



模拟电路基础（下）

三极管与其放大电路

3.2 三极管放大电路分析

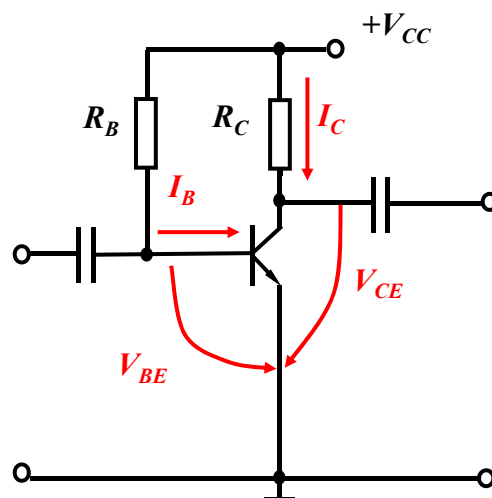
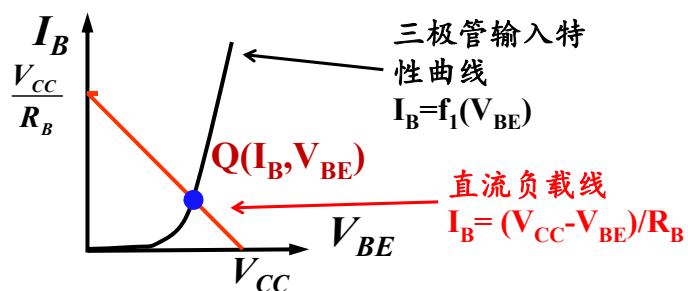


➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法（静态）

由基极回路： $I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$

由输入特性曲线： $I_B = f_1(V_{BE})$



3.2 三极管放大电路分析

3



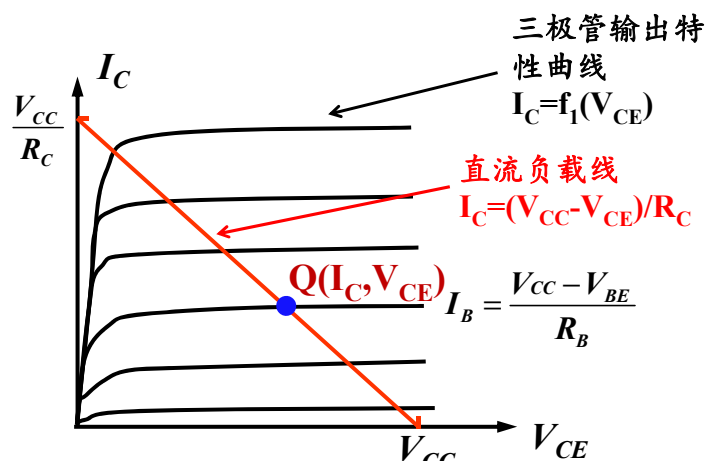
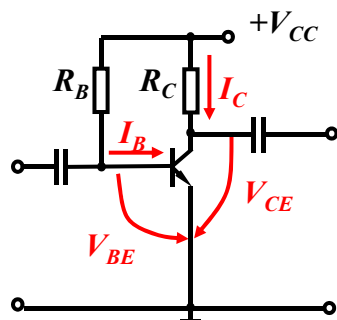
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法（静态）

集电极回路： $I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$

输出特性曲线： $I_C = f_2(V_{CE})$



3.2 三极管放大电路分析

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

(1) R_B 的影响

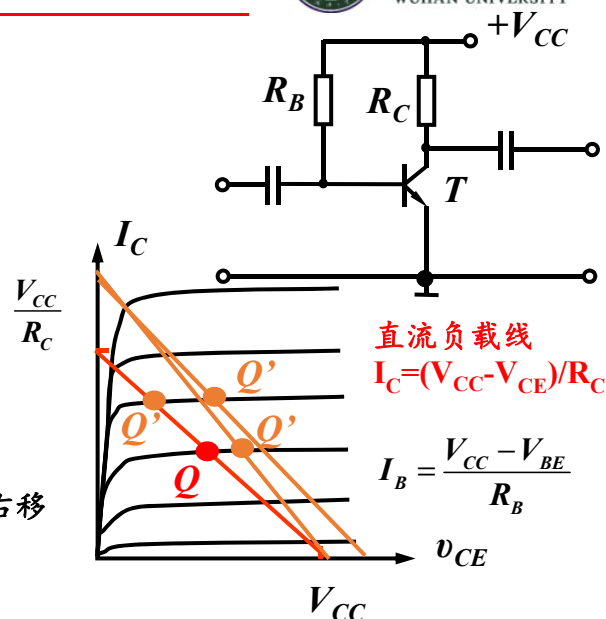
$R_B \downarrow \rightarrow V_{CC}/R_B \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow Q \text{ 点上移}$

