

第8章 三极管

三极管的结构和工作原理

三极管的特性及其等效模型

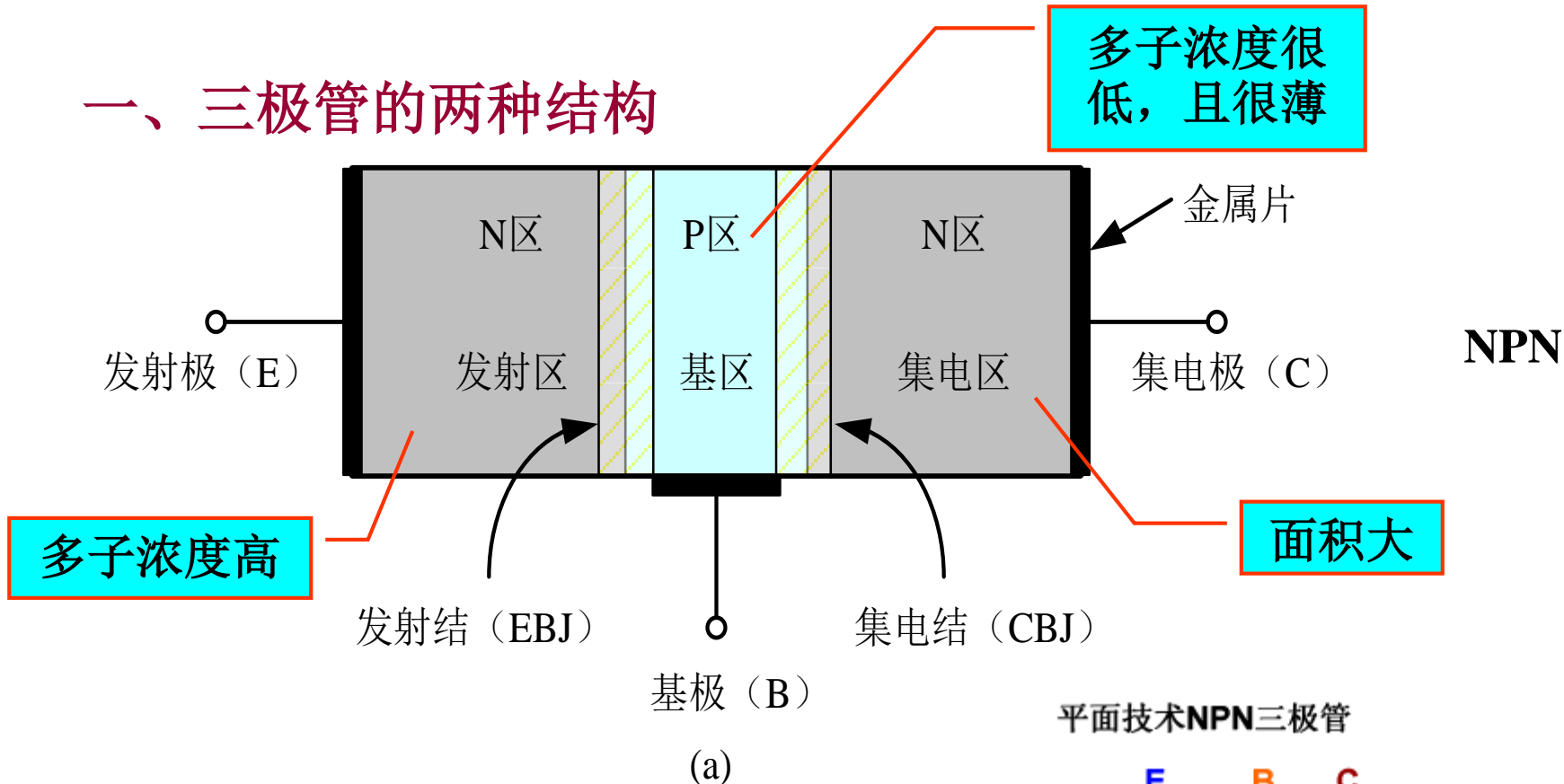
三极管放大电路的构成及其分析

8.1 三极管的结构和工作原理

8.1.1 三极管的结构及其电路符号

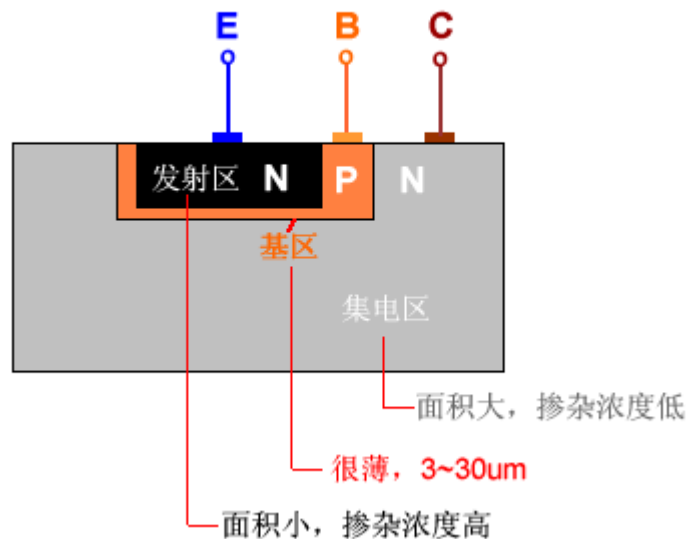


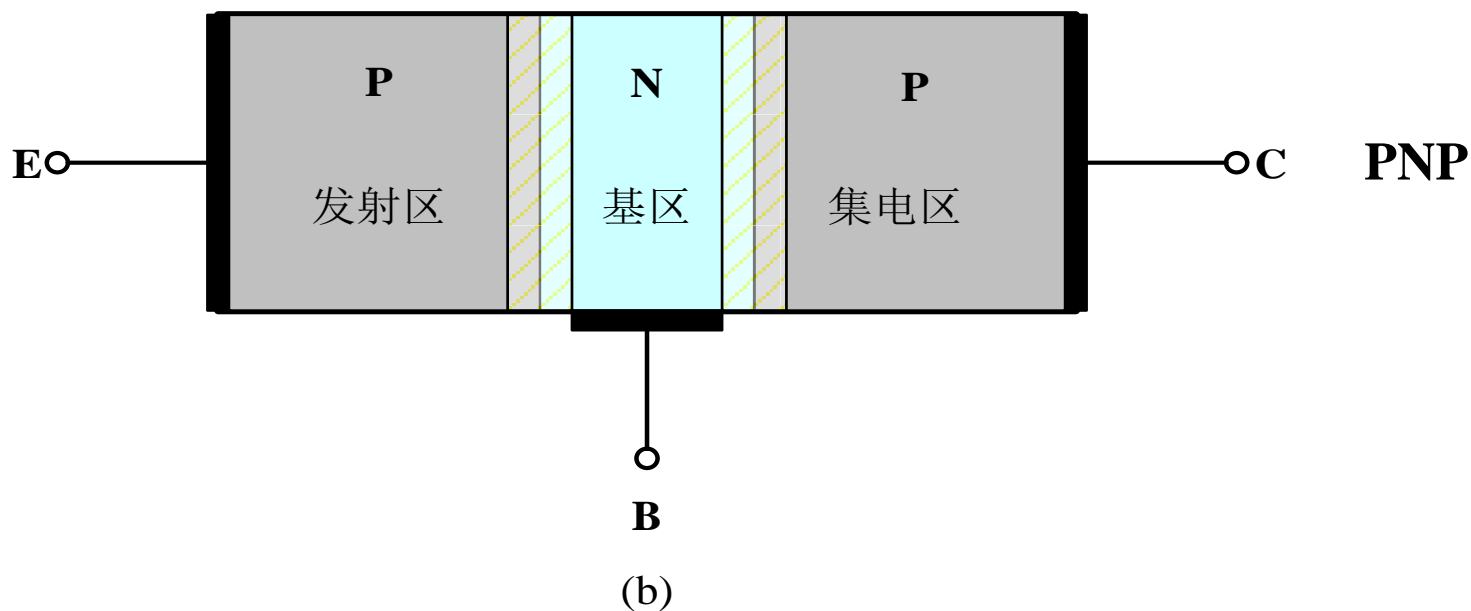
一、三极管的两种结构



(a)

平面技术NPN三极管

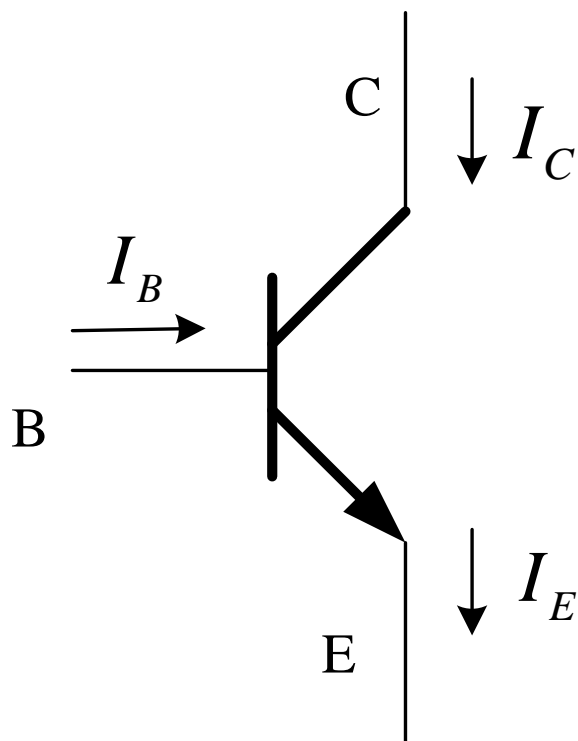




三极管

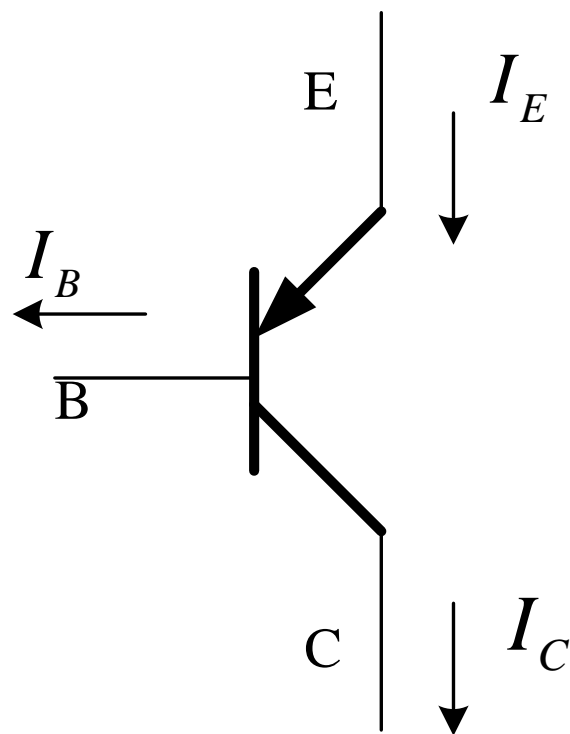
- 三个极：发射极、基极、集电极
- 三个区：发射区、基区、集电区
- 两个PN结：发射结、集电结

二、三极管电路符号



(a)

NPN



(b)

PNP

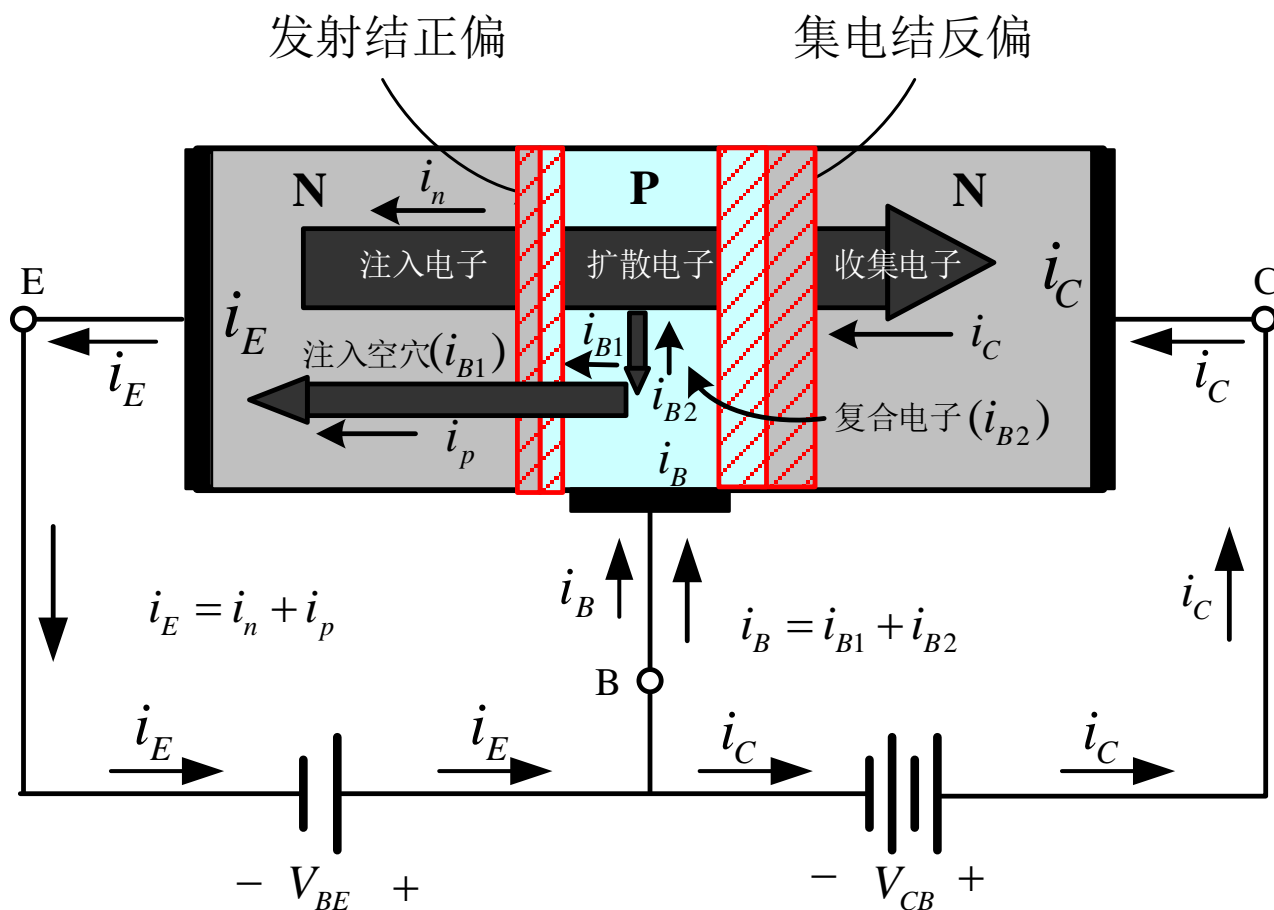
三极管的不同工作状态

模式	EB 结	CB 结
截止	反向	反向
放大	正向	反向
饱和	正向	正向

8.1.2 三极管的工作原理

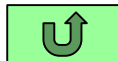
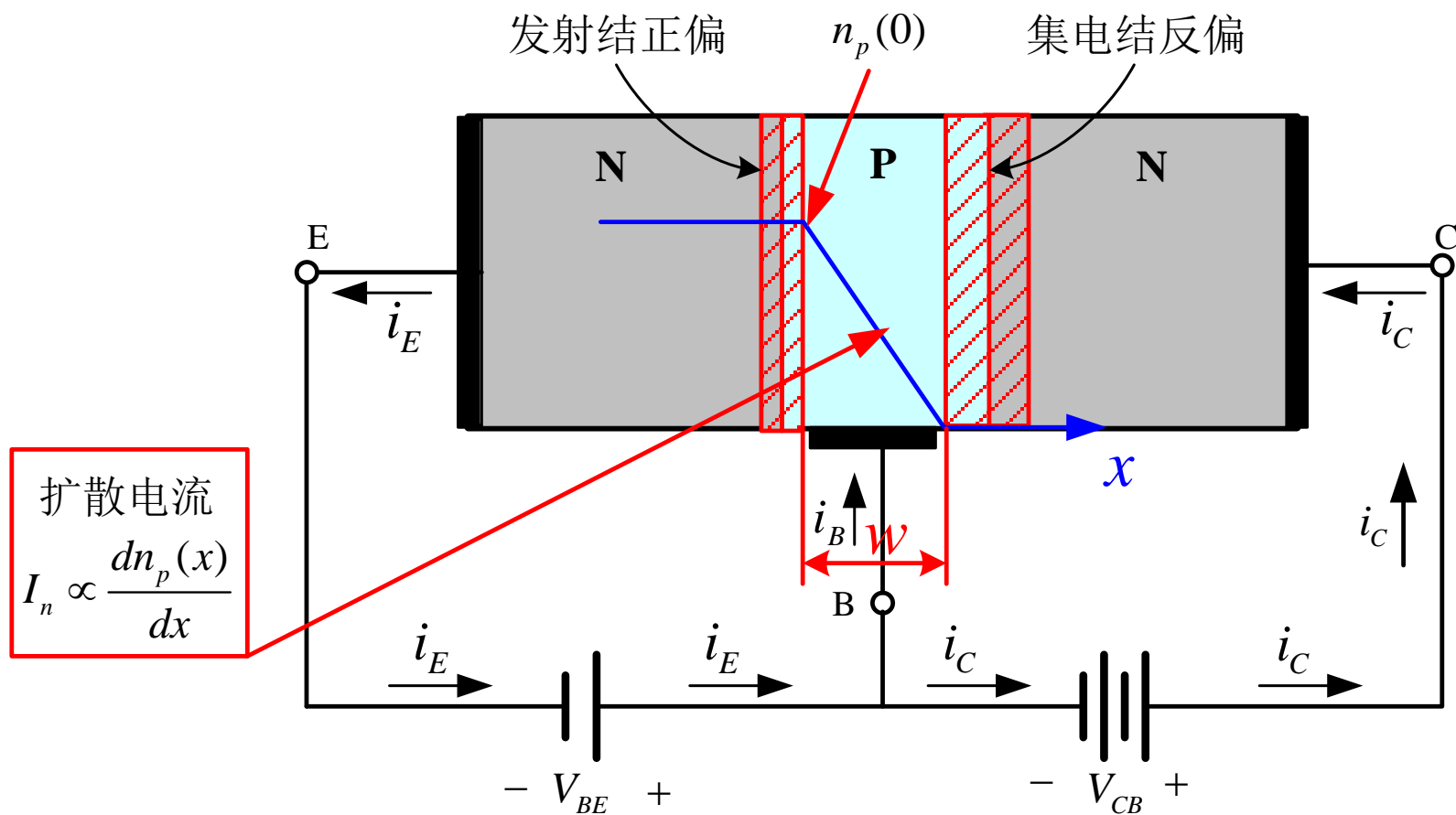
一、三极管内部载流子传输

