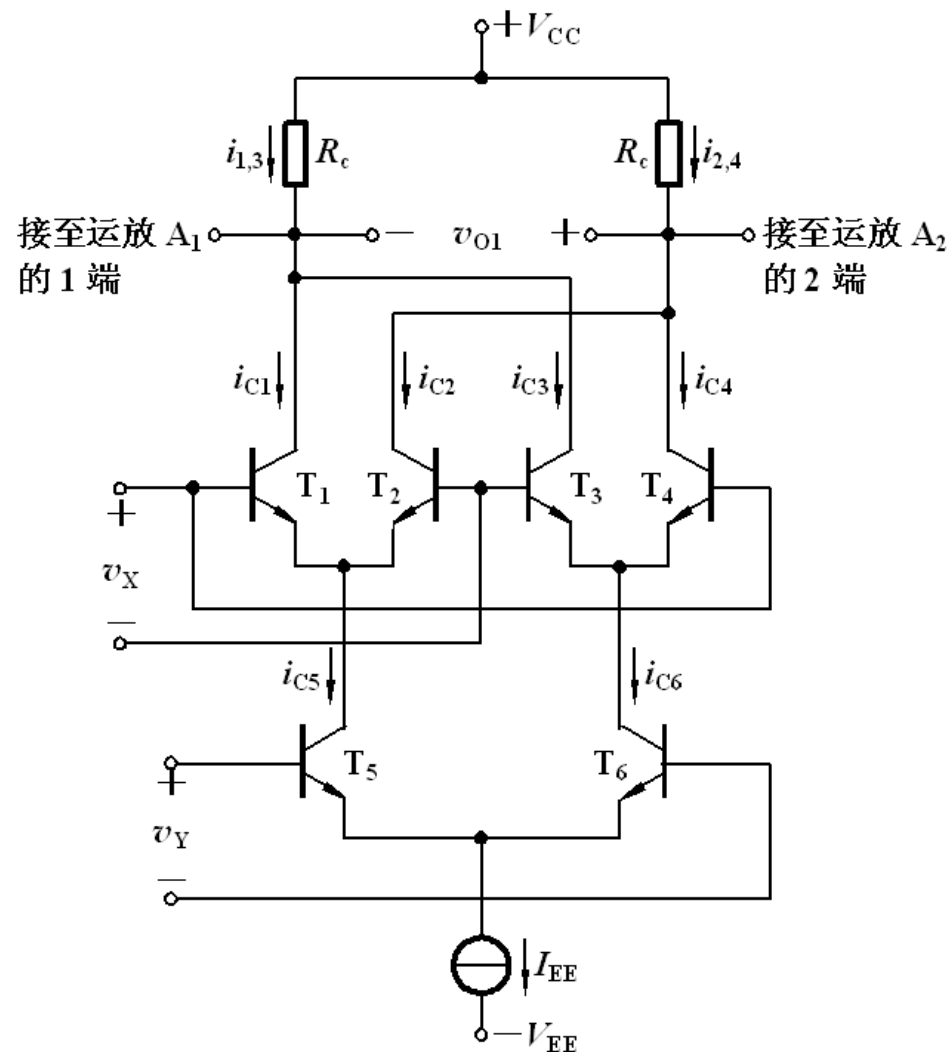


模拟乘法器

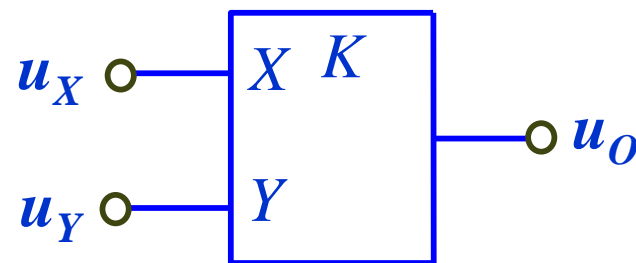
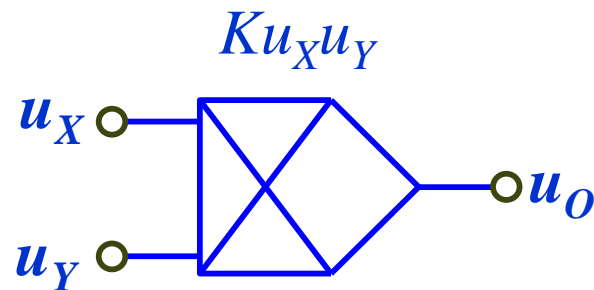
是实现两个模拟信号相乘的器件，是一种多用途、通用性很强的集成电路。

