



# 第6章 集成运算放大器及其应用

## 6.1 集成运算放大器的电路组成

## 6.2 集成运算放大器的性能指标与工作特点

## 6.3 放大电路中的反馈

## 6.4 集成运放的线性应用

## 6.5 集成运算放大器的非线性应用



# 第6章 集成运算放大器及其应用

## 重点

01

差动放大电路

02

放大电路中的反馈

03

集成运放的线性应用



## 第6章 集成运算放大器及其应用

- 概述

**分立元件电路：**由各种单个元器件连接起来的电路。

**缺点：**可靠性差和体积庞大这两个致命弱点。

随着电子技术的发展，各种集成电路层出不穷。

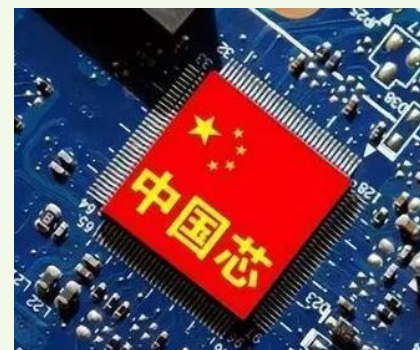
**什么是集成电路？**把整个电路的各个元器件及相互间的连接同时制造在一块半导体芯片上，组成不可分割的整体。

**优点：**体积小，可靠性高，成本低。

我国的芯片制造技术如何？

我国苦芯片制造久矣！！

我辈当  
自强！





## 6.1 集成运算放大器的电路组成

### 6.1.1 输入级—差动放大电路

### 6.1.2 偏置电路—恒流源电路

### 6.1.3 中间级—有源负载和复合管电路

### 6.1.4 输出级—功率放大电路

为了有效地抑制直接耦合放大电路的零点漂移，在集成运放的输入级采用差动放大电路。

## 6.1.1 输入级—差动放大电路

### ➤ 基本差动放大电路的结构

特点:

- (1) 左右结构、参数对称
- (2) 具有两个输入端
- (3) 输出电压  $u_o = u_{o1} - u_{o2}$

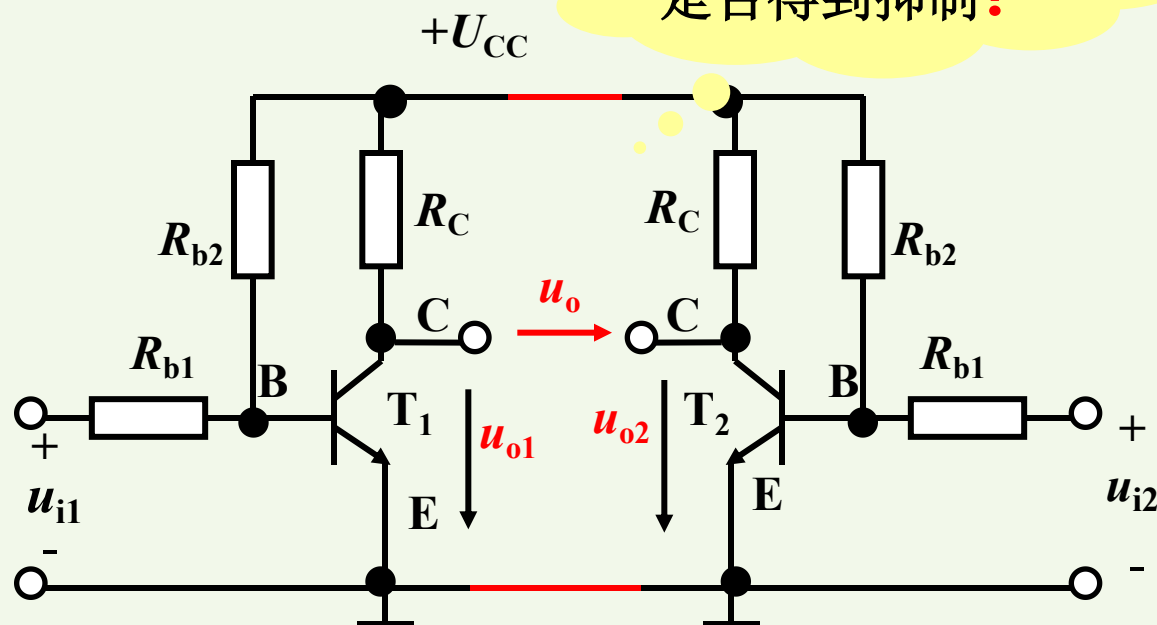
### ➤ 电路抑制零漂的原理

设电路处于静态, 即:

$$u_{i1} = u_{i2} = 0$$

由于电路对称, 则  $I_{c1} = I_{c2}$ ,  $V_{c1} = V_{c2}$ ,

$$\text{故 } u_o = V_{c1} - V_{c2} = 0$$



两管各自的零漂  
是否得到抑制?

### 结论

基本差动放大电路利用电路的**对称性**, 在**双端输出**时将零漂完全抑制。

温度升高

集电极电流产生增量  $\Delta I_{c1} = \Delta I_{c2}$

集电极电位产生负增量  $\Delta V_{c1} = \Delta V_{c2}$

$$\text{所以, } u_o = (V_{c1} + \Delta V_{c1}) - (V_{c2} + \Delta V_{c2}) = 0$$

## ➤ 差动放大电路输入信号类型

共模输入信号  
差模输入信号  
任意输入信号

### 1、共模输入信号

当  $u_{i1}=u_{i2}$  时，为共模输入。

设  $u_{ic}$  为共模输入信号，即  $u_{ic}=u_{i1}=u_{i2}$

由于电路对称，所以双端输出时  $u_o=V_{c1}-V_{c2}=0$ ，

**结论：差放电路对共模信号无放大作用。**

### 2、差模输入信号

当两个输入信号满足  $u_{i1}=-u_{i2}$  时，称为差模输入。

设  $u_{id}$  为差模输入信号，  $u_{id}=u_{i1}-u_{i2}=2u_{i1}$

此时：  $\Delta V_{c1}=-\Delta V_{c2}$ ，  $u_o=2\Delta V_{c1} \neq 0$

**结论：差放电路对差模信号有放大作用。**



### (3) 任意输入

当两个输入信号  $|u_{i1}| \neq |u_{i2}|$  时，称为任意输入信号。

任意信号可分解成差模和共模信号两种性质的输入信号。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{差模输入信号 } u_{id} : u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \\ \text{共模输入信号 } u_{ic} : u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} \end{array} \right.$$

$$\text{即 } \left\{ \begin{array}{l} u_{i1} = u_{id}/2 + u_{ic} \\ u_{i2} = -u_{id}/2 + u_{ic} \end{array} \right.$$

差动放大电路只对其中的差模信号进行放大。

# 典型差动放大电路的结构与分析



基本差动放大电路  
是借助电路的对称  
性抑制零漂的

存在问题

实际电路中不存在绝对对称

每管的零漂并未能抑制，不能单端输出。

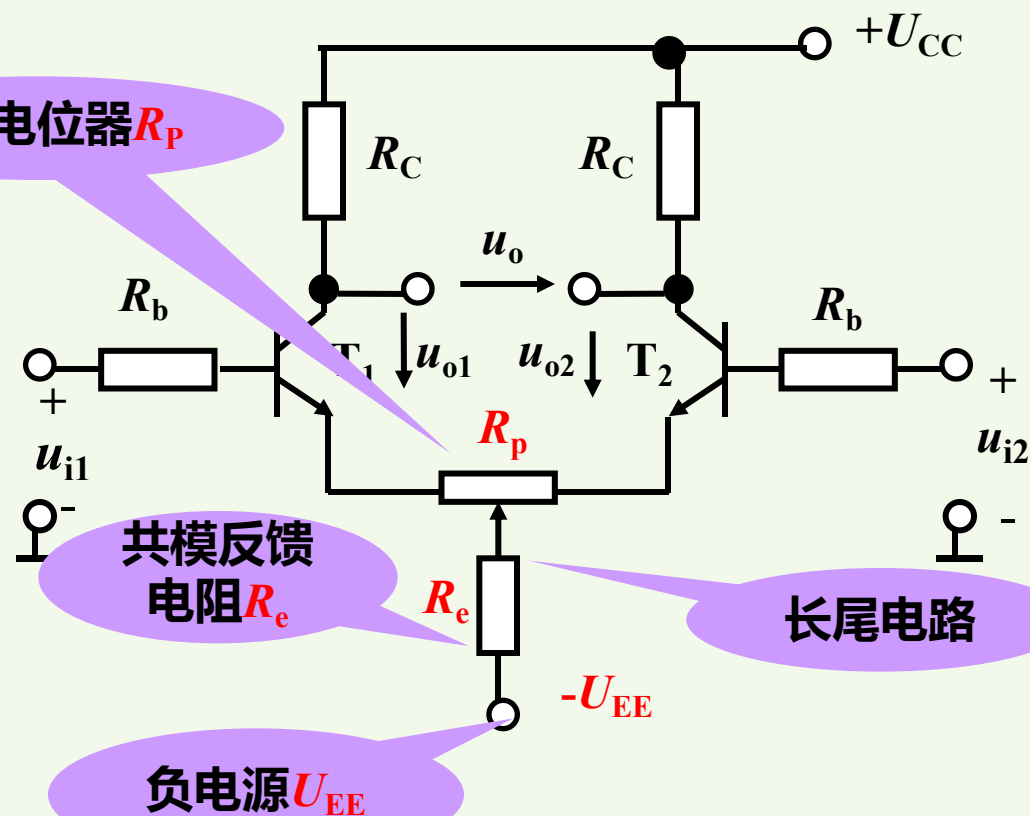
解决  
方法

采用典型差动放大电路结构

**$R_P$ 作用：**（1）调节两管的Q点，保证在输入为零时 $u_o=0$ 。  
（2）取值在几十到几百 $\Omega$ 。

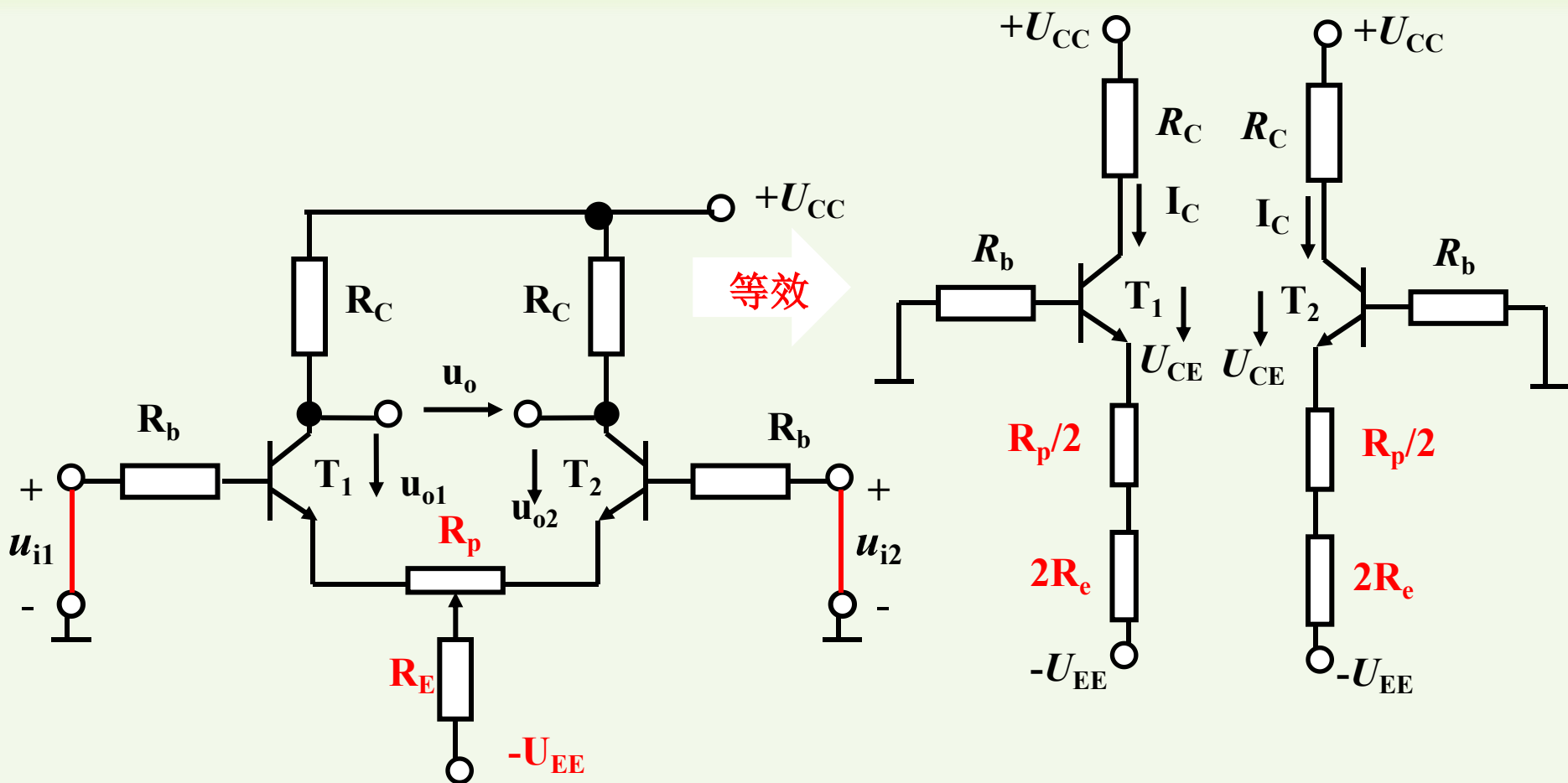
**$R_e$ 作用：**（1）对差模信号压降为零，可视为短路。（2）对共模信号其压降为单管电路的两倍，更好的抑制零漂。（3）取值越大越好。

**$U_{EE}$ 作用：**（1）补偿 $R_E$ 上的直流压降。（2）取值 $U_{EE}=U_{CC}$ 。





## ➤ 静态工作点的计算





## ➤ 静态工作点的计算

由图可得：

$$U_{EE} = I_B R_b + U_{BE} + I_E \frac{R_P}{2} + 2I_E R_e$$

即：

$$U_{EE} - U_{BE} = I_B \left[ R_b + (1 + \beta) \frac{R_P}{2} + 2(1 + \beta) R_e \right]$$

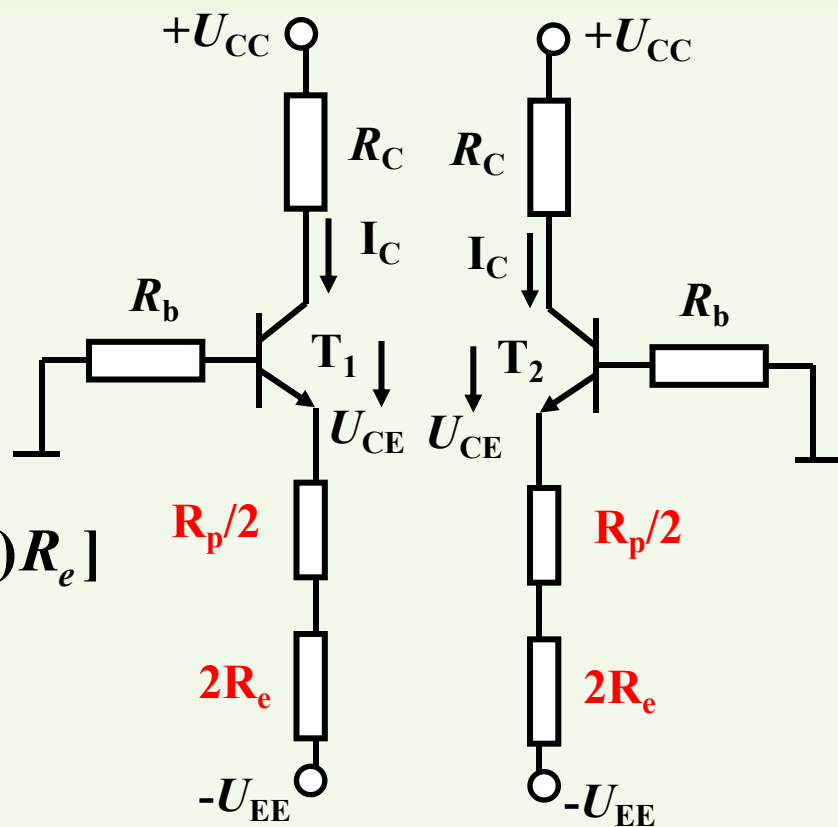
则：

$$I_B = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta) \left( \frac{R_P}{2} + 2R_e \right)}$$

又：

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} = U_{CC} + U_{EE} - I_C \left( R_c + \frac{1}{2} R_P + 2R_e \right)$$





差动放大器共有四种输入输出方式:

1. 双端输入、双端输出 (双入双出)
2. 双端输入、单端输出 (双入单出)
3. 单端输入、双端输出 (单入双出)
4. 单端输入、单端输出 (单入单出)

对于图示的单端输入情况，可视为电路输入任意信号： $u_{i1}=u_i$ ， $u_{i2}=0$

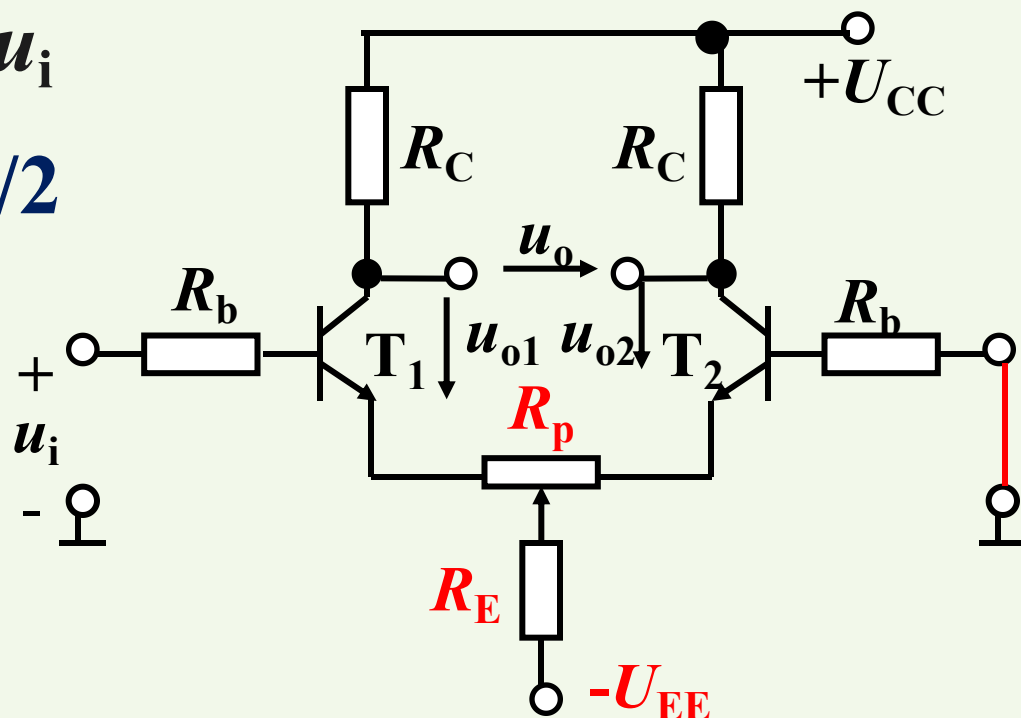
因为：共模  $u_{ic}=(u_{i1}+u_{i2})/2=u_i/2$

差模  $u_{id}=u_{i1}-u_{i2}=u_i$

则： $u_{i1}=u_{id}/2+u_{ic}=u_i/2+u_i/2$

$u_{i2}=-u_{id}/2+u_{ic}=-u_i/2+u_i/2$

**结论：单端输入的效果相当于双端输入**



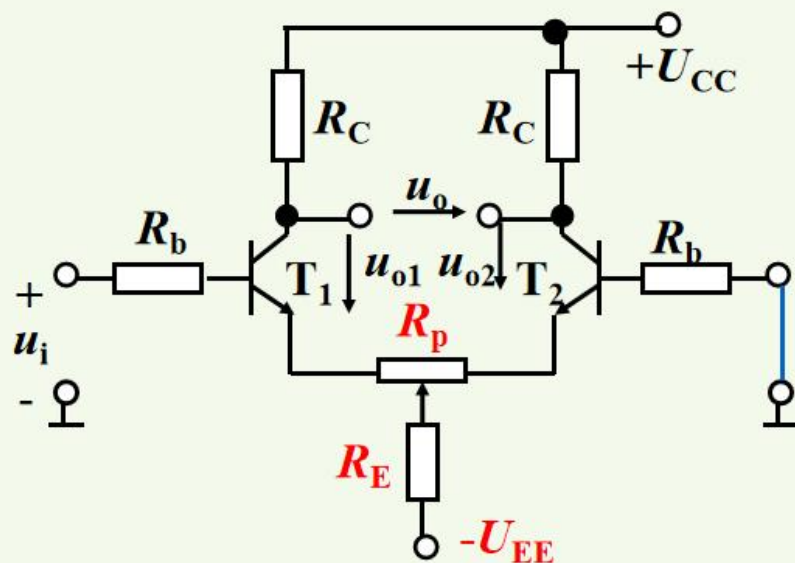
## 讨论:

- 1、多级放大电路的耦合方式中，哪一种适合集成电路芯片设计？
- 2、在单端输入的情况下，为什么差动放大电路还可以抑制零漂？



## 练习:

第一节1, 2, 3, 4, 5



## 6.2 集成运算放大器的性能指标与工作特点

### 集成电路 (Integrated circuits - IC)

在半导体制造工艺的基础上，把整个电路中的元器件制作在一块硅基片上，然后封装在一个管壳内，构成特定功能的电子电路。

**集成电路优点：** 性能好、体积小、成本低



模拟集成电路： 集成运算放大器、功率放大器、稳压电源

数字集成电路： 门电路、译码器、编码器、触发器、计数器

## 6.2 集成运算放大器的性能指标与工作特点

集成运算放大器（集成运放）在现代科技领域有着广泛的应用，以下是一些主要的应用领域：

滤波电路：广泛应用于音频、视频、无线电通信等领域。

数字信号处理：用于功率放大器中的比较器电路、**DAC**（数模转换器）电路等。还包括信号放大、模拟运算、数字运算、自动控制等应用领域。

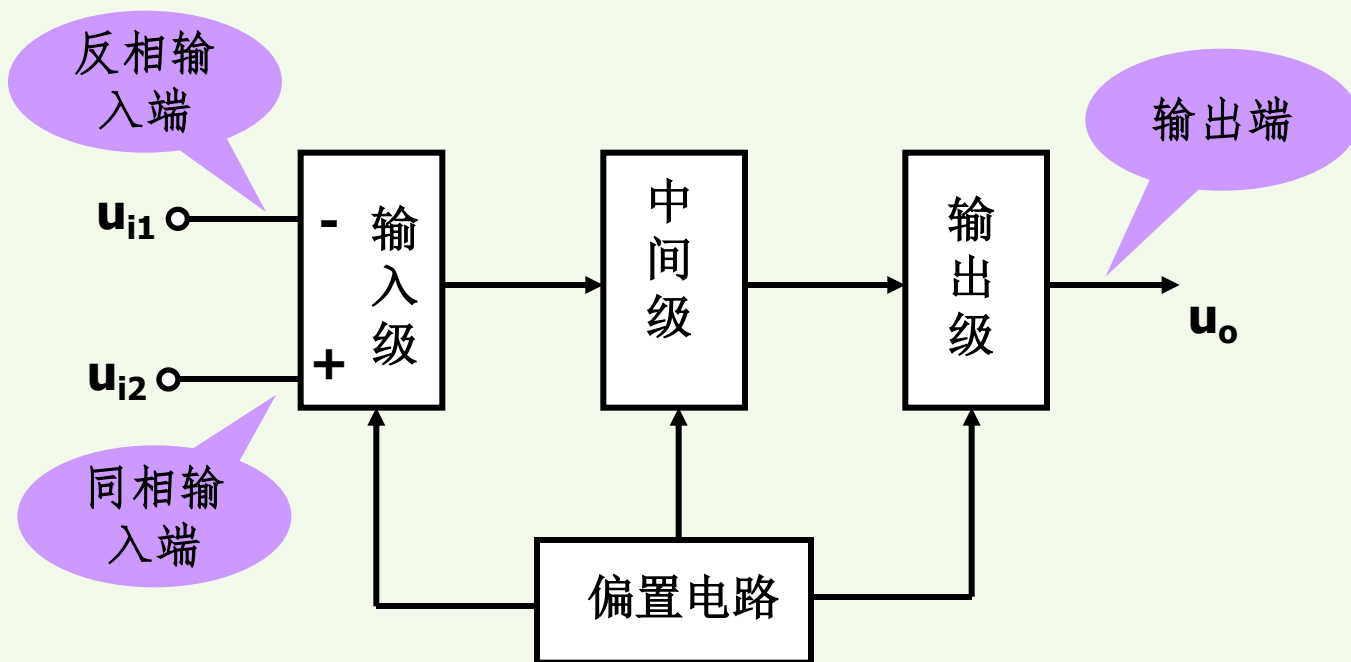
我国近年来在各类芯片制造领域一直面临挑战和困难。



近期我们在芯片制造上取得了重大突破：华为自研芯片麒麟9000S，中国移动自研的5G射频芯片，中国电科实现国产离子注入机28纳米工艺全覆盖。。。

# 集成运算放大器

——集成的具有高电压放大倍数的直接耦合多级放大电路



输入级：多采用差动放大电路，以抑制零漂、提供两个输入端。

中间级：多采用共射放大电路，以提供高电压放大倍数。

输出级：多采用功率放大电路，以输出一定的功率。

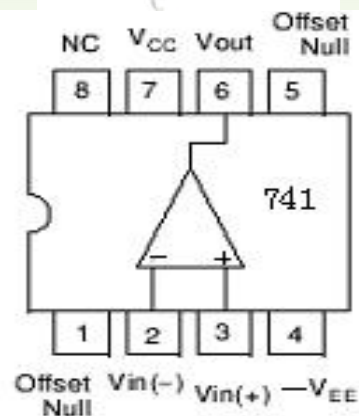
偏置电路：多采用镜像恒流源电路。





## 6.2.1 双极型集成运放F007

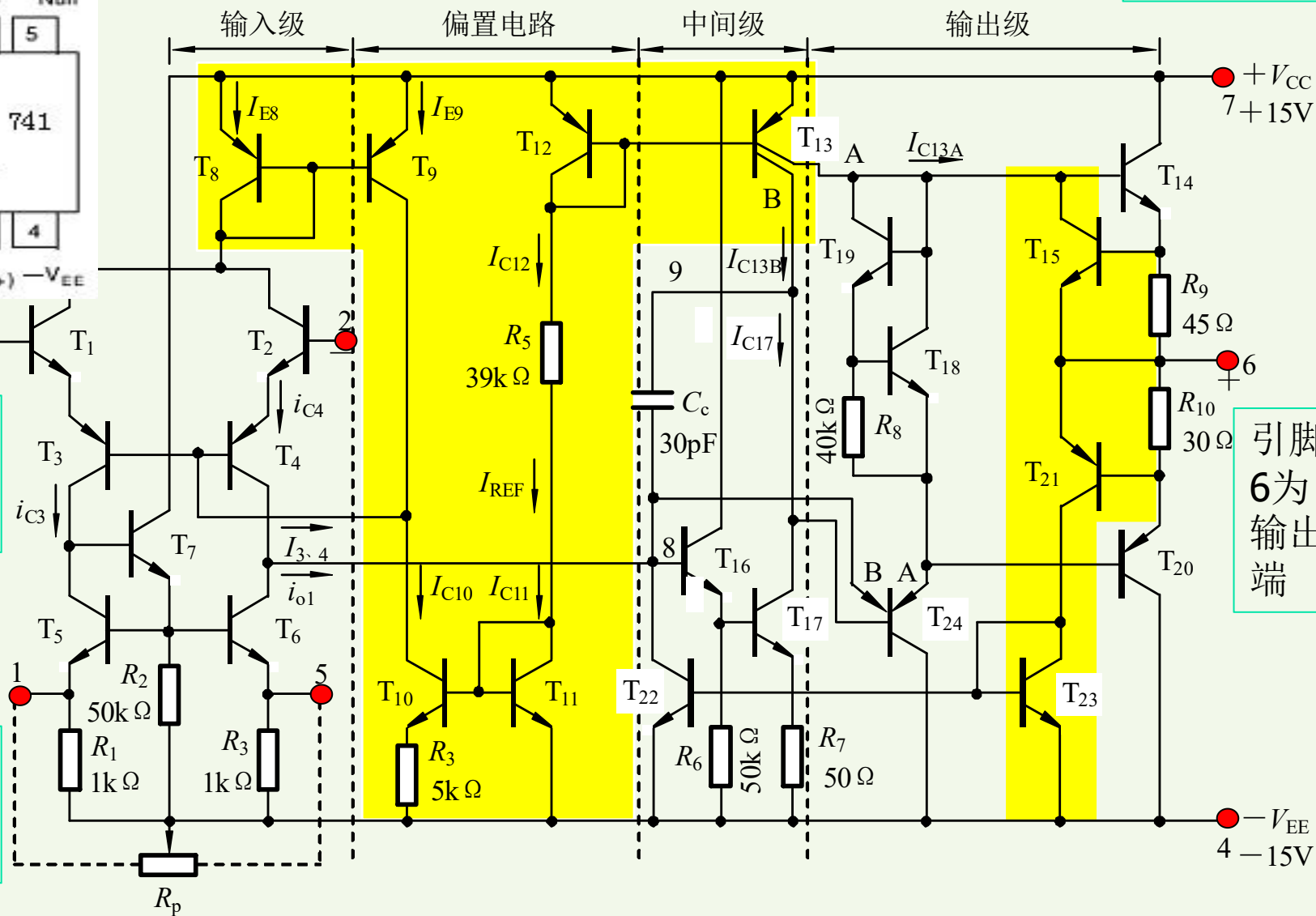
引脚4, 7  
为正、负  
电源端



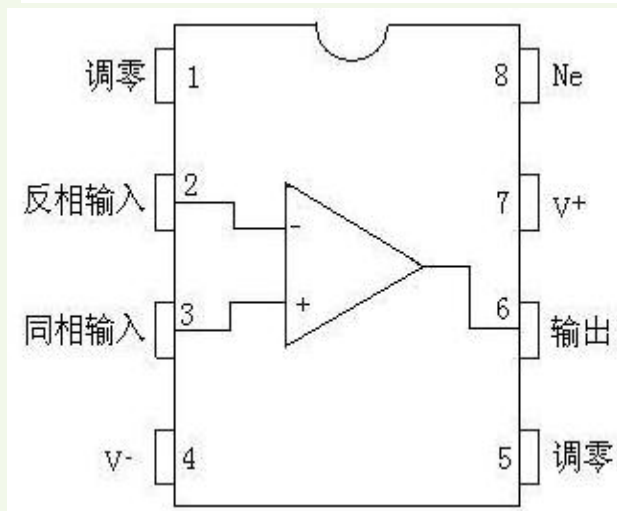
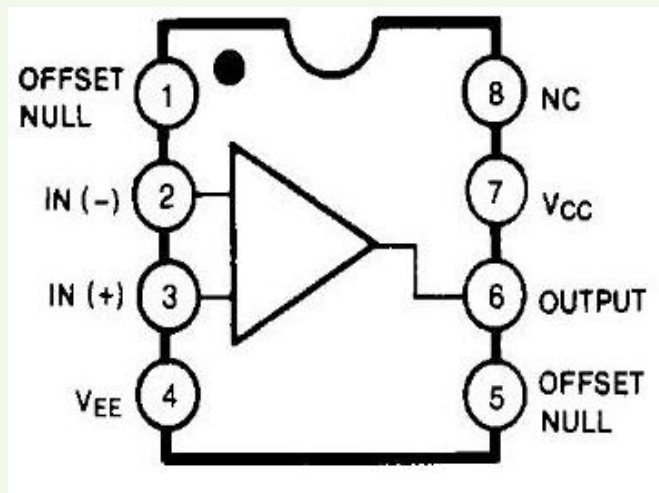
引脚2, 3  
为反、同  
向输入端

引脚1, 5  
为外接调  
零电位器

引脚  
6为  
输出端

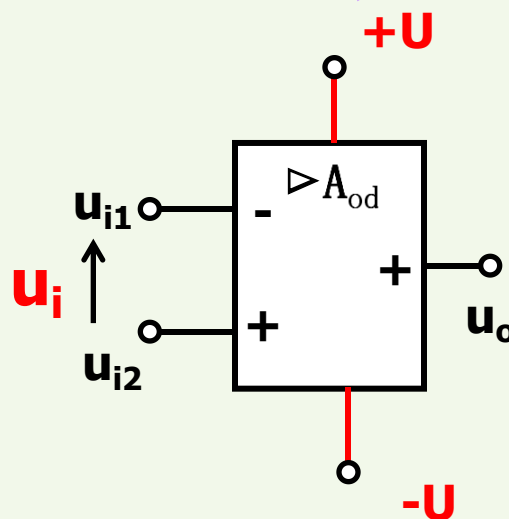


# 集成运放F007(741)的管脚图



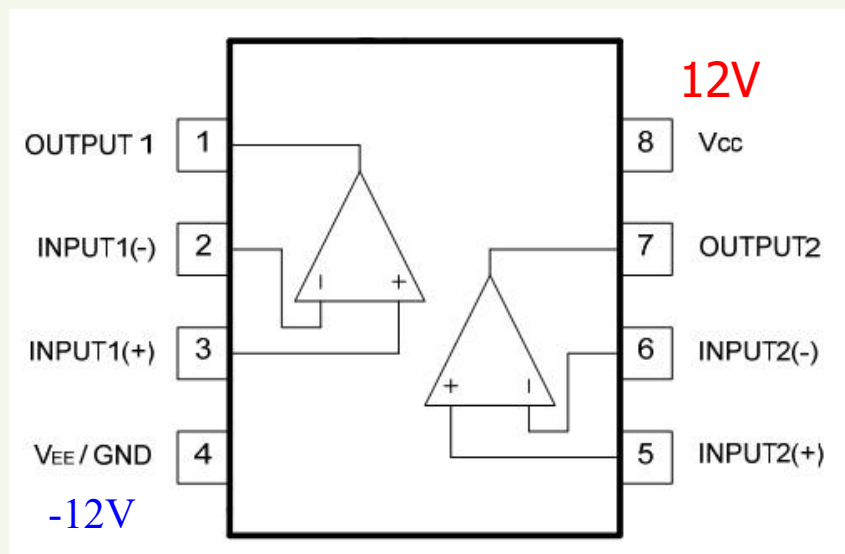
符号

注意：实际运放在使用时必须外加电源



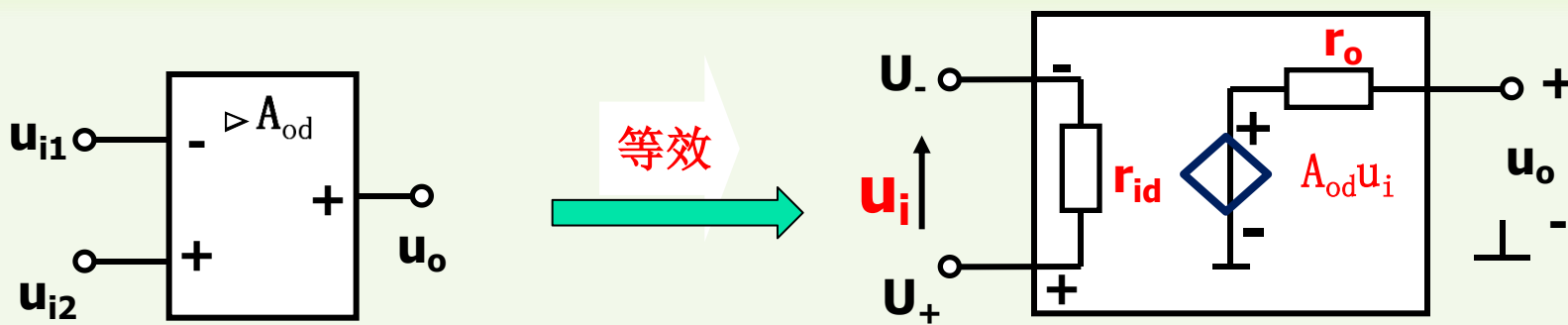
$$u_o = A_{od}(u_{i2} - u_{i1}) = A_{od} u_i$$

## 双运放 LM324管脚图



没有调零端

## 6.2.2 集成运算放大器的主要性能指标



### 集成运算放大器的主要参数

$A_{od}$ : 开环差模电压放大倍数

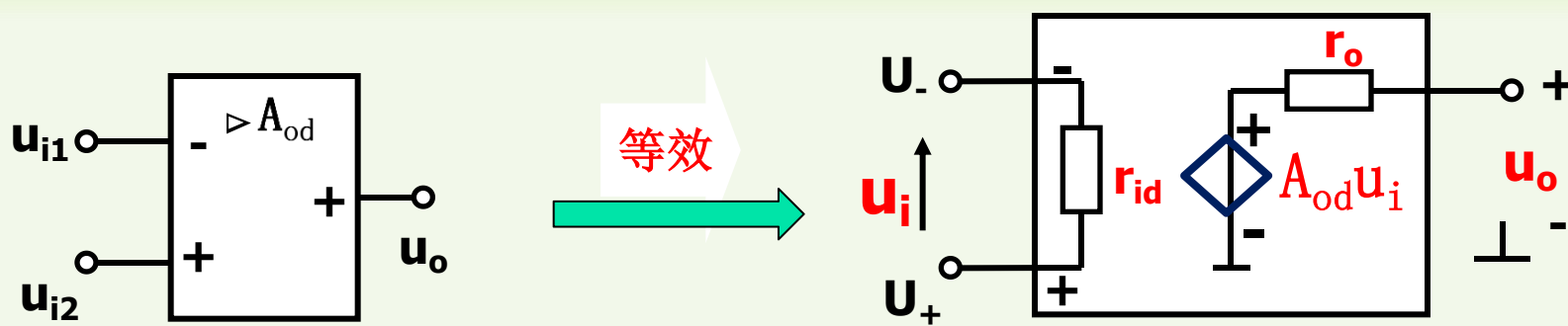
----运放开环时输出电压与输入差模电压之比

$$A_{od} = u_o / (U_+ - U_-) = u_o / u_i$$

常用  $20\lg|A_{od}|$  表示电压增益，单位为dB，一般运放可达60dB，高精度运放可达140dB。

注：60分贝表示电路放大倍数为1000倍

# 集成运算放大器的主要参数



◆ 差模输入电阻  $r_{id}$  ----- 可达  $M\Omega$  数量级

◆ 输出电阻  $r_o$  ----- 为几十  $\Omega$   $\sim$  几百  $\Omega$

◆ 共模抑制比  $K_{CMR}$  --- 差模电压放大倍数  $A_{od}$  与共模电压放大倍数  $A_{oc}$  之比

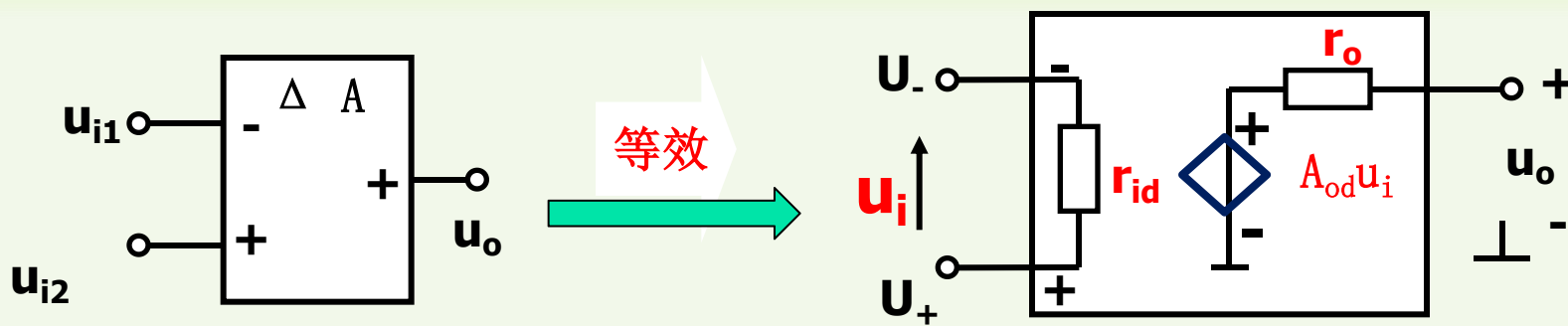
差模电压放大倍数  $A_{od} = u_o / (U_+ - U_-) = u_o / u_i$

共模电压放大倍数 当  $U_+ = U_- = u_{ic}$  时,  $A_{oc} = u_o / u_{ic}$ , 值越小越好

共模抑制比  $K_{CMR}$   $K_{CMR} = |A_{od} / A_{oc}|$  或  $K_{CMR} = 20 \lg |A_{od} / A_{oc}|$  (dB)

共模抑制比反映了运放抑制零飘的能力, 值越大越好, 一般运放可达 **80dB**, 高精度运放可达 **160dB**。

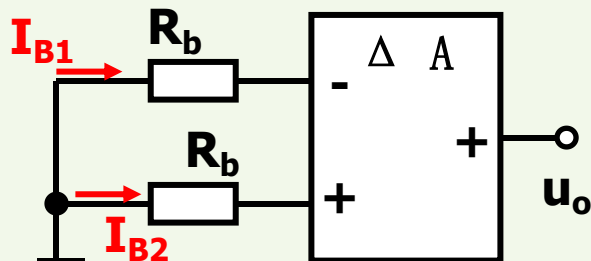
# 集成运算放大器的主要参数



## ◆ 输入失调电压 $U_{I0}$

——指当输入电压为零时，为使输出电压也为零所必须在输入端加的补偿电压。一般为  $1 \sim 5\text{mV}$ ，高精度运放可达  $\pm 0.5\text{mV}$ 。

◆ 输入失调电流  $I_{I0}$  -----输入为零时两静态基极电流的差值，其值越小越好， $I_{I0} = |I_{B1} - I_{B2}|$ ，一般为几十nA。



# 理想运算放大器的条件

差模电压增益  $A_{od} = \infty$

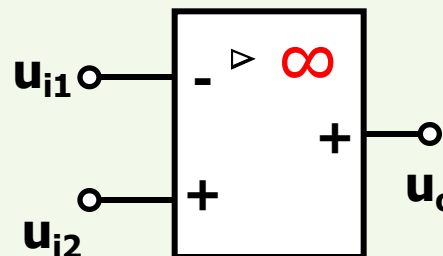
差模输入电阻  $r_{id} = \infty$

共模抑制比  $K_{CRM} = \infty$

输出电阻  $r_o = 0$

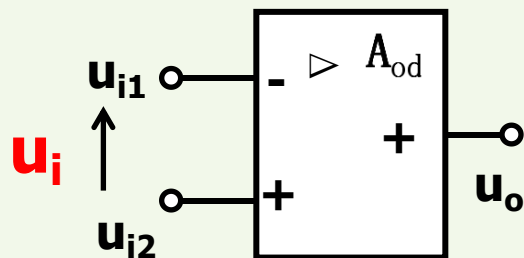
失调电压、电流 = 0、漂移 = 0

符号



## 6.2.3 集成运放的两种工作状态

### 一、运放线性应用的条件与特点

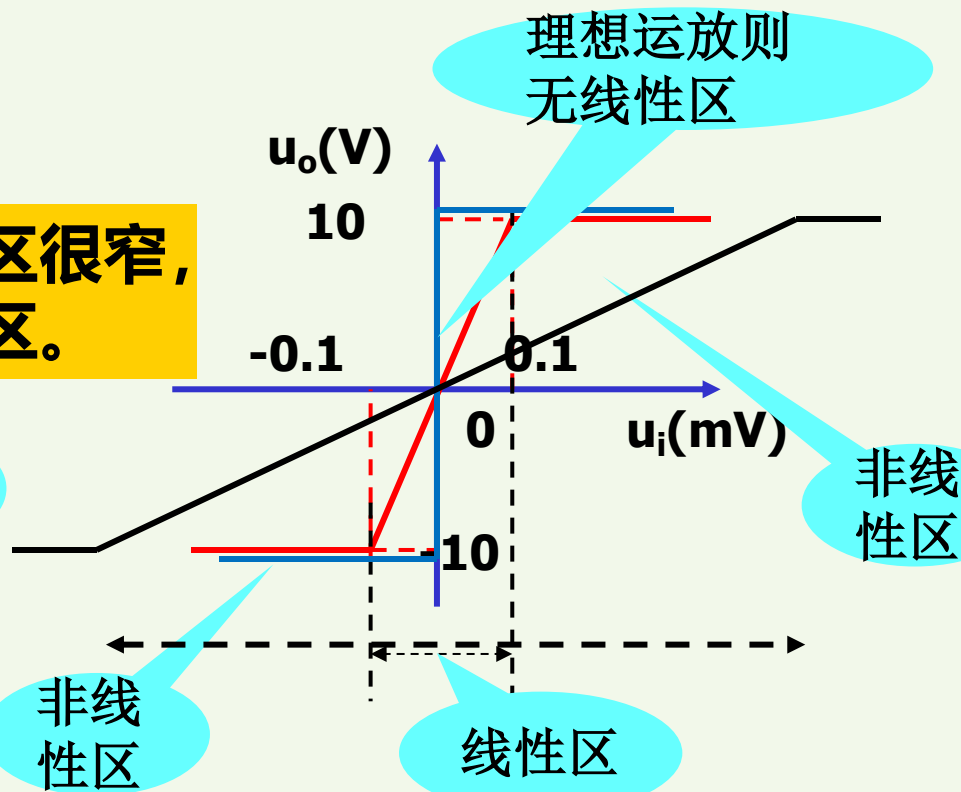


$$u_o = A_{od}(u_{i2} - u_{i1}) = A_{od} u_i$$

设运放  $A_{od} = 10^5$ ，最大输出电压  $U_{OM} = \pm 10V$

➤ 运放的传输特性  $u_o = f(u_i)$

**结论：**运放在开环状态下线性区很窄，即开环运放只能工作在非线性区。



如何使运放工作在线性区呢？

如何降低电压放大倍数呢？

降低电压放大倍数

引入负反馈

**结论：**运放工作在线性区的条件是在电路中加入一定深度的负反馈。





# 理想运放线性应用的两个特点

设 $U_+$ 与 $U_-$ 为运放同相端与反相端的电位

$$u_o = A_{od} (U_+ - U_-)$$

即:  $U_+ - U_- = u_o / A_{od}$

对于理想运放有 $A_{od} = \infty$ , 所以

$$U_+ = U_-$$

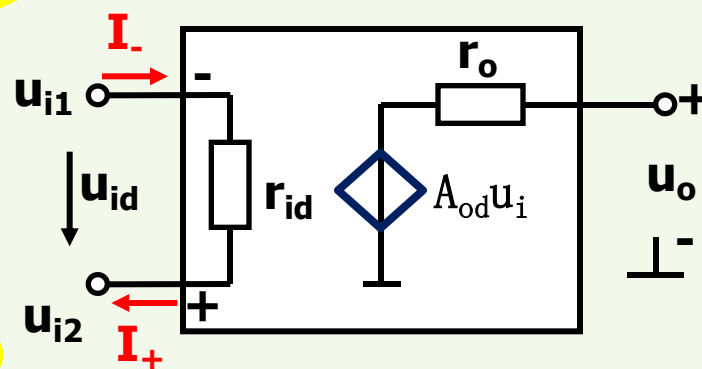
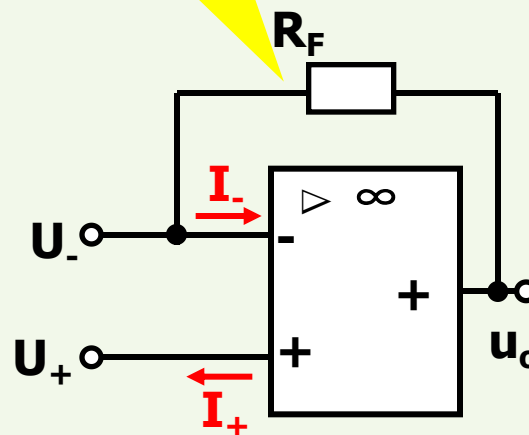
虚接  
(虚短)

对于理想运放有 $r_{id} = \infty$ , 所以

$$I_+ = I_- = 0$$

虚断

$R_F$ 引入  
负反馈



## 二、运放非线性应用的条件与特点

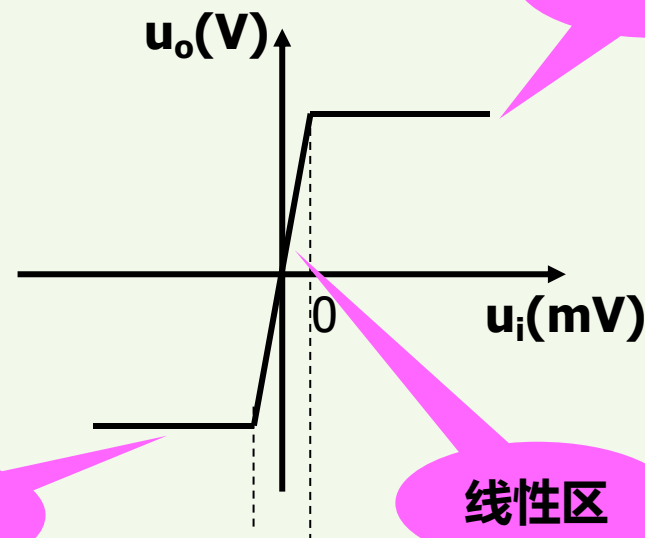
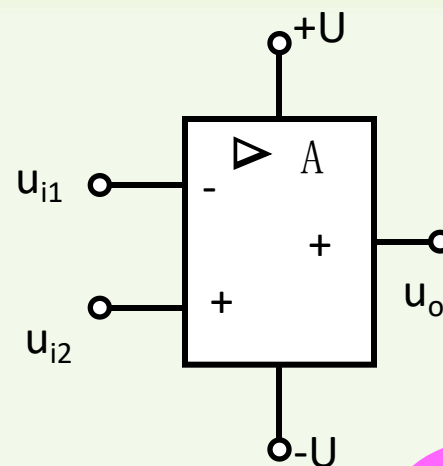
### ➤ 运放工作在非线性状态的条件

在图示运放电路中，有

$$u_o = A_{od}(u_{i2} - u_{i1}) = A_{od}u_i$$

开环状态 $A_{od}$ 非常大，线性区就会非常小；  
如果引入正反馈会使 $A_{od}$ 变得更大，线性  
工作区更窄。

**结论：集成运放的开环与正反馈工作是集成运放非线性应用的充分必要条件。**



传输特性图

## ➤ 运放工作在非线性状态下的两个特点

(1) 设 $+U_{OM}$ 与 $-U_{OM}$ 为运放输出的正、负最大值，有

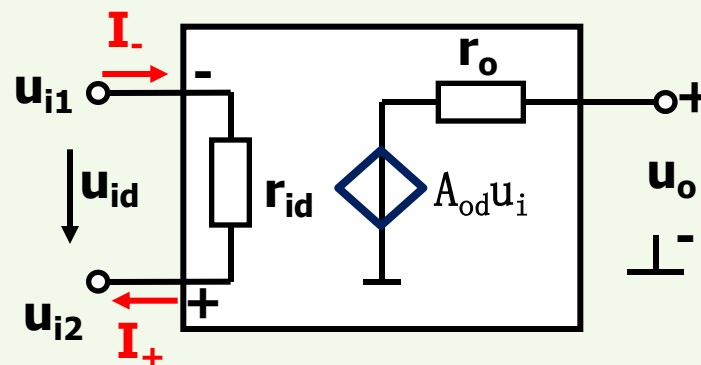
$$u_o = \begin{cases} +U_{OM} & \text{当 } u_+ > u_- \\ -U_{OM} & \text{当 } u_+ < u_- \end{cases}$$