放大模式下的各电流成分



二、集电极电流

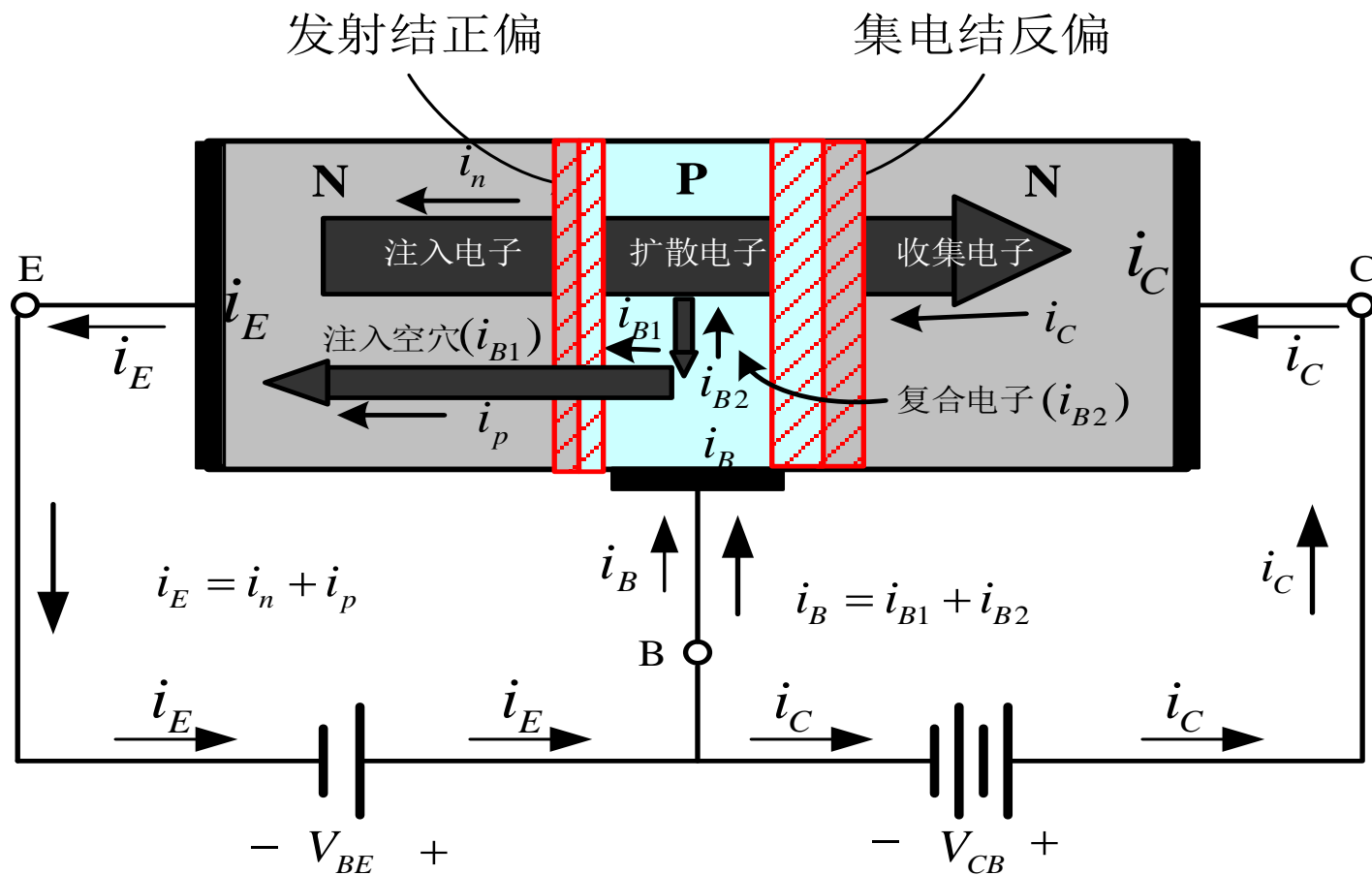
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (= I_n)$$



三、基极电流

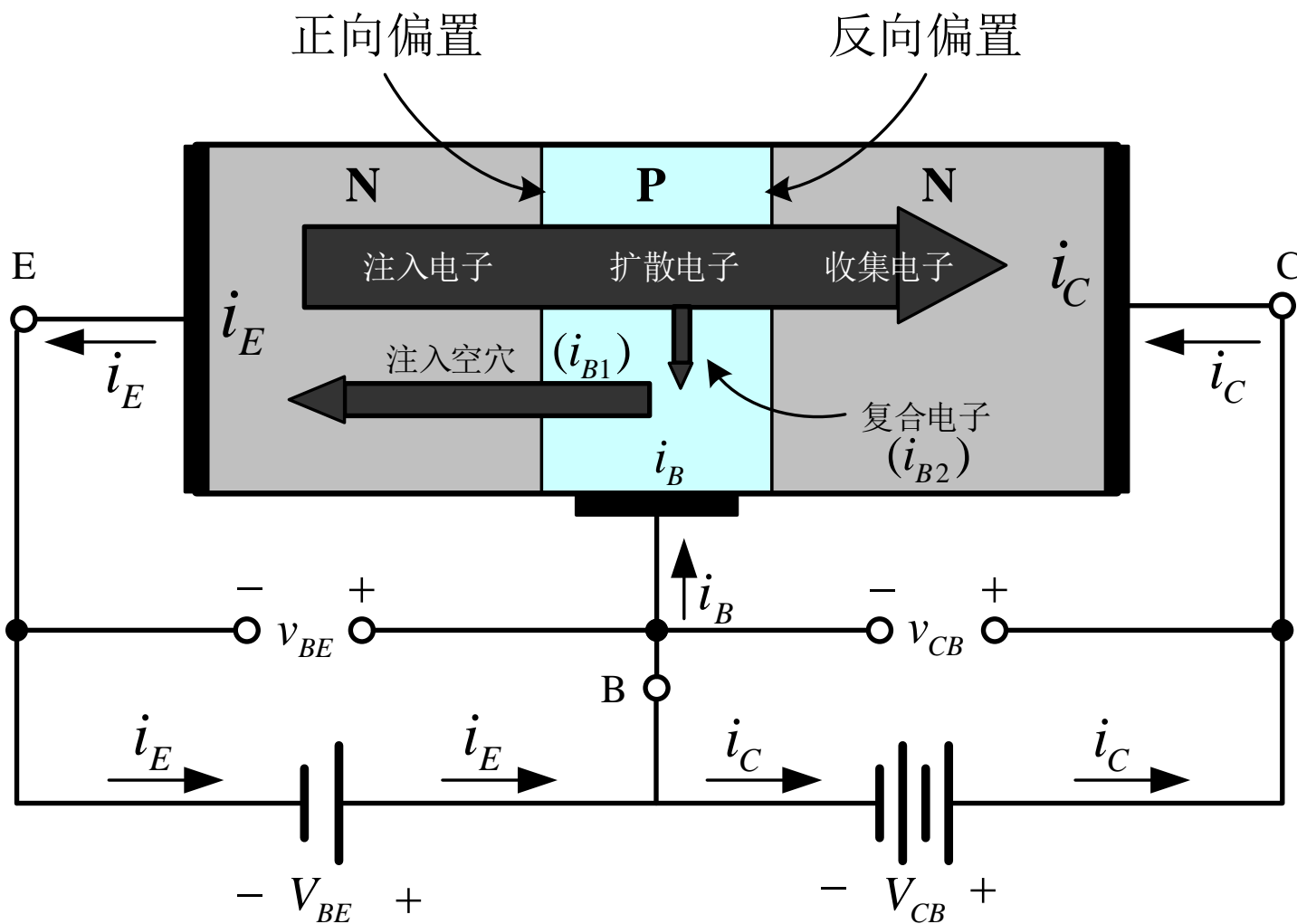
$$i_B = \frac{I_S e^{v_{BE}/V_T}}{\beta} = \frac{i_C}{\beta}$$

β : 共发射极电流增益
(common-emitter current gain)



四、发射极电流

$$i_E = i_C + i_B = (1 + \beta)i_B = \frac{1 + \beta}{\beta} i_C = \frac{i_C}{\alpha}$$



放大模式下重要公式

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = \beta i_B$$

$$i_E = (\beta + 1)i_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

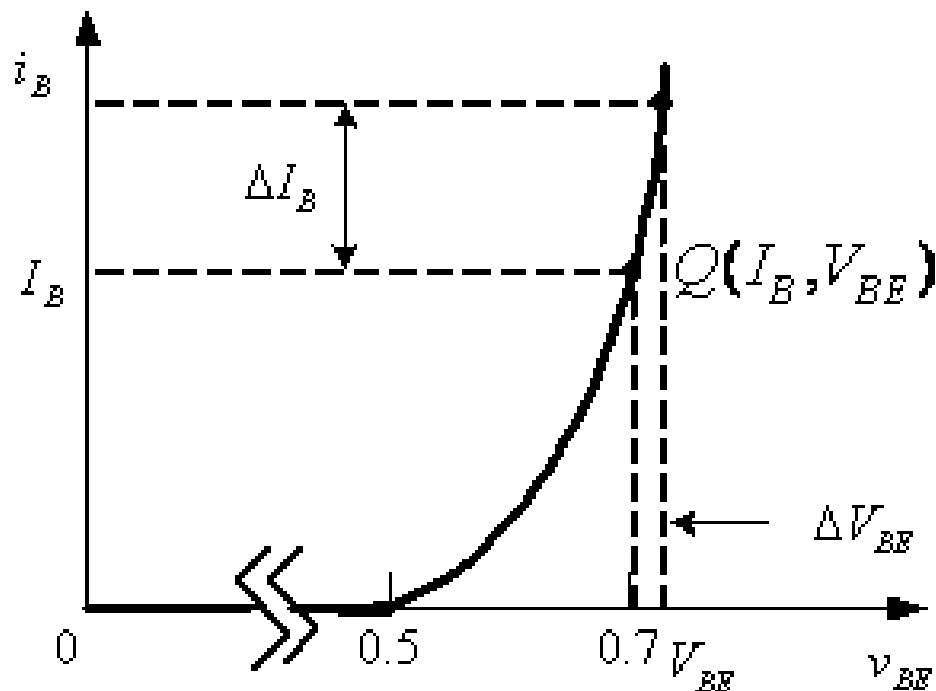
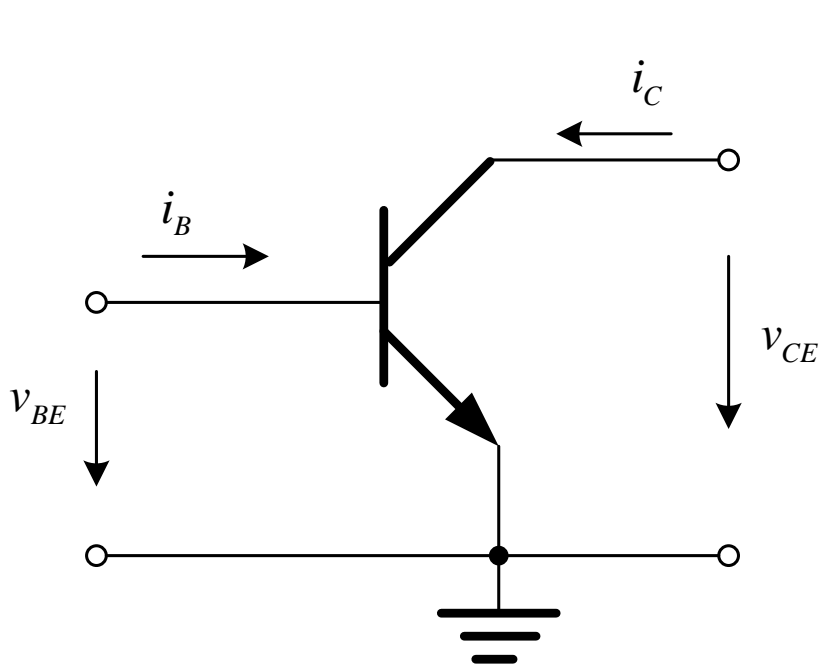
$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

8.2 三极管的特性及其等效模型

8.2.1 输入特性、输出特性和转移特性

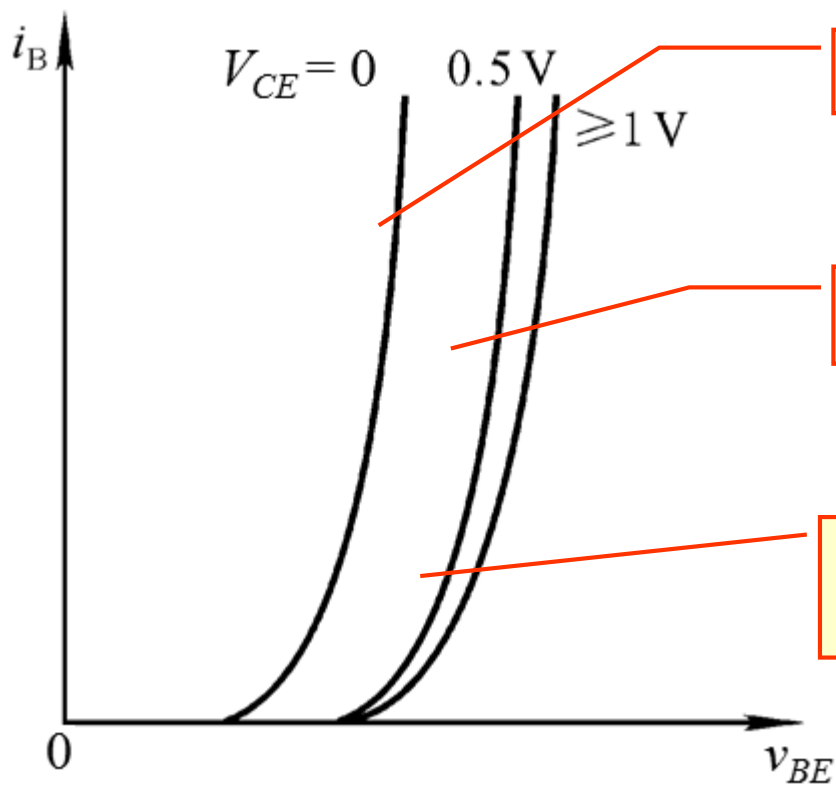
一、三极管的输入特性

—— 描述输入电压和输入电流之间的关系。



增量电阻

$$r = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B}$$



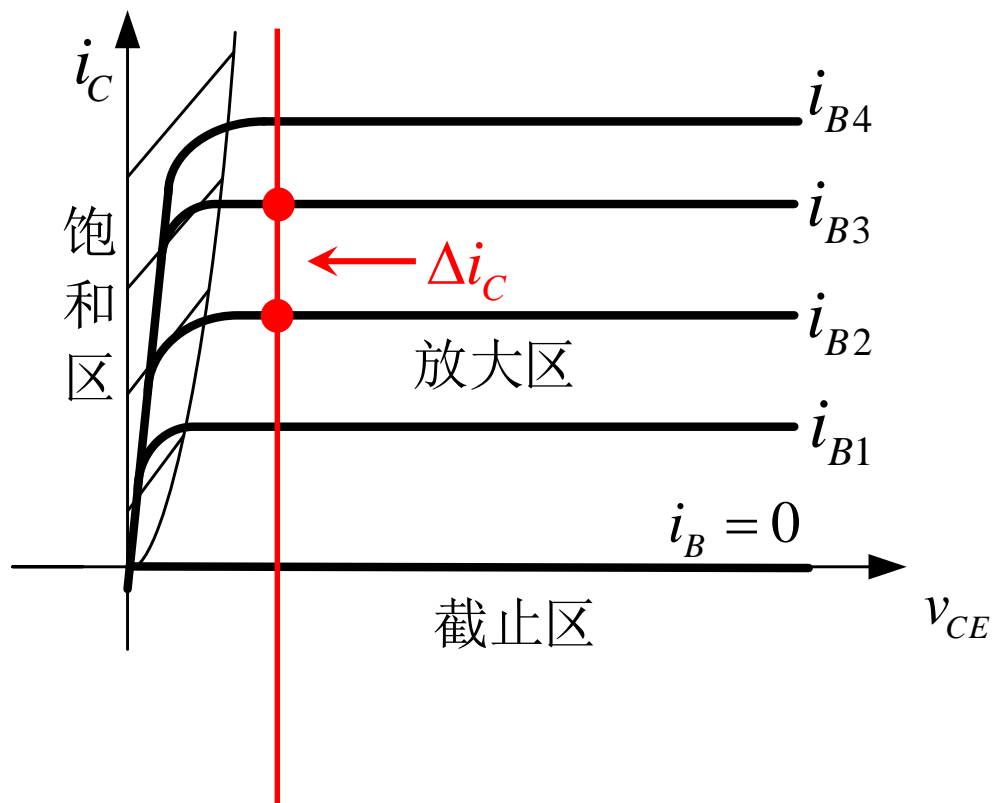
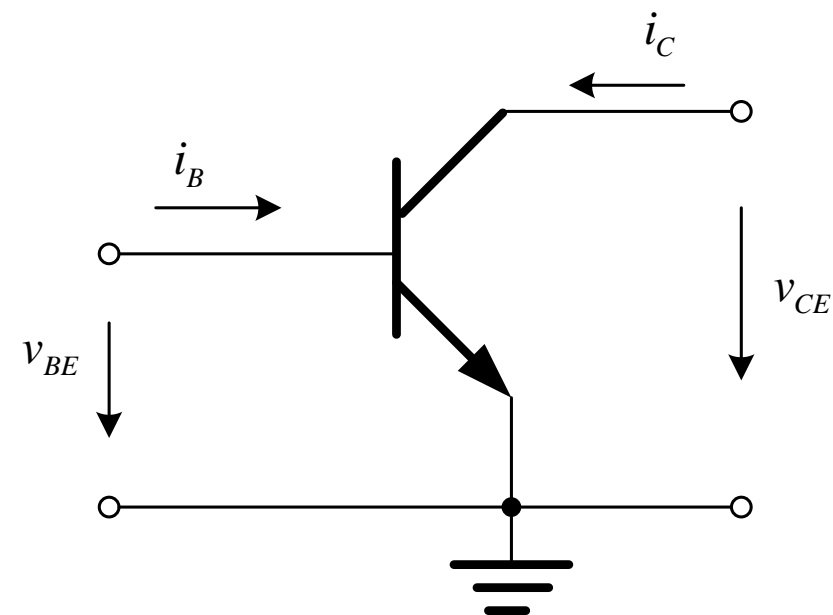
为什么像 PN 结的伏安特性？

为什么 V_{CE} 增大曲线右移？

为什么 V_{CE} 增大到一定值曲线右移就不明显了？

二、三极管的输出特性

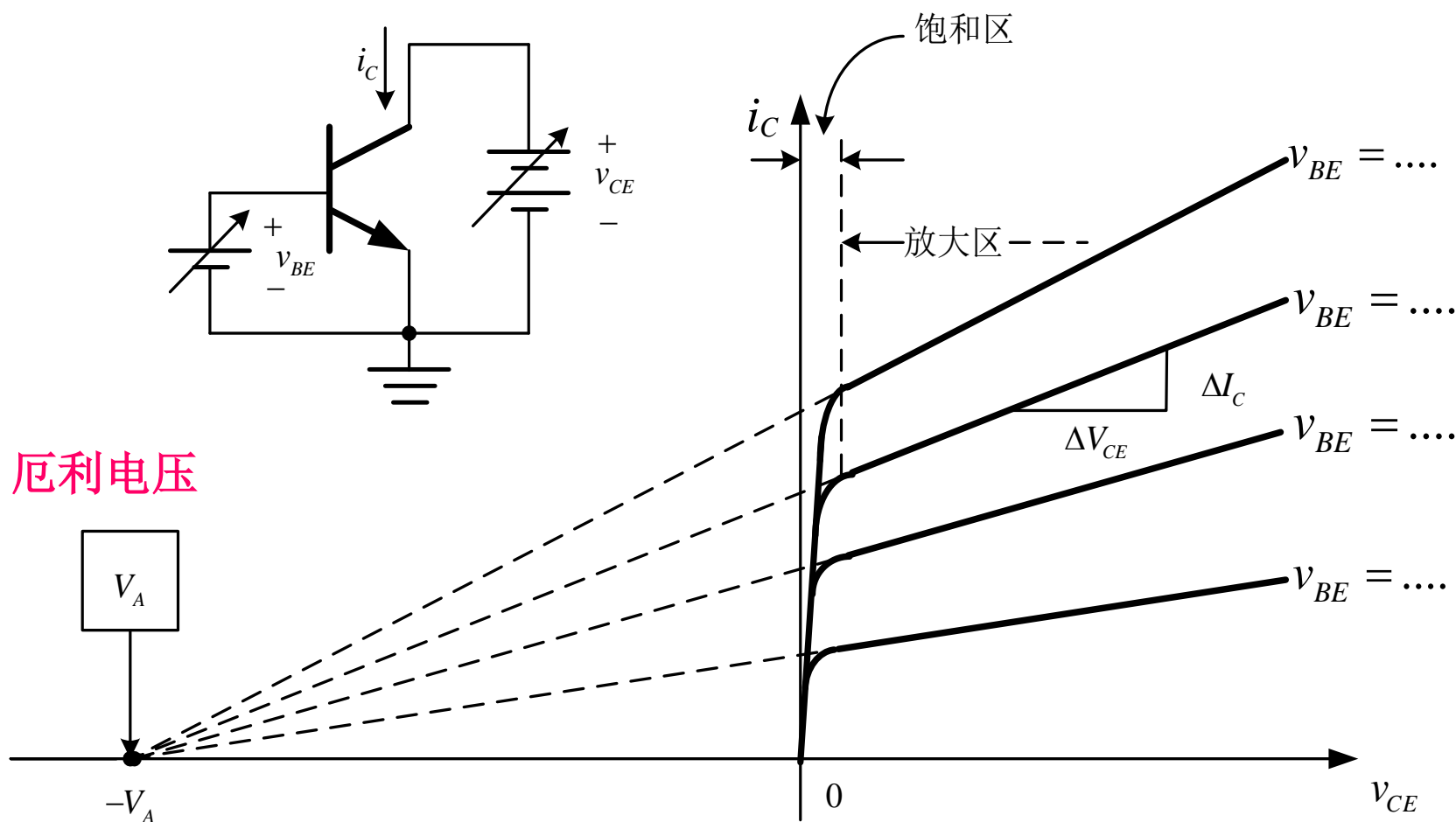
—— 描述输出电压和输出电流之间的关系。



$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

三极管的厄利现象 (Early Effect)

给定 v_{BE} 下，随着 v_{CE} 的上升导致耗尽区宽度增加，使得基区宽度 W 减小， I_n 增大， i_C 增大。



考虑厄利现象后

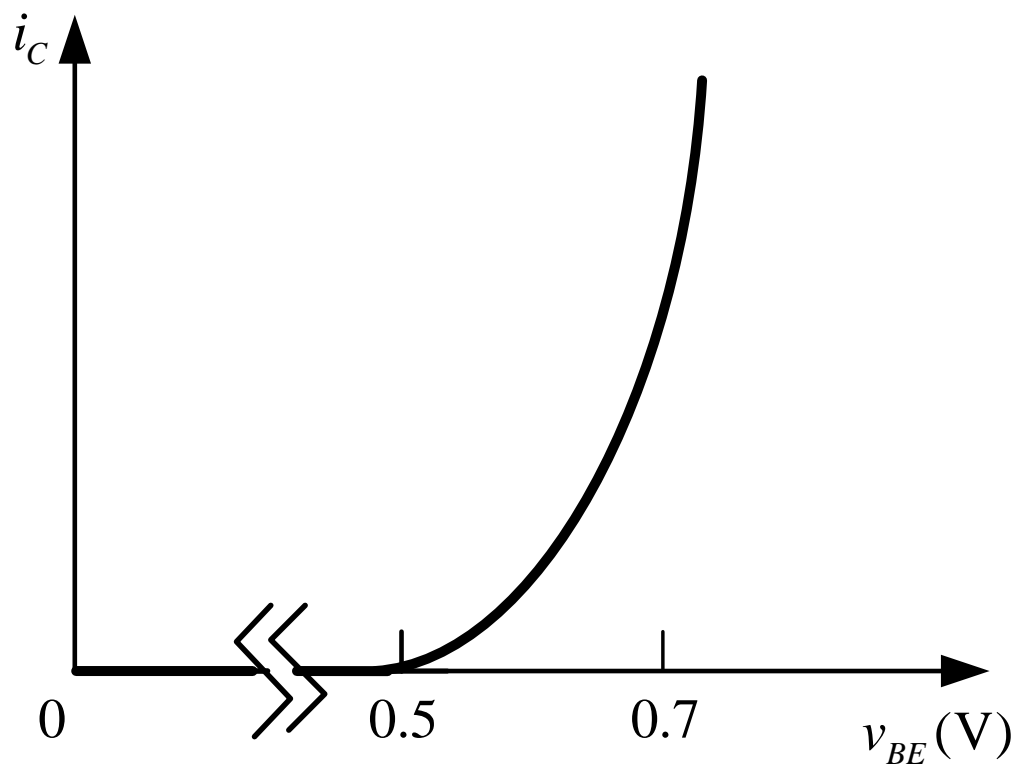
$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

输出电阻

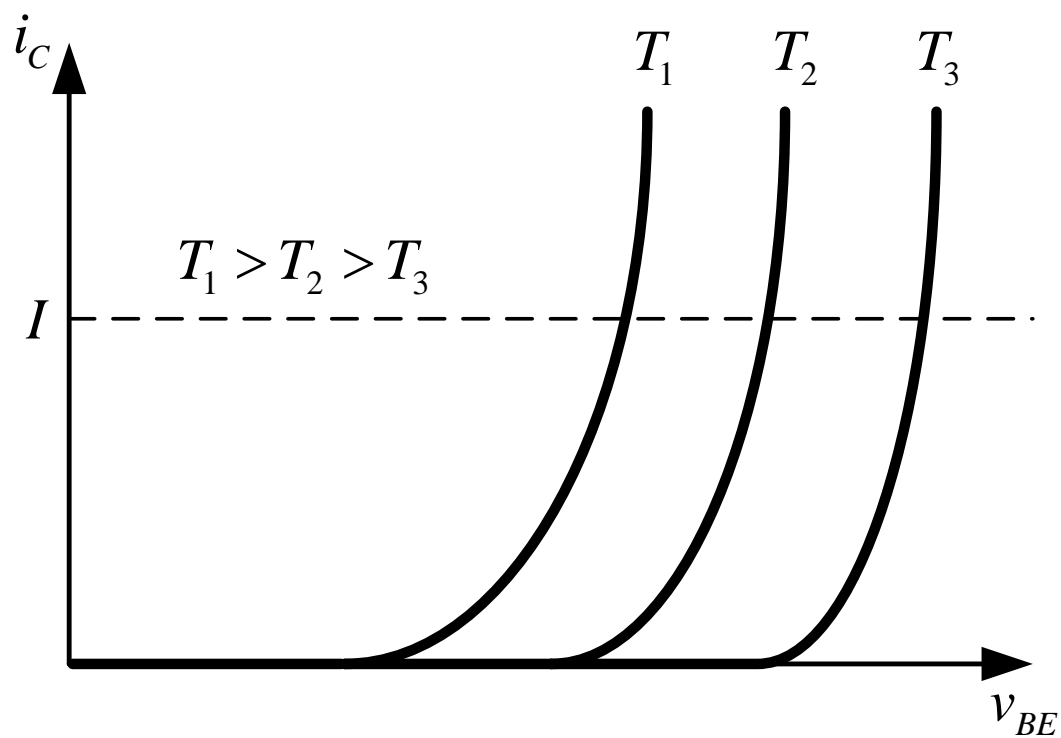
$$r_o = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta i_C} \approx V_A / I_C$$

三、三极管的转移特性

—— 描述输入电压 v_{BE} 与输出电流 i_C 之间的关系。



三极管转移特性随温度变化



四、三极管的参数

• 直流参数: $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 I_{CBO} 、 I_{CEO} 、 V_{CEsat}

• 交流参数: β 、 α 、 f_{β} 、 f_{α}

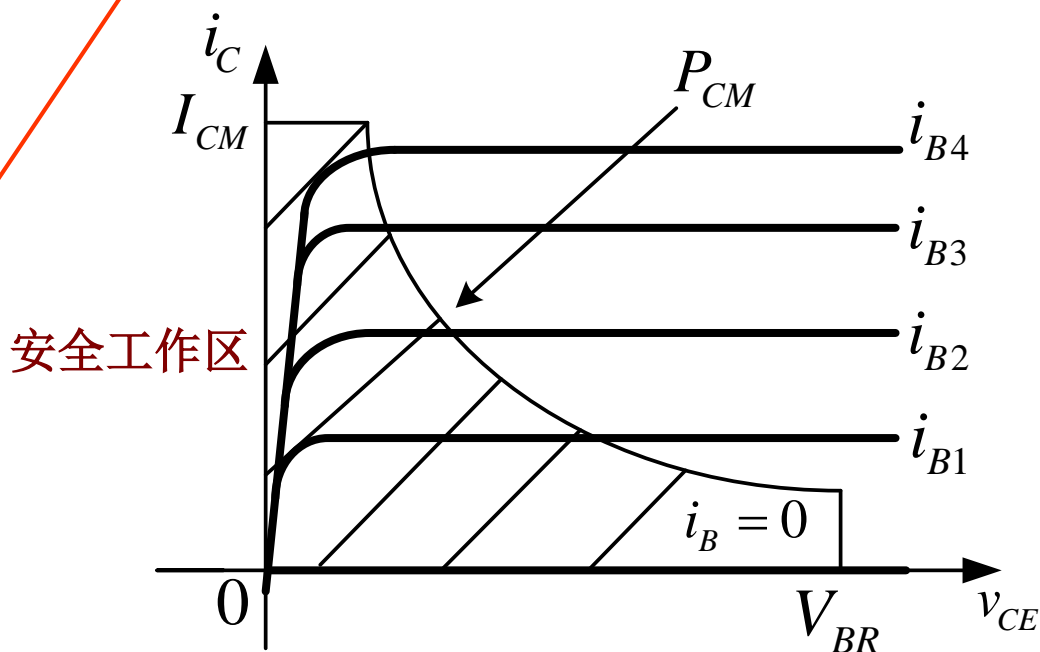
发射极开路, 在规定的集电极-基极电压下, 流过集电极-基极的反向电流

• 极限参数: I_{CM} 、 P_{CM} 、 $V_{(BR)CBO}$ 、 $V_{(BR)EBO}$ 、 $V_{(BR)CEO}$

最大
集电极电流

最大集电极耗散功率
 $P_{CM} = i_C v_{CE}$

发射极开路, C、B
间的反向击穿电压



8.2.2 小信号中频等效电路

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} = V_S + v_s$$

$$\begin{aligned} i_C &= I_S e^{v_{BE}/V_T} = I_S e^{(V_S + v_s)/V_T} = I_S e^{V_S/V_T} \cdot e^{v_s/V_T} \\ &= I_C e^{v_s/V_T} \end{aligned}$$

若 $v_s \ll V_T$

$$i_C \approx I_C + \frac{I_C}{V_T} v_s = I_C + i_c$$

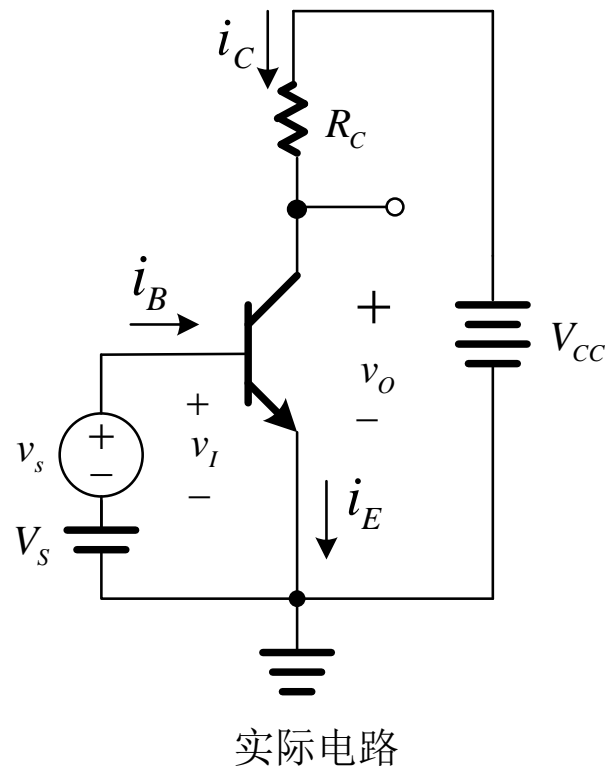
其中
$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_s$$

定义

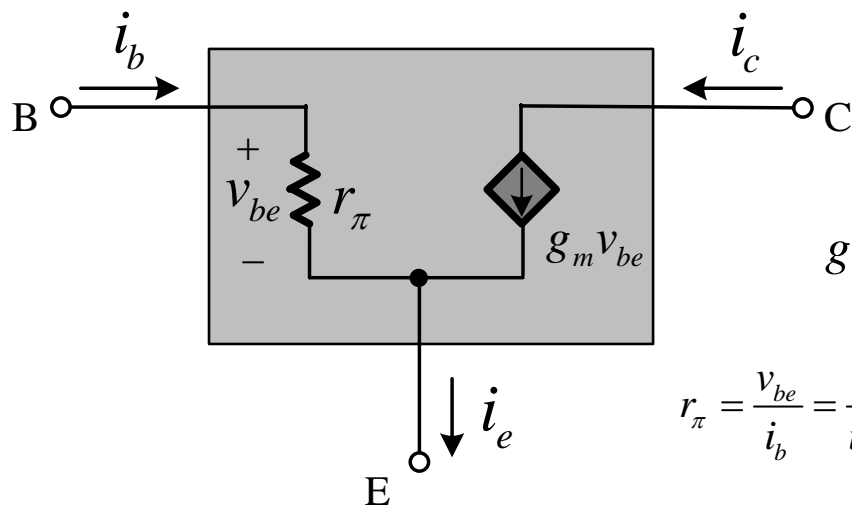
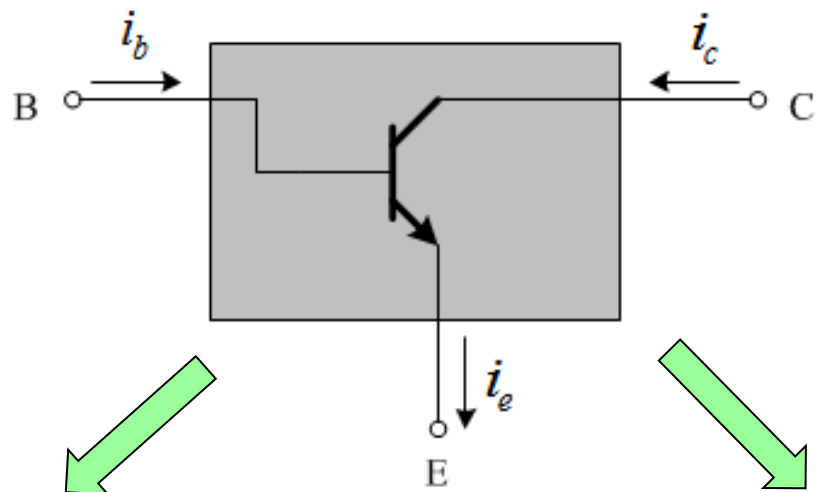
$$\text{跨导 } g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{i_c}{v_s} = \frac{I_C}{V_T}$$

$$i_c = g_m v_s = g_m v_{be}$$

$$i_c = \beta i_b$$



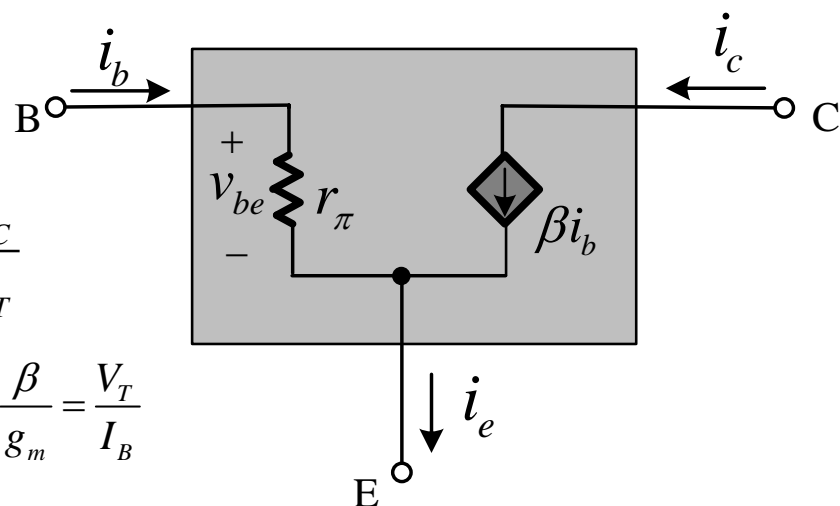
一、 π 型等效电路



压控型等效电路

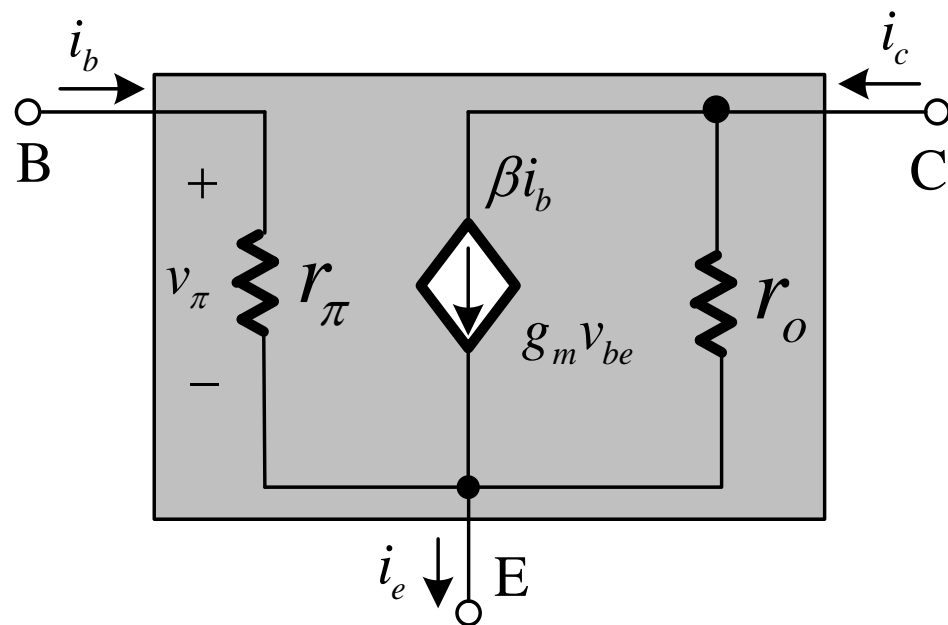
$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{v_{be}}{i_c / \beta} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$

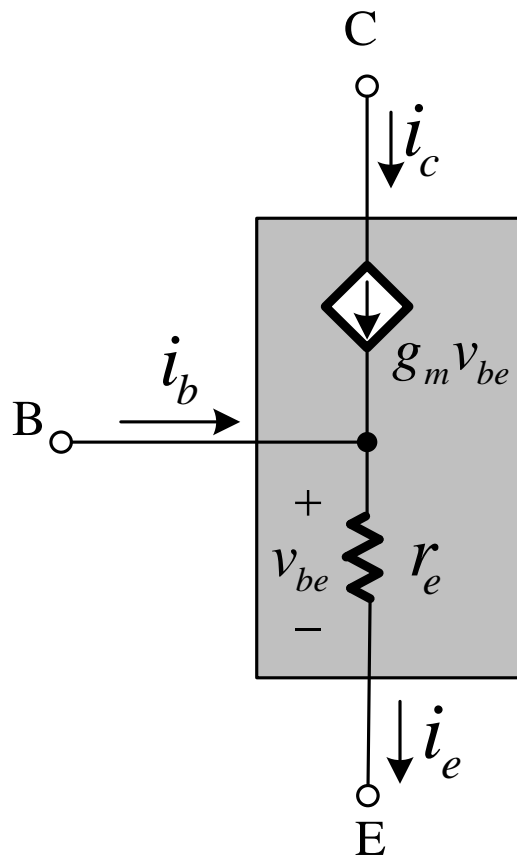


流控型等效电路

考虑厄利效应



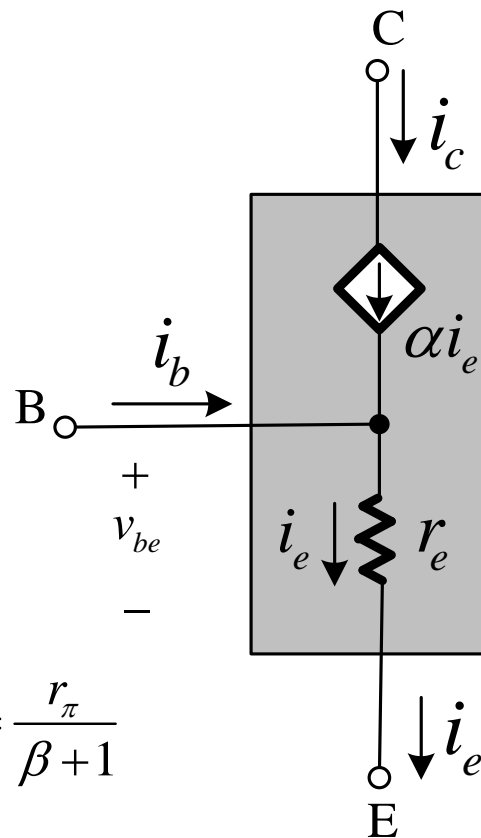
二、T型等效电路



电压控制型

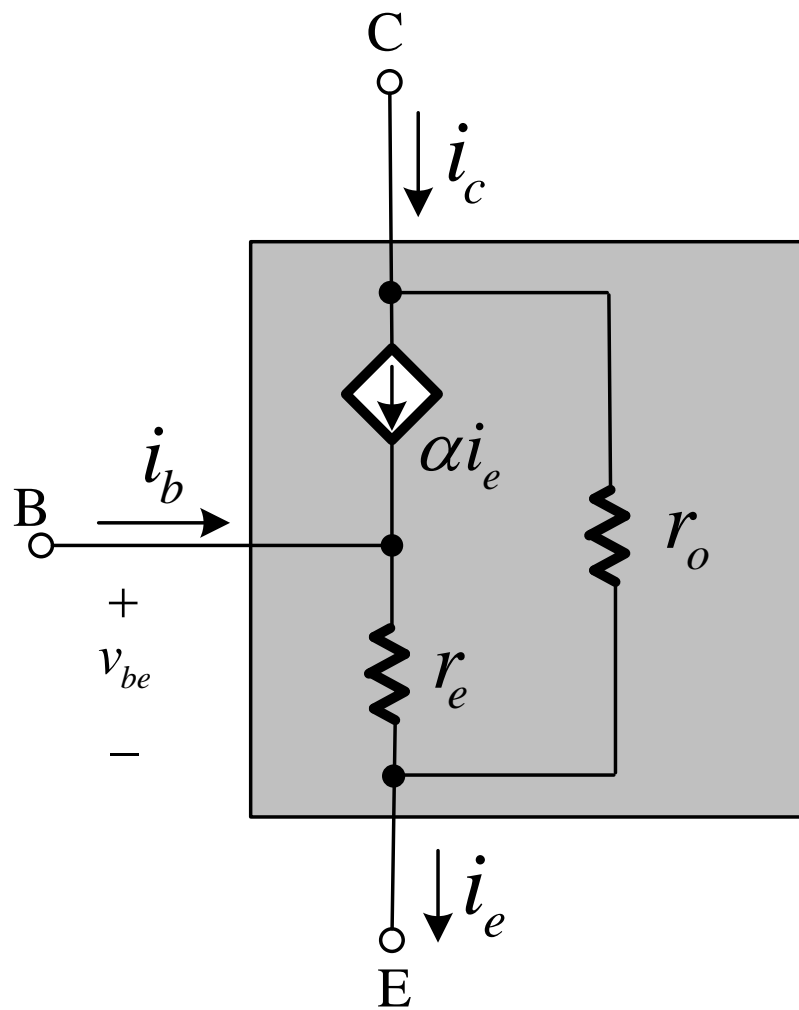
$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{r_\pi}{\beta + 1}$$

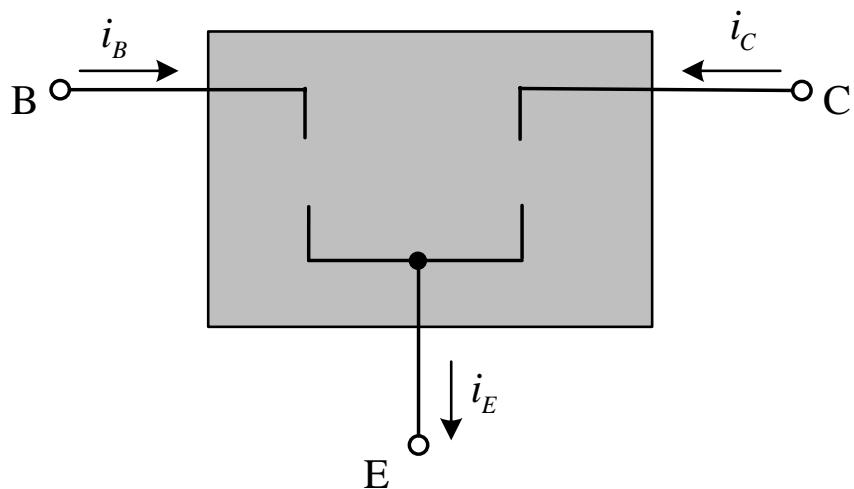


电流控制型

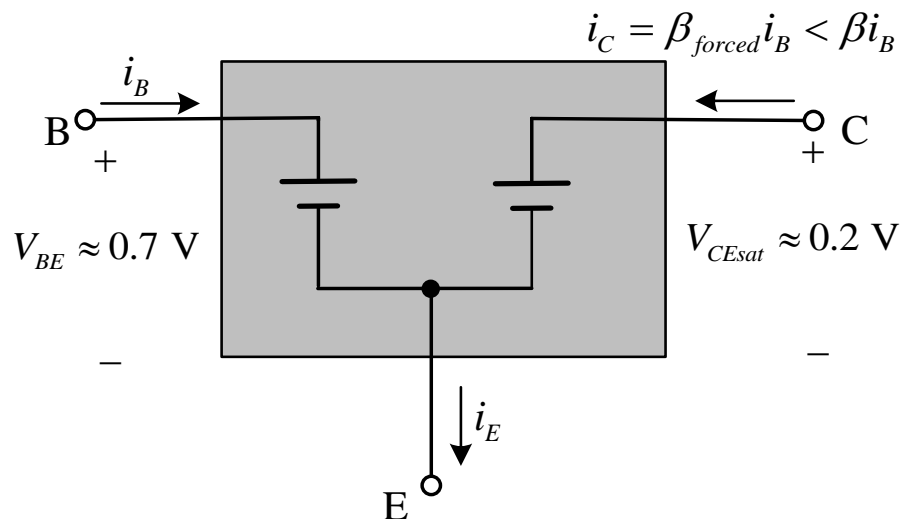
考虑厄利效应



三、截至和饱和时的等效电路



截至时的等效电路

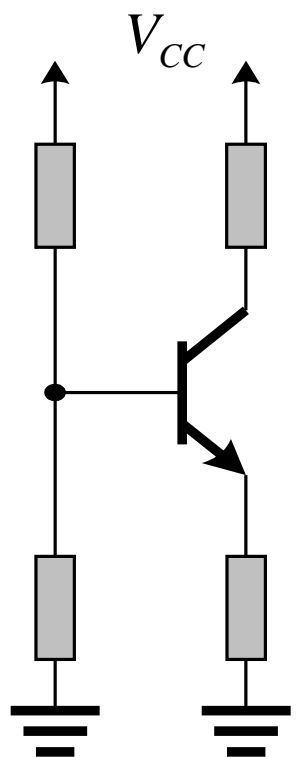


饱和时的等效电路 (npn)

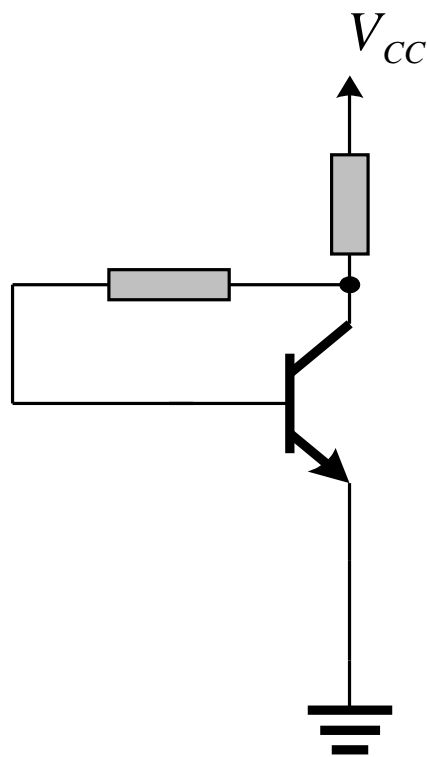
npn型三极管饱和时的等效电路相同吗？

8.3 三极管放大电路的构成及其分析

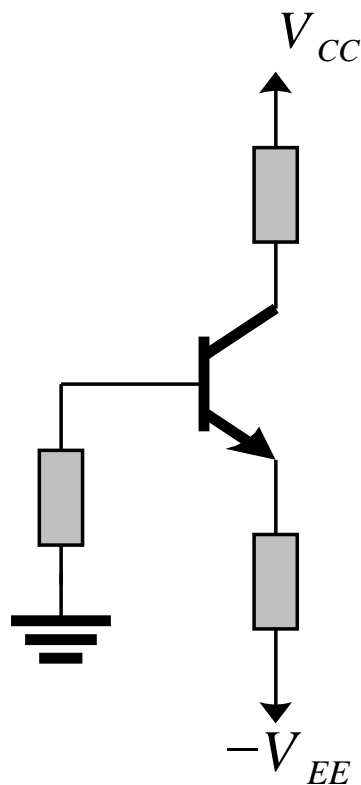
8.3.1 直流偏置电路及其分析



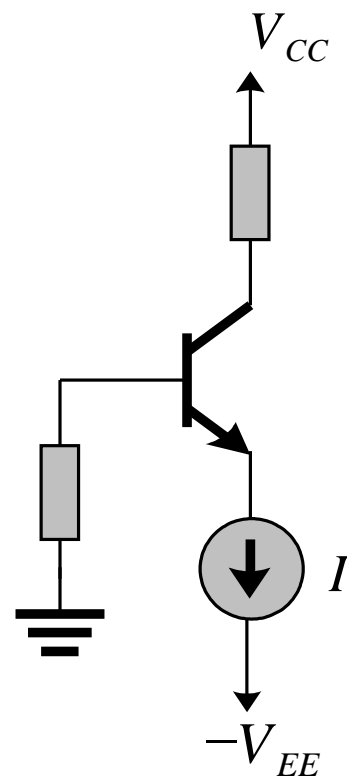
单电源供电



可变偏置电路

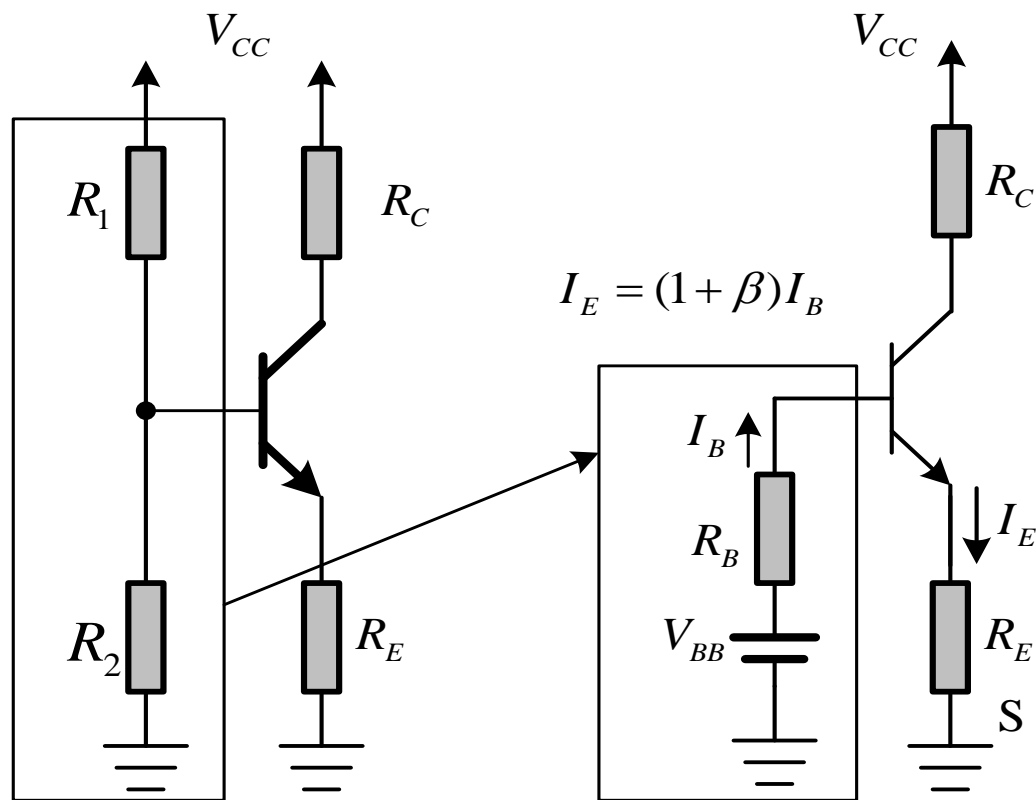


双电源供电



电流源偏置

一、分压式偏置电路（单电源供电）



$$V_{BB} = ?$$

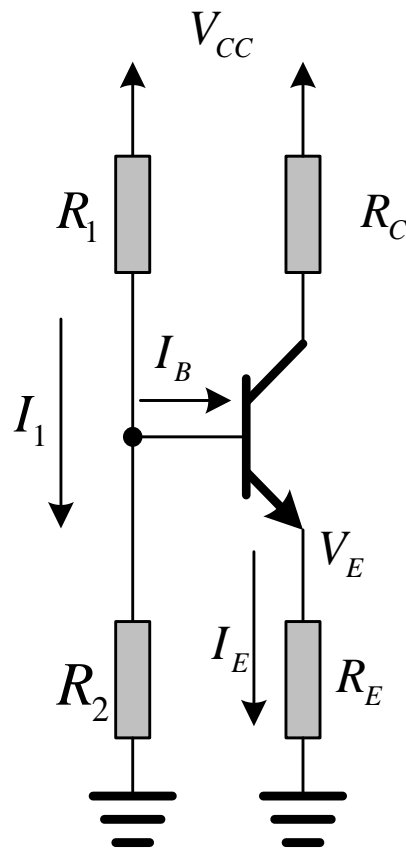
$$R_B = ?$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E = \frac{I_E R_B}{1 + \beta} + V_{BE} + I_E R_E$$