广泛应用于乘法、除法、乘方、开方等模拟运算，同时也广泛应用于信号调制、解调、混频、倍频、鉴相等领域。

二、运算电路——其它信号运算电路



双平衡四象限乘法器



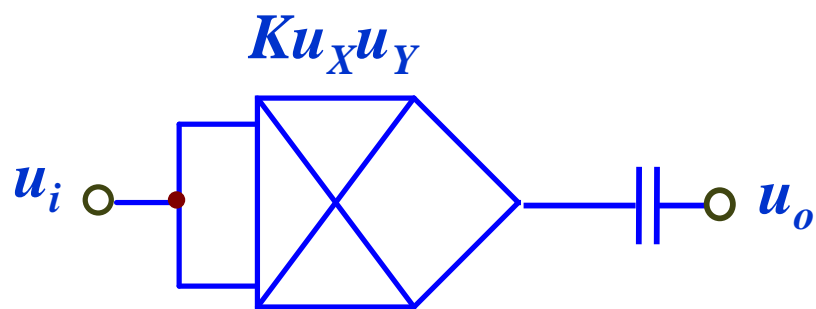
模拟乘法器的符号

$$u_O = Ku_X u_Y$$

二、运算电路——其它信号运算电路



乘法器的应用 ——乘方运算



$$u_o = Ku_i^2$$

$$u_i = U_m \sin \omega t$$

$$u_o = K(U_m \sin \omega t)^2 = \frac{1}{2} KU_m^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

$$u_o = \frac{1}{2} KU_m^2 \cos 2\omega t$$

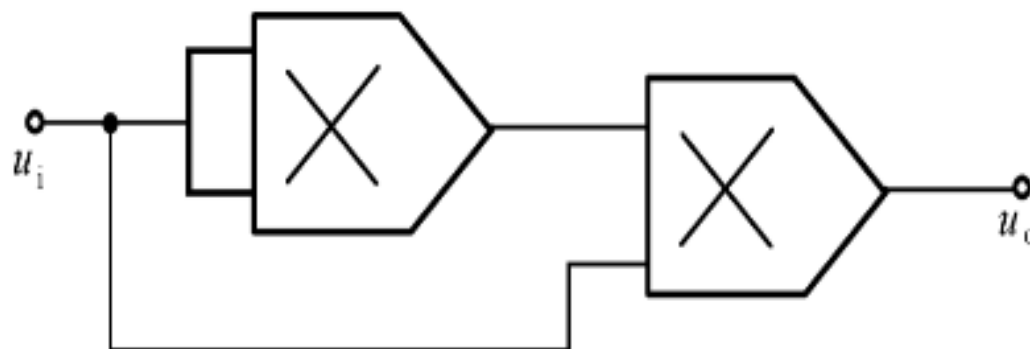
倍频



三次方、四次方、n次方

下图所示集成乘法器电路实现的运算为 ()