(2) R_C 的影响

$R_C \downarrow \rightarrow V_{CC}/R_C \uparrow \rightarrow Q \text{ 右移}$

(3) 电源 V_{CC} 的影响

$V_{CC} \uparrow \rightarrow$ 直流负载线发生平移 $\rightarrow Q$ 上移并右移



3.2 三极管放大电路分析

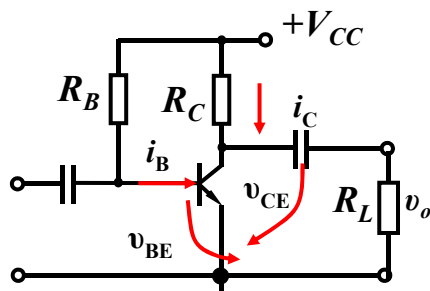
5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法 (动态)



直流负载线:

输入: $I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$

输出: $I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$

$$i_B = I_{BQ} + i_b$$

$$v_{BE} = V_{BEQ} + v_i$$

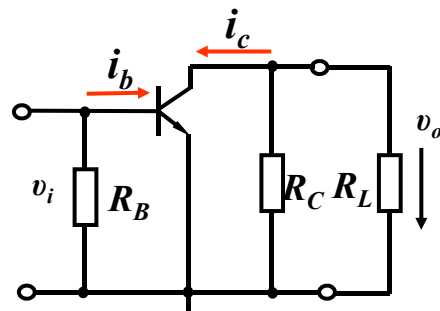
$$i_C = I_{CQ} + i_c$$

$$v_{CE} = V_{CEQ} + v_o$$

交流负载线(输入与二极管类似):

输出: $i_c = (V_{CC} - v_{CE}) / R_C$ ✗

输出: $i_c = -(v_{CE} - V_{CEQ}) / R'_L + I_{CQ}$



交流通路

3.2 三极管放大电路分析

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法 (动态)

(1) 当有交流信号输入时, 电路的瞬时工作状态将沿着交流负载线移动。

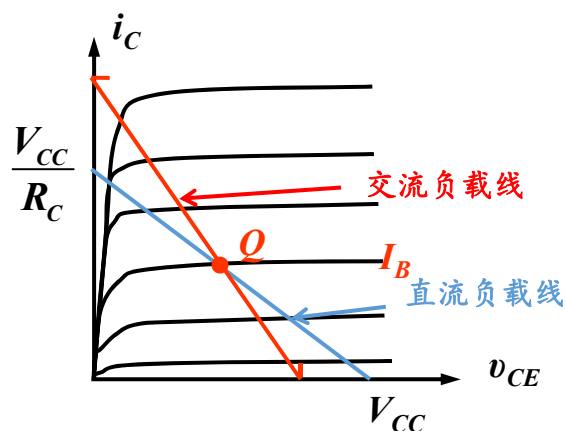
(2) 直流负载线只能用来确定静态工作点。

(3) 当 $R_L = \infty$ 时, 直流负载线与交流负载线重合。

问题: 那一条直线是交流负载线?

