

# 第一章 半导体二极管

## 1. 本征半导体

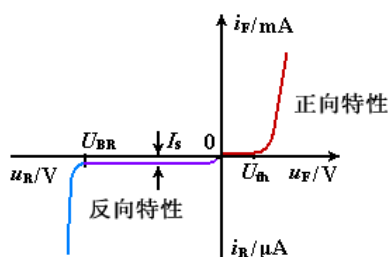
- 单质半导体材料是具有 4 价共价键晶体结构的硅 Si 和锗 Ge。
- 导电能力介于导体和绝缘体之间。
- 特性：光敏、热敏和掺杂特性。
- 本征半导体：纯净的、具有完整晶体结构的半导体。在一定的温度下，本征半导体内的最重要的物理现象是本征激发（又称热激发），产生两种带电性质相反的载流子（空穴和自由电子对），温度越高，本征激发越强。
  - ◆ 空穴是半导体中的一种等效+q 的载流子。空穴导电的本质是价电子依次填补本征晶体中空位，使局部显示+q 电荷的空位宏观定向运动。
  - ◆ 在一定的温度下，自由电子和空穴在热运动中相遇，使一对自由电子和空穴消失的现象称为复合。当热激发和复合相等时，称为载流子处于动态平衡状态。

## 2. 杂质半导体

- 在本征半导体中掺入微量杂质形成的半导体。体现的是半导体的掺杂特性。
  - ◆ P 型半导体：在本征半导体中掺入微量的 3 价元素（多子是空穴，少子是电子）。
  - ◆ N 型半导体：在本征半导体中掺入微量的 5 价元素（多子是电子，少子是空穴）。
- 杂质半导体的特性
  - ◆ 载流子的浓度：多子浓度决定于杂质浓度，几乎与温度无关；少子浓度是温度的敏感函数。
  - ◆ 体电阻：通常把杂质半导体自身的电阻称为体电阻。
  - ◆ 在半导体中，存在因电场作用产生的载流子漂移电流（与金属导电一致），还才能在因载流子浓度差而产生的扩散电流。

## 3. PN 结

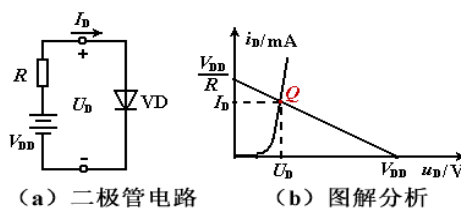
- 在具有完整晶格的 P 型和 N 型半导体的物理界面附近，形成一个特殊的薄层（PN 结）。
- PN 结中存在由 N 区指向 P 区的内建电场，阻止结外两区的多子的扩散，有利于少子的漂移。
- PN 结具有单向导电性：正偏导通，反偏截止，是构成半导体器件的核心元件。
  - ◆ 正偏 PN 结 (P+, N-)：具有随电压指数增大的电流，硅材料约为 0.6-0.8V，锗材料约为 0.2-0.3V。
  - ◆ 反偏 PN 结 (P-, N+)：在击穿前，只有很小的反向饱和电流  $I_s$ 。
  - ◆ PN 结的伏安（曲线）方程：



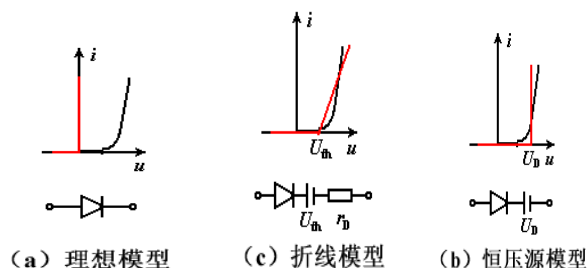
## 4. 半导体二极管

- 普通的二极管内芯片就是一个 PN 结，P 区引出正电极，N 区引出负电极。

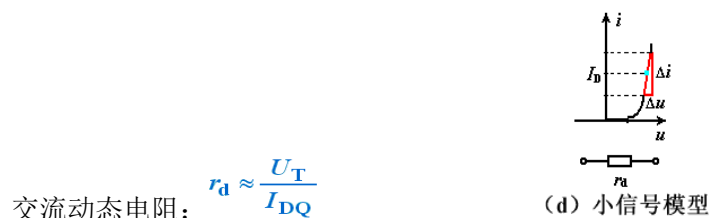
- ◆ 单向导电性：正向导通，反向截止。
- ◆ 正向导通压降：硅管 0.6~0.7V，锗管 0.2~0.3V。
- ◆ 死区电压：硅管 0.5V，锗管 0.1V。
- 分析方法：将二极管断开，分析二极管两端电位的高低：
  - ◆ 若  $V_{\text{阳}} > V_{\text{阴}}$  (正偏)，二极管导通(短路)；
  - ◆ 若  $V_{\text{阳}} < V_{\text{阴}}$  (反偏)，二极管截止(开路)。
- 方法 1：图解分析法
  - ◆  $U_D = V_{DD} - I_D R$  该式与伏安特性曲线的交点叫静态工作点  $Q$ 。



- 方法 2：等效电路法
  - ◆ 直流等效电路法（低频大信号模型）

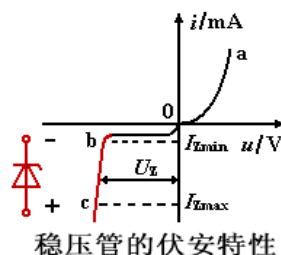


- ◆ 微变等效电路法（低频小信号模型）



## 5. 稳压二极管

- 二极管反偏电压增大到一定值时，反向电流突然增大的现象称为反向击穿。
- 反向击穿的主要原因是价电子碰撞电离而发生的“雪崩击穿”。
- 稳压二极管的特性：常工作时处在 PN 结的反向击穿区。
- 稳压管的参数：稳定电压、稳定电流、额定功耗、动态电阻、温度系数。
- 稳压管的应用：限幅电路，稳压电路。



## 第二章 晶体三极管及基本放大电路

### 4.1 晶体三极管

#### 1. 三极管的结构、类型及特点

- 类型：分为 NPN 和 PNP 两种。
- 形成两个结：发射结和集电结；三个区域：发射区、集电区和基区。
- 结构特点：
  - ◆ 基区很薄，且掺杂浓度最低；
  - ◆ 发射区掺杂浓度很高，与基区接触面积较小；
  - ◆ 集电区结面积大，掺杂浓度较高。

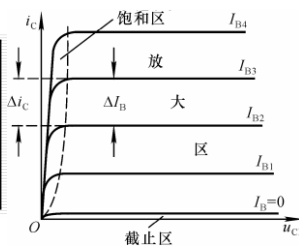
#### 2. 三极管的工作原理

- 电流控制性器件，具有电流放大作用
- 电流放大的外部条件：
  - ◆ 发射结正向偏置，集电结反向偏置。。
- 所谓的放大：实质上是一种能量控制作用，通过晶体管这种有源元件对直流电源的能量进行控制，使负载从电源中获得的输出信号的能量比信号源向放大电路提供的能量大的多。放大的特征是功率放大。

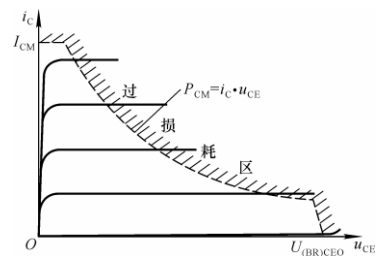
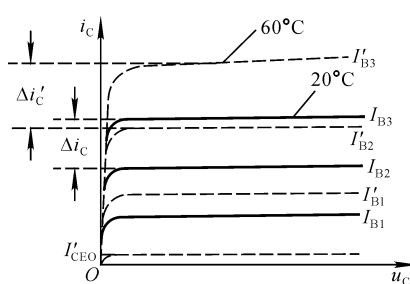
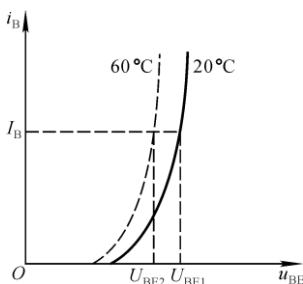
#### 3. 晶体管的三个工作区

- 放大区，饱和区，截止区
  - ◆ 判断晶体管处于哪一个工作区的方法。
  - ◆ 放大区的电流分配关系。

状态	$u_{BE}$	$i_C$	$u_{CE}$
截止	$< U_{on}$	$I_{CEO}$	$V_{CC}$
放大	$\geq U_{on}$	$\beta i_B$	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$\leq u_{BE}$



- 温度对晶体管特性及参数的影响：
  - ◆ 温度升高，输入特性曲线向左移动。
  - ◆ 温度升高  $I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$ 、 $I_C$  以及  $\beta$  均增加。



- 晶体管的主要参数
  - ◆ 电流放大倍数：交流和直流
  - ◆ 极限参数：最大集电极耗散功率、最大集电极电流、极间反向击穿电压

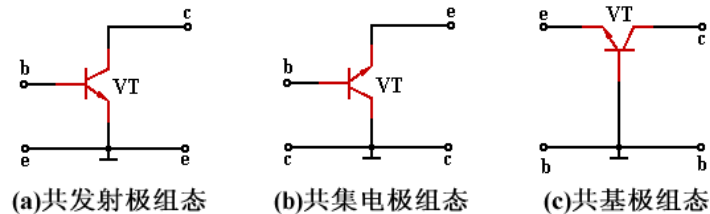
### 4.2 放大电路的组成原则

- 晶体管放大电路的原则

- ◆ 确保合适的工作点（处于放大区）；
- ◆ 确保被放大的交流输入信号能够作用于晶体管的输入回路；
- ◆ 确保放大后的交流输出信号能传送到负载上去。

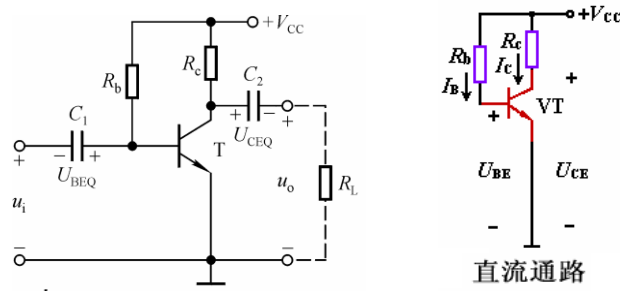
□ 理解静态工作点的必要性！

□ 三极管的三种基本组态



### 4.3 放大电路的基本分析方法

□ 共射极电路的分析方法



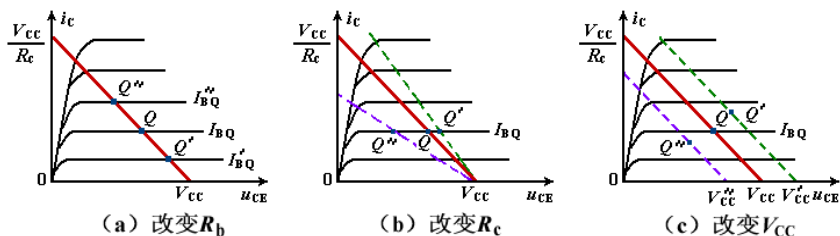
- ◆ 理解个元件的作用；
- ◆ 直流通路与静态分析：

★ 直流通路：电容视为开路；

★ 图解法与解析法

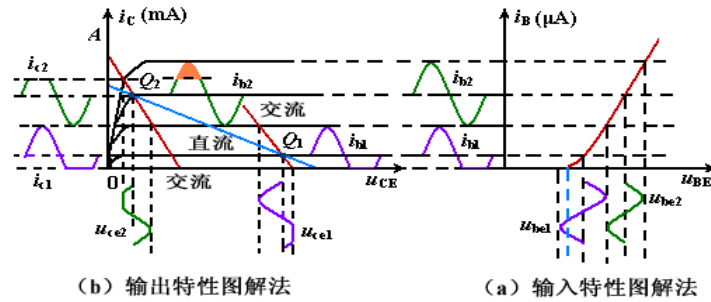
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}, \quad I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}, \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

- ◆ 电路参数对静态工作点的影响；



- ★ 直流负载线：由  $V_{CC} = I_c R_c + U_{CE}$  确定的直线。
- ★ 改变  $R_b$ ：Q 点将沿直流负载线上下移动。
- ★ 改变  $R_c$ ：Q 点在  $I_{BQ}$  所在的那条输出特性曲线上移动。
- ★ 改变  $V_{CC}$ ：直流负载线平移，Q 点发生移动。

◆ 静态工作点与非线性失真



★ 截止失真

- 产生原因---Q 点设置过低
- 消除方法---减小  $R_b$ ，提高  $Q$ 。

★ 饱和失真

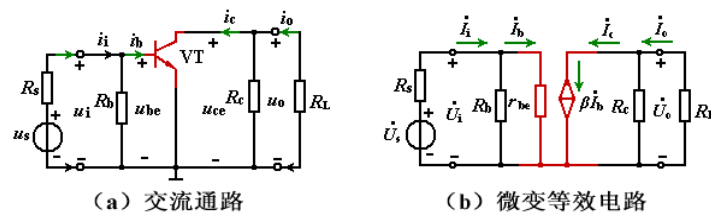
- 产生原因---Q 点设置过高
- 消除方法---增大  $R_b$ 、减小  $R_c$ 、增大  $V_{CC}$ 。

★ 放大器的动态范围：失真输出电压的峰峰值  $U_{opp}$ 。

- 当  $(U_{CEQ} - U_{CES}) > (V_{CC} - U_{CEQ})$  时，受截止失真限制， $U_{OPP} = 2U_{OMAX} = 2I_{CQ}R_L'$ 。
- 当  $(U_{CEQ} - U_{CES}) < (V_{CC} - U_{CEQ})$  时，受饱和失真限制， $U_{OPP} = 2U_{OMAX} = 2(U_{CEQ} - U_{CES})$ 。
- 当  $(U_{CEQ} - U_{CES}) = (V_{CC} - U_{CEQ})$ ，放大器将有最大的不失真输出电压。

◆ 交流通路和动态分析：(分析信号被放大的过程)

- ★ 交流通路：电容视为短路,理想直流电压源视为短路。
- ★ 图解法
- ★ 微变等效电路法



➢ 放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_L'}{r_{be}} \quad \dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{\beta R_L'}{r_{be}}$$

➢ 输入电阻

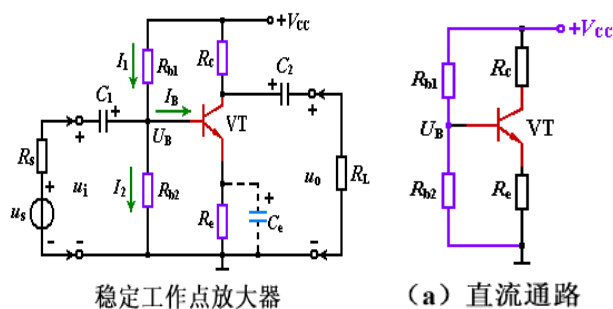
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_i/R_b + \dot{U}_i/r_{be}} = R_b // r_{be}$$

➢ 输出电阻

$$R_o = \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} \approx R_c$$

## □ 分压式稳定工作点共射电路

◆ 静态分析：

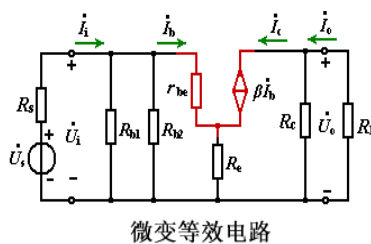


$$U_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_e}, \quad I_{BQ} \approx I_{CQ} / \beta$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e)$$

◆ 动态分析



无旁路电容：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$R_o \approx R_c$$

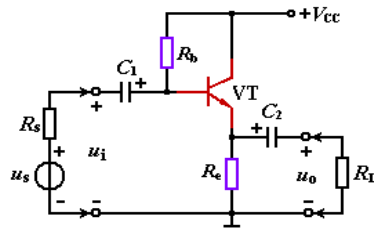
在  $R_e$  两端并一电解电容  $C_e$  后：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}}; \quad \dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \dot{A}_u$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$R_o \approx R_c$$

## □ 共集电极基本放大电路



(a) 共集电极基本放大电路

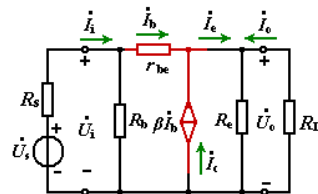
◆ 静态分析

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_e$$

◆ 动态分析



(b) H参数等效电路

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$$

$$R_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$$

$$R_o = \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} = R_e // \frac{r_{be} + R_{sb}}{1 + \beta}$$

◆ 电路特点

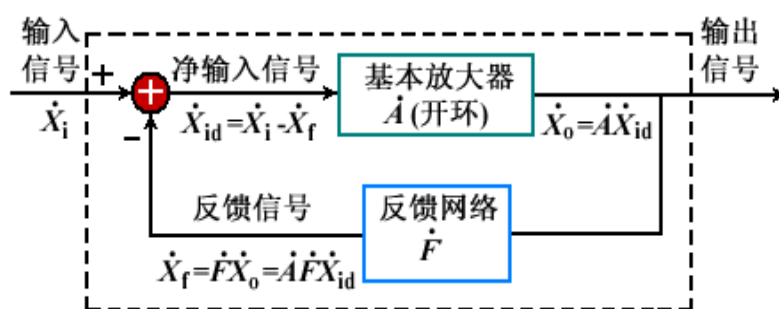
- 电压放大倍数为正，且略小于 1，称为射极跟随器，简称射随器。
- 输入电阻高，输出电阻低。
- 应用：多级放大器的输入级、输出级、或作为两个共射极电路的中间级。

□ 三种组态放大电路比较

	共发射极	共集电极	共基极
电压增益	$-\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$	$\frac{(1+\beta) \cdot (R_e // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_e // R_L)}$	$\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$
输入电阻	$R_b // r_{be}$	$R_b // [r_{be} + (1+\beta)(R_e // R_L)]$	$R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$
输出电阻	$R_c$	$R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1+\beta}$	$R_c$

## 第六章 负反馈技术

放大器的输出电压（或电流）经反馈网络在放大器输入端产生反馈信号，该反馈信号与放大器原来输入信号共同控制放大器的输入，即构成反馈放大器。



反馈放大器组成方框图

### 一、单环负反馈理想模型

#### 1. 基本定义：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

- 开环放大倍数—— $A$
- 闭环放大倍数—— $A_f$
- 反馈系数—— $F$
- 反馈深度—— $1+AF$

- ◆ 1. 当  $AF > 0$  时， $A_f$  下降，这种反馈称为负反馈。
- ◆ 2. 当  $AF = 0$  时，表明反馈效果为零。
- ◆ 3. 当  $AF < 0$  时， $A_f$  升高，这种反馈称为正反馈。
- ◆ 4. 当  $AF = -1$  时， $A_f \rightarrow \infty$ 。放大器处于“自激振荡”状态。

#### 2. 深度负反馈



□ 当  $AF \gg 1$  时称深负反馈

□ 深负反馈的特征是：反馈信号  $X_f$  接近原输入信号  $X_i$ ，使净输入  $X_{id}$  很小；此时，闭环增益  $A_f$  只由反馈网络决定。

## 二、反馈的形式和判断

1. 反馈的范围——本级或级间。

2. 反馈的性质——交流、直流或交直流。

直流通路中存在反馈则为直流反馈，交流通路中存在反馈则为交流反馈，交、直流通路中都存在反馈则为交、直流反馈。

3. 反馈的取样——

电压反馈：反馈量取样于输出电压；具有稳定输出电压的作用。（输出短路时反馈消失）

电流反馈：反馈量取样于输出电流。具有稳定输出电流的作用。（输出短路时反馈不消失）

4. 反馈的方式——

并联反馈：反馈量与原输入量在输入电路中以电流形式相叠加。 $R_s$  越大反馈效果越好。  
反馈信号反馈到输入端）

串联反馈：反馈量与原输入量在输入电路中以电压的形式相叠加。 $R_s$  越小反馈效果越好。  
反馈信号反馈到非输入端）

5. 反馈极性——瞬时极性法：

(1) 假定某输入信号在某瞬时的极性为正（用+表示），并设信号的频率在中频段。

(2) 根据该极性，逐级推断出放大电路中各相关点的瞬时极性（升高用 + 表示，降低用 - 表示）。

(3) 确定反馈信号的极性。

(4) 根据  $X_i$  与  $X_f$  的极性，确定净输入信号的大小。 $X_{id}$  减小为负反馈； $X_{id}$  增大为正反馈。

6. 反馈类型及用双口网路表示的理想模型

• 由于基本放大器与反馈网络在输出口的接法不同，取样信号可能是输出电压或输出电流；由于基本放大器与反馈网络在输入口的接法不同，求和信号也可能为电压或电流。因此有四种不同的反馈类型，表 7-1 给出了这四种类型的总结。

表 7-1 四种反馈类型各物理量的含义

物理量 类型	$X_i, X_f, X_{id}$	$X_o$	$A$	$A_f$	$F$
电压取样电压求和反馈 (电压串联反馈)	电压	电压	电压比	电压比	电压比
电压取样电流求和反馈 (电压并联反馈)	电流	电压	互阻	互阻	互导
电流取样电压求和反馈 (电流串联反馈)	电压	电流	互导	互导	互阻
电流取样电流求和反馈 (电流并联反馈)	电流	电流	电流比	电流比	电流比

\*表中的互阻又称为传输阻抗，互导又称为传输导纳。

反馈网络可以看成是一个受控源。实现各类反馈的规律是： $A$ 、 $F$  两网络与负载在输出口并联实现电压取样；串联则实现电流取样。 $A$ 、 $F$  两网络与源电流  $i_s$  在输入口并联形成电流求和； $A$ 、 $F$  两网络与源电压  $V_s$  在输入口串联形成电压求和。

## 三、负反馈对放大器性能的影响

## 1. 负反馈环具有自动调节功能

任何因素使输出端取样信号  $X_o$  发生变化，负反馈可以减小这种变化，使  $X_o$  稳定。

利用负反馈的稳定  $X_o$  的功能可以解释为什么负反馈能使  $A_f$  稳定，展宽通频带和减小非线性失真。

2. 可以提高闭环增益的稳定性。
3. 可以扩展闭环增益的通频带
4. 可以减小非线性失真及抑制环内干扰和噪声。
5. 直流负反馈可以稳定放大器工作点。
6. 改变输出电阻与取样方式有关。

电压取样负反馈使输出电阻减小；电流取样负反馈使输出电阻增大。

## 7. 改变输入电阻与求和方式有关。

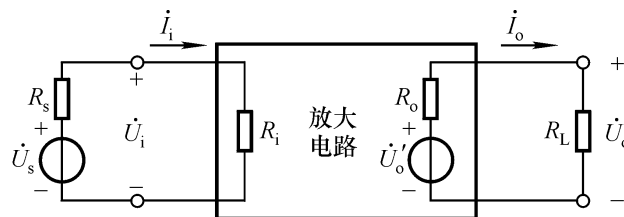
电流求和负反馈使输入电阻减小；电压求和负反馈使输入电阻增大。

## 四、深负反馈条件下电压增益的估算

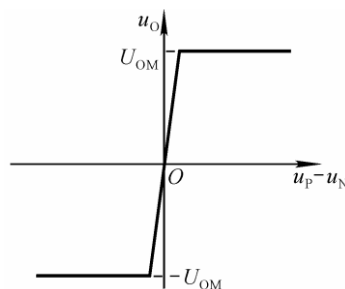
两种出发点:基于反馈网络的放大;基于理想运放的方法.

## 第七章 集成运放及其应用

### □ 放大电路模型



### □ 集成运放的电压传输特性



- 当  $u_i$  在  $+U_{im}$  与  $-U_{im}$  之间，运放工作在线性区域：

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

### □ 理想集成运放的参数

- 开环电压放大倍数  $A_{od} \rightarrow \infty$ ;
- 差模输入电阻  $R_{id} \rightarrow \infty$ ;
- 输出电阻  $R_o \rightarrow 0$ ;
- 共模抑制比  $K_{CMR} \rightarrow \infty$ ;

### □ 理想集成运放的分析方法

- 运放工作在线性区:

★ 电路特征——引入负反馈

★ 电路特点——“虚短”和“虚断”：

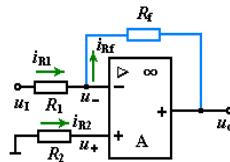
■ 运放工作在非线性区

★ 电路特征——开环或引入正反馈

★ 电路特点——输出电压的两种饱和状态：当  $u_+ > u_-$  时， $u_o = +U_{om}$ ，当  $u_+ < u_-$  时， $u_o = -U_{om}$

## □ 基本运算电路

■ 反相比例运算电路

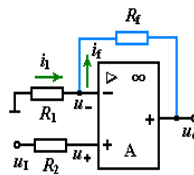


(a) 基本形式

$$R_2 = R_1 // R_f$$

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_1$$

■ 同相比例运算电路

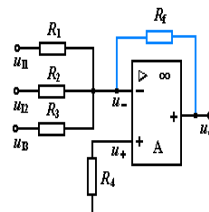


(a) 基本形式

$$R_2 = R_1 // R_f$$

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

■ 反相求和运算电路

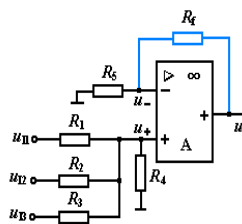


反相求和运算电路

$$R_4 = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$$

$$u_o = -R_f \left( \frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} + \frac{u_{13}}{R_3} \right)$$

■ 同相求和运算电路

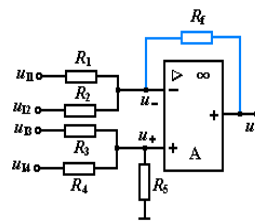


同相求和运算电路

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

$$u_O = (1 + \frac{R_f}{R_5})(\frac{R_f}{R_1}u_{I1} + \frac{R_f}{R_2}u_{I2} + \frac{R_f}{R_3}u_{I3})$$

■ 加减运算电路

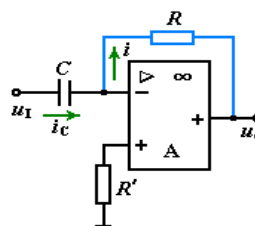


单运放加减运算电路

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

$$u_O = R_f (\frac{u_{I3}}{R_3} + \frac{u_{I4}}{R_4} - \frac{u_{I1}}{R_1} - \frac{u_{I2}}{R_2})$$

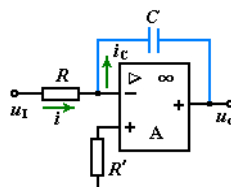
■ 积分运算



(a) 基本微分电路

$$u_O = -\frac{1}{RC} \int u_I dt$$

■ 微分运算



基本积分运算电路

$$u_O = -RC \frac{du_I}{dt}$$