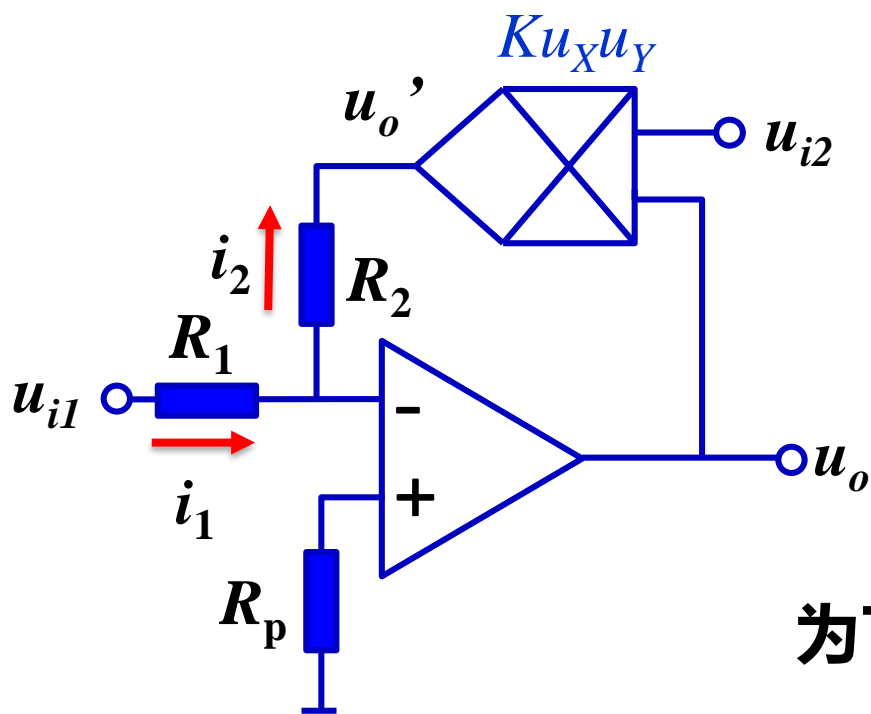
- A 平方
- B 立方**
- C 开平方
- D 开立方



二、运算电路——其它信号运算电路



乘法器的应用 —— 除法运算



$$i_1 = i_2$$

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

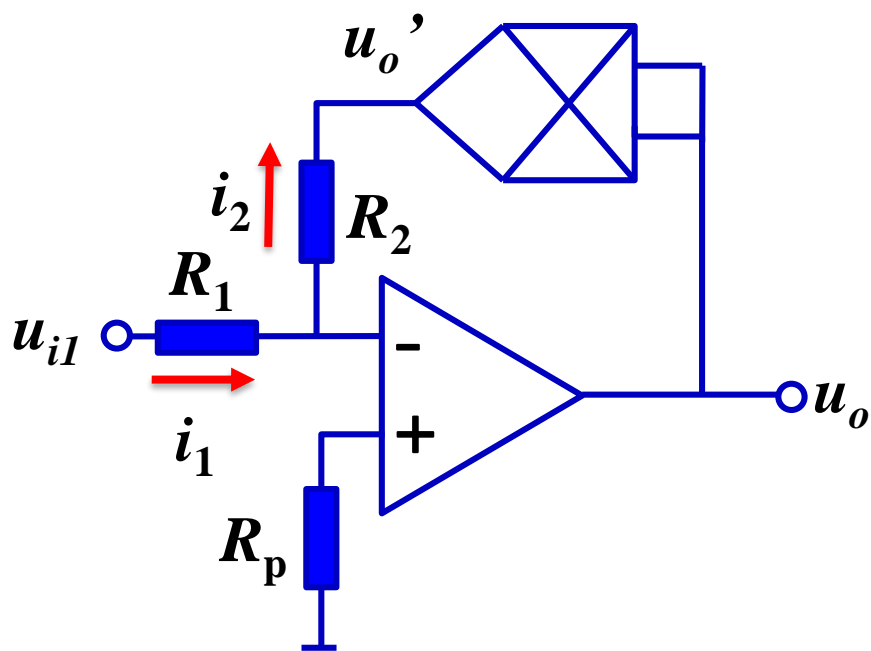
$$u_o = -\frac{R_2}{KR_1} \frac{u_{i1}}{u_{i2}}$$

为了保证集成运放处于负反馈状态，要求 u_{i2} 和 K 同极性。

- 当 $K < 0$ 时，必须 $u_{i2} < 0$ ；
- 当 $K > 0$ 时，必须 $u_{i2} > 0$ ；

二、运算电路——其它信号运算电路

乘法器的应用 ——平方根运算



$$i_1 = i_2$$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} = -\frac{u_o'}{R_2} = -\frac{Ku_o^2}{R_2}$$