注意：运放非线性应用时， $u_+ \neq u_-$

(2) 设 $I_+$ 与 $I_-$ 为运放同相输入端与反相输入端的电流，因为对于理想运放有 $r_{id} = \infty$ ，所以

$$I_+ = I_- = 0$$

虚断





# 课堂练习

## 第二节1, 2, 3, 4, 5





# 课程小结

## 1、差动放大电路

- 由两个左右结构、参数对称的放大电路组成，利用电路的**对称性**，将零漂完全抑制。

## 2、集成运算放大器

- 介绍了集成运算放大器的主要性能指标，包括开环差模电压放大倍数、差模输入、输出电阻和共模抑制比。
- 集成运放的两种工作状态：**线性与非线性**。

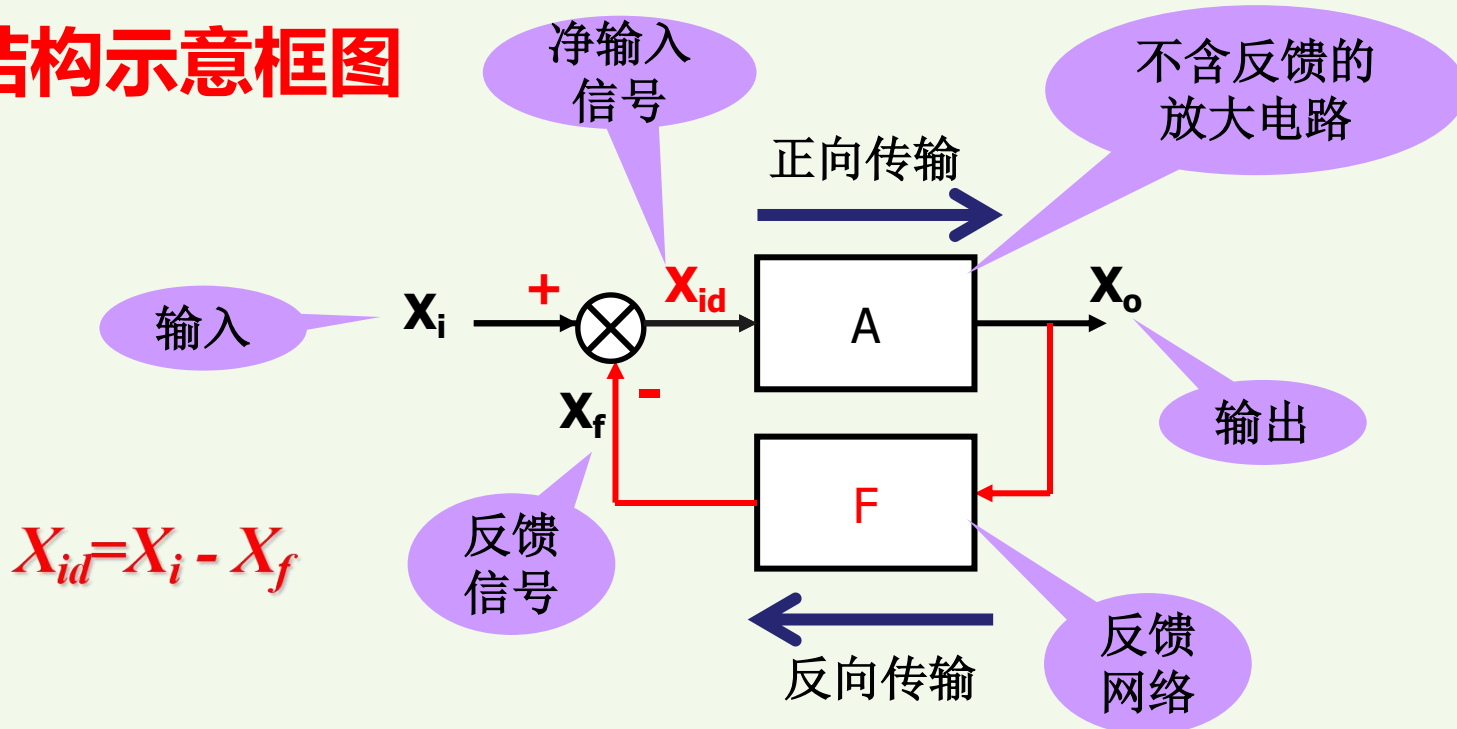
# 6.3 放大电路中的反馈



## 6.3.1 反馈的基本概念

将放大电路**输出量**（电压或电流）的一部分或全部，通过某种电路（称为**反馈网络**）**送回到输入回路**的过程。

### ➤ 反馈结构示意框图



## ◆ 反馈基本关系

1、开环放大倍数  $A$

$$A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}}$$

2、反馈系数  $F$

$$F = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

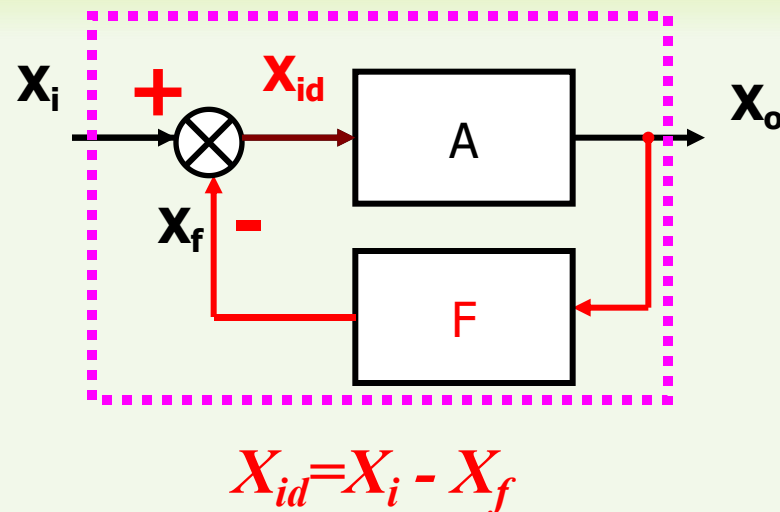
3、闭环放大倍数  $A_f$

$$A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$

$$A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id} + \dot{X}_f} = \frac{\dot{X}_o / \dot{X}_{id}}{1 + \dot{X}_f / \dot{X}_{id}} = \frac{\dot{X}_o / \dot{X}_{id}}{1 + \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \cdot \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}}}$$

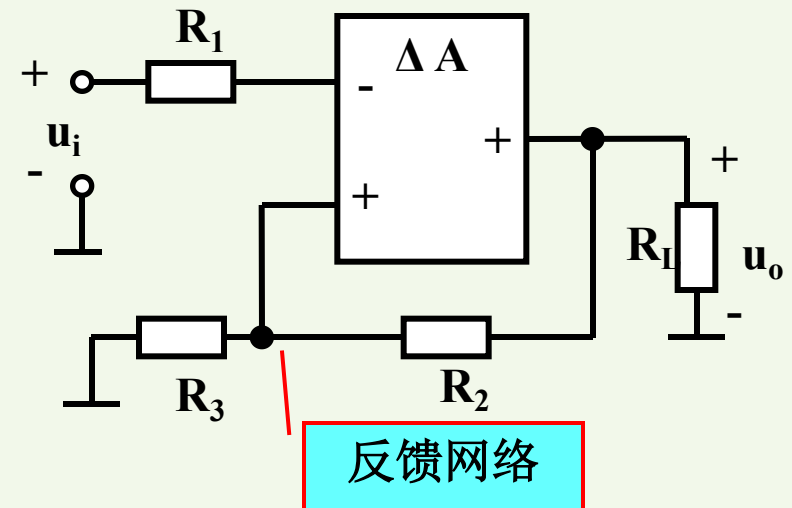
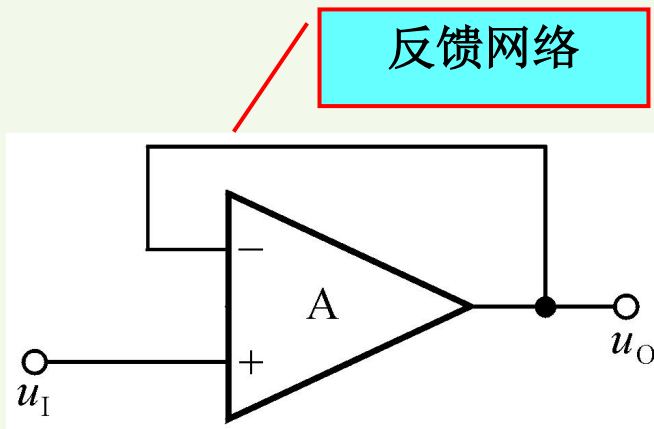
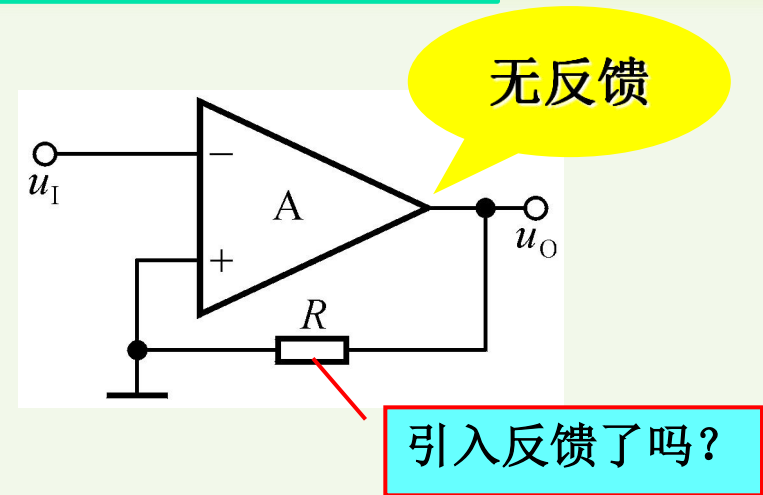
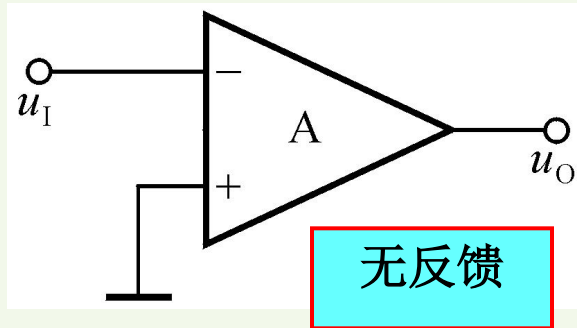
$$\therefore A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

分母为反  
馈深度



## 二、有无反馈的判断

输出回路与输入回路间是否存在反馈通路。







## 6.3.2 反馈的分类

- 反馈极性的分类
  - 正反馈
  - 负反馈
- 按反馈量中包含交、直流的成分
  - 交流反馈
  - 直流反馈
  - 交直流反馈
- 按反馈在输入端连接方式
  - 串联反馈
  - 并联反馈
- 按反馈在输出端取样方式
  - 电压反馈
  - 电流反馈



# (一) 直流反馈和交流反馈

➤ 按反馈量中包含交、直流的成分

直流反馈：反馈量中只含有**直流成分**

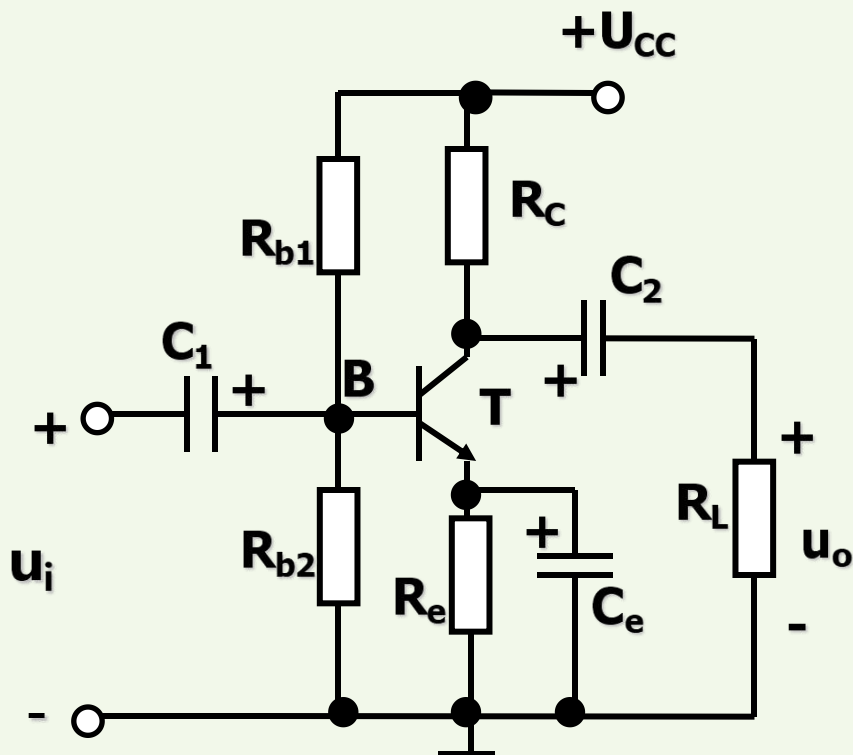
交流反馈：反馈量中只含有**交流成分**

交直流反馈：反馈量中同时含有**交流成分**和**直流成分**

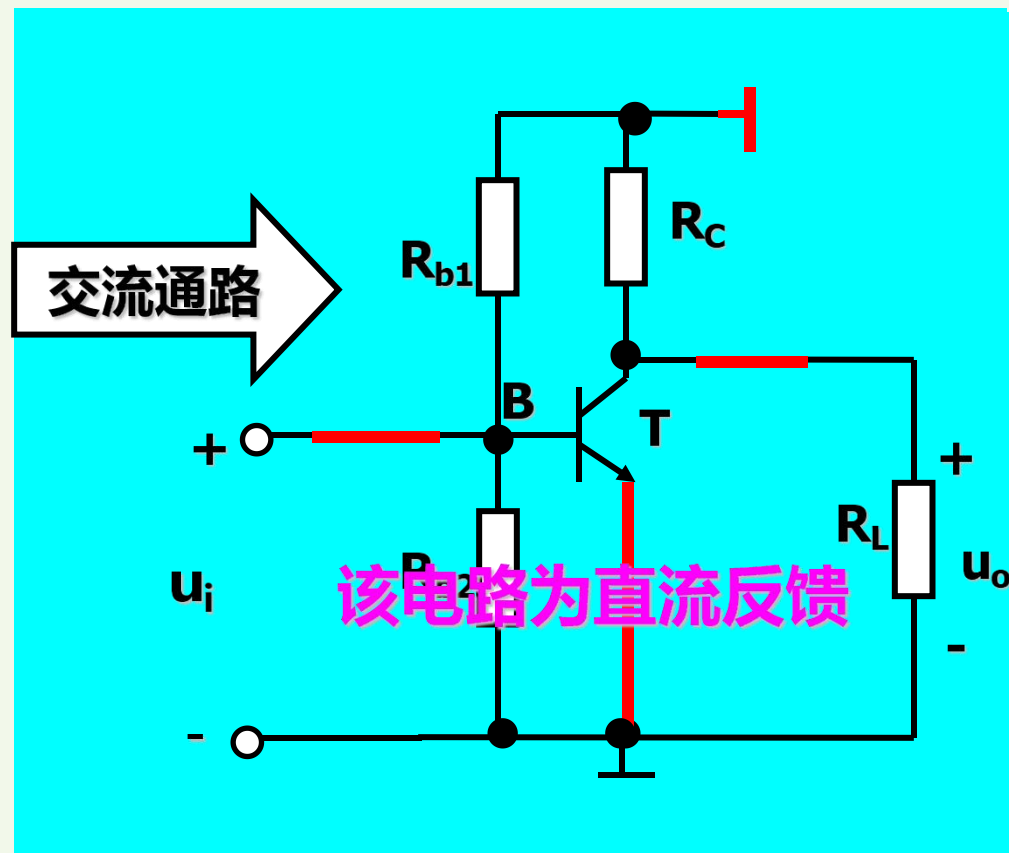
**判断方法：“看通路”**

即交流通路和直流通路中有无反馈通路

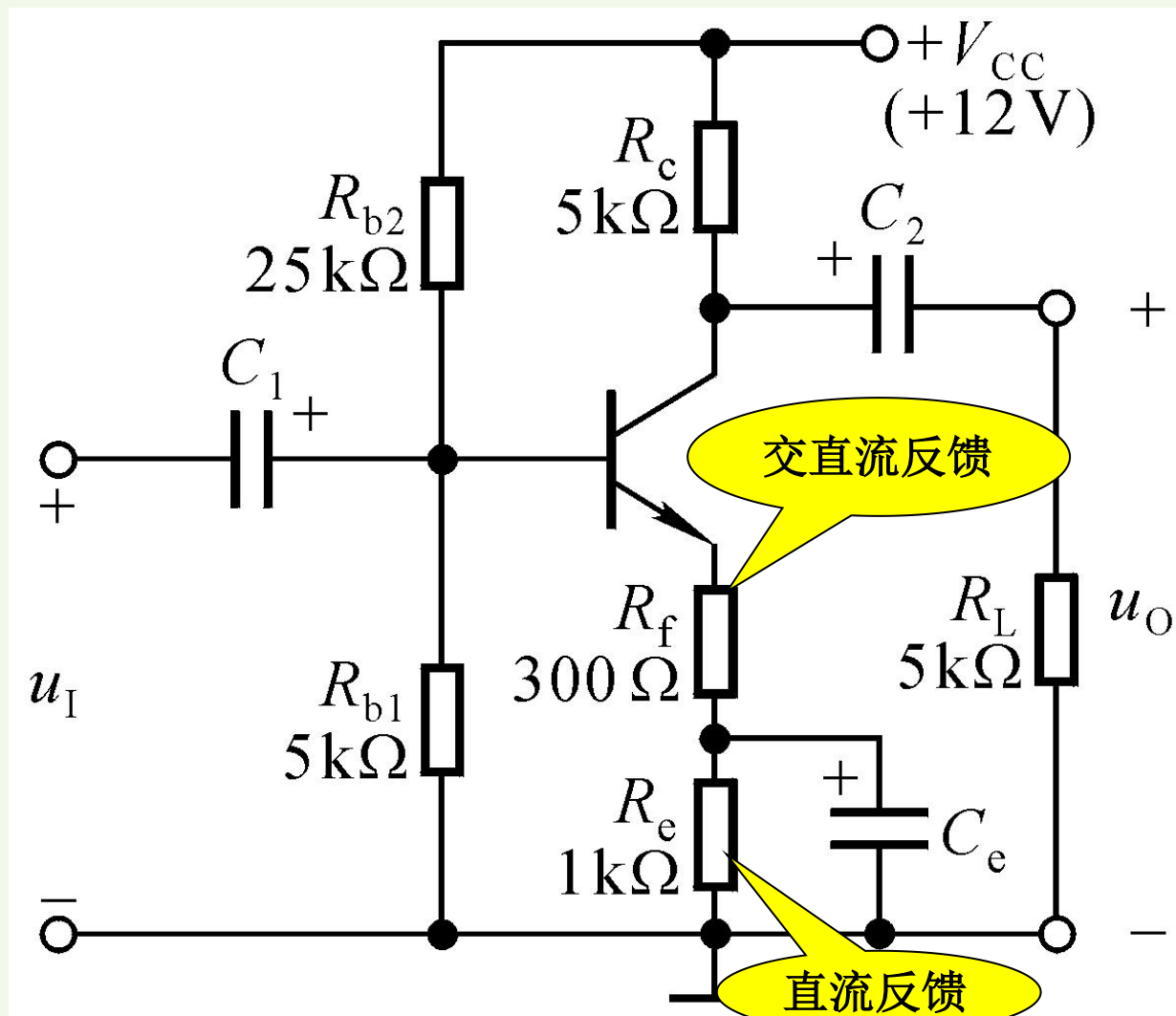
# 交直流反馈的判断



$R_e$ 与 $C_e$ 构成反馈网络

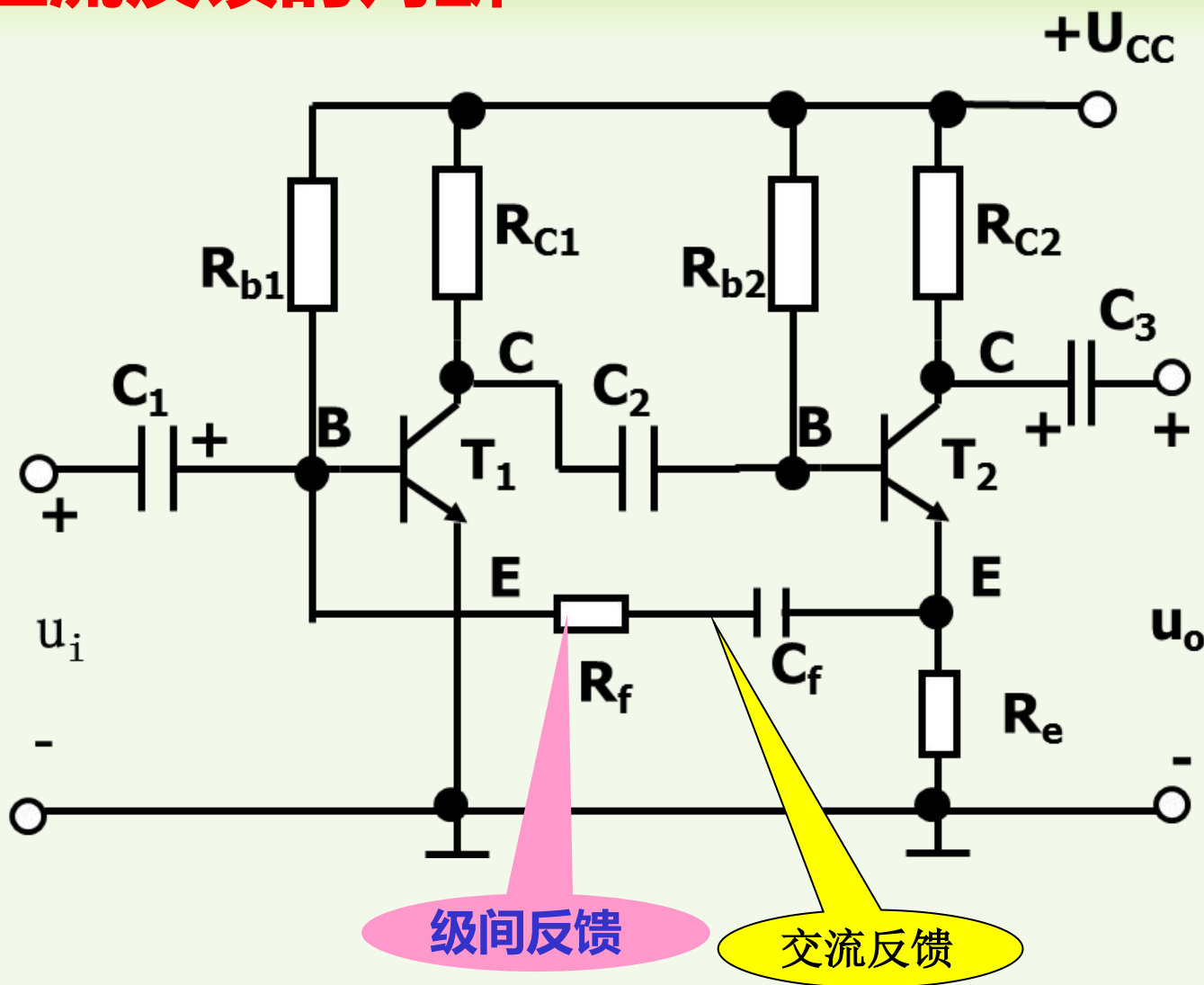


# 交直流反馈的判断

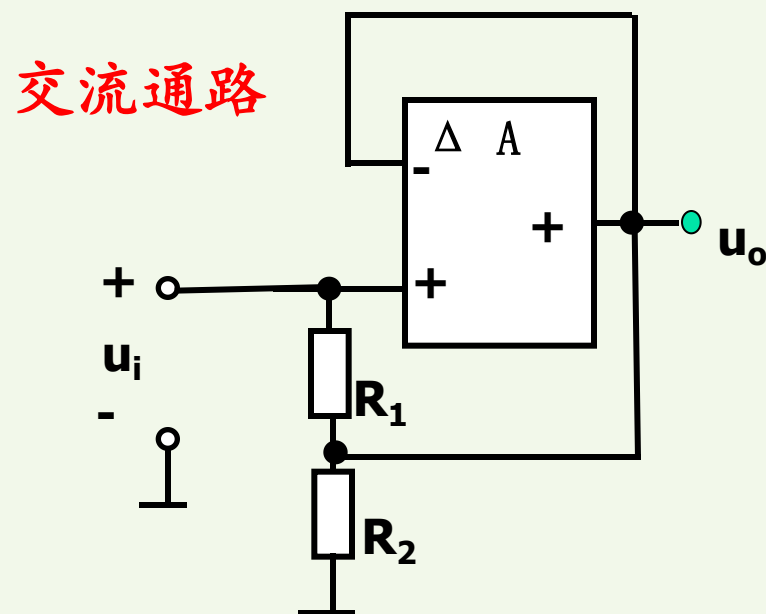
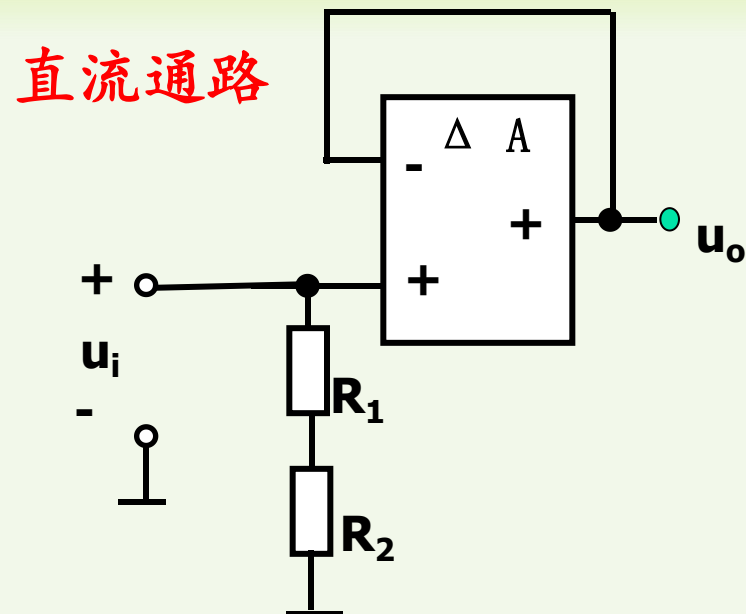
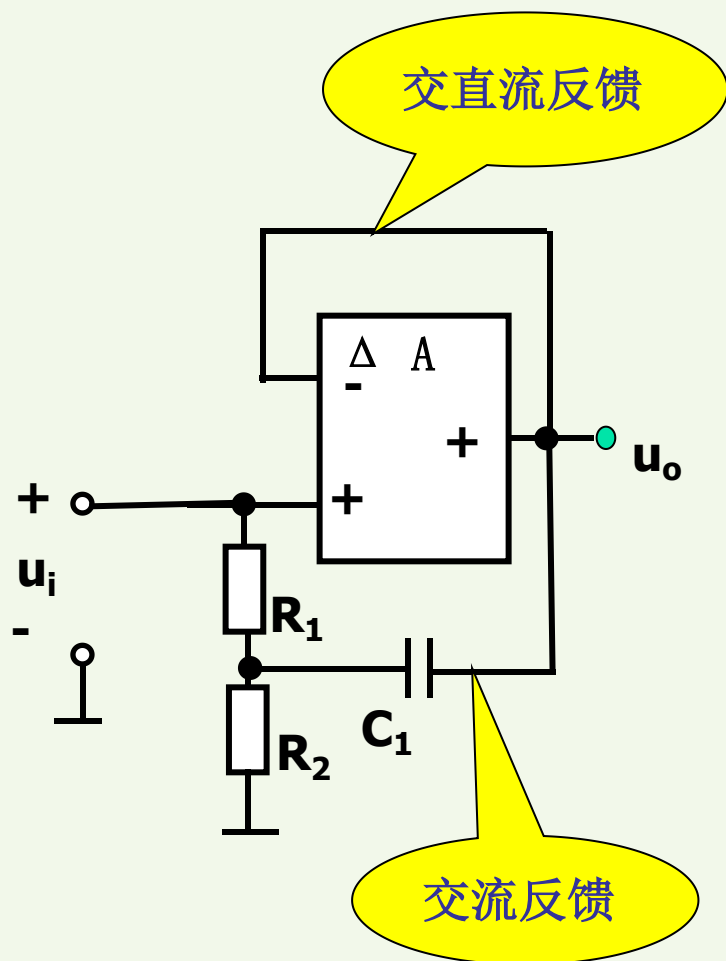




