

## 第6章 集成运算放大器

### § 6.1 集成运算放大器简介

#### § 6.2 运算放大电路中的反馈（重点）

#### § 6.3 集成运算放大器线性应用（重点）

#### § 6.4 集成运算放大器非线性应用

#### § 6.5 运算放大器使用时应注意问题（自学）

1

## 6.1 集成运算放大器简介

**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。

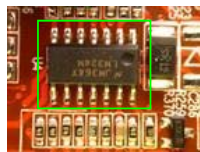
集成电路分类

- 模拟集成电路：集成运算放大器、集成功率放大器、集成稳压电源、集成A/D D/A等。
- 数字集成电路

集成运算放大器是一种具有很高放大倍数的多级直接耦合放大电路，是发展最早、应用最广泛的一种模拟集成电路。

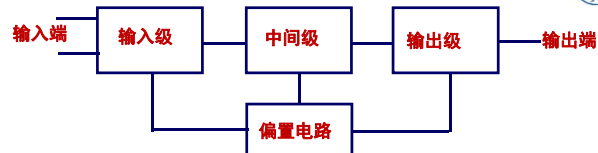
2

### 运算放大器外形图



3

### 一、组成



**输入级：**要求输入电阻高，差模放大倍数高，抑制零点漂移和共模干扰信号的能力强。都采用**差分放大电路**。

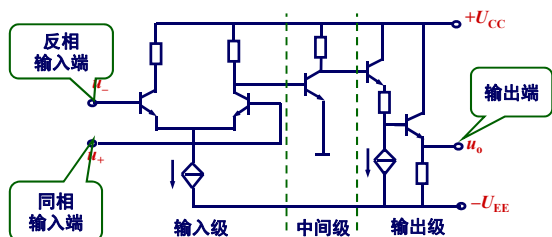
**中间级：**要求电压放大倍数高。常采用**共射极放大电路**构成。

**输出级：**与负载相接，要求输出电阻低，带负载能力强，一般由**互补对称电路或射极输出器**构成。

**偏置电路：**为各级放大电路提供稳定和合适的偏置电流，决定各级的静态工作点，一般由**恒流源电路**构成。

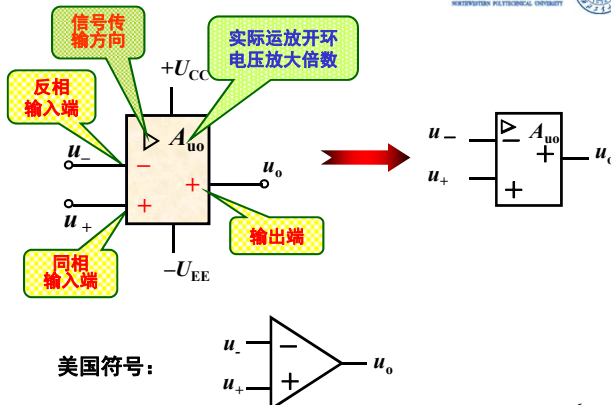
4

### 实际集成运算放大器组成电路



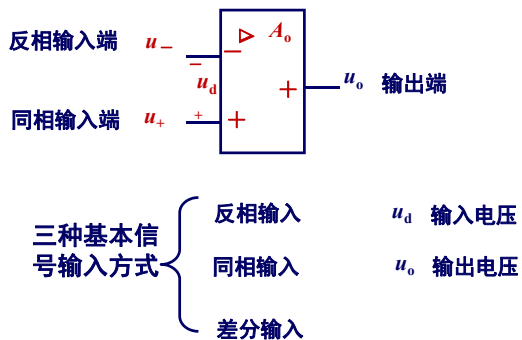
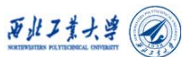
5

### 集成运算放大器符号

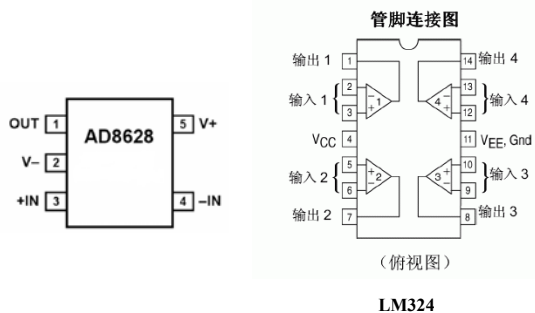


6

## 集成运放的三种基本信号输入方式



7



8

## 二、主要参数



### (1) 开环电压放大倍数(开环增益)大

$$A_{uo} = u_o / (u_+ - u_-) = 10^5 \sim 10^7 \text{ 倍。}$$

### (2) 共模抑制比高

$$K_{CMRR} = 20 \lg |A_d / A_c| = 100 \text{ dB 以上。}$$

$A_d$  为差模放大倍数,  $A_c$  为共模放大倍数

### (3) 差模输入电阻大

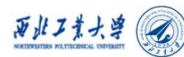
$$r_{id} > 1 \text{ M}\Omega, \text{ 有的可达 } 100 \text{ M}\Omega \text{ 以上。}$$

### (4) 开环输出电阻小

$$r_o = \text{几}\Omega \sim \text{几十}\Omega$$

9

## 三、传输特性和分析方法



### 实际运放:

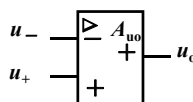
$$A_{uo} \text{ 很大: } 10^5 \sim 10^7$$

$$K_{CMRR} \text{ 很大}$$

$$r_{id} \text{ 大: } r_{id} > 1 \text{ M}\Omega$$

$$r_o \text{ 小: 几十} \sim \text{几百}\Omega$$

### 运放符号:



实际运放的符号

### 理想运放:

$$A_{uo} \rightarrow \infty$$

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

$$r_{id} \rightarrow \infty$$

$$r_o \rightarrow 0$$

理想运放的符号

10

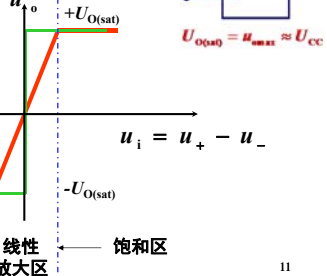
## 1、分析方法



**传输特性:** 表示运算放大器输出电压与输入电压之间关系的曲线称为传输特性。

$$u_o = f(u_i)$$

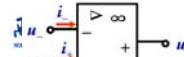
$$u_o = A_{uo} (u_+ - u_-)$$



11

线性区很窄, 所以运放在线性区工作, 通常引入深度电压负反馈。

## 2、分析依据



### 运放工作在线性区的依据:

(1) 差模输入电阻  $r_{id} \rightarrow \infty$ , 两个输入端的输入电流可认为是零,  $i_i \approx i_{i-} \approx 0$ , 即**虚断**。

(2) 开环电压放大倍数  $A_{uo} \rightarrow \infty$ , 而输出电压是一个有限值,

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

$$u_+ \approx u_- \text{ 即虚短。}$$

如果信号从反相端输入, 同相端接地  $u_+ \approx 0$ ,

$u_- \approx 0$  反相端近于“地”电位, 即**虚地**。

12

**运放工作在非线性区的依据：**

非线性区

非线性区

由于运放工作在非线性区

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

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

当  $u_+ = u_-$  时,  $u_o$  发生跃变

所以

1.  $u_+ \approx u_-$  不再成立

2.  $i_d \approx 0$  依然成立

13

**集成运算放大器的应用**

**1. 线性应用**

电路结构上存在从输出端到反相输入端的**负反馈支路**（输入信号幅度足够小），以保证集成运算放大器的输出处于最大输出电压的范围内。

**2. 非线性应用**

电路结构上集成运算放大器处于开环（无反馈）或存在从输出端到同相输入端的**正反馈支路**，输出总是处于饱和状态，即输出在正、负最大值之间变化。

**3. 集成运算放大器电路反馈分析方法**

首先判断应用类型，然后利用理想运算放大器的特征对电路进行分析。

14

**6.2 运算放大电路中的反馈**

**一、反馈的基本概念**

**反馈：**将放大电路输出端的信号(电压或电流)的一部分或全部通过某种电路引回到输入端。

15

**反馈框图：**

实际被放大信号

开环

闭环

输入  $\dot{X}_i$  — 输入信号  $\dot{X}_o$  — 输出信号  $\dot{X}_f$  — 反馈信号

净输入信号  $\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

若三者同相, 则  $X_d < X_i$ , 此时, 反馈信号削弱了净输入信号, 电路为负反馈。

若  $X_d > X_i$ , 即反馈信号起了增强净输入信号的作用, 电路则为正反馈。

16

**二、反馈极性（即正、负反馈）的判断：**

**利用瞬时极性法判别负反馈与正反馈的步骤：**

1. 设接“地”参考点的电位为零。
2. 若电路中某点的瞬时电位高于参考点(对交流为电压的正半周), 则该点电位的瞬时极性为正(用 $\oplus$ 表示); 反之为负(用 $\ominus$ 表示)。
3. 若反馈信号与输入信号加在不同输入端(或两个电极)上, 两者极性相同时, 为**负反馈**; 反之为**正反馈**。
4. 若反馈信号与输入信号加在同一输入端(或同一电极)上, 两者极性相反时, 为**负反馈**; 反之为**正反馈**。

17

**例1：**

设输入电压  $u_i$  为正, 各电压的实际方向如图

差值电压  $u_d = u_i - u_f$

$u_f$  减小了净输入电压(差值电压)

——负反馈

**例2：**

设输入电压  $u_i$  为正, 各电压的实际方向如图

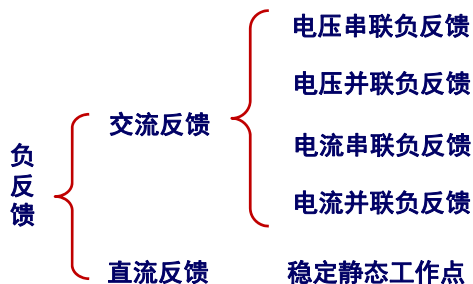
差值电压  $u_d = u_i + u_f$

$u_f$  增大了净输入电压

——正反馈

18

### 三、负反馈的类型判定



19

### 三、负反馈的类型判定

#### 1、交流反馈与直流反馈

按照反馈的信号，分直流反馈和交流反馈。

**交流反馈**——反馈只对交流信号起作用

**直流反馈**——反馈只对直流信号起作用

在反馈网络中**串接隔直电容**，可以隔断直流，此时反馈只对交流起作用。

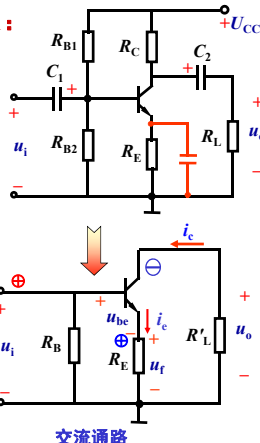
在起反馈作用的电阻两端**并联旁路电容**，可以使其只对直流起作用。

**交流反馈和直流反馈的判断：**

- **采用电容观察法：**反馈通路如果存在**隔直电容**，就是交流反馈；反馈通路存在**旁路电容**，则是直流反馈；如果不存在电容，就是交直流反馈。

20

例1：



交、直流分量的信号均可通过  $R_E$ ，所以  $R_E$  引入的是交、直流反馈。

如果有发射极旁路电容， $R_E$  中仅有直流分量的信号通过，这时  $R_E$  引入的则是直流反馈。

引入直流负反馈的目的：稳定静态工作点

引入交流负反馈的目的：改善放大电路的性能

21

#### 2、电压反馈和电流反馈

根据反馈所采样的信号不同，可以分为电压反馈和电流反馈。

**电压反馈：**反馈信号取自输出电压信号。

**电流反馈：**反馈信号取自输出电流信号。

**电压反馈与电流反馈的判断：**

- **判断原则1：**

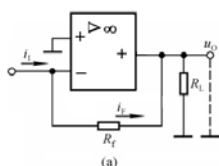
假设把输出端交流短路（即令负载上的电压等于0），观察是否仍有反馈信号。如果反馈信号不存在了，即反馈量为0，则说明是电压反馈；若反馈量不等于0，则说明是电流反馈。

- **判断原则2：**

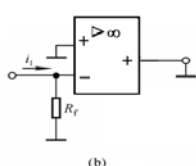
从**输出端直接取回**的反馈为**电压反馈**；从**输出负载串联的电阻上取回**的反馈为**电流反馈**。

22

例1：判断下面电路引入的是电压反馈还是电流反馈。



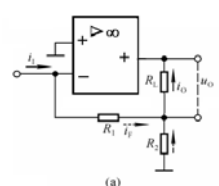
(a)



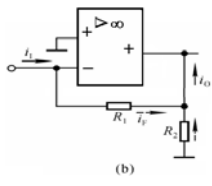
(b)

电压反馈

例2：判断下面电路引入的是电压反馈还是电流反馈。



(a)



(b)

电流反馈

23

#### 3、串联反馈和并联反馈

根据反馈信号在输入端与输入信号比较形式的不同，可以分为串联反馈和并联反馈。

**串联反馈：**反馈电压信号与输入信号电压比较（求和）。

**并联反馈：**反馈信号电流与输入信号电流比较（求和）。

**思考：**为什么输入回路中以电压形式求和时为串联反馈，以电流形式求和时为并联反馈？

∵ 串联时电流相等，是电压相加；

并联时电压相等，是电流相加。

**串联反馈与并联反馈的判断：**

- **判断方法：** (a) 反馈量与输入量在**不同输入端**，是串联反馈； (b) 反馈量与输入量在**同一输入端**，是并联反馈。

## 四种基本负反馈电路



反馈量 $\dot{X}_o$	输入信号的连接方式
电流 $\dot{I}_c$ $\dot{I}_e$	串联 (将反馈信号变为电压信号与输入电压 $\dot{U}_i$ 相减)
电压 $\dot{U}_o$	并联 (将反馈信号变为电流信号与输入电流 $\dot{I}_i$ 相减)

四种连接方式:

- (1) 电流串联负反馈
- (2) 电压串联负反馈
- (3) 电流并联负反馈
- (4) 电压并联负反馈

25

## 1、电压串联负反馈



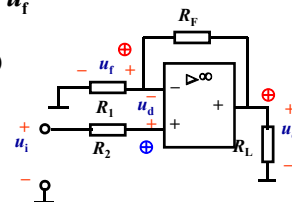
反馈信号与输入信号在加在两个输入端——**串联反馈**！

设输入电压  $u_i$  为正,  $u_d = u_i - u_f$

$u_f$  削弱了净输入电压(差值电压)

——**负反馈**

$$\text{反馈电压 } u_f = \frac{R_1}{R_F + R_1} u_o$$



反馈信号取自输出电压  $u_o$ ——**电压反馈**  
(反馈信号从**输出端**直接取回)

26

## 2、电压并联负反馈



反馈信号与输入信号都加在反相输入端——**并联反馈**！

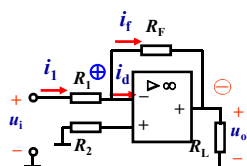
设输入电压  $u_i$  为正,  $i_d = i_1 - i_f$

$i_f$  削弱了净输入电流(差值电流)

——**负反馈**

$$\text{反馈电流 } i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

反馈信号取自输出电压  $u_o$ ——**电压反馈**  
(反馈信号从**输出端**直接取回)



27

## 3、电流串联负反馈



反馈信号与输入信号加在两个输入端——**串联反馈**！

设输入电压  $u_i$  为正,  $u_d = u_i - u_f$

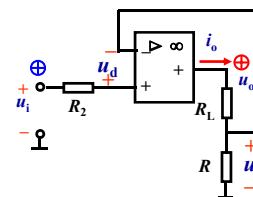
$u_f$  削弱了净输入电压(差值电压)

——**负反馈**

$$\text{反馈电压 } u_f = R (i_o + i_i) \approx R i_o$$

$$i_o \approx \frac{u_f}{R} = \frac{u_i}{R}$$

反馈信号取自输出电流——**电流反馈**  
(反馈信号取自**输出负载串联的电阻**)



28

## 4、电流并联负反馈



反馈信号与输入信号都加在反相输入端——**并联反馈**！

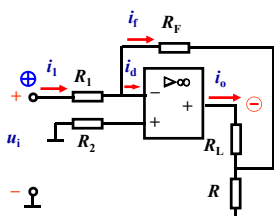
设输入电压  $u_i$  为正,  $i_d = i_1 - i_f$

$i_f$  削弱了净输入电流(差值电流)

——**负反馈**

$$\text{反馈电流 } i_f \approx -\frac{R}{R + R_f} i_o$$

反馈信号取自输出电流——**电流反馈**  
(反馈信号取自**输出负载串联的电阻**)



29

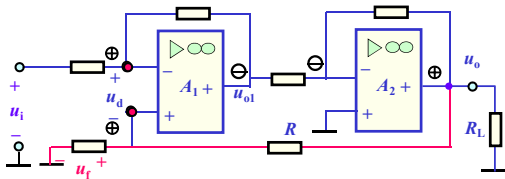
## 运算放大器电路反馈类型的判别方法小结:



- (1) 反馈量与输入量在**不同输入端**, 极性**相同**→为负反馈; 否则为正反馈。
- (2) 反馈量与输入量在**同一输入端**, 极性**相反**→为负反馈; 否则为正反馈。
- (3) 从**输出端**直接取回的反馈为**电压反馈**; 从输出负载串联的电阻上取回的反馈为**电流反馈**;
- (4) **输入**信号和反馈信号分别加在两个输入端上的, 是**串联反馈**; 加在同一个输入端上的, 是**并联反馈**。

30

[例1] 判别图示电路从  $A_2$  输出端引入  $A_1$  输入端的反馈类型。



[解] 反馈信号和输入信号分别加在  $A_1$  的两个输入端——串联反馈！

设为  $u_i$  正，则  $u_{o1}$  为负， $u_o$  为正。

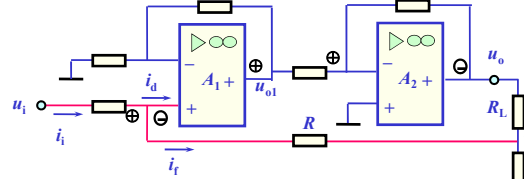
净输入电压  $u_d = u_i - u_f$  减小，故为负反馈；

反馈电路从  $A_2$  的输出端引出，故为电压反馈；

电压串联  
负反馈

31

[例2] 判别图示电路从  $A_2$  输出端引入  $A_1$  输入端的反馈类型。



[解] 反馈信号和输入信号加在  $A_1$  的同一个输入端——并联反馈！

设为  $u_i$  正，则  $u_{o1}$  为正， $u_o$  为负。

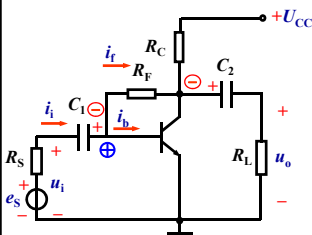
净输入电流  $i_d = i_i - i_f$  减小，故为负反馈；

反馈电路从  $R_L$  靠近“地”端引出，为电流反馈；

电流并联  
负反馈

32

### 基本放大电路中的反馈判别



反馈信号和输入信号加在三极管的基极——并联反馈！

净输入信号： $i_b = i_i - i_f$

反馈电流  $i_f$  削弱了净输入电流——负反馈

反馈信号取自输出电压——电压反馈  
(反馈信号从三极管的输出端直接取回)

$$\text{反馈电流 } i_f = \frac{u_{be} - u_o}{R_F} \approx \frac{-u_o}{R_F}$$

结论：反馈类型——电压并联负反馈

33

### 基本放大电路（共射极）中的反馈判别方法：

(1) 电压反馈与电流反馈判别方法：

电压反馈一般从后级放大器的集电极采样。

电流反馈一般从后级放大器的发射极采样。

注意：直流反馈中，输出电压指  $U_{CE}$ ，输出电流指  $I_E$  或  $I_C$ 。

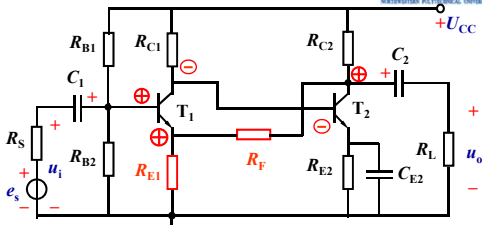
(2) 并联反馈与串联反馈判别方法：

并联反馈的反馈信号接于三极管基极。

串联反馈的反馈信号接于三极管发射极。

34

例3：判断图示电路中的反馈类型。



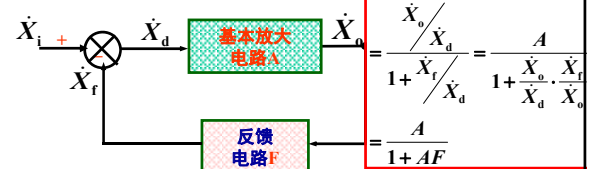
解：  $T_2$  集电极的  $\oplus$  反馈到  $T_1$  的发射极，提高了  $E_1$  的交流电位，使  $U_{be1}$  减小，故为负反馈；

反馈从  $T_2$  的集电极引出，是电压反馈；反馈电压引入到  $T_1$  的发射极，是串联反馈。

$R_{E1}$ 、 $R_F$  引入越级电压串联负反馈。

35

### 三、负反馈对放大电路性能的影响



反馈放大电路的基本方程

开环放大倍数

$$A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d}$$

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

$$\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

闭环放大倍数

$$A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{A}{1 + AF}$$

反馈系数

净输入信号

36



### 1、降低放大倍数

在  $A_f = \frac{A}{1+AF}$  中,

$$AF = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \cdot \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_d}$$

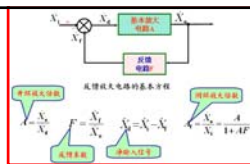
负反馈时,  $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_d$  同相, 所以  $AF$  是正实数

则有:  $|A_f| < |A|$  负反馈使放大倍数下降。

$|1+AF|$  称为反馈深度, 其值愈大, 负反馈作用愈强,  $A_f$  也就愈小。若  $|AF| \gg 1$ , 称为深度负反馈, 此时:

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

在深度负反馈的情况下, 闭环放大倍数仅与反馈电路的参数有关。



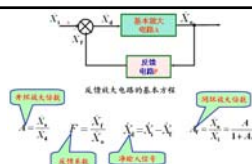
### 2、提高放大倍数的稳定性

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

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

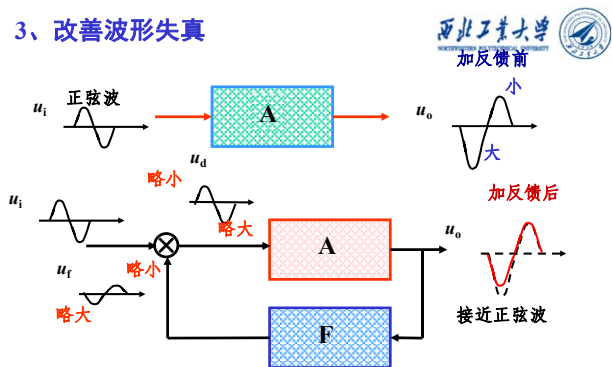
引入负反馈使放大倍数的稳定性提高。

放大倍数下降至  $1/(1+|AF|)$ , 其稳定性提高  $(1+|AF|)$  倍。



38

### 3、改善波形失真



负反馈是利用失真的波形来改善波形的失真, 因此只能减小失真, 而不能完全消除失真。

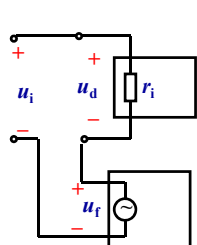
39

### 4、对输入电阻的影响

所谓输入电阻, 是从运算放大电路的输入电路看进去的交流等效电阻。因此电路有负反馈时, 输入电阻的改变只取决于输入电路的反馈方式 (反馈电路与输入端的连接方式, 串联还是并联), 而与输出电路的反馈方式 (反馈电路与输出端的连接方式, 电压还是电流) 没有直接关系。

40

#### (1) 串联负反馈



$$\text{无负反馈时: } r_i = \frac{\dot{U}_d}{\dot{I}_i}$$

有负反馈时:

$$\dot{U}_f = AF \times \dot{U}_d$$

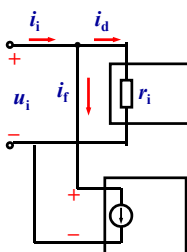
$$r_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_d + \dot{U}_f}{\dot{I}_i} = (1 + AF)r_i$$

串联负反馈使电路的输入电阻提高

理解: 串联负反馈相当于在输入回路中串联了一个电阻, 故输入电阻增加。

41

#### (2) 并联负反馈



$$\text{无负反馈时: } r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

有负反馈时:

$$\dot{I}_f = AF \times \dot{I}_d$$

$$r_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d + \dot{I}_f} = \frac{1}{1 + AF} r_i$$

并联负反馈使电路的输入电阻降低

理解: 并联负反馈相当于在输入回路中并联了一条支路, 故输入电阻减小。

42

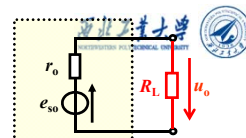
## 5、对输出电阻的影响

所谓输出电阻，是从运算放大电路的输出电路看进去的交流等效电阻。因此电路有负反馈时，输出电阻的改变只取决于输出电路的反馈方式（**反馈电路与输出端的连接方式，电压还是电流**），而与输入电路的反馈方式（反馈电路与输入端的连接方式，串联还是并联），没有直接关系。

43

### (1) 电压负反馈使电路的输出电阻降低

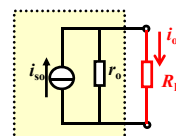
放大电路空载时可等效右图框中为电压源：



**理解：**电压负反馈目的是阻止 $\Delta u_o$ 的变化，**电压负反馈具有稳定输出电压的作用**，即输出电阻越小，输出电压越稳定，反之亦然。

### (2) 电流负反馈使电路的输出电阻提高

放大电路空载时可等效为右图框中电流源：



**理解：**电流负反馈目的是阻止 $\Delta i_o$ 的变化，**电流负反馈具有稳定输出电流的作用**，即输出电阻越大，输出电流越稳定，反之亦然。

44

## 6.3 集成运算放大器线性应用

集成运算放大器与外部电阻、电容、半导体器件等构成闭环电路后，能对各种模拟信号进行**比例、加、减、微分与积分、对数与指数以及乘除**等运算。

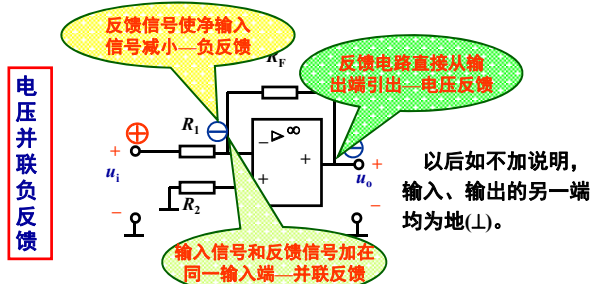
运算放大器**工作在线性区**时，通常要引入**深度负反馈**。所以，它的输出电压和输入电压的关系基本决定于反馈电路和输入电路的结构和参数，而与运算放大器本身的参数关系不大。改变输入电路和反馈电路的结构形式，就可以实现不同的运算。

45

## 一、比例运算电路

### 1、反比例运算

#### (1) 电路组成



**结构特点：**负反馈引到反相输入端，信号从反相端输入。

46

### 1、反比例运算

#### (2) 电压放大倍数

因虚断， $i_+ = i_- = 0$ ，所以  $i_1 \approx i_f$

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1} \quad i_f = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

因虚短，所以  $u_- = u_+ = 0$ ，**反相输入端“虚地”——反相输入的重要特点**

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

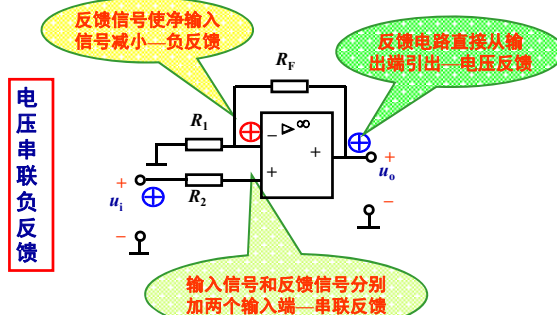
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

$R_2$ ? 因要求静态时  $u_+$ 、 $u_-$  对地电阻相同，所以**平衡电阻**  $R_2 = R_1 // R_F$

47

### 2、同比例运算电路

#### (1) 电路组成



**结构特点：**负反馈引到反相输入端，信号从同相端输入。

48



## 2、同相比例运算电路

### (2) 电压放大倍数

因虚断，所以  $u_+ = u_i$

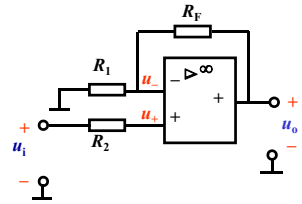
$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o$$

因虚短，所以  $u_- = u_+ = u_i$ ，  
反相输入端不“虚地”

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

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

因要求静态时  $u_+$ 、 $u_-$  对地电阻相同，所以平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_F$



49

## 3、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。**电压跟随器是同相比例运算放大器的特例。**

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

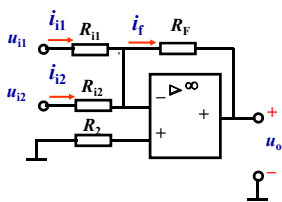
此电路是电压串联负反馈，输入电阻大，输出电阻小，在电路中作用与分离元件的射极输出器相同，但是电压跟随性能好。



50

## 二、加法和减法运算电路

### 1、加法运算电路



**平衡电阻：**

$$R_2 = R_{i1} // R_{i2} // R_F$$

因虚断， $i_- = 0$  所以  $i_{i1} + i_{i2} = i_F$

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

因虚短， $u_- = u_+ = 0$

$$\text{故得 } \frac{u_{i1}}{R_{i1}} + \frac{u_{i2}}{R_{i2}} = -\frac{u_o}{R_F}$$

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{i1}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{i2}} u_{i2}\right)$$

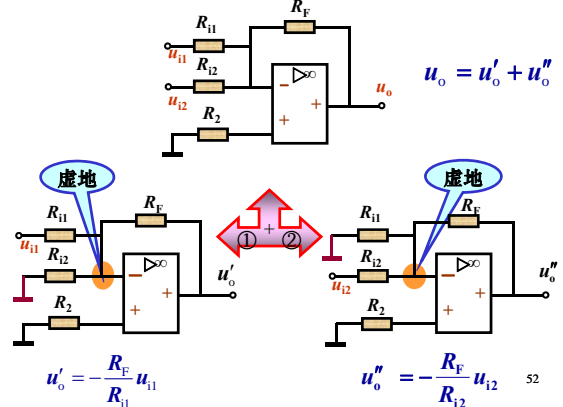
若  $R_{i1} = R_{i2} = R$ ,

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

51

### 分析方法2：利用叠加原理

反相加法运算电路可看作是二个反相比例运算电路的叠加。



52

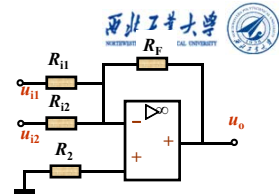
$$u_o = u'_o + u''_o = -\left(\frac{R_F}{R_{i1}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{i2}} u_{i2}\right)$$

▲ 若  $R_{i1} = R_{i2} = R_1$ ，则：

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

▲ 若  $R_{i1} = R_{i2} = R_F$ ，

则：  $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$



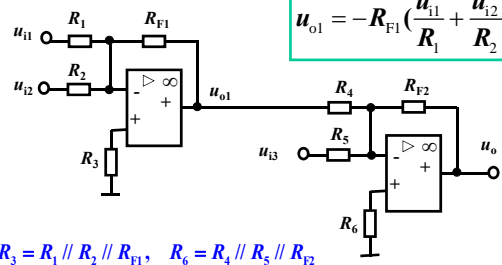
▲ 平衡电阻：

$$R_2 = R_{i1} // R_{i2} // R_F$$

53

## 双运放加法运算电路

$$u_{o1} = -R_{F1} \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right)$$

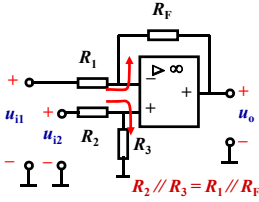
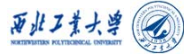


$$R_3 = R_1 // R_2 // R_{F1}, \quad R_6 = R_4 // R_5 // R_{F2}$$

$$u_o = -R_{F2} \left( \frac{u_{o1}}{R_4} + \frac{u_{i3}}{R_5} \right) = R_{F2} \left[ \frac{R_{F1}}{R_4} \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) - \frac{u_{i3}}{R_5} \right]$$

54

## 2、减法运算电路



由虚断可得：

$$\begin{cases} u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} \\ \frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F} \end{cases}$$

由虚短可得：\$u\_- = u\_+\$

如果取 \$R\_1 = R\_2\$, \$R\_3 = R\_F\$

则：\$u\_o = \frac{R\_F}{R\_1} (u\_{i2} - u\_{i1})\$

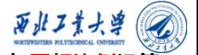
如 \$R\_1 = R\_2 = R\_3 = R\_F\$

则：\$u\_o = u\_{i2} - u\_{i1}\$

输出与两个输入信号的差值成正比—差动放大器。

55

## 分析方法2：利用叠加原理



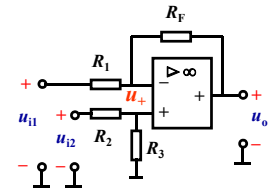
减法运算电路可看作是反相比例运算电路与同相比例运算电路的叠加。

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

$$u''_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) u_+$$

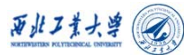
$$= (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

$$u_o = u'_o + u''_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$



56

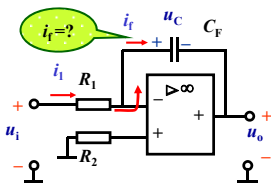
## 三、积分和微分运算电路



### 1、积分运算电路

由虚短及虚断性质可得

$$i_1 = i_f$$



$$i_1 = \frac{u_i}{R_1} \quad i_f = C_F \frac{du_o}{dt}$$

$$\frac{u_i}{R_1} = C_F \frac{du_o}{dt} = -C_F \frac{du_o}{dt}$$

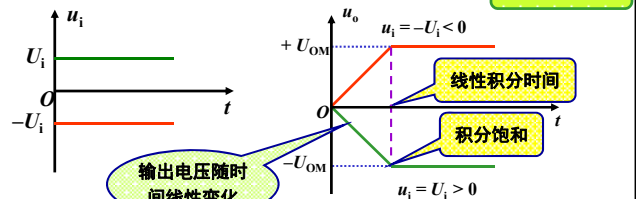
$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$