$$u_o = \sqrt{-\frac{R_2 u_i}{KR_1}}$$

为了保证集成运放处于负反馈状态，要求

$$u_i < 0, K > 0$$



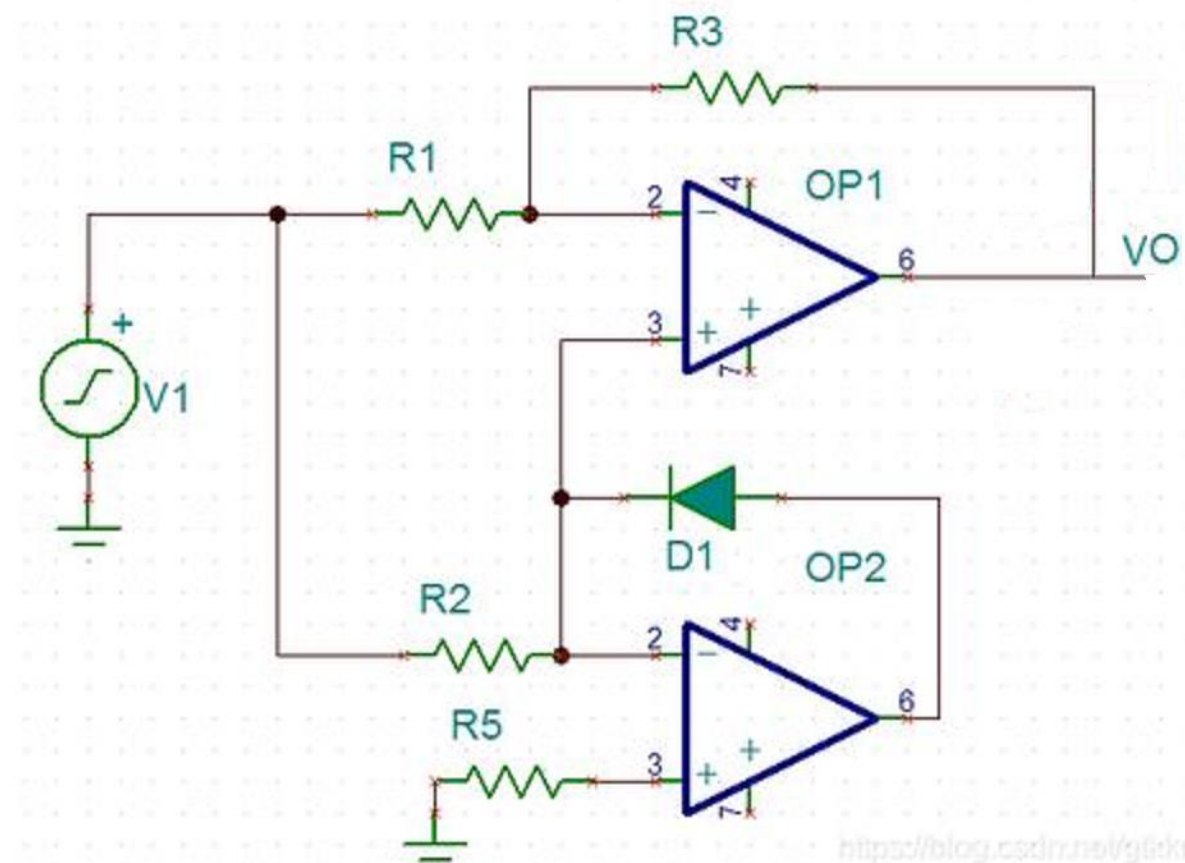
开立方

**例题：已知 $R1=R3$ ，求解 $V_O = f(V1) = ?$ ，理想二极管 $D1$ 什么时候导通？
什么时候截止？**

