

# 第十一章 模拟电子技术

2020-12-15



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

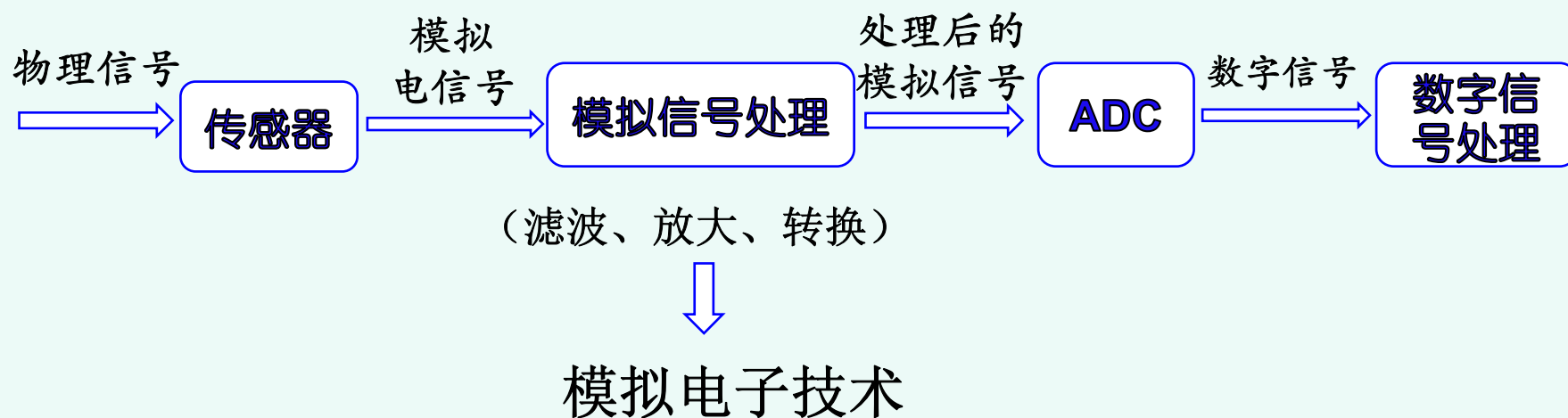
电工基础教研室

电工  
电子学

# 引言

电子技术: 利用电子电路完成信号的处理（提取、过滤、转换、放大）

- 分类
  - 模拟电子电路：处理模拟信号，即随时间连续变化的信号
  - 数字电子电路：处理数字信号，即高低电平。



## 本章重点及难点

- 二极管的工作原理及应用
- 三极管的工作原理及应用
- 基本放大电路的电路分析及工作原理
- 集成运放的应用
- 直流稳压电路分析



## § 11.1 半导体二极管

### 一、半导体的导电特性

根据导电性能，将自然界的物质分为三类：

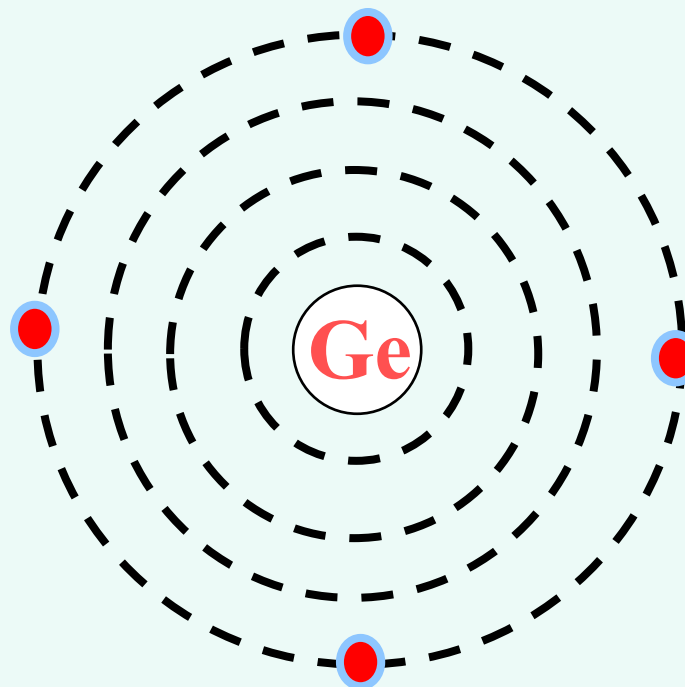
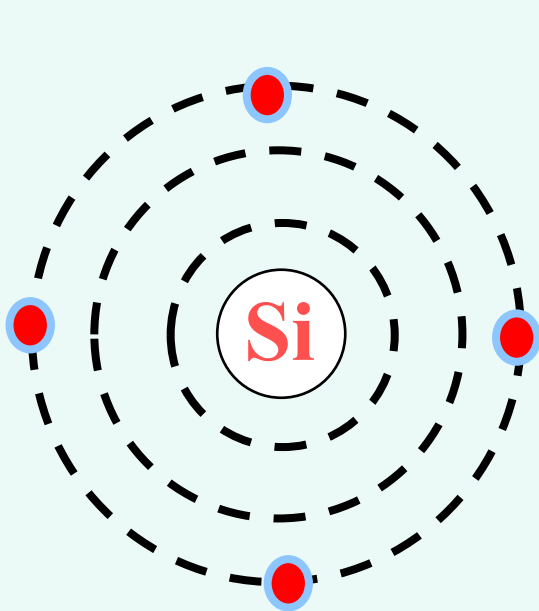
**导体：**容易导电的物质，如金属。

**绝缘体：**不易导电、几乎不导电的物质，如橡胶、塑料。

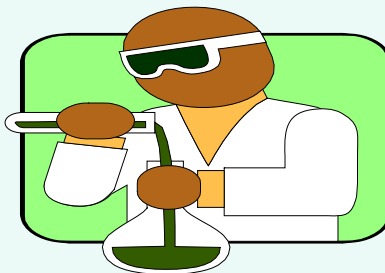
**半导体：**导电特性处于导体和绝缘体之间的物质，如锗Ge、硅Si、砷化镓和一些硫化物、氧化物等。

## 1. 本征半导体

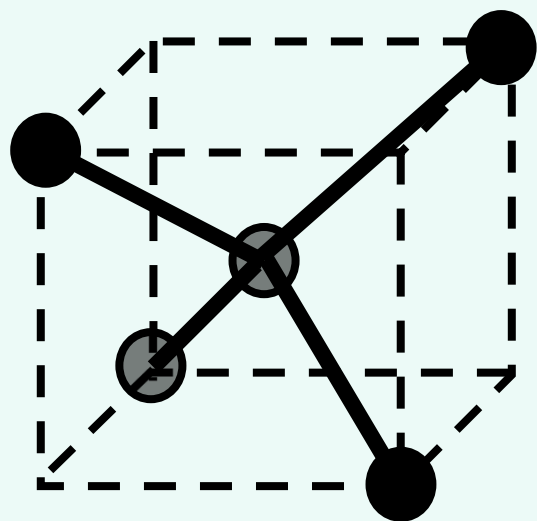
现代电子学中，用的最多的半导体是**硅**和**锗**，其导电性能是由其原子结构决定的，**最外层电子（价电子）都是四个。**



# 1.本征半导体



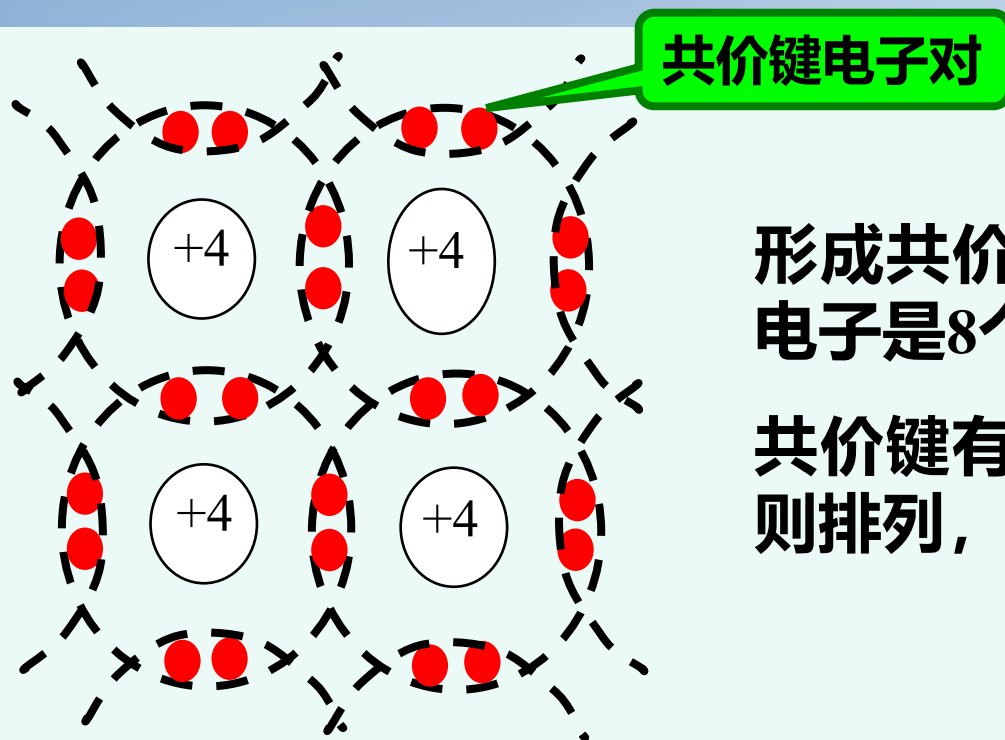
纯净的、结构完整的半导体，称为**本征半导体**。  
通过一定的提纯工艺，可以将半导体制成**晶体**。



硅和锗的晶体结构

硅和锗晶体，每个原子都处在中心，而四个相邻原子位于四面体的顶点，每个原子与其相邻的原子之间形成**共价键**，共用一对价电子。

## 1. 本征半导体



形成共价键后，每个原子的最外层电子是8个，构成稳定结构。

共价键有很强的结合力，使原子规则排列，形成晶体。

共价键中的两个电子被紧紧束缚在共价键中，称为**束缚电子**，常温下束缚电子很难脱离共价键成为**自由电子**，因此**本征半导体**中的自由电子很少，所以本征半导体的导电能力很弱。



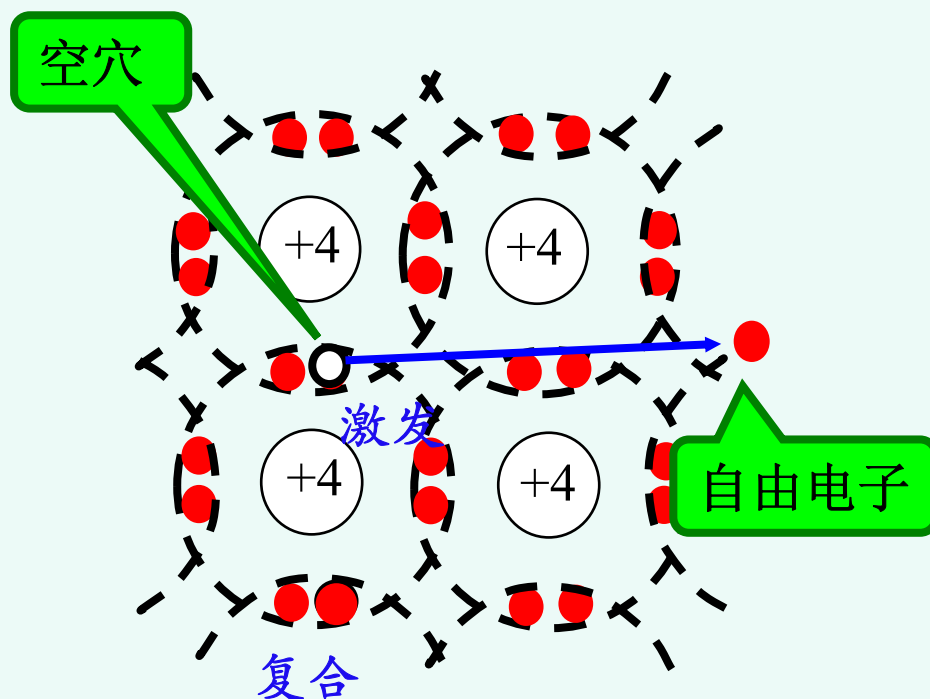
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



# 本征半导体的导电机理

1 当温度升高或受到光的照射，价电子能量增高，可以挣脱原子核的束缚成为**自由电子**而参与导电。

这一现象称为**本征激发**，也称**热激发**。



本征激发和复合的过程

2 **自由电子**产生的同时，在其原来的共价键中就出现了一个空位，称为**空穴**。

自由电子和空穴总是成对地出现与复合，称为**电子空穴对**。

3 附近的自由电子容易填补到空穴中，称为**复合**。

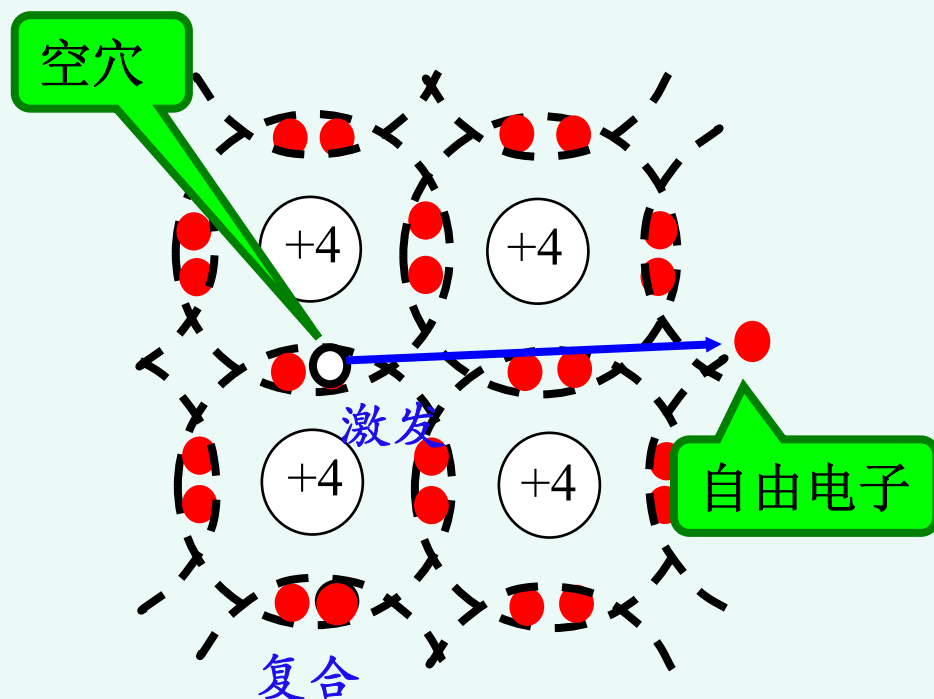


# 本征半导体的导电机理

➤ 自由电子作定向运动所形成**电子电流**;

➤ 空穴运动相当于正电荷的运动, 形成**空穴电流**。

**自由电子和空穴都称为载流子。**



**本征激发和复合的过程**

➤ 在半导体中, **电子和空穴同时参与导电**, 这是半导体导电方式的最大特点, 也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

➤ 室温下, 载流子数量极少, 导电能力很弱。温度越高, 载流子数目越多, 导电性能也就越好。所以, **温度对半导体器件性能的影响很大。**

## 2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素（杂质），就会使半导体的导电性能发生显著变化，掺入了杂质的半导体称为**杂质半导体**

原因是掺杂半导体的某种载流子浓度大大增加。

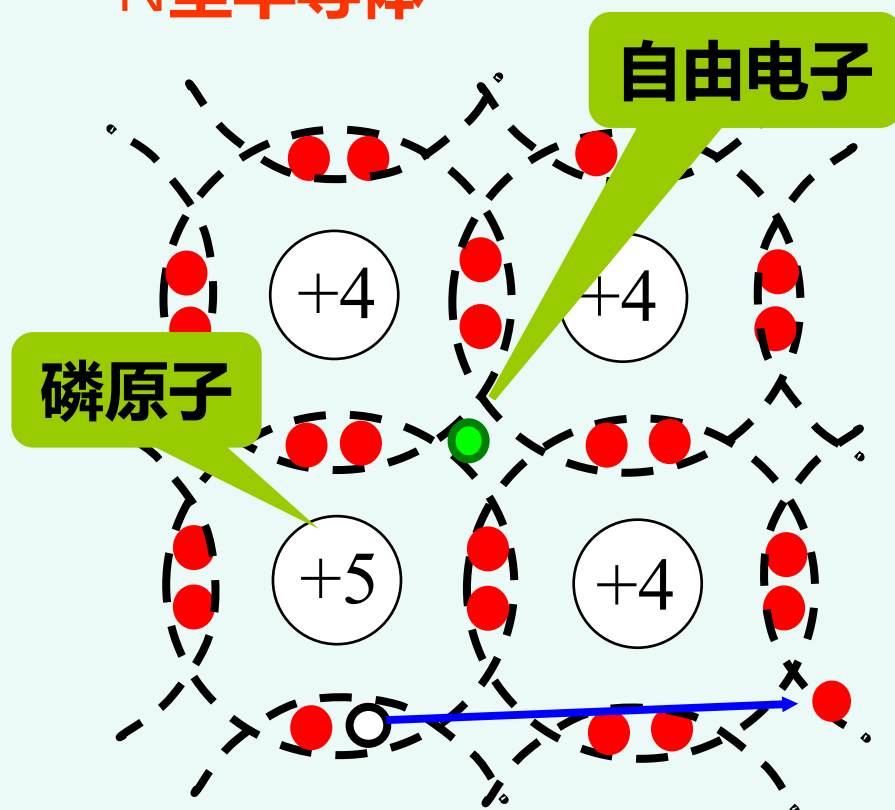
杂质半导体

**N型半导体：**掺入+5价元素（P, Sb），  
自由电子浓度增加

**P型半导体：**掺入+3价元素（B, In），  
空穴浓度增加

## 2. 杂质半导体

### N型半导体



在硅或锗晶体点阵中，某些半导体原子被杂质取代，磷原子的最外层有五个价电子，其中四个与相邻的半导体原子形成共价键，必定多出一个电子，此电子易被激发而成为自由电子，这样磷原子就成了不能移动的**带正电的离子**。

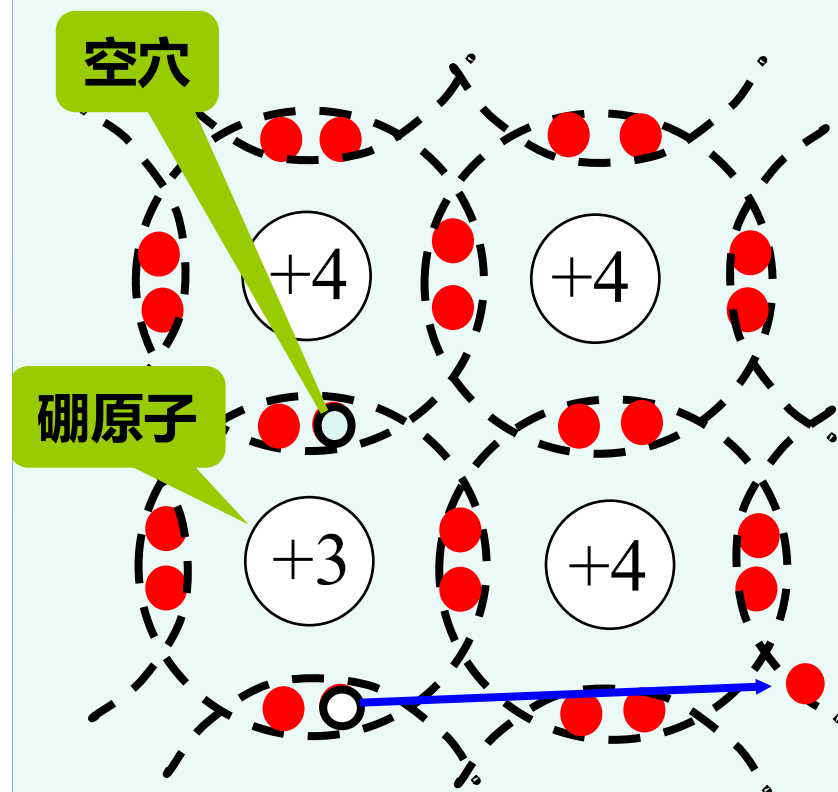
N型半导体中的载流子：

- 1) 自由电子, **多数载流子 (多子)**
- 2) 空穴, **少数载流子 (少子)**

自由电子的浓度远大于空穴浓度，导电以电子为主，称为**电子型半导体**或**N型半导体**。

## 2. 杂质半导体

### P型半导体



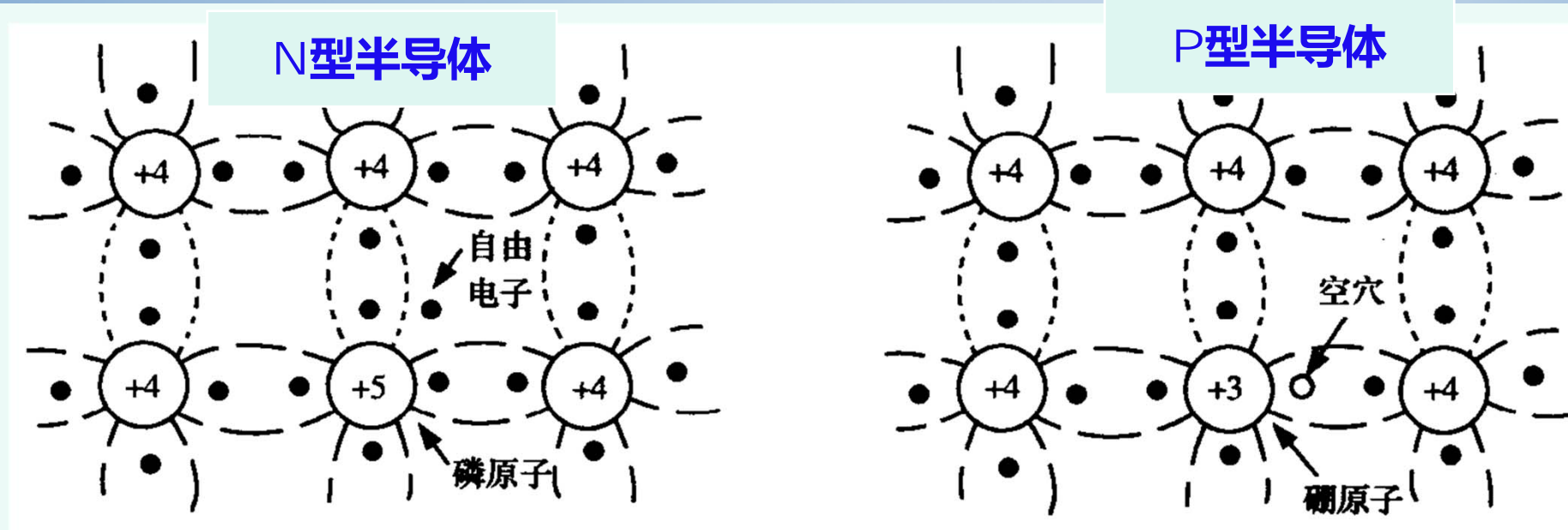
在硅或锗晶体中掺入少量的三价元素，如硼（或铟），晶体点阵中的某些半导体原子被杂质取代，硼原子的最外层有三个价电子，与相邻的半导体原子形成共价键时，产生一个空穴。这个空穴可能吸引束缚电子来填补，使得硼原子成为不能移动的**带负电的离子**。

P型半导体中的载流子：

- 1) 自由电子, **少数载流子** (**少子**)
- 2) 空穴, **多数载流子** (**多子**)

空穴的浓度远大于自由电子浓度，导电以空穴为主，称为**空穴型半导体**或**P型半导体**。

## 2. 杂质半导体



在杂质半导体中，**多数载流子的浓度主要取决于掺杂浓度**，**少数载流子的浓度则随着温度的升高而增加。**

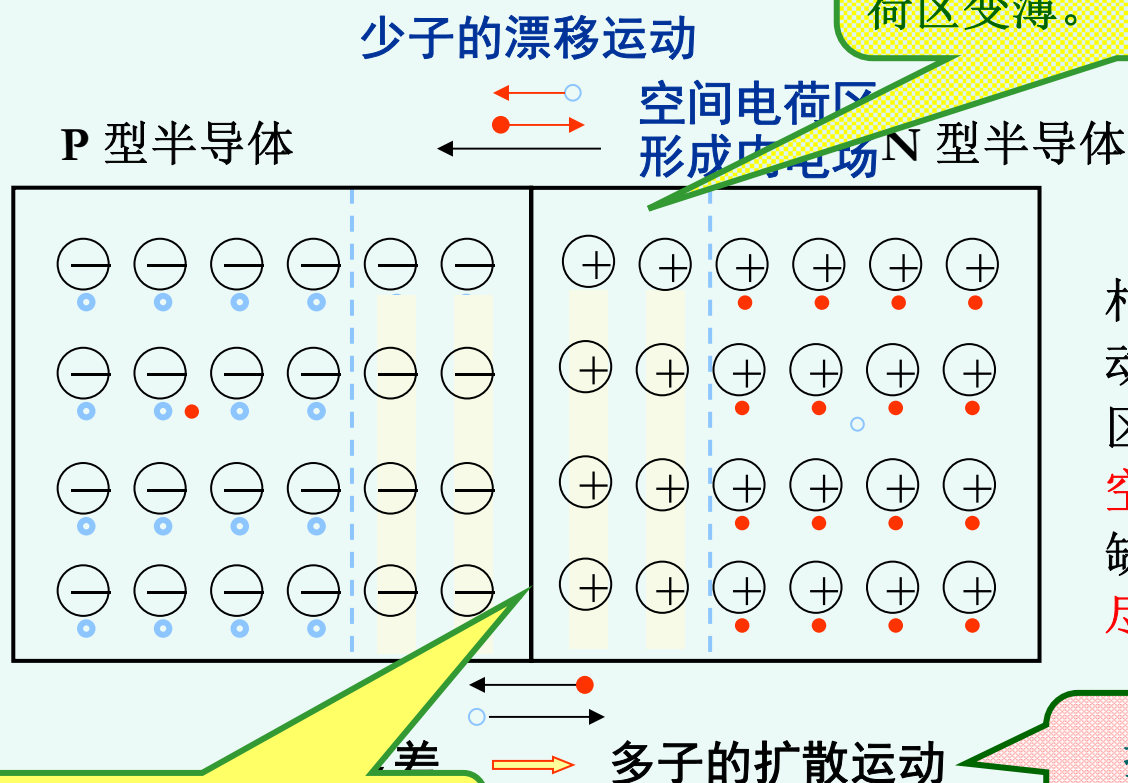
不论是N型半导体还是P型半导体，虽然有一种载流子占多数，但整体保持电中性。

## 二、PN结及其单向导电性

### 1. PN 结的形成

把一块半导体的一侧做成P型，另一侧做

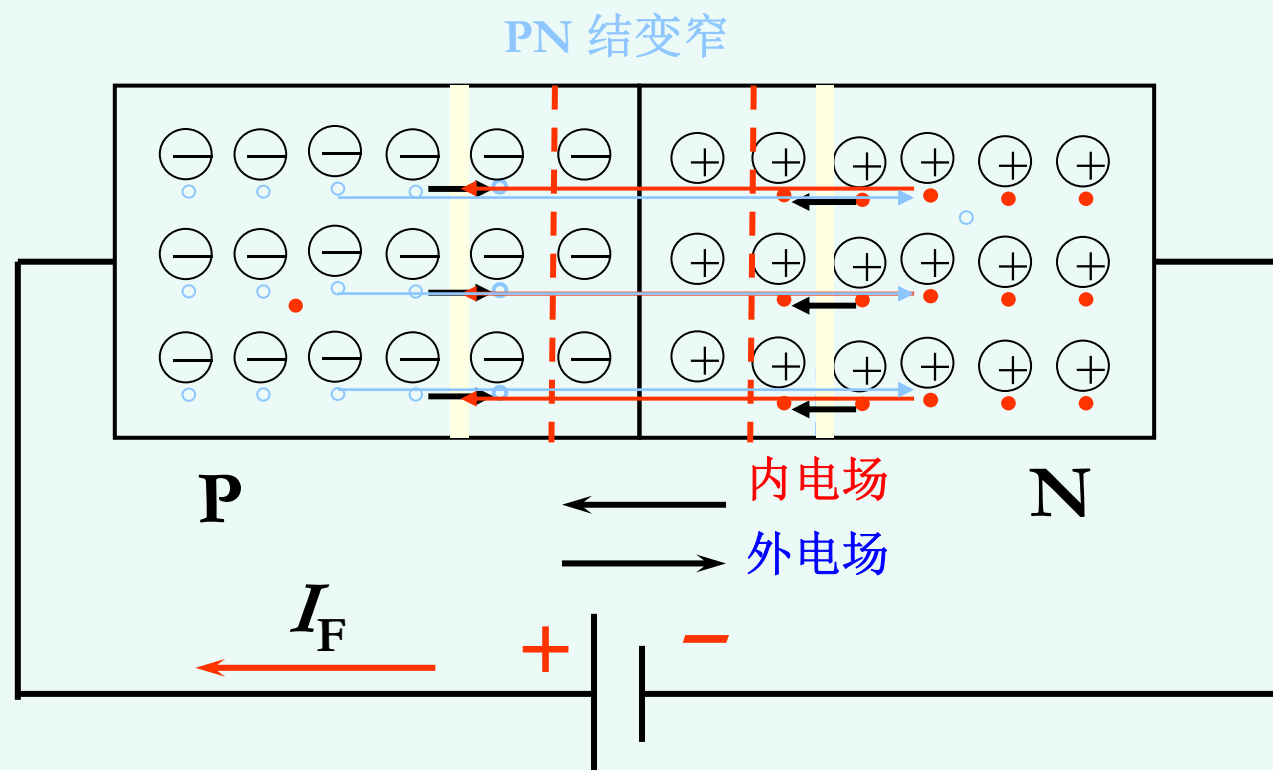
内电场促进少子的漂移，  
阻止多子的扩散，使空间电  
荷区变薄。



## 2. PN结的单向导电性

### 1) PN 结加正向电压 (正向偏置)

P接正、N接负



内电场被削弱，多子的扩散加强，形成较大的扩散电流。

PN 结加正向电压时，PN结变窄，正向电流较大，正向电阻较小，PN结处于导通状态。



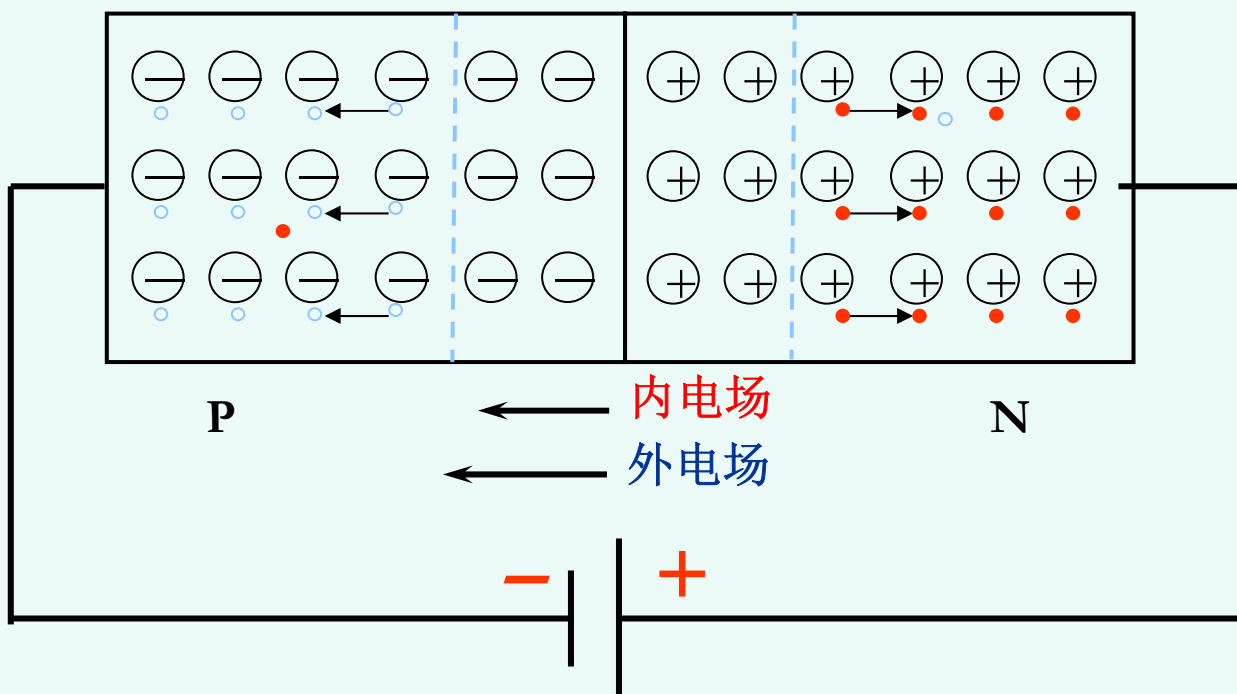
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



## 2. PN结的单向导电性

### 2) PN 结加反向电压 (反向偏置)

P接负、N接正

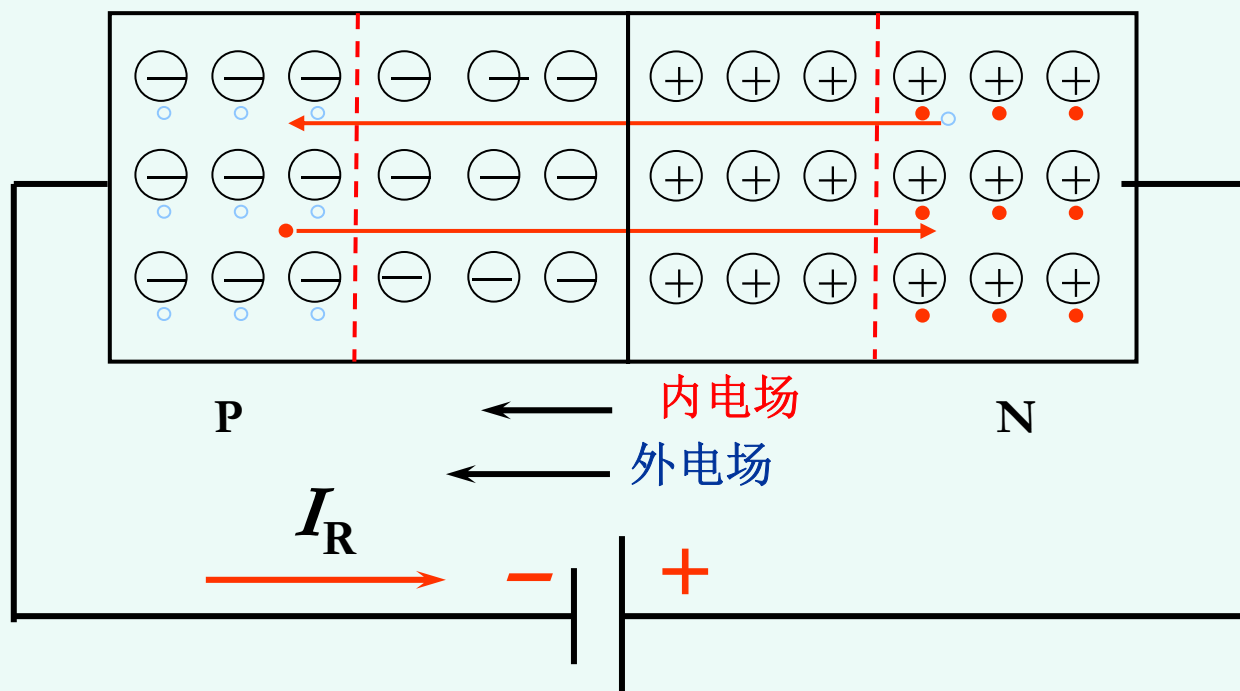


## 2. PN结的单向导电性

### 2) PN 结加反向电压 (反向偏置)

P接负、N接正

PN 结变宽



内电场被加强，少子的漂移加强，由于少数数量很少，形成很小的反向电流。

PN 结加反向电压时，PN结变宽，反向电流较小，反向电阻较大，PN结处于截止状态。

温度越高少子的数目越多，反向电流将随温度增加。

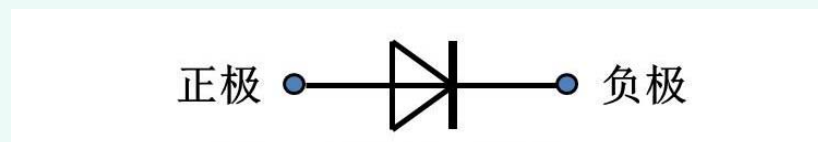
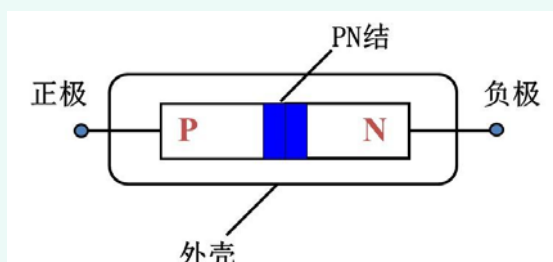


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

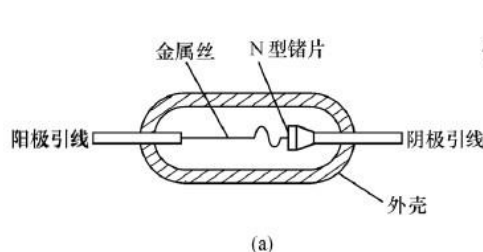
### 三、 半导体二极管

#### 1. 结构与参数

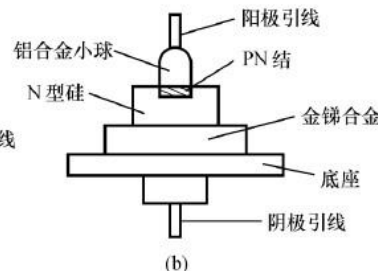
在PN结上加上引线和封装，就制成了半导体二极管。



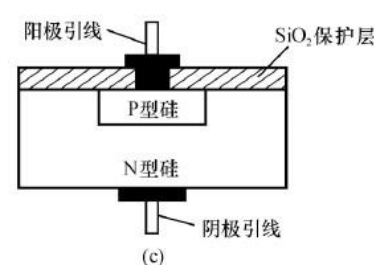
二极管按结构分有**点接触型**、**面接触型**和**平面型**三大类。



点接触型：  
结面积小，结电容小  
故结允许的电流小  
最高工作频率高



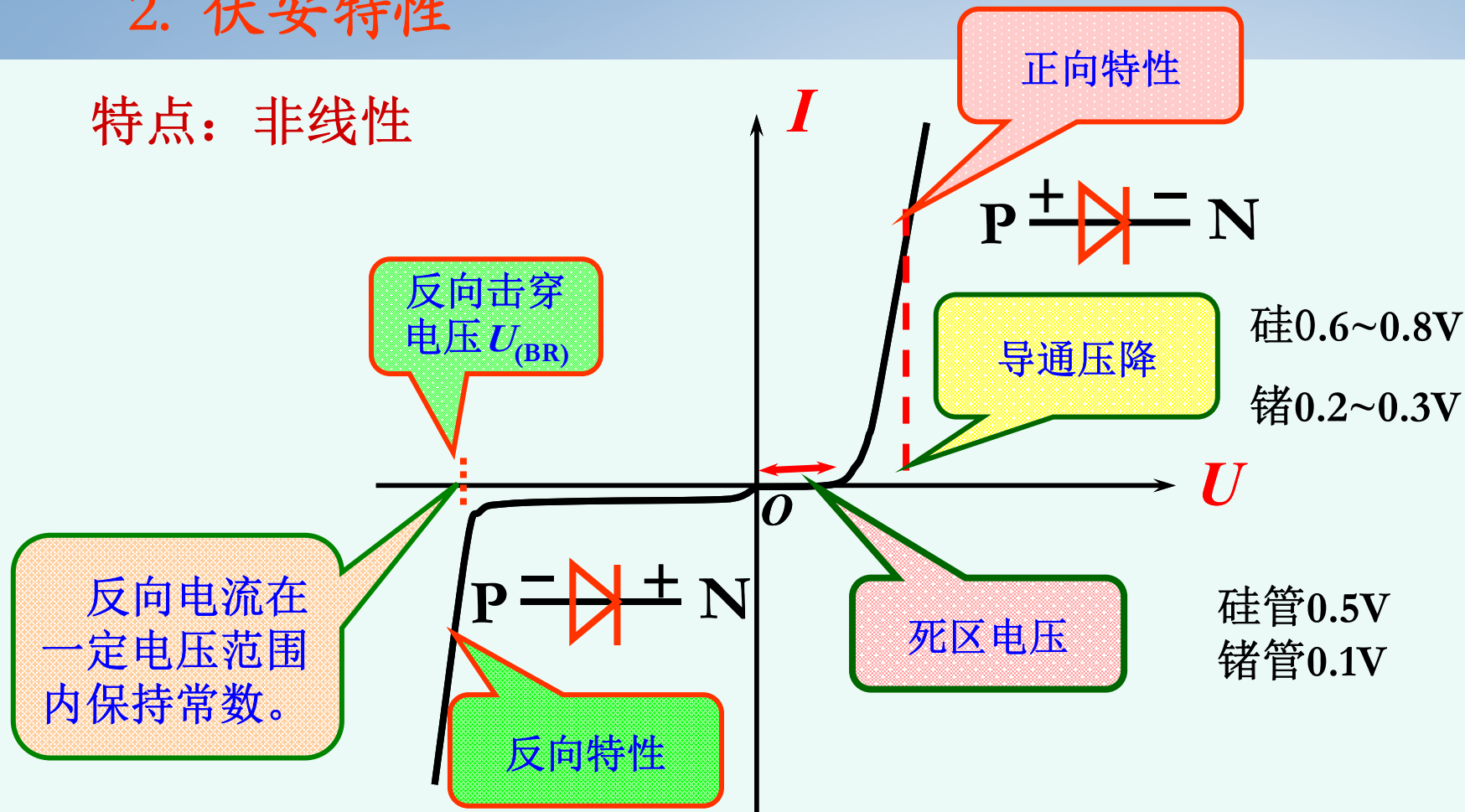
面接触型：  
结面积大，结电容大  
故结允许的电流大  
最高工作频率低



平面型：  
结面积可小、可大  
的工作频率高  
大的结允许的电流大

## 2. 伏安特性

特点：非线性



外加电压大于反向击穿电压二极管被击穿，失去单向导电性。

外加电压大于死区电压二极管才能导通。

### 3. 主要参数

#### 1) 最大整流电流 $I_F$

二极管长期使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。由PN结面积和散热条件决定

#### 2) 反向击穿电压 $V_{BR}$

二极管反向击穿时的电压值。击穿时反向电流剧增，二极管的单向导电性被破坏，甚至过热而烧坏。

#### 3) 最高反向工作电压 $V_{RM}$

一般是  $V_{BR}$  的一半，是正常使用时允许的最大反向电压。

#### 4) 反向电流 $I_R$

室温下，二极管加最高反向工作电压（ $V_{RM}$ ）时的反向电流。

反向电流大，说明管子的单向导电性差，因此**反向电流越小越好**。反向电流由少子形成，受温度的影响较大，温度越高反向电流越大。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 5.二极管应用举例