57

若输入信号电压为恒定直流量，即 \$u\_i = U\_i\$ 时，则

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int U_i dt = -\frac{U_i}{R_1 C_F} t \quad 0 \leq t \leq \left| \frac{\pm U_{OM}}{U_i} \right| R_1 C_F$$

线性积分时间



采用集成运算放大器组成的积分电路，\$u\_o\$ 是时间 \$t\$ 的一次函数，从而提高了它的线性度。

58

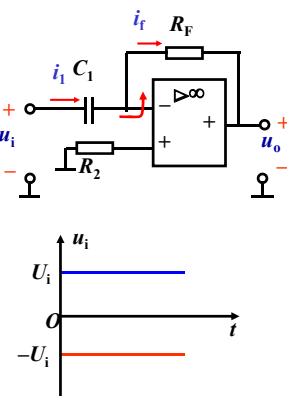
### 2、微分运算电路

由虚短及虚断性质可得

$$i_1 = i_f$$

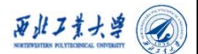
$$C_1 \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_o}{R_F}$$

$$u_o = -R_F C_1 \frac{du_i}{dt}$$



59

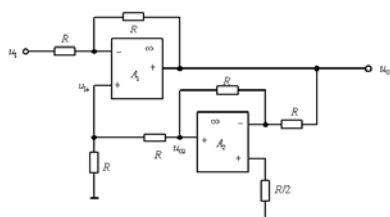
## 运算电路要求



- 1、熟记前各种基本运算电路的电路图及放大倍数公式。
- 2、以上基本运算电路级联后输出的计算。
- 3、会用“虚断 (\$i\_+ = i\_- = 0\$) 和虚短 (\$u\_+ = u\_-\$)”分析给定运算电路的放大倍数。

60

例1: 电路如图所示,  $R=100\text{k}\Omega$ , 求输出电压 $u_o$ 与输入电压 $u_i$ 之间关系的表达式。



解: 对于运算放大器  $A_2$ :  $u_{o2} = -u_o$

对于运算放大器  $A_1$ :  $u_{i1} = -\frac{1}{2}u_o$ ,  $\frac{u_i - u_{i1}}{R} = \frac{u_{i1} - u_o}{R}$

整理得:  $u_o = -\frac{1}{2}u_i$

61

例2: 试求下图的放大倍数, 设 $R_F \gg R_4$ 。(教材)

解: 因 $i_1 \approx i_f$ ,  $u_- \approx u_+ = 0$

故得  $\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_A}{R_F}$ ,  $u_A = -\frac{R_F}{R_1}u_i$

又  $i_f + i_3 = i_4$  或  $i_1 + i_3 = i_4$

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

因 $R_F \gg R_4$ , 故  $u_o = -\frac{R_F R_4 + R_F R_3}{R_1 R_4}u_i$

将 $u_A$ 代入, 整理后得

整理后得

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

62

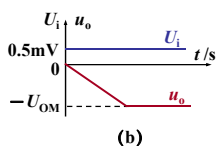
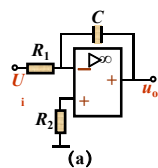
例3: 图(a)所示积分电路中,  $R_1 = 500\text{k}\Omega$ ,  $C = 0.5\mu\text{F}$ , 电路接通前电容未充电。当电路接通后, 测得 $u_o$ 从零下降到 $-2\text{mV}$ 所需要的时间为 $1\text{s}$ , 求: 输入的直流电压 $U_i$ , 并画出输入和输出电压的波形。

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt \\ &= -\frac{1}{R_1 C} \int U_i dt = -\frac{1}{R_1 C} U_i t \\ &= \frac{U_i t}{500 \times 10^3 \times 0.5 \times 10^{-6}} \\ &= -4U_i t \end{aligned}$$

$$-2\text{mV} = -4U_i$$

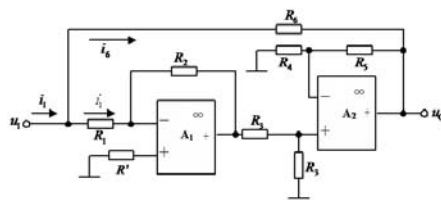
$$U_i = 0.5\text{mV}$$

$U_i$ 和 $u_o$ 的波形如图(b)所示。



63

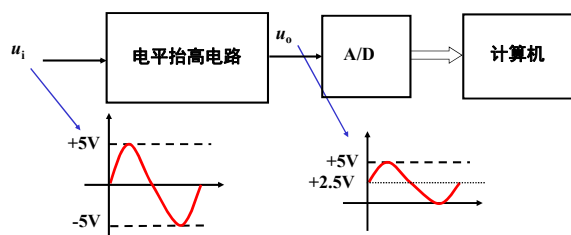
例4: 在下图所示的电路中, 若已知 $u_o = -3u_i$ ,  $u_i / i_1 = 7.5\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = R_6$ , 求电阻 $R_6$ 为多少?



$$\begin{aligned} \text{解: } \begin{cases} i_1 = i_6 + i_1 \\ i_6 = \frac{u_i - u_o}{R_6} \\ i_1 = \frac{u_i}{R_1} \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} i_1 &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{4}{R_6}\right)u_i \\ \frac{u_i}{i_1} &= \frac{R_1 R_6}{4R_1 + R_6} = 7.5\text{k}\Omega \\ R_6 &= 37.5\text{k}\Omega \end{aligned} \end{aligned}$$

64

例5: A/D转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 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$ 。试设计一电平抬高电路, 将其变化范围变为 $0 \sim +5\text{V}$ 。

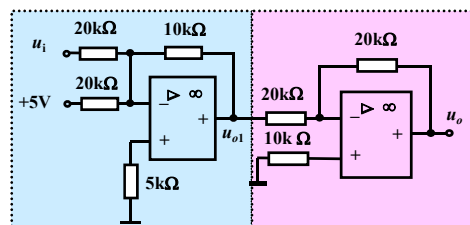


$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \text{ (V)}$$

实现此功能的方法很多

65

$$\begin{aligned} u_o &= 0.5u_i + 2.5 \text{ V} \\ &= 0.5(u_i + 5) \text{ V} \end{aligned}$$

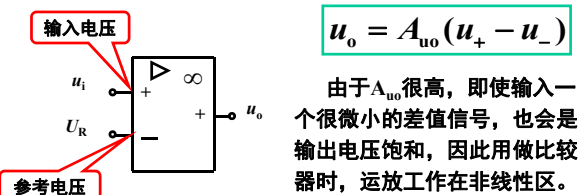


$$\begin{aligned} u_{o1} &= -\frac{10}{20} \times (u_i + 5) = -0.5(u_i + 5) \\ u_o &= -\frac{20}{20} \times u_{o1} = 0.5(u_i + 5) \end{aligned}$$

66

## 6.4 集成运算放大器非线性应用

### 电压比较器

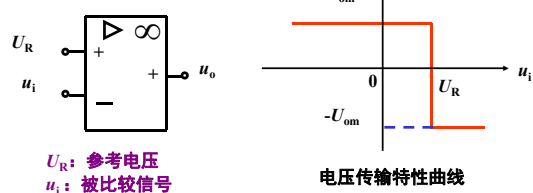


**电压比较器的功能：**电压比较器用来比较输入信号与参考电压的大小。当两者幅度相等时输出电压产生跃变，由高电平变成低电平，或者由低电平变成高电平。由此来判断输入信号的大小和极性。

67

### 1、任意电压比较器

#### (1) $u_i$ 从反相端输入

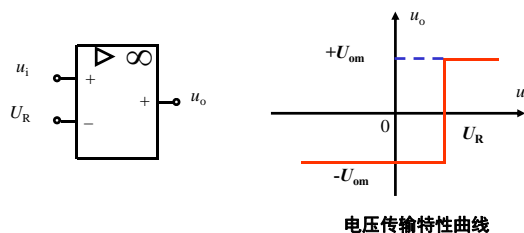


**特点：**运放处于开环状态。开环电压放大倍数很高。

当  $u_i < U_R$  时， $u_o = +U_{om}$ ，当  $u_i > U_R$  时， $u_o = -U_{om}$

68

#### (2) $u_i$ 从同相端输入

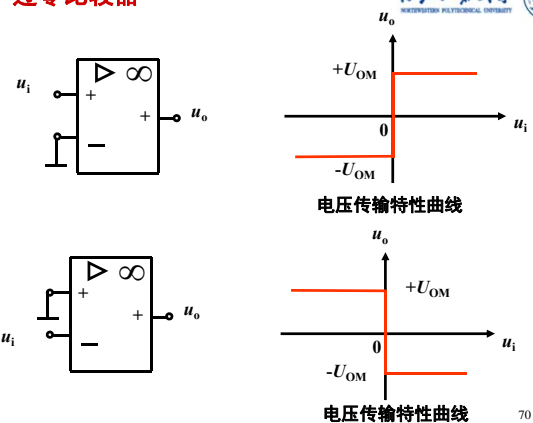


当  $u_i > U_R$  时， $u_o = +U_{om}$

当  $u_i < U_R$  时， $u_o = -U_{om}$

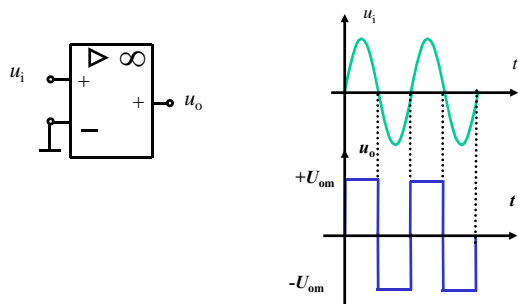
69

### 2、过零比较器



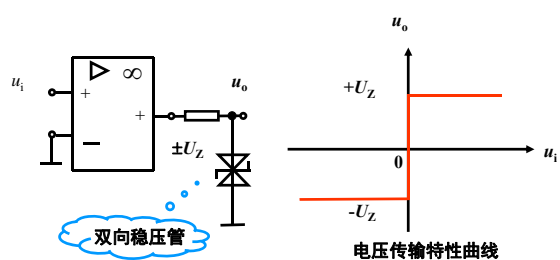
70

**例：**利用电压比较器将正弦波变为方波。



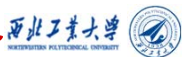
71

**电路改进：**用稳压管稳定输出电压。



72

## 第6章 集成运算放大器



### 本章要求:

- 1、掌握运算放大器的电压传输特性以及理想运算放大器的分析依据。
- 2、掌握负反馈的判别方法，掌握负反馈对放大电路动态性能的影响。
- 3、理解用集成运放组成的比例、加减、微分和积分运算电路的工作原理。
- 4、理解电压比较器的工作原理、电压传输特性和应用。

第6章 结束

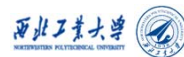


73

## 第6章 作业

### 习题集:

6.5、6.6、6.7、6.8、6.9、6.10、6.11



74