当 $V1 > 0$ ， $D1$ 截止， $V_O = V1$

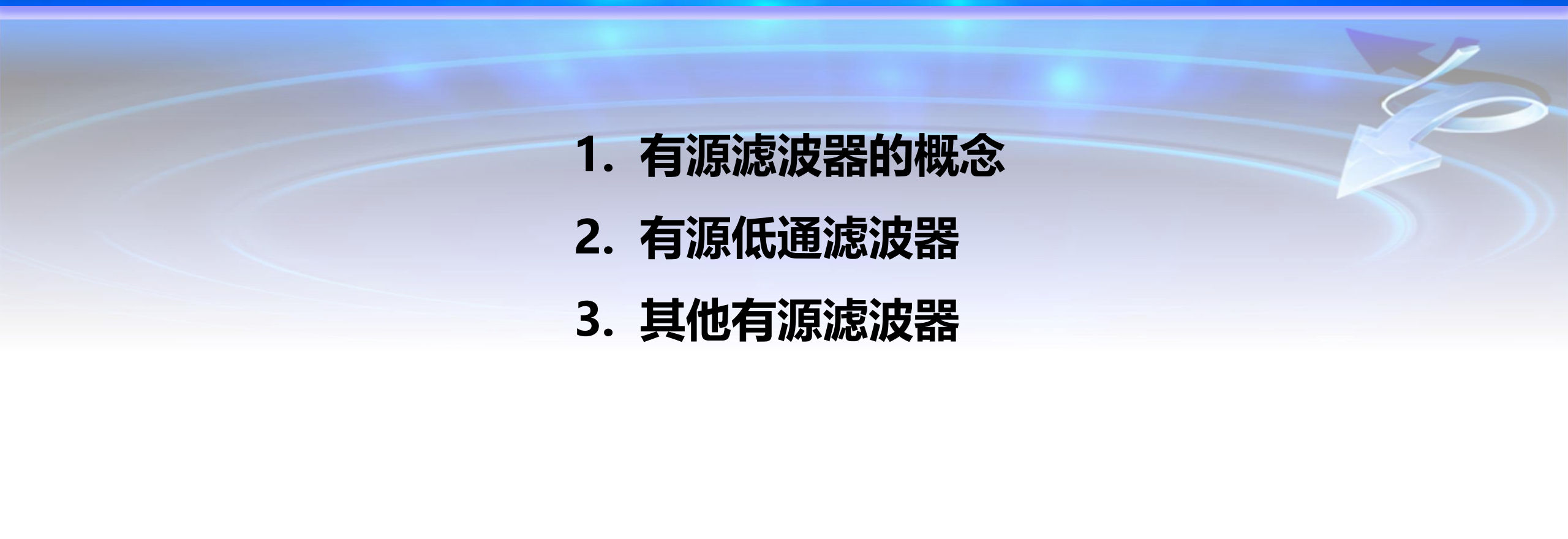
当 $V1 < 0$ ， $D1$ 导通， $V_O = -V1$

所以 $V_O = |V1|$

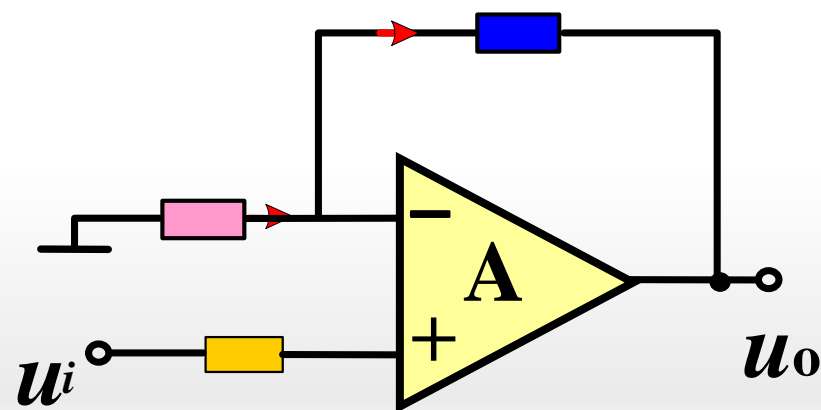
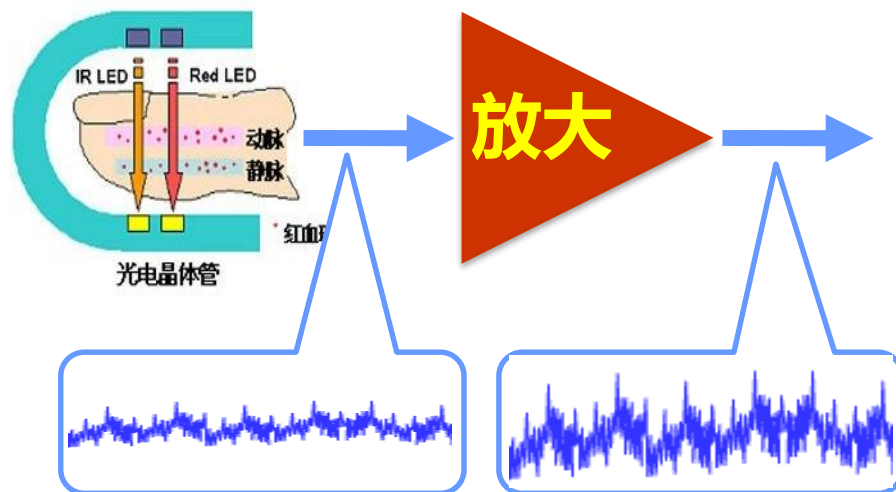


三、有源滤波器

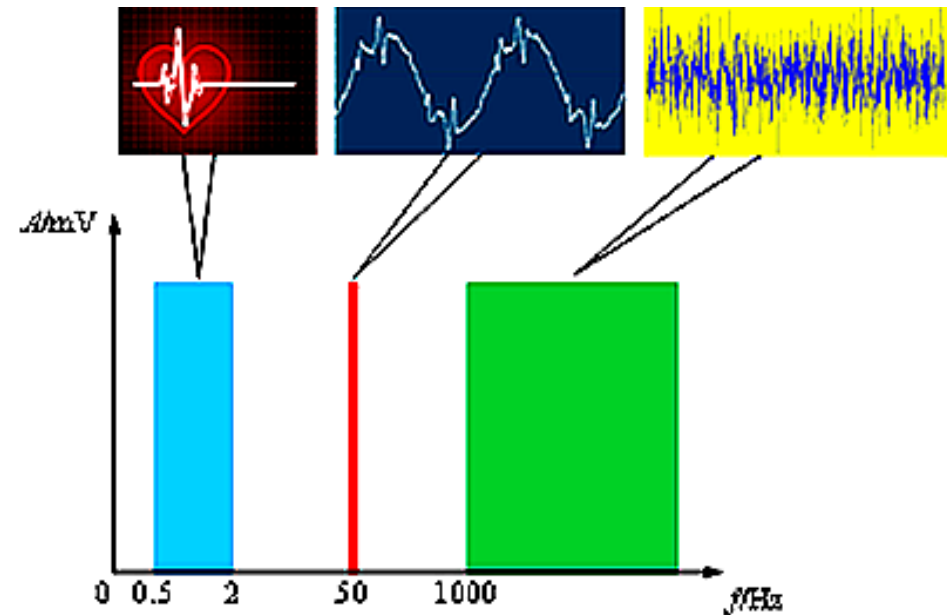
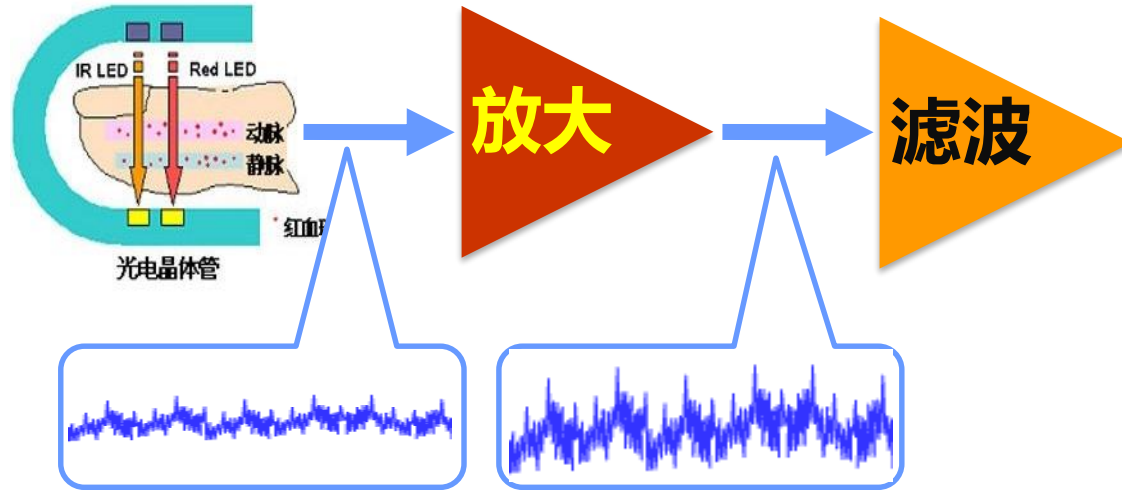


1. 有源滤波器的概念
 2. 有源低通滤波器
 3. 其他有源滤波器
- 

1、滤波器基本概念



1、滤波器基本概念

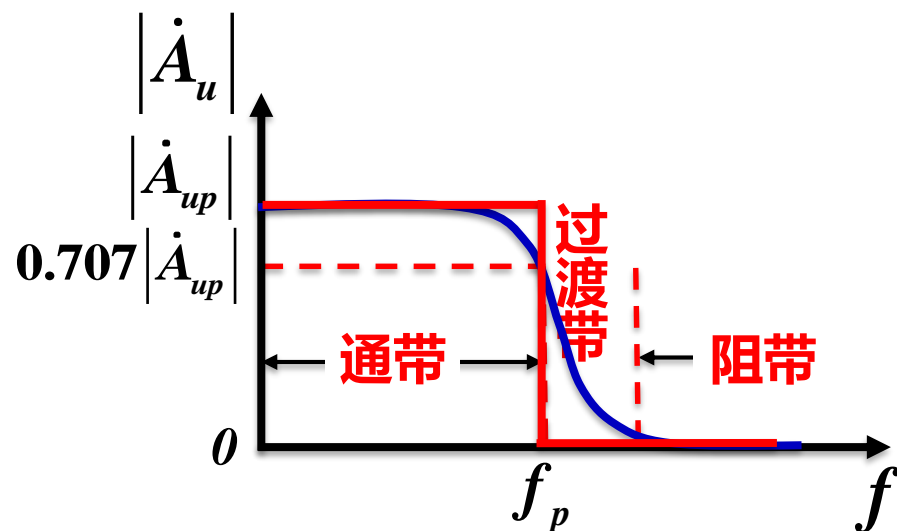


1、滤波器基本概念



对信号频率有选择性地传输的电路称为滤波器，它能使有用信号通过而同时抑制（或大大衰减）无用频率信号。

在通信、电子工程、仪器仪表等领域有着广泛的应用。



滤波器的幅频特性

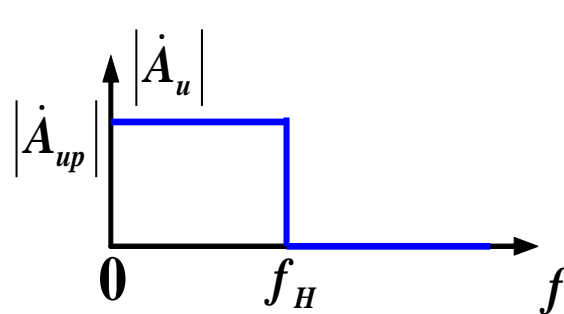
过渡带越窄，频率特性越陡峭，电路的选择性越好，滤波特性越好。

1、濾波器基本概念

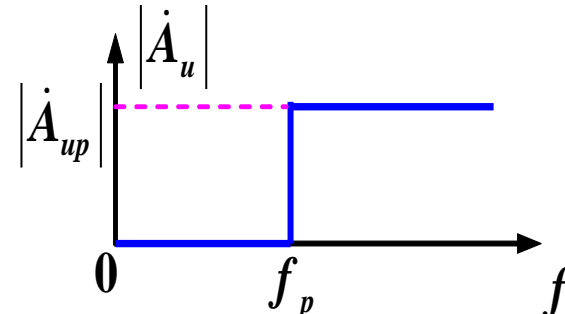


分类

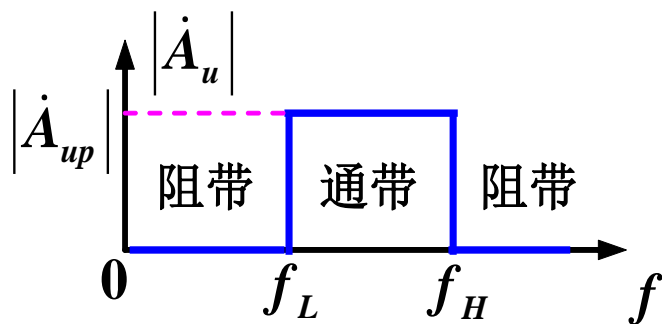
- LPF** (Low Pass Filter)
- HPF** (high Pass Filter)
- BPF** (Band Pass Filter)
- BRF** (Band Rejection Filter)
- APF** (All Pass Filter)



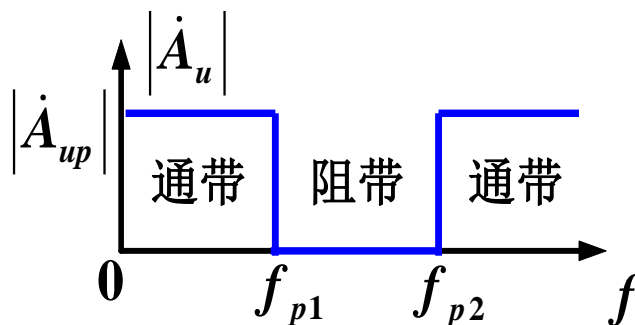
低通濾波器 (LPF)



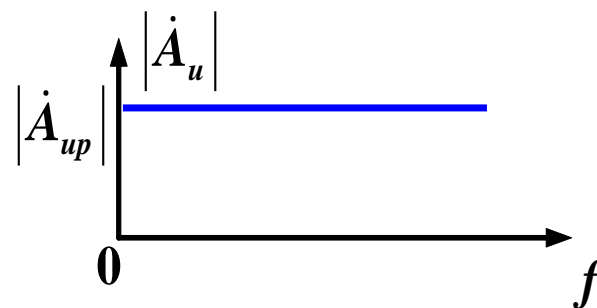
高通濾波器 (HPF)



帶通濾波器 (BPF)



帶阻濾波器 (BRF)



全通濾波器 (APF)

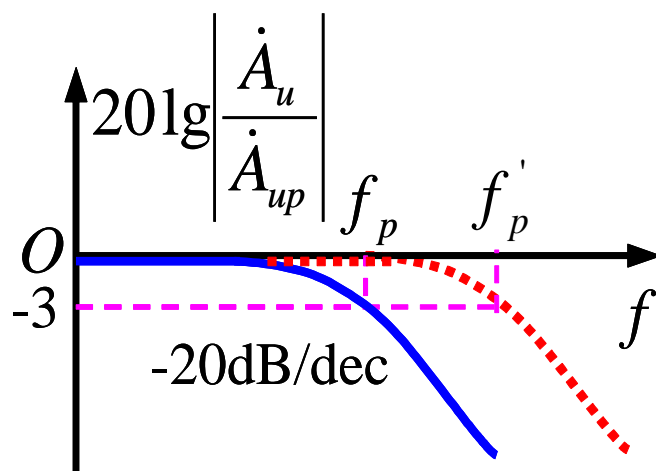
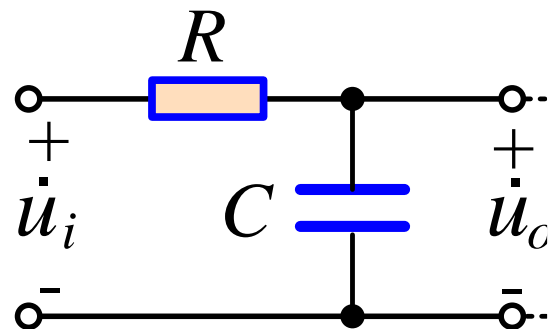