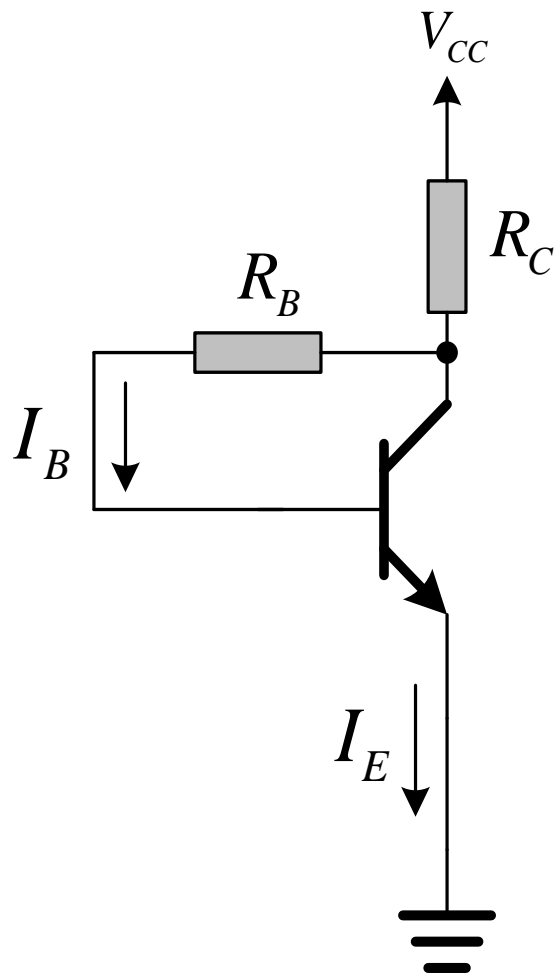
近似计算方法

$$I_1 \gg I_B$$

$$V_B \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

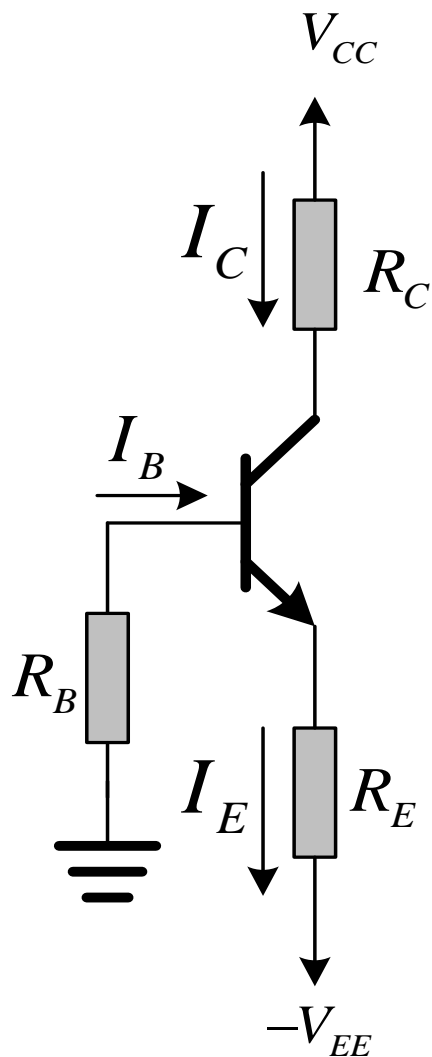


二、可变偏置电路



$$V_{CC} = I_E R_C + I_B R_B + V_{BE}$$

三、带发射极电阻的固定式偏置电路（双电源供电）

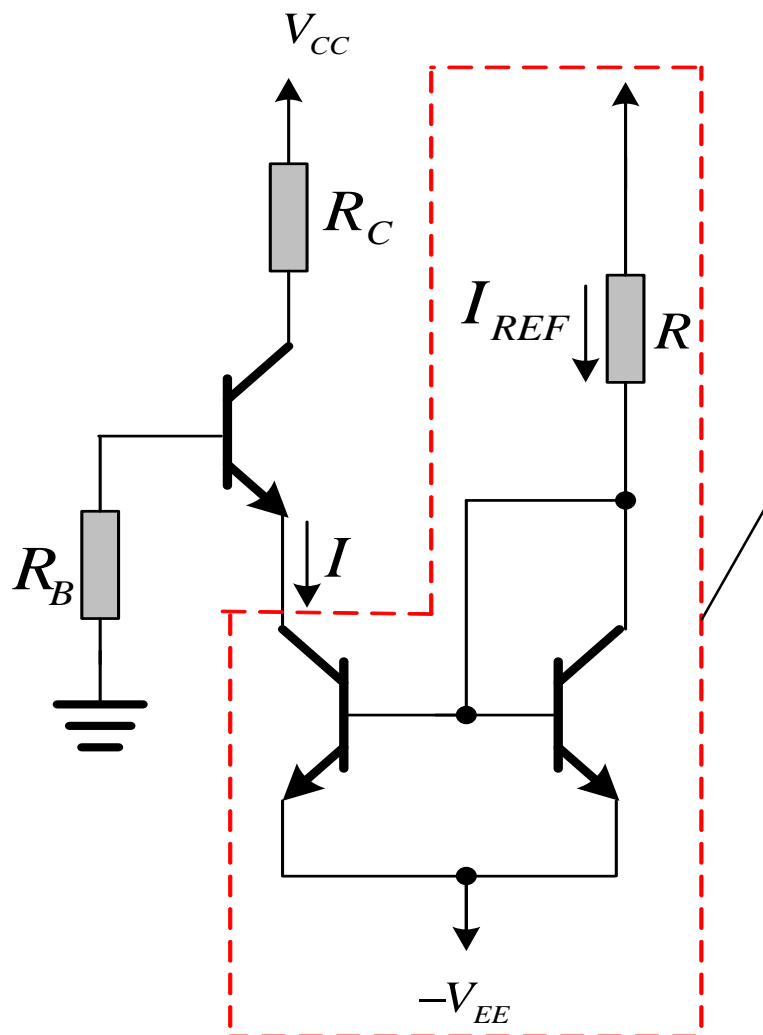
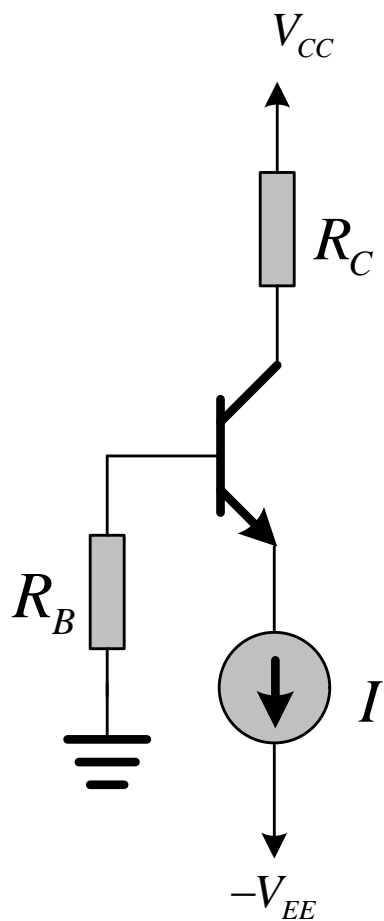


$$I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E = V_{EE}$$

四、电流源偏置

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - (-V_{EE}) - V_{BE}}{R}$$

$$I \approx I_{REF}$$



镜像电流源
电流镜
(Current Mirror)

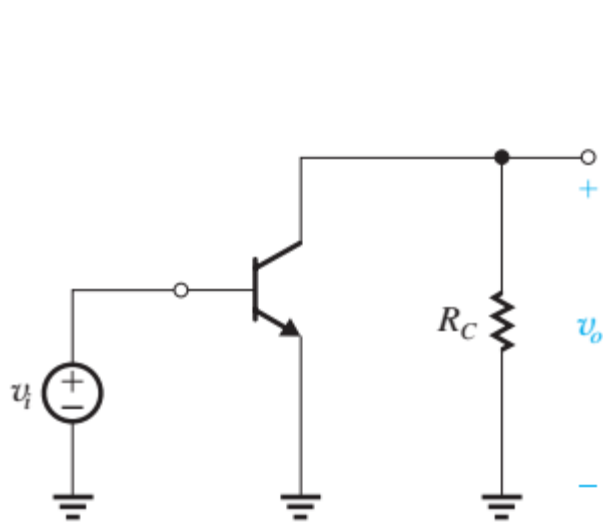
8.3.2 三种接法放大电路的分析计算

一、三种接法

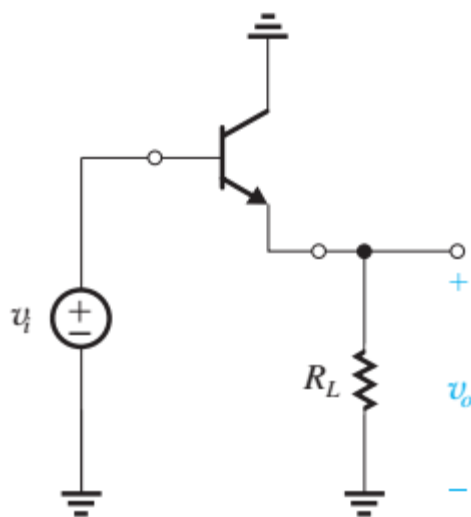
1、共射接法 **Common-Emitter (CE)**

2、共集接法 **Common-Collector (CC)**

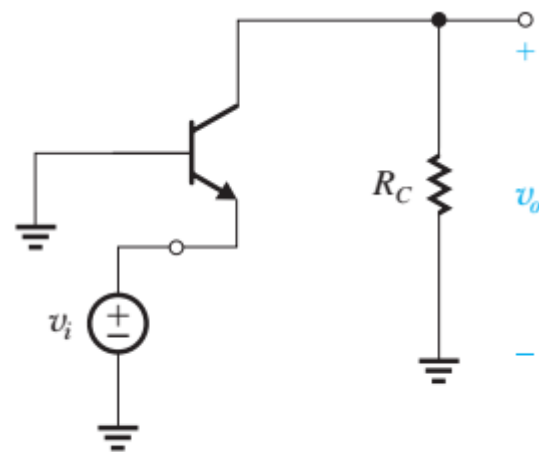
3、共基接法 **Common-Base (CB)**



(d) Common-Emitter (CE)



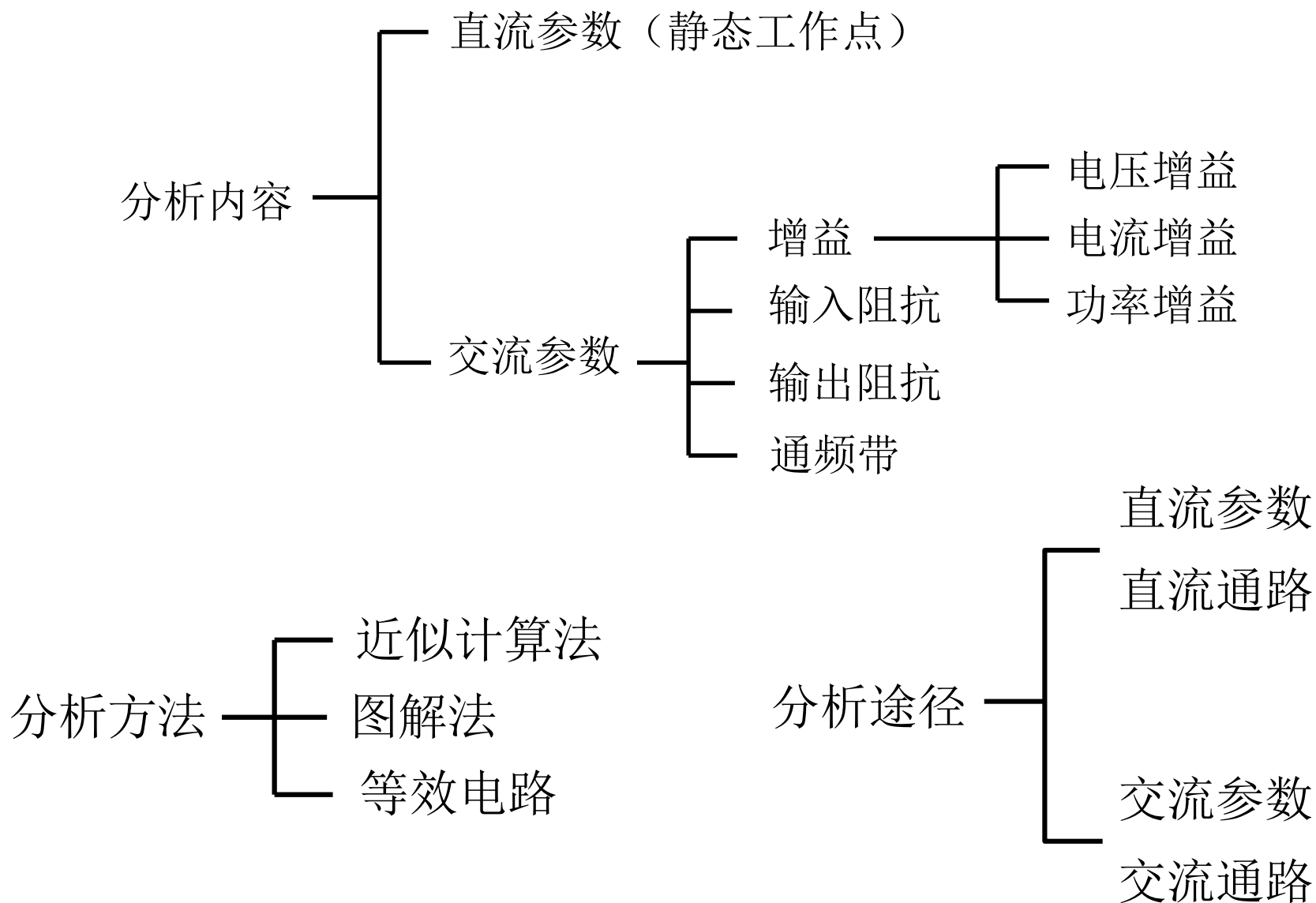
(f) Common-Collector (CC)
or Emitter Follower



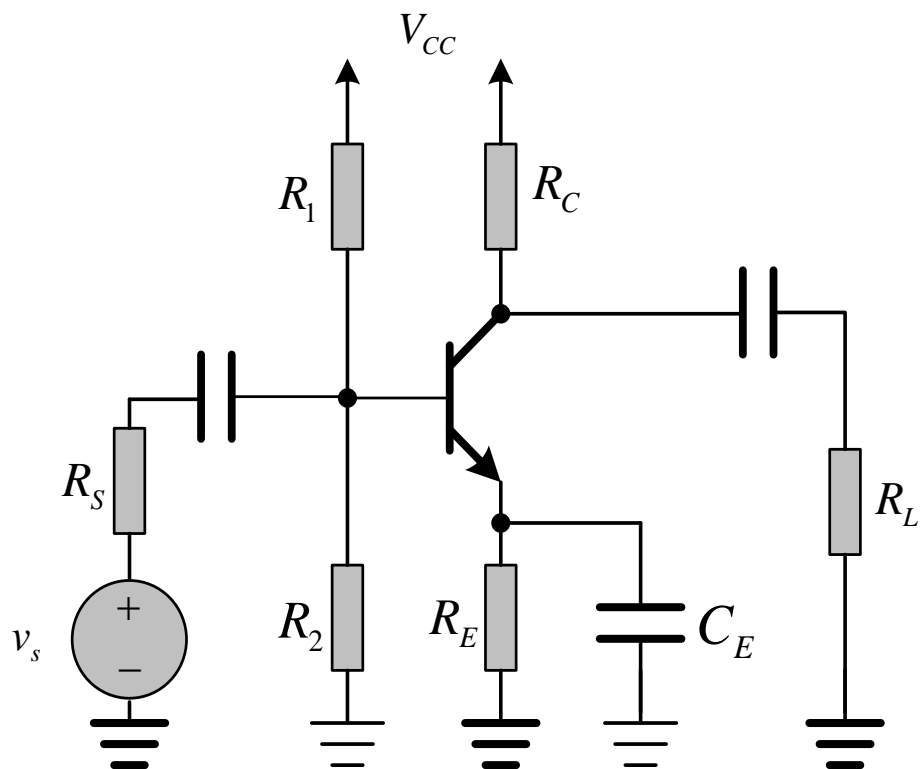
(e) Common-Base (CB)

二、放大器分析方法

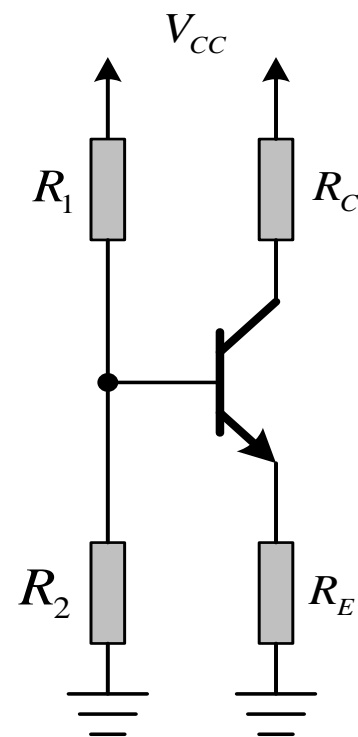
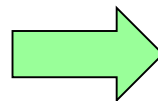
1、分析方法概述



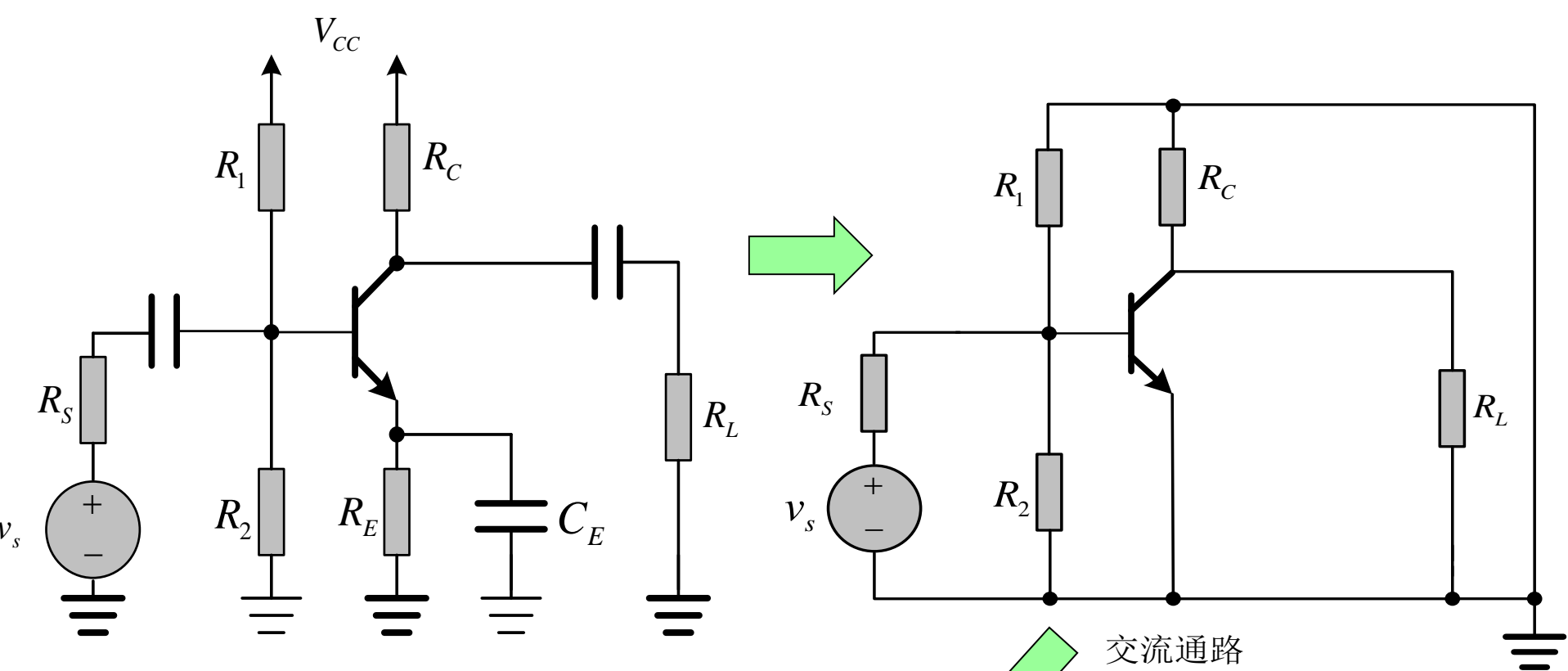
2、直流通路和交流通路



实际电路

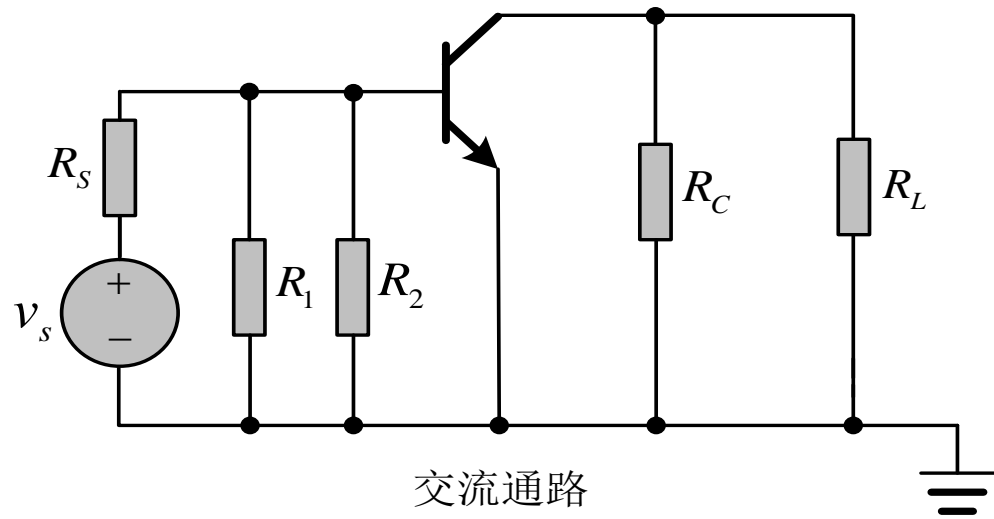


直流通路



实际电路

交流通路

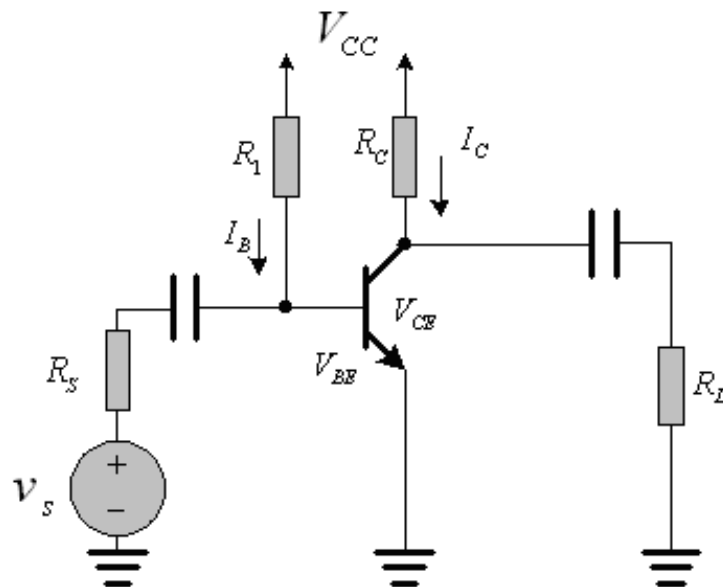


交流通路

3、图解法

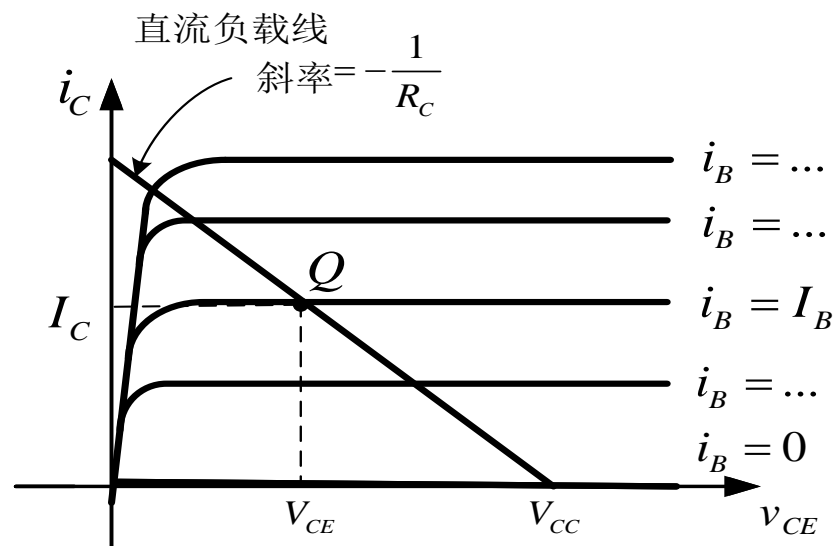
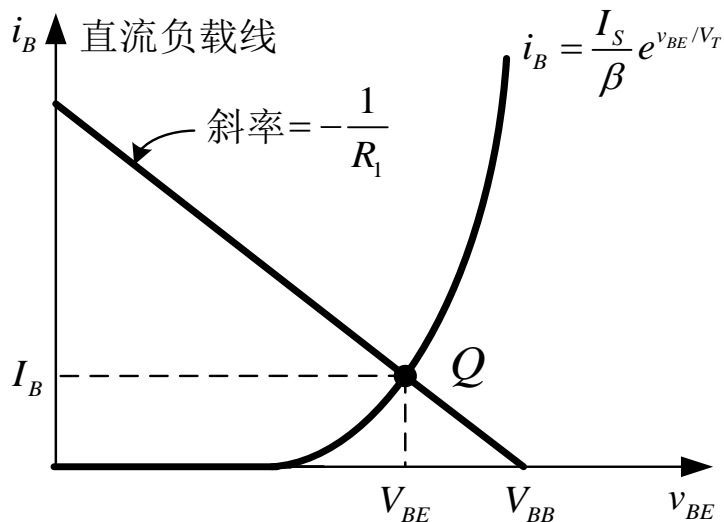
输入特性曲线

$$V_{CC} = i_B R_1 + v_{BE}$$

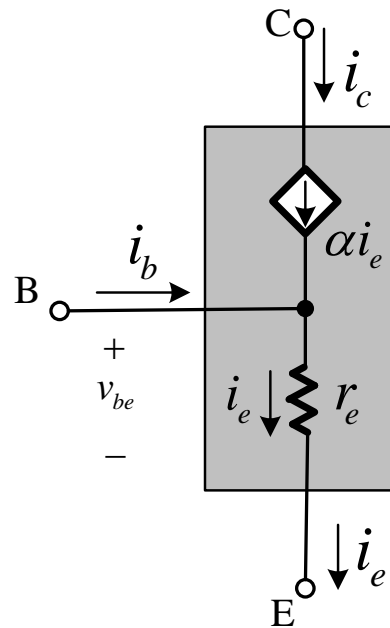
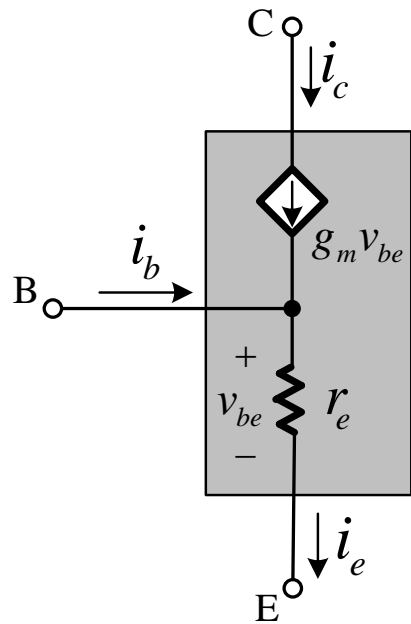
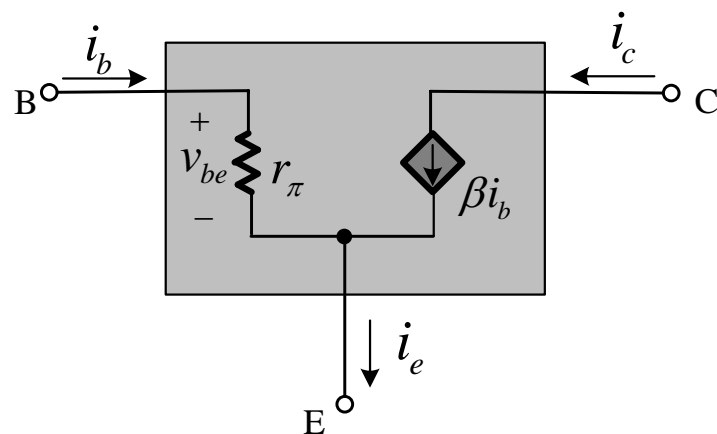
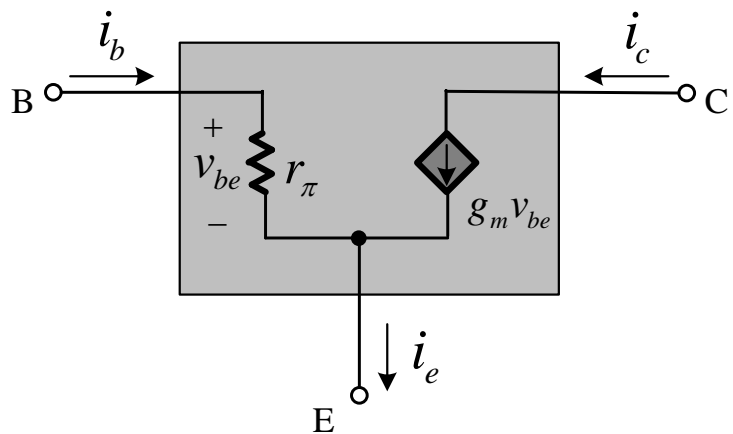


输出特性曲线

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$

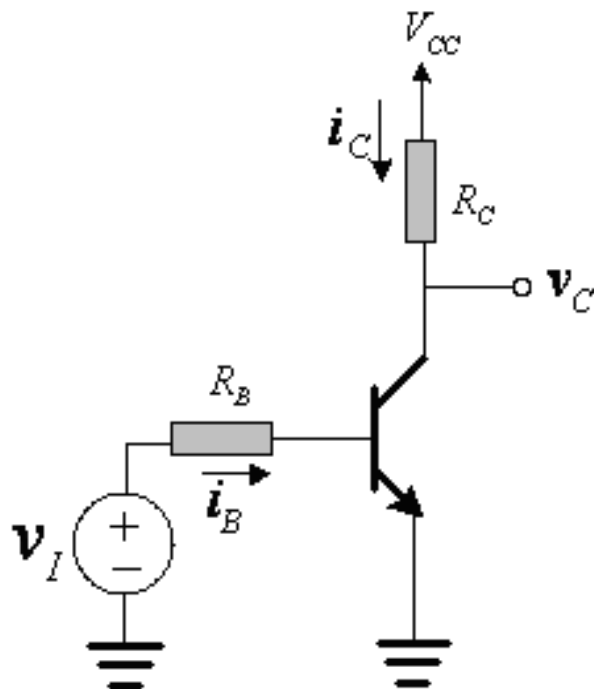


4、等效电路法



三、三极管放大电路工作区的确定和选择

例



NPN三极管构成的放大电路

截止区

$$v_I \leq 0.5V$$

放大区

$$v_I > 0.7V$$

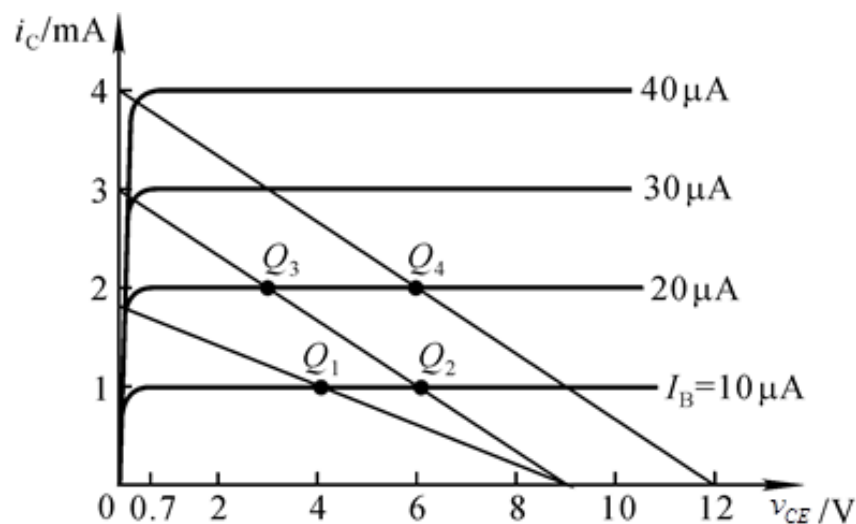
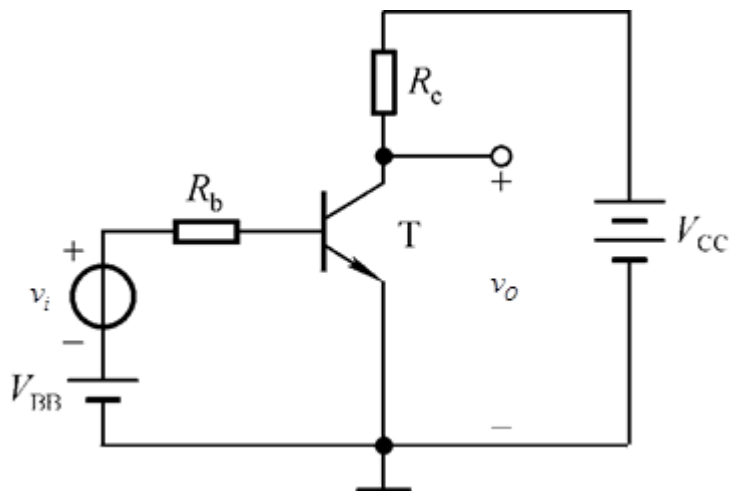
饱和区

$$v_{CB} < 0$$

PNP三极管构成的放大电路？

讨论

$$v_O = v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C = V_{CEQ} - i_c R_C$$

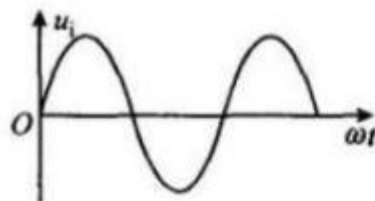


1. 在什么参数、如何变化时 $Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4$?
2. 从输出电压上看, Q_2 点下最易产生截止失真? Q_3 点下最易产生饱和失真? Q_4 点下 V_{om} 最大?
3. 设计放大电路时, 应根据什么选择 V_{CC} ?

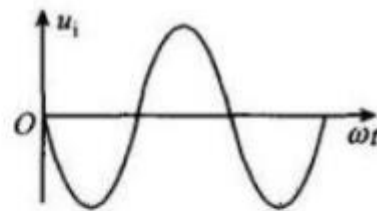
截止失真和饱和失真

饱和失真：是晶体管因Q点过高出现的输出回路失真。当Q点过高时，虽然基极动态电流为不失真的正弦波，但是由于输入信号正半周靠进峰值的某段时间内晶体管进入饱和区，导致集电极动态电流产生顶部失真，集电极电阻上的电压波形随之产生同样的失真。由于输出电压与集电极电阻上的电压变化相位相反，从而导致输出波形产生底部失真。

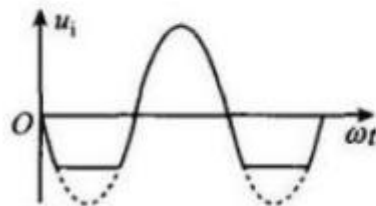
截止失真：由晶体管截止造成的输入回路失真。当Q点过低时，在输入信号负半周靠进峰值的某段时间内，晶体管b-e间电压总量小于其开启电压，此时，晶体管截止，因此，基极电流将产生底部失真。



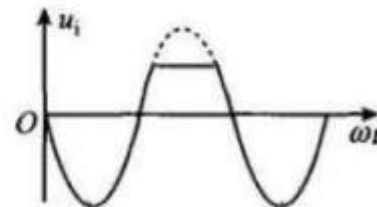
输入波形



正常输出波形



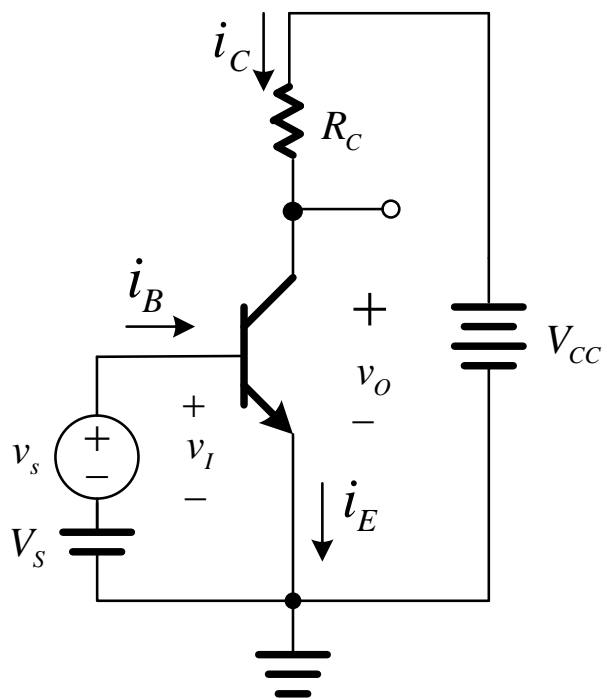
饱和失真的输出波形



截止失真的输出波形

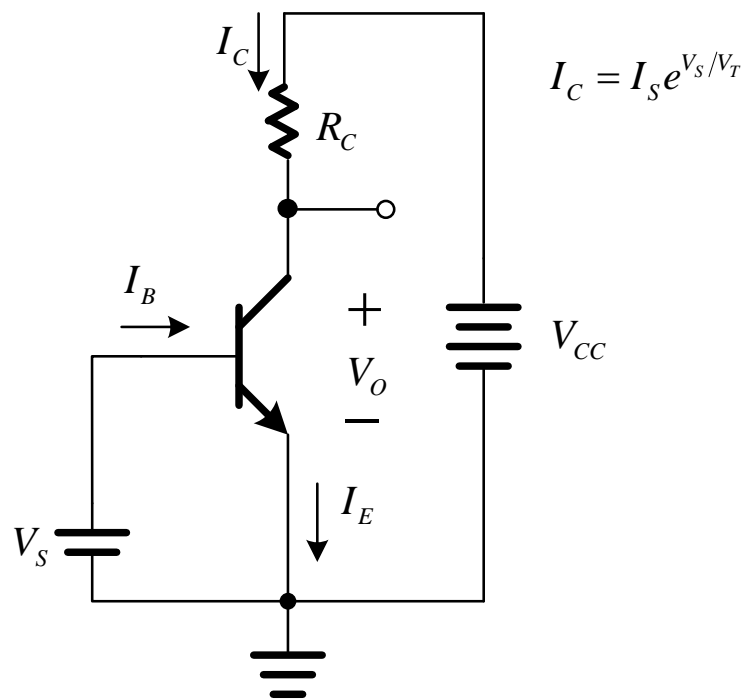
四、三极管放大器分析

共射放大器



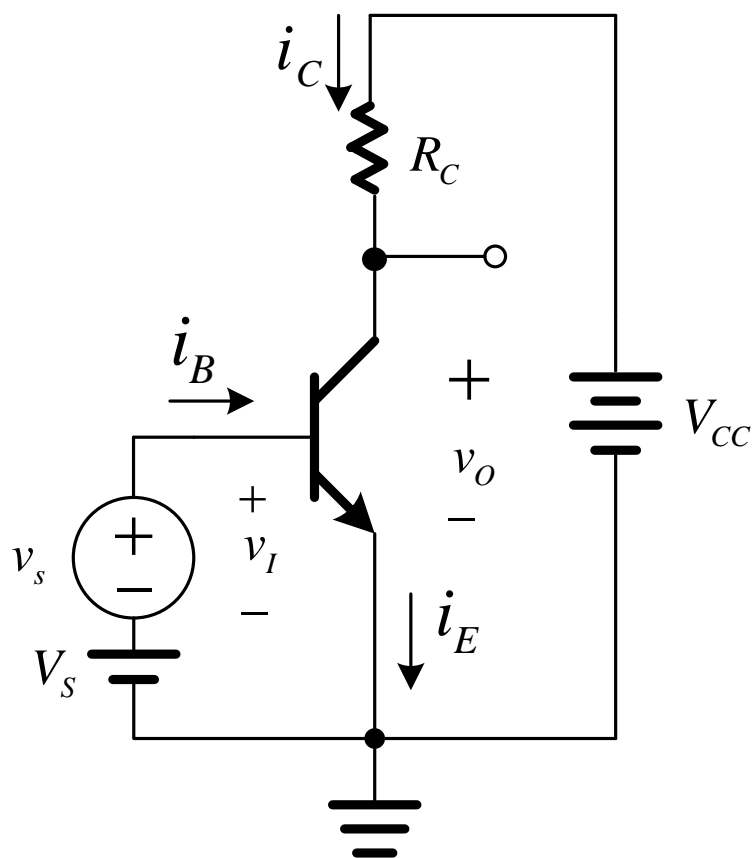
实际电路

1、直流状态



直流通路

2、集电极电流和跨导

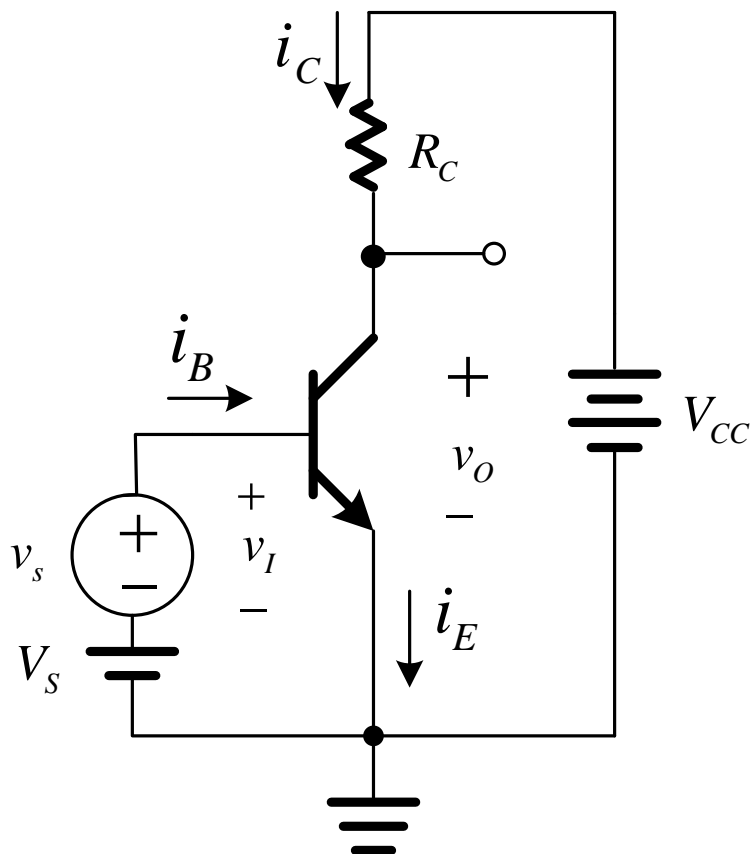


实际电路

$$i_c = g_m v_s$$

$$\text{跨导 } g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

3、基极电流和基极输入电阻



实际电路

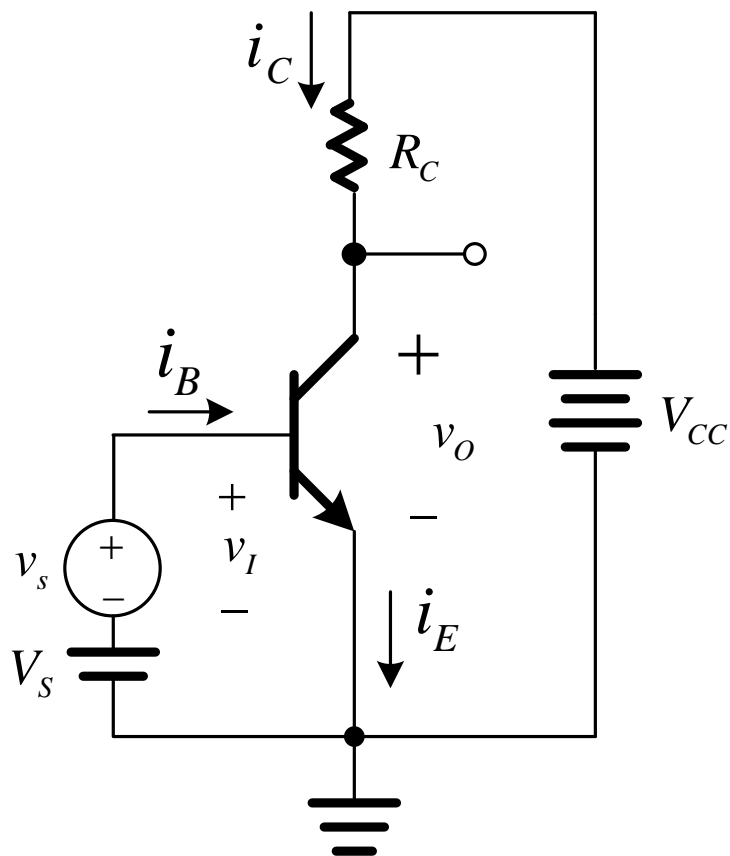
$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C + i_c}{\beta} = I_B + i_b$$

$$i_b = \frac{g_m v_s}{\beta} = \frac{v_s}{\frac{\beta}{g_m}} = \frac{v_s}{r_\pi}$$

基极输入电阻

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$

4、发射极电流和射极输入电阻



实际电路

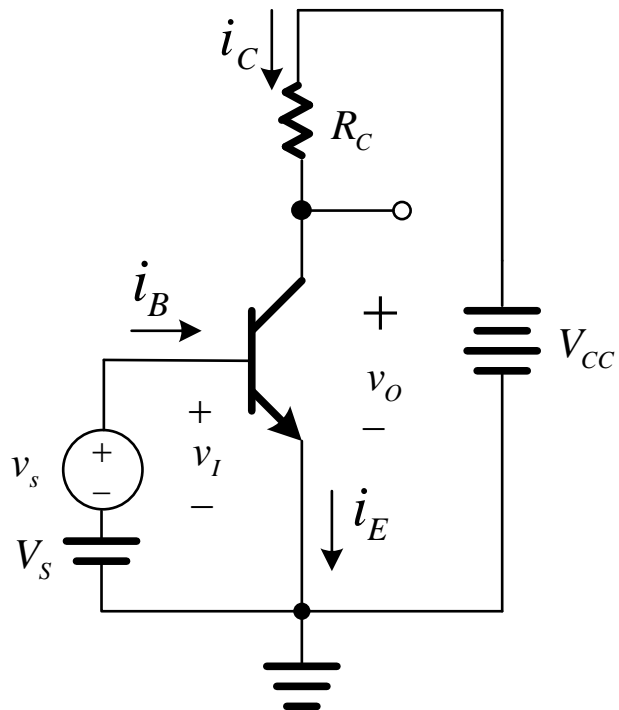
$$i_E = I_E + i_e$$

$$i_e = \frac{I_C}{\alpha V_T} v_s = \frac{I_E}{V_T} v_s = \frac{g_m}{\alpha} v_s$$

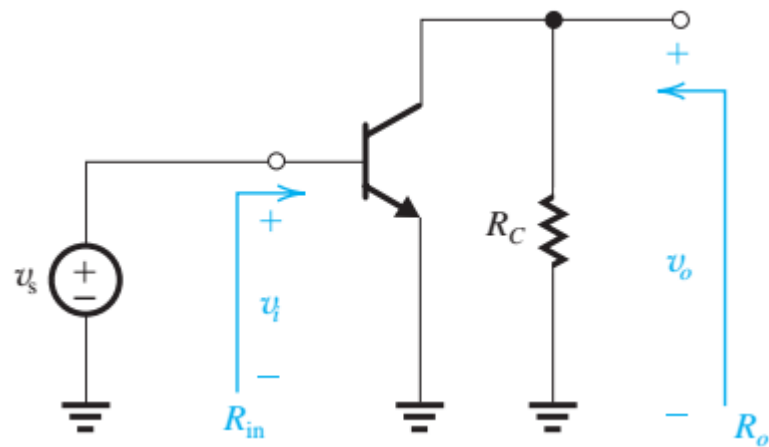
发射极输入电阻

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

5、电压增益

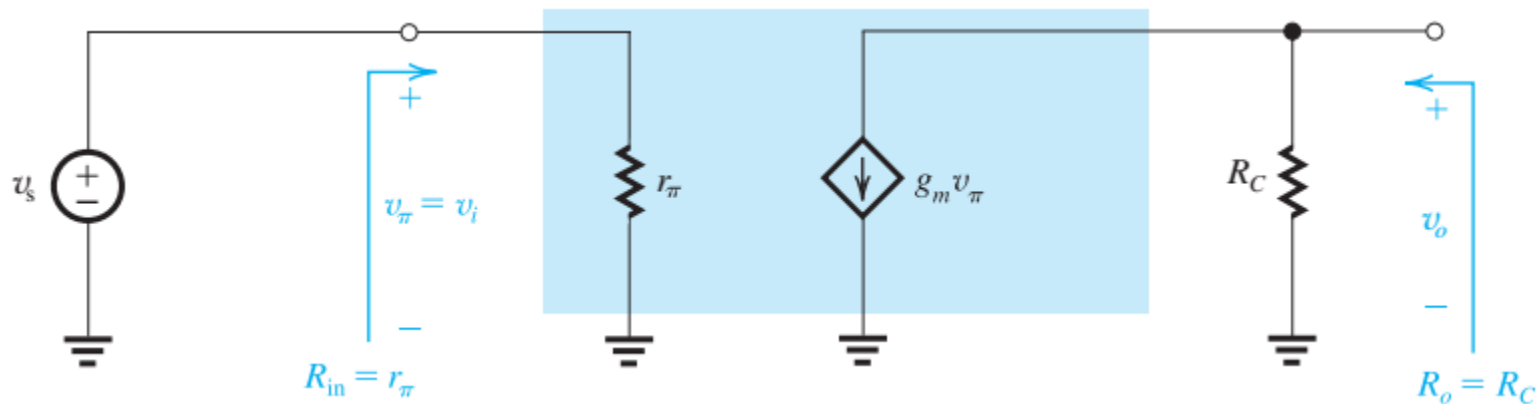


实际电路

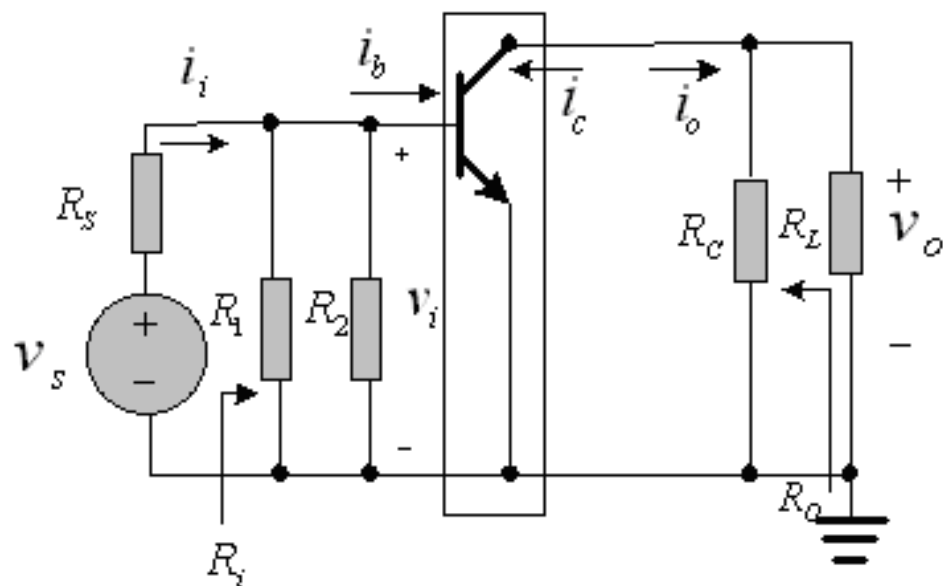


$$A_v = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{-i_c R_C}{v_{be}} = -g_m R_C$$

混合 π 型等效电路适合分析发射极无电阻的共射放大器电路。



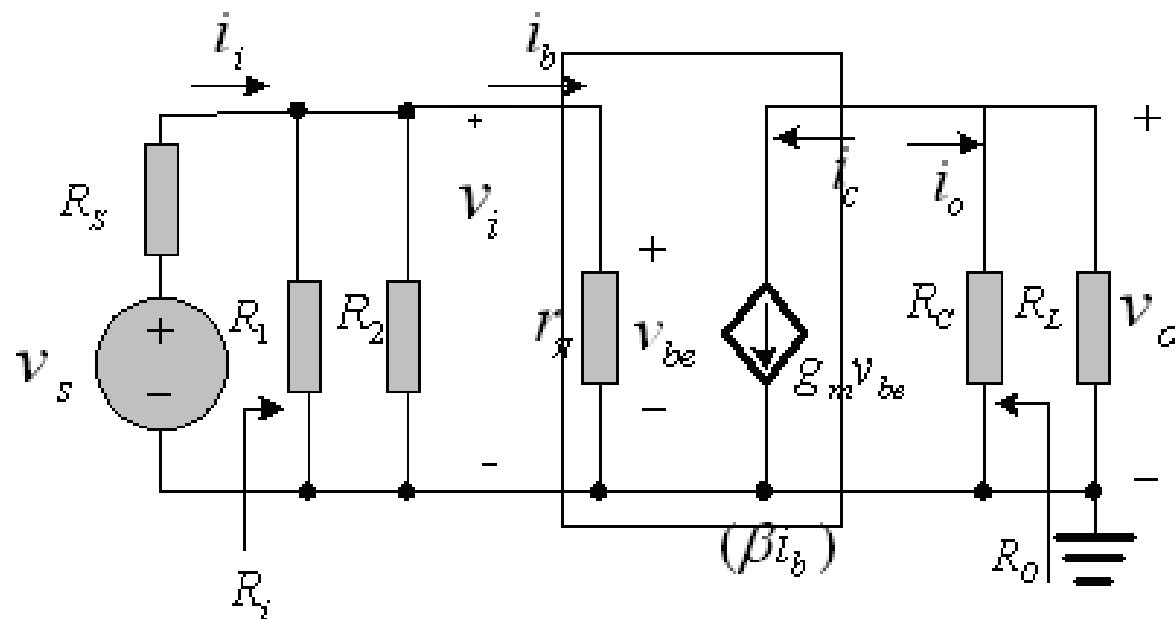
例 若共射放大器连接负载

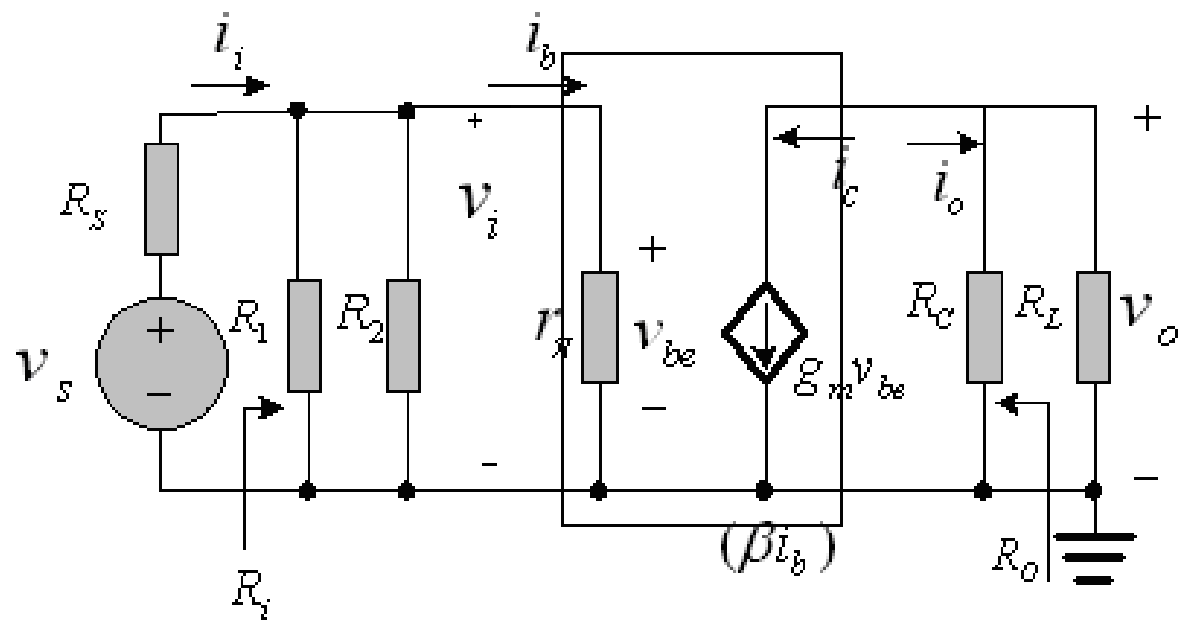


求电压增益 A_v

求输入阻抗 R_i

求输出阻抗 R_o





$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{be} R_C // R_L}{v_{be}} = -g_m R_C // R_L = -\frac{\beta R_C // R_L}{r_\pi}$$

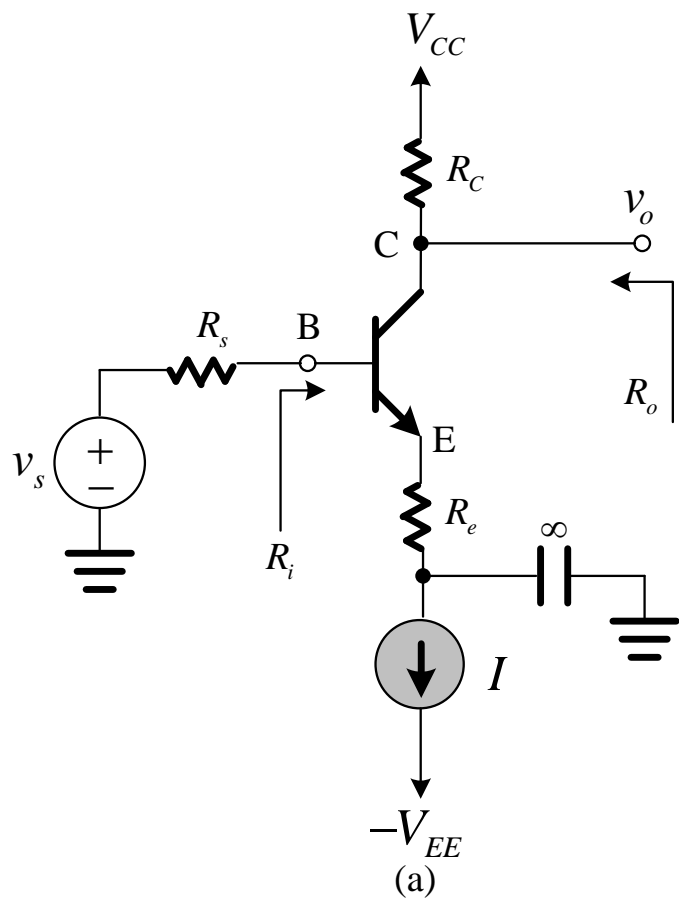
$$R_i = R_1 // R_2 // r_\pi$$

$$R_o = R_C$$

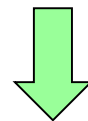
特点：

输入电阻中等，输出电阻大，频带窄！放大电压和电流！

例 发射极接有电阻的共射放大器



R_e 的作用



$T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_E \uparrow \rightarrow V_{BE} \downarrow$ (V_B 基本不变) $\rightarrow I_C \downarrow$

关于反馈的一些概念：

将输出量通过一定的方式引回输入回路影响输入量的措施称为反馈。

I_C 通过 R_e 转换为 ΔV_E 影响 V_{BE}

直流通路中的反馈称为直流反馈。

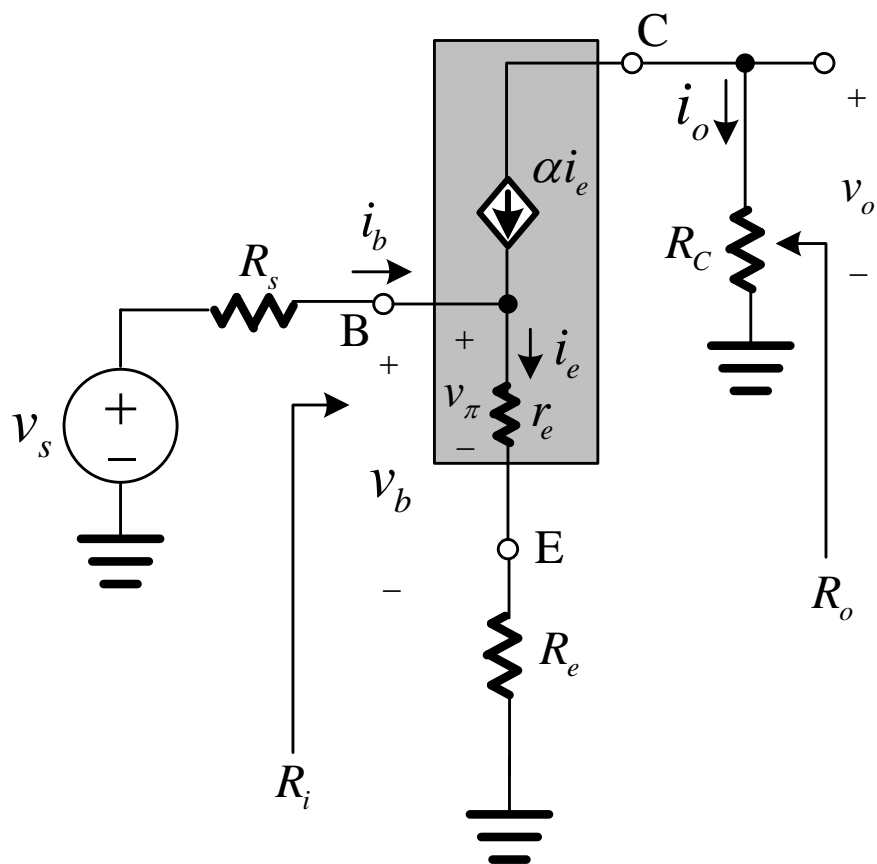
反馈的结果使输出量的变化减小的称为负反馈，反之称为正反馈。

温度升高 I_C 增大，反馈的结果使之减小

R_e 起直流负反馈作用，其值越大，反馈越强， Q 点越稳定。

R_e 有上限值吗？

发射极接有电阻的共射放大器适合采用T型等效电路进行分析



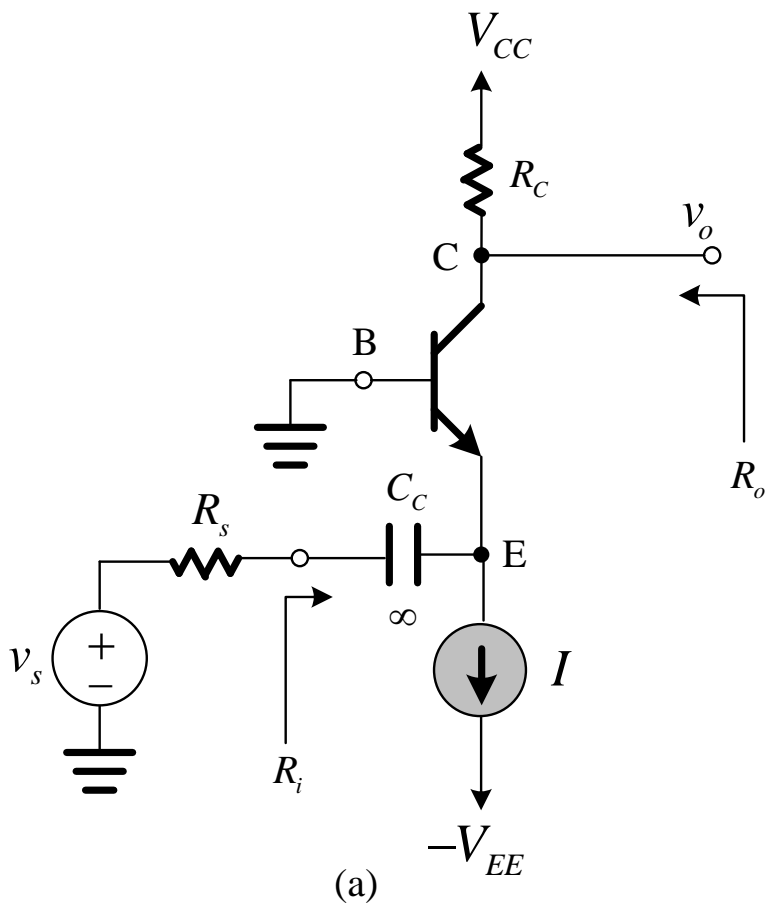
小信号等效电路

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\alpha i_e R_C}{i_e (r_e + R_e)} = -\alpha \frac{R_C}{r_e + R_e}$$

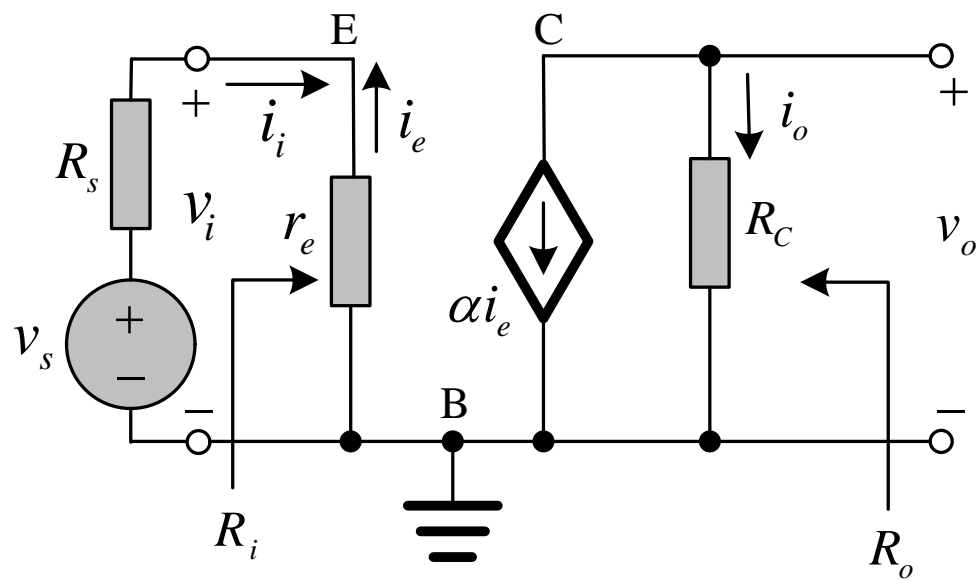
$$R_i = \frac{v_i}{i_b} = (\beta + 1)(r_e + R_e)$$

$$R_o = R_C$$

共基放大器



共基放大器适合采用T型等效电路进行分析



T型等效电路

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\alpha i_e R_C}{-i_e r_e} = \frac{\alpha R_C}{r_e} = g_m R_C$$

$$A_i = \frac{i_c}{i_e} \approx 1$$

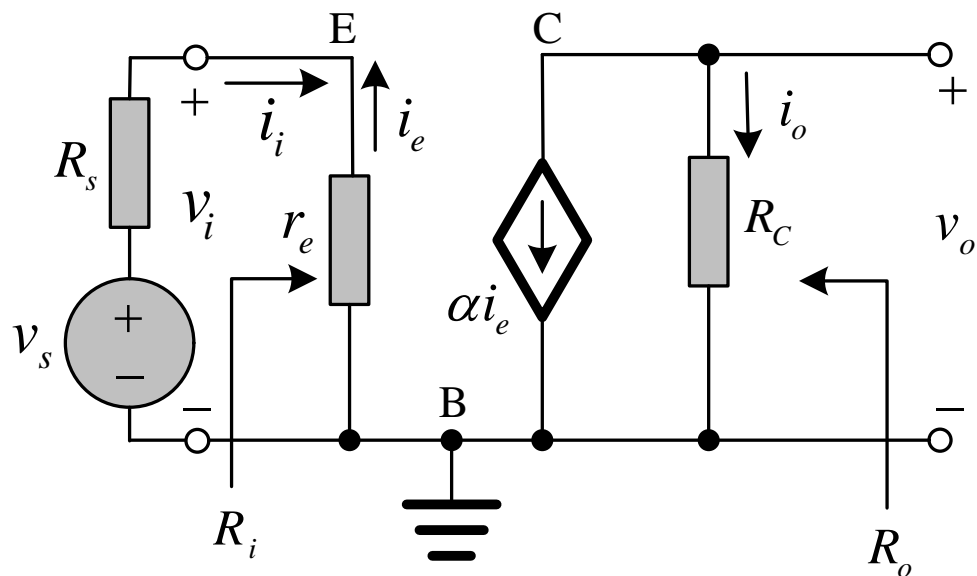
共基放大器又称为**电流缓冲器**。

$$R_i = r_e$$

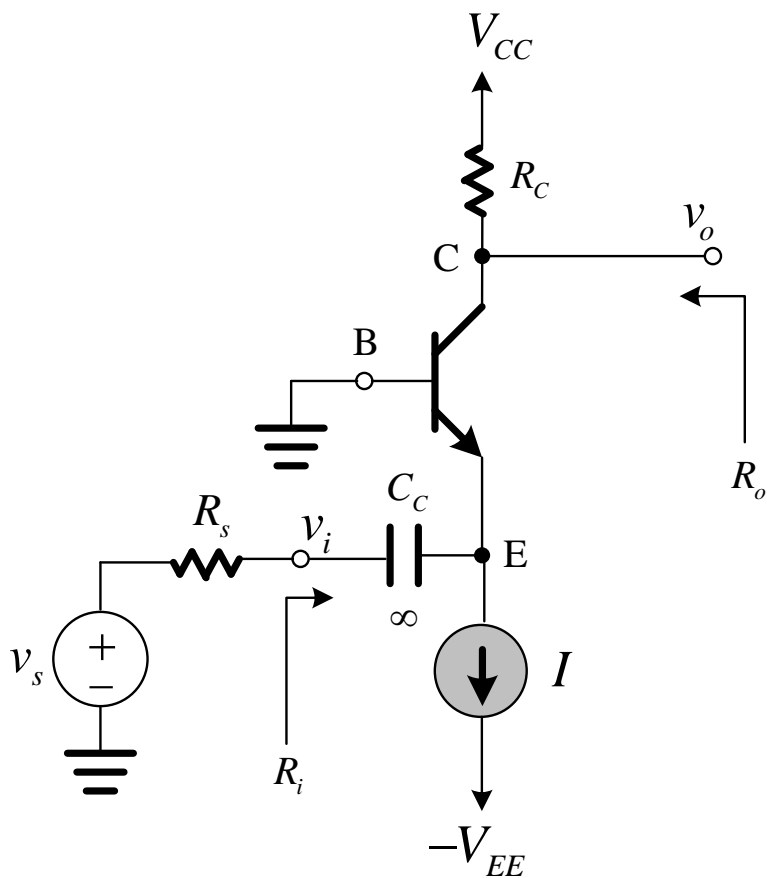
$$R_o = R_C$$

特点：

输入电阻小，频带宽！只放大电压，不放大电流！



T型等效电路



注意：

其实不需要用等效电路也能分析电路。

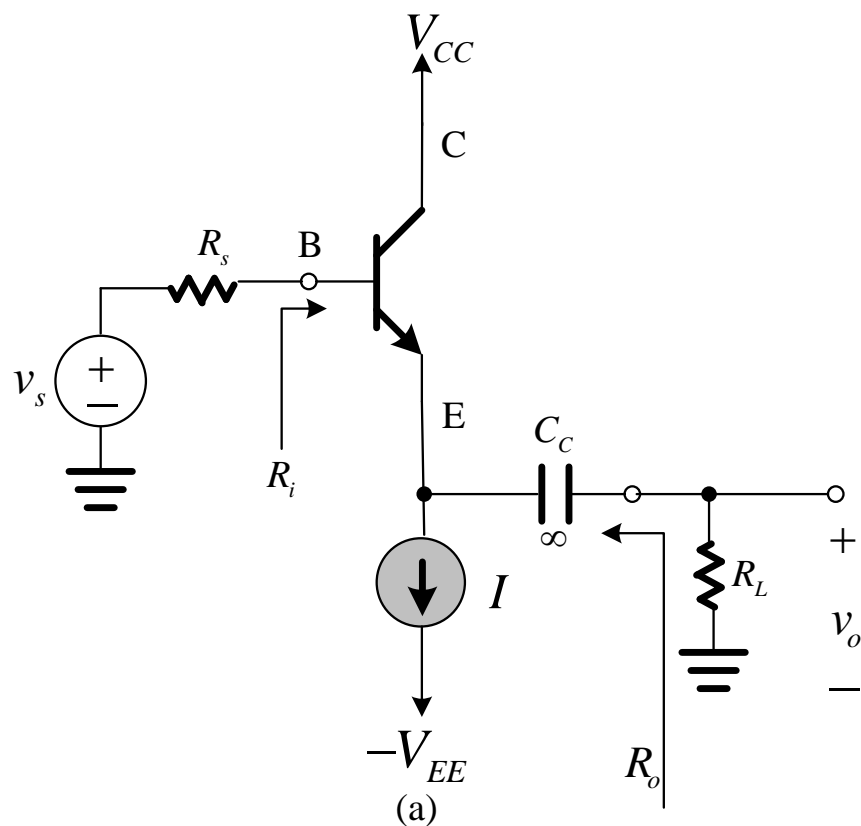
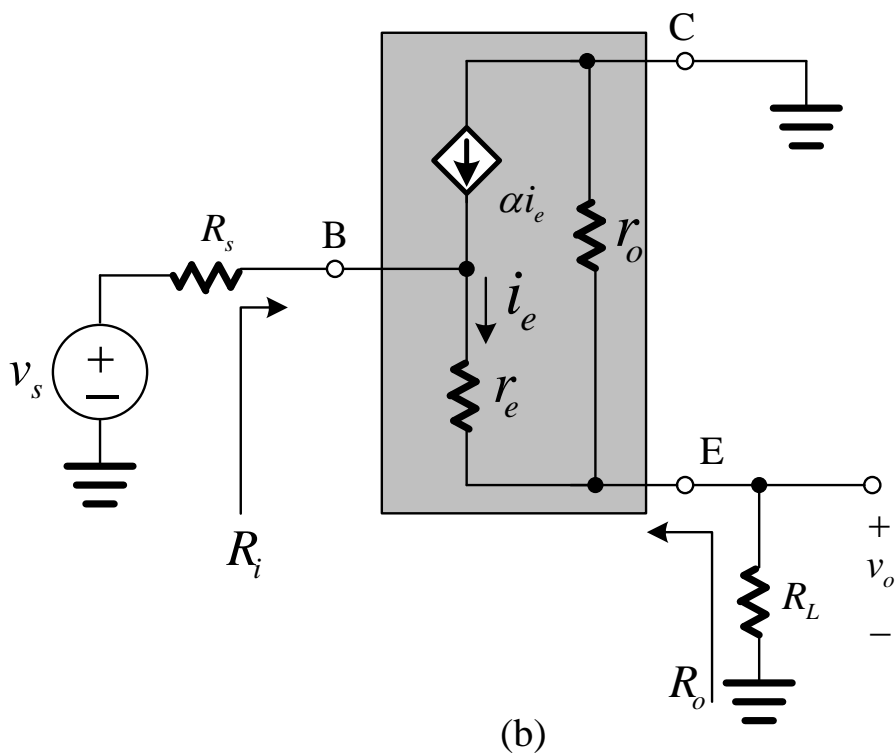
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_c R_C}{-i_e r_e} = \frac{\alpha R_C}{r_e} = g_m R_C$$

$$R_i = r_e$$

$$R_o = R_C$$

共集放大器

共集放大器适合采用T型等效电路进行分析



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L // r_o}{r_e + R_L // r_o} \approx 1$$

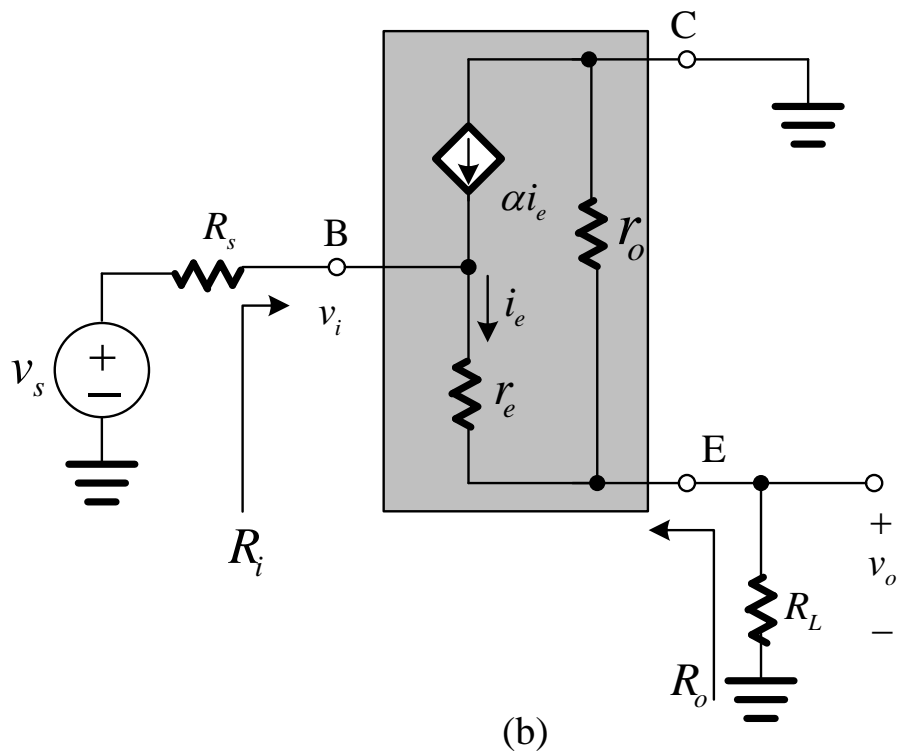
共集放大器又称为
射极跟随器 (Emitter Follower)。

$$R_i = (\beta + 1)(r_e + r_o // R_L)$$

$$R_o = r_o // \left(r_e + \frac{R_s}{\beta + 1} \right)$$

特点:

输入电阻大，输出电阻小，频带中等！只放大电流，不放大电压！

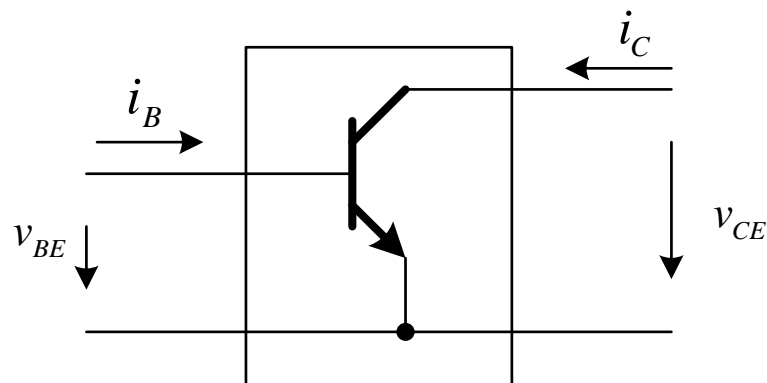


三种接法的比较：空载情况下

• 接法	共射	共集	共基
• A_v	大	小于1	大
• A_i	β	$1+\beta$	α
• R_i	中	大	小
• R_o	大	小	大
• 频带	窄	中	宽

6、H 参数等效电路

把晶体管看成是一个二端口的网络。



$$\left\{ \begin{array}{l} v_{BE} = f(i_B, v_{CE}) \\ i_C = F(i_B, v_{CE}) \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} dv_{BE} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{i_B} dv_{CE} \\ di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{i_B} dv_{CE} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{be} = h_{11} i_b + h_{12} v_{ce} \\ i_c = h_{21} i_b + h_{22} v_{ce} \end{array} \right.$$

$$h_{11} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} = h_{ie}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} = h_{re}$$

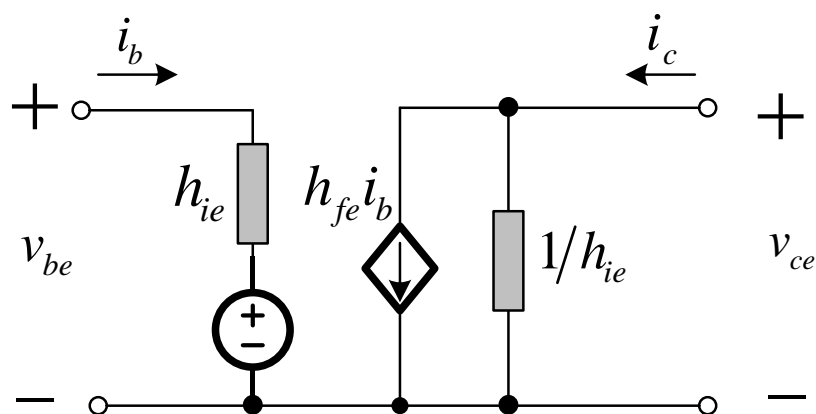
$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{BE}} = h_{fe}$$

$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} = h_{oe}$$

根据以下等式可画出对应的等效电路

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$



当晶体管工作在放大区时, v_{ce} 对输入特性曲线和 i_c 的影响很小, 可以认为 $h_{re} = h_{oe} = 0$