$$\text{输出: } i_c = -(v_{CE} - V_{CEQ}) / R'_L + I_{CQ}$$

$$I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$$



3.2 三极管放大电路分析

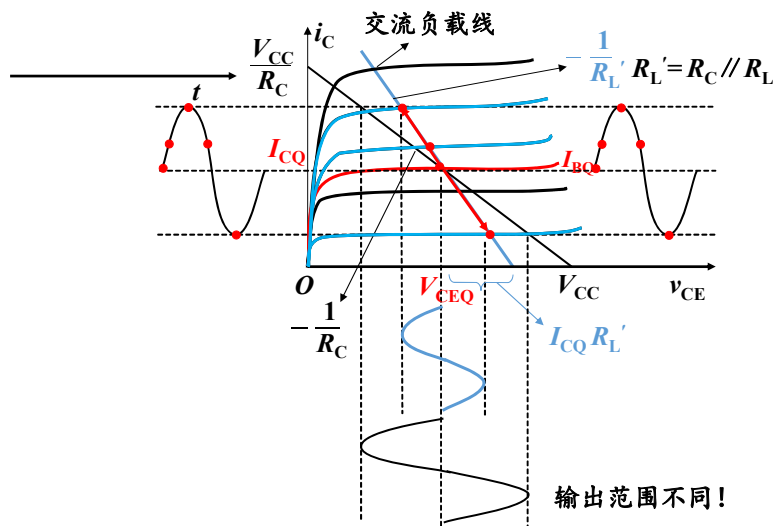
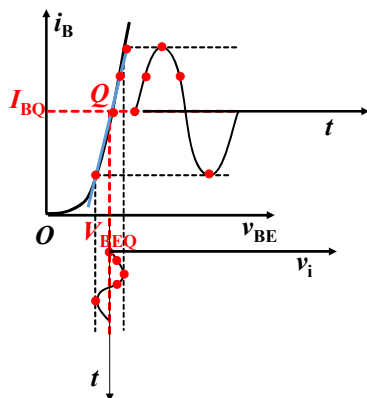
7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法（动态）



3.2 三极管放大电路分析

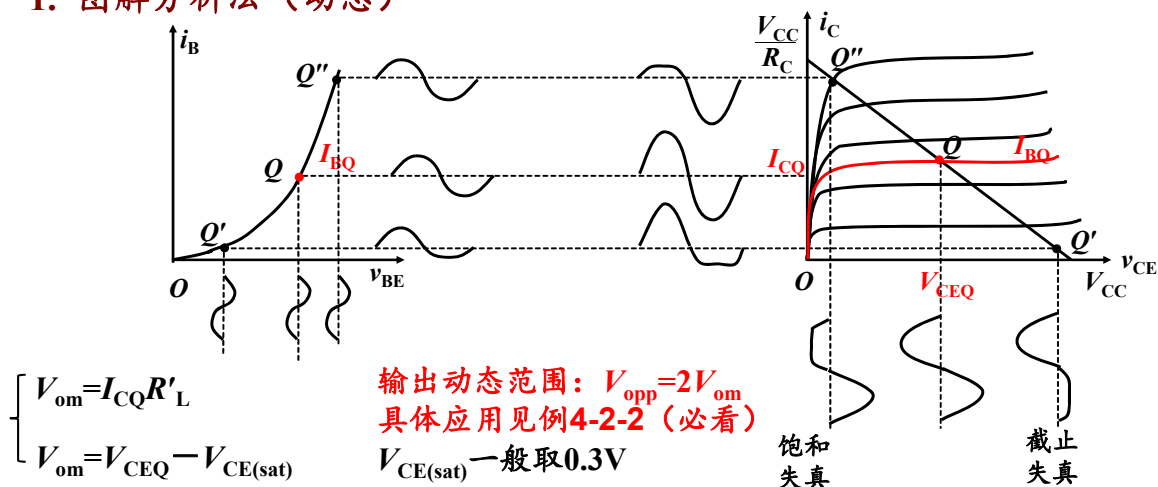
8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

1. 图解分析法（动态）



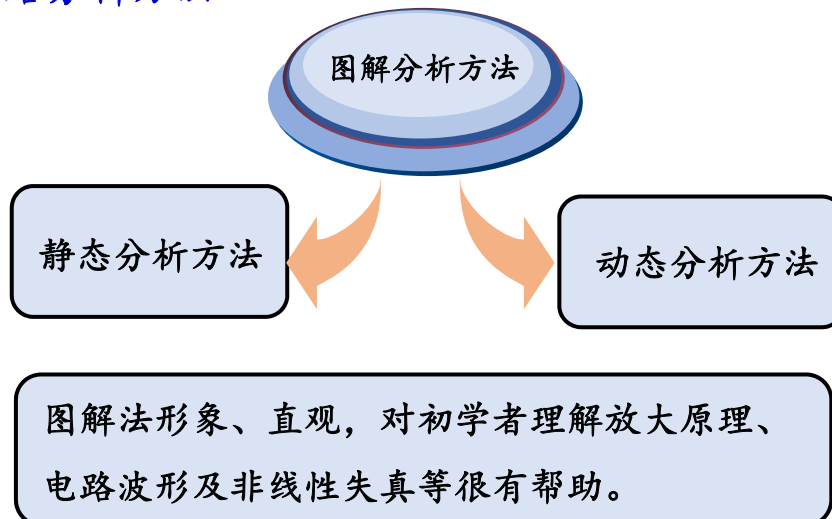
3.2 三极管放大电路分析

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法



3.2 三极管放大电路分析

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法 对应书本3.3.1

2. H参数模型

为什么要建立小信号模型？

由于三极管是非线性器件，这样就使得放大电路的分析非常困难。建立小信号模型，就是将非线性器件做线性化处理，从而简化放大电路的分析和设计。

如何建立小信号模型？

当放大电路的输入信号电压很小时，就可以把三极管小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把三极管这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。