忽略导通压降和反向漏电流，二极管可以理想化为**开关**

正向导通时二极管相当于短路，



反向截止时二极管相当于断开。

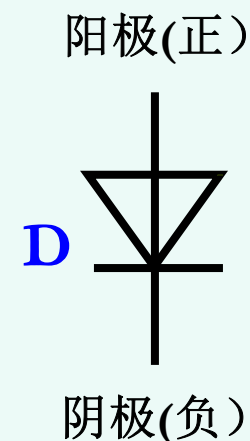


### 二极管电路分析：

**分析方法：**将二极管断开，分析二极管两端电位的高低或所加电压  $U_D$  的正负。

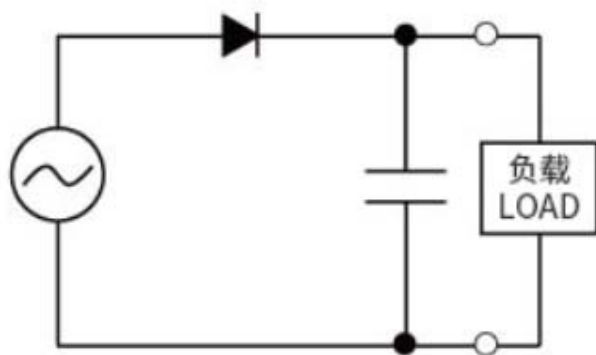
若  $V_{\text{阳}} > V_{\text{阴}}$  或  $U_D$  为正(正向偏置)，二极管导通

若  $V_{\text{阳}} < V_{\text{阴}}$  或  $U_D$  为负(反向偏置)，二极管截止

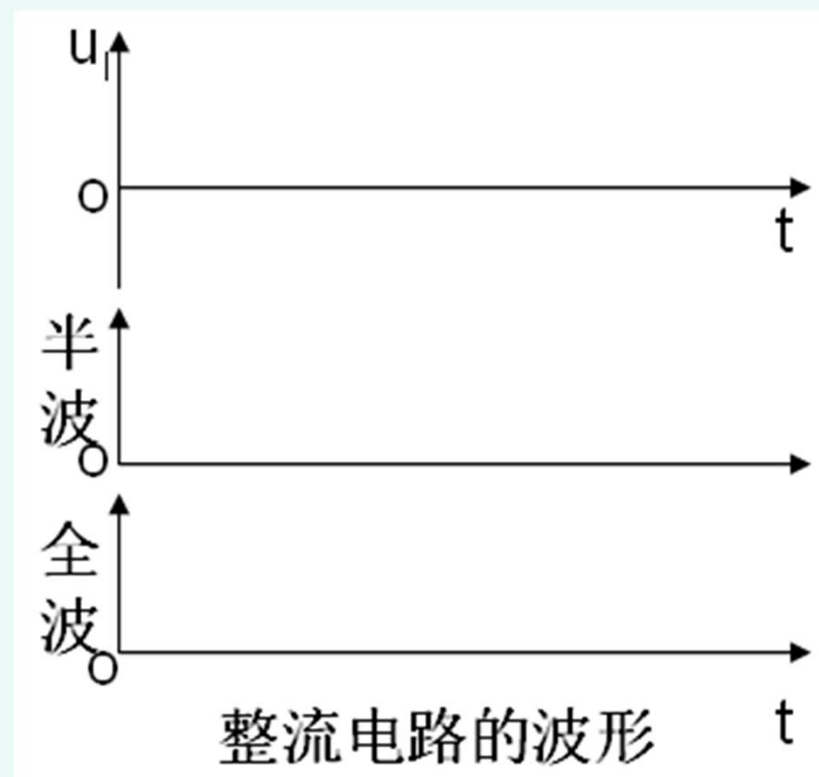
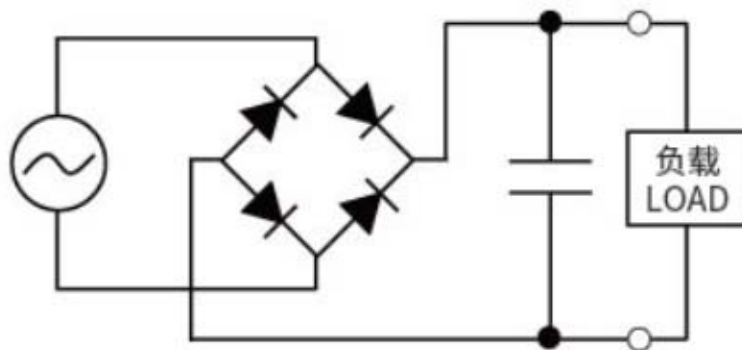


## 5.二极管应用举例

半波整流



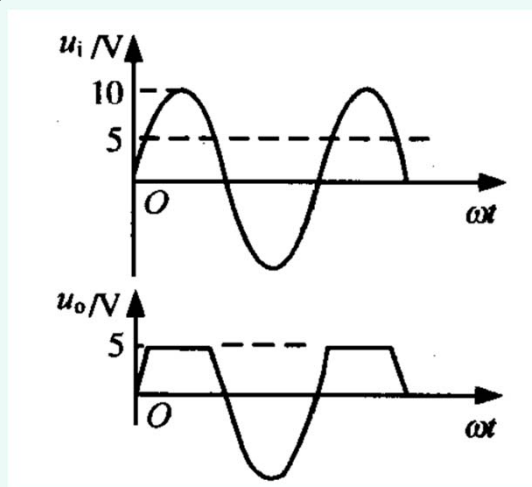
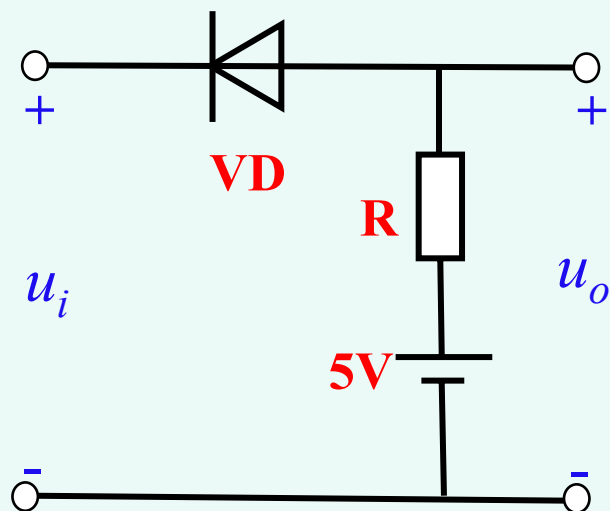
全波整流





## 二极管的限幅电路

**例** 已知 $u_i = 10\sin\omega t$  V, VD是理想二极管, 求输出 $u_o$ 的波形。



解: 将VD断开, 求二极管两端的正向开路电压。

$$u_{VD} = V_{\text{阳}} - V_{\text{阴}} = 5 - u_i$$

$$u_{VD} > 0, \Rightarrow u_i < 5V, VD \text{ 导通, } u_o = u_i$$

$$u_{VD} < 0, \Rightarrow u_i > 5V, VD \text{ 截止, } u_o = 5V$$

电路的输出电压幅值不超过5V, 此电路体现二极管的限幅作用。

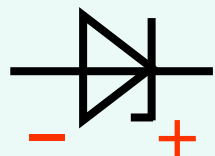


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 四、稳压二极管

稳压二极管是特殊的二极管,工作在击穿区,其反向击穿是可逆的,且反向电压较稳定.

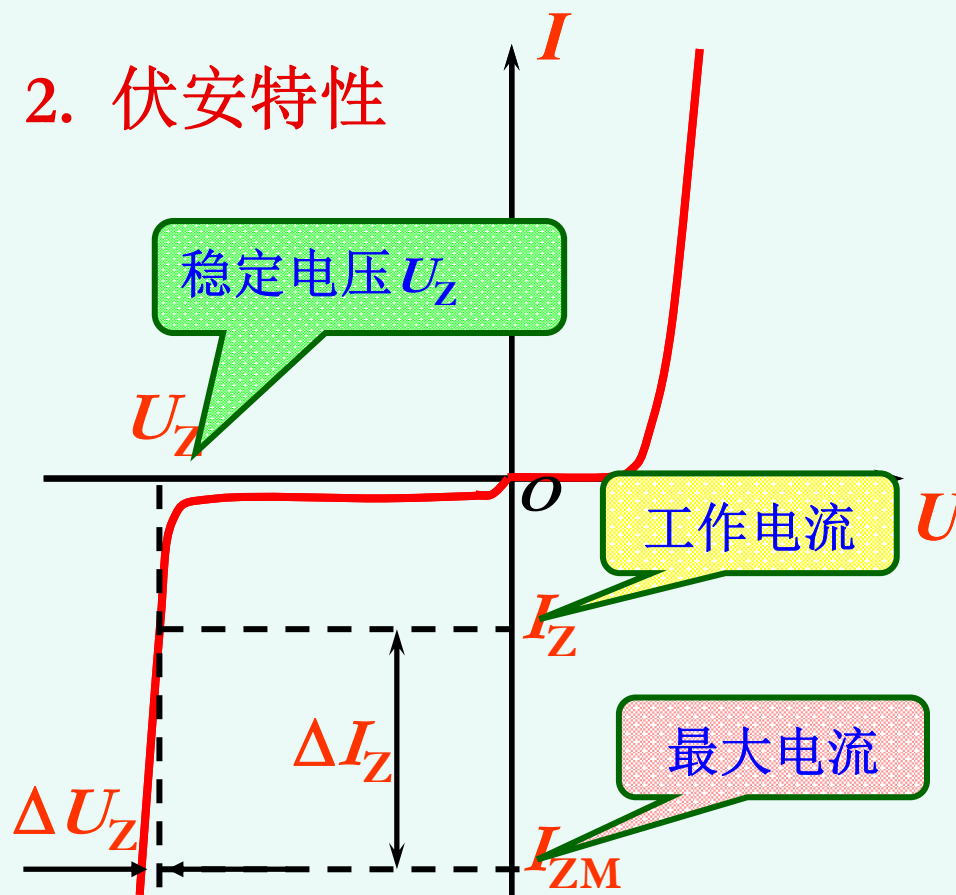
### 1. 符号和外形图



稳压管正常工作时加反向电压

稳压管反向击穿后, 电流变化很大, 但其两端电压变化很小。利用此特性, 稳压管在电路中可起稳压作用。

### 2. 伏安特性



使用时要加限流电阻

石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 3. 稳压二极管的参数

#### (1) 稳定电压 $U_Z$ :

稳压管正常工作在反向击穿时，管子两端电压值。

受制造工艺的影响，同一型号的稳压管，稳定电压值也会不同。

#### (2) 稳定电流 $I_Z$ : 稳压状态下，稳压管流过的电流。

其范围  $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ ，当  $I < I_{Zmin}$  时，电压稳定性能差，  
当  $I > I_{Zmax}$  时，稳压管会因过流而损坏。

#### (3) 最大允许功耗 $P_{Zm}$

$$P_{Zm} = U_Z I_{Zmax}$$

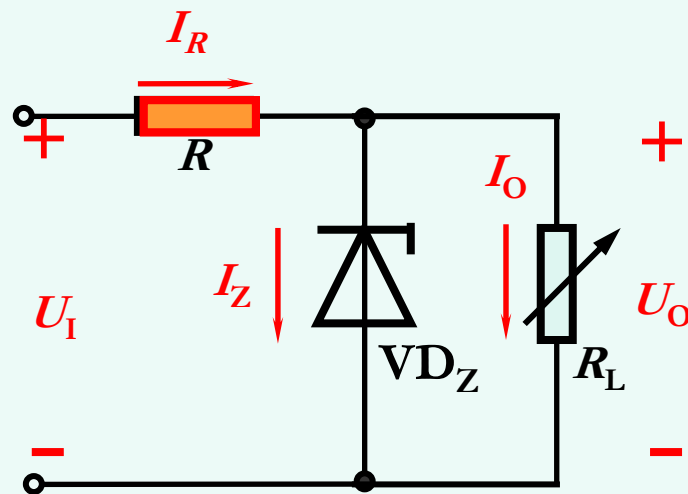
若  $P > P_{Zm}$ ，稳压管会损坏，使用稳压管要选择合适的限流电阻。

## 使用稳压管需要注意的几个问题：

1. 外加电源的正极接管子的 **N 区**，电源的**负极接 P 区**，保证管子工作在反向击穿区；

2. 稳压管应与负载电阻  $R_L$  并联，使输出电压稳定。

3. 必须限制流过稳压管的电流  $I_Z$ ，不能超过规定值，以免因过热而烧毁管子。采取的方法是接入限流电阻



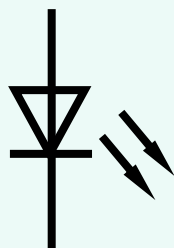
稳压管电路

## 五、发光二极管 (LED)

LED (Light emitting diode)

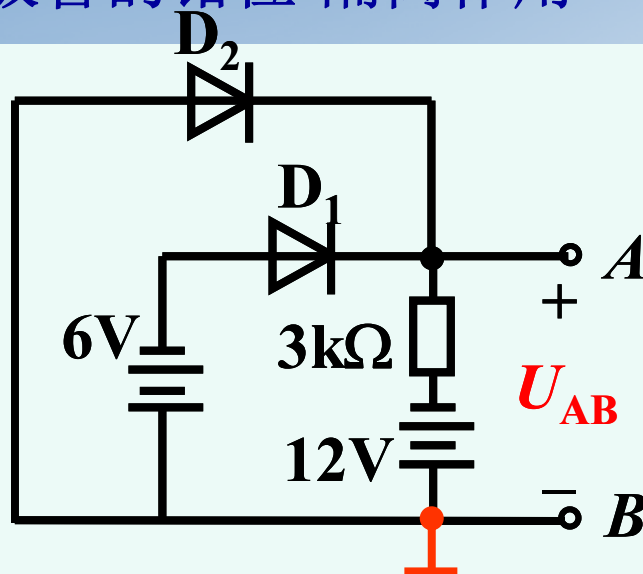
发光二极管和普通二极管一样具有单相导电性，加上正向电压并有足够大的正向电流时才能发光。

符号



### 3. 二极管的钳位-隔离作用

例:



求:  $U_{AB}$

两个二极管的阴极接在一起，取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$$V_{1阳} = -6 \text{ V}, \quad V_{2阳} = 0 \text{ V}, \quad V_{1阴} = V_{2阴} = -12 \text{ V}$$

$$U_{D1} = 6 \text{ V}, \quad U_{D2} = 12 \text{ V}$$

$\because U_{D2} > U_{D1} \quad \therefore D_2$  优先导通,  $D_1$  截止。

若忽略管压降, 二极管可看作短路,  $U_{AB} = 0 \text{ V}$

流过  $D_2$  的电流为  $I_{D2} = \frac{12}{3} = 4 \text{ mA}$

$D_1$  承受反向电压为  $-6 \text{ V}$

$D_2$  起钳位作用,  
 $D_1$  起隔离作用。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

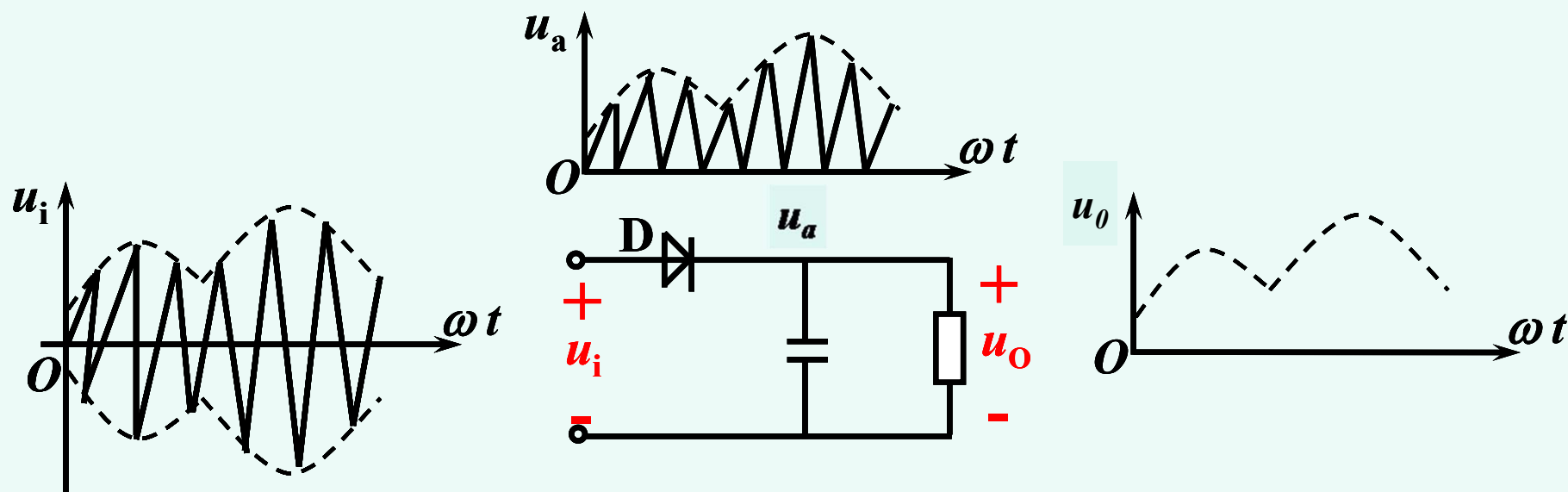
## 5. 二极管应用举例

### 1. 二极管整流-检波电路

**整流（半波）**，利用二极管的单向导电性，将交流电转为直流电。 $u_i \rightarrow u_a$

**检波**就是将低频信号从已调制信号(高频信号)中取出。 $u_a \rightarrow u_0$

电路及信号波形如图所示，D为理想二极管（忽略导通压降）。



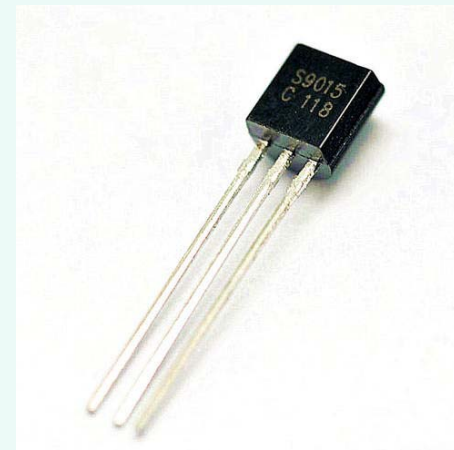
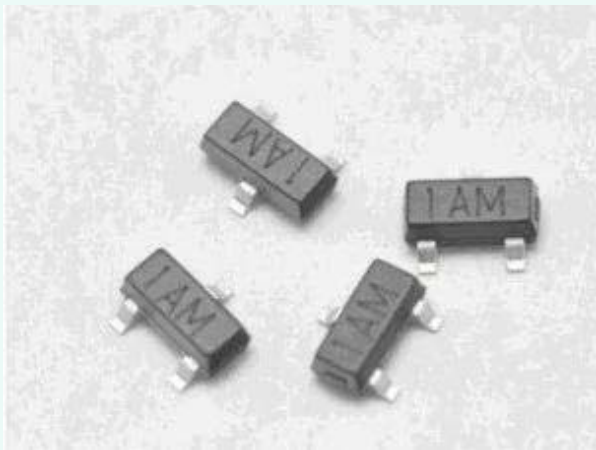
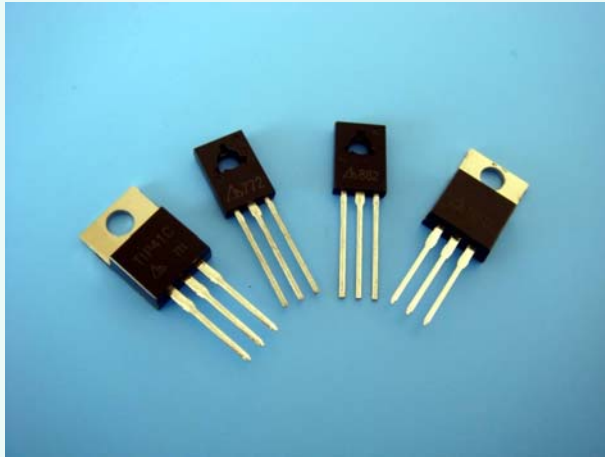
**输入**信号为已调制信号，由电视机、收音机接收后，由整流二极管 D 将已调制信号的负半周去掉，然后利用电容将高频信号滤去，留下低频信号，再经放大电路放大，送给负载显像管或扬声器，还原成图像或声音。



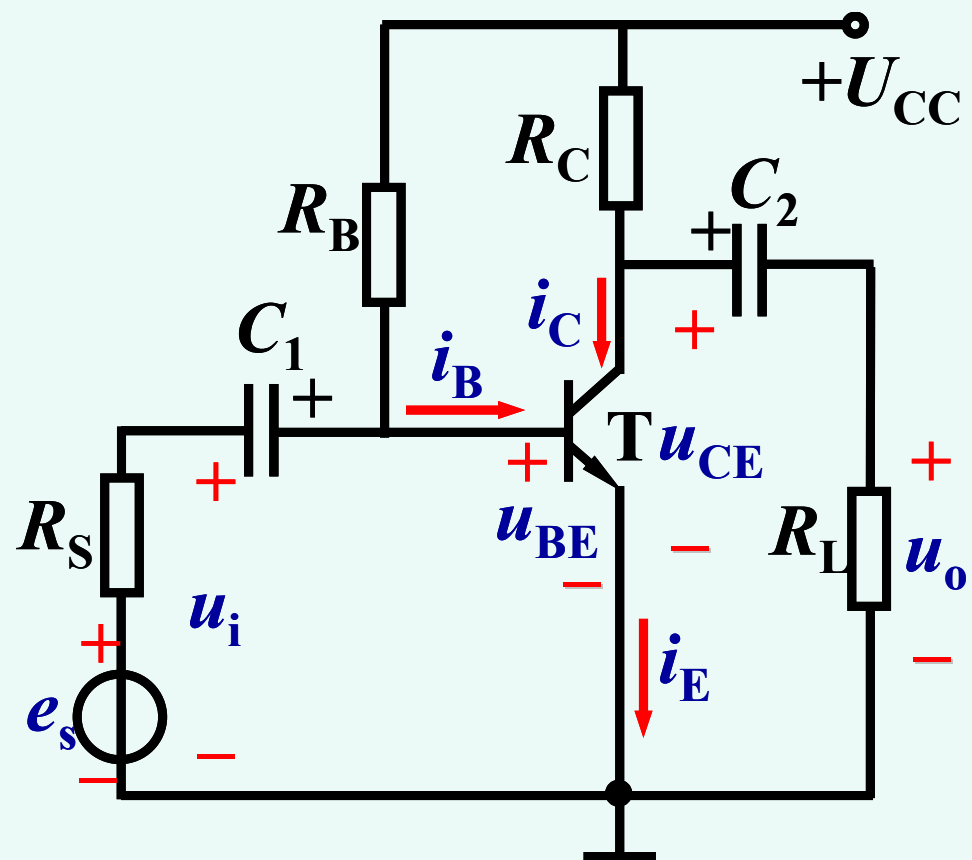
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



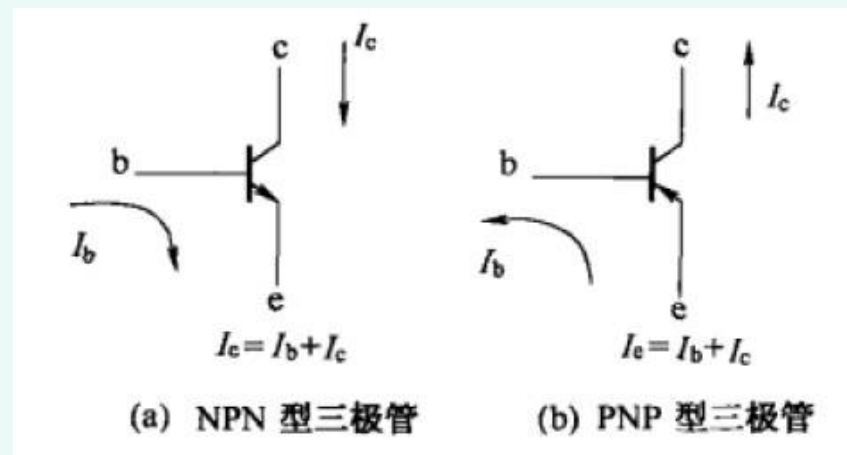
## § 11.2 半导体三极管



## § 11.2 半导体三极管



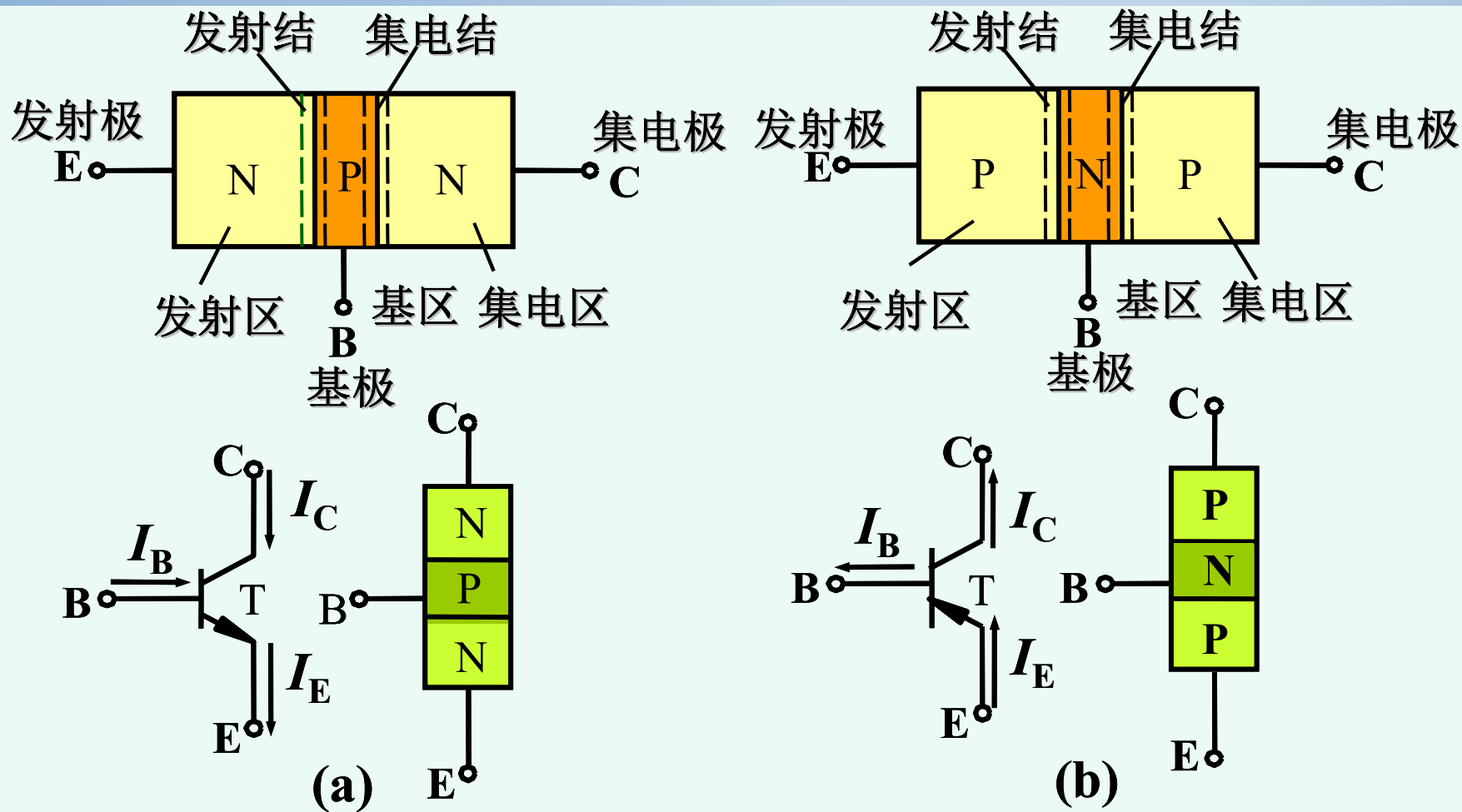
三极管用于放大电路



$e_s$  信号输入  
 $u_o$  信号输出

# 一、基本结构和特点

发射极Emitter, 基极Base, 集电极Collector



晶体管的结构示意图和表示符号

(a)NPN型晶体管;

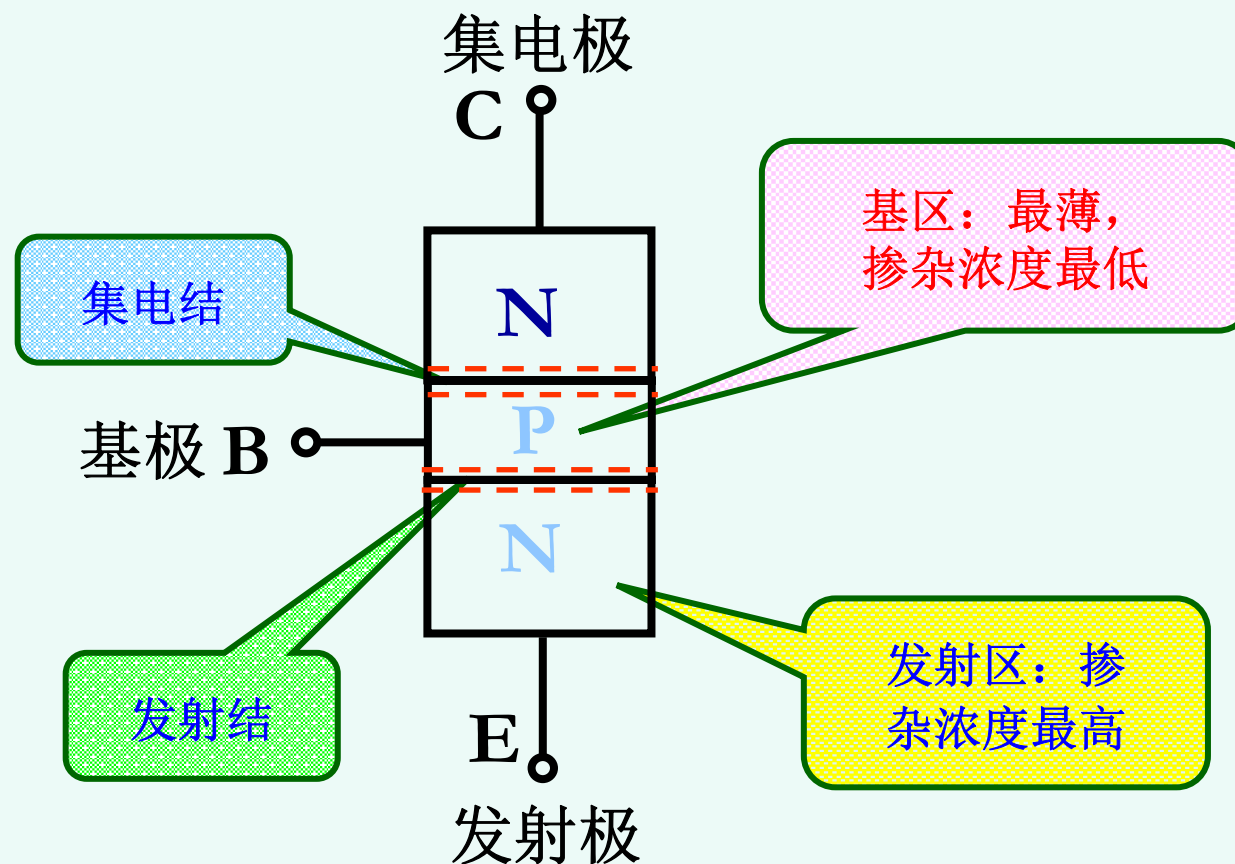
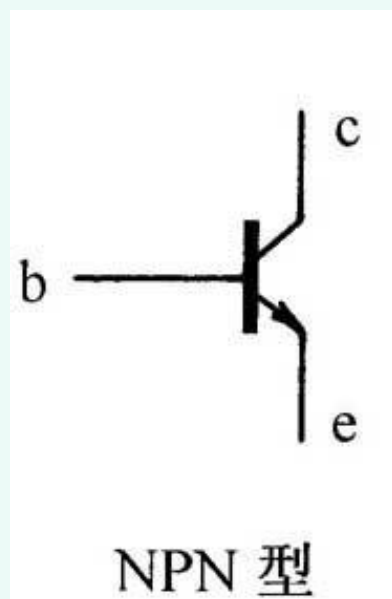
(b)PNP型晶体管



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 一、基本结构和特点

结构特点：三极管具有电流放大的内部条件



## 二、电流分配和放大原理

### ○1. 三极管放大的外部条件 发射结正偏、集电结反偏

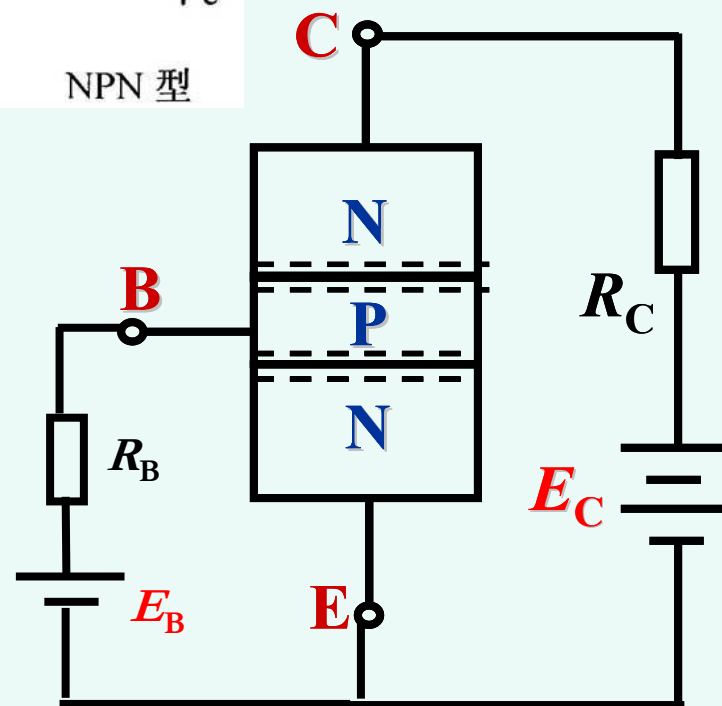
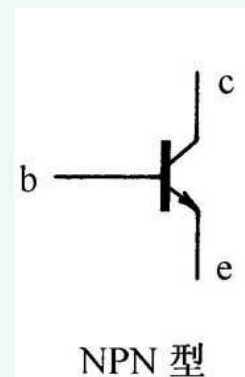
从电位的角度看

NPN

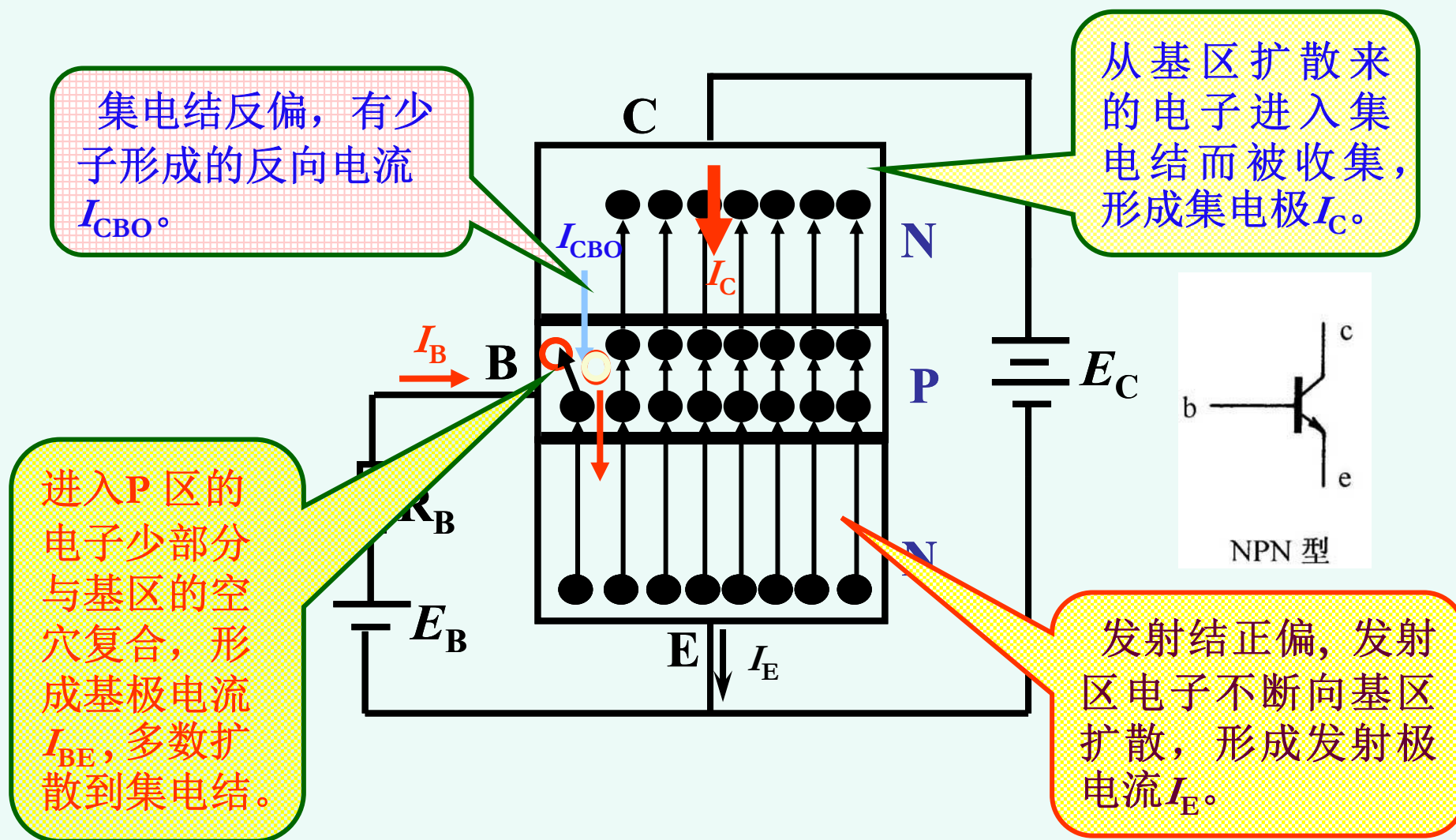
发射结正偏： $V_B > V_E$

集电结反偏： $V_C > V_B$

$$V_C > V_B > V_E$$

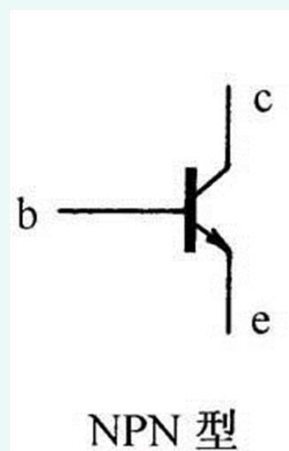


### 3. 三极管内部载流子的运动规律



### 3. 三极管内部载流子的运动规律

$$I_E = I_C + I_B$$

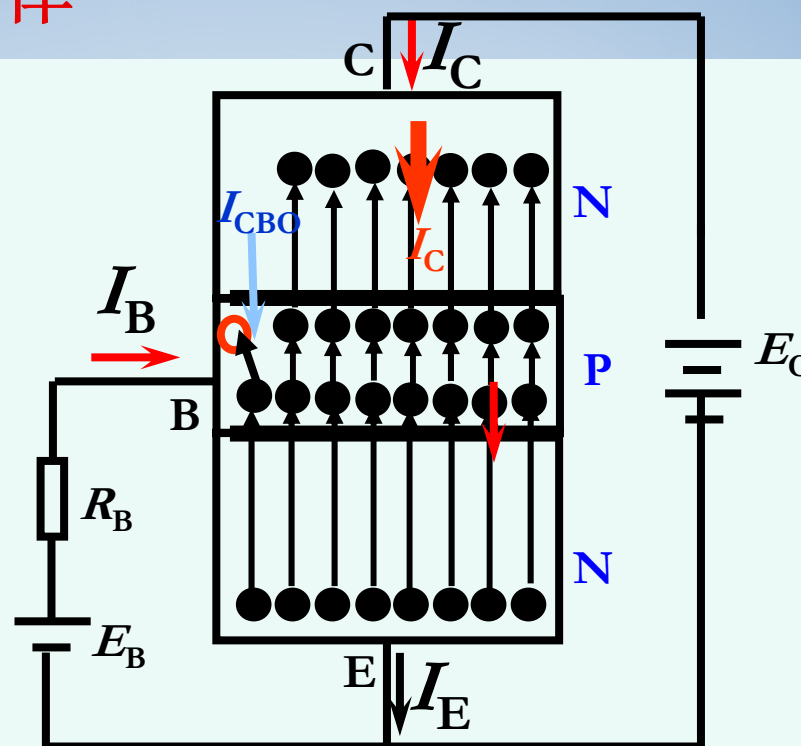


$\bar{\beta}$ : 称为共射直流电流放大倍数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

$\beta$ :  $I_C$ 与 $I_B$ 的变化量之比, 称为共射交流电流放大倍数。  
晶体管电流放大作用一般指  $\beta$

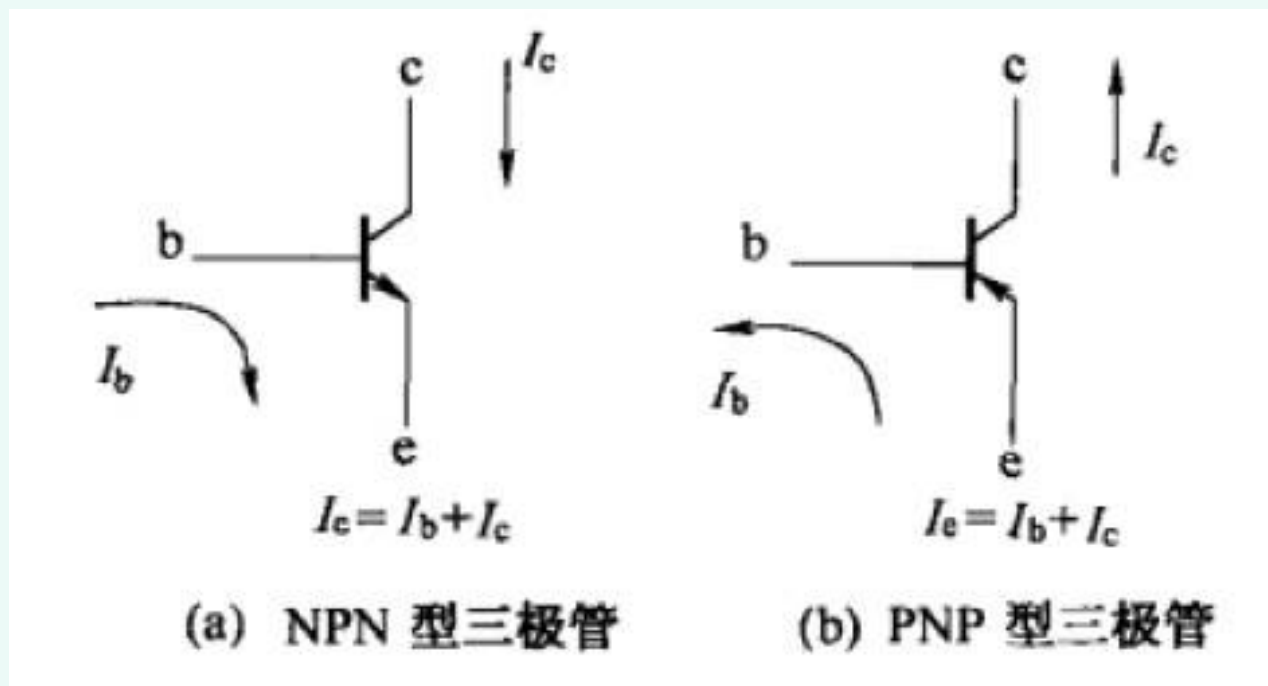
$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