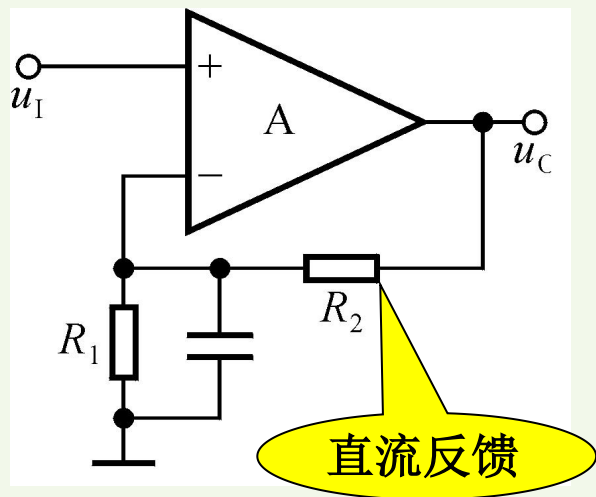
# 交直流反馈的判断



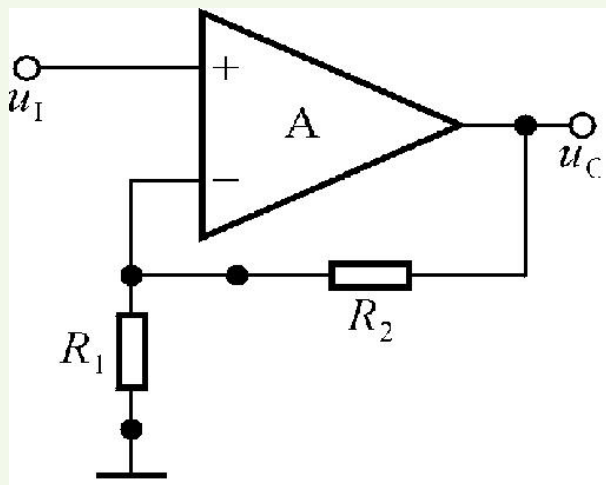
# 交直流反馈的判断



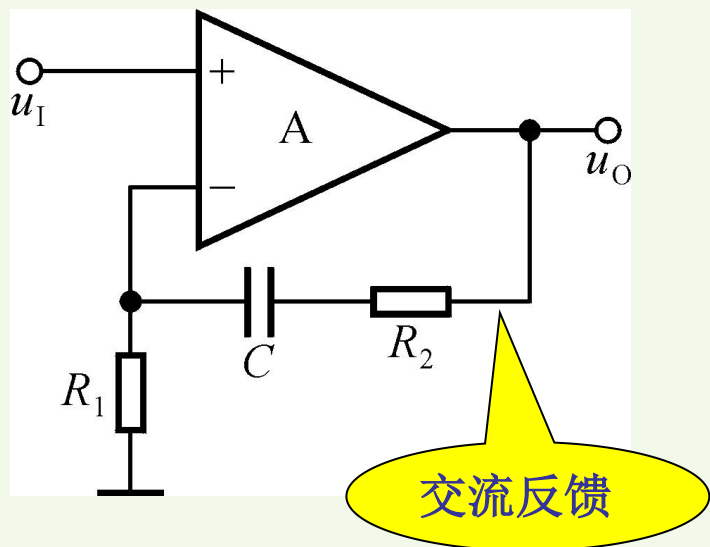
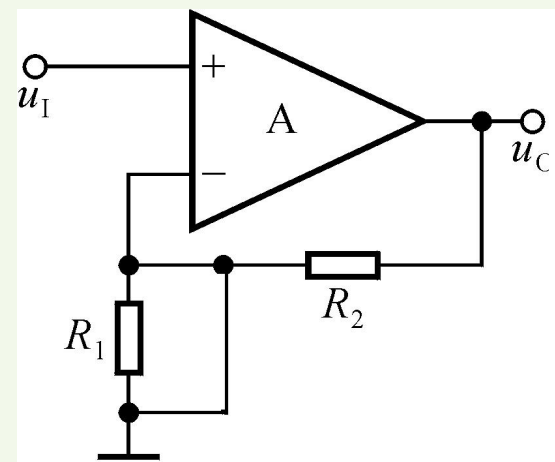
# 交直流反馈的判断



直流通路

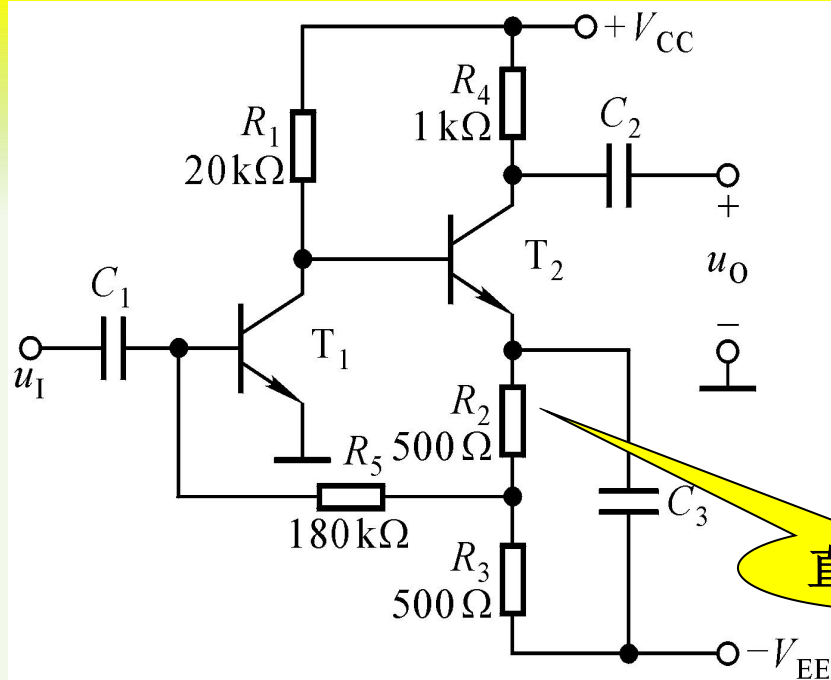


交流通路

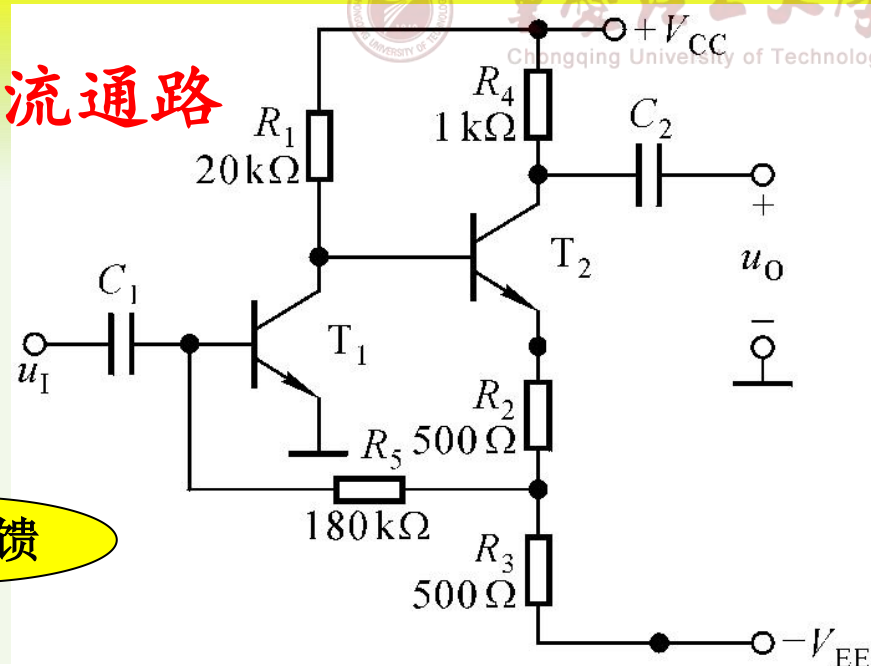


找同学回答！！

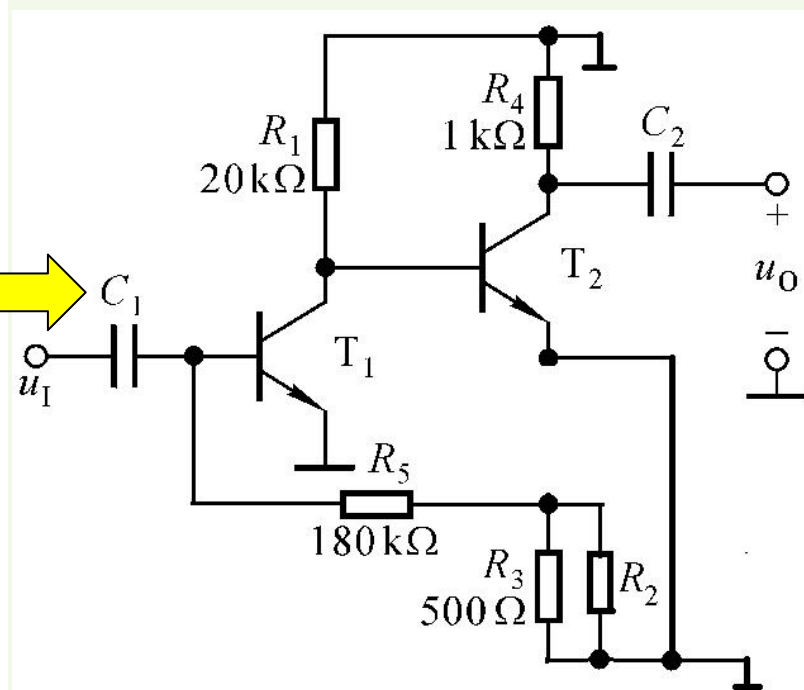
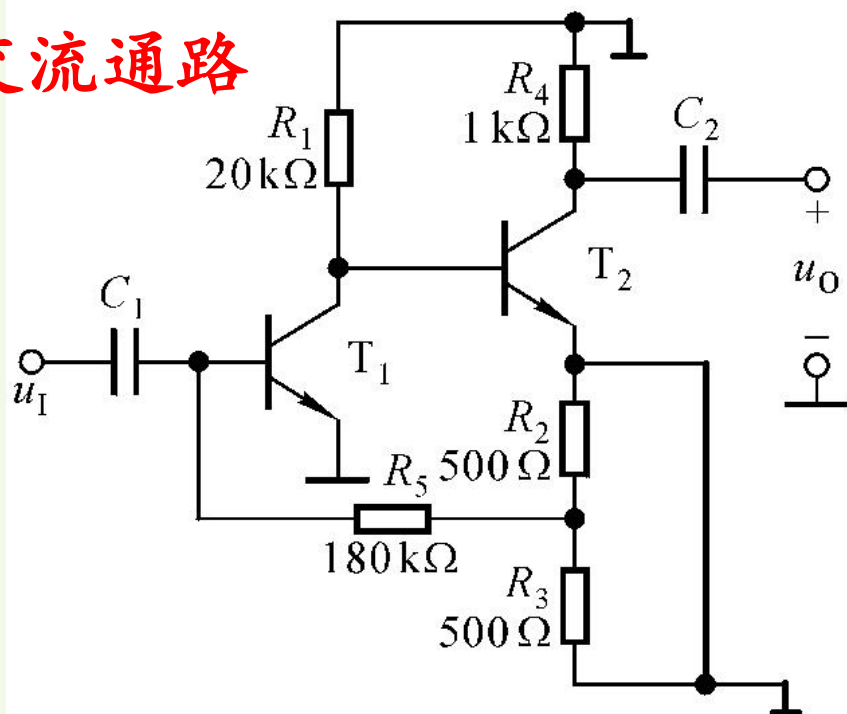




直流通路



交流通路



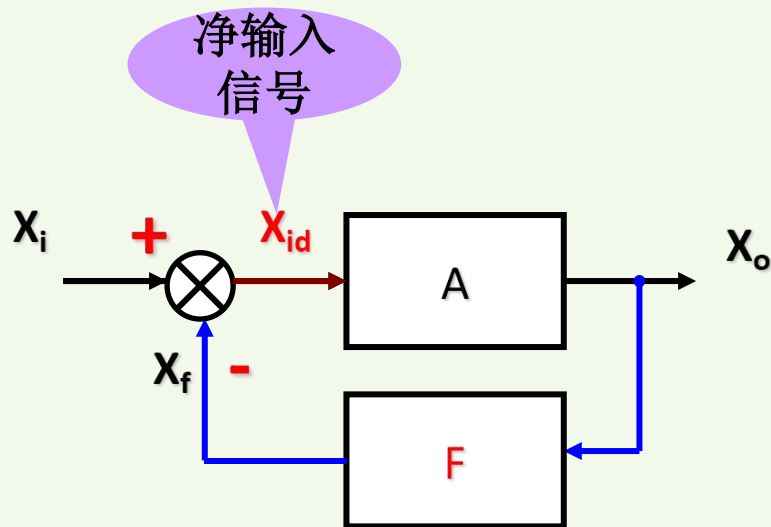


## (二) 反馈的极性

负反馈(*negative feedback*) ---使净输入减小

正反馈(*positive feedback*) ---使净输入增大

判断正负反馈的依据就是看引入反馈后净输入信号是增大了还是减小了。



$$X_{id} = X_i - X_f$$



## 反馈极性的判断：瞬时极性法

### ◆ “瞬时极性法” 判断反馈极性的步骤

设输入端的瞬时极性为 “+”



判断反馈信号的瞬时极性



判断净输入量的变化

若加入反馈后净输入量**增大**，则为**正反馈**

若加入反馈后净输入量**减小**，则为**负反馈**

注意：若反馈信号与输入信号**不是同一端口**，则用**电压**的增减来判断反馈极性；反之，若反馈信号与输入信号在**同一端口**，则用**电流**的增减来判断反馈极性。

# 反馈极性的判断举例

## 例1：判断图示放大电路的反馈极性

解：“瞬时极性法”判断

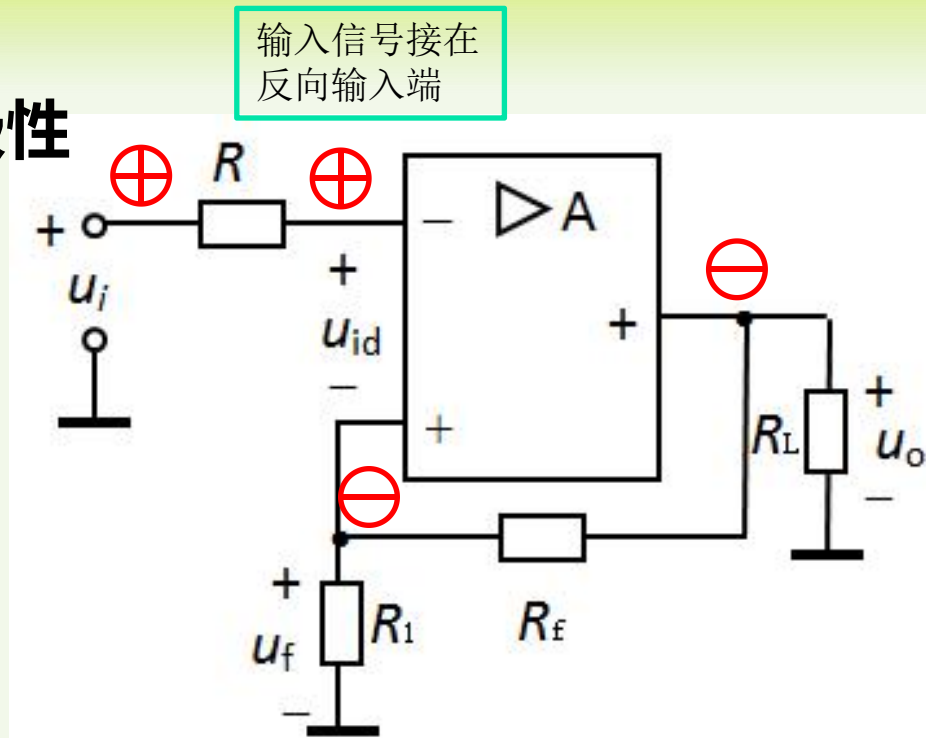
(1) 在输入端加 “+” 极性

(2) 判断净输入信号的变化

净输入电压  $u_{id} = u_i - u_f$

加反馈后净输入电压变大了，所以该反馈为**正反馈**

※规律：对单级运放，若通过纯电阻网络将反馈引到**同相输入端**则为**正反馈**。



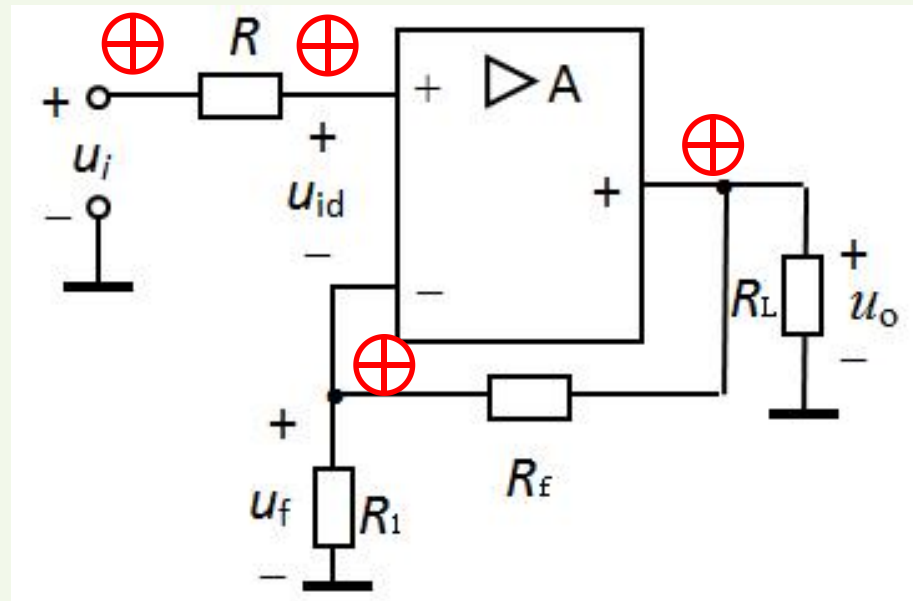
## 例2：判断图示放大电路的反馈极性

解：用“瞬时极性法”判断

(1) 在输入端加 “+” 极性

(2) 判断净输入信号的变化

净输入电压  $u_{id} = u_i - u_f$



加反馈后净输入电压减小，所以该反馈为负反馈

规律：对单级运放，若通过纯电阻网络将反馈引到反相输入端则为负反馈。

### 例3：判断图示放大电路的反馈极性

解：用“瞬时极性法”判断

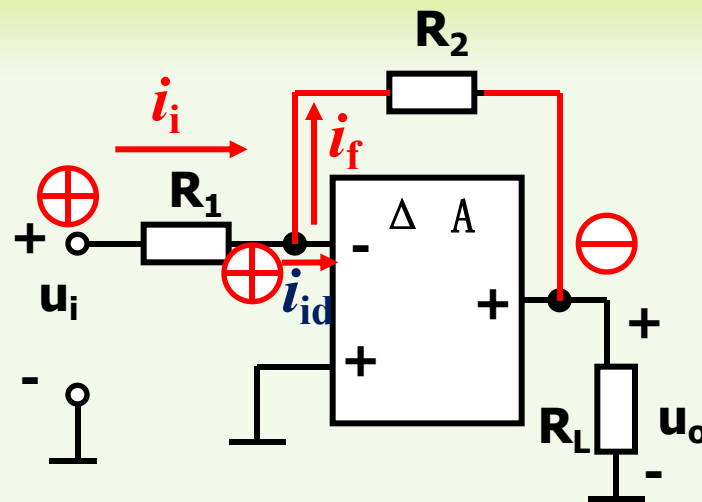
设输入端的瞬时极性为“+”