为防止50Hz电网电压干扰混入信号之中，应选用（）滤波器。

- A 带通
- B 低通
- ☒ C 带阻
- D 高通

1、滤波器基本概念

无源滤波电路



	通带增益	频率响应	截止频率
空载	$\dot{A}_{up} = 1$	$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_p}}$	$f_p = \frac{1}{2\pi RC}$
带负载	$\dot{A}_{up} = \frac{R_L}{R + R_L}$	$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j \frac{f}{f_p}}$	$f_p = \frac{1}{2\pi (R // R_L) C}$

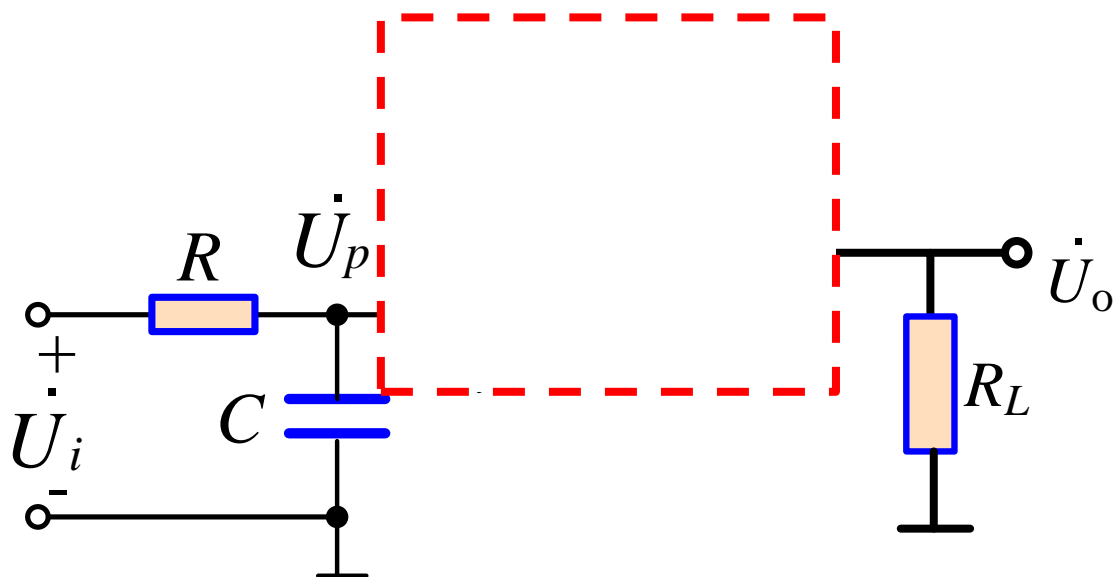
缺点：

- 1、带负载能力差。
- 2、无放大作用。
- 3、特性不理想，边沿不陡。

1、滤波器基本概念



有源滤波电路



由有源器件（三极管、场效应管、集成运放）构成的滤波器。

$$\dot{U}_o = \dot{U}_p = \frac{\frac{1}{j\omega C} \dot{U}_i}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\dot{U}_i}{1 + j\omega RC}$$

带载或不带载时都有：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j \frac{f}{f_p}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

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

1、滤波器基本概念



有源滤波电路的优点:

- (1) 输入与输出之间具有良好的隔离，滤波参数不随负载变化。
- (2) 电路中的集成运放可引入串联电压负反馈，使 r_i 高， r_o 低。
- (3) 除起滤波作用外，还可以放大，而且放大倍数容易调节。

- 有源滤波电路是信号处理电路，其输出电压和电流的大小受有源元件自身参数和供电电源的限制；
- 无源滤波电路可用于高电压大电流，如直流电源中的滤波电路；
- 有源滤波器不宜用于高频范围。

1、滤波器基本概念



滤波电路的分析方法



- 电压: $U(s)$
- 电流: $I(s)$
- 电阻: $R(s)$
- 电容容抗: $Z_C(s)=1/sC$
- 电感感抗: $Z_L(s)=sL$

传递函数: $A_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)}$

$$j\omega \Leftrightarrow s$$

$$\dot{A}_u(j\omega) = |\dot{A}(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} = |\dot{A}(j\omega)| \angle \phi(\omega)$$

□ $A_u(s)$ 分母中 s 的最高方次, 称滤波器的**阶数**。

□ 滤波器阶数越高, 过渡带越窄。