要使晶体管起放大作用，发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。



$$V_C > V_B > V_E$$

$$V_E > V_B > V_C$$

### 三、三极管的特性曲线

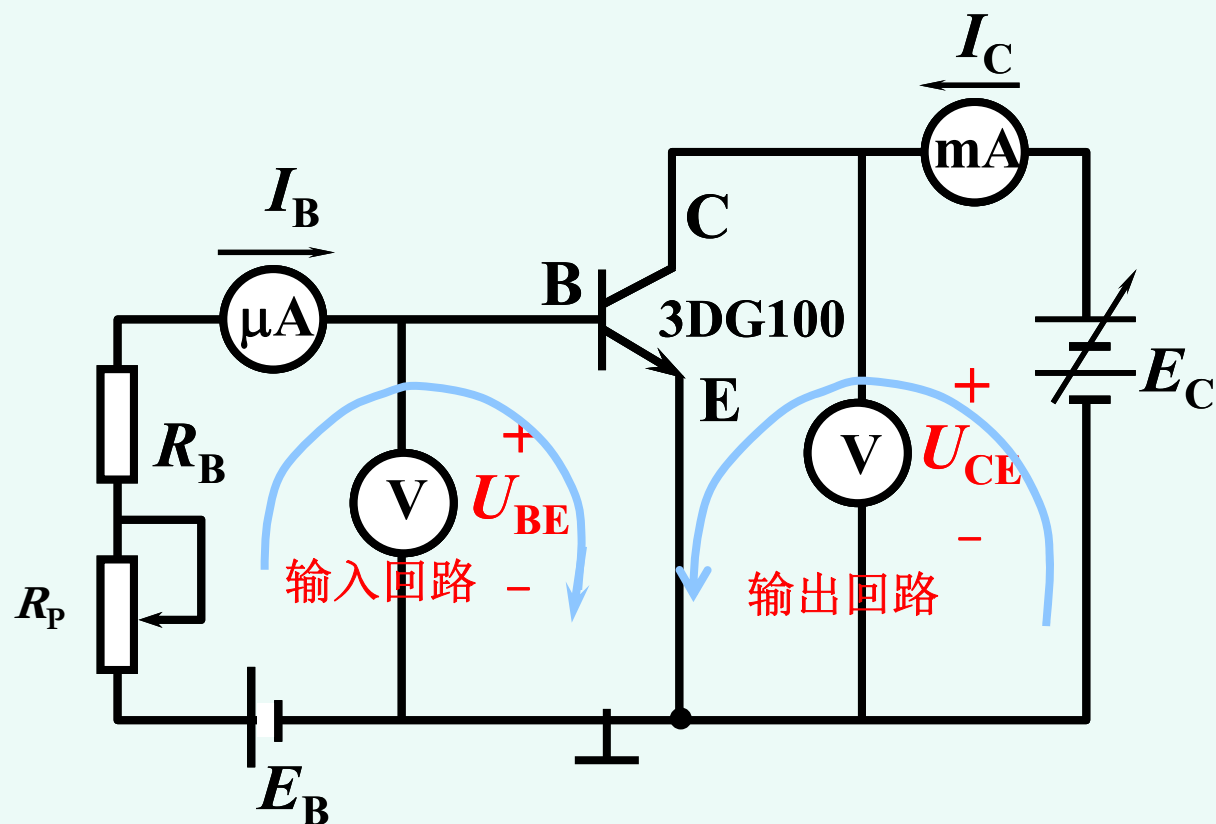
三极管各电极电压与电流的关系曲线，是三极管内部载流子运动的外部表现，反映了三极管的性能，是分析放大电路的依据。

研究特性曲线目的：

- (1) 直观地分析三极管的工作状态
- (2) 合理地选择偏置电路的参数, 设计性能良好的电路

重点讨论应用最广泛的共发射极接法的特性曲线

# 测试电路



共发射极电路

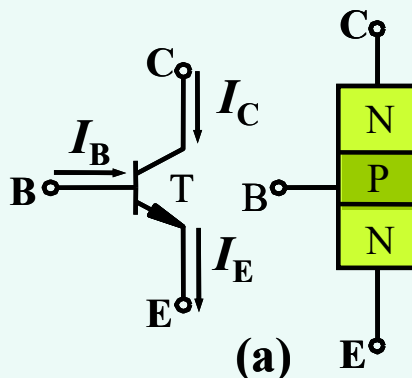
发射极是输入回路、输出回路的公共端



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 1. 输入特性

$$I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=\text{常数}}$$



当  $U_{CE} \geq 1V$ ,  $U_{CE} > U_{BE}$ ,  
发射结正偏, 集电极反偏, 曲线基本重合, 三极管进入放大状态。

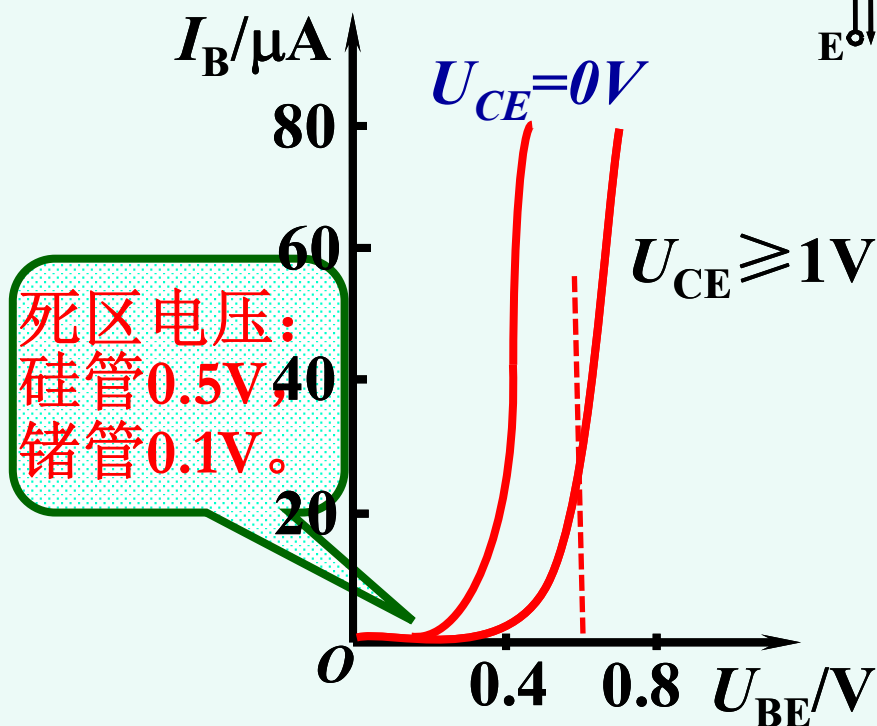
三极管的输入特性曲线与二极管正向曲线类似。

正常工作时发射结电压:  
NPN型硅管

$$U_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7V$$

PNP型锗管

$$U_{BE} \approx -0.2 \sim -0.3V$$

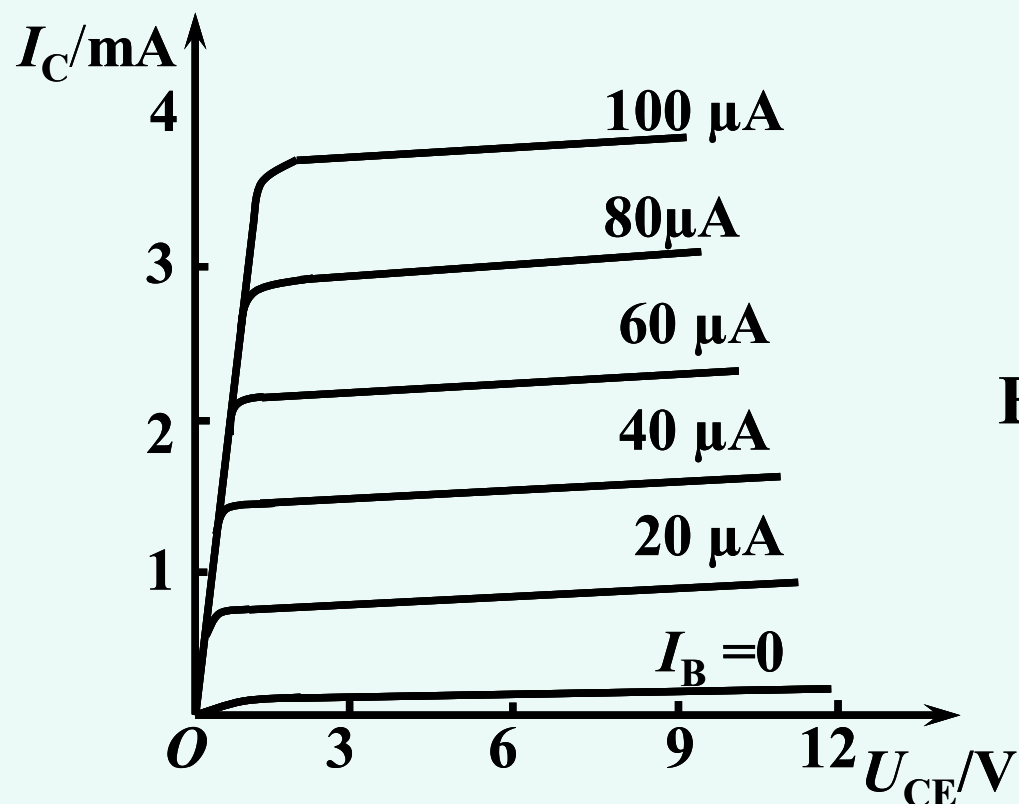


3DG100晶体管的  
输入特性曲线

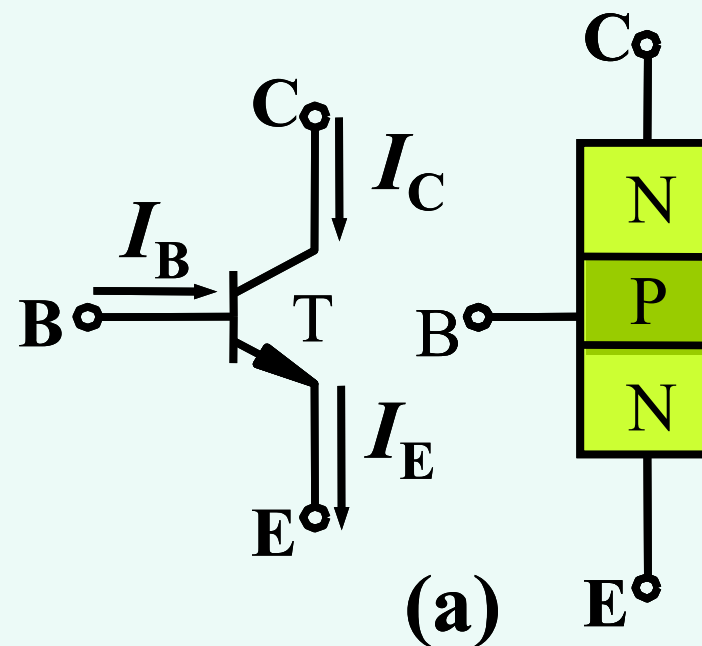
## 2. 输出特性

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_B=\text{常数}}$$

当 $I_B$ 为常数时， $I_C$ 和 $U_{CE}$ 之间的关系曲线，称为共射输出特性。



3DG100晶体管的输出特性曲线

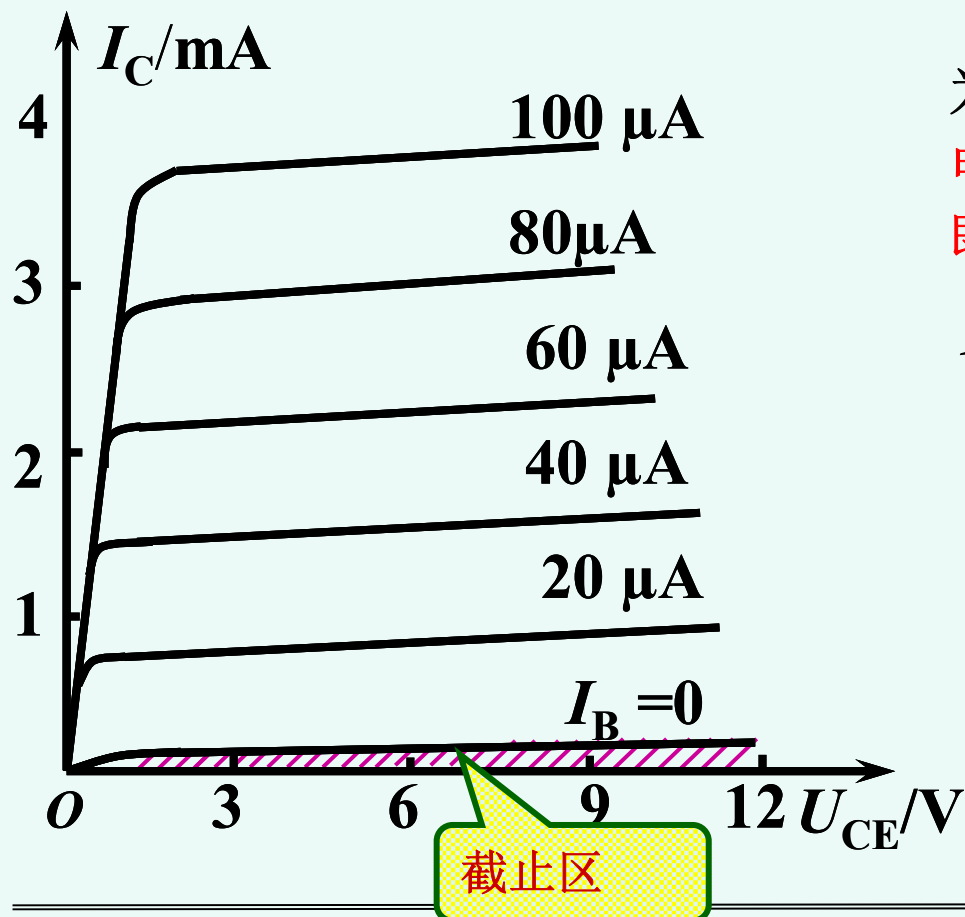


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 2. 输出特性

### (1) 截止区

$I_B = 0$  的曲线以下的区域称为截止区。



对 **NPN** 型管:  $U_{BE}$  低于死区电压。

为了可靠截止, 要求**发射结和集电结均处于反向偏置**。

即  $U_{BE} < 0V$ ,  $U_{BC} < 0V$ 。

$I_B = 0$  时,  $I_C = I_{CEO}$  (很小)

对于硅管,  $I_{CEO} < 1\mu A$

对于锗管,  $I_{CEO}$  约为  $10\mu A \sim 500\mu A$

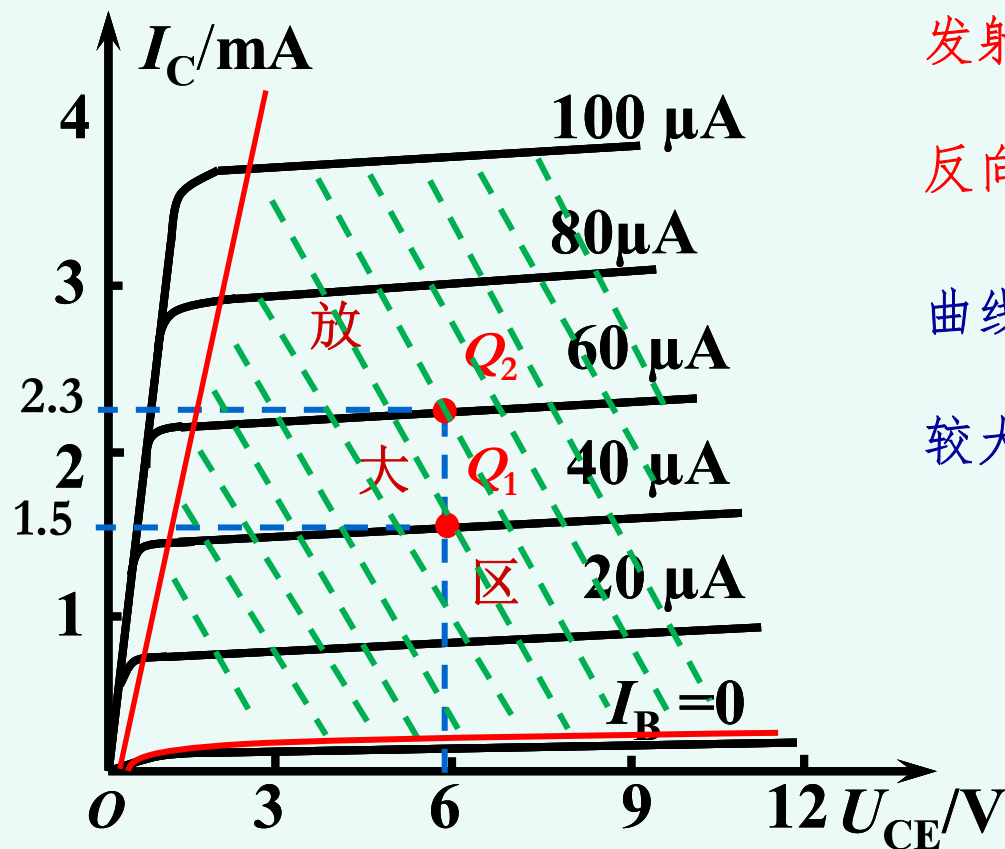
若忽略  $I_{CEO}$ :  $I_C \approx 0$ , 三极管**C和E**之间可以看做断开的开关。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 2. 输出特性

### (2) 放大区



3DG100晶体管的输出特性曲线

发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置，晶体管工作于放大状态。

曲线的平坦部分， $I_C$ 不会随 $U_{CE}$ 发生较大变化， $I_C$ 主要受 $I_B$ 控制。

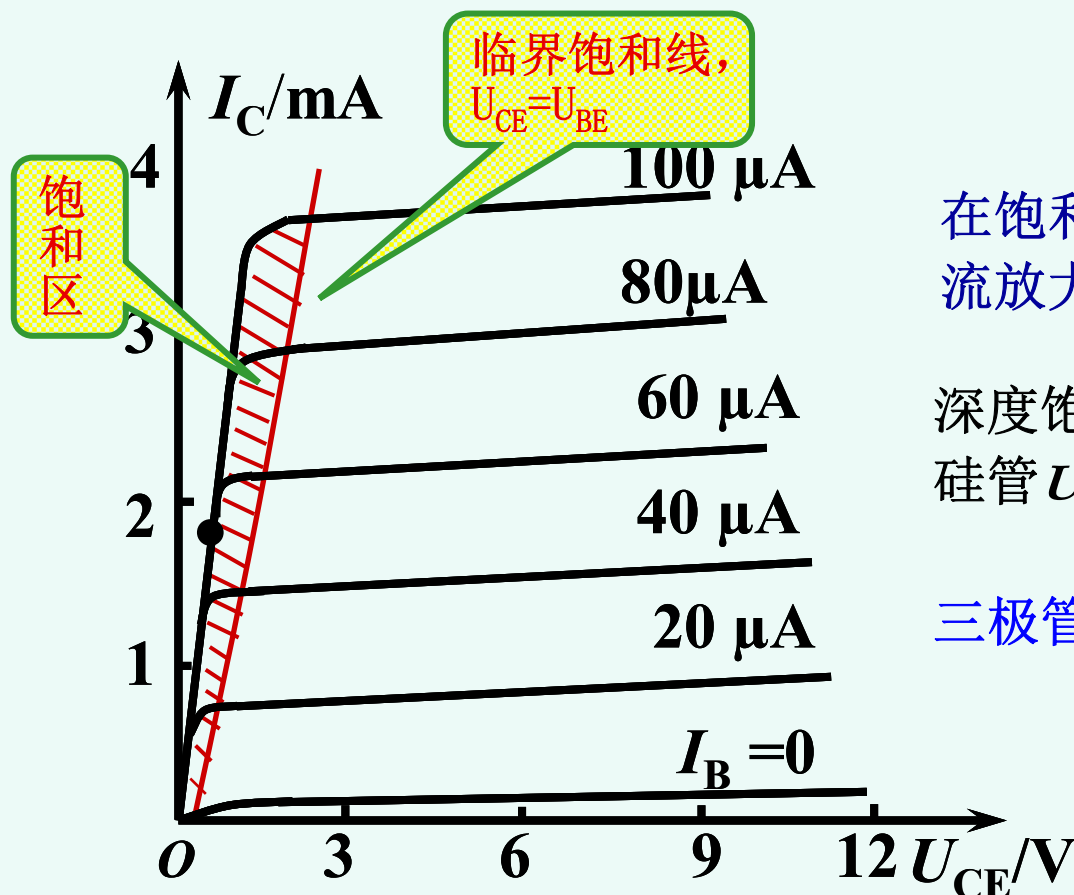
$$I_C = \beta I_B$$

输出电流可看做受控电流源。

## 2. 输出特性

### (3) 饱和区

$U_{CE} < U_{BE} \rightarrow U_{BC} > 0$ , 且  $U_{BE} > 0$ , 发射结和集电结均处于正向偏置, 晶体管工作于饱和状态。



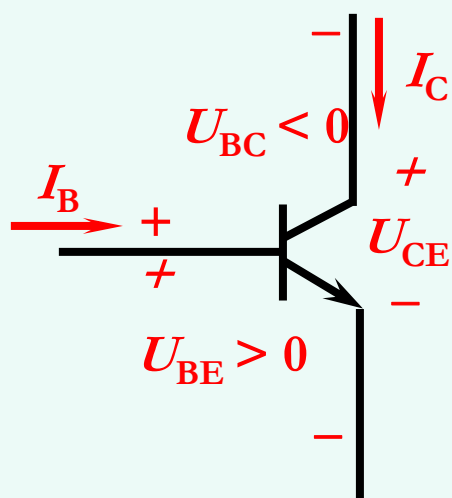
在饱和区,  $\beta I_B \geq I_C$ , 三极管失去电流放大作用。

深度饱和时,  
硅管  $U_{CES} \approx 0.3V$ , 锗管  $U_{CES} \approx 0.1V$ 。

三极管C和E之间可以看做导通的开关



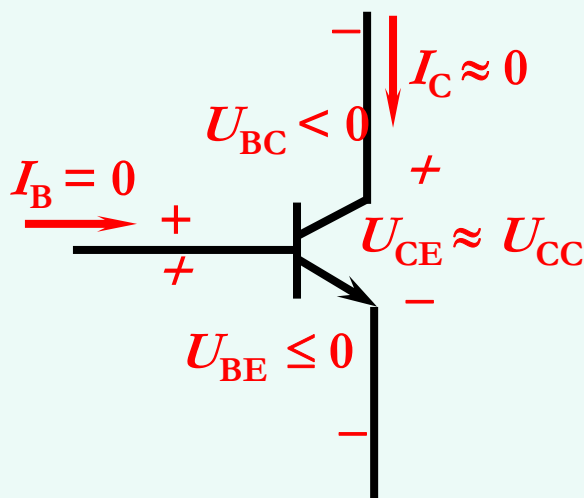
## 三极管的三种工作状态



(a)放大

发射结正偏  
集电结反偏  
 $V_C > V_B > V_E$

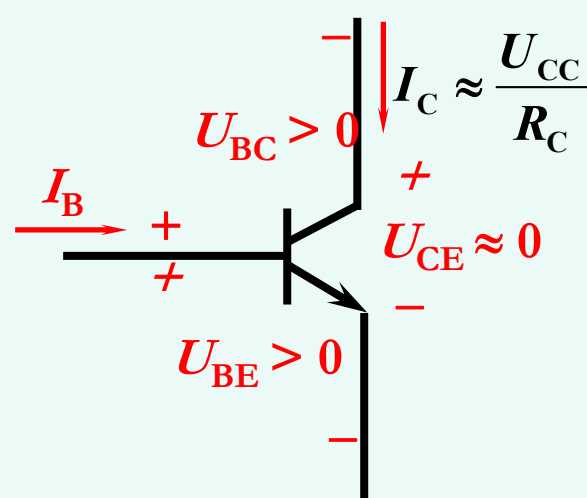
$$I_C = \beta I_B$$



(b)截止

发射结反偏  
集电结反偏  
 $V_B < V_C \& V_B < V_E$

CE两极“开关断开”



(c)饱和

发射结正偏  
集电结正偏  
 $V_B > V_C \& V_B > V_E$

CE两极“开关闭合”

- 在模拟放大电路中，三极管作为放大元件，工作在放大状态。
- 在数字电路中，三极管作为开关元件，工作在截止或饱和状态。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 四、三极管主要参数

是表征三极管各项性能的指标，也是设计电路、选用晶体管的依据。

### 1. 电流放大系数 $\bar{\beta}$ , $\beta$

当晶体管接成共发射极电路时，

直流电流放大系数： $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$

交流电流放大系数： $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

当三极管工作在放大区，在输出特性曲线近于平行等距并且  $I_{CE0}$  较小的情况下，两者数值接近

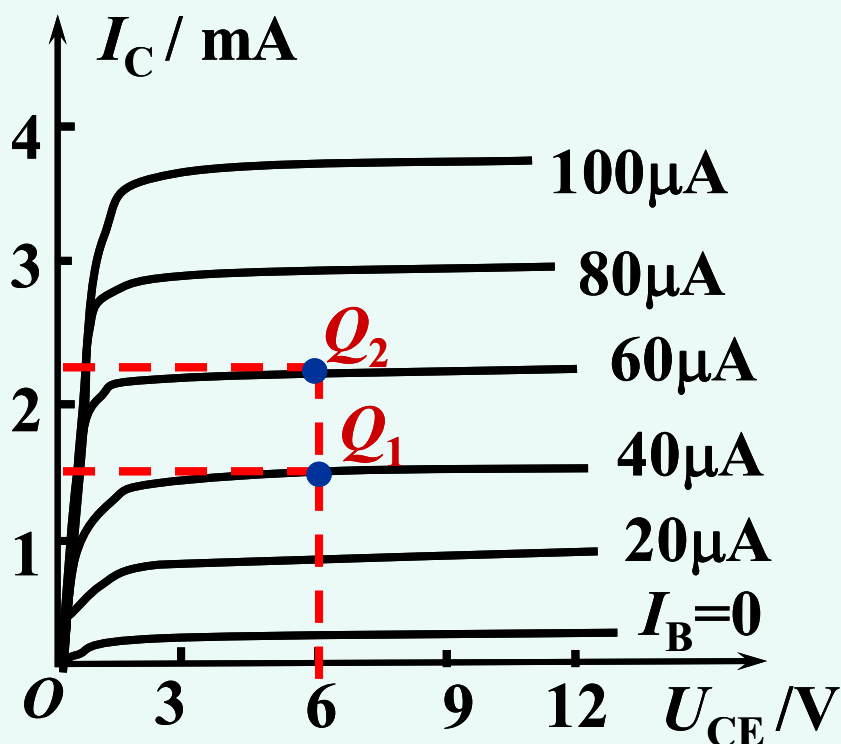
$$\beta = \bar{\beta}$$

常用晶体管的  $\beta$  值在 20 ~ 200 之间。  $\beta$  值与温度有关。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

例：在  $U_{CE} = 6\text{ V}$  时，在  $Q_1$  点  $I_B = 40\mu\text{A}$ ,  $I_C = 1.5\text{mA}$ ;  
在  $Q_2$  点  $I_B = 60\mu\text{A}$ ,  $I_C = 2.3\text{mA}$ 。



在  $Q_1$  点，有

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

由  $Q_1$  和  $Q_2$  点，得

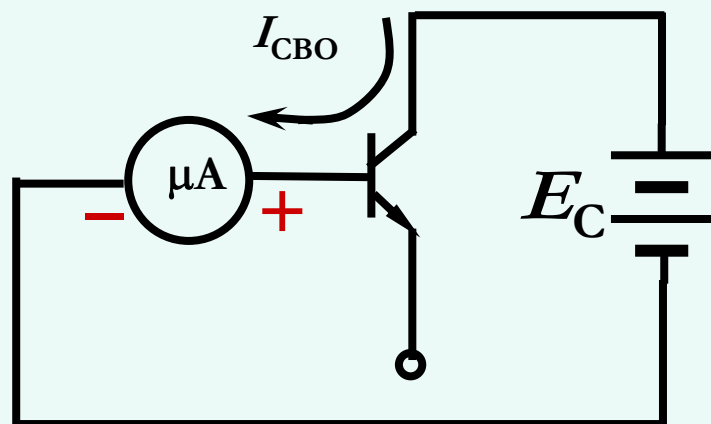
$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = 40$$

在以后的计算中，一般作近似处理： $\beta = \bar{\beta}$ 。

在放大电路里，真正需要放大的信号是叠加在直流上的交流信号，所以交流放大倍数是更关注的。

## 2.极间的反向电流

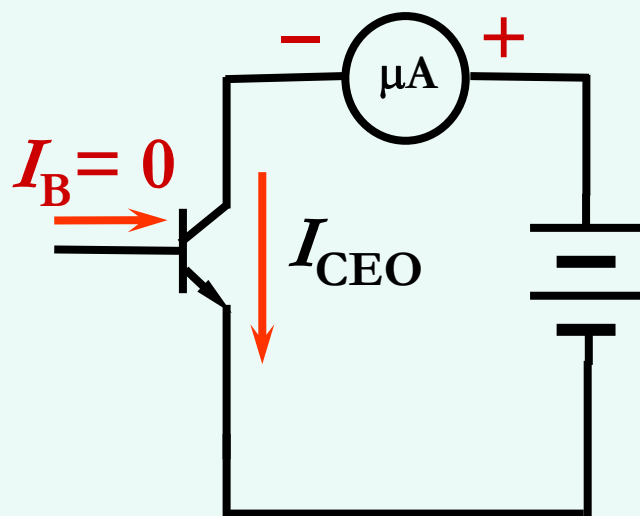
### 1) 集-基极反向截止电流 $I_{CBO}$ (发射极开路)



$I_{CBO}$ 是由少数载流子的漂移运动所形成的电流，受温度的影响大。

温度 $\uparrow \rightarrow I_{CBO} \uparrow$

### 2) 集-射极反向截止电流(穿透电流) $I_{CEO}$ (基极开路)



温度 $\uparrow \rightarrow I_{CEO} \uparrow$ ，所以  $I_C$  也相应增加。三极管的温度特性较差。

### 3. 极限参数

#### 1) 集电极最大允许电流 $I_{CM}$

当集电极电流  $I_C$  超过一定值时,  $I_C$  的上升会导致三极管的  $\beta$  值的下降, 当  $\beta$  值下降到正常值的三分之二时的集电极电流即为  $I_{CM}$ 。

当  $I_C > I_{CM}$  时, 三极管特性变坏, 甚至被烧毁。

#### 2) 集电极最大允许耗散功耗 $P_{CM}$

$P_C = I_C U_{CE}$ ,  $P_C$  称为集电极耗散功率。  $P_C \uparrow$ , 集电结发热, 结温升高, 当温度超过一定值时, 会烧坏三极管。硅管允许结温约为  $150^\circ\text{C}$ , 锗管约为  $70\sim 90^\circ\text{C}$ 。  $P_C \leq P_{CM}$ , 保证三极管正常工作。

$P_{CM} \geq 1\text{W}$ , 大功率管,  $P_{CM} < 1\text{W}$ , 小功率管

#### 3) 反向击穿电压

基极开路, 集-射极的反向击穿  $U_{(BR)CEO}$

发射极开路, 集-基极的反向击穿电压  $U_{(BR)CBO}$

集电极开路, 射-基极的反向击穿电压  $U_{(BR)EBO}$

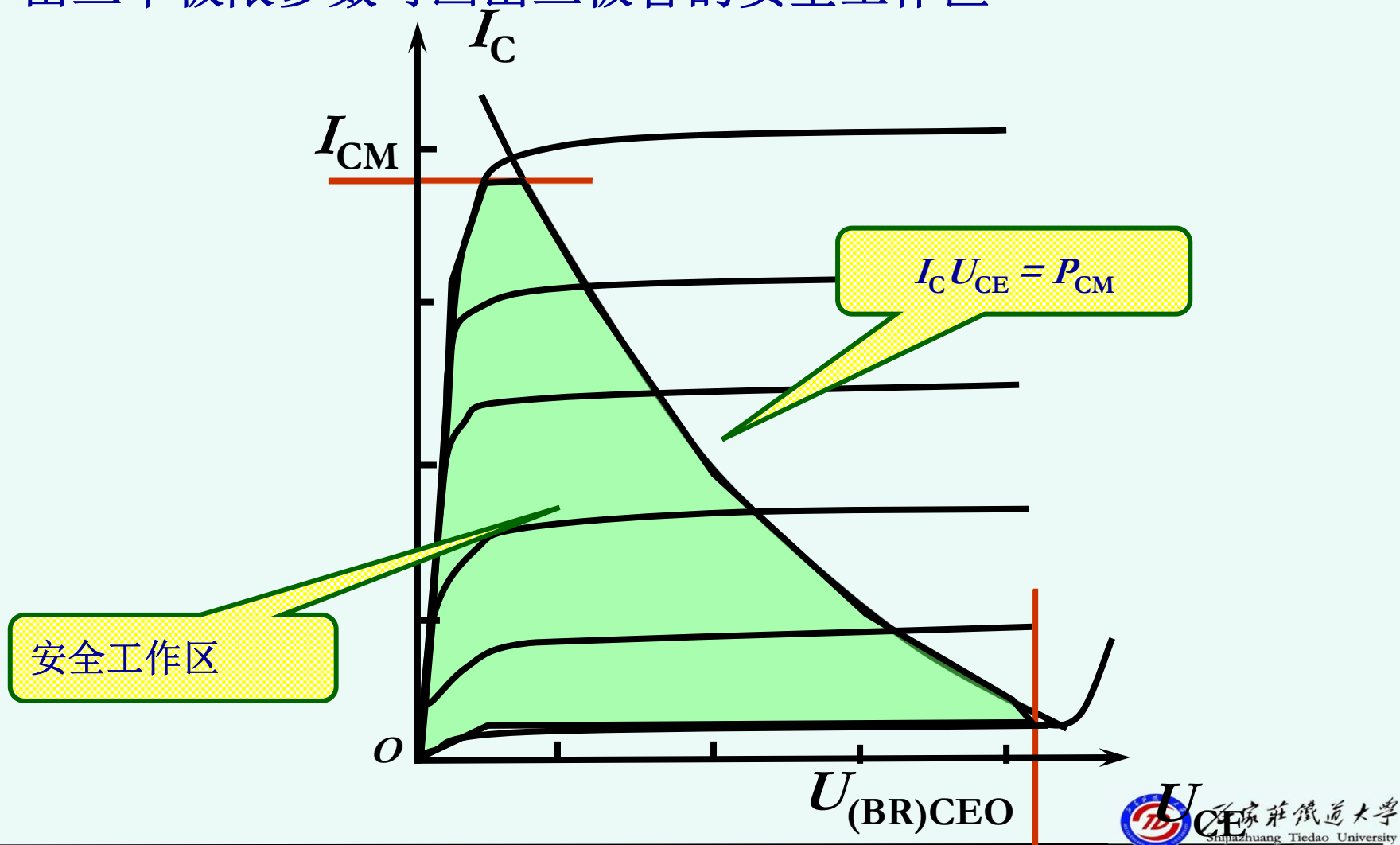
通常, 对于NPN管,  $U_{(BR)CBO} > U_{(BR)CEO} > U_{(BR)EBO}$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 3. 极限参数

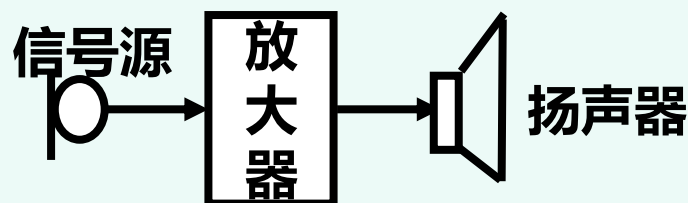
由三个极限参数可画出三极管的安全工作区



## § 11.3 基本放大电路

### ➤ 放大的概念:

放大的目的是将微弱的信号放大到所需要的数值，驱动负载工作。



### ➤ 放大的实质:

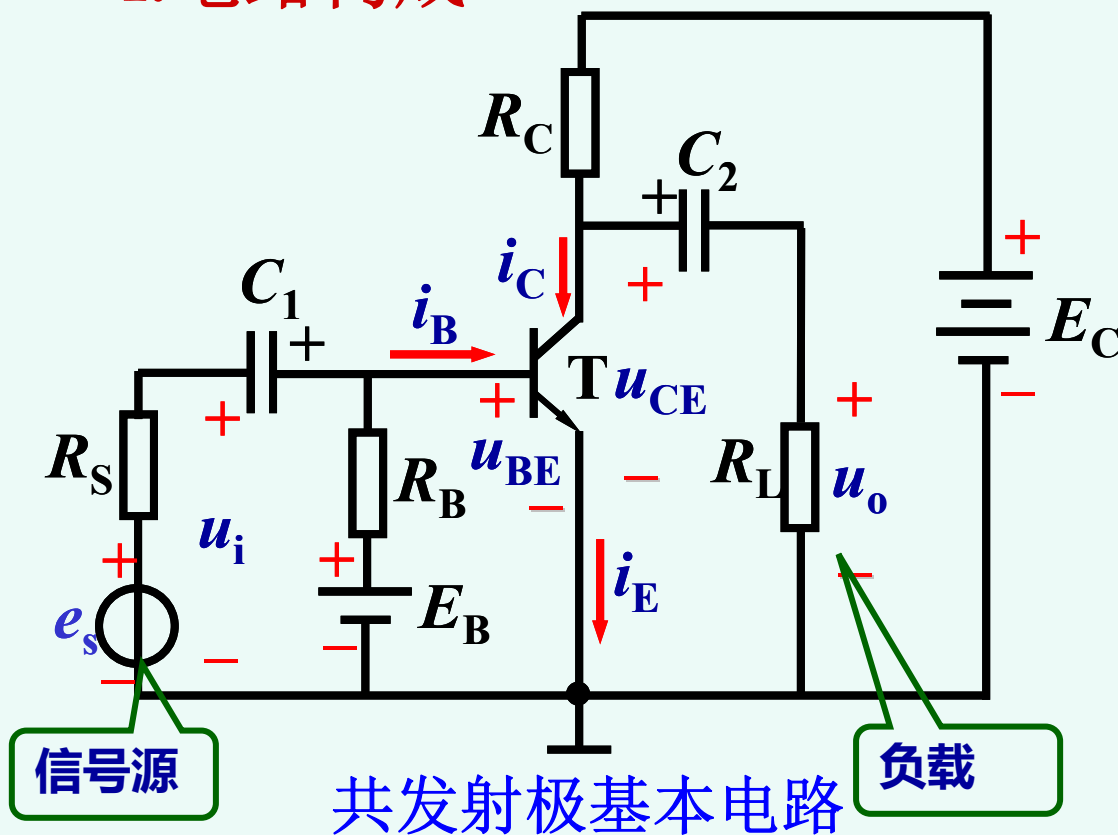
在输入信号的作用下，通过三极管等控制元件把电源的能量转换成输出信号的能量，所以放大的实质是能量的控制作用。

### ➤ 对放大电路的基本要求：

1. 要有足够的放大倍数(电压、电流、功率)。
2. 尽可能小的波形失真。

## 二、单管共射放大电路

### 1. 电路构成



耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$ ：隔离输入、输出信号与直流通路的联系，可使信号顺利输入、输出。

**三极管T**：放大元件，核心。  
要保证集电结反偏，发射结正偏，使晶体管工作在放大区

$$I_C = \beta I_B$$

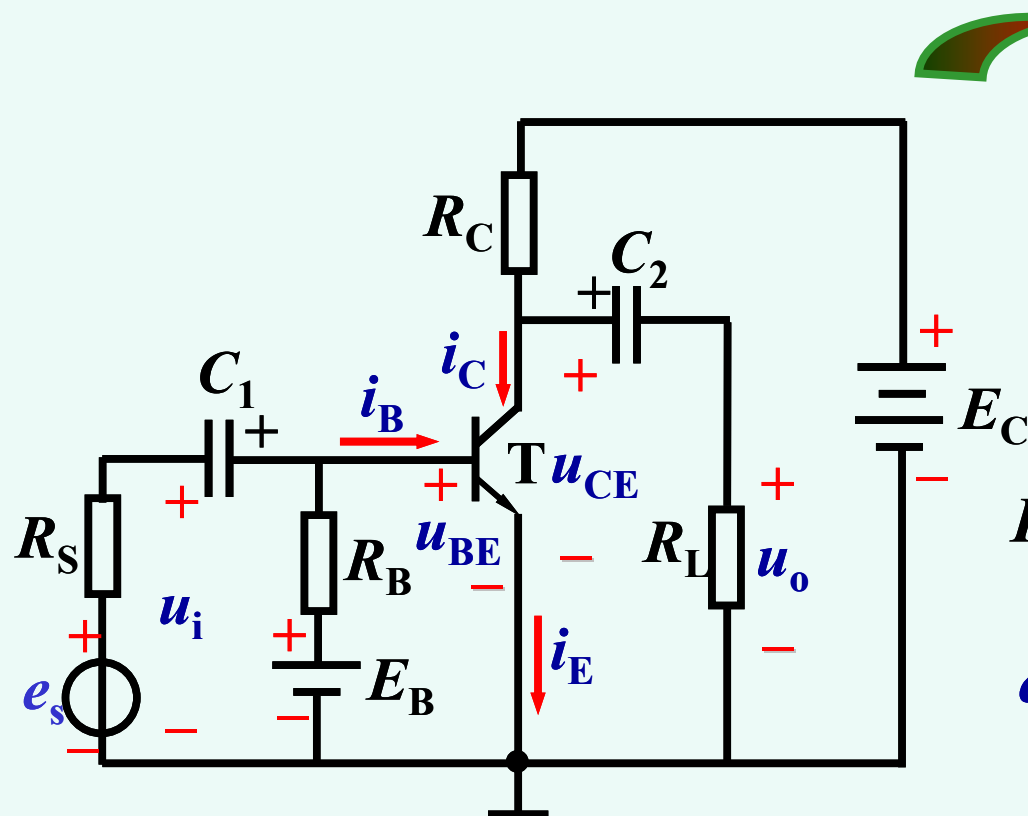
**基极电源  $E_B$  与基极阻  $R_B$** ：使发射结处于正偏，并提供大小适当的基极电流。

**集电极电源  $E_C$** ：为电路提供能量。并保证集电结反偏。

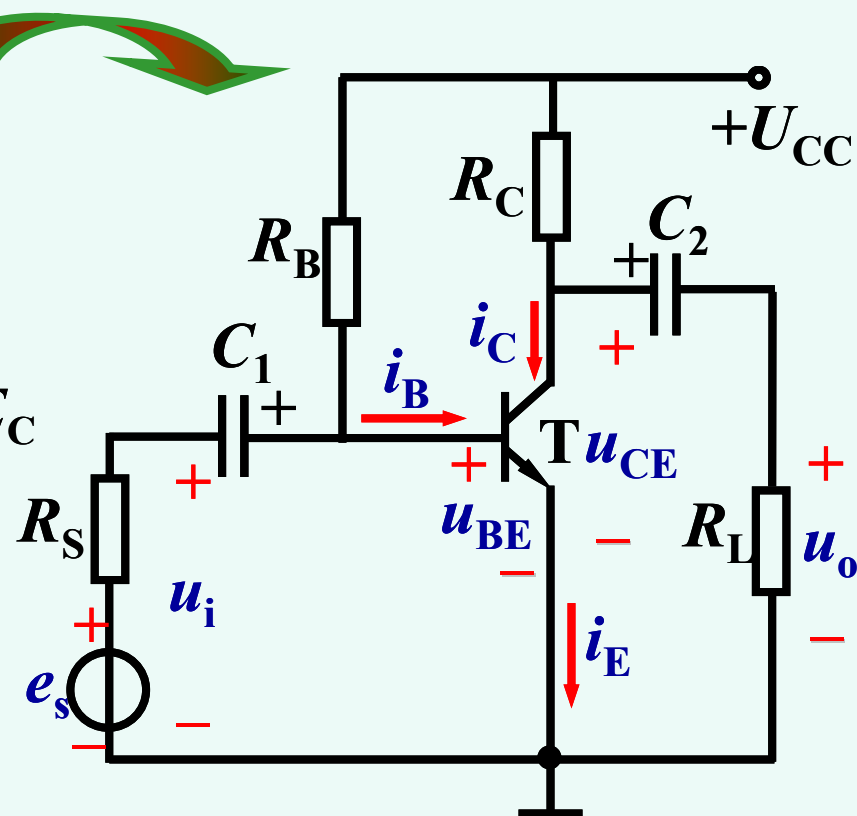
**集电极电阻  $R_C$** ：将变化的电流转变为变化的电压。



# 1.电路构成



共发射极放大电路



单电源供电放大电路

## § 11.3 基本放大电路

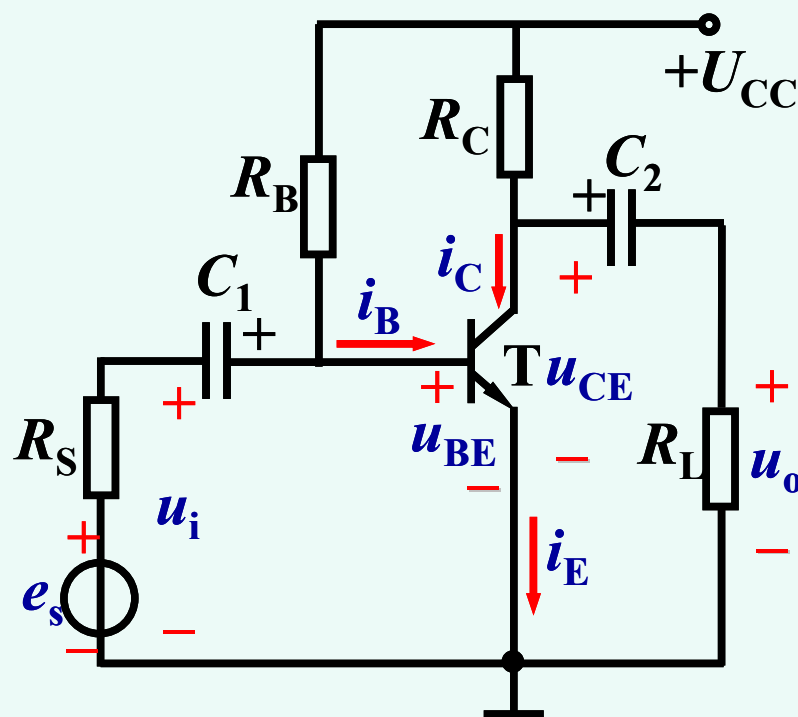
放大电路的分析:

➤ 静态分析:

电路中直流分量的分析，  
利用电路的直流通路。

➤ 动态分析:

电路中交流分量的分析，  
利用电路的交流通路。

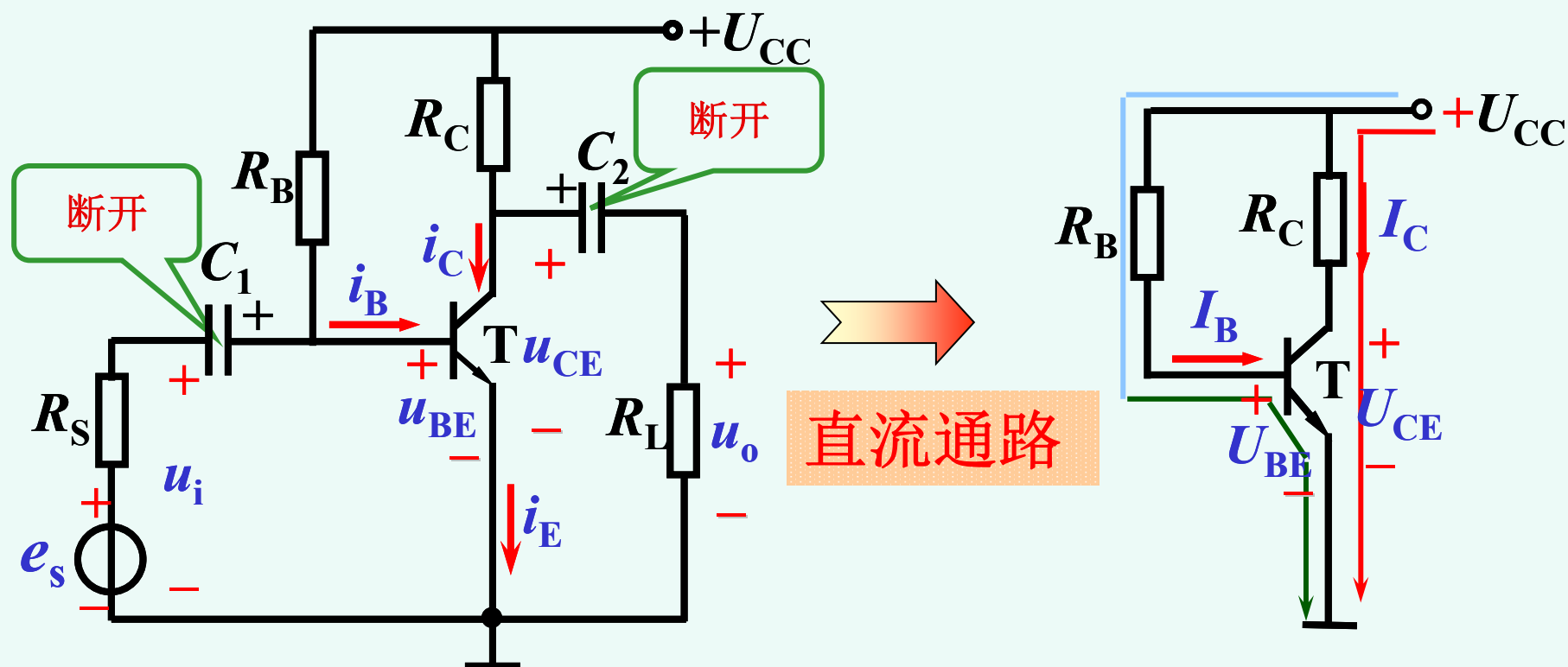


静态分析是动态分析的基础，动态电流由直流和交流分量叠加构成

## 1) 直流通路

无输入信号时电流的通路，直流状态。

对直流信号电容  $C$  可看作开路（即将电容断开）

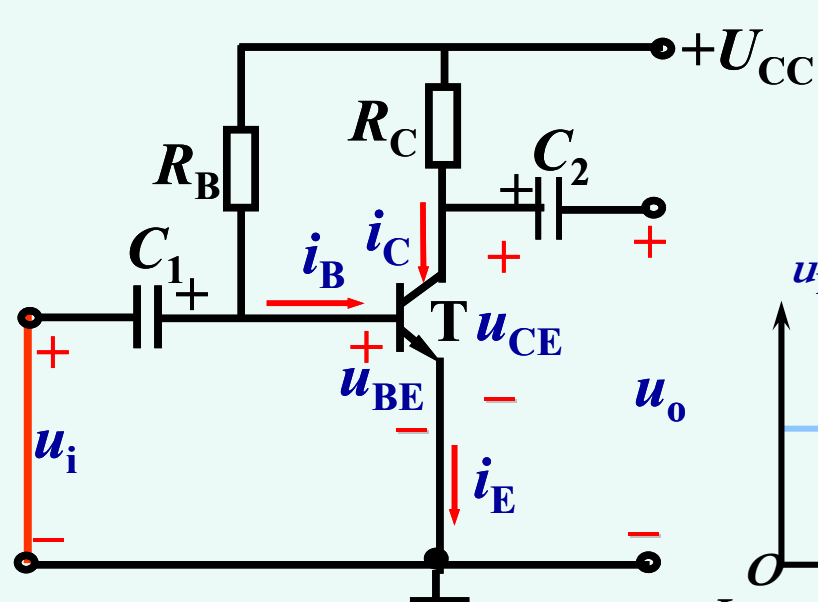


直流通路用来估算静态工作点  $Q(I_B, I_C, U_{CE})$

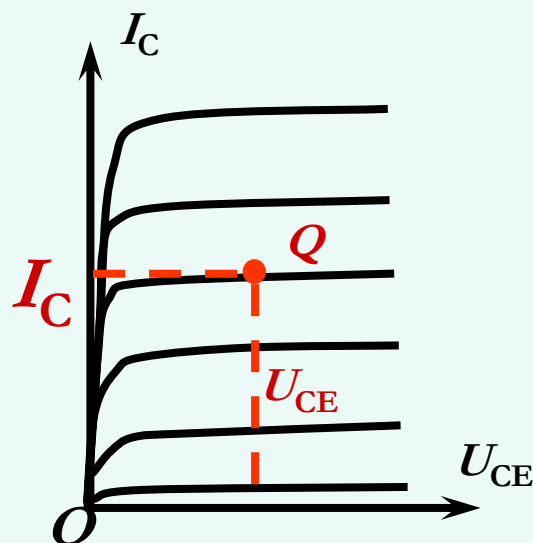
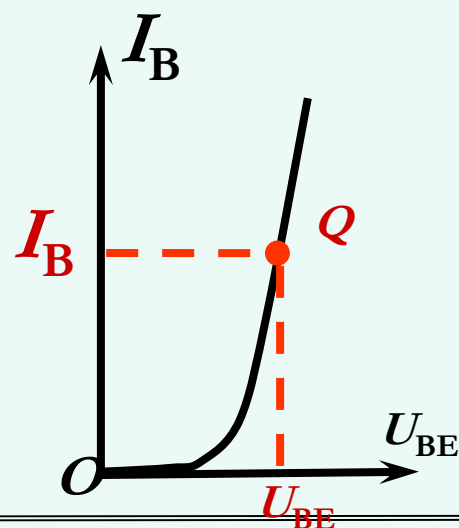
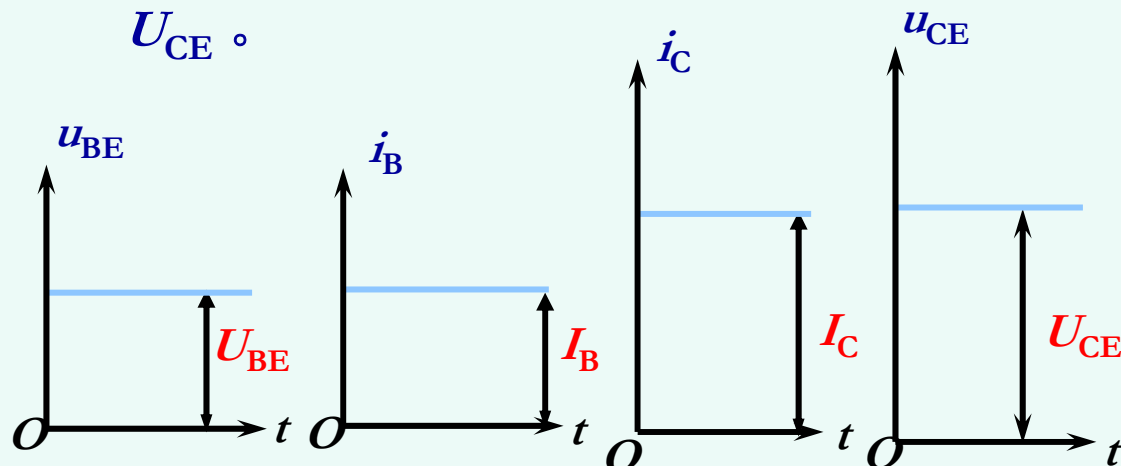


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 1.电路静态分析

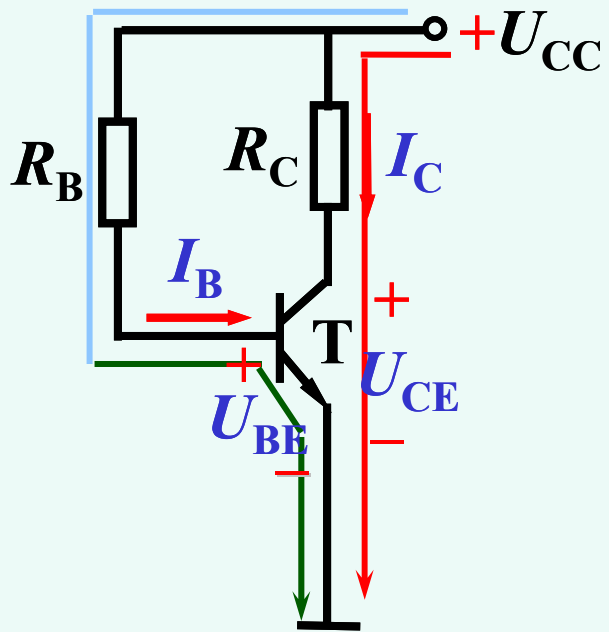


无输入信号电压( $u_i = 0$ )时, 晶体管各电极都是恒定的电压和电流:  $I_B$ 、 $U_{BE}$ 和  $I_C$ 、 $U_{CE}$ 。



( $I_B$ 、 $U_{BE}$ ) 和 ( $I_C$ 、 $U_{CE}$ ) 分别对应于输入、输出特性曲线上的一个点, 称为静态工作点。

## 2) 估算法确定静态工作点



$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$U_{BE}$  硅管约为0.7V, 锗管约为0.3V

当  $U_{BE} \ll U_{CC}$  时,

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

根据电流放大作用  $I_C \approx \beta I_B \approx \beta I_B$

所以  $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$

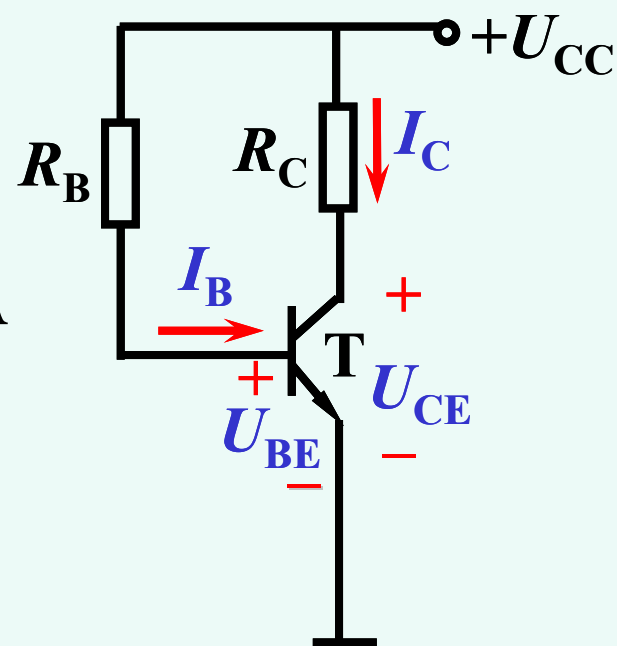
## 例1：用估算法计算静态工作点。

已知：  $U_{CC}=12V$ ，  $R_C=4k\Omega$ ，  $R_B=300k\Omega$ ，  $\beta=37.5$ 。

解：  $I_B \approx \frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_B} = \frac{12-0.7}{300} \text{mA} = 0.0377 \text{mA}$

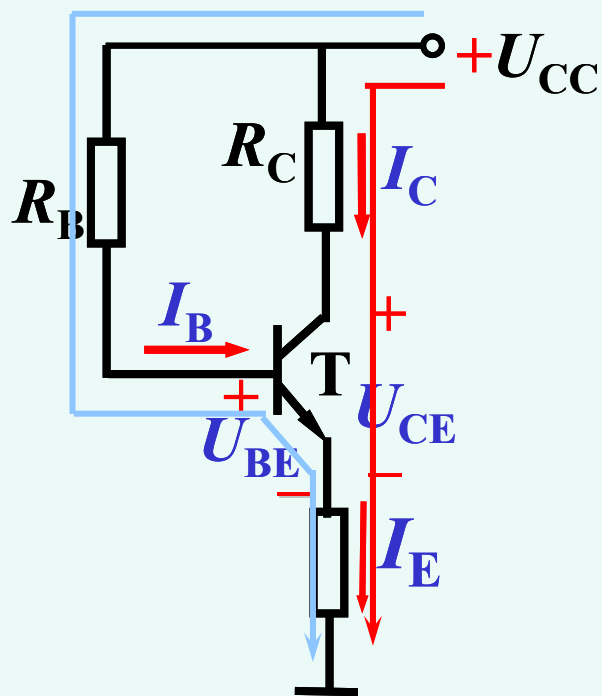
$$I_C \approx \beta I_B = 37.5 \times 0.0377 \text{mA} = 1.42 \text{mA}$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= U_{CC} - I_C R_C \\ &= 12 - 1.42 \times 4 \text{V} = 6.3 \text{V} \end{aligned}$$



注意：电路中  $I_B$  和  $I_C$  的数量级不同

## 例2：用估算法计算图示电路的静态工作点。



由KVL可得出

$$\begin{aligned} U_{CC} &= I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E \\ &= I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta) I_B R_E \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$$I_C \approx \beta I_B$$

由KVL可得：

$$\begin{aligned} U_{CE} &= U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \\ &\approx U_{CC} - I_C (R_C + R_E) \end{aligned}$$

由例1、例2可知，当电路不同时，计算静态值的公式也不同。

返回



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 3) 图解法确定静态工作点

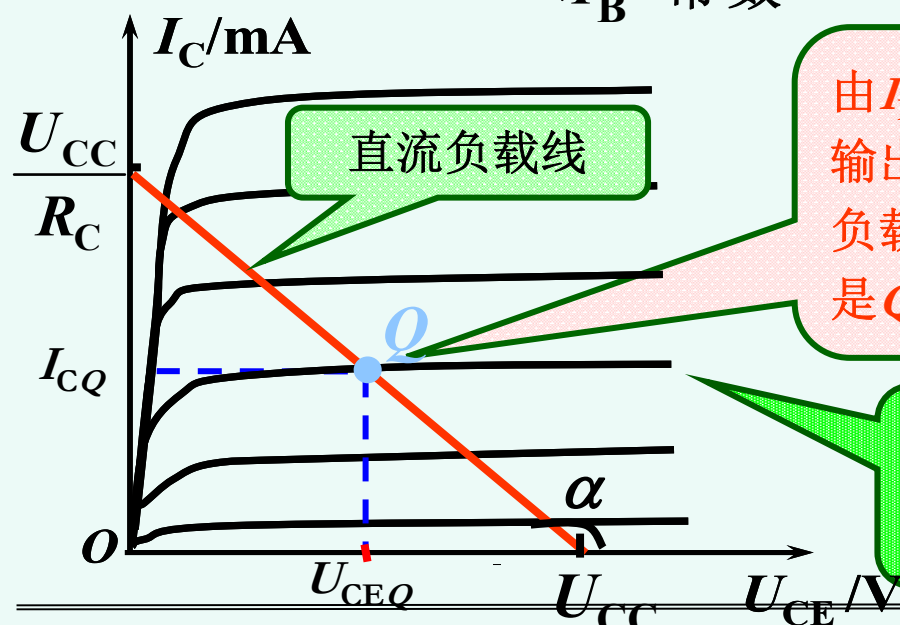
**优点：**能直观地分析和了解静态值的变化对放大电路的影响。

**步骤：**

1. 用估算法确定  $I_B$
2. 由输出特性确定  $I_C$  和  $U_{CE}$

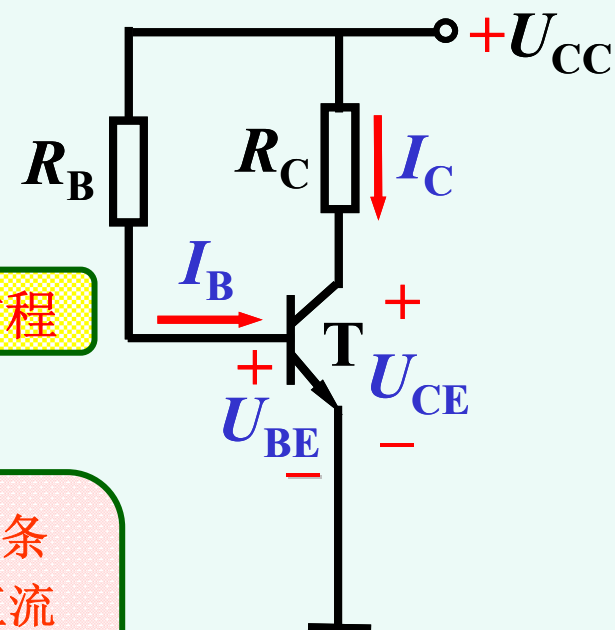
$$\begin{cases} U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \\ I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{常数}} \end{cases}$$

直流负载线方程



由  $I_B$  确定的那条输出特性与直流负载线的交点就是  $Q$  点

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$



$$\tan \alpha = -\frac{1}{R_C}$$

直流负载线斜率



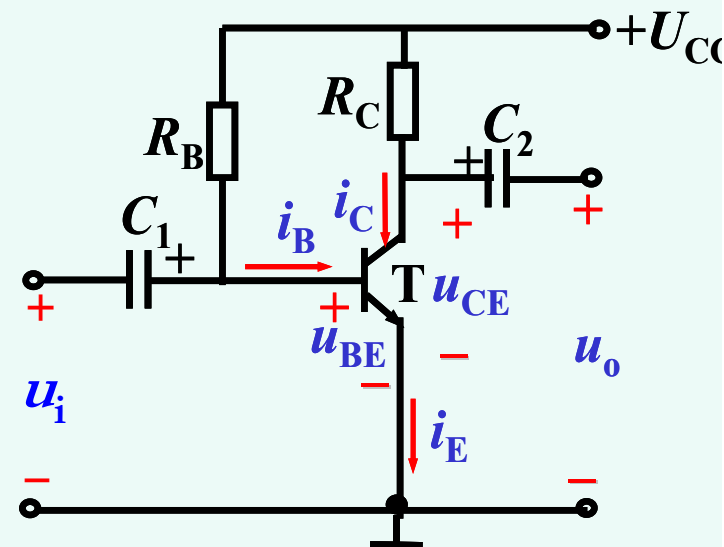
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



## 2. 电路的动态分析

动态时电路中的电流和电压由两部分组成：一部分是**直流分量**，另一部分是**交流分量**。为了便于分析，将放大电路中电流、电压的符号作了规定，如下表所示。

名称	直流量	交流量			总电流(电压)
		瞬时值	相量	有效值	瞬时值
基极电流	$I_B$	$i_b$	$\dot{I}_b$	$I_b$	$i_B$
集电极电流	$I_C$	$i_c$	$\dot{I}_c$	$I_c$	$i_C$
发射极电流	$I_E$	$i_e$	$\dot{I}_e$	$I_e$	$i_E$
集射极电压	$U_{CE}$	$u_{ce}$	$\dot{U}_{ce}$	$U_{ce}$	$u_{CE}$
基射极电压	$U_{BE}$	$u_{be}$	$\dot{U}_{be}$	$U_{be}$	$u_{BE}$



$$u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$$

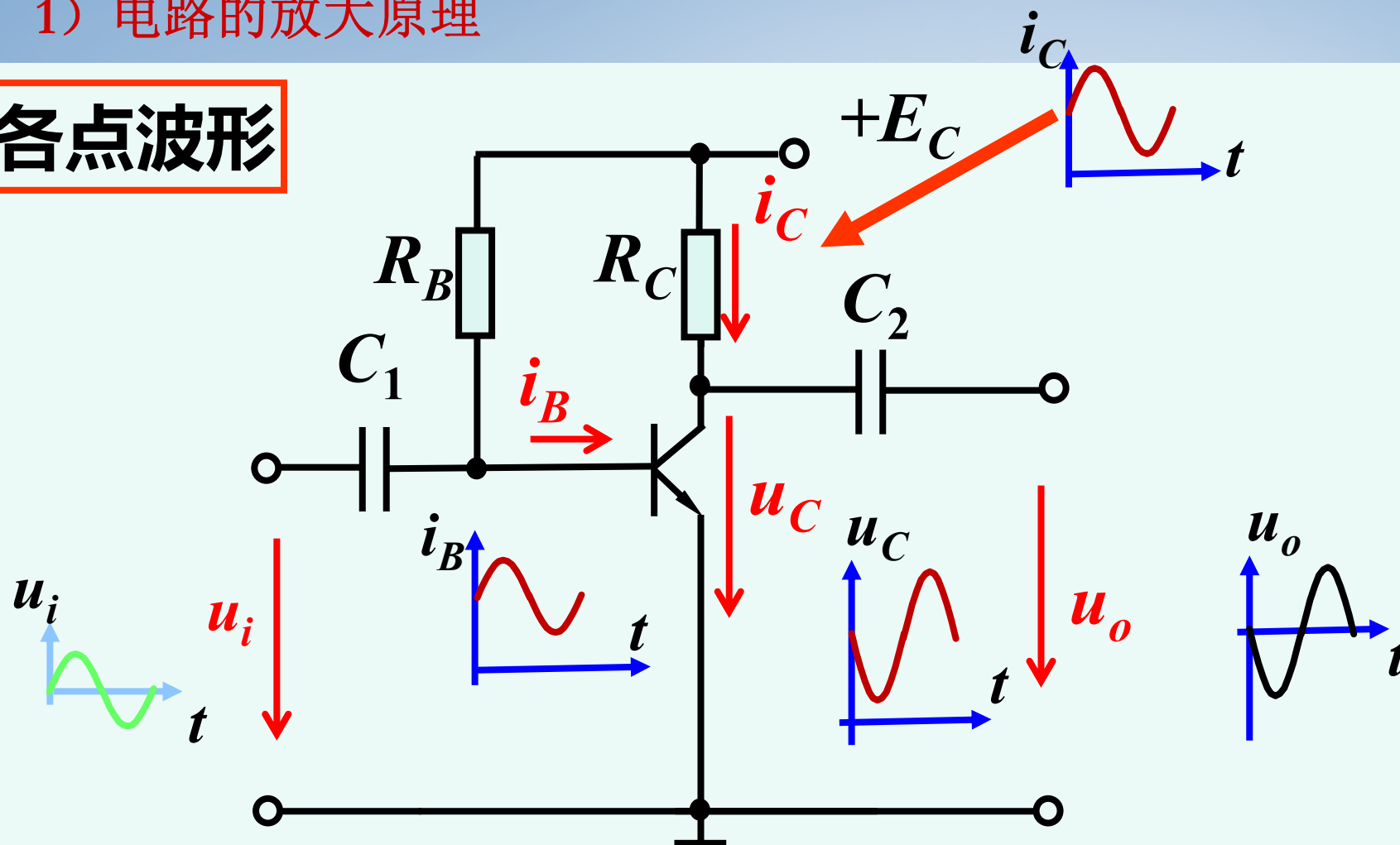
$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$$

## 1) 电路的放大原理

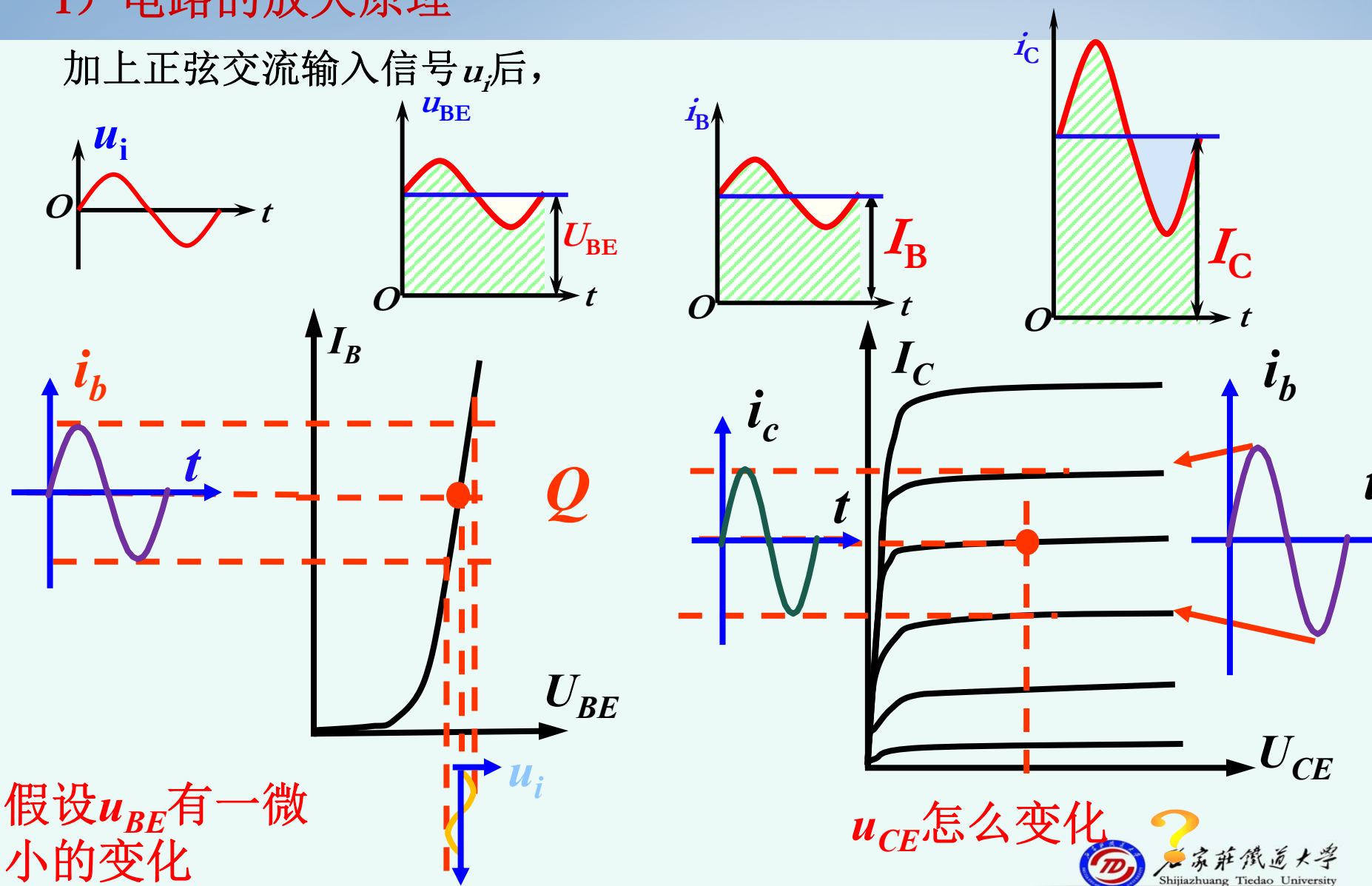
### 各点波形



因此，电路具有电压放大作用（交流信号），且共发射极电路具有反相作用。

# 1) 电路的放大原理

加上正弦交流输入信号  $u_i$  后,



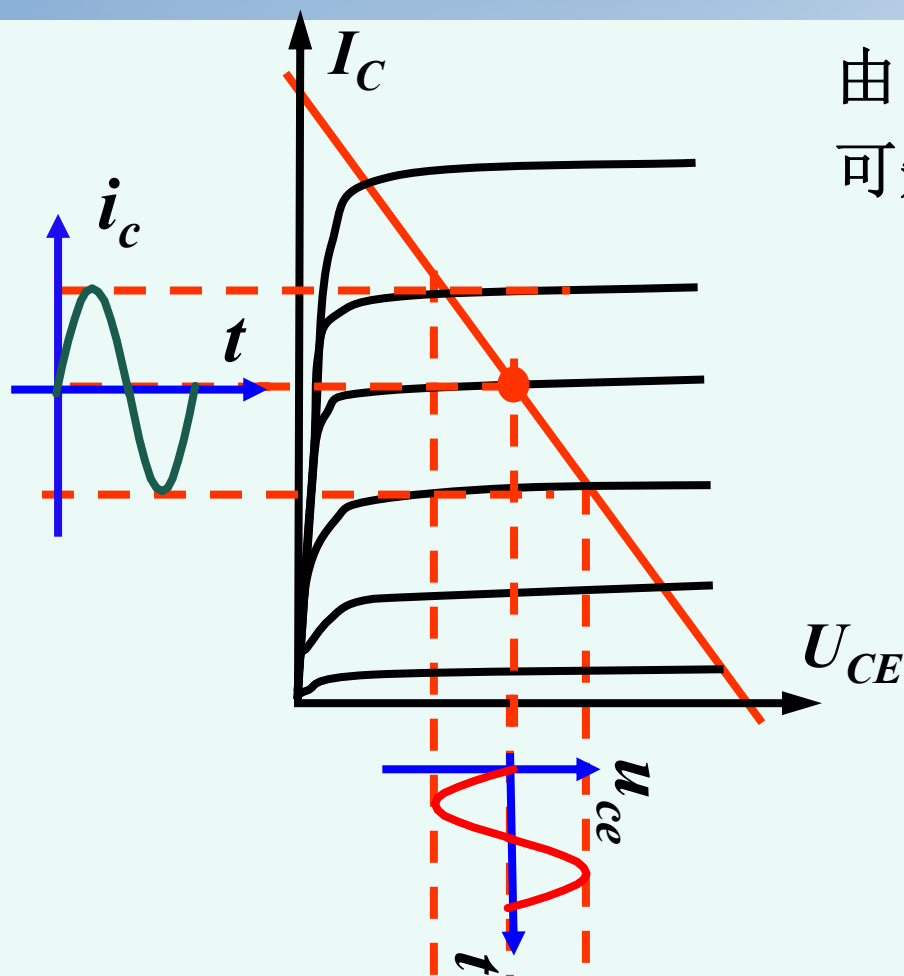
假设  $u_{BE}$  有一微小的变化

$u_{CE}$  怎么变化

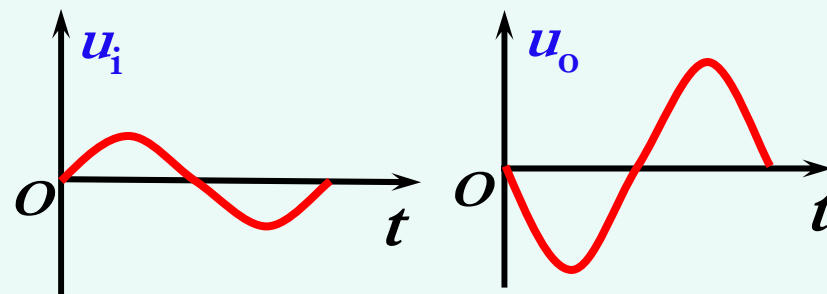
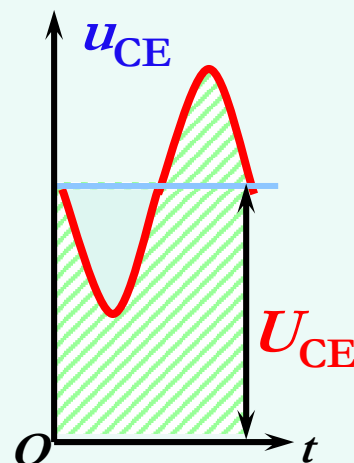


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 1) 电路的放大原理



由  $u_{CE} = U_{CC} - i_C R_C$   
可知,  $u_{CE}$  的变化沿一条直线



**$u_o$  与  $u_i$  反相!**



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

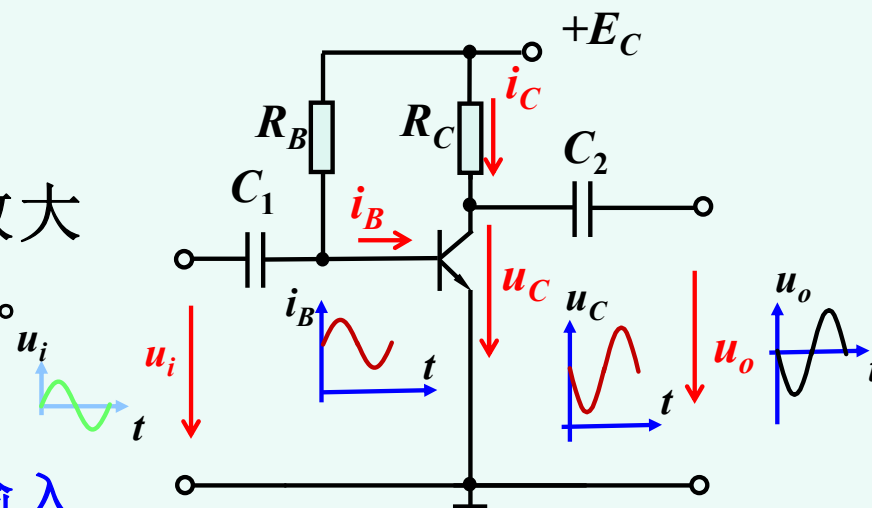
## 1) 电路的放大原理

总结:

(1) 三极管必须工作在合适的放大区。发射结正偏，集电结反偏。

(2) 放大是指输出交流分量与输入信号的关系，不包括直流成分。

(3) 直流分量是正常放大的基础，交流分量是放大的对象，交流量搭载在直流上进行传输和放大。



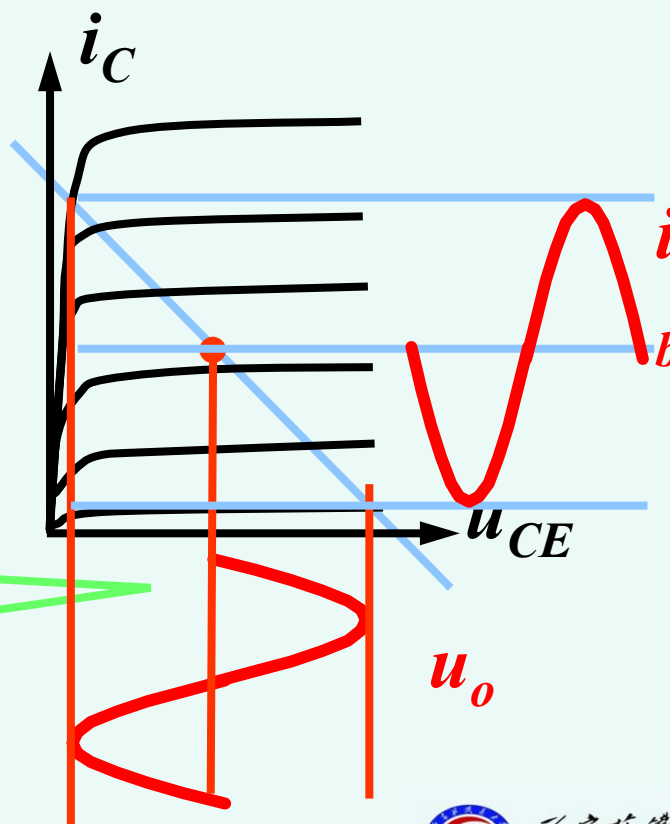
### 3) 静态工作点的作用

在放大电路中，**输出信号应该成比例地放大输入信号**（即线性放大）；如果两者不成比例，则输出信号不能反映输入信号的情况，放大电路产生**非线性失真**。

为了得到尽量大的输出信号，要把 $Q$ 设置在交流负载线的中间部分。如果 $Q$ 设置不合适，信号进入截止区或饱和区，造成非线性失真。

选择静态工作点

可输出的最大不失真信号

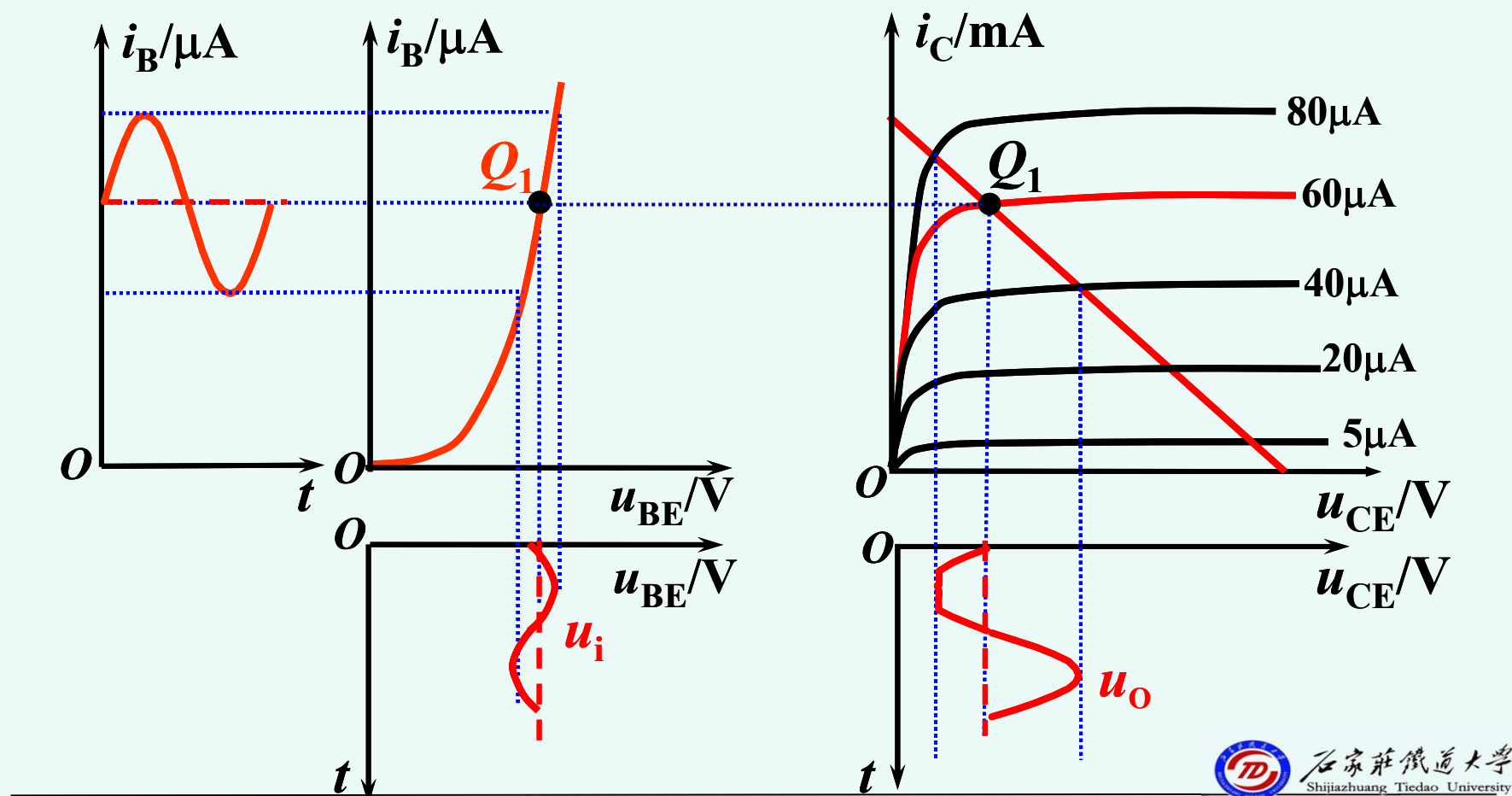


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## a. 饱和失真

若  $Q$  设置过高, 三极管进入饱和区工作, 造成饱和失真。

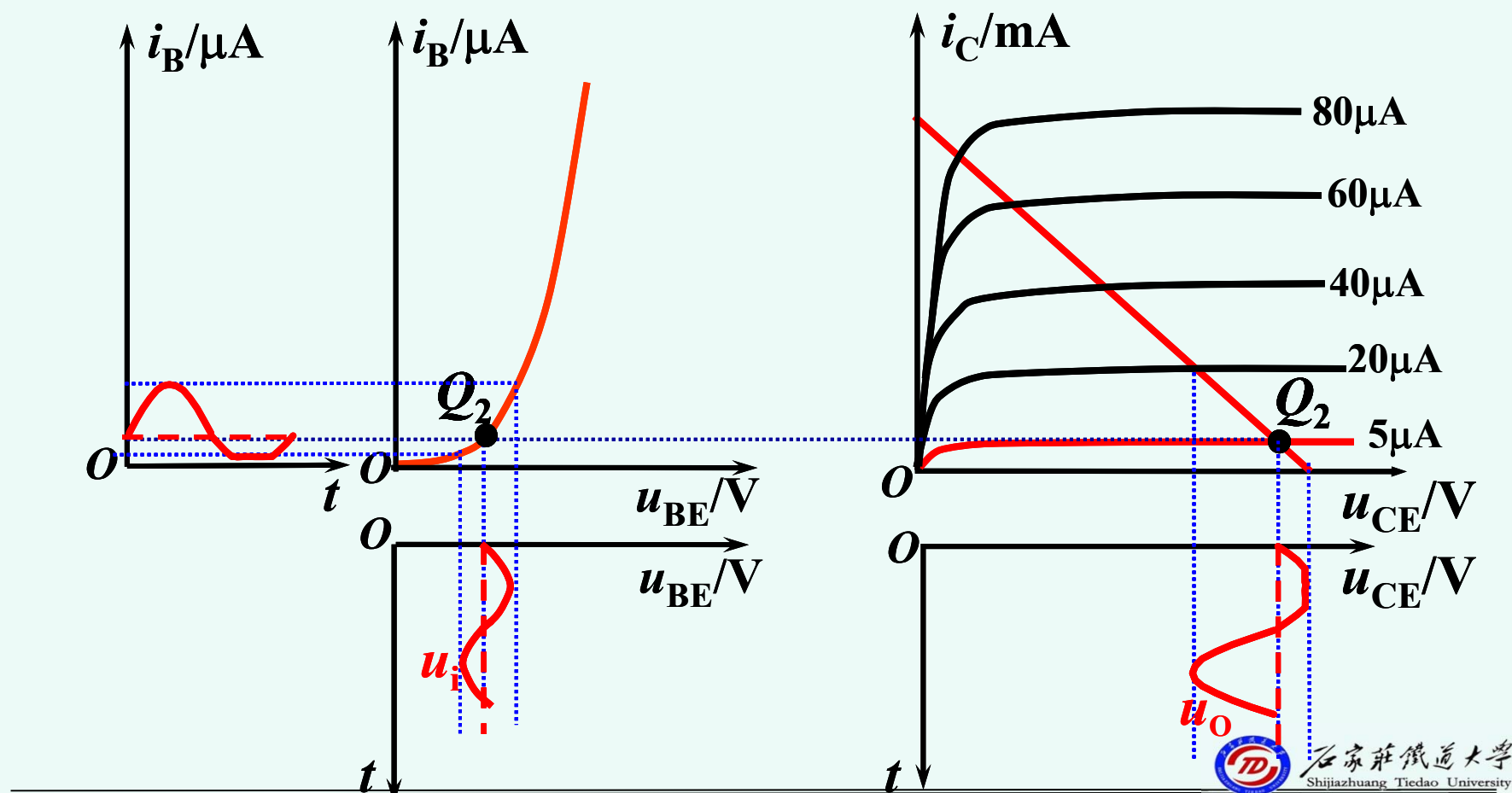
解决办法: 适当减小基极电流可消除失真。



## b. 截止失真

若  $Q$  设置过低, 三极管进入截止区工作, 造成截止失真。

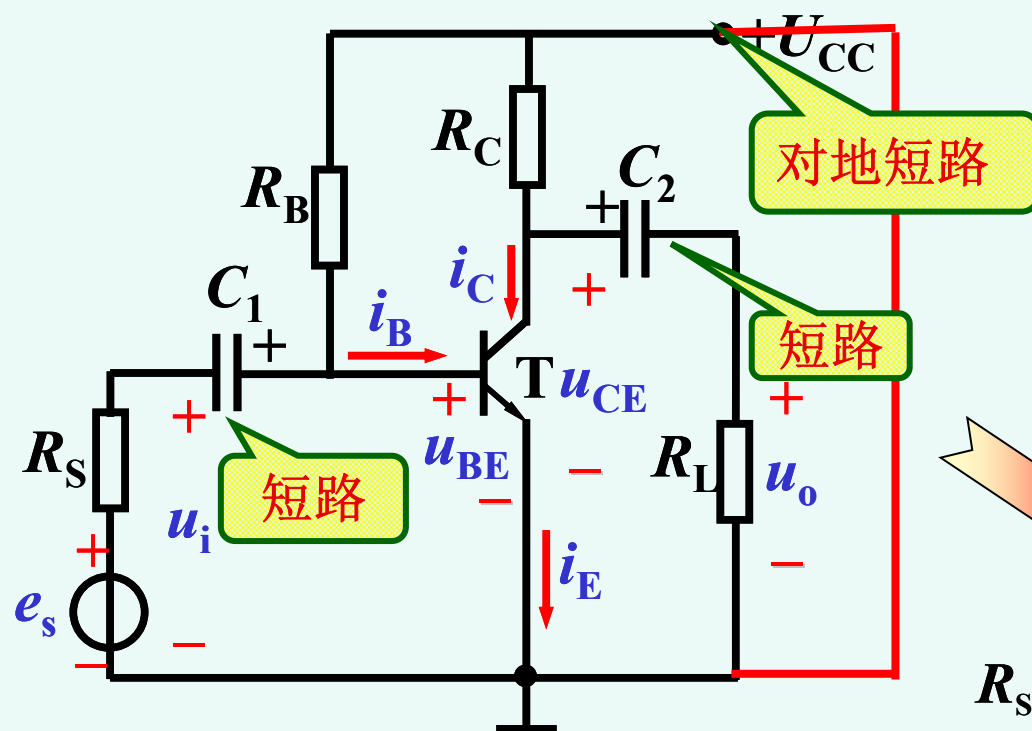
解决办法: 适当增加基极电流可消除失真。





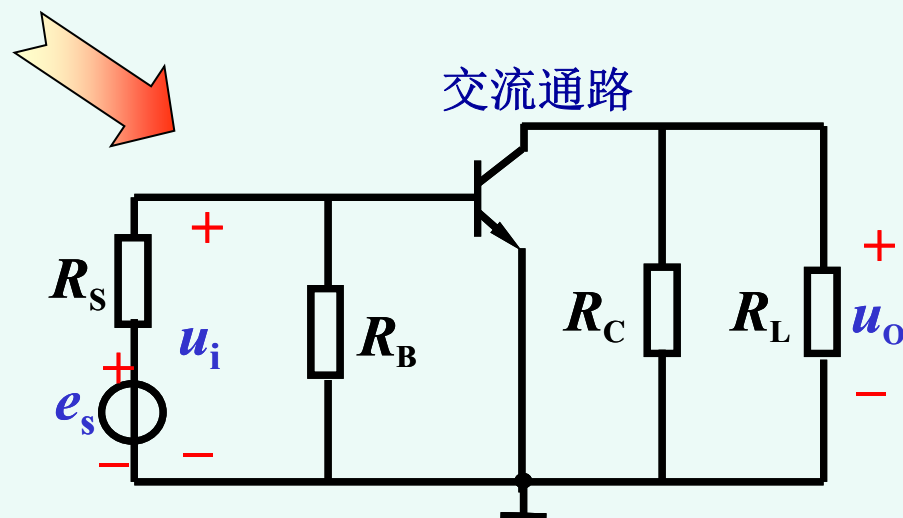
# 交流通路

分析交流信号 (有输入信号  $u_i$  时的交流分量)



$X_C \approx 0$ ,  $C$  可看作短路。忽略电源的内阻, 电源的端电压恒定, 直流电源对交流可看作短路。

用来计算电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态参数。



## 2) 微变等效电路法

### 微变等效电路:

把非线性元件三极管所组成的放大电路等效为一个线性电路。即把非线性的三极管线性化，等效为一个线性元件。

### 线性化的条件:

三极管在小信号（微变量）情况下工作。因此，在静态工作点附近小范围内的特性曲线可用直线近似代替。

### 微变等效电路法:

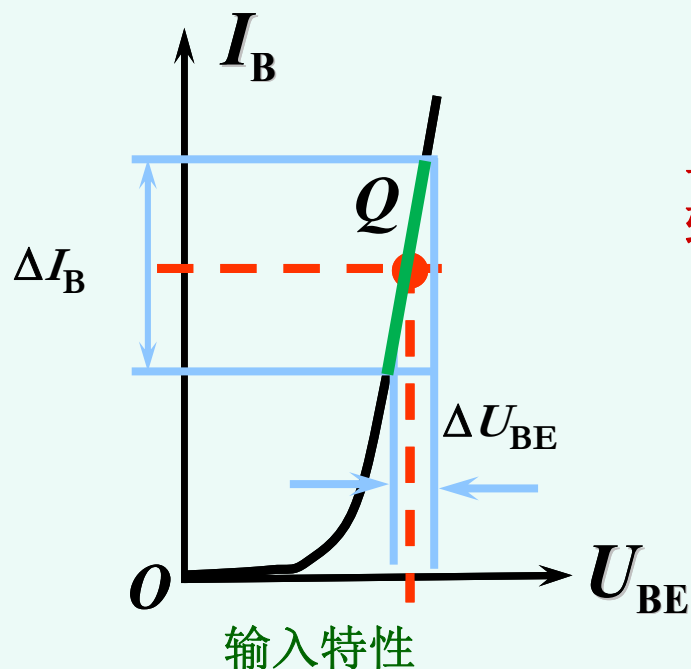
利用放大电路的微变等效电路分析计算放大电路电压放大倍数  $A_u$ 、输入电阻  $r_i$ 、输出电阻  $r_o$  等。

微变等效电路是交流信号的等效电路，只能进行交流分量的分析和计算，不能用来分析和计算直流分量。

## a) 三极管的微变等效电路

### (1) 输入回路

当信号很小时，在静态工作点附近的输入特性在小范围内可近似线性化。



三极管的  
输入电阻

$$r_{be} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}} = \left. \frac{u_{be}}{i_b} \right|_{U_{CE}}$$

三极管的输入回路 ( B、E 之间 ) 可用  $r_{be}$  等效代替。

对于小功率三极管：

$$r_{be} \approx 300(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$$

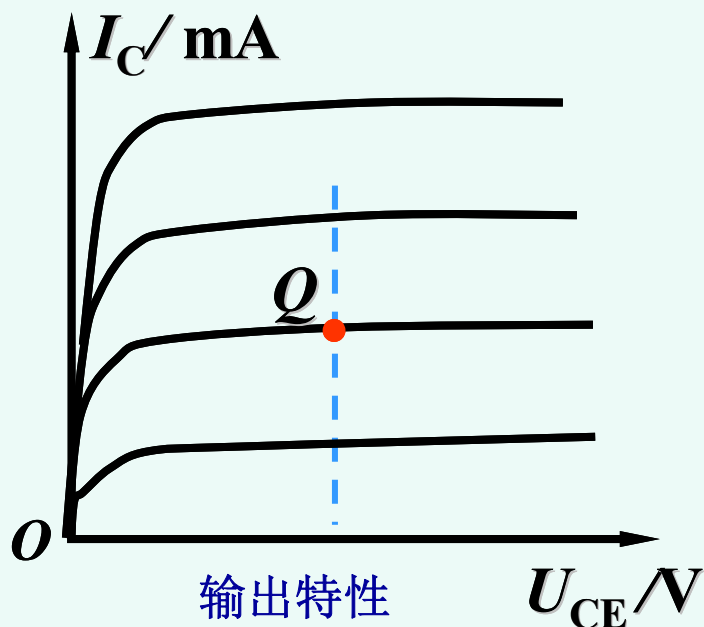
$r_{be}$  一般为几百欧到几千欧。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## a) 三极管的微变等效电路

### (2) 输出回路



输出特性在放大区是一组近似等距的平行直线。

三极管的电流放大系数

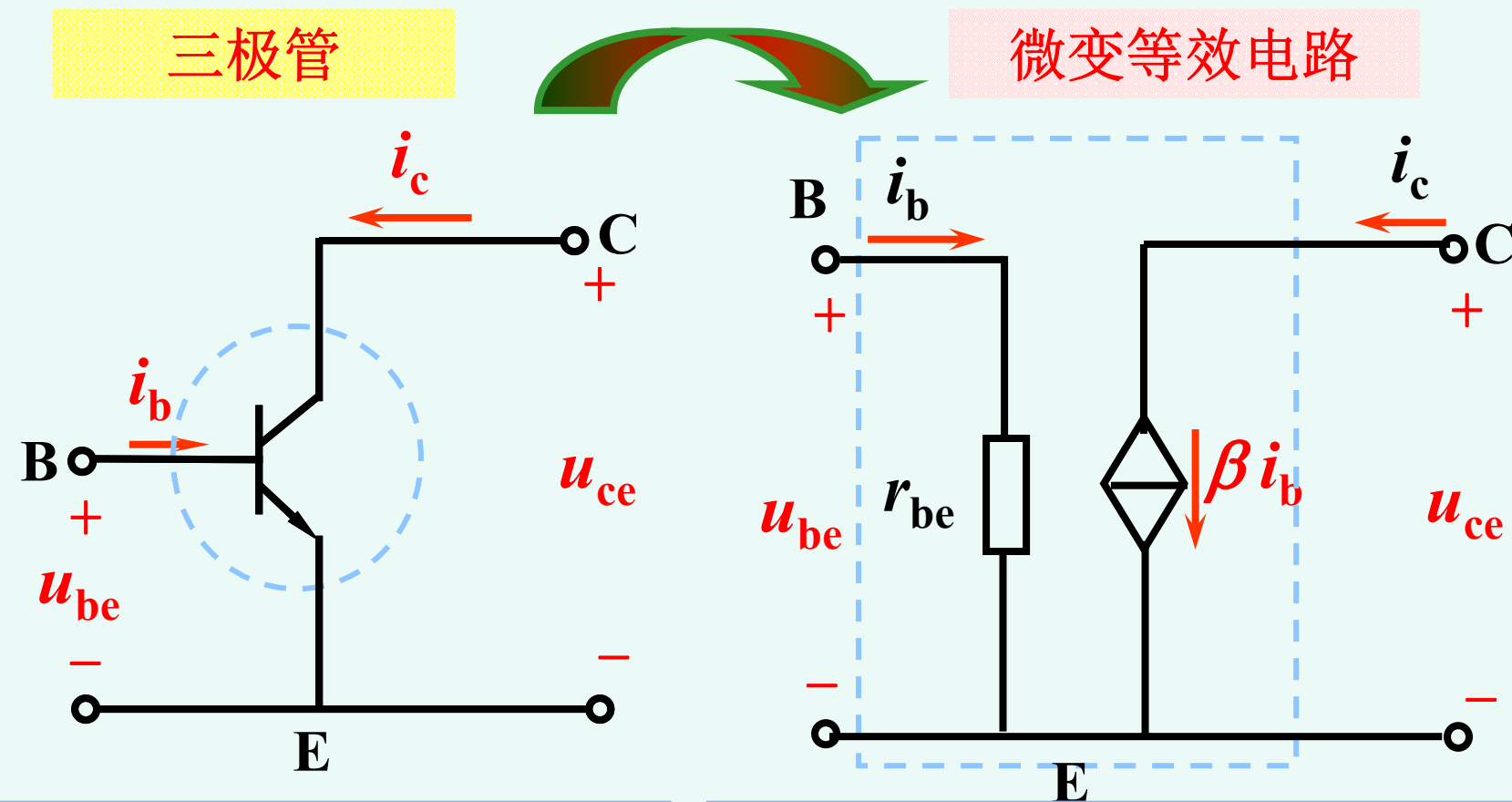
$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{U_{CE}}$$

$\beta$ 一般在20~200之间

三极管的输出回路(C、E 之间)可用一受控电流源等效代替。

$$i_c = \beta i_b$$

## a) 三极管的微变等效电路

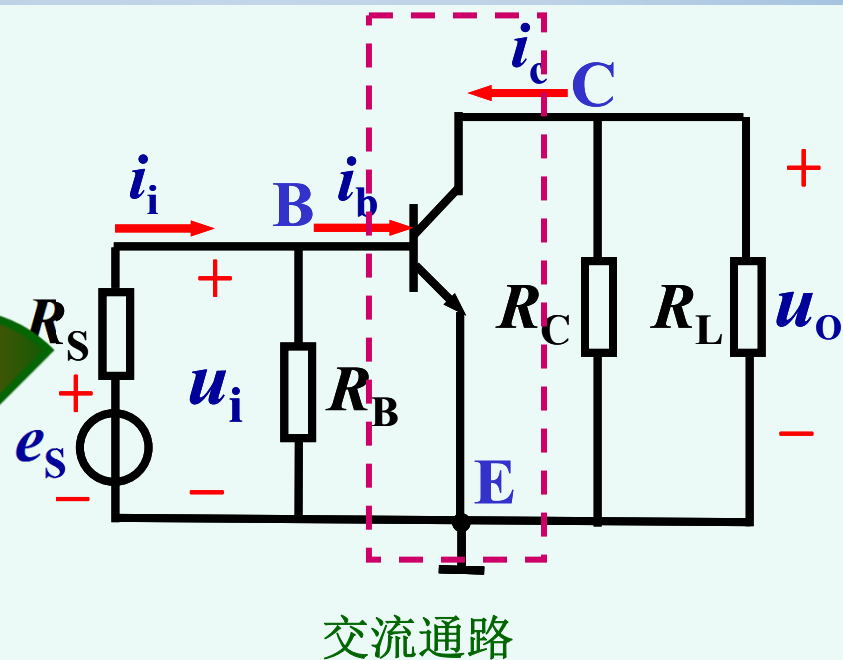
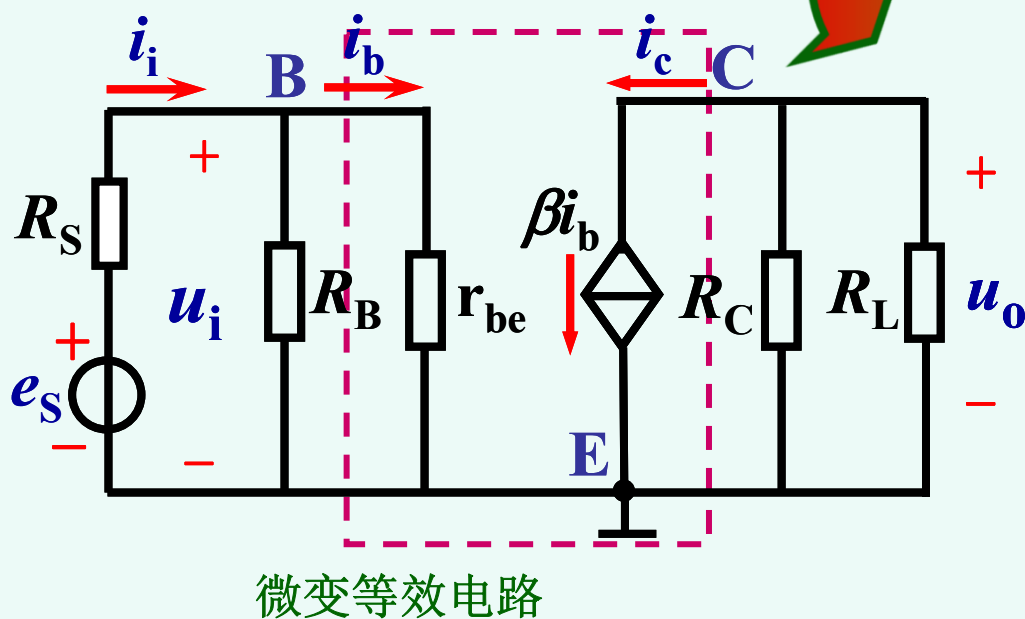


三极管的B、E之间可用  $r_{be}$  等效代替。

三极管的C、E之间可用一受控电流源  $i_c = \beta i_b$  等效代替。

## b) 放大电路的微变等效电路

将交流通路中的三极管用微变等效电路代替即可得放大电路的微变等效电路。



运用该等效电路可以对放大电路的动态指标进行定量分析。

### c) 动态指标计算- 放大倍数

定义:  $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

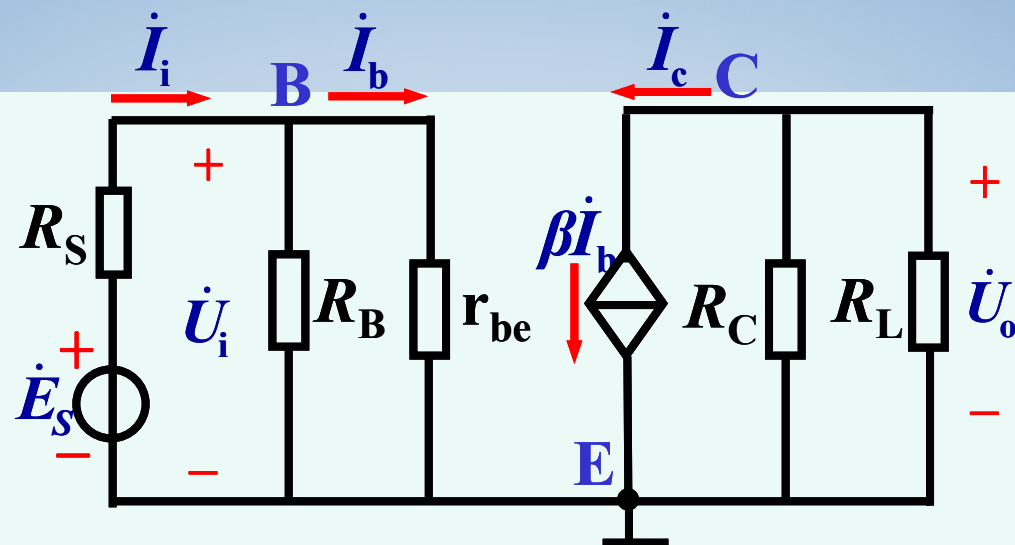
$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L$$

$$= -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

输出端开路时

$$A_u = -\beta \frac{R_C}{r_{be}}$$



$$r_{be} \approx 300(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$$

负号表示输出电压的相位与输入相反。

因  $r_{be}$  与  $I_E$  有关, 故放大倍数与静态  $I_E$  有关。

放大倍数与负载电阻有关:  
负载电阻愈小, 放大倍数愈小。

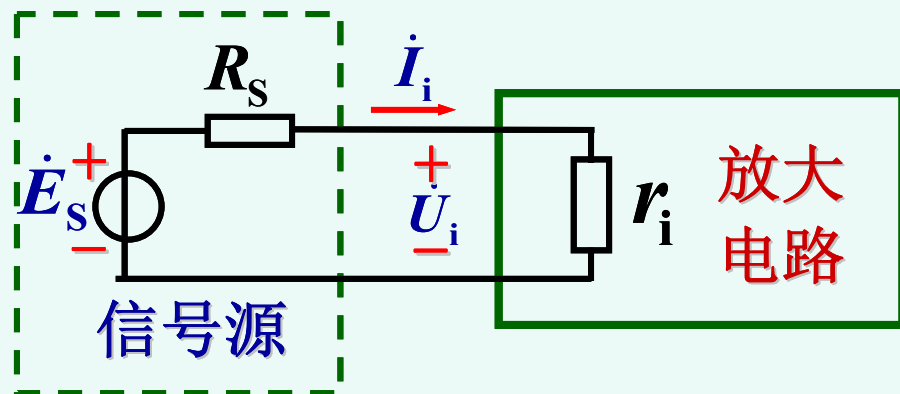


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## c) 动态指标计算- 输入电阻

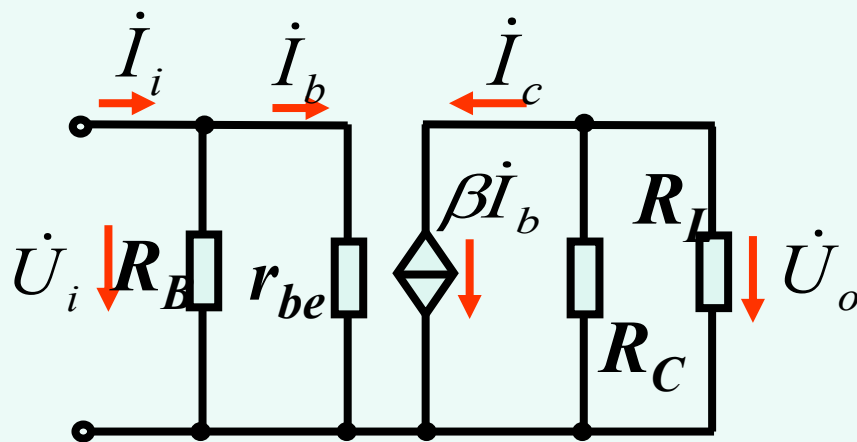
放大电路对信号源来说，是一个负载，可用一个电阻来等效代替，称为放大电路的输入电阻。反映对信号电压的衰减

定义：输入电阻  $r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$



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

当  $R_B \gg r_{be}$  时,  $R_i \approx r_{be}$

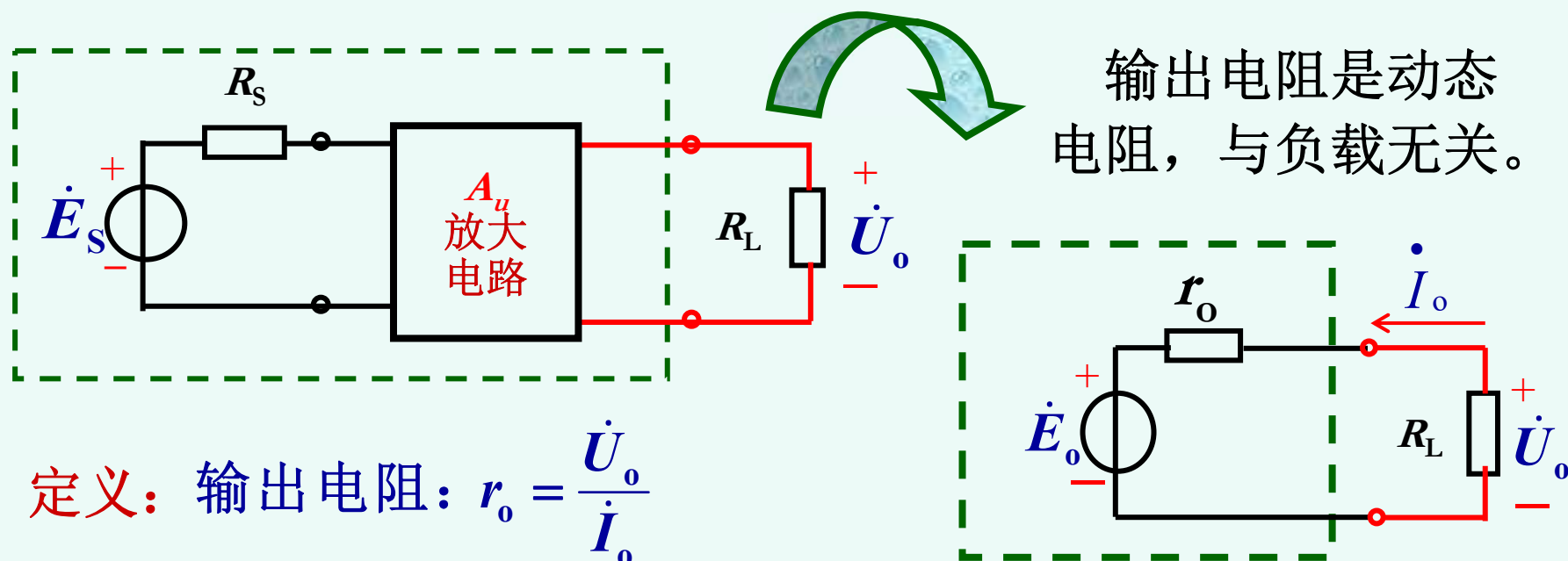


通常希望  $R_i$  大一些，从而输入电压更接近信号电压。



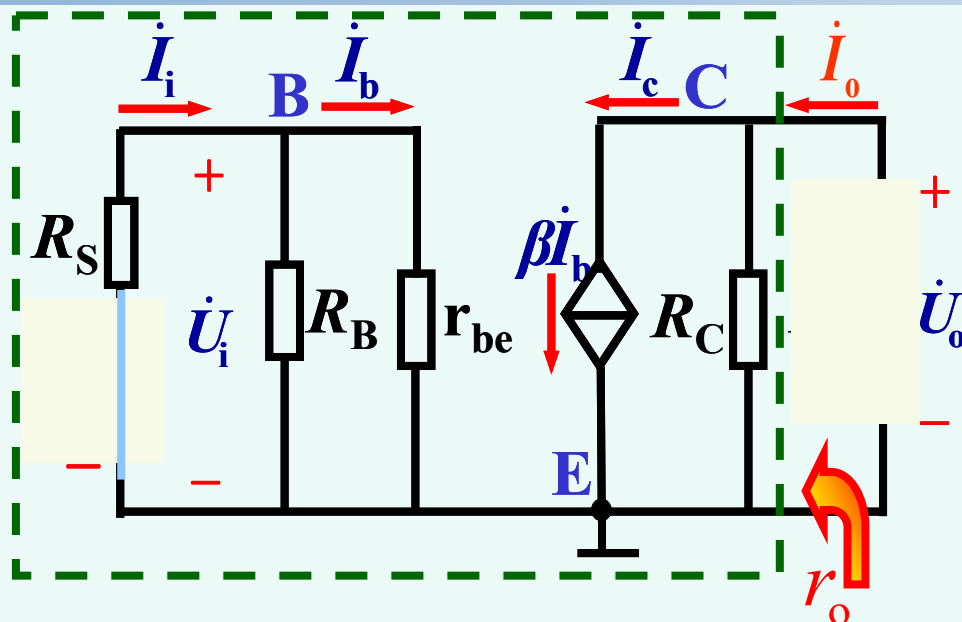
### c) 动态指标计算- 输出电阻

放大电路对负载来说，是一个信号源，可以将它进行戴维宁等效，等效电源的内阻即为放大电路的输出电阻，**反映带载能力**



输出电阻越小，当负载变化时输出电压的变化就越小，带载能力越强，因此一般总是希望输出电阻小一些。

求输出电阻:



求 $r_o$ 的步骤:  
断开负载 $R_L$

$$I_b = 0 \quad \text{所以} \quad I_c = 0$$

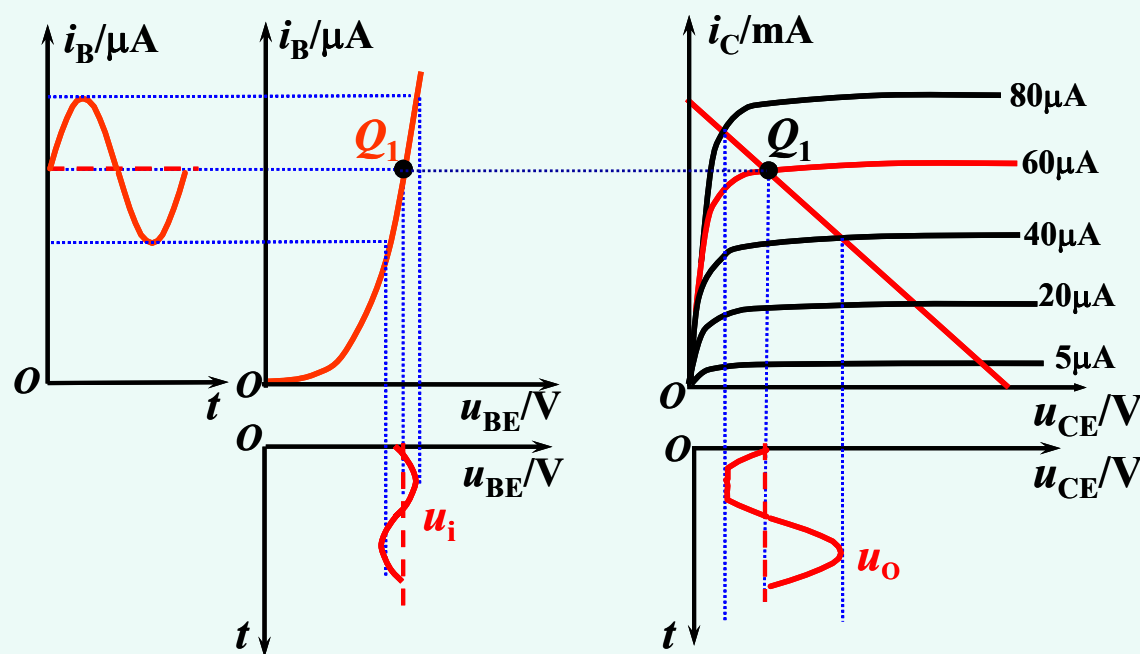
$$r_o = \frac{U_o}{I_o} = R_C$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 4. 静态工作点稳定电路

为了保证放大电路的稳定工作，必须有合适的、稳定的静态工作点。但是， $\beta$  和  $I_{CEO}$  决随温度变化，导致  $I_C$  变化，又会引起  $U_{CE}$  变化，即静态工作点变化。



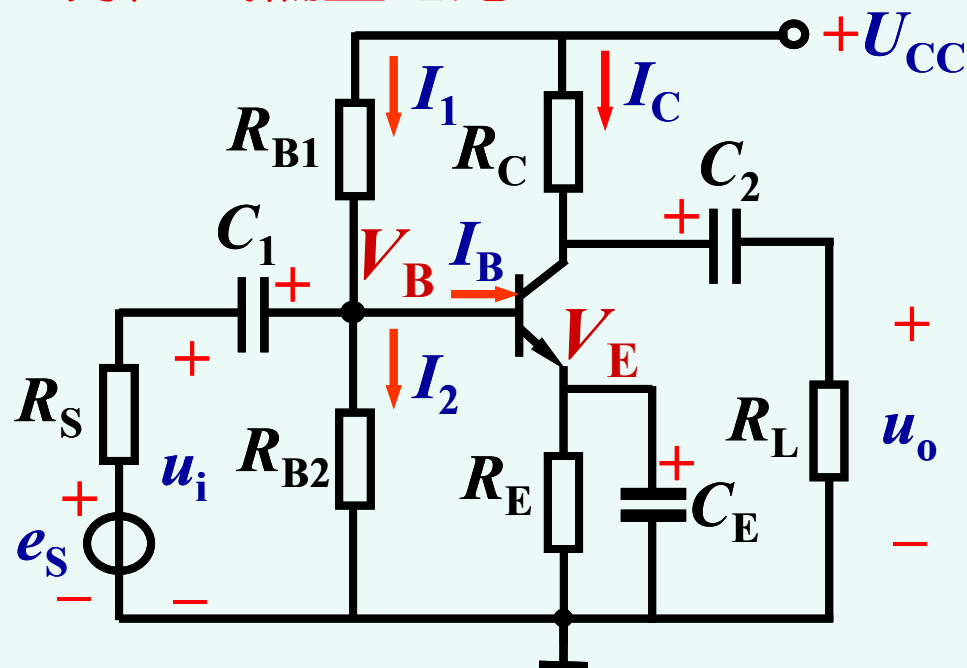
需要稳定  $I_C$  不受温度的影响。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## Q 点稳定的过程

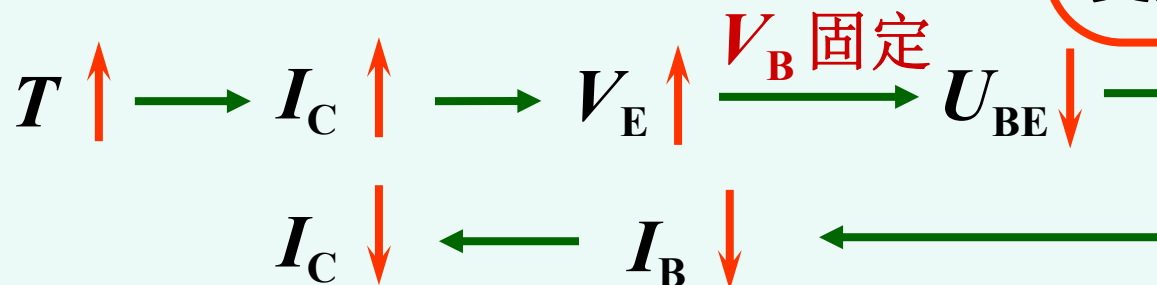
### 分压式偏置电路



本电路稳压的过程实际是由于加了  $R_E$  形成了负反馈过程

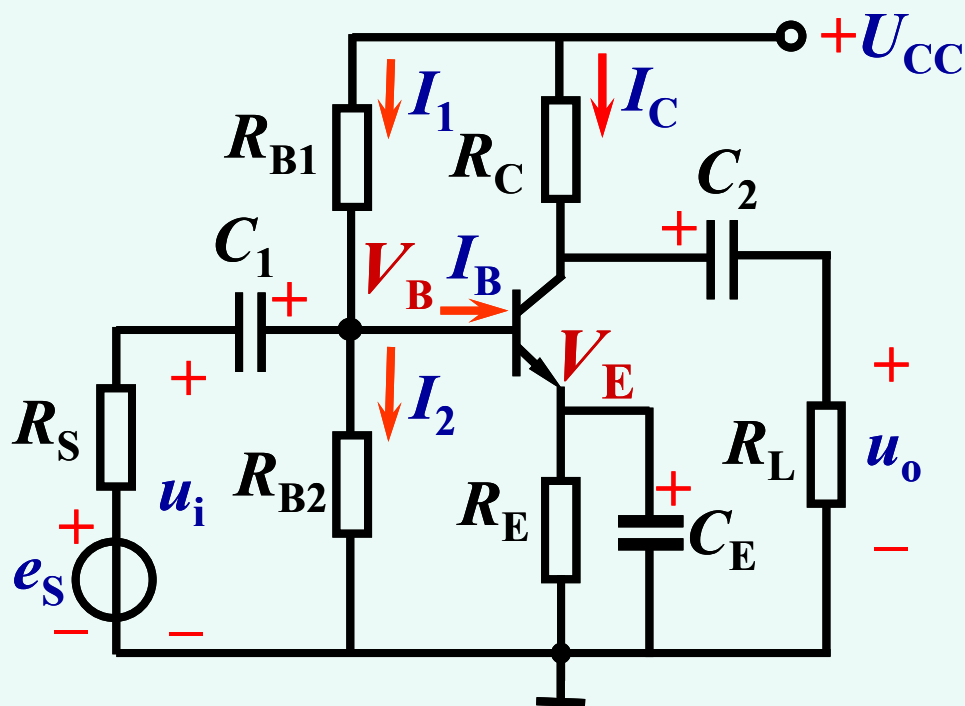
$R_E$ : 反馈电阻

旁路电容  $C_E$  的作用：  
交流通路中， $C_E$  将  $R_E$  短路， $R_E$  对交流不起作用，使放大倍数不受影响。



# 分压式偏置电路-静态工作点稳定电路

## 稳定Q点的原理



基极电位  $V_B$  和集电极电流  $I_C$  与三极管的参数无关，不受温度的影响。

若满足：  $I_1 \gg I_B$

$$I_1 \approx I_2 \approx \frac{U_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

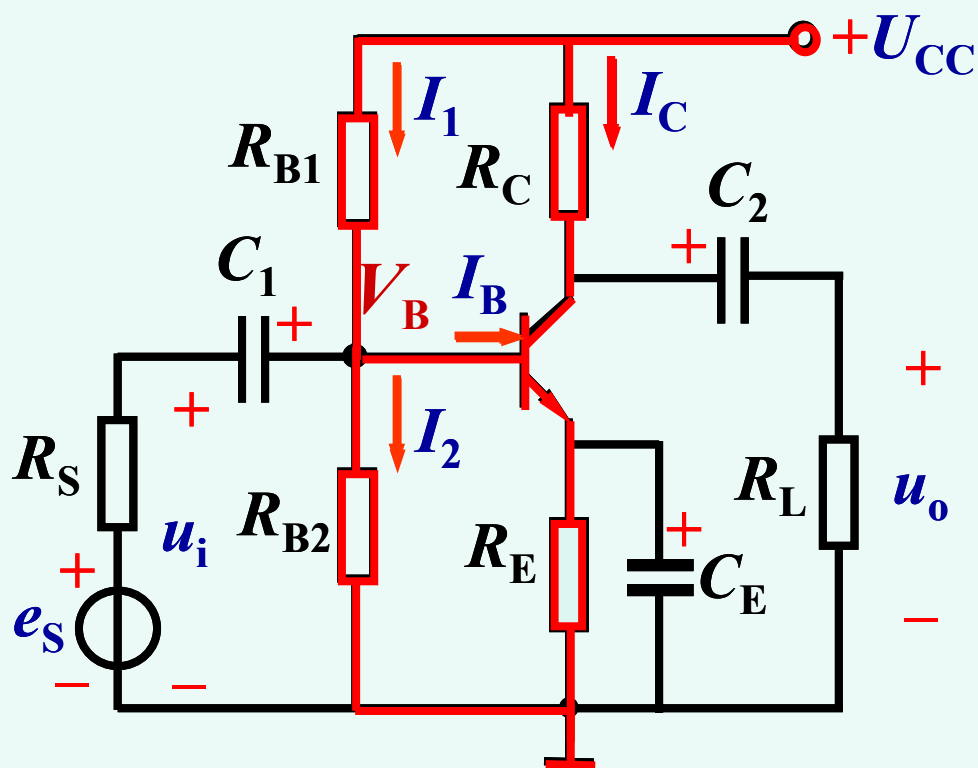
$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

若满足：  $V_B \gg U_{BE}$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B}{R_E}$$

## 2. 静态工作点的计算

估算法：



$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

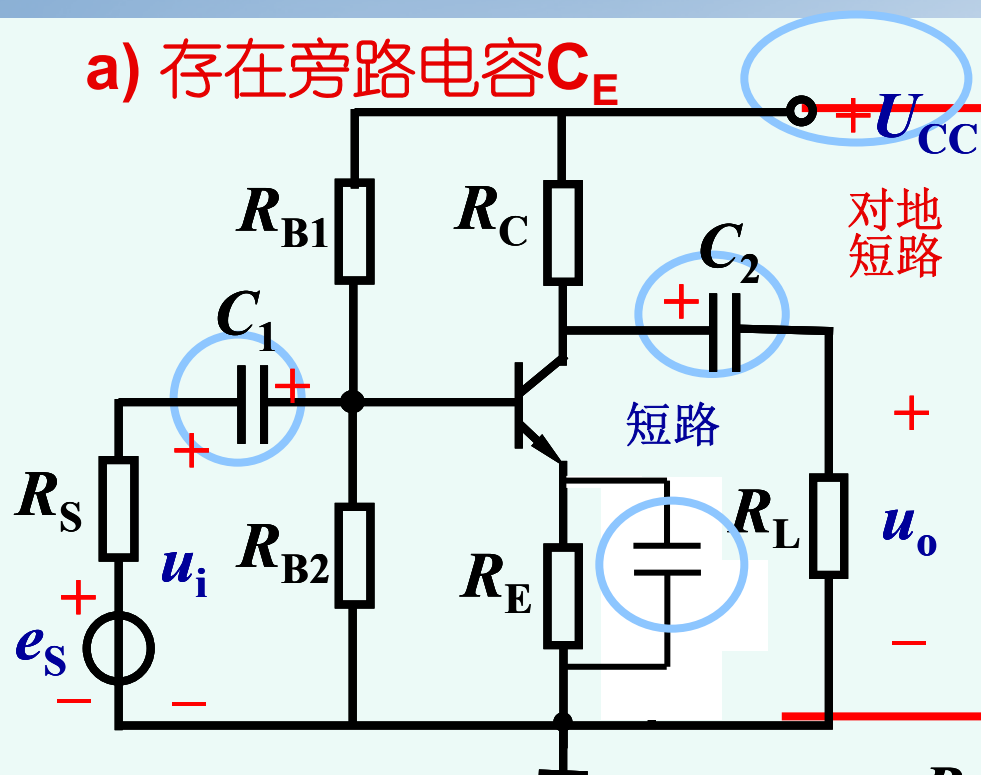
$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

$$I_B \approx \frac{I_C}{\beta}$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \\ &= U_{CC} - I_C (R_C + R_E) \end{aligned}$$

### 3. 动态分析

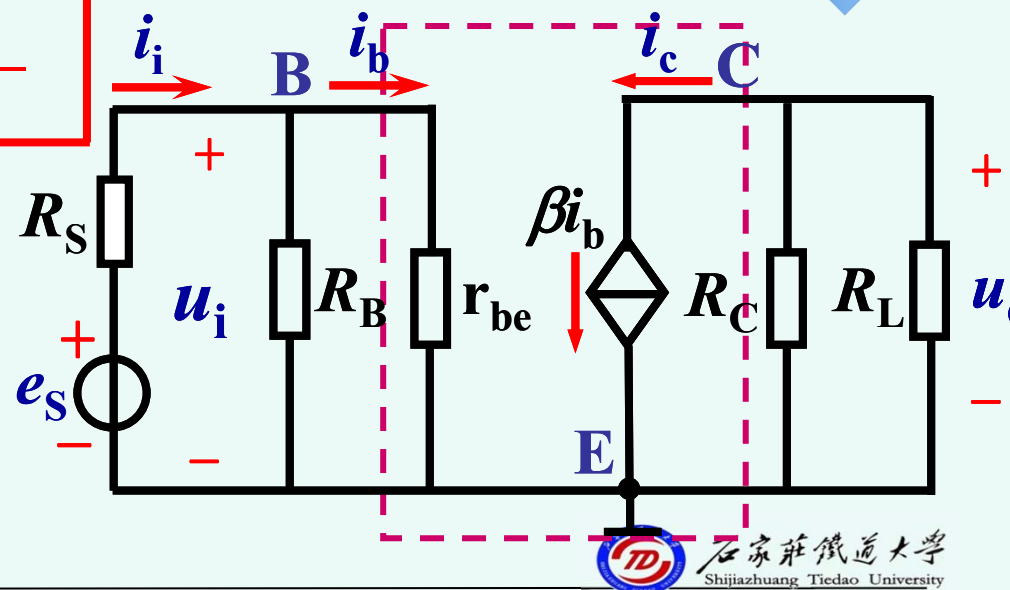
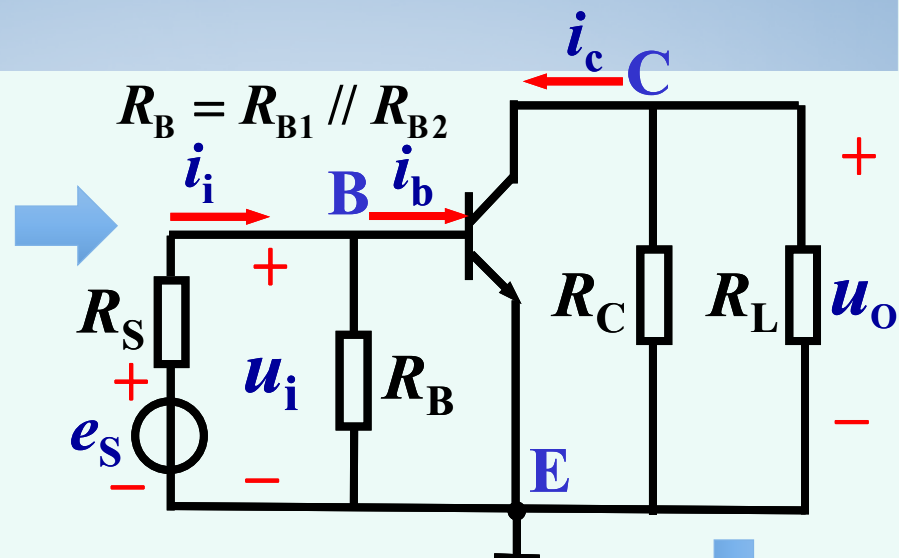
#### a) 存在旁路电容 $C_E$



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

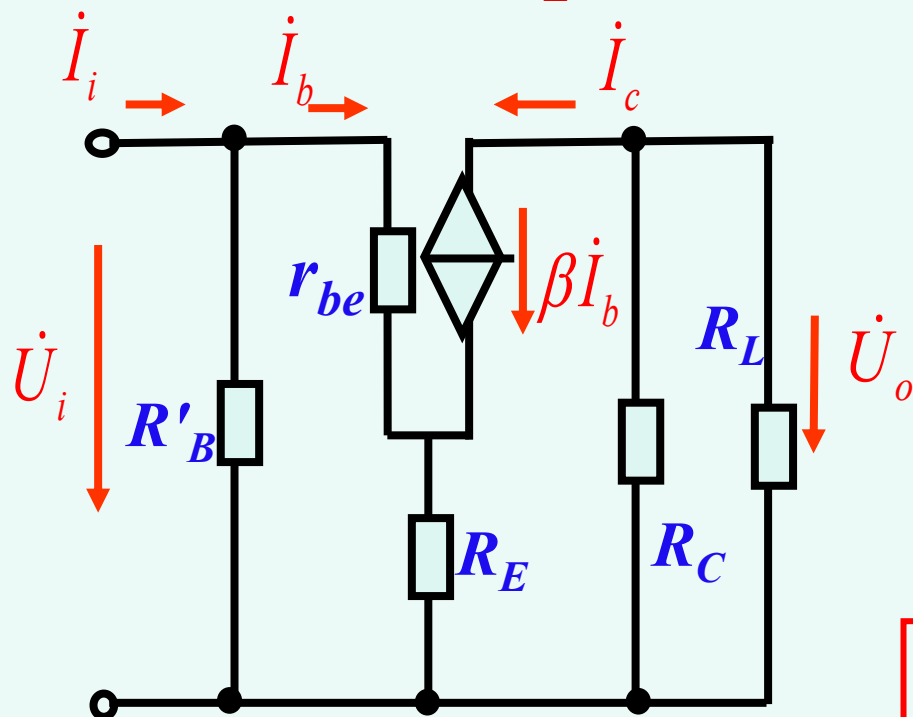
$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = R_C$$



### 3. 动态分析

#### b) 去掉旁路电容 $C_E$ 的微变等效电路



将 $R_E$ 折算到基极

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E$$

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R'_B // \{r_{be} + (1 + \beta) R_E\}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = R_C$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



## 分压式偏置电路

有旁路电容  $C_E$

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$r_i = R_B // r_{be}$$

$$r_o = R_C$$

无旁路电容  $C_E$

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

$A_u$  减小

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R_E]$$

$r_i$  提高

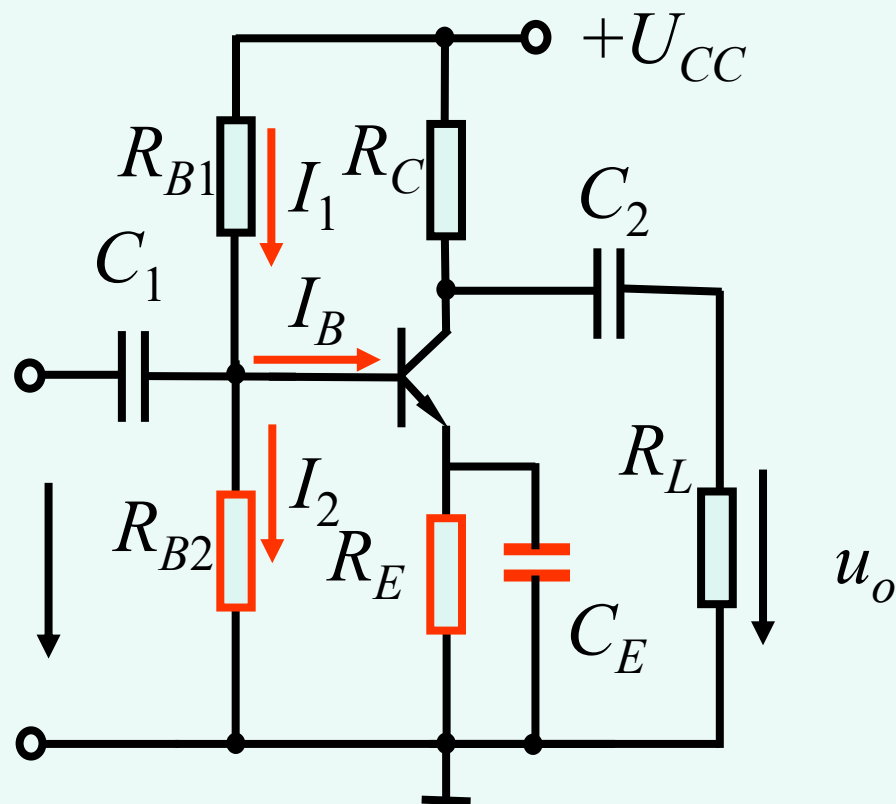
$$r_o = R_C$$

$r_o$  不变

## 分压式偏置电路-例题

例：已知 $R_{B1}=15k\Omega$ ,  $R_{B2}=5k\Omega$ ,  $R_E=1k\Omega$ ,  $R_L=R_C=2k\Omega$ ,  $V_{CC}=12V$ ,  $\beta=60$ 。

- (1) 求放大电路的静态工作点
- (2) 求电压放大倍数和输入输出电阻
- (3)  $C_E$ 开路时对放大电路会产生什么影响



## 分压式偏置电路-例题

例：已知 $R_{B1}=15k\Omega$ ,  $R_{B2}=5k\Omega$ ,  $R_E=1k\Omega$ ,  $R_L=R_C=2k\Omega$ ,  $V_{CC}=12V$ ,  $\beta=60$ 。

### (1) 求放大电路的静态工作点

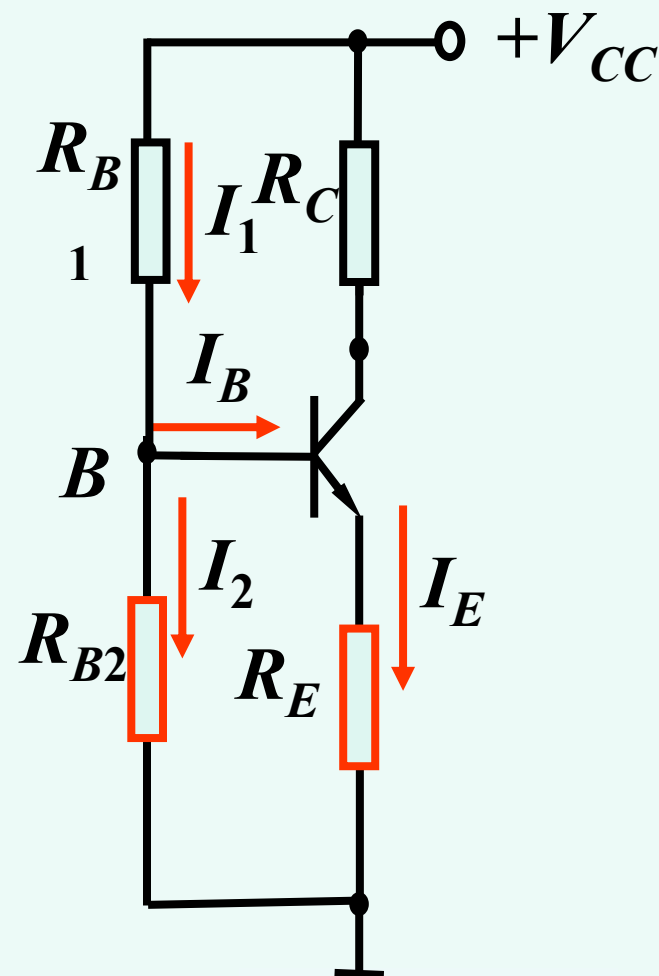
解： (1) 估算静态值

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{5 \times 12}{15 + 5} = 3V$$

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3 - 0.7}{1} = 2.3mA$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \\ &= 12 - 2.3 \times 3 = 5.1V \end{aligned}$$

$$I_B \approx \frac{I_C}{\beta} = \frac{2.3}{60} = 38\mu A$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 分压式偏置电路-例题

例：已知 $R_{B1}=15k\Omega$ ,  $R_{B2}=5k\Omega$ ,  $R_E=1k\Omega$ ,  $R_L=R_C=2k\Omega$ ,  $V_{CC}=12V$ ,  $\beta=60$ 。

(2) 求电压放大倍数和输入输出电阻

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}}$$

$$= 300 + 61 \times \frac{26}{2.3} = 990\Omega$$

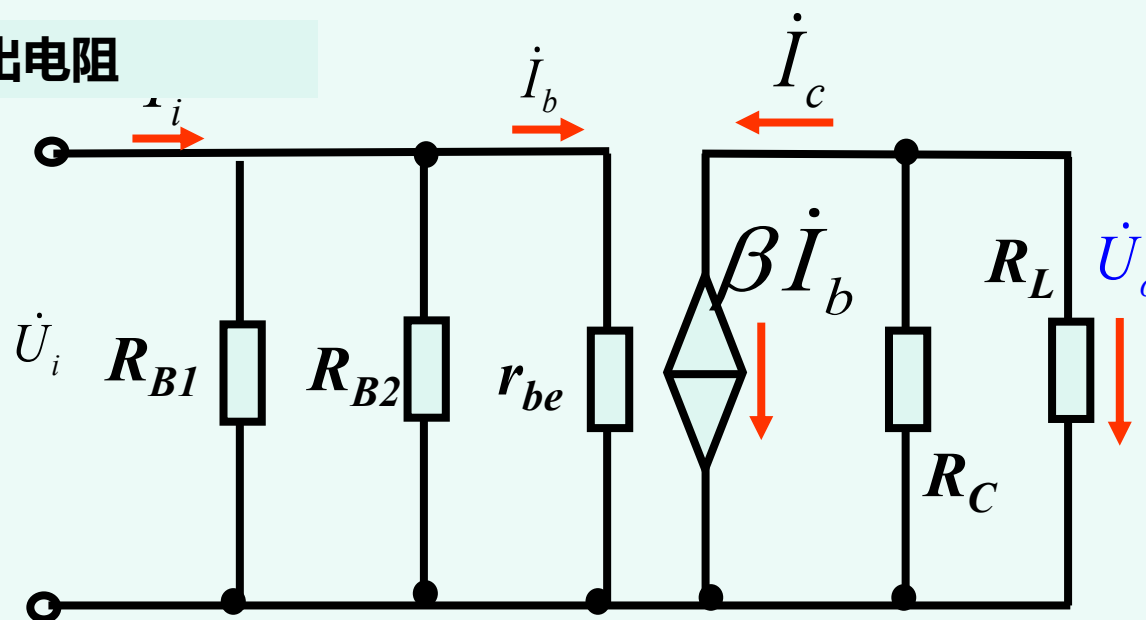
$$R'_L = \frac{R_L \times R_C}{R_L + R_C} = 1k\Omega$$

$$\therefore A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -60.6$$

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$= 15 // 5 // 0.99k\Omega = 783\Omega$$

$$R_o = R_C = 2k\Omega$$



微变等效电路图

## 分压式偏置电路-例题

例：已知 $R_{B1}=15k\Omega$ ,  $R_{B2}=5k\Omega$ ,  $R_E=1k\Omega$ ,  $R_L=R_C=2k\Omega$ ,  $V_{CC}=12V$ ,  $\beta=60$ 。

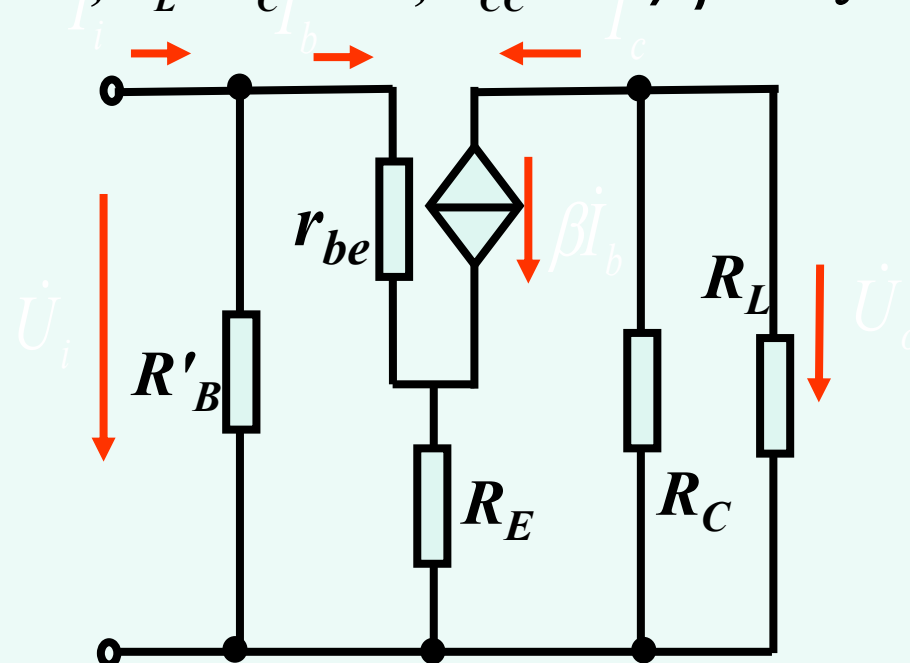
(3) 去掉  $C_E$  后的微变等效电路

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} = -0.97$$

将 $R_E$ 折算到基极

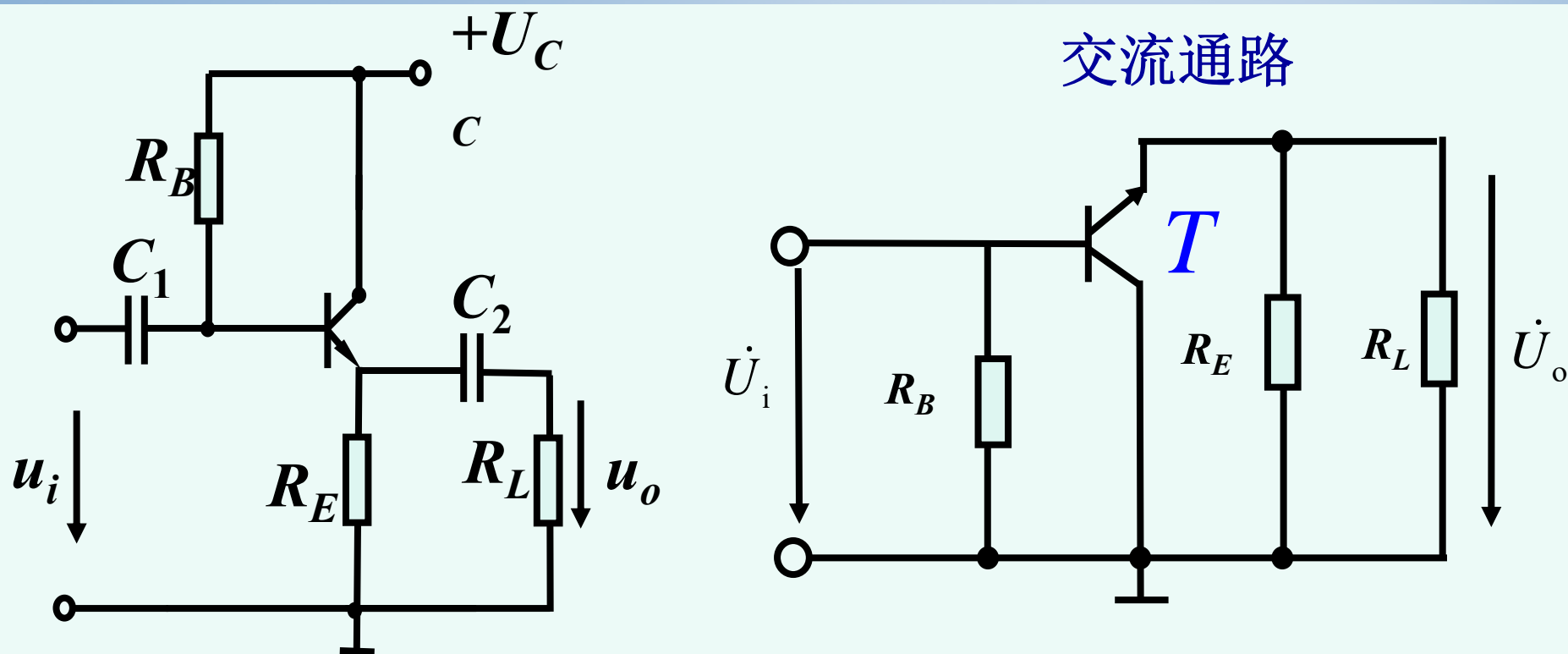
$$R_i = R'_B // \{r_{be} + (1 + \beta)R_E\} = 3.53k\Omega$$

$$R_o = R_C = 2k\Omega$$



去掉旁路电容，输入电阻由783欧增大为3530欧，电压放大倍数由60.6减小为0.97

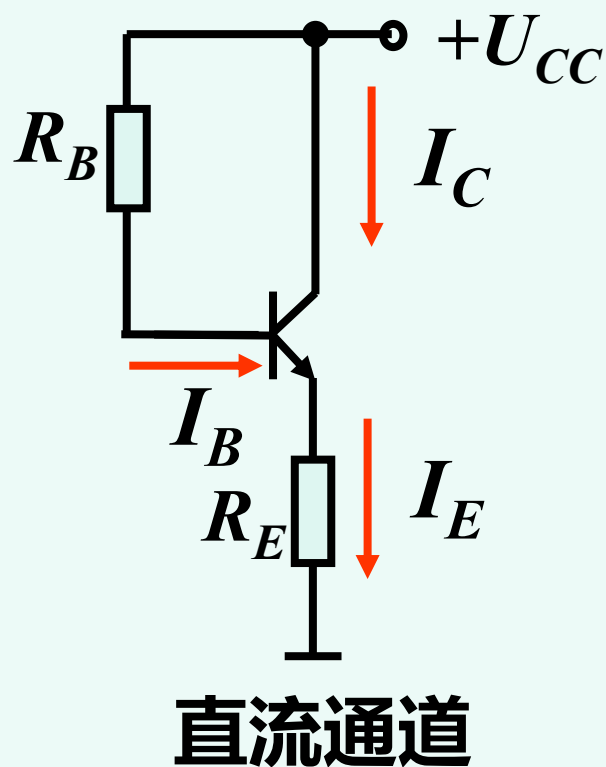
### 三、共集电极放大电路



由交流通路可知，集电极是输入与输出回路的公共端，所以称为**共集电极放大电路**。

因从输出信号从发射极输出，所以又称射极输出器。

# 1、静态工作点的计算



$$U_{CC} = I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta) I_B R_E$$

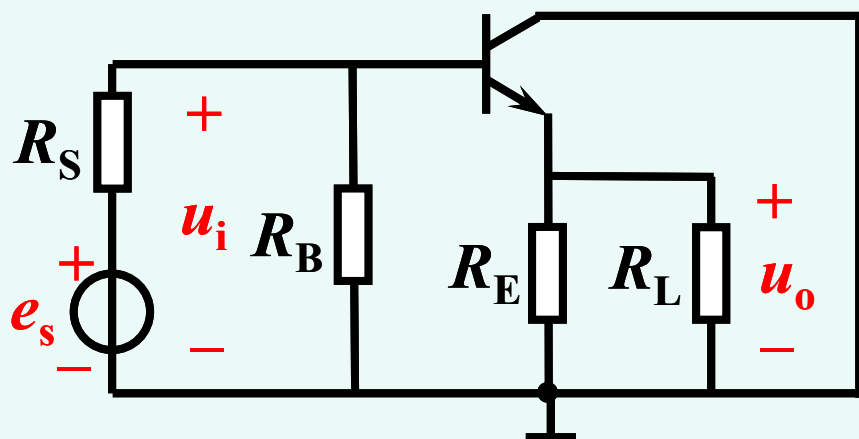
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_E$$

## 2、动态分析

由交流通路画出微变等效电路，如下图所示。



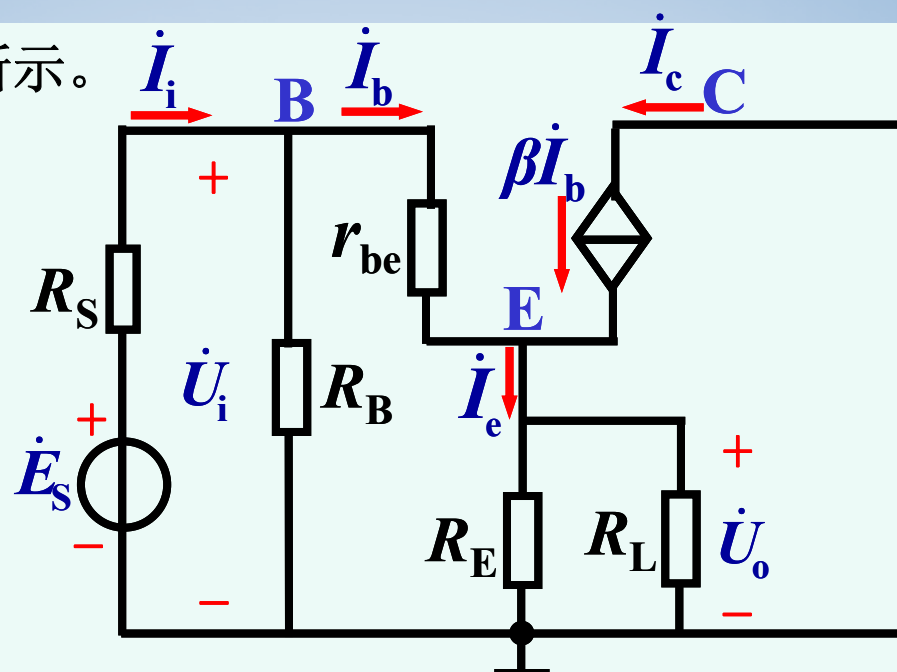
交流通路

(1) 电压放大倍数  $R'_L = R_E // R_L$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R'_L = (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$



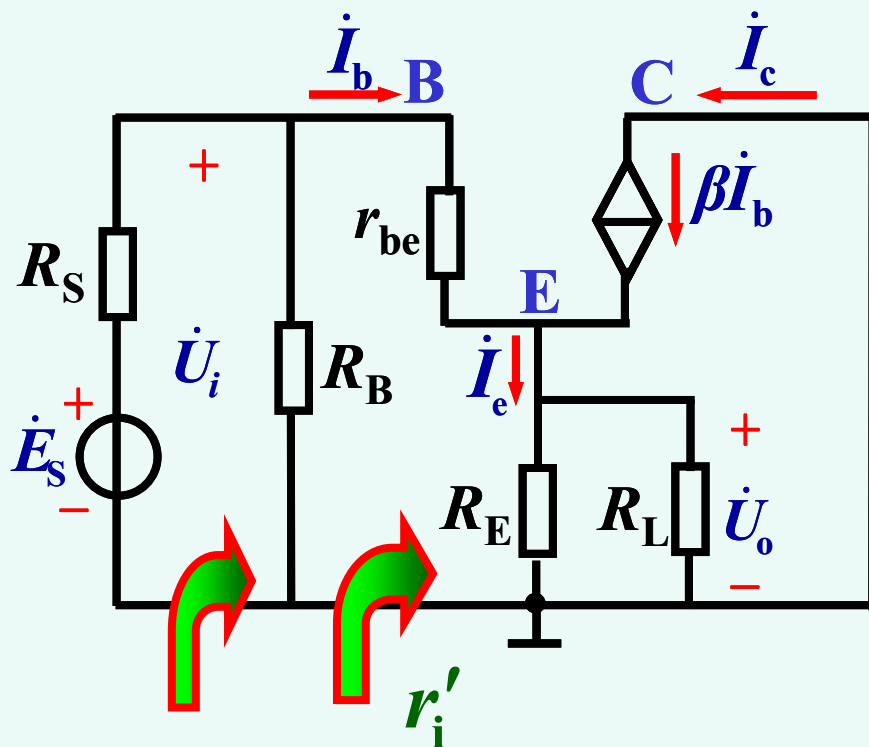
微变等效电路

$$r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$$

电压放大倍数  $A_u \approx 1$  且输入输出同相，输出电压跟随输入电压，故称电压跟随器。



## (2) 输入电阻



$$R'_L = R_E // R_L$$

$$r_i = R_B // r'_i$$

$$r'_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = \frac{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L}{\dot{I}_b}$$

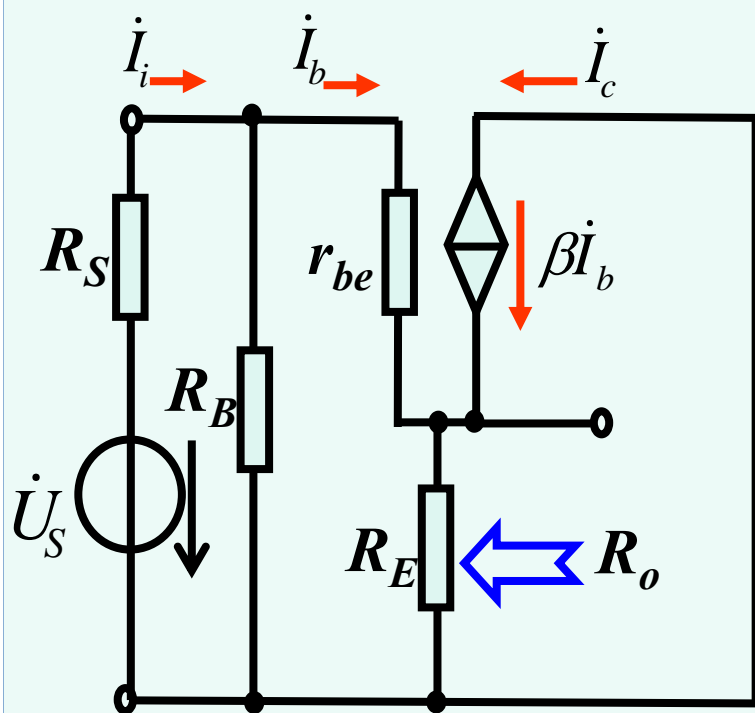
$$= r_{be} + (1 + \beta) R'_L$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

输入电阻较大，从而输入电压更接近信号电压，对信号电压的衰减小。

### (3) 输出电阻

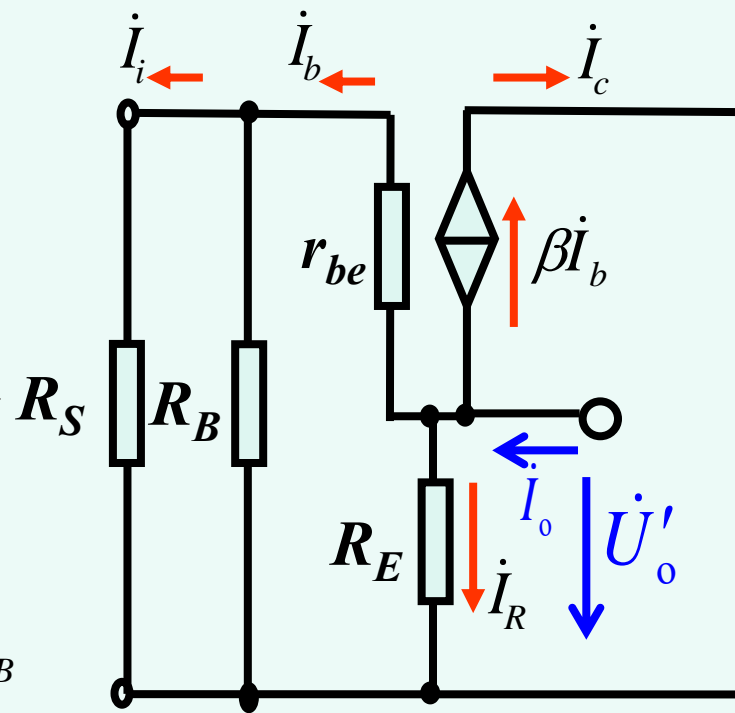
用加压求流法求输出电阻。



电源置0

设：

$$R'_s = R_s // R_B$$



$$\begin{aligned} \dot{I}_O &= \dot{I}_e + \dot{I}_R = \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b + \dot{I}_R = \dot{I}_b (1 + \beta) + \dot{I}_R \\ &= \frac{\dot{U}_o}{r_{be} + R'_s} (1 + \beta) + \frac{\dot{U}_o}{R_E} \quad \because R_E \gg \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \end{aligned}$$

$$R_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} = \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} // R_E$$

$$\therefore R_0 \approx \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

射极输出器的输出电阻很小，带负载能力强。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 3. 共集电极电路的特点和应用

共集电极电路的特点是：

1. 输入电阻大

2. 输出电阻小

3. 输出电压与输入电压近似相等，相位相同

$$R_0 = \frac{r_{be} + R'_S}{1 + \beta} // R_E$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

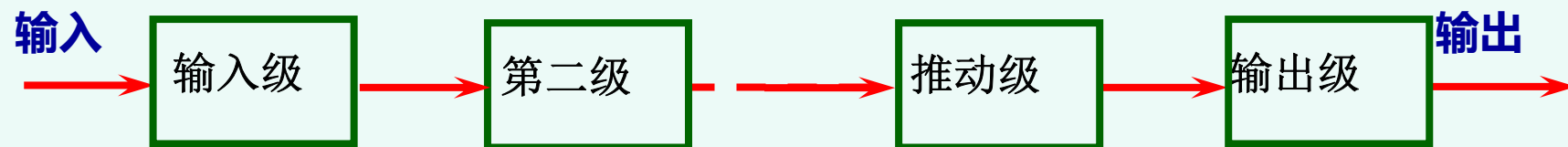
射极输出器的应用

1. 将射极输出器放在电路的首级，可以提高输入电阻，  
减轻信号源负担。
2. 将射极输出器放在电路的末级，可以降低输出电阻，  
提高带负载能力。
3. 将射极输出器放在电路的两级之间，可以起到电路的  
阻抗匹配作用，这一级射极输出器称为缓冲级或中间  
隔离级。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 四、多级放大电路及耦合方式



多级放大电路的框图

### 1. 耦合方式

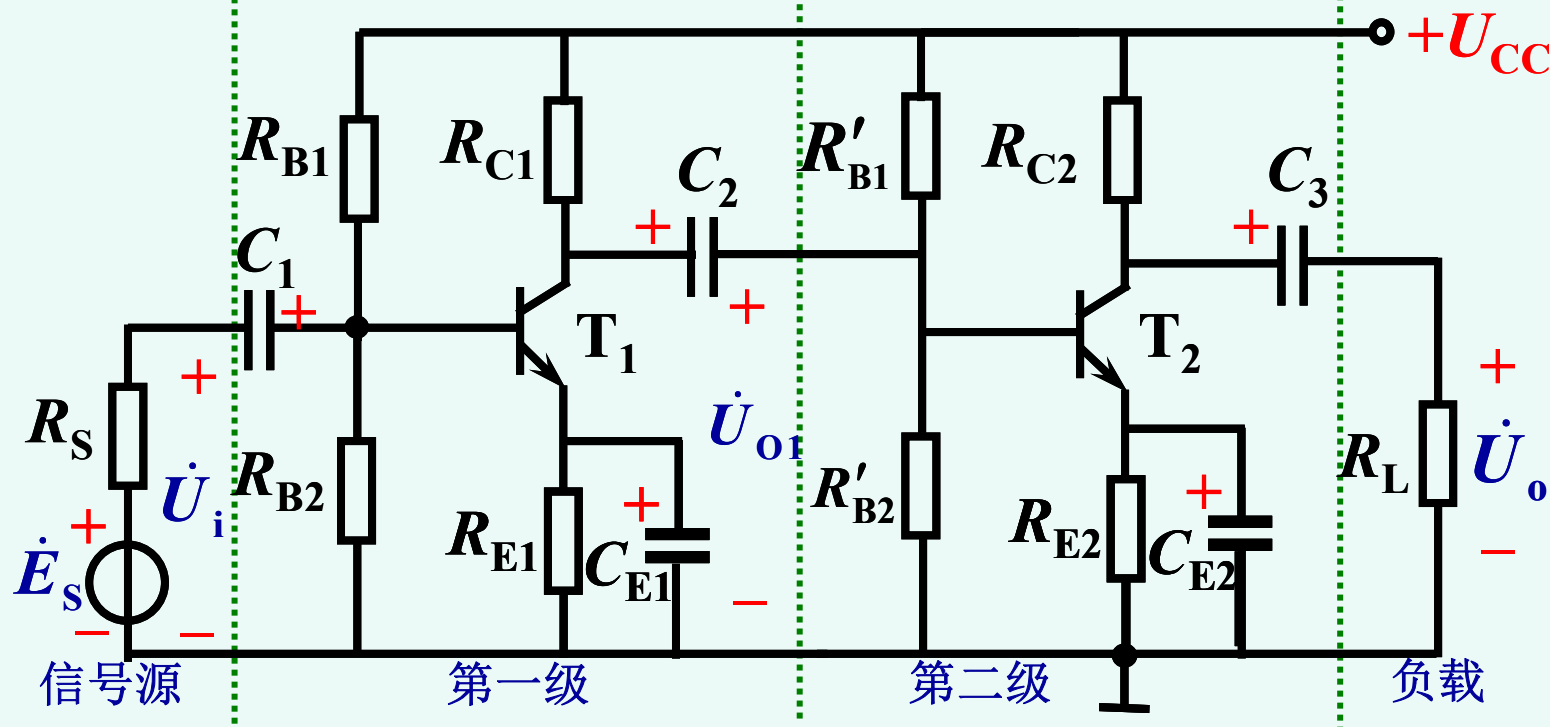
信号源与放大电路之间、两级放大电路之间、放大器与负载之间的连接方式。

常用耦合方式：**直接耦合、阻容耦合和变压器耦合。**

对耦合电路的要求 { 静态：保证各级有合适的  $Q$  点  
动态：传送信号 { 波形不失真  
减少压降损失

## (一) 阻容耦合

在多级放大电路中，级与级之间通过电容和电阻相连接的方式，称为阻容耦合。



特点：各级的静态工作点互不影响, 便于静态值的分析、设计和调试。

缺点：信号频率低时，电容容抗较大，使信号衰减，放大倍数下降。  
在集成电路中由于难以制造大容量的电容器, 所以也不适于集成化。



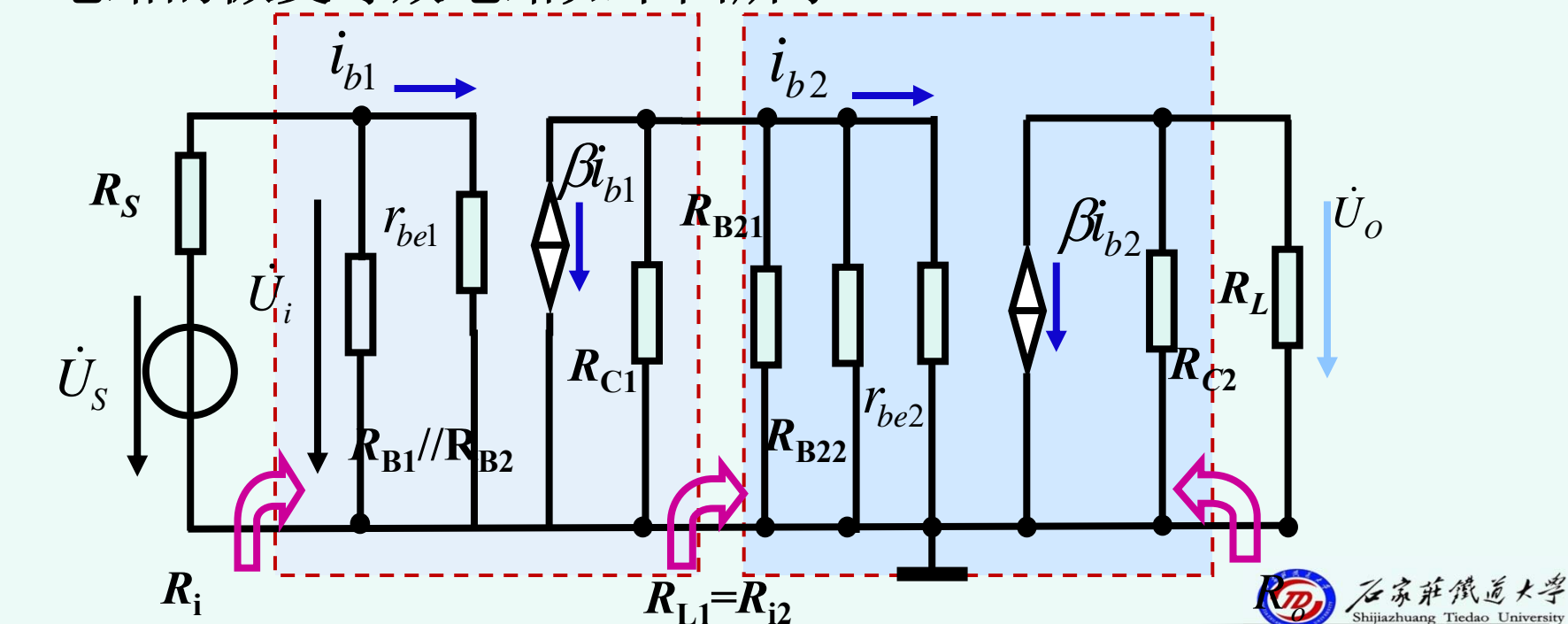
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 1.静态分析

由于电容器的隔直作用，各级的静态工作点互不影响，所以可以由各级的直流通路分别计算静态工作点。

## 2.动态分析

以前面的图为例，讨论多级放大电路的动态指标。该电路的微变等效电路如下图所示。



关键:考虑级间影响。

## (1) 总的电压放大倍数

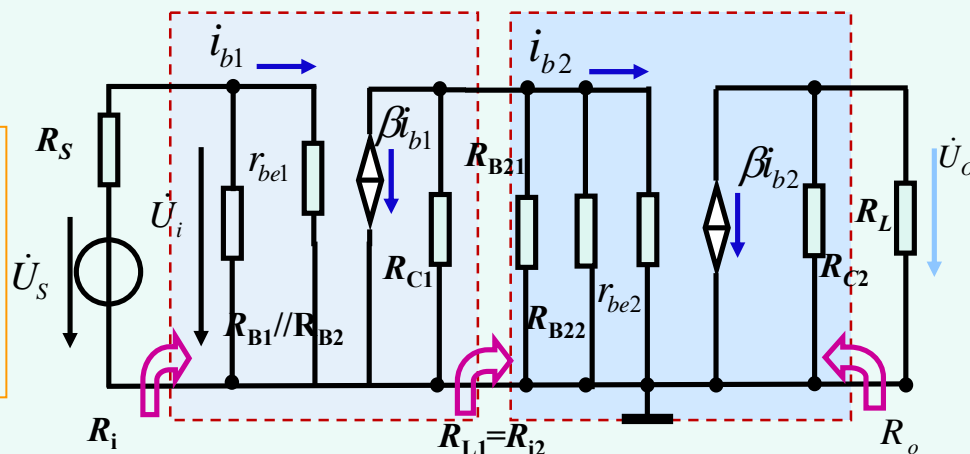
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{01}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_{01}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

第一级的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta_1(R_{C1} // R_{i2})}{r_{be1}}$$

第二级的电压放大倍数为

$$\dot{A}_{u2} = -\frac{\beta_2(R_{C2} // R_L)}{r_{be2}}$$



$R_{i2}$  是第二级的输入电阻

$$R_{i2} = R_{B21} // R_{B22} // r_{be2}$$

后一级的输入电阻为前一级的负载电阻



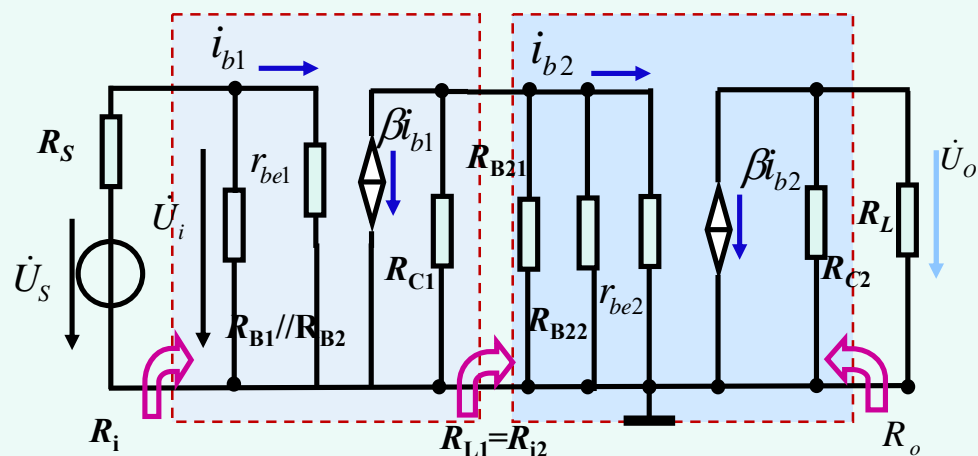
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## (2) 输入电阻和输出电阻

多级放大电路的输入电阻 $R_i$ 就是第一级的输入电阻。输出电阻 $R_o$ 就是最后一级的输出电阻。

$$R_i = R_{B1} // r_{be1}$$

$$R_o = R_{C2}$$



说明：计算多级放大电路的  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$ 、 $R_o$  可以画出整个电路的微变等效电路计算；也可以将多级放大电路分解为单级放大电路，将后级的输入电阻作为前级的负载电阻，分别画出每一级的微变等效电路计算。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University



## (二) 直接耦合

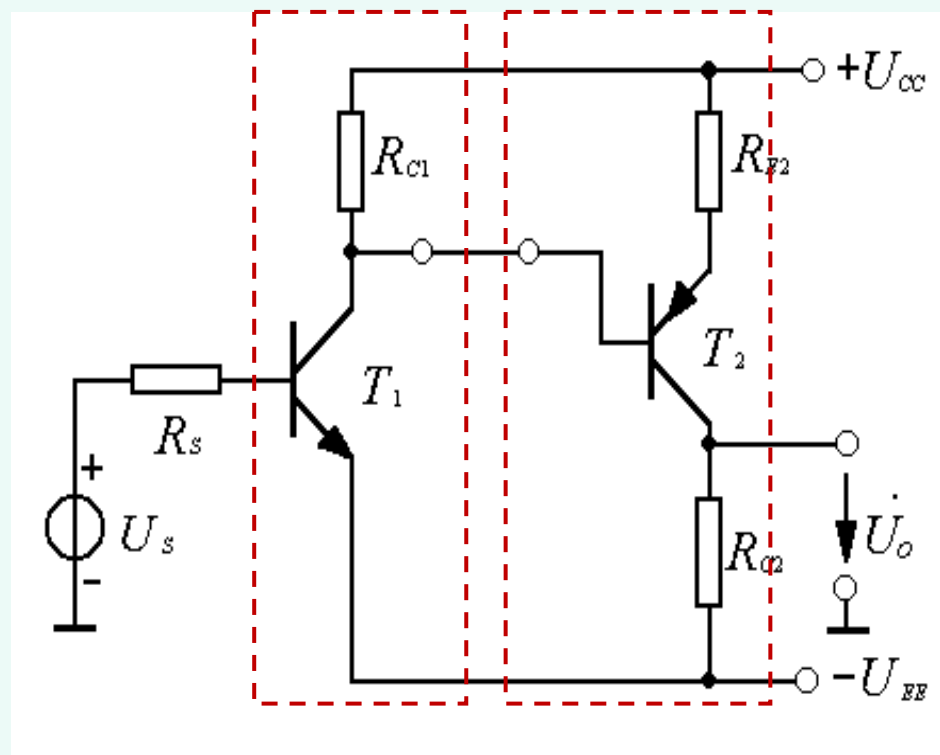
**直接耦合：**将前级的输出端直接通过电阻或导线连接到下一级的输入端的连接方式。

第一级：NPN管共发射极电路

第二级：PNP管共发射极电路

直接耦合的优点：

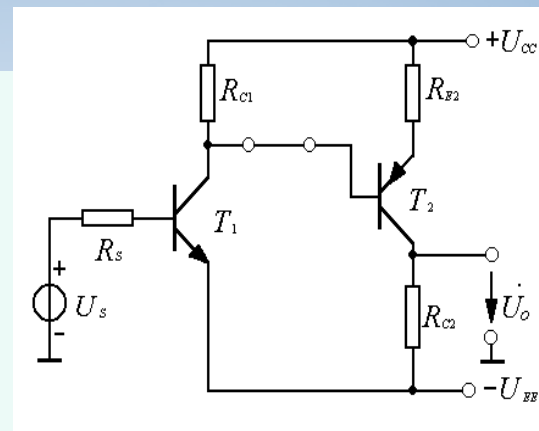
由于没有隔直电容，  
所以直接耦合放大电路能放大缓慢变化的信号，也适于集成化。



## 直接耦合放大电路的两个问题：

**问题 1：**各级的静态工作点互相影响。

**问题 2：**零点漂移。



**零点漂移（简称零漂）：**是指输入信号为零时，输出电压偏离静态值随时间和温度出现忽大忽小的不规则变化。

➤产生零漂的原因：

- ① 元件参数的老化
- ② 电源电压的波动
- ③ 三极管的参数随温度的变化

➤减小零漂的措施：

- ① 对元器件进行老化处理和筛选
- ② 高稳定度的稳压电源
- ③ 采用差动式放大电路

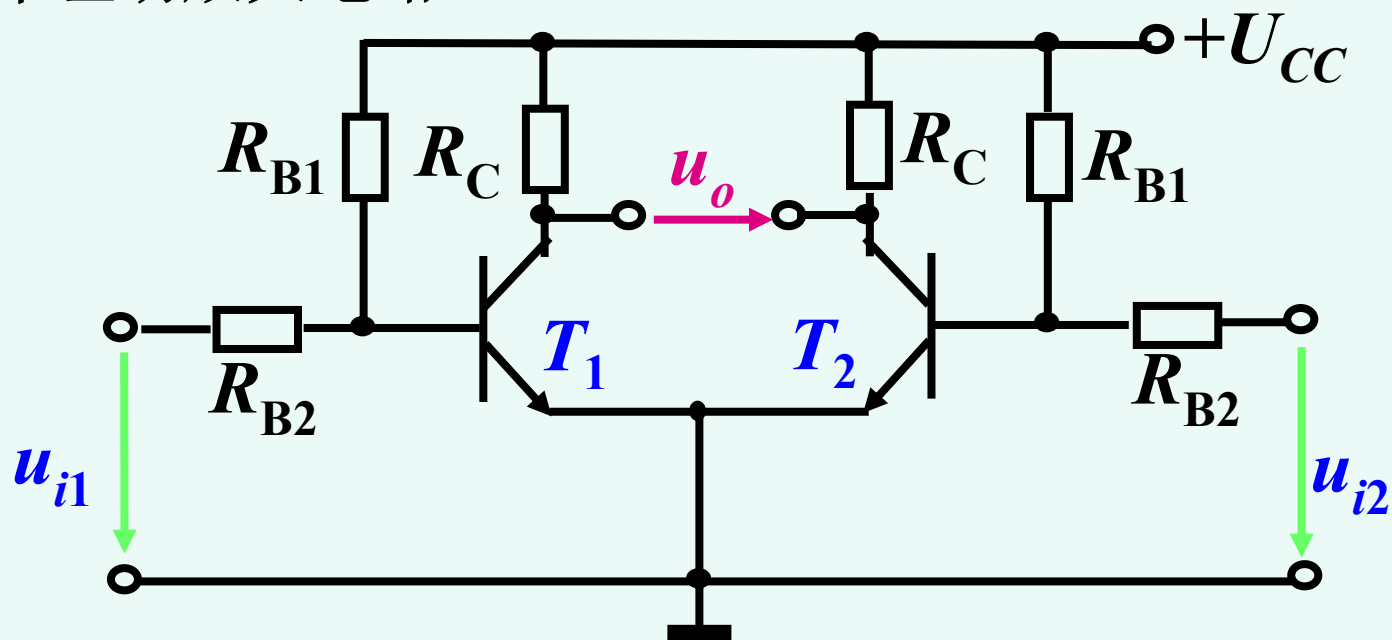
放大倍数越高，零点漂移越大，影响输出电压。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 五、差动放大电路

### 基本差动放大电路



由两个左右**完全对称**的单管共射放大电路组成。

**双端输入双端输出**

- 三极管 $T_1$ ,  $T_2$ 的特性相同
- 集电极和基极对应的电阻也相等

# 1. 工作原理

(1) 静态时,  $u_{i1}=u_{i2}=0$ , 即输入端接地。

$$u_o = V_{C1} - V_{C2} = 0$$

(2) 动态分析, 加**共模输入信号**, 即  $u_{i1} = u_{i2} = u_c$ 。

共模输入信号: 两输入端的信号电压大小相等, 极性相同

共模电压放大倍数:  $\boxed{A_{uc} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_c}} \longrightarrow A_{uc} = 0$

**结论:** 在完全对称的理想情况下, 电路对共模信号没有放大能力。

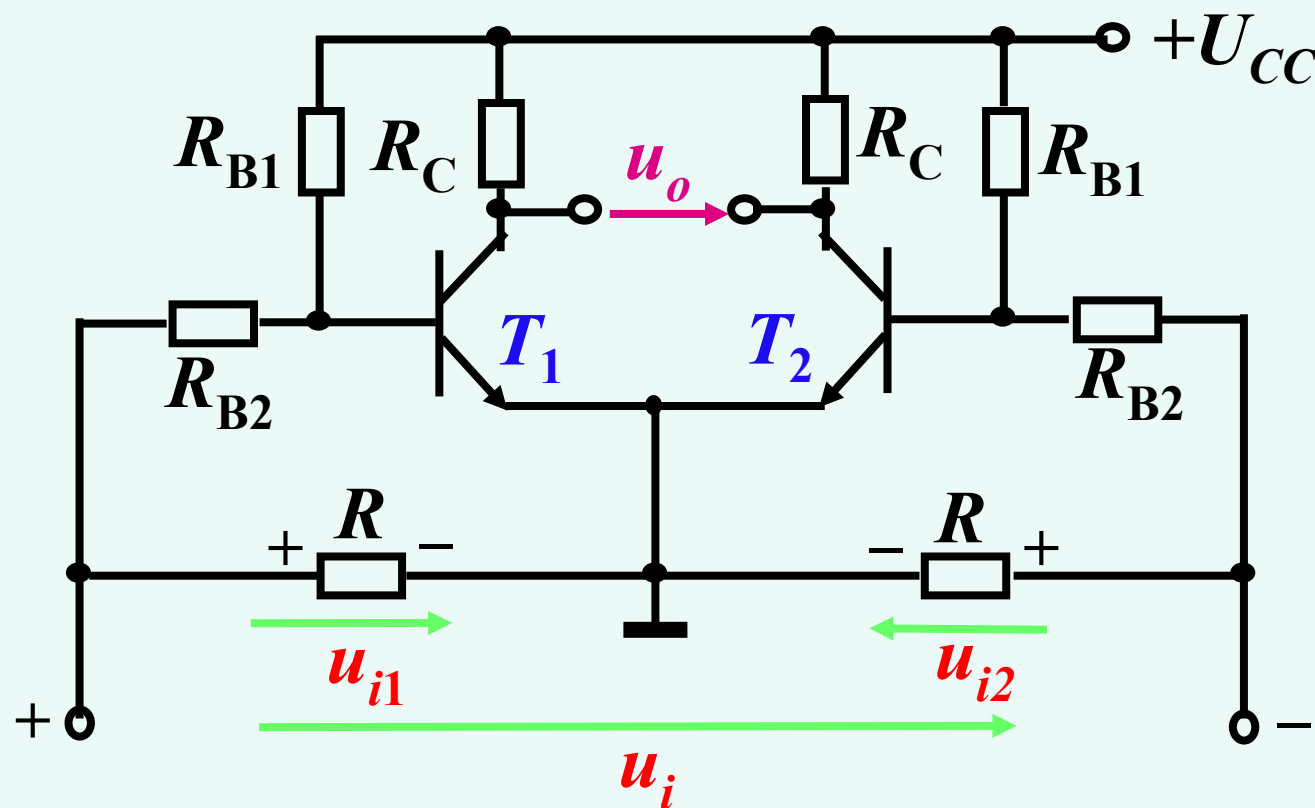
温度的变化或外界干扰信号, 对于差分放大电路都可以等效为共模信号, **因此差分放大电路对它们有很强抑制能力**。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 1. 工作原理

(3) 加差模输入信号，信号大小相等，极性相反，即  $u_{i1} = -u_{i2}$



$$u_{i1} = \frac{1}{2}u_i \quad u_{i2} = -\frac{1}{2}u_i \quad A_{u1} = A_{u2} = A_u$$



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

$$\left. \begin{aligned} u_{i1} &= \frac{1}{2}u_i \\ u_{i2} &= -\frac{1}{2}u_i \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\quad} \left. \begin{aligned} \Delta U_{C1} &= A_{u1}u_{i1} = \frac{1}{2}A_u u_i \\ \Delta U_{C2} &= A_{u2}u_{i2} = -\frac{1}{2}A_u u_i \end{aligned} \right\}$$

$A_{u1}=A_{u2}=A_u$

$$u_o = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2} = A_u u_i$$

$$A_{ud} = \frac{u_o}{u_i} = A_u$$

差模放大倍数

**结论：**差动放大电路对差模信号具有放大作用，其差模放大倍数等于单管共射放大电路的电压放大倍数。

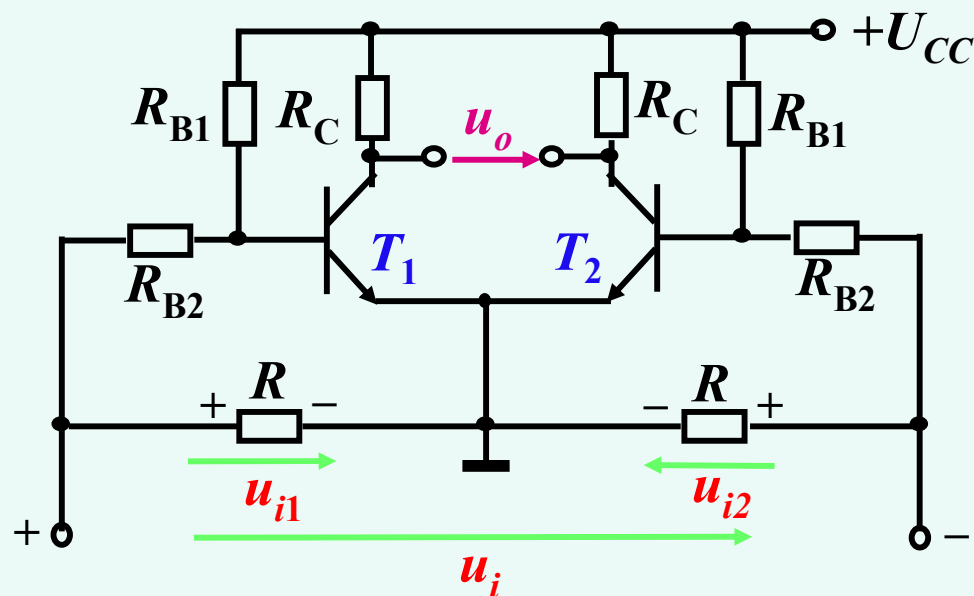


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 理想差动放大电路

共模电压放大倍数:  $A_{uc} = 0$

差模电压放大倍数:  $A_{ud} = A_u$



## 实际电路不会完全对称

$$\text{共模抑制比: } CMRR = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

CMRR越大，放大电路对共模信号的抑制能力，电路的性能越好



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

# 一、集成运算放大器简介

## 集成电路:

将整个电路的各个元件以及之间的连线做在同一个半导体基片上，构成特定功能的电子电路。

## 集成电路的优点:

体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、价格低。

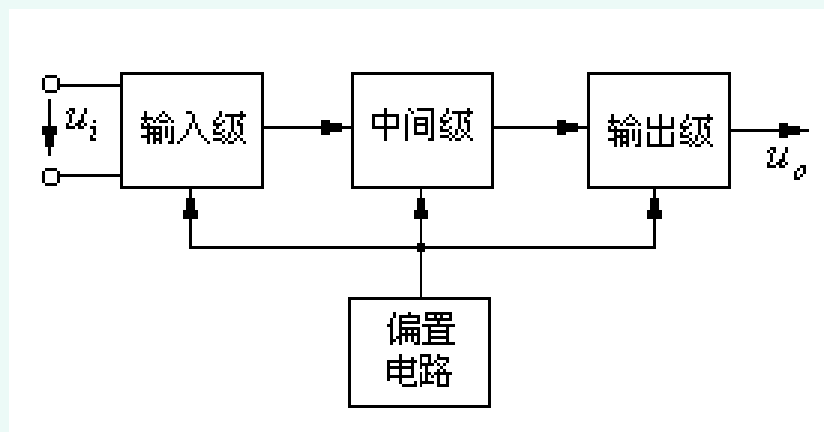
## 模拟集成电路的分类（作用）:

运算放大器、电压比较器、功率放大器、模拟乘法器、稳压器、数模\模数转器等



# 一、集成运算放大器简介

**集成运算放大器：**一种具有高放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、采用直接耦合的**多级放大电路**。



## 集成运放的特点:

**偏置电路**：为各级提供静态工作电流。

**输入级**：通常采用差动放大电路，以减小零点漂移和干扰，尽量提高 $K_{CMRR}$ ，输入电阻 $R_i$ 尽可能大。

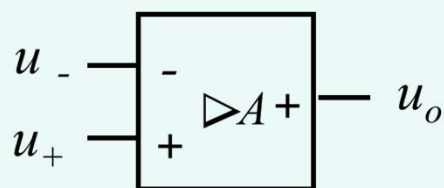
**中间级**：通常由共发射极电路组成，足够高的电压放大倍数

**输出级**：通常由共集电极电路构成的互补对称式电路组成。输出电阻 $R_o$ 小、输出功率大、且有过载保护功能

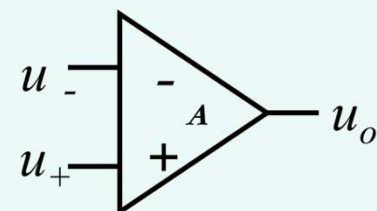
# 集成运放的符号

▷表示信号由输入到输出的传送方向；A表示放大器

集成运放简化符号

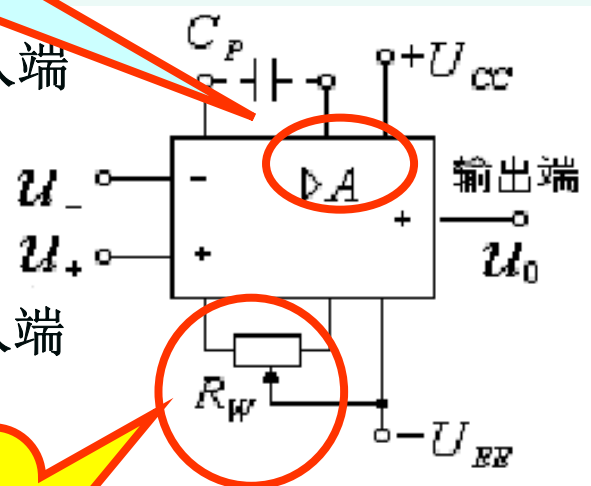


集成运放习惯画法



反相输入端

同相输入端



输入  $u_+$  与输出  $u_o$  同相

输入  $u_-$  与输出  $u_o$  反相

外接的调零电位器，调整它可实现零输入时零输出。

## 集成运放的特点:

### 运放的特点:

$r_i$  大: 几十  $k\Omega$  ~ 几百  $k\Omega$

$K_{CMRR}$  很大

$r_o$  小: 几十 ~ 几百  $\Omega$

$A_o$  很大:  $10^4$  ~  $10^7$



### 理想运放:

$r_i \rightarrow \infty$

$K_{CMRR} \rightarrow \infty$

$r_o \rightarrow 0$

$A_o \rightarrow \infty$

高放大倍数使输入信号变化范围小, 输出波形易失真,  
必须引入负反馈, 实现线性放大

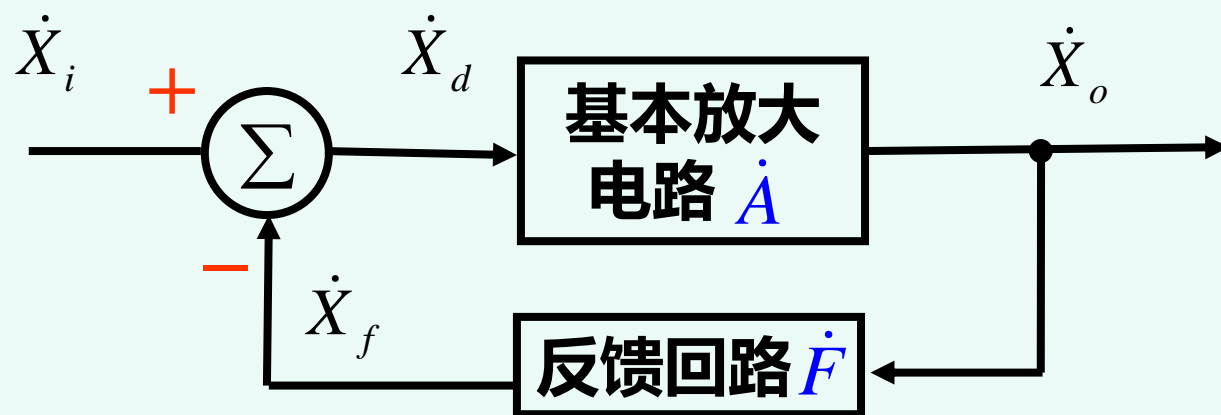
## 二、集成运放构成的负反馈放大电路

### (一) 反馈的基本概念

**反馈：**就是把放大电路输出信号（电压或电流）的一部分或全部，通过一定的元件或网络反送到放大电路的输入回路。

**反馈放大器或闭环放大器：**有反馈的放大器。

**基本放大器或开环放大器：**没有反馈的放大器。



放大:  $A_o = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d}$

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

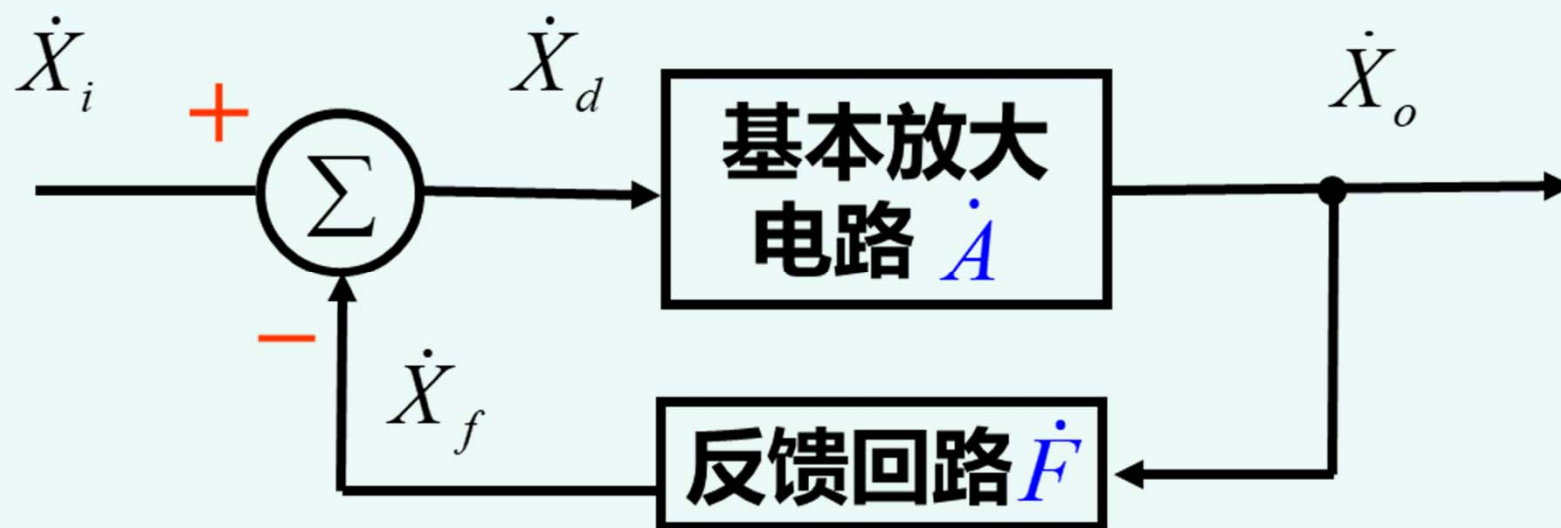
反馈放大器的方框图

## (二) 反馈的分类

### (1) 正反馈和负反馈

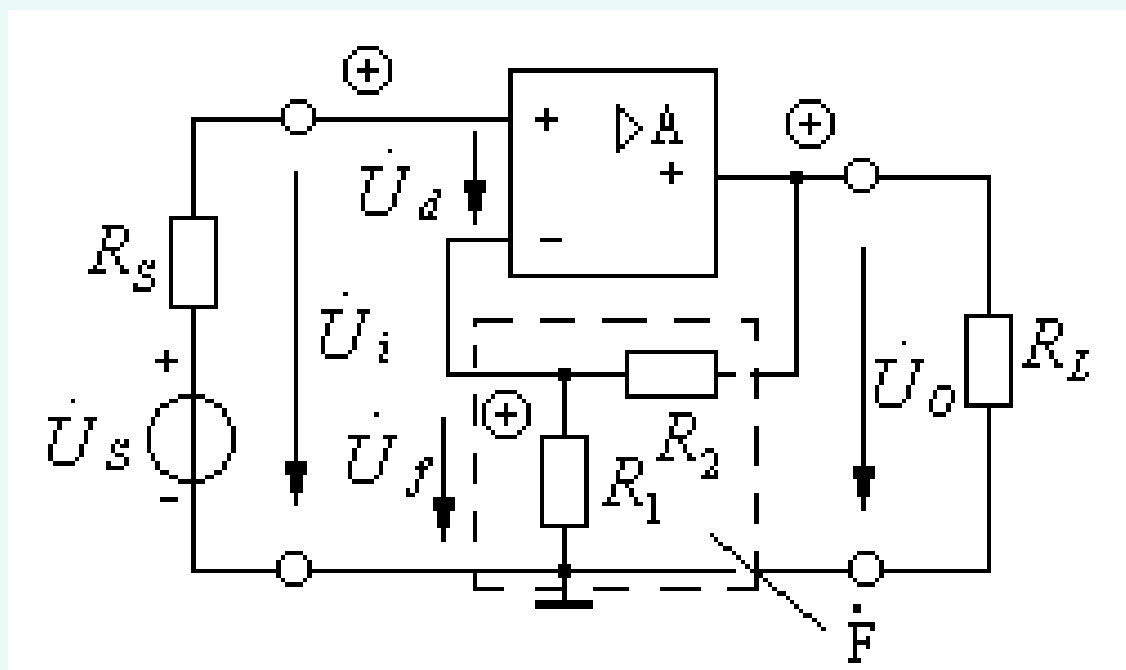
若引回的信号削弱了输入信号，就称为**负反馈**。

若引回的信号增强了输入信号，就称为**正反馈**。



## 区分正负反馈的方法：瞬时极性法

假设输入端信号为某一瞬时极性（+或-），然后逐级推出电路其他有关各点瞬时信号的变化情况，最后判断反馈到输入端的信号的瞬时极性是增强还是削弱了原来的信号。



**负反馈**

$$\dot{U}_i (\oplus) \longrightarrow \dot{U}_o (\oplus) \longrightarrow \dot{U}_f (\oplus) \longrightarrow |\dot{U}_d| < |\dot{U}_i|$$

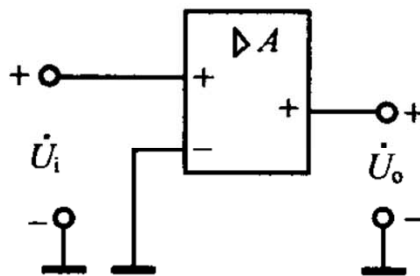


石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## (2) 交流反馈和直流反馈

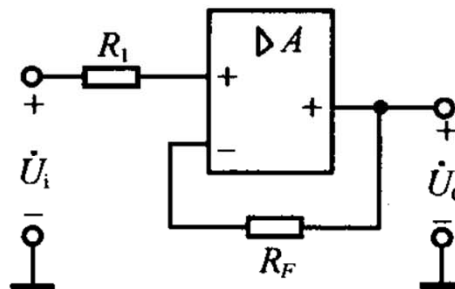
交流反馈：反馈只对交流信号起作用，改善放大器的动态性能。

直流反馈：反馈只对直流起作用，用于稳定静态工作点



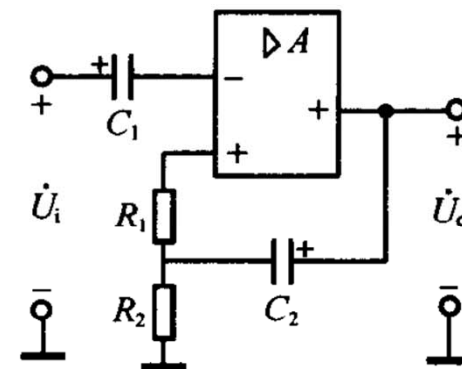
(a)

无反馈



(b)

交直流反馈

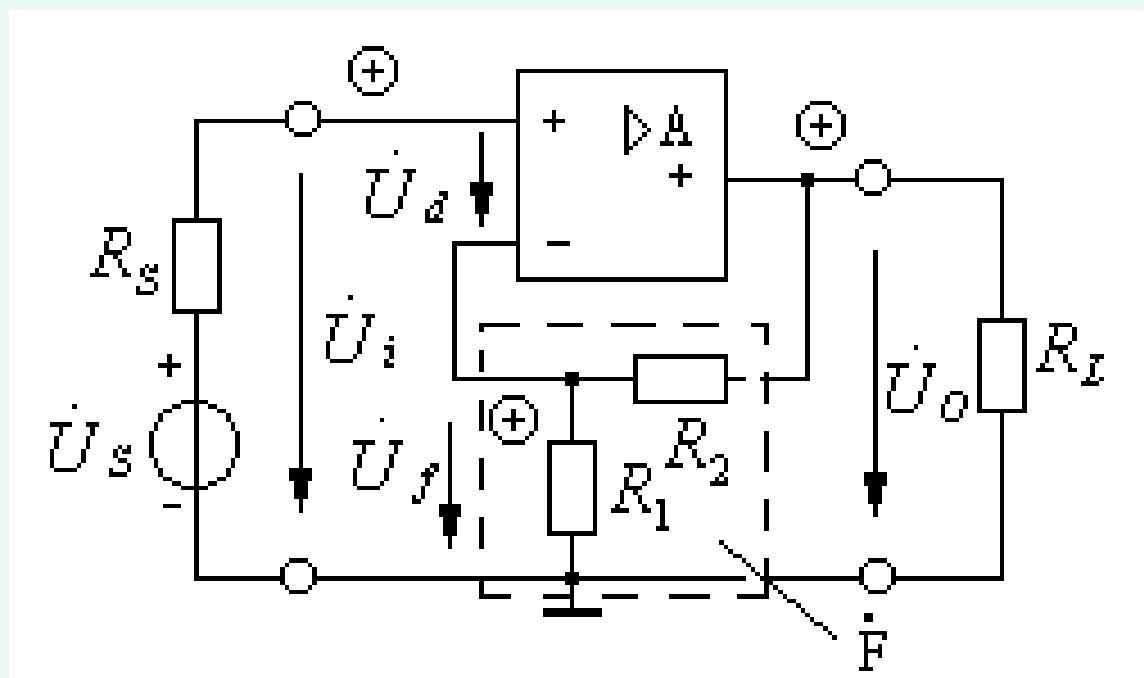


(c)

交流反馈



判断下图电路是交流？直流？交直流反馈？



交直流反馈同时存在

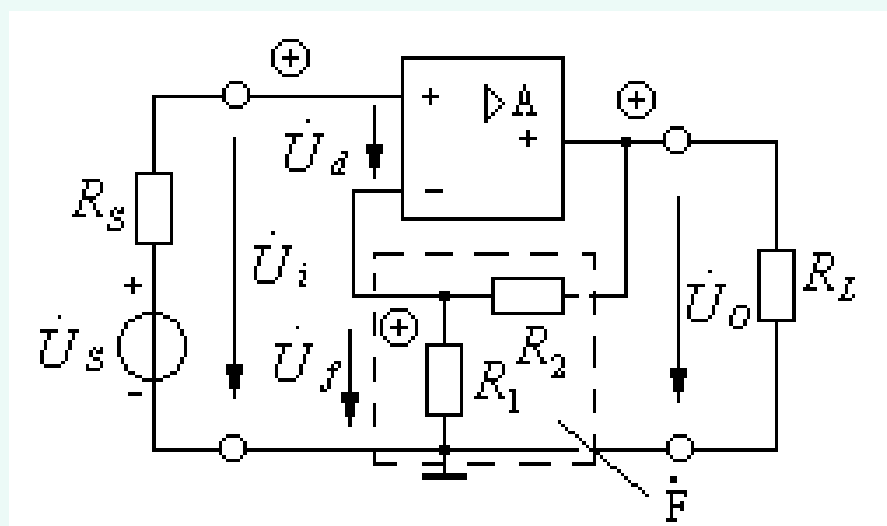
### (3) 电压反馈和电流反馈

电压反馈：反馈信号取自输出电压并与之成正比。

电流反馈：反馈信号取自输出电流并与之成正比。

判断电压反馈和电流反馈的方法：

可先假设输出端短接，若反馈信号消失则为电压反馈；  
若仍有反馈信号，则为电流反馈。

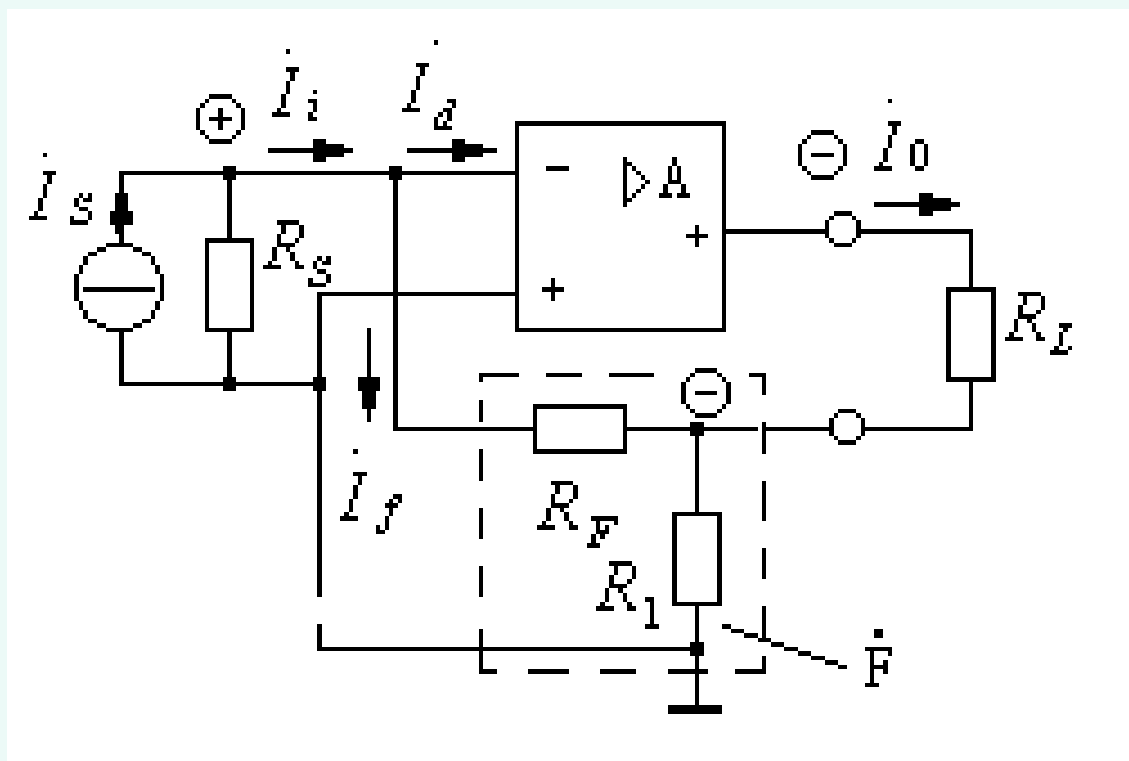


$$U_f = \frac{R_1}{R_2 + R_1} U_o$$

是电压反馈

### (3) 电压反馈和电流反馈

例:判断下图电路是电压反馈还是电流反馈?



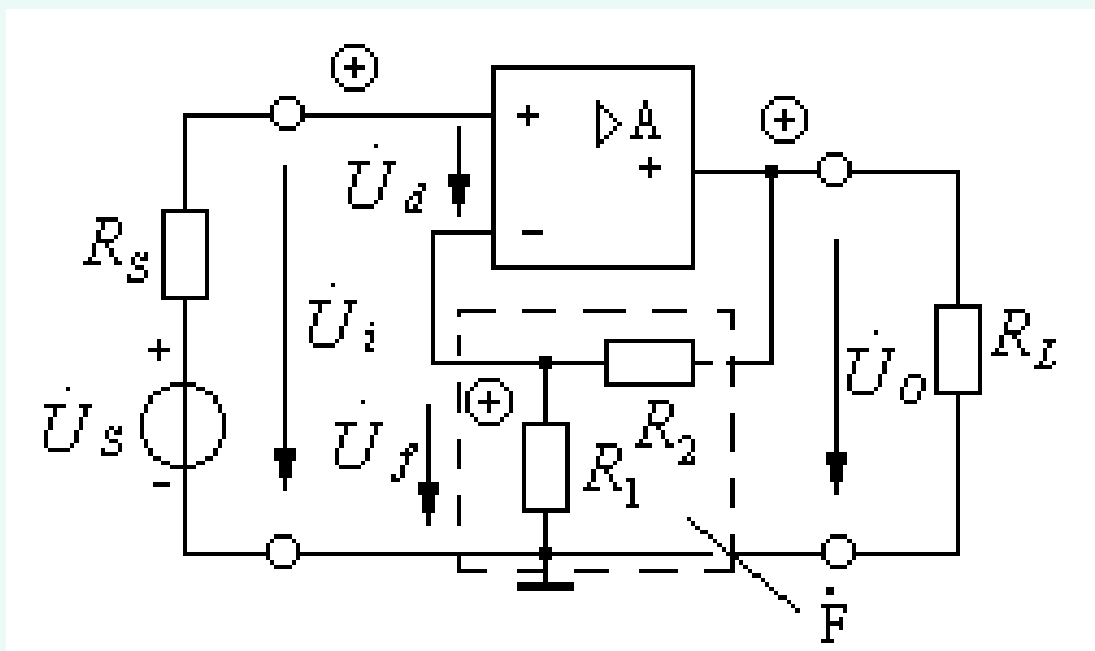
$$I_f = -\frac{R_1}{R_F + R_1} I_o$$

是电流反馈

#### (4) 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。

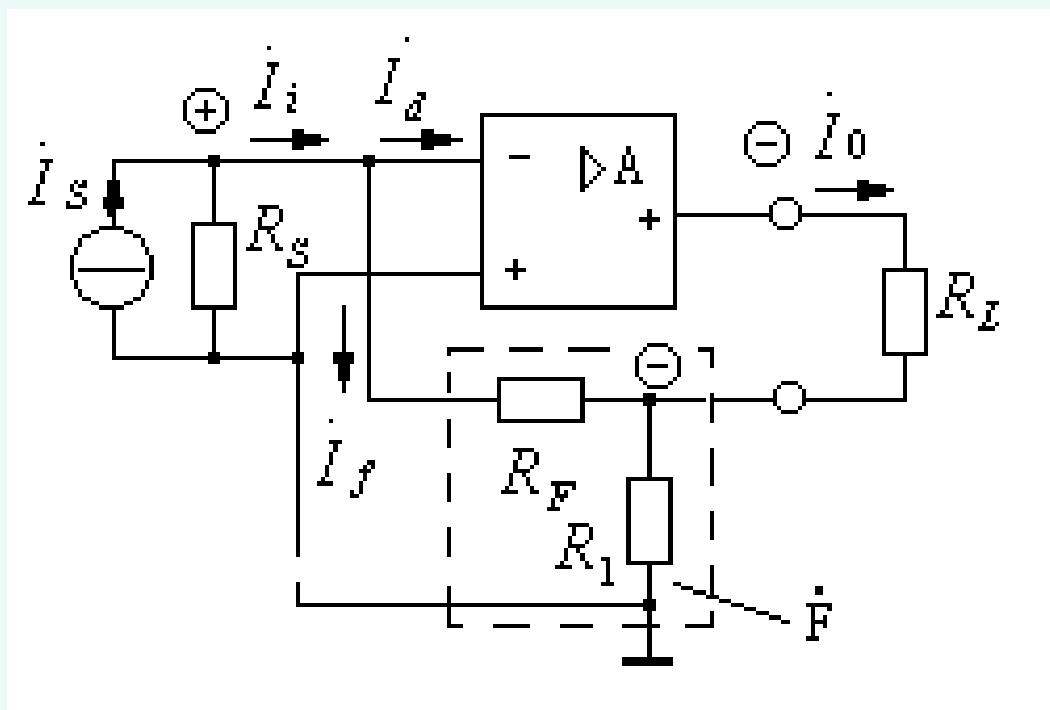
串联反馈：反馈信号以电压的形式出现，与输入信号串联。  
其电路结构的特点是输入信号和反馈信号分别连接在运放的两个输入端子上。



## 串联负反馈电路

## (4) 串联反馈和并联反馈

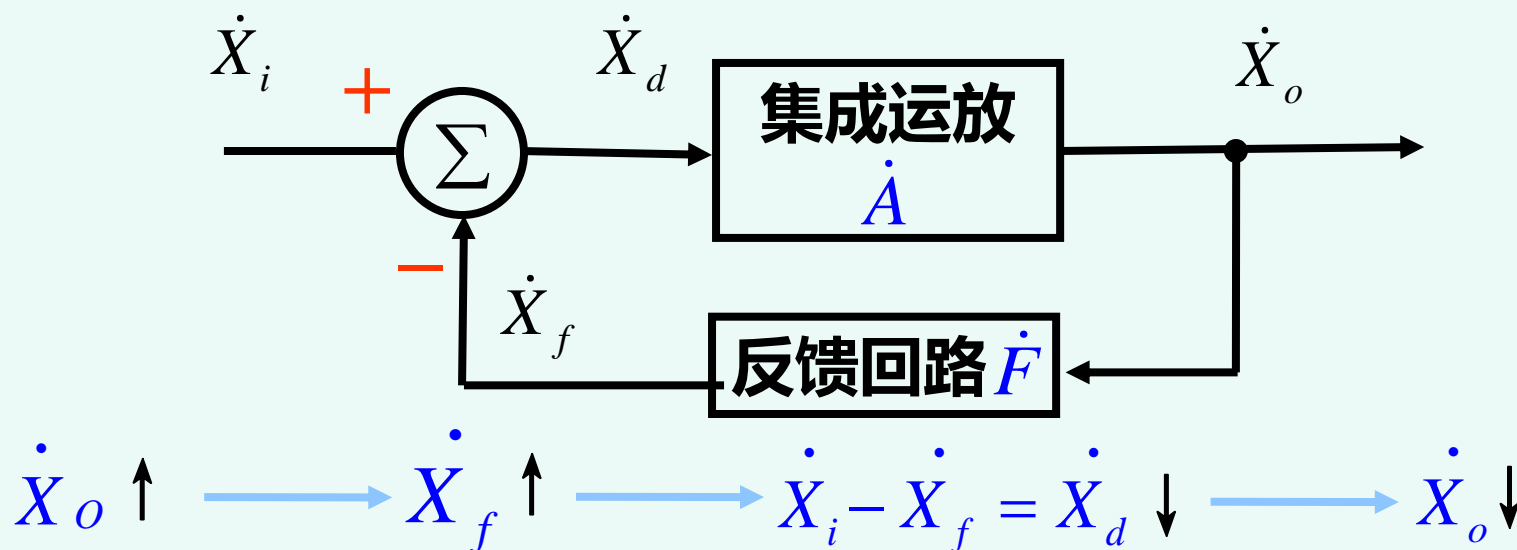
**并联反馈：**反馈信号以**电流**的形式出现，与输入信号并联。  
电路结构的特点是**输入信号和反馈信号接在运放的同一端子上。**



并联负反馈电路

### (三) 负反馈对放大电路性能的影响

(1) 电压负反馈能稳定输出电压，电流负反馈能稳定输出电流。



(2) 负反馈对输入电阻的影响

对于串联负反馈，集成运放电路和反馈网络在输入回路是串联的，所以使放大电路输入电阻增大；

对于并联负反馈，集成运放电路与反馈网络在输入回路是并联的，所以使放大电路输入电阻减小。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### (3) 负反馈对输出电阻的影响

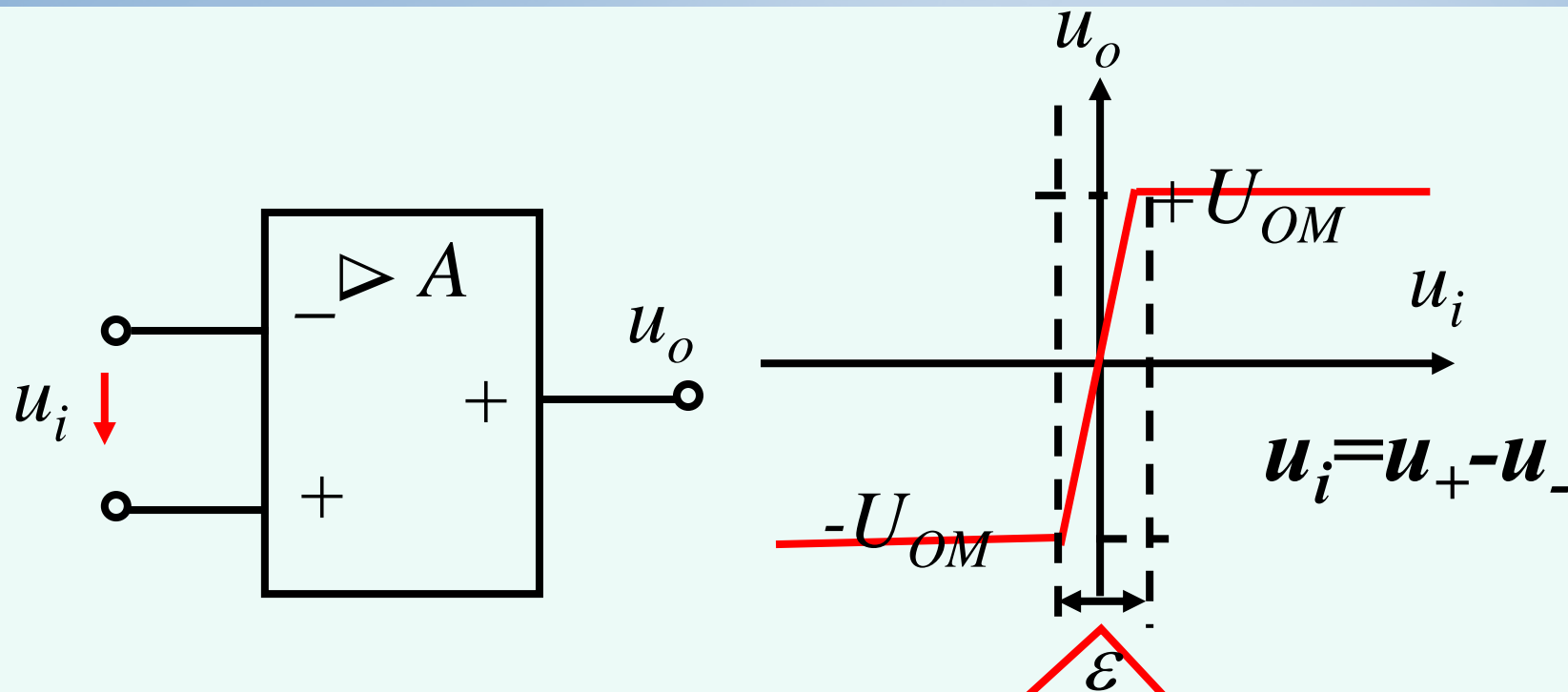
**电压负反馈**能稳定输出电压，当负载变化时，输出电压近似不变，即放大电路的输出电压趋于理想电压源特性，因此其**输出电阻很小**。

**电流负反馈**能稳定输出电流，当负载变化时，输出电流近似不变，即放大器的输出电流趋向于理想恒流源特性，因此其**输出电阻很大**。

总结：

- 1) 串联负反馈使输入电阻增大，并联负反馈使输入电阻减小。
- 2) 电压负反馈能稳定输出电压，减小输出电阻。  
电流负反馈能稳定输出电流，增大输出电阻。

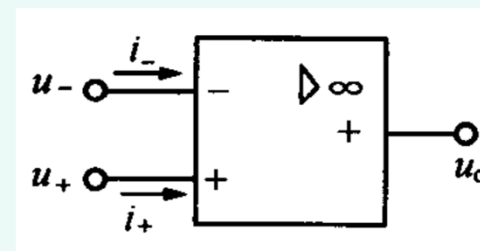
### 三、集成运放工作在线性区时的特点



$A$ 越大，运放的线性范围越小，必须在输出与输入之间加负反馈才能使其工作于线性区。



由于运放的开环放大倍数很大，输入电阻高，输出电阻小，在分析时常将其理想化，称其所谓的理想运放。



理想运放工作在线性区的特点

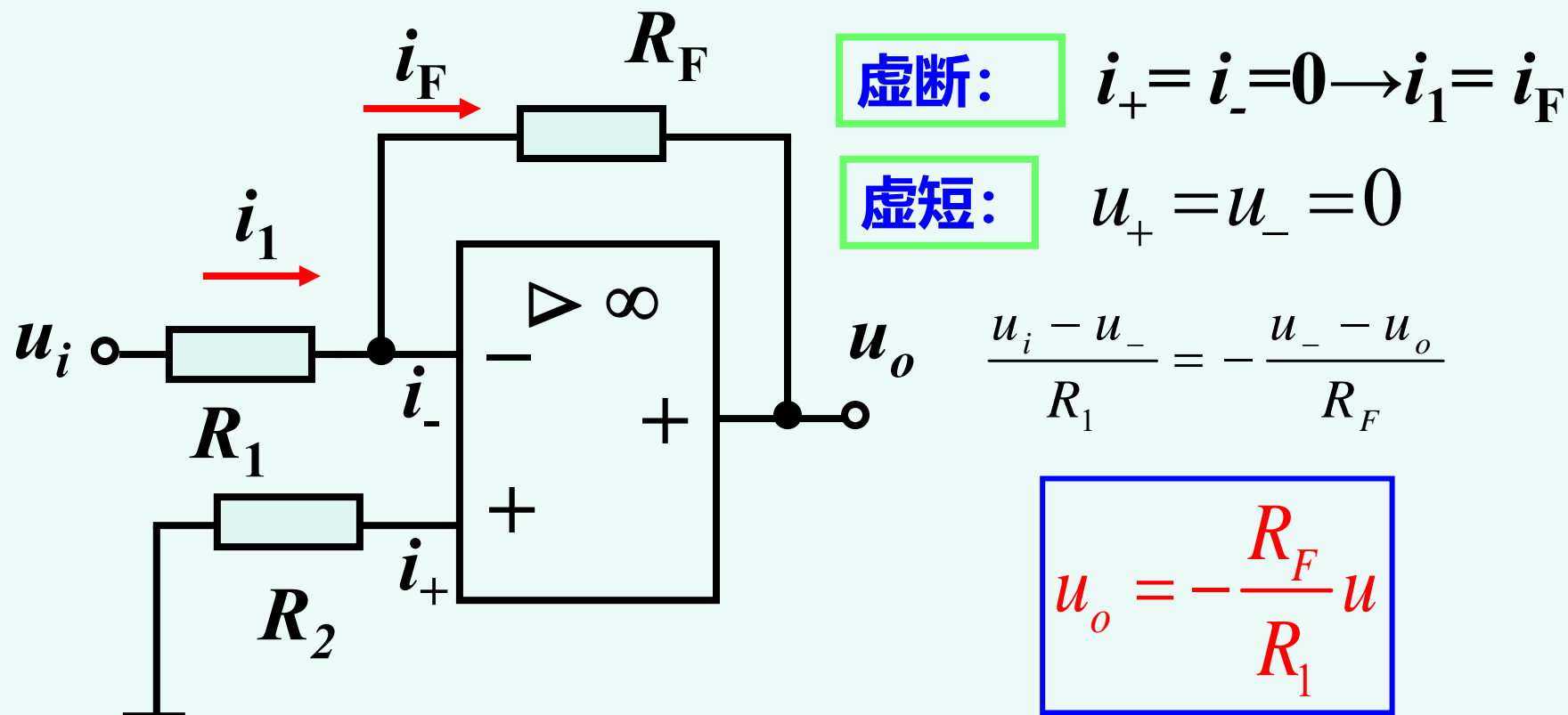
$$A = \infty \Rightarrow u_o = A(u_+ - u_-) \quad u_+ = u_- \quad \text{虚短}$$

$$R_i = \infty \Rightarrow i_+ = i_- = 0 \quad \text{虚断}$$

$$R_o = 0 \Rightarrow \text{输出端是理想的电压源}$$

## 四、集成运放的线性应用

### 1. 反相比例运算电路

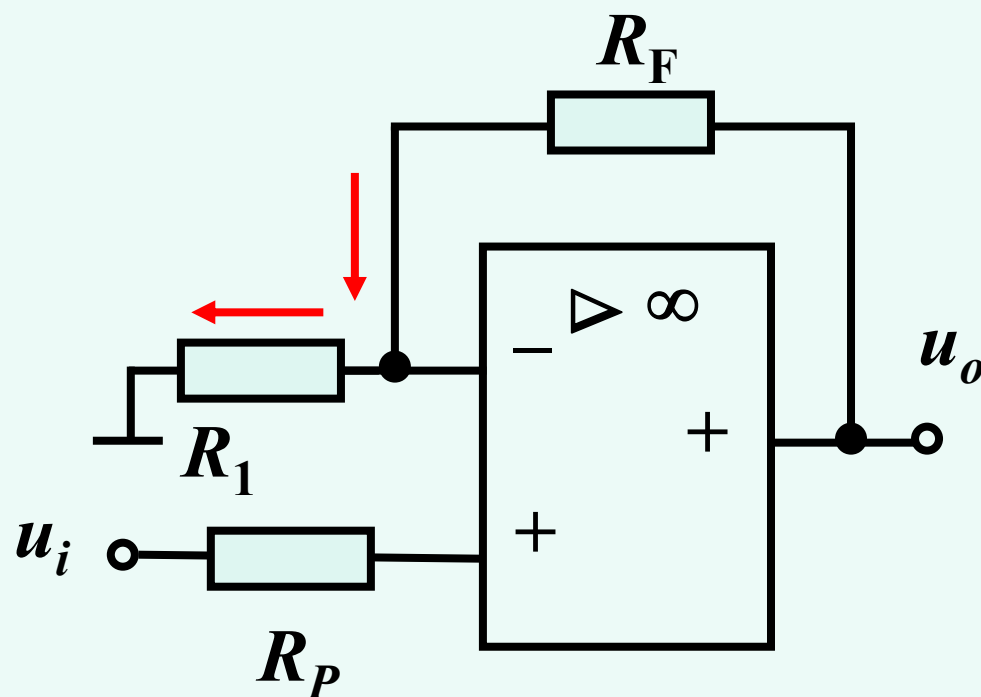


运放加负反馈后的电压放大倍数只与外接电阻 $R_F$ 和 $R_1$ 有关，与运放参数无关，电路具有很高的稳定性。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 2. 同相比例运算电路



虚断:  $i_+ = i_- = 0$

虚短:  $u_- = u_+ = u_i$

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

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

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

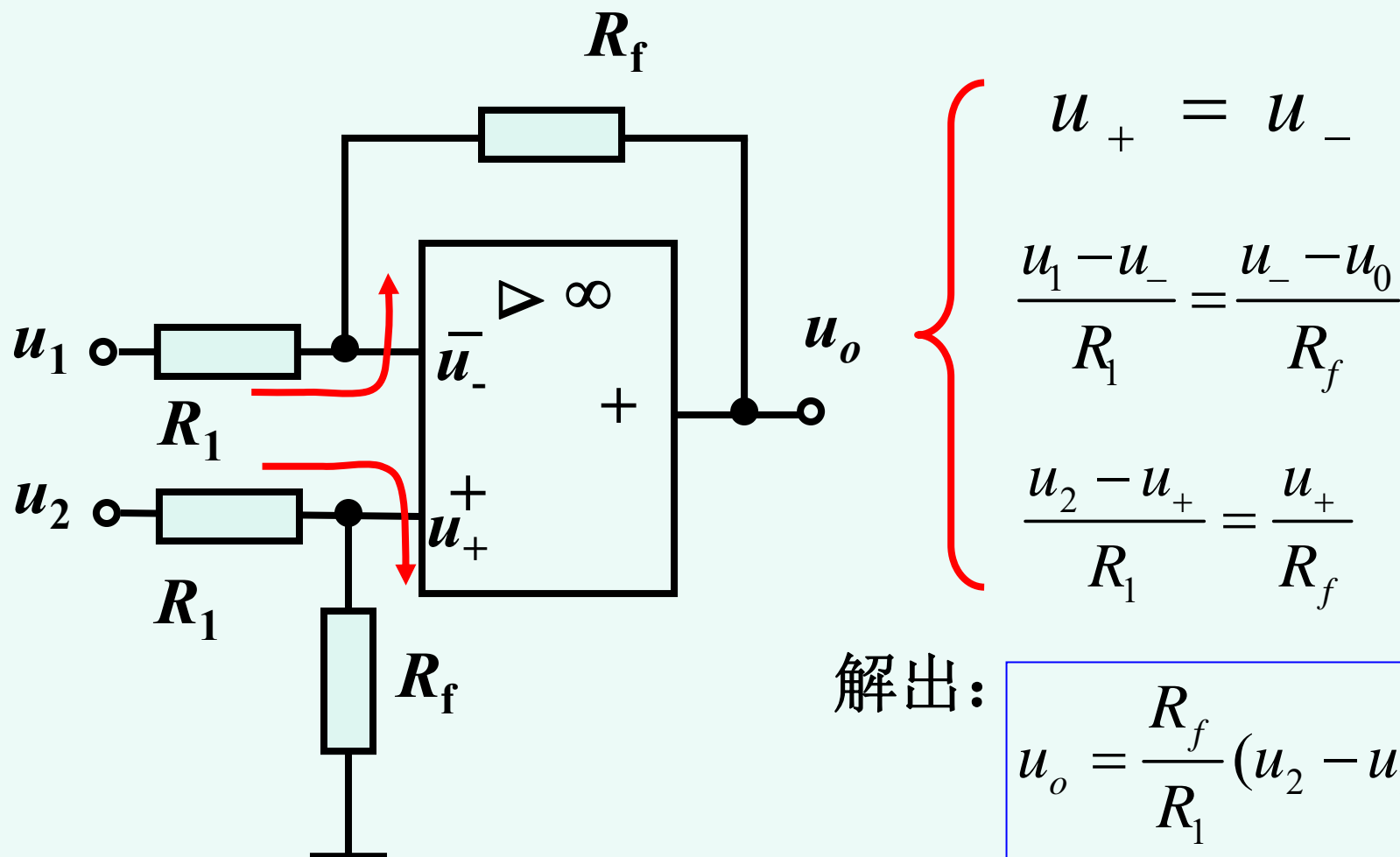
同相比例运算电路的电压放大倍数始终大于或等于1，公式中没有负号表明输出电压与输入电压同相。

当  $R_1$  开路时,  $u_o = u_i$  称为电压跟随器



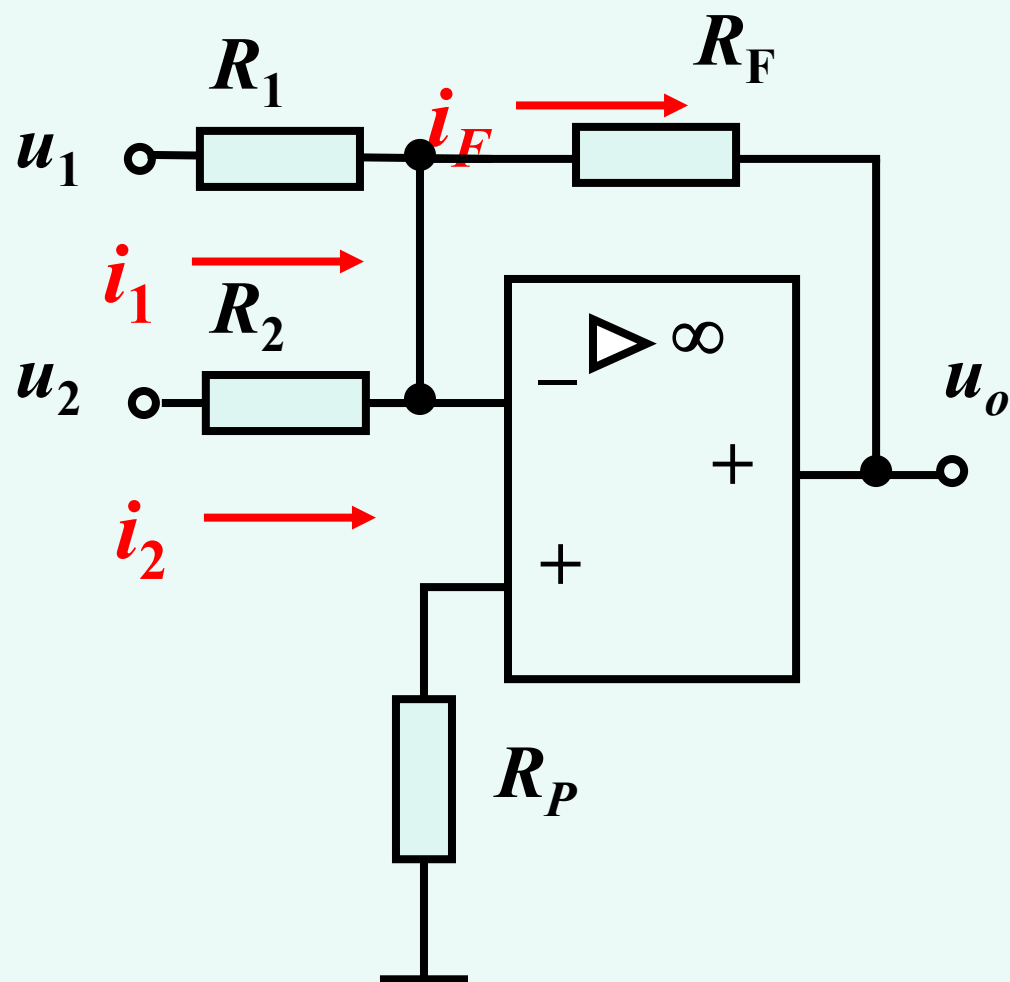
石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

### 3. 差动比例运算电路（减法运算电路）



输出电压只有两个输入电压之差成比例，实现了减法运算

## 4. 反相求和运算电路



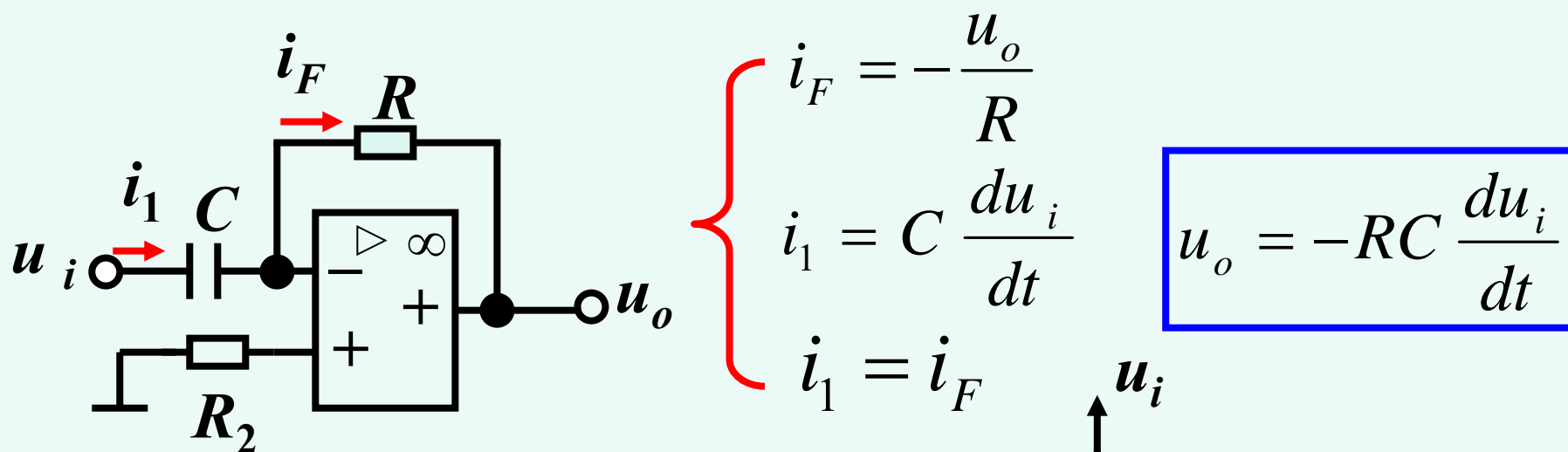
$$\begin{cases} u_+ = u_- = 0 \\ i_1 + i_2 = i_F \end{cases}$$

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} = -\frac{u_o}{R_F}$$

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_1 + \frac{R_F}{R_2}u_2\right)$$

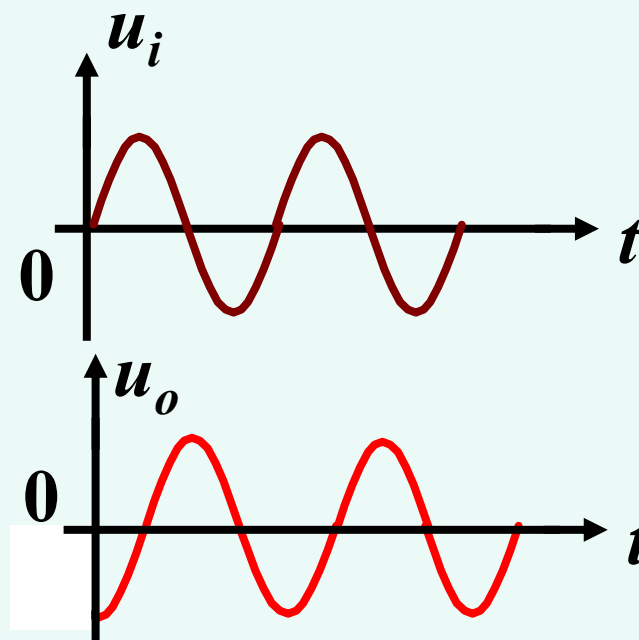
电路实现了反向求和运算

## 5. 微分运算电路



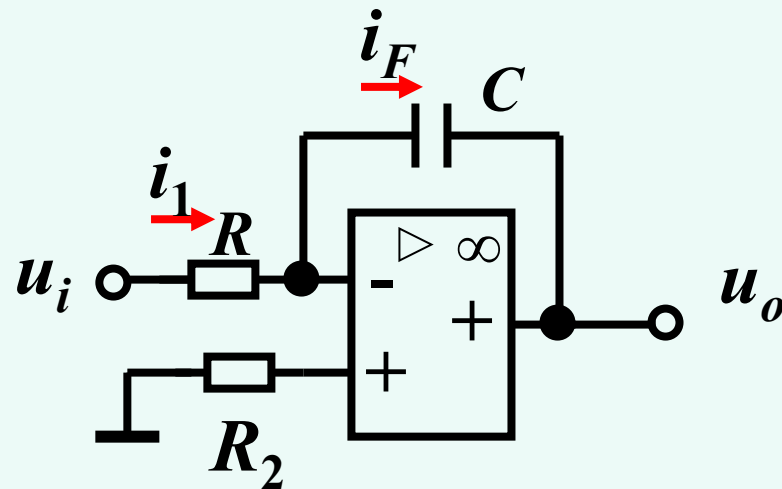
输入:  $u_i = \sin \omega t$

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



**电路的输出电压和输入电压成微分关系**

## 6. 积分运算电路



$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{u_i}{R} \\ i_F = -C \frac{du_o}{dt} \end{array} \right. \quad \boxed{u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt}$$

电路的输出电压和输入电压成积分关系

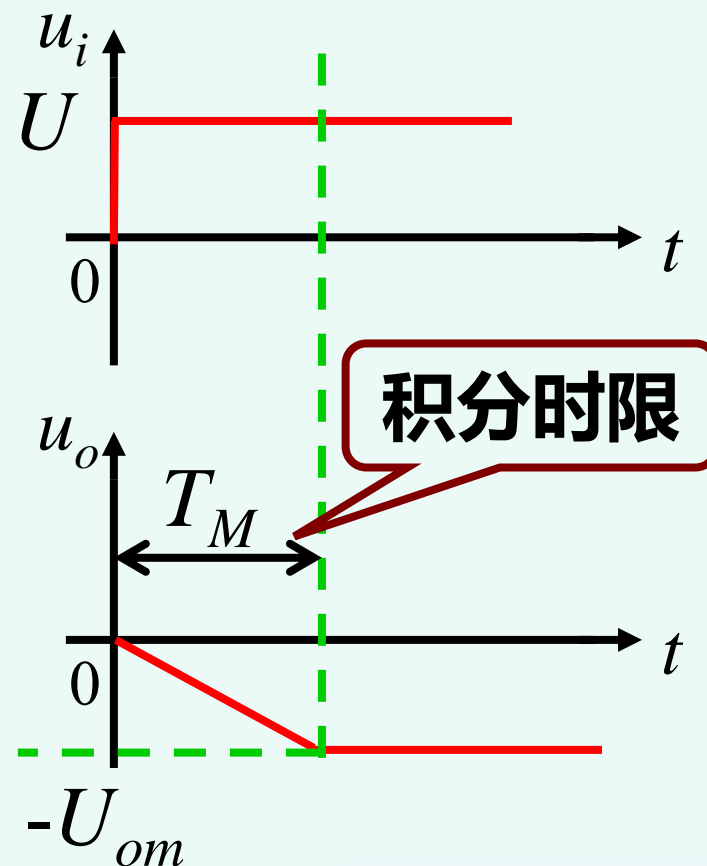
## 6. 积分运算电路

如果积分器从某一时刻输入一直流电压，输出将反向积分，输出电压直到最大值（接近于电源电压）。

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t U dt$$

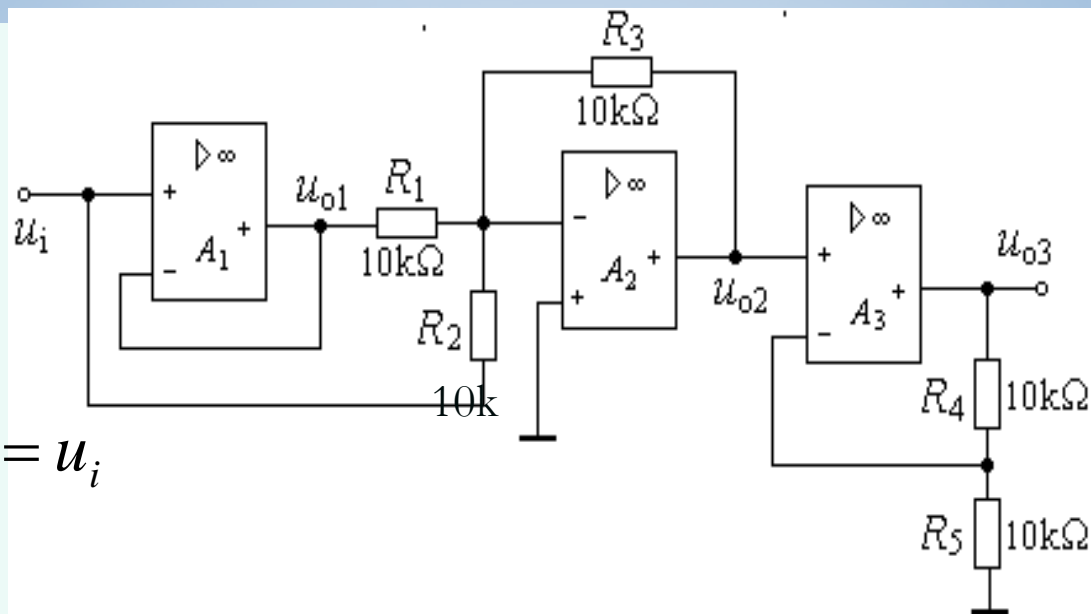
$$-U_{om} = -\frac{1}{RC} UT_M$$

$$T_M = \frac{RCU_{om}}{U}$$





## 求电路中 $u_{01}$ 、 $u_{02}$ 、 $u_{03}$ 和 $u_i$ 的运算关系



解:  $A_1$  电压跟随器  $\Rightarrow u_{01} = u_i$

$A_2$  反相求和电路

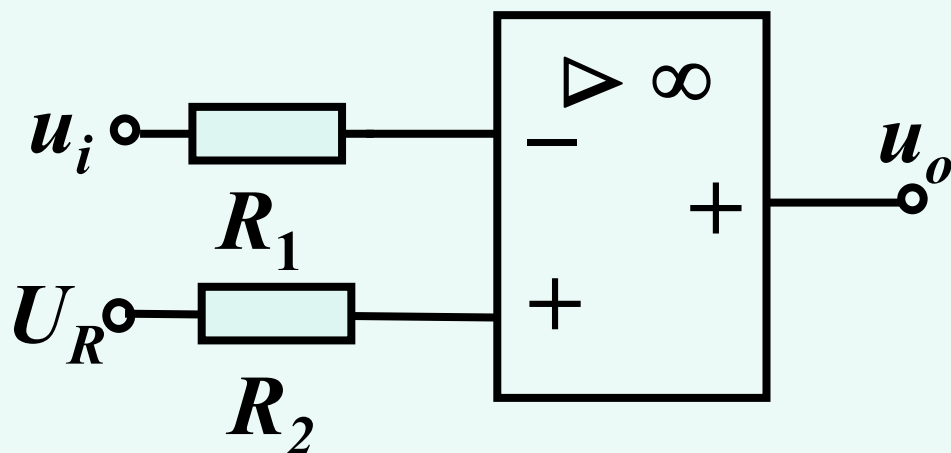
$$\therefore u_{02} = -\left(\frac{R_3}{R_1} u_{01} + \frac{R_3}{R_2} u_i\right) = -2u_i$$

$A_3$  同相比例电路

$$\therefore u_{03} = \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right) u_{02} = -4u_i$$

## 四、集成运放的非线性应用—电压比较器

电压比较器是将输入的模拟信号和一个参考电压进行幅度比较，输出高低电平，广泛用于信号处理和检测、波形产生电路等



$$\because A_u = \infty$$

如果两个输入端存在压差，  
则输出电压达到饱和值。

当  $u_i > U_R$  时， $u_o = -U_{om}$

当  $u_i < U_R$  时， $u_o = U_{om}$

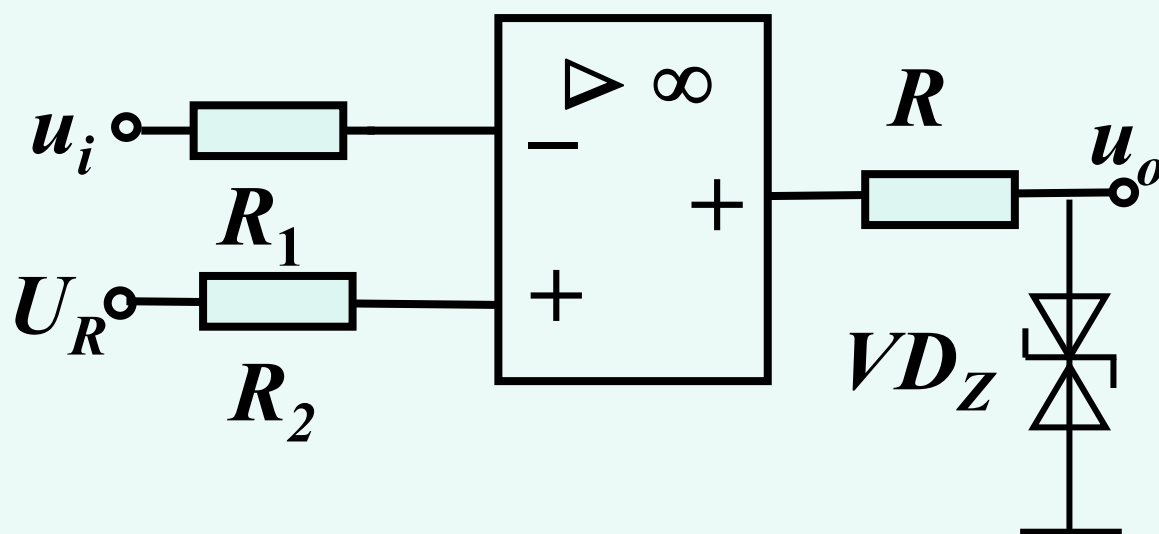
集成运放工作在开环状态

$U_R$  是参考电压。

当  $U_R=0$  时，称为过零比较器。

$U_{om}$  是集成运放输出的最大电压。

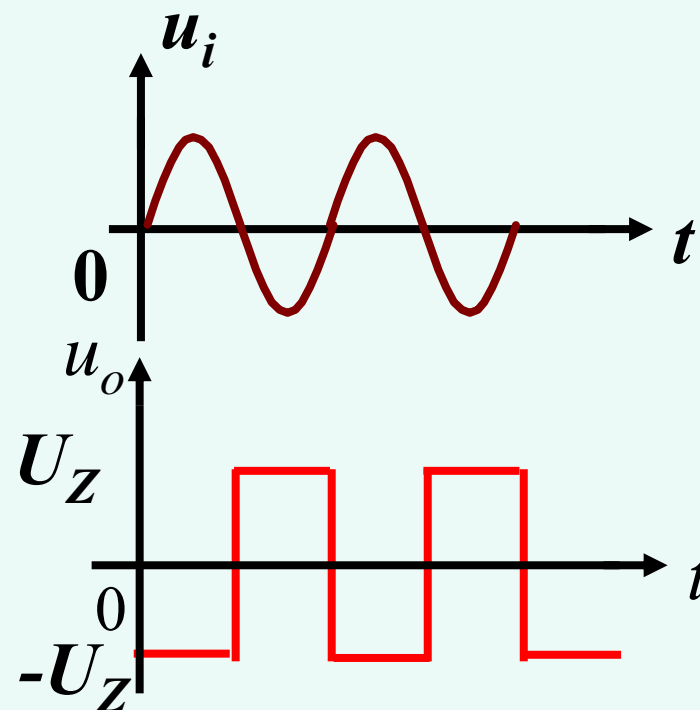
## 利用稳压管限幅的电压比较器



$VD_Z$ 是两个背靠背的稳压管，其稳定电压都是 $U_Z$ ，忽略正向导通压降

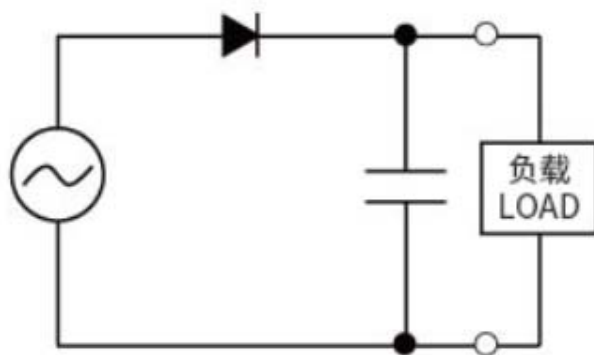
当  $u_i > U_R$  时， $u_o = -U_Z$

当  $u_i < U_R$  时， $u_o = U_Z$

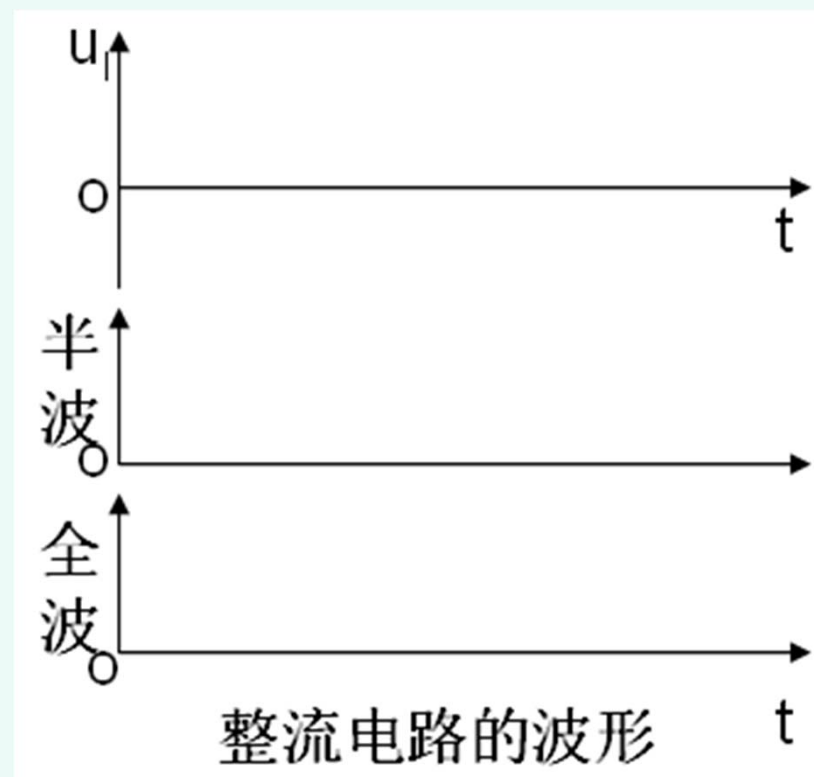
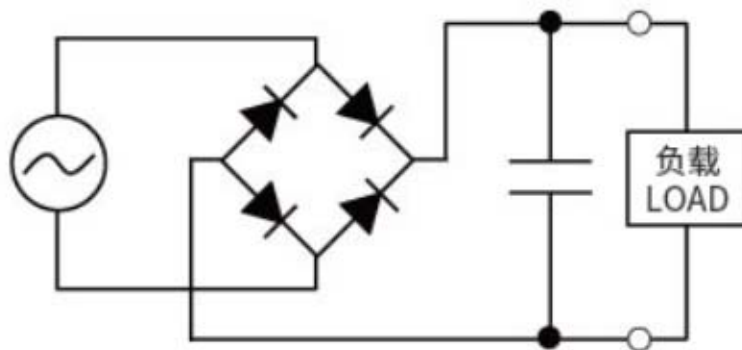


## 第五节 直流电源

半波整流

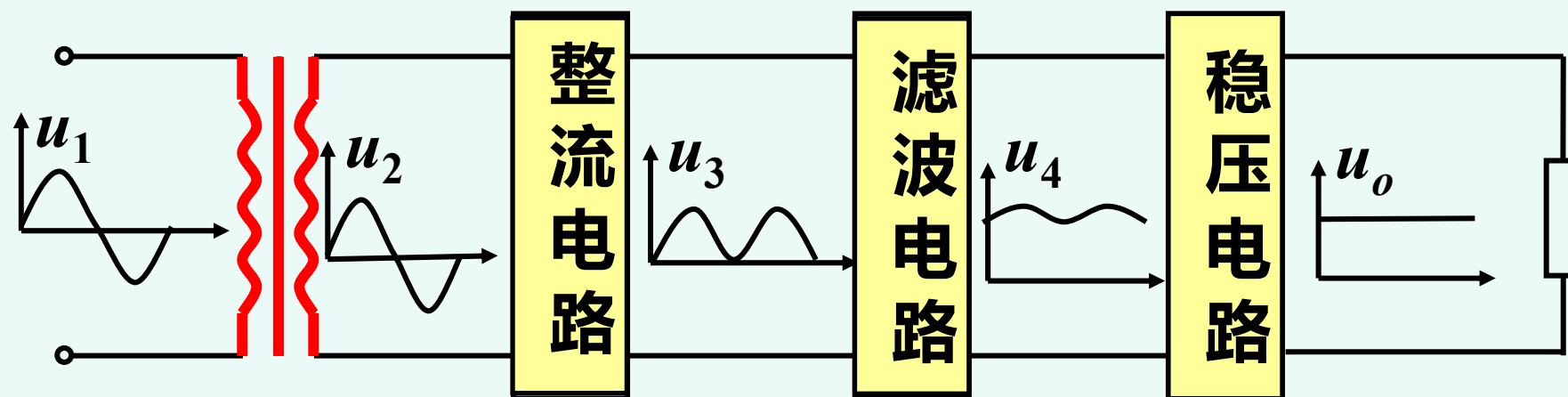


全波整流



整流电路的波形

## 第五节 直流电源



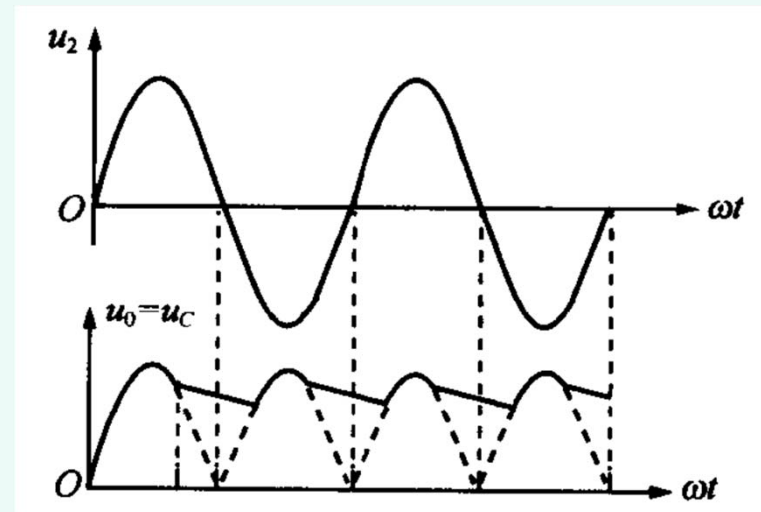
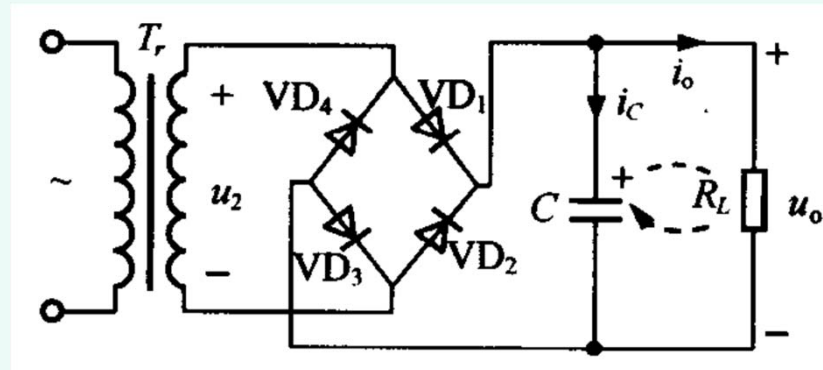
- ❖ 电源变压器：将交流电网电压  $u_1$  变为合适的交流电压  $u_2$ 。
- ❖ 整流电路：将交流电压  $u_2$  变为脉动的直流电压  $u_3$ 。
- ❖ 滤波电路：将脉动直流电压  $u_3$  转变为平滑的直流电压  $u_4$ 。
- ❖ 稳压电路：清除电网波动及负载变化的影响,保持输出电压  $u_o$  的稳定。



石家庄铁道大学  
Shijiazhuang Tiedao University

## 第五节 直流电源

### 滤波电路



### 稳压电路