3.2 三极管放大电路分析

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法 对应书本3.3.1

2. H参数模型

$$v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE})$$

$$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$$

$$d v_{BE} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} d i_B + \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} d v_{CE}$$

$$d i_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} d i_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} d v_{CE}$$

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

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

$$\begin{bmatrix} v_{be} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} \quad \text{输出端交流短路时的输入电阻 } (\Omega)$$

$$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} \quad \text{输入端交流开路时的反向电压传输比}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} \quad \text{输出端交流短路时的正向电流传输比}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} \quad \text{输入端交流开路时的输出电导 } (S)$$

3.2 三极管放大电路分析

12



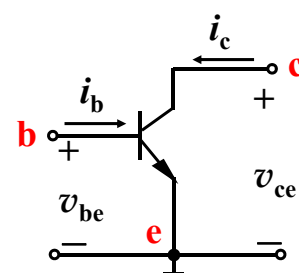
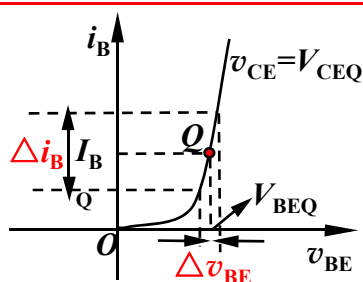
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型

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

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



物理意义：反映了输入电压对输入电流 i_b 的控制能力。

几何意义：表示输入特性的Q点处的切线的斜率的倒数。

单位： Ω , $10^2 \sim 10^3 \Omega$

输出端交流短路时的输入电阻 在小信号的情况下是常数。（常称为输入电阻）

3.2 三极管放大电路分析

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型

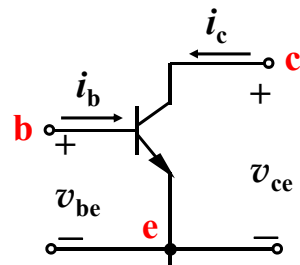
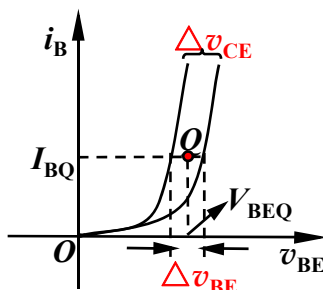
$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

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

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

输入端交流开路时

反向电压传输比



物理意义：反映了输出回路 v_{CE} 对输入回路 v_{BE} 影响的程度

几何意义：在输入特性上表示Q点附近输入特性曲线横向的疏密。

它是一个无量纲的量（ 10^{-4} ）。

3.2 三极管放大电路分析

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型

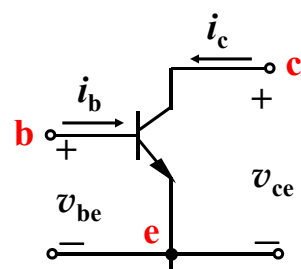
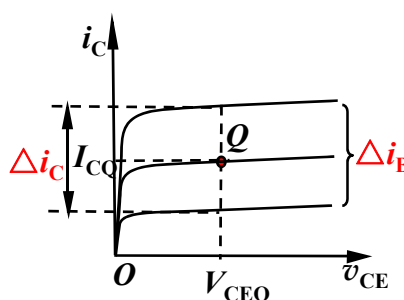
$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

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

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{v_{CE}}$$

输出端交流短路时

的正向电流传输比



物理意义：晶体管对电流的放大能力，即 β

几何意义：在输出特性上表示Q点附近输出特性曲线的纵向疏密。

它是一个无量纲的量。（ $10 \sim 10^2$ ）

3.2 三极管放大电路分析

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

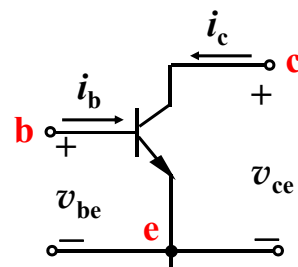
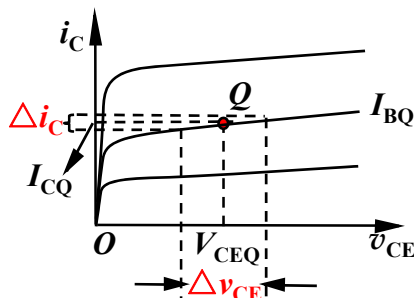
2. H参数模型