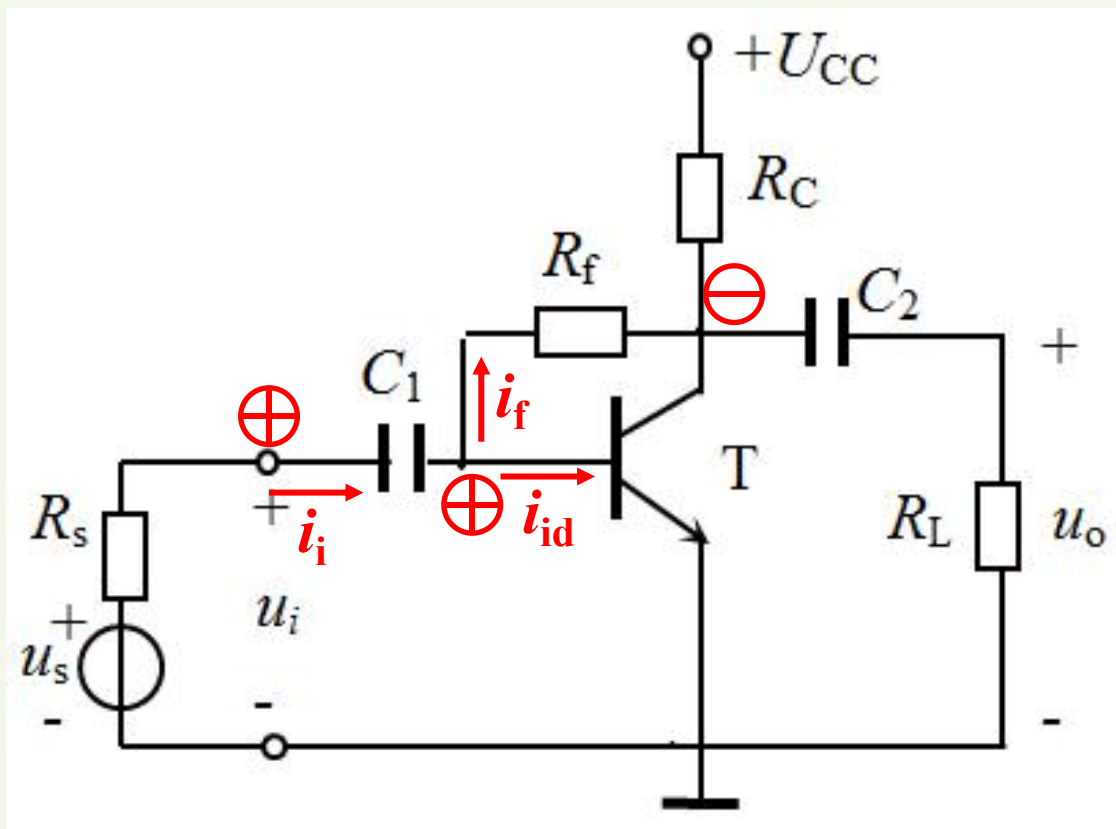
判断净输入量的变化

净输入电流  $i_{id} = i_i - i_f$

加反馈后净输入电流减小，所以该反馈为负反馈



## 例4：判断图示放大电路的反馈极性。



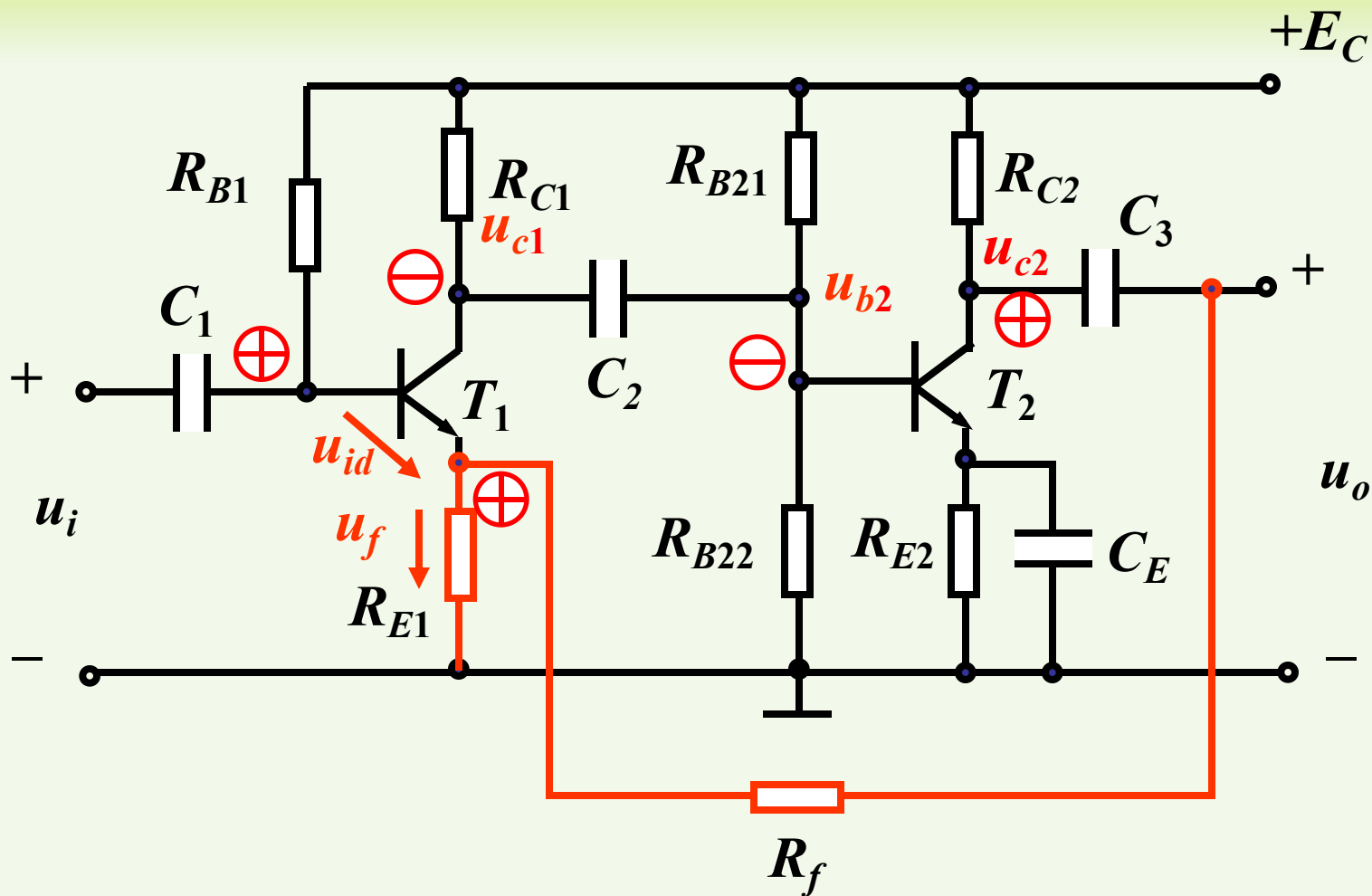
净输入电流

$$i_{id} = i_i - i_f$$

加反馈后净输入电流减小，所以该反馈为负反馈



**例5：判断 $R_f$ 引入的反馈极性。**



净输入电压

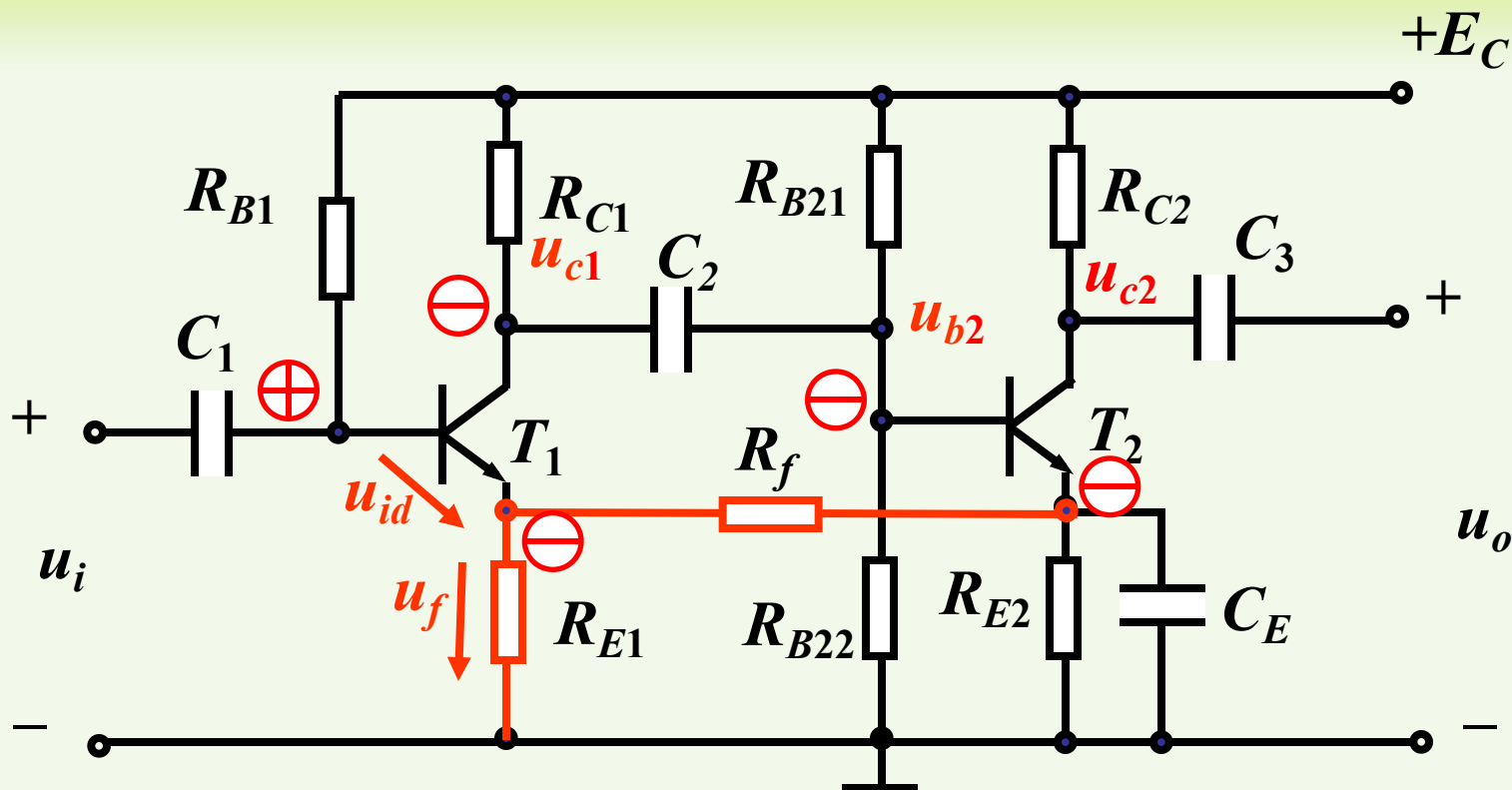
$$u_{id} = u_i - u_f$$

变小

负反馈



## 例6：判断 $R_f$ 引入的反馈极性。



净输入电压

$$u_{id} = u_i - u_f$$

变大

正反馈

找同学回答！！







# 课堂练习

## 第三节1, 2, 3





## (三) 反馈的组态(*topologies*)

反馈所取  
输出信号  
可以是电  
压或电流

按所取  
信号

电压型反馈

电流型反馈

反馈在输  
入端的叠  
加信号可  
以是电压  
或电流

按叠加  
信号

串联型反馈 ---- 信号以电压形式叠加

并联型反馈 ---- 信号以电流形式叠加

反馈的  
组态

电压串联型反馈(*Series-shunt*)

电压并联型反馈(*Shunt-shunt*)

电流串联型反馈(*Series-series*)

电流并联型反馈(*shunt-Series*)

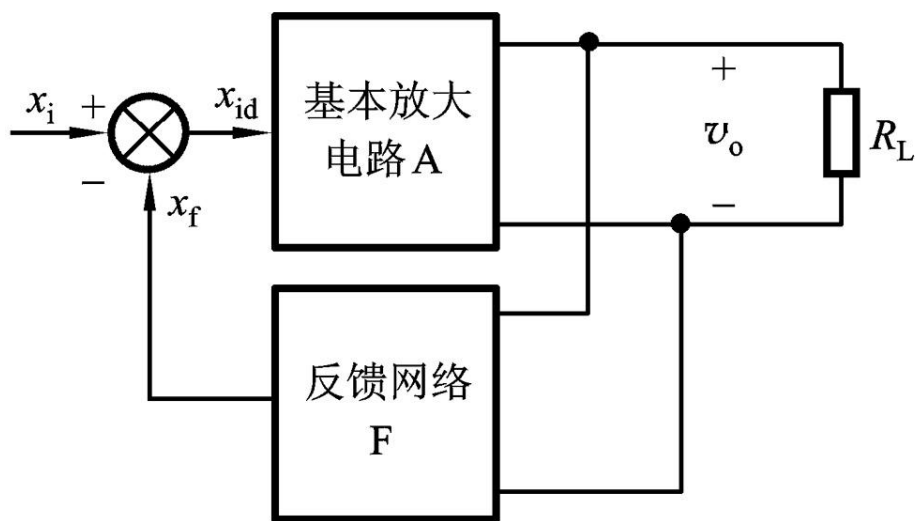


按输出端取样对象

**电压型反馈**：反馈信号取自于**输出电压**

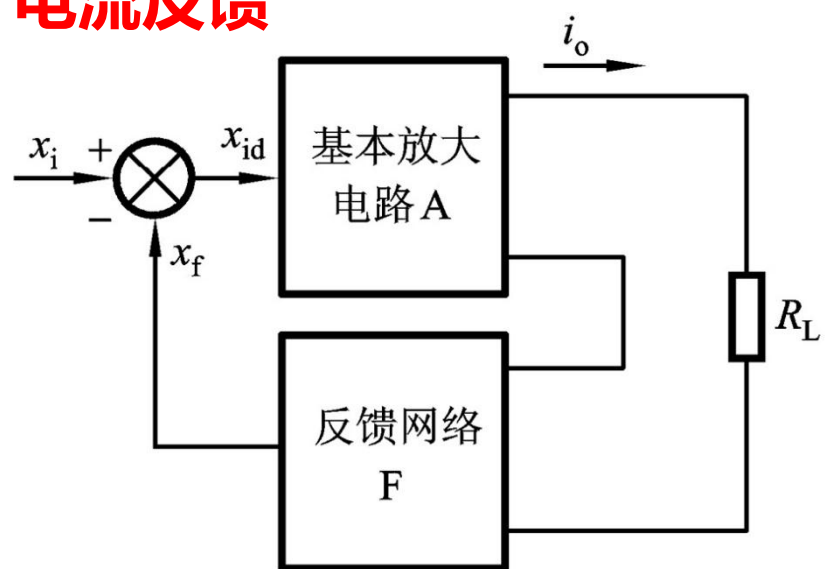
**电流型反馈**：反馈信号取自于**输出电流**

## 电压反馈



反馈信号 $x_f$ 和输出电压成比例，  
即 $x_f = Fv_o$

## 电流反馈



反馈信号 $x_f$ 与输出电流成比例，  
即 $x_f = Fi_o$

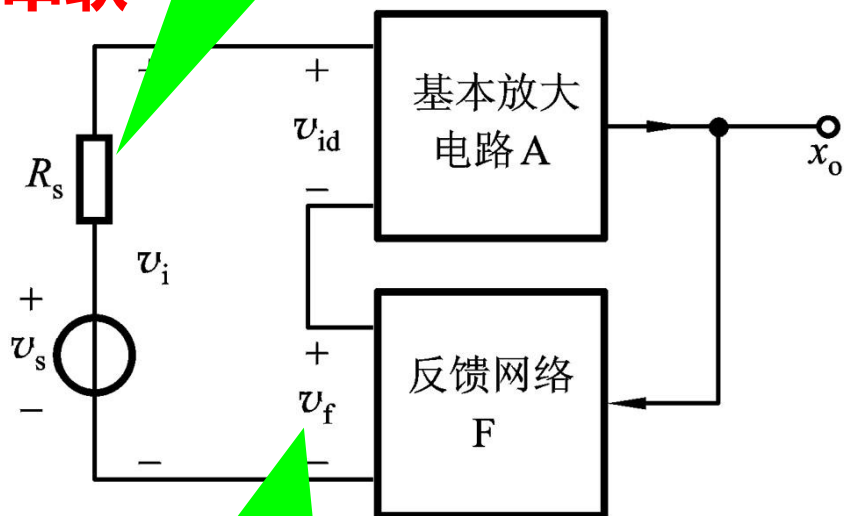
按反馈信号在输入端连接方式

**串联型反馈** ---- 信号以电压形式叠加

**并联型反馈** ---- 信号以电流形式叠加

为加强反馈效果，信号源内阻要尽量小。

**串联**

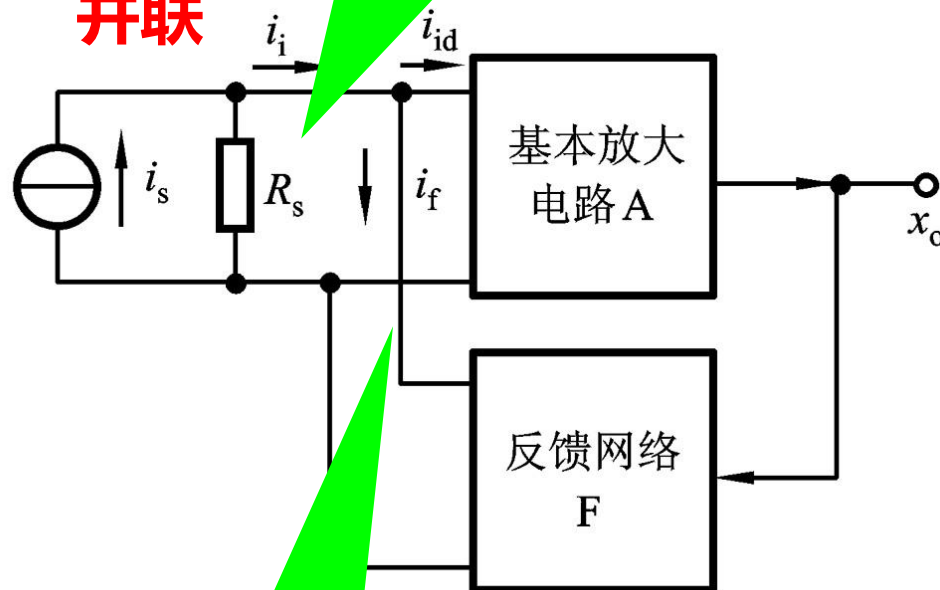


反馈信号在输入回路中以电压形式叠加

$$v_{id} = v_i - v_f$$

为加强反馈效果，信号源内阻要尽量大。

**并联**



反馈信号在输入回路中以电流形式叠加

$$i_{id} = i_i - i_f$$



## 交流负反馈的四种组态

**输入端：**反馈网络在放大电路输入端的连接分为**串联**和**并联**两种方式。

**输出端：**反馈信号在输出端分为**电压取样**和**电流取样**两种方式。

由此可组成四种组态：

**电压串联型反馈**

**电压并联型反馈**

**电流串联型反馈**

**电流并联型反馈**



## ◆ 电压、电流反馈的判断

输出短路法

将负载短接

令  $u_o = 0$

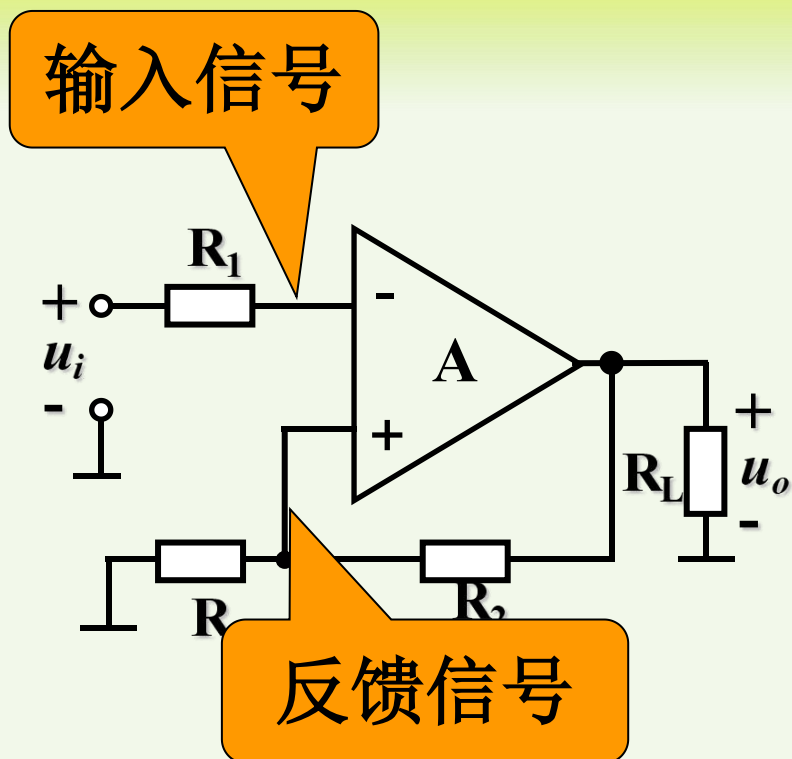
若反馈消失，则为电压型反馈

若反馈仍存在，则为电流型反馈

## ◆ 串联反馈与并联反馈的判断方法

输入信号和反馈信号接到输入端的**同一个电极上**—— **并联反馈**

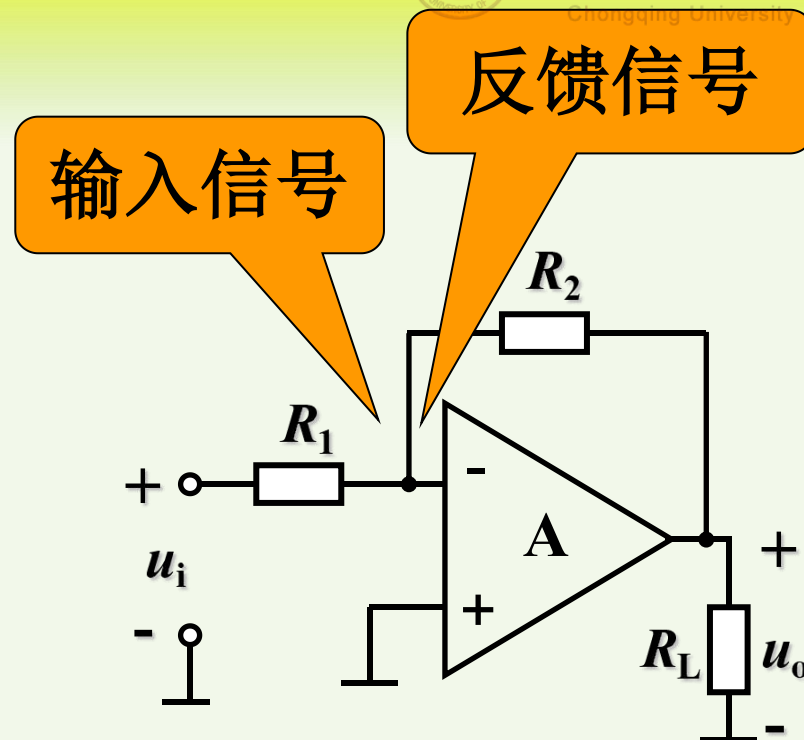
输入信号和反馈信号接到输入端的**不同电极上**—— **串联反馈**。



串联反馈

令  $u_o=0$ ，反馈消失

电压反馈



并联反馈

令  $u_o=0$ ，反馈消失

电压反馈



## 例1：判断图示放大电路的反馈组态

### (1) 用“瞬时极性法”判断反馈极性

加反馈后净输入电压减小，  
所以为负反馈

### (2) “输出短路法”判断反馈 输出端组态

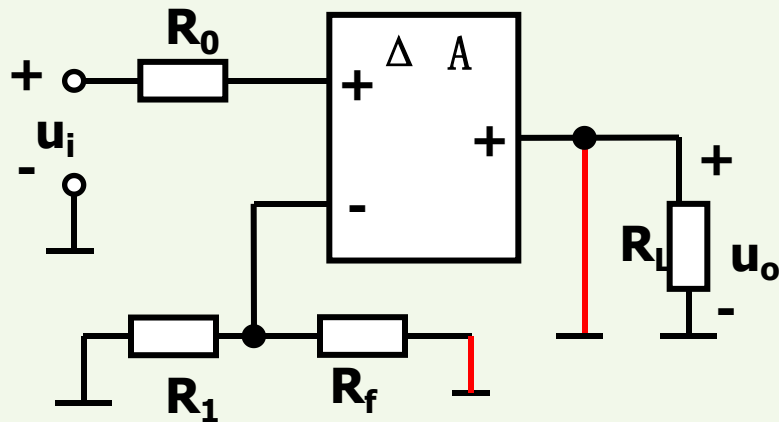
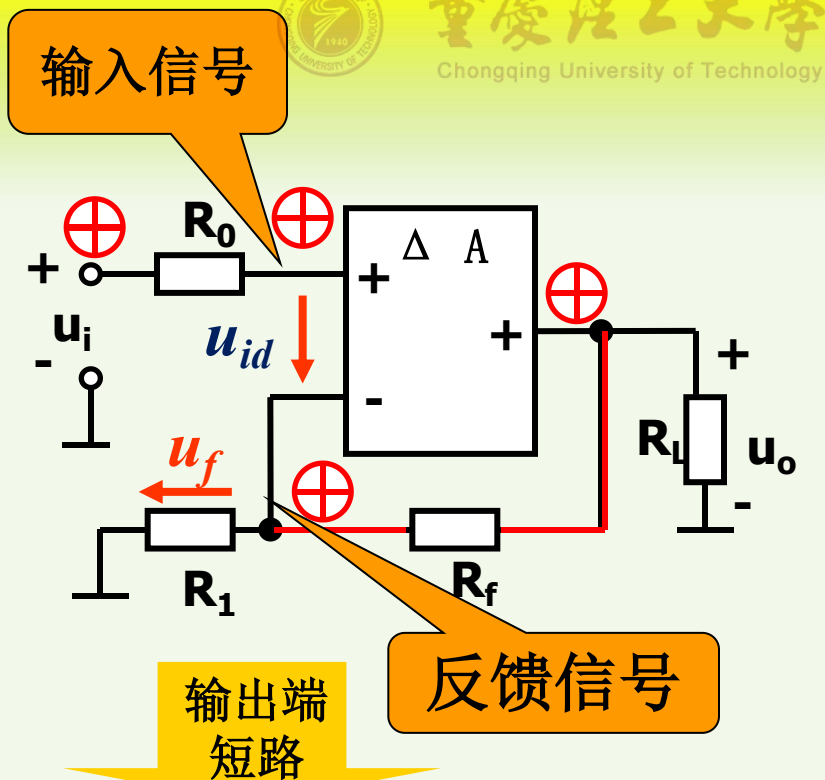
令 $u_o=0$ ，反馈消失，则为电压反馈

### (3) 判断反馈输入端组态

因为反馈信号与输入信号接在  
输入的两个端钮，为串联反馈

**结论：电压串联型负反馈**

注意：反馈电路与输入信号接在一起  
时分析电流，反之分析电压。







## 例2：判断图示放大电路的反馈组态

### (1) 判断反馈极性

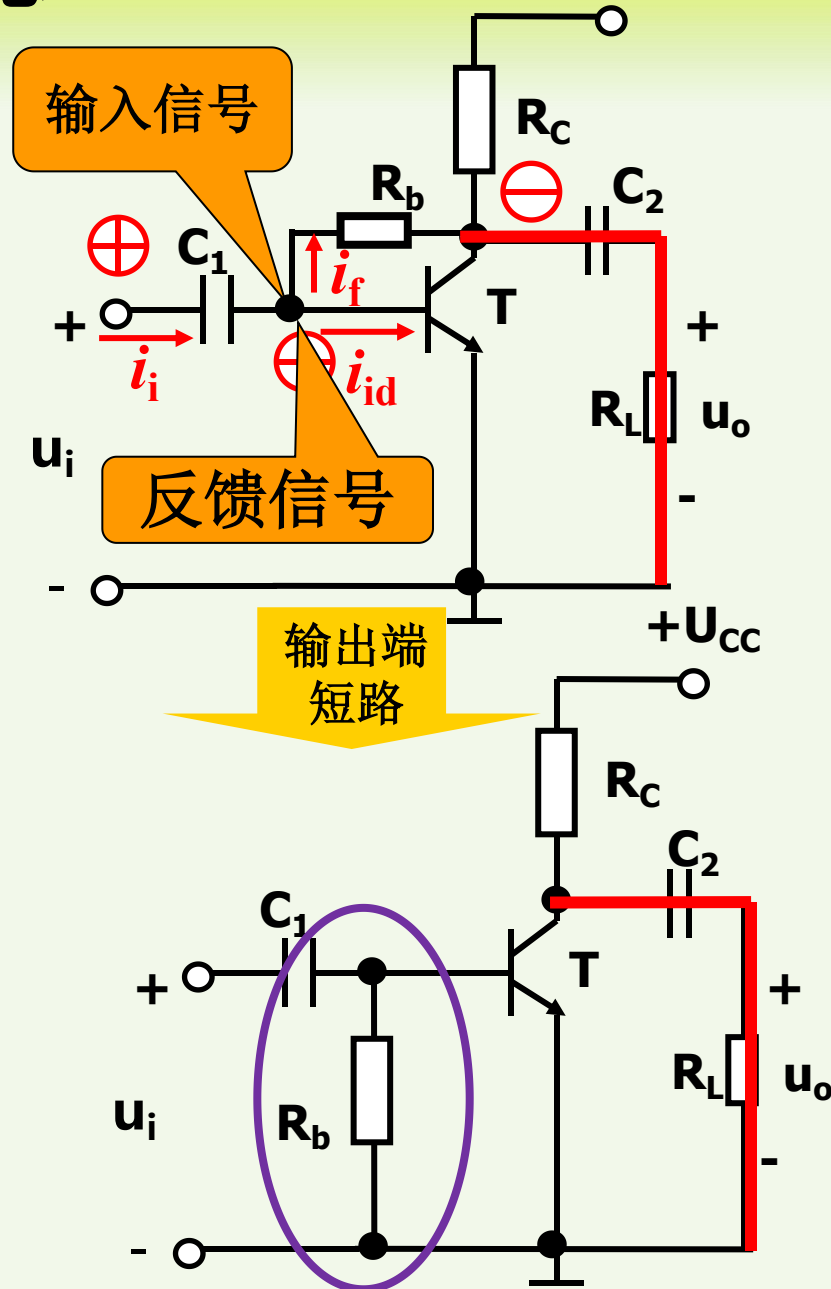
加反馈后净输入电流减小，  
所以该反馈为负反馈

### (2) 判断反馈输出端组态

令 $u_o=0$ ，反馈消失，则为电压型。

(3) 因为反馈信号与输入  
信号接在输入的同一段，  
则为并联反馈

结论：电压并联型负反馈



### 例3：判断图示放大电路的反馈组态



#### (1) 判断反馈极性

加反馈后净输入电压减小，所以该反馈为负反馈

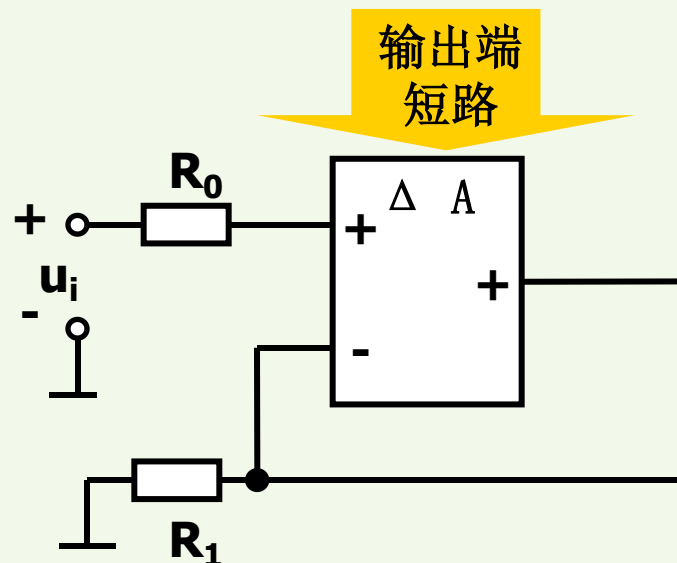
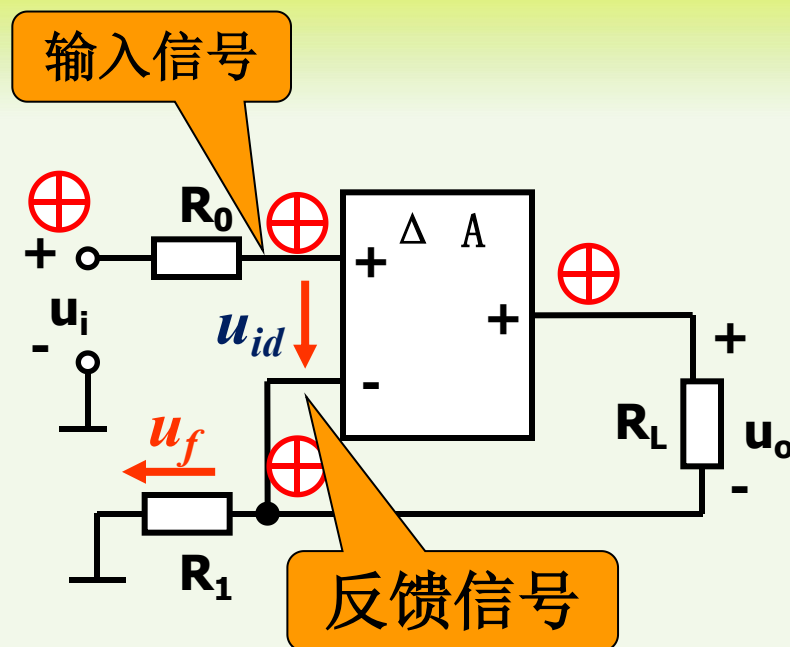
#### (2) 判断反馈输出端组态

令 $u_o=0$ ，反馈仍存在，为电流反馈

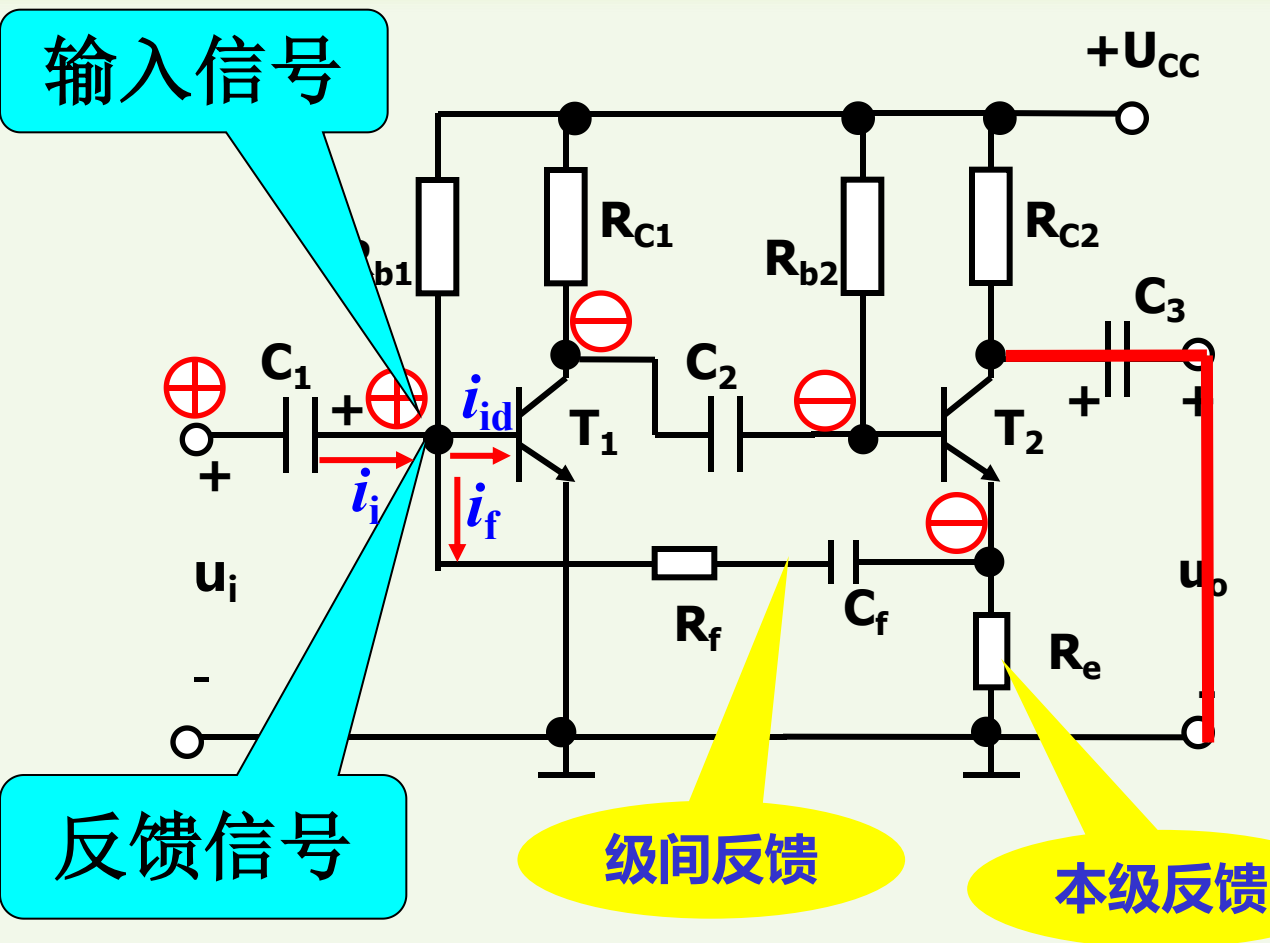
#### (3) 判断反馈输入端组态

反馈信号与输入信号接在输入的两个端钮，则为串联反馈

结论：电流串联型负反馈



## 例4：判断图示放大电路级间反馈的组态。



(1) 判断反馈极性  
**负反馈**

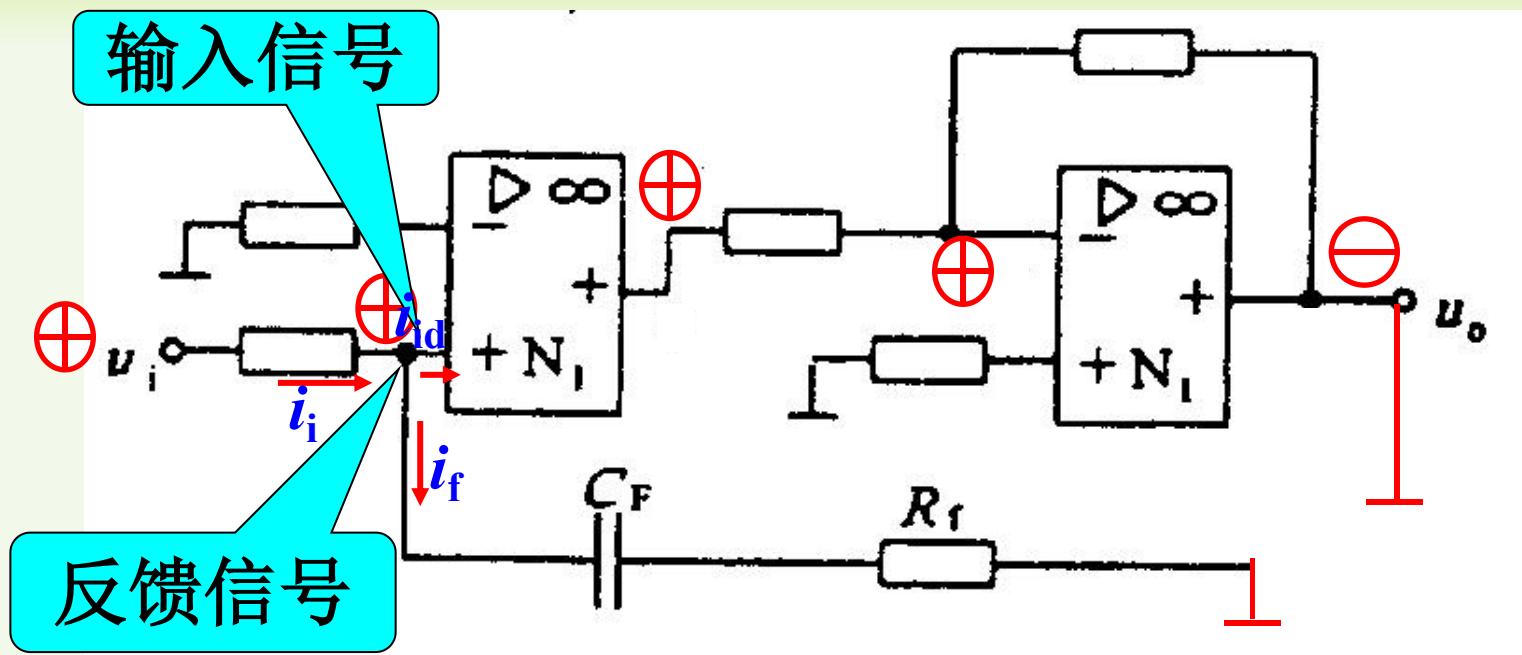
(2) 判断反馈组态

令  $u_o = 0$ ，反馈仍存在，  
为**电流反馈**。

反馈信号与输入信号  
接在**同一个端钮**，为  
**并联反馈**。

**结论：电流并联型负反馈**

## 例5：判断图示放大电路 $R_f$ 的反馈极性及其组态



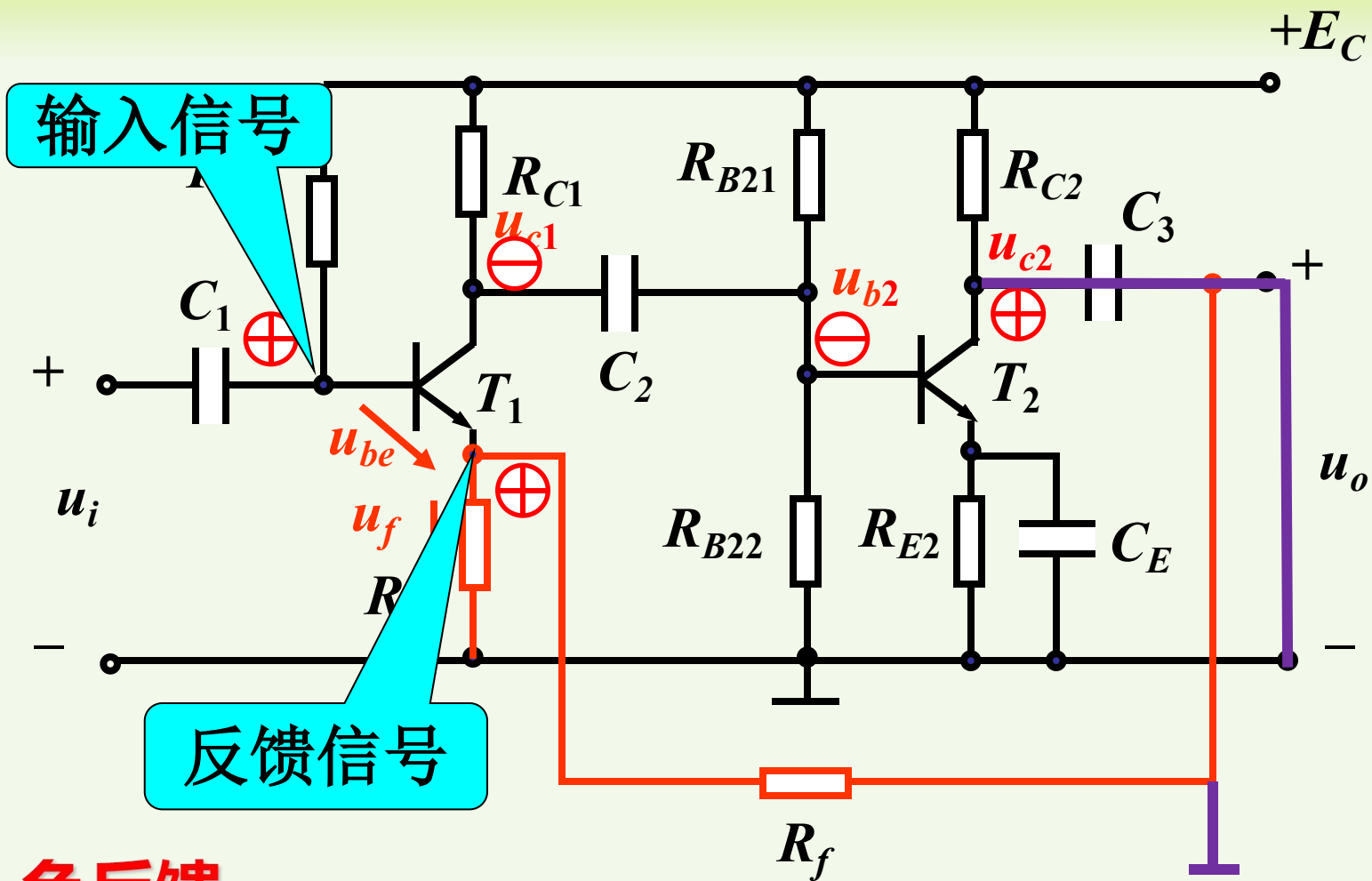
(1) 反馈极性的判断      **负反馈**

(2) 反馈组态的判断      令  $u_o = 0$ ，**反馈消失**，为**电压反馈**

**结论：电压并联型负反馈**



**例6：**判断 $R_f$ 是否负反馈，若是，判断反馈的组态。

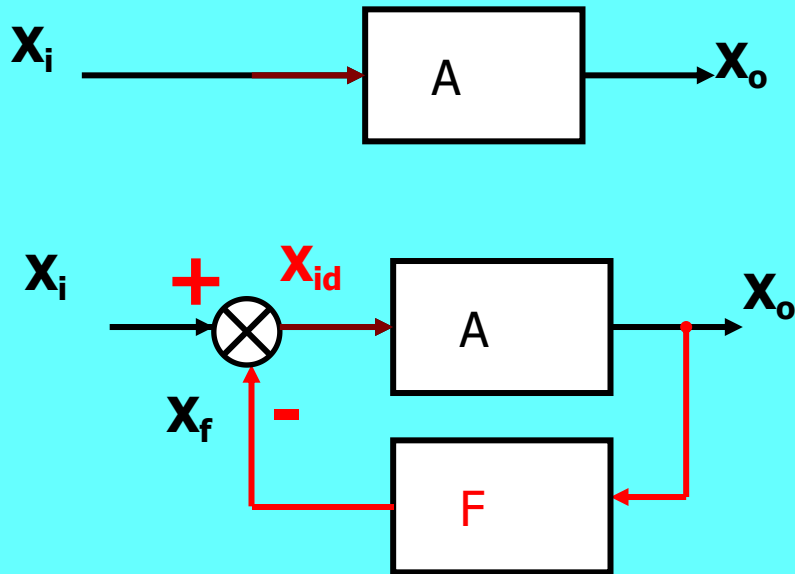




## 6.3.3 交流负反馈对放大电路性能的影响

### 1. 降低放大倍数

负反馈使得 $X_{id}$ 减小，在相同输入 $X_i$ 下，输出 $X_o$ 减小了



$$\therefore |A_f| < |A|$$

反馈的基本关系：

$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

定义： $|1 + AF|$ 为反馈深度

负反馈  $|1 + AF| > 1$

## 2.提高放大倍数的稳定性

开环放大倍数的  
相对变化量

闭环放大倍数的  
相对变化量

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad \Rightarrow \quad \frac{d|A_f|}{|A_f|} = \frac{1}{|1 + AF|} \cdot \frac{d|A|}{|A|}$$

负反馈  $|1+AF| > 1$

$$\therefore \frac{d|A_f|}{|A_f|} < \frac{d|A|}{|A|}$$

**引入负反馈使放大倍数的稳定性提高。**

当  $|1+AF| \gg 1$  时，称放大电路具有**深度负反馈**，此时：

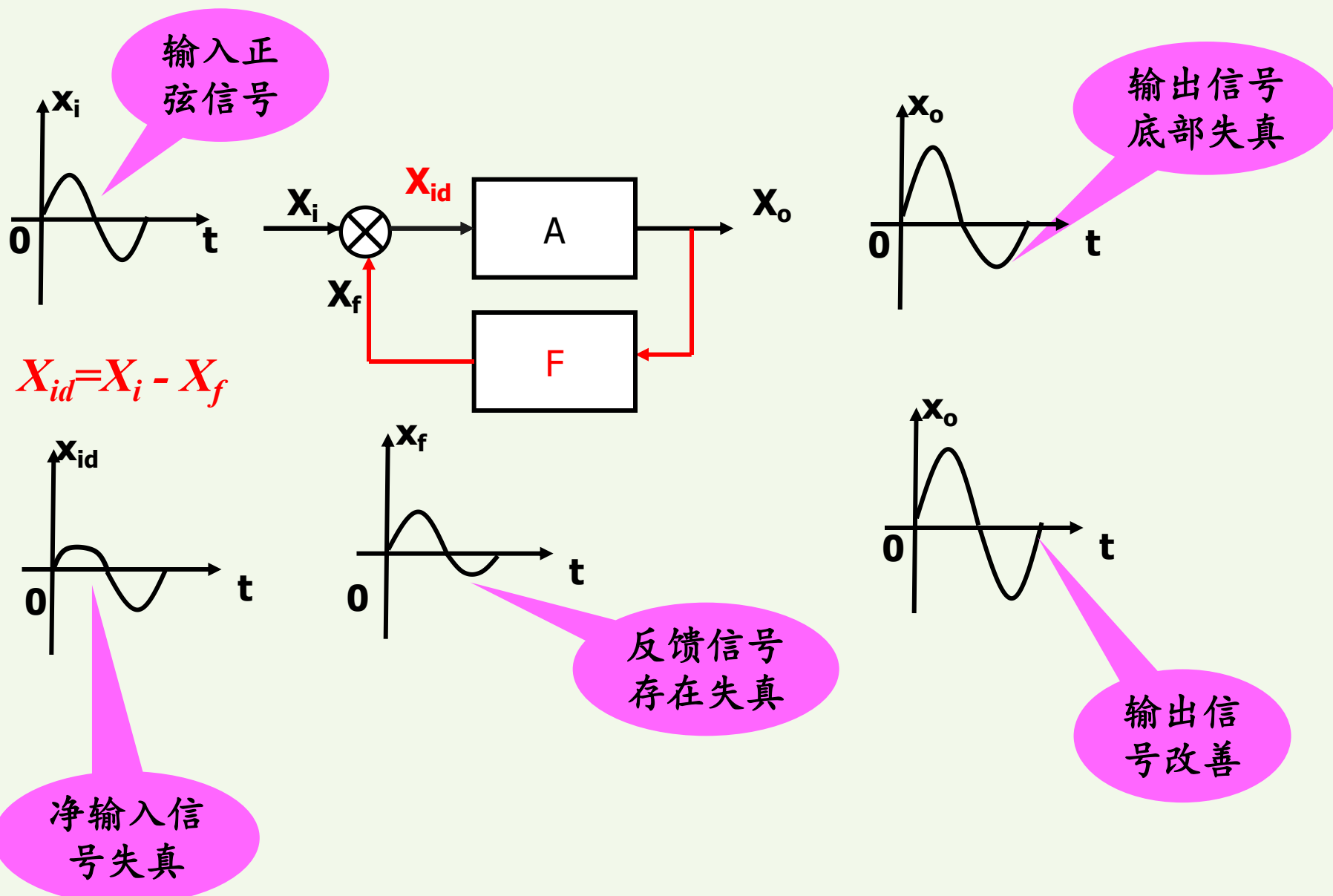
$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{A}{AF} = \frac{1}{F}$$

闭环放大倍数与开  
环放大倍数无关

即**闭环放大倍数只取决于反馈网络**。当反馈网络由稳定的线性元件组成时，闭环放大倍数将有很高的稳定性。

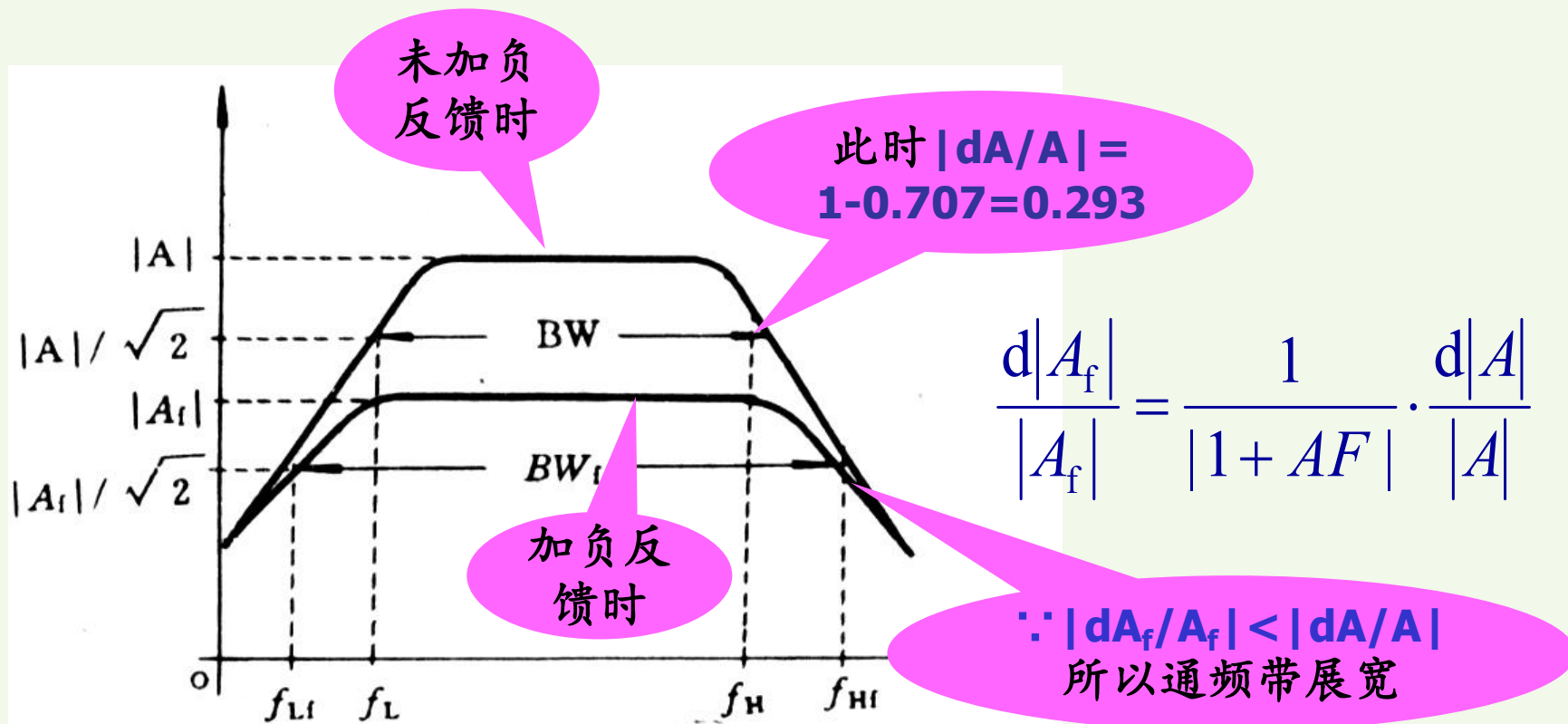


### 3.减小输出波形的非线性失真





## 4.展宽放大电路的通频带



可以证明，通频带展宽倍数为  $|1 + AF|$

注：通频带用于衡量放大电路对不同频率信号的放大能力。



# 负反馈对放大电路的影响

## 5、负反馈对输入、输出电阻的影响

**串联**负反馈 —— 增大输入电阻

**并联**负反馈 —— 减小输入电阻

**电压**负反馈 —— 减小输出电阻，稳定输出电压

**电流**负反馈 —— 增大输出电阻，稳定输出电流



# 放大电路中引入负反馈的一般原则

- (1) 为了**稳定静态工作点**，应引入**直流负反馈**；  
为了**改善电路的动态性能**，应引入**交流负反馈**。
- (2) 根据**信号源的性质**决定引入**串联负反馈**还是**并联负反馈**。（信号源内阻小：串联，内阻大：并联）
- (3) 根据**负载对放大电路输出量的要求**，决定引入**电压负反馈或电流负反馈**。（需要输出稳定电压还是稳定电流？）

具体内容查看教材202页



# 课程小结 反馈的分类及判断

## ➤ 反馈极性的分类

正反馈  
负反馈

引入反馈后净输入信号是增强还是削弱了，用瞬时极性法判断。  
窍门：反馈连接同向输入端，则为正反馈，反之为负反馈

## ➤ 按反馈量中包含交、直流的成分

交流反馈  
直流反馈  
交直流反馈

看反馈存在于直流通路还是交流通路。

## ➤ 按反馈在输入端连接方式

串联反馈  
并联反馈

反馈信号与输入信号是否在同一输入端，若不同输入端则为串联，相同输入端则为并联。

## ➤ 按反馈在输出端取样方式

电压反馈  
电流反馈

用输出短路法判断，若短路后反馈信号仍在，则为电流反馈，若短路后反馈消失，则为电压反馈。



# 课堂练习

## 第三节4, 5, 6, 7, 8, 9, 10



## 6.4 集成运放的线性应用



### ➤ 集成运放的线性应用的条件

引入一定深度的负反馈

### ➤ 集成运放的线性应用的特点

$$U_+ = U_-$$

虚接  
(虚短)

$$I_+ = I_- = 0$$

虚断

## 6.4.1 运算电路



实现将信号放大并进行运算的电路,称为**运算电路**。

- 比例运算
- 加减运算
- 微分/积分运算

# 一、比例运算电路

实现将输入信号按比例放大的电路，称为  
**比例运算电路**

**反相**比例运算-----实现运算  $u_o = -ku_i$

**同相**比例运算 -----实现运算  $u_o = +ku_i$

## 1.反相比例运算电路

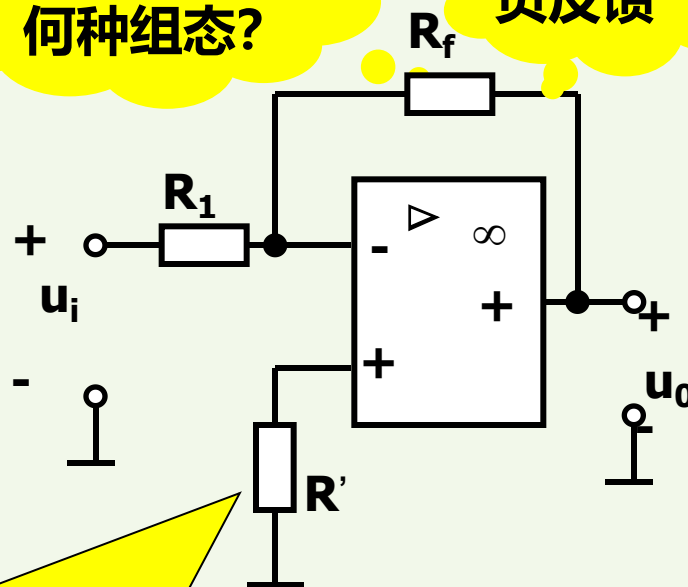
### ◆电路结构特点

$R_f$ 引入深度负反馈

输入信号加入反相端

平衡电阻  $R' = R_1 // R_F$

该反馈为何种组态?  
电压并联负反馈



平衡电阻，使输入端对地的静态电阻相等，保证静态时输入级的对称性。



# 1.反相比例运算电路

## ◆参数计算

### (1) 闭环电压放大倍数

因为  $I_- = 0$ , 所以  $i_1 = i_f$

$$\text{即, } \frac{u_i - U_-}{R_1} = \frac{U_- - u_o}{R_f}$$

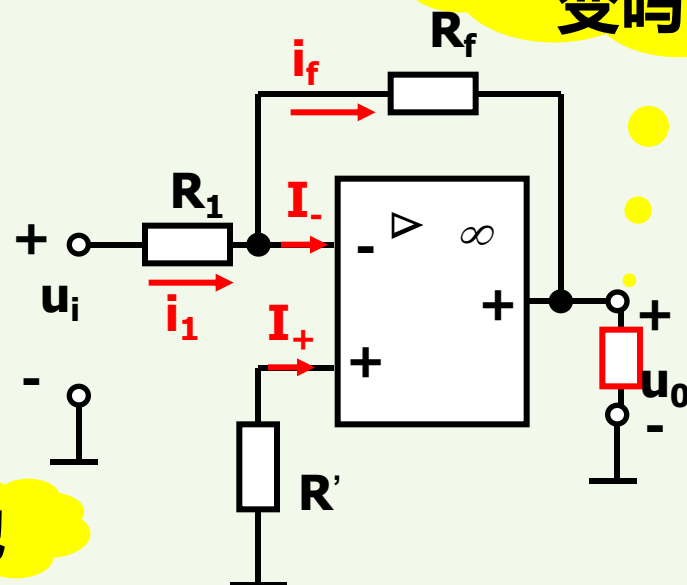
又因为  $U_- = U_+ = R' I_+ = 0 \dots$  **虚地**

$$\text{所以 } \frac{u_i}{R_1} = \frac{-u_o}{R_f}$$

即**电压放大倍数**  $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$  则实现运算:  $u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$

(2) **输入电阻**  $R_{if} = \frac{u_i}{i_1} = R_1$

(3) **输出电阻** 因为电路引入电压负反馈, **输出电阻**  $R_o = 0$



若输出端加负载,  $u_o$  改变吗?



## 反相比例电路的特点:

### 优点

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**。

**缺点** 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。

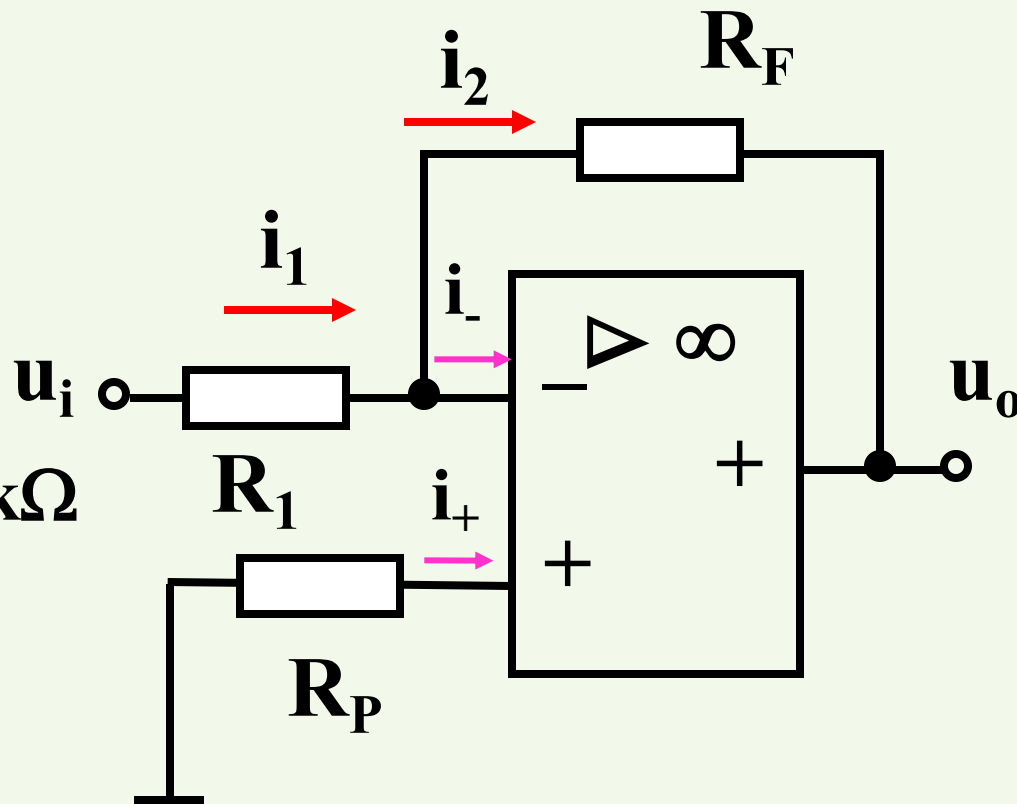
**一句话：输入电阻小、共模电压为 0 以及“虚地”是反相输入的特点。**



**例1.**  $R_1=10\text{k}\Omega$  ,  $R_F=20\text{k}\Omega$  ,  $u_i=-1\text{V}$ 。求： $u_o$  ,  $R_P$ 应  
为多大？

$$u_o = - (R_F/R_1) u_i$$
$$= (-2)(-1) = 2\text{V}$$

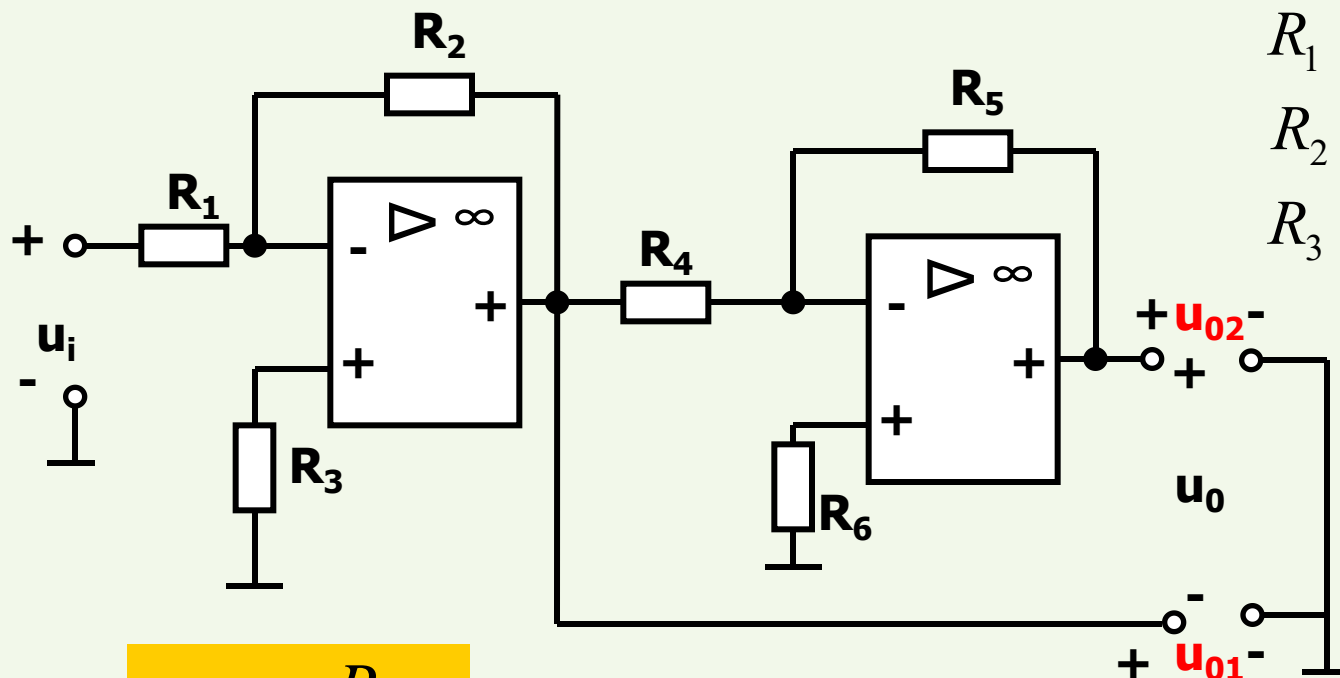
$$R_P = R_1 // R_F = 10 // 20 = 6.7 \text{ k}\Omega$$



# 反相比例运算电路举例



◆例2 分析图示电路输出电压 $u_o$ 与输入电压 $u_i$ 的关系



$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = R_4 = R_5 = 10k\Omega$$

$$R_3 = R_6 = 0.9k\Omega$$

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_i = -10u_i$$

$$u_{o2} = -\frac{R_5}{R_4} u_{o1} = \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1} u_i = 10u_i$$

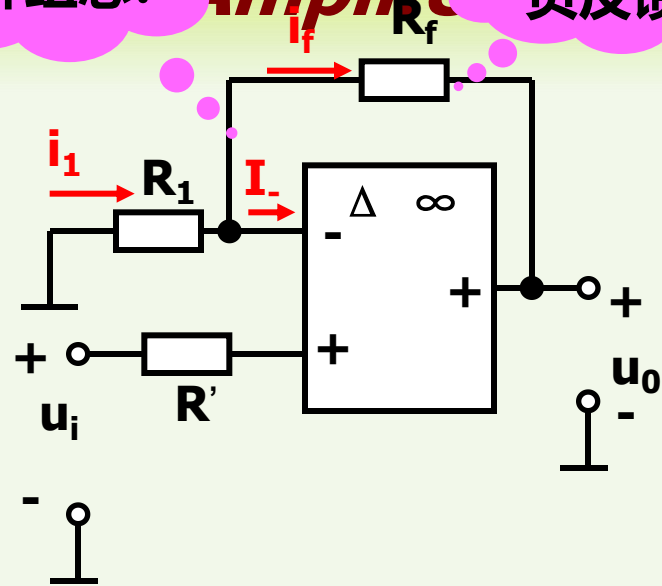
$$\therefore u_o = u_{o2} - u_{o1} = 20u_i$$

## 2、同相比比例运算电路(Noninverting)

该反馈为何种组态?

电压串联负反馈

- ◆ 电路结构特点
  - $R_f$  引入深度负反馈
  - 输入信号加入同相端
  - 平衡电阻  $R' = R_1 // R_f$
- ◆ 参数计算



### (1) 闭环电压放大倍数

因为  $I_- = 0$ , 所以  $i_1 = i_f$

$$\frac{0 - U_-}{R_1} = \frac{U_- - u_o}{R_f} \quad \text{得} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_- = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+$$

又因为  $U_- = U_+ = u_i$

则实现运算:

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

电压放大倍数

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



## (2) 输入电阻

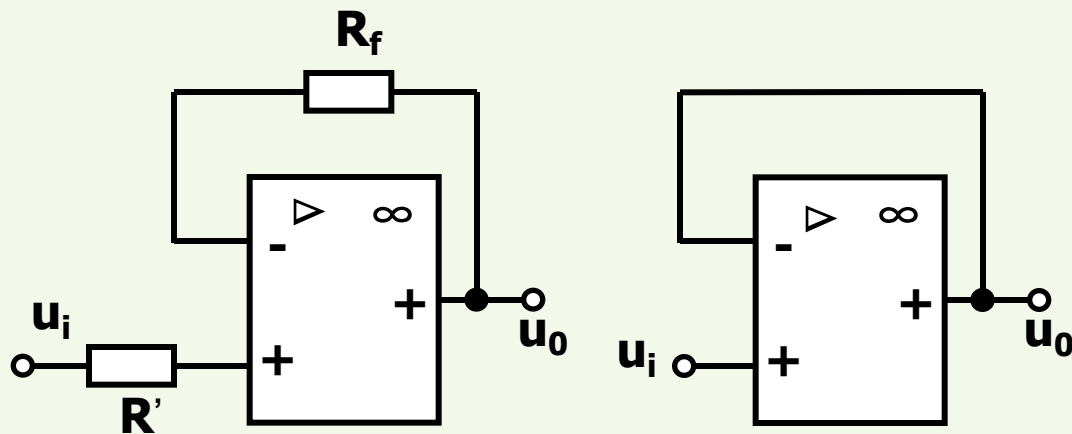
$$R_{if} = \frac{u_i}{I_+} = \frac{u_i}{0} = \infty$$

## (3) 输出电阻

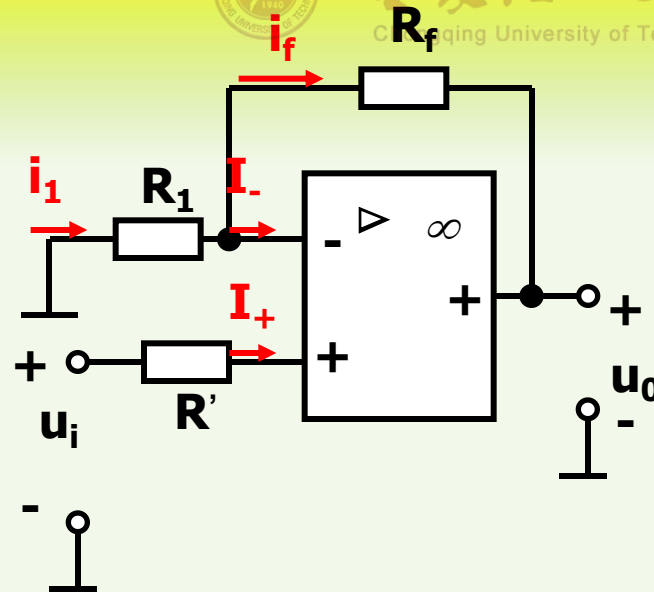
因为电路引入电压负反馈,

**输出电阻**  $R_o = 0$

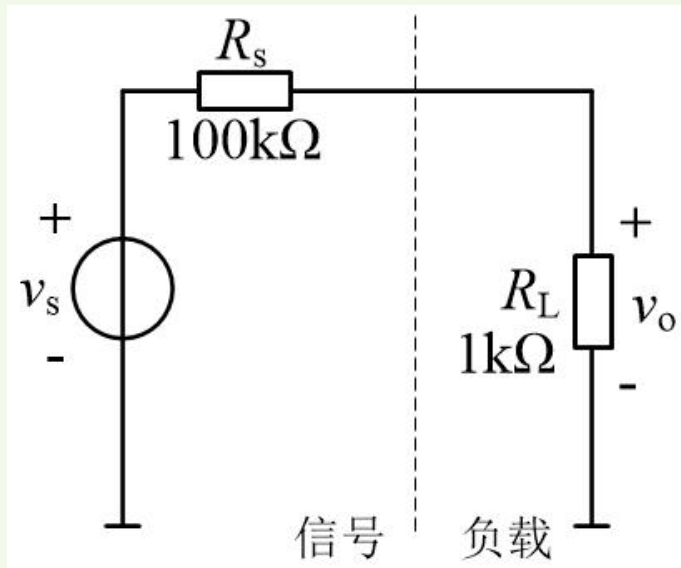
当  $A_{uf} = 1$  时, 称为**电压跟随器**(*Voltage Follower*)。



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

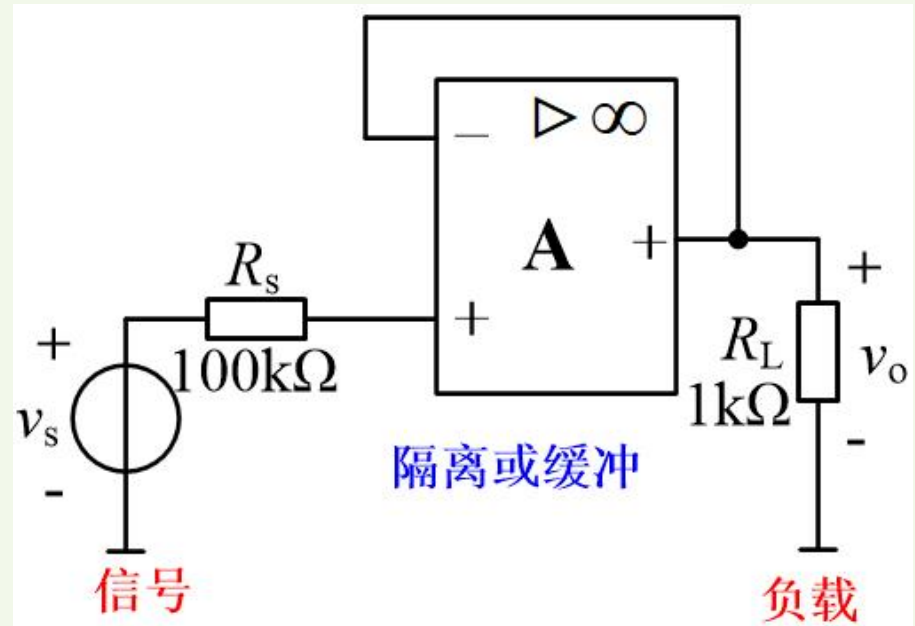


# 电压跟随器对电压增益有影响么？



无电压跟随器时

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} v_s = \frac{1}{101} v_s \approx 0.01 v_s$$



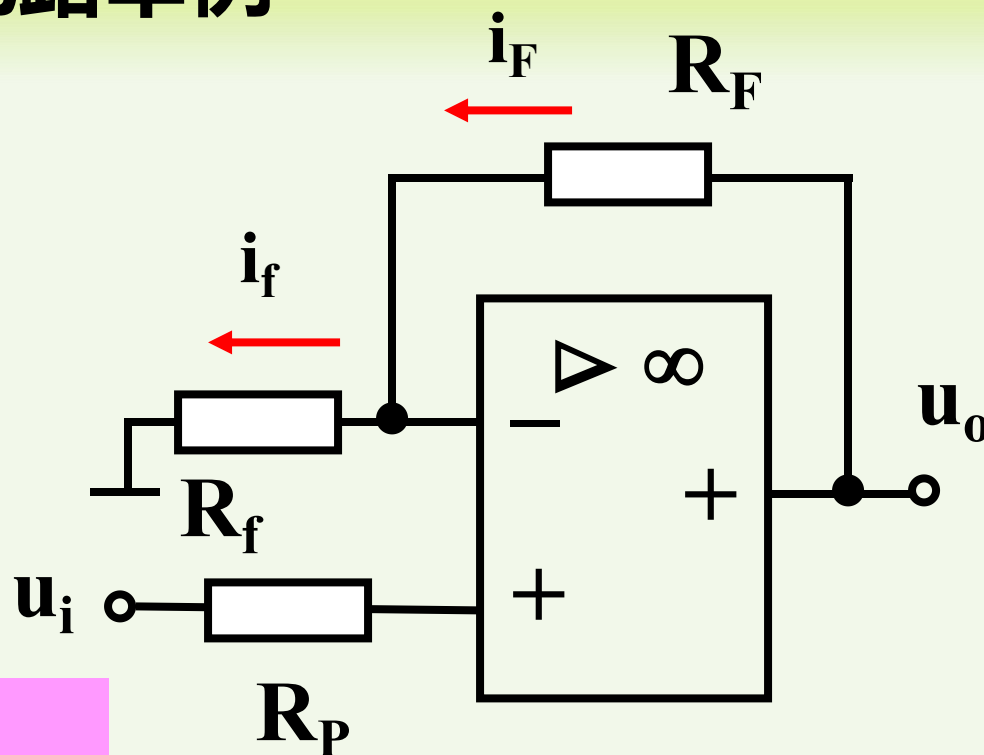
有电压跟随器时

$$v_o = u_- = u_+ = v_s$$



# 同相比例运算电路举例

**例1.**  $R_f=10\text{k}\Omega$  ,  
 $R_F=20\text{k}\Omega$  ,  $u_i=-1\text{V}$ 。  
求： $u_o$  ,  $R_P$ 应为多大？



$$A_{uf}=1+\frac{R_F}{R_f}=1+20/10=3$$

$$u_o=A_{uf} u_i=(3)(-1)=-3\text{V}$$

$$R_P=R_f//R_F=10//20=6.7\text{ k}\Omega$$



同相比例运算  
电路

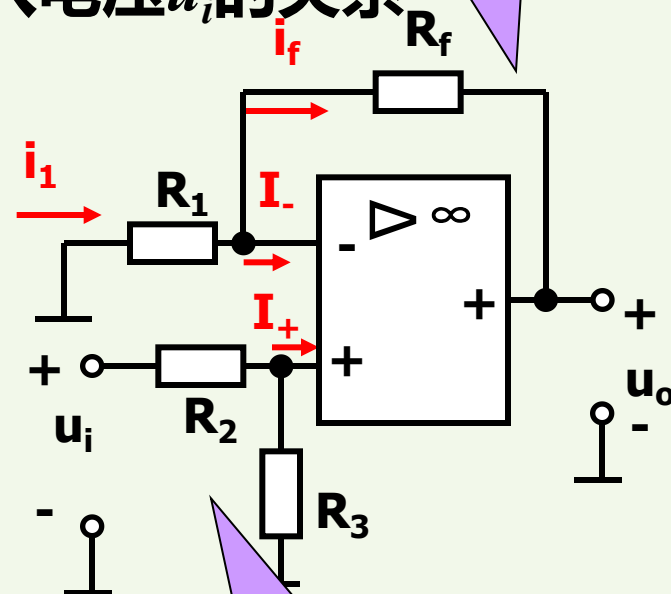
◆例2 分析图示电路输出电压 $u_o$ 与输入电压 $u_i$ 的关系

$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+$$

$U_+ = ?$

➔  $U_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$

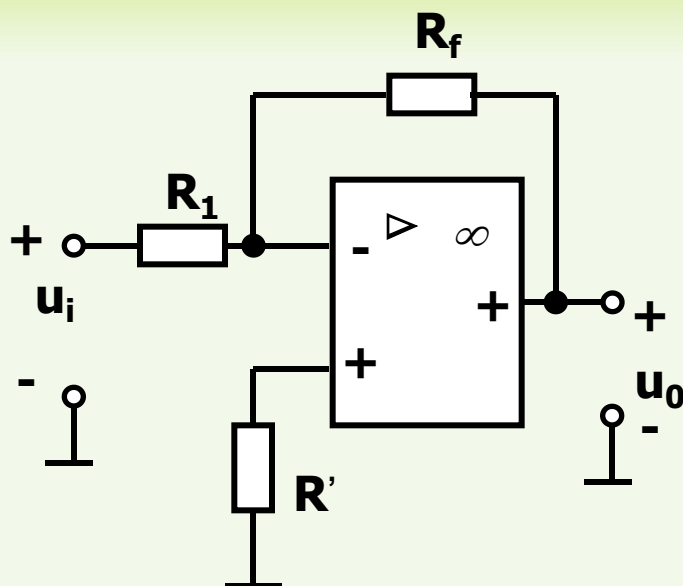
$$\therefore u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+ = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$



因为 $I_+ = 0$ ，所以 $R_2, R_3$ 串联

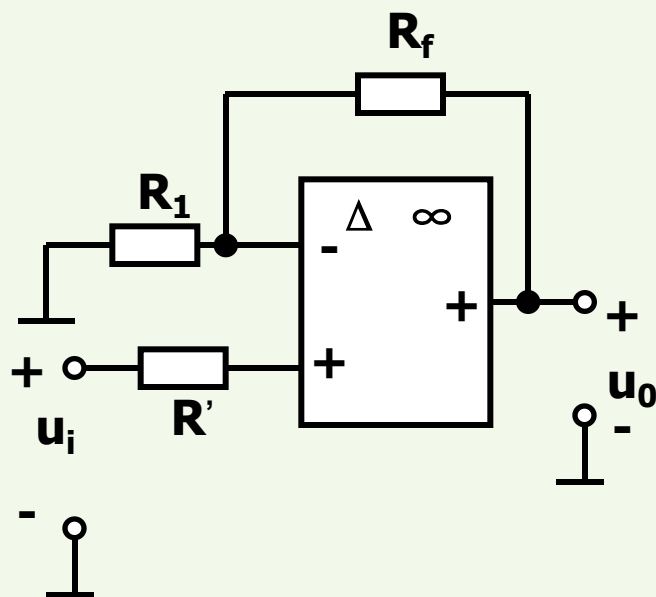


## 小结:



## 反相比例运算电路

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



## 同相比例运算电路

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$



## 二、加/减运算电路

实现将若干个输入信号之和或之差按比例放大的电路，称为**加/减运算电路**。

- 反相加法器
- 同相加法器
- 减法器
- 加减器



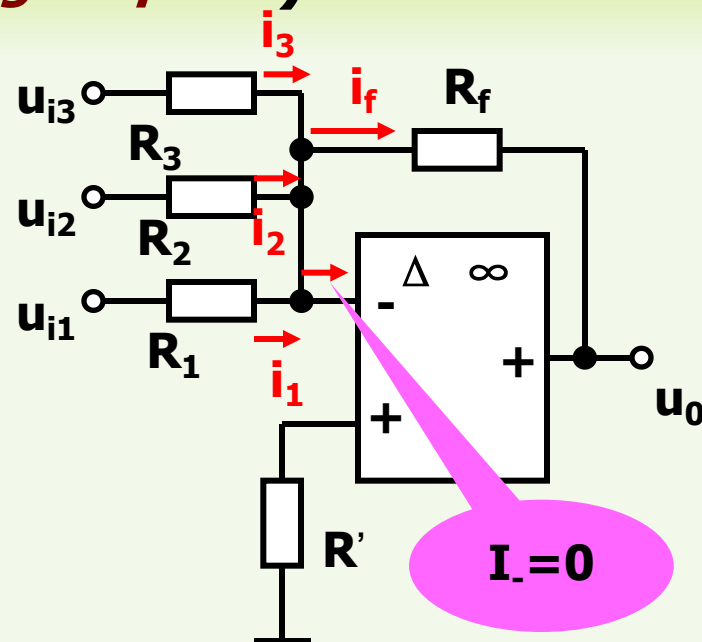
## ➤ 反相加法器 (Inverting Summing Amplifier)

### ◆ 电路结构特点

$R_f$  引入深度负反馈

输入信号均加入反相端

平衡电阻  $R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$



### ◆ 输入输出关系计算

因为  $I_- = 0$ , 所以  $i_1 + i_2 + i_3 = i_f$

又因为  $U_- = U_+ = R' I_+ = 0$  即, 
$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} = \frac{0 - u_o}{R_f}$$

则实现运算: 
$$u_o = -R_f \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$$

若取  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , 则 
$$u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$



## ◆ 反相加法器的特点:

1. 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。
2. 由于“**虚地**”的特点，调节反相求和电路的某一路信号的输入电阻，不影响其他输入电压和输出电压的比例关系，调节方便。



## ➤ 同相加法器 (Noninverting Summing Amplifier)

◆ 电路结构特点 {  $R_f$  引入深度负反馈  
输入信号均加入同相端

◆ 输入输出关系计算

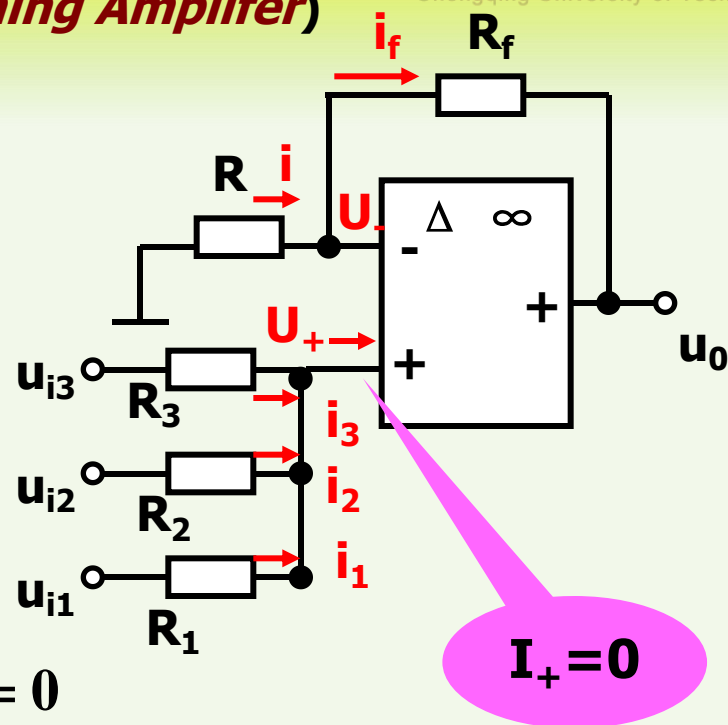
因为  $I_+ = 0$ , 所以  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

即, 
$$\frac{u_{i1} - U_+}{R_1} + \frac{u_{i2} - U_+}{R_2} + \frac{u_{i3} - U_+}{R_3} = 0$$

整理得, 
$$U_+ = (R_1 // R_2 // R_3) \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$$

又因为在同相比例器中有, 
$$u_o = \left( 1 + \frac{R_f}{R} \right) U_+$$

则实现运算: 
$$u_o = \left( 1 + \frac{R_f}{R} \right) R_P \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$$



$R_P = R_1 // R_2 // R_3$

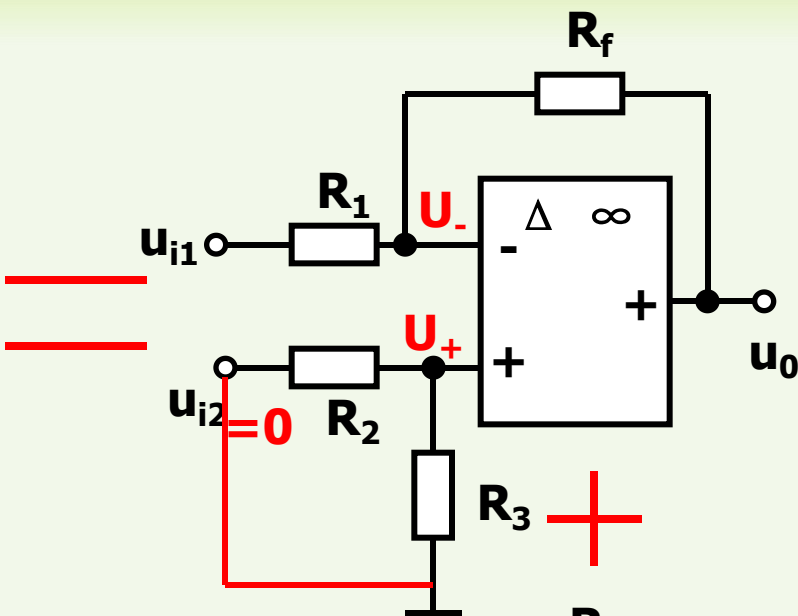
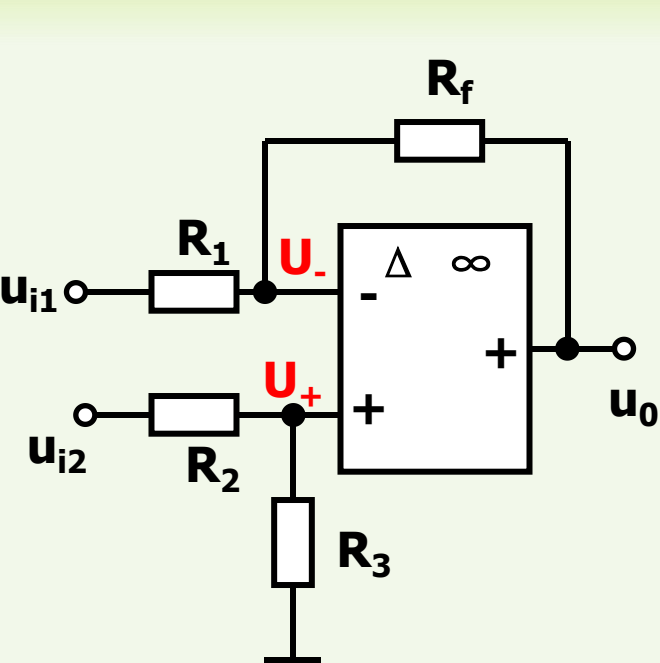


## ◆ 同相加法器的特点:

1. 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。
2. 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. 由于存在共模电压，对输入电压及运放的共模抑制比要求较高。

# ➤减法器

-----输入信号同时加入反相端与同相端



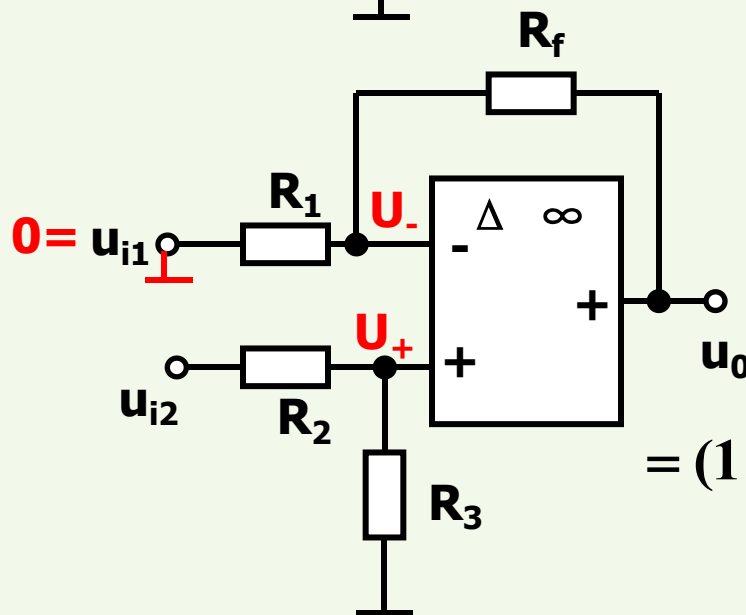
$u_{i1}$ 单独作用

$$u'_o = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

所以,  $u_o = u'_o + u''_o$

若取  $R_1 = R_2$ 、 $R_3 = R_f$  则

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



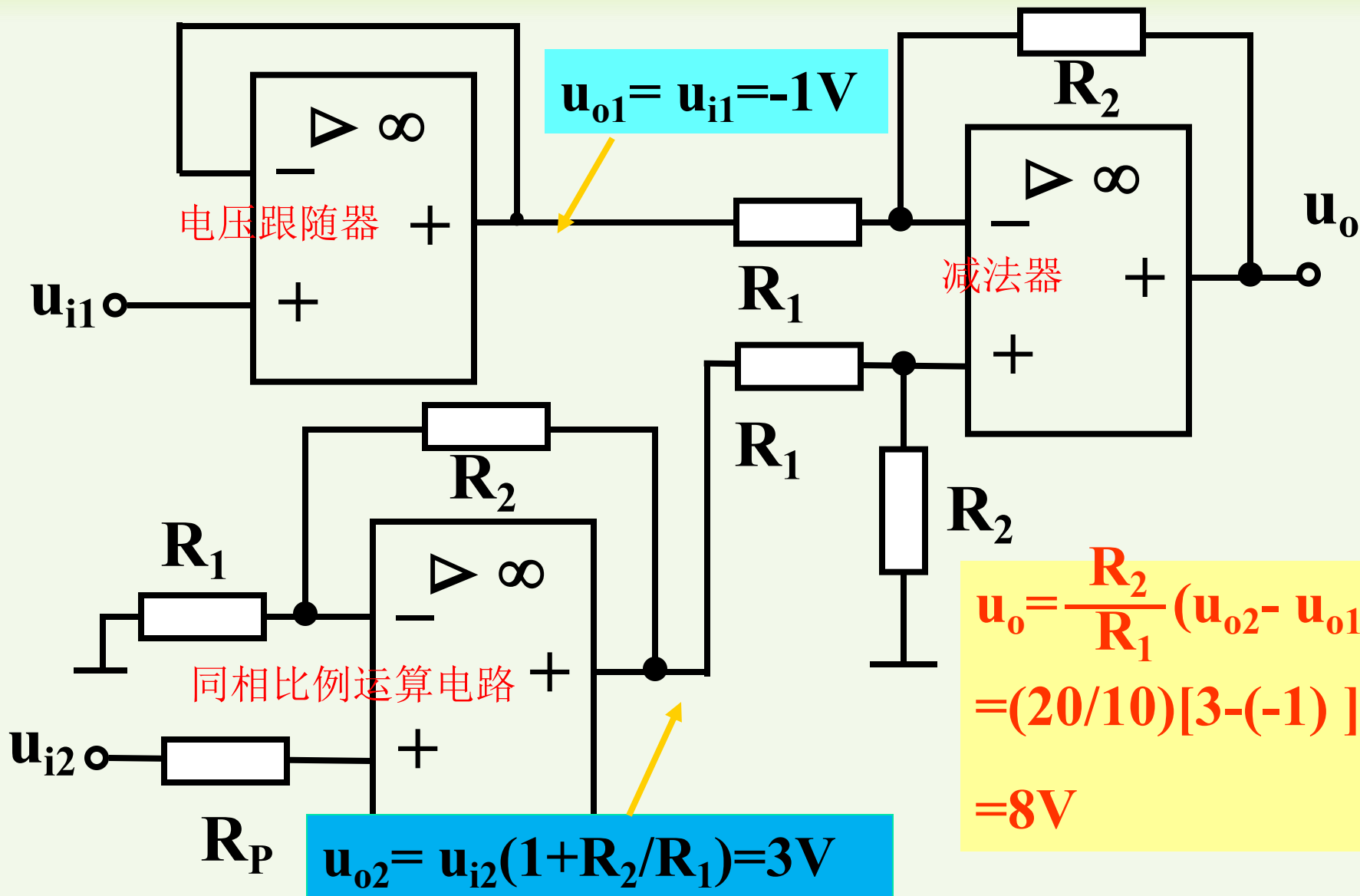
$u_{i2}$ 单独作用

$$\begin{aligned} u''_o &= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+ \\ &= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} \end{aligned}$$





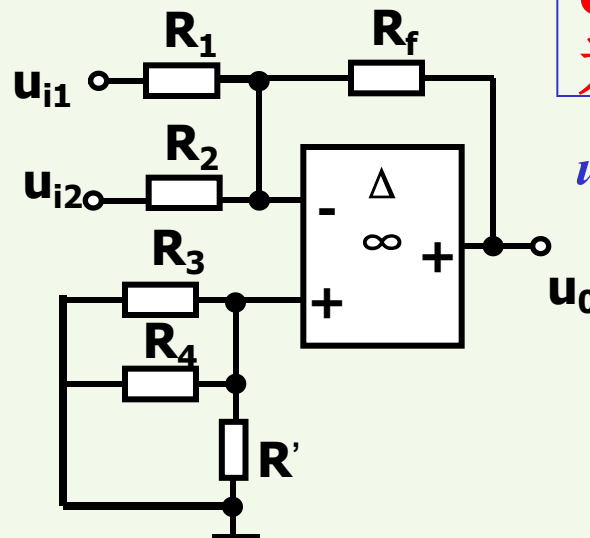
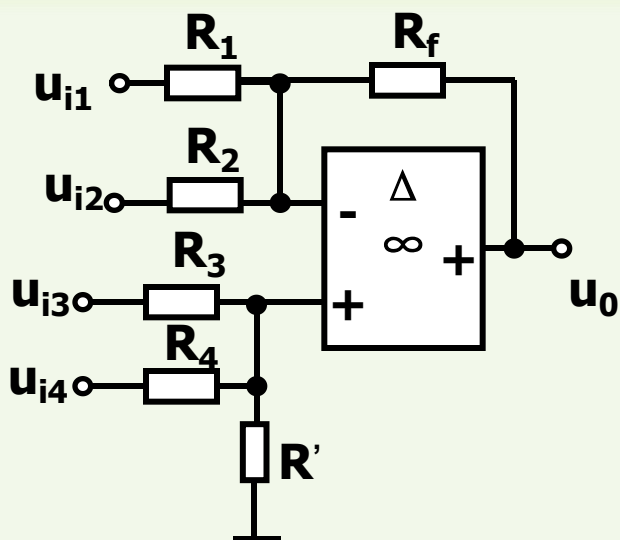
例题.  $R_1=10\text{k}\Omega$  ,  $R_2=20\text{k}\Omega$  ,  $u_{i1}=-1\text{V}$  ,  $u_{i2}=1\text{V}$  。求:  $u_o$



$$\begin{aligned} u_o &= \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1}) \\ &= (20/10) [3 - (-1)] \\ &= 8\text{V} \end{aligned}$$



# ➤ 加减器 ---- 同时实现加与减运算的电路



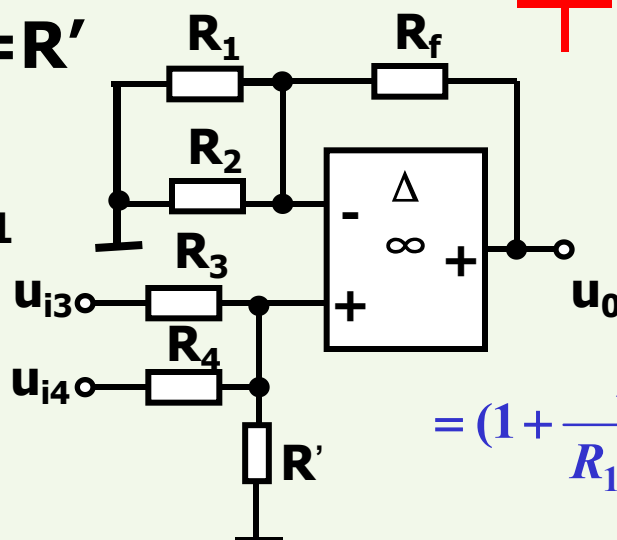
**$U_{i1}$ 、 $U_{i2}$ 作用时  
为反相加法器**

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

若取

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_f = R'$$

则  $u_o = u_{i3} + u_{i4} - u_{i2} - u_{i1}$



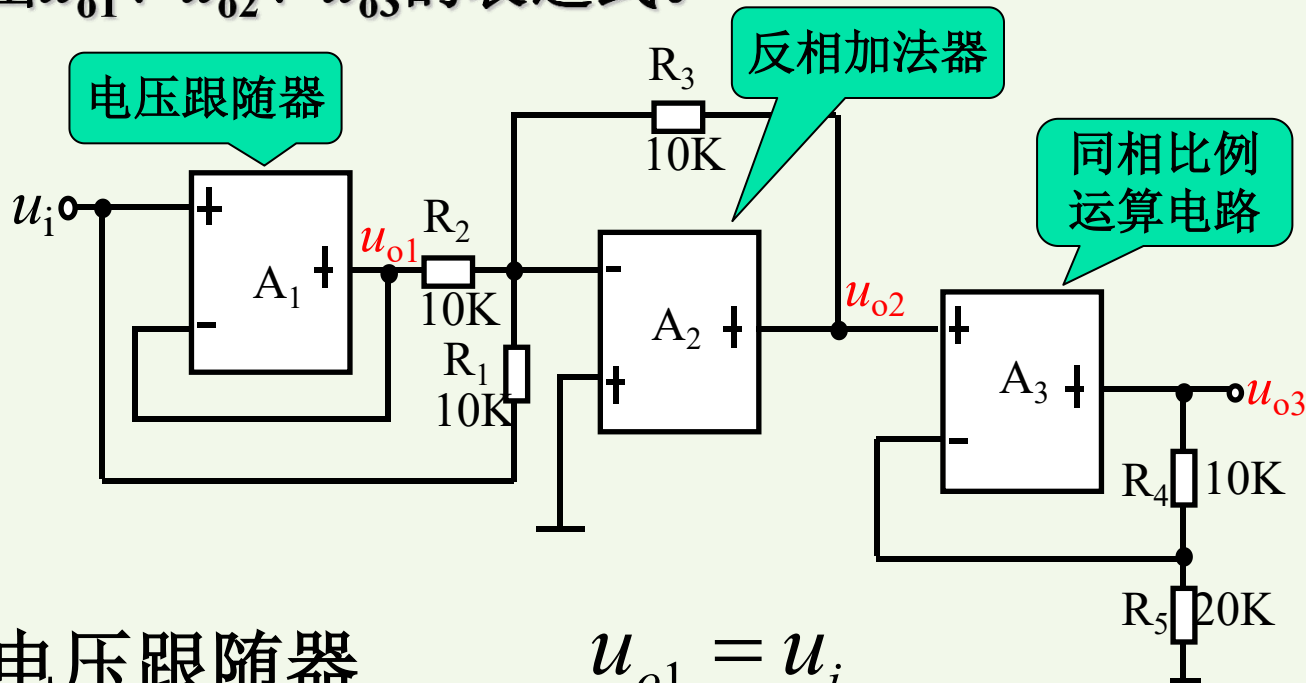
**$U_{i3}$ 、 $U_{i4}$ 作用时  
为同相加法器**

$$u_o'' = \left( 1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) U_+$$

$$= \left( 1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) (R_3 // R_4 // R') \left( \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} \right)$$



例：图示电路，（1）指出 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 各组成什么电路；  
（2）写出 $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ 、 $u_{o3}$ 的表达式。



解：

（1） $A_1$ :电压跟随器

$$u_{o1} = u_i$$

$A_2$ :反相加法运算电路

$$u_{o2} = -R_3 \left( \frac{u_i}{R_1} + \frac{u_{o1}}{R_2} \right) = -2u_i$$

$A_3$ :同相比例运算电路

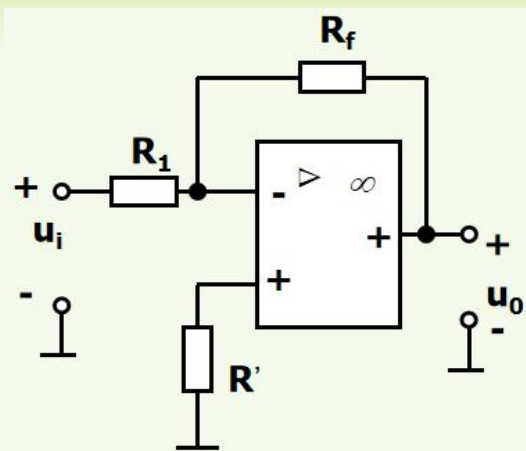
$$u_{o3} = \left( 1 + \frac{R_4}{R_5} \right) u_{o2} = -3u_i$$

# 比例运算电路与加减运算电路小结



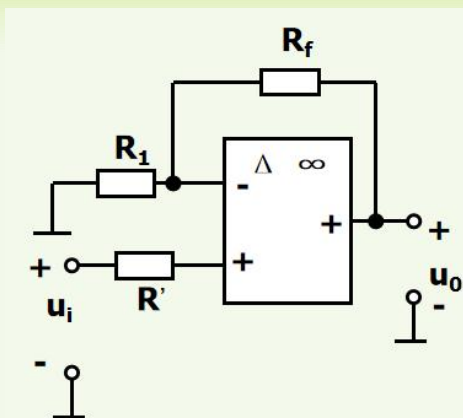
1. 它们都引入电压负反馈，因此输出电阻都比较小。
2. 关于输入电阻：反相输入的输入电阻小，同相输入的输入电阻高。
3. 同相输入的共模电压高，反相输入的共模电压小。

# 比例运算电路与加减运算电路小结



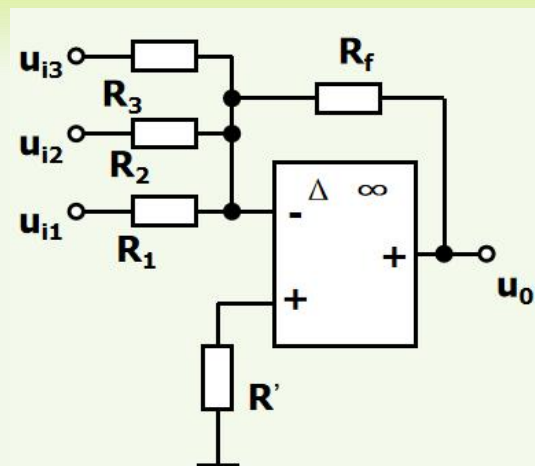
反相比例运算电路

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



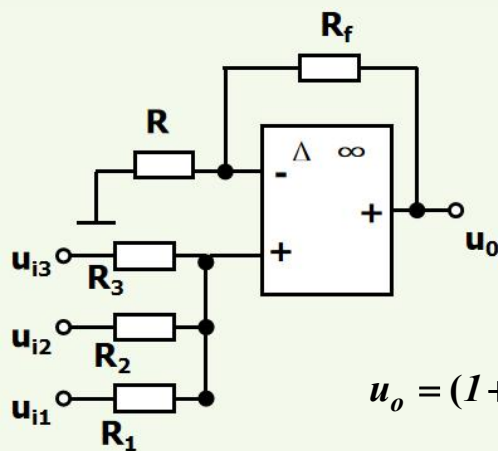
同相比例运算电路

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



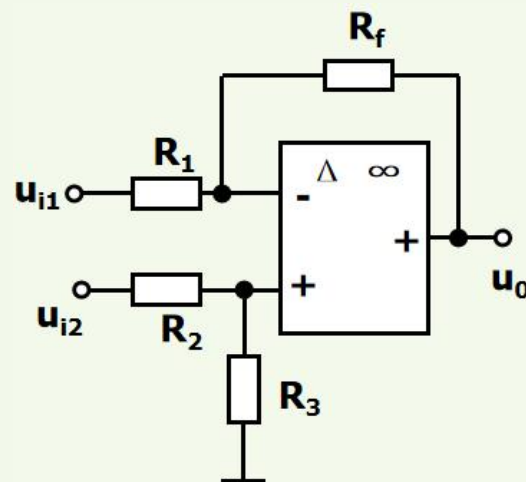
反相加法器

$$u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$



同相加法器

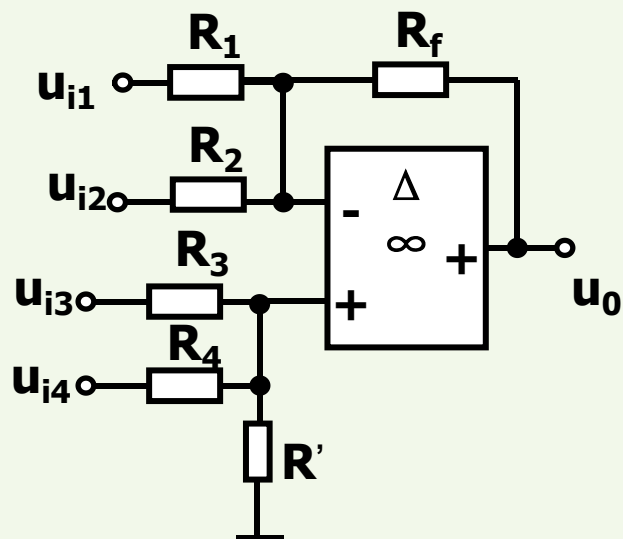
$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) R_p \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}\right)$$



减法器

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

# 比例运算电路与加减运算电路小结



加减器

若取

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_f = R'$$

则  $u_o = u_{i3} + u_{i4} - u_{i2} - u_{i1}$



# 课堂练习

## 第四节2, 3, 4