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

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

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_c}{\partial v_{ce}} \right|_{i_b} \quad r_{oe} = \frac{1}{h_{oe}}$$

输入端交流开路
时的输出电导



物理意义：反映了输出电压 v_{ce} 对输出电流 i_c 的控制能力

几何意义：保持 i_b 不变，有 Δv_{ce} ，则引起 Δi_c ，反映了输出特性曲线的倾斜程度。

单位：西门子 (S) ($10 \sim 10^2 \mu S$)

3.2 三极管放大电路分析

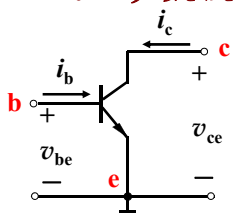
16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型



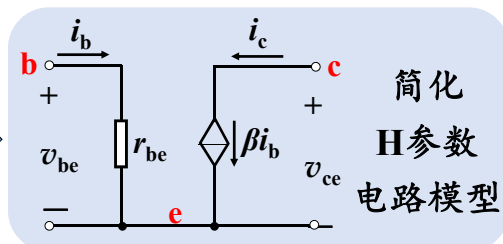
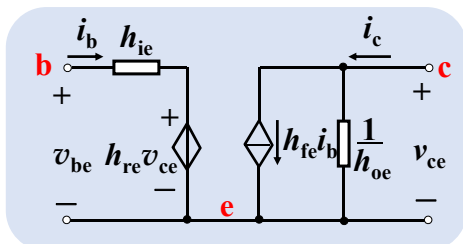
$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

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

$$\begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^3 \Omega & 10^{-3} \sim 10^{-4} \\ 10^2 & 10^{-5} S \end{bmatrix}$$

h_{re} 和 h_{oe} 都很小，常忽略它们的影响。

常用习惯符号 $r_{be} = h_{ie}$ ， $\beta = h_{fe}$



3.2 三极管放大电路分析

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型

β 一般用测试仪测出

r_{be} 与 Q 点有关, 根据结构, 估算公式如下:

$$r_{be} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{i_b r_b + (1 + \beta) i_b r_e}{i_b} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

一般来说, 取 $r_b \approx 200\Omega$

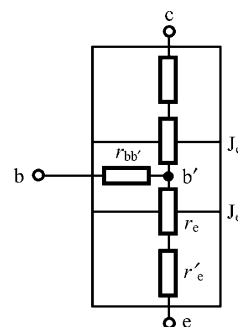
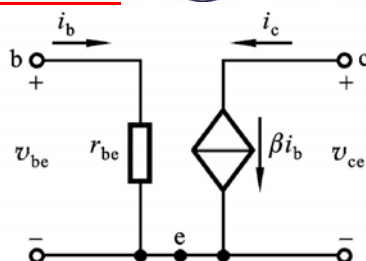
$$\text{而 } r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (T=300\text{K})$$

$$\text{则 } r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (\text{估算公式})$$

17



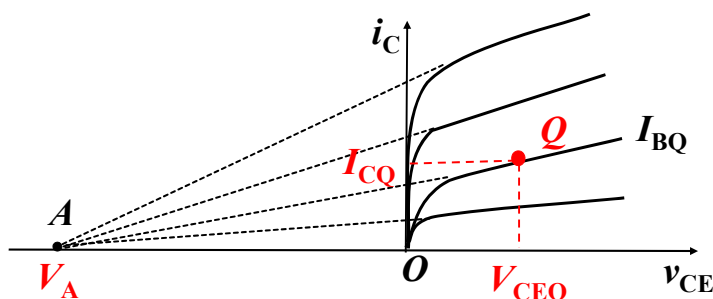
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



3.2 三极管放大电路分析

➤ 放大电路分析方法

2. H参数模型



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

题目给出 V_A , 意味着什么?

$$h_{oe} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_Q = \left. \frac{I_{CQ}}{V_{CEQ} + |V_A|} \right|_{I_{BQ}} \approx \frac{I_{CQ}}{|V_A|}$$

$$r_{ce} = \frac{1}{h_{oe}} \approx \frac{|V_A|}{I_{CQ}} \quad \text{—交流输出电阻}$$

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY