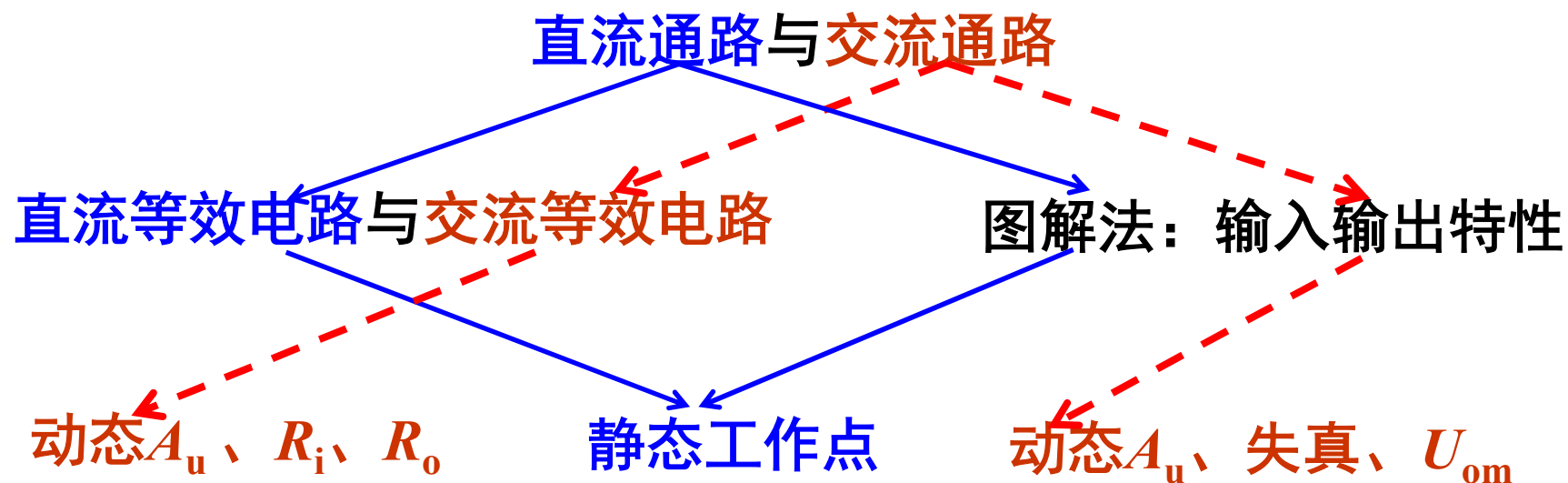




2.3 放大电路的分析方法

放大电路特点： (1) 交直流量共存，交流负载在直流上
(2) 晶体管具有非线性特性

分析方法： (1) 直流和交流工作状态分开分析
(2) 图解法
(3) 合理近似、采用线性等效模型





2.3 放大电路的分析方法

一、直流通路与交流通路

二、图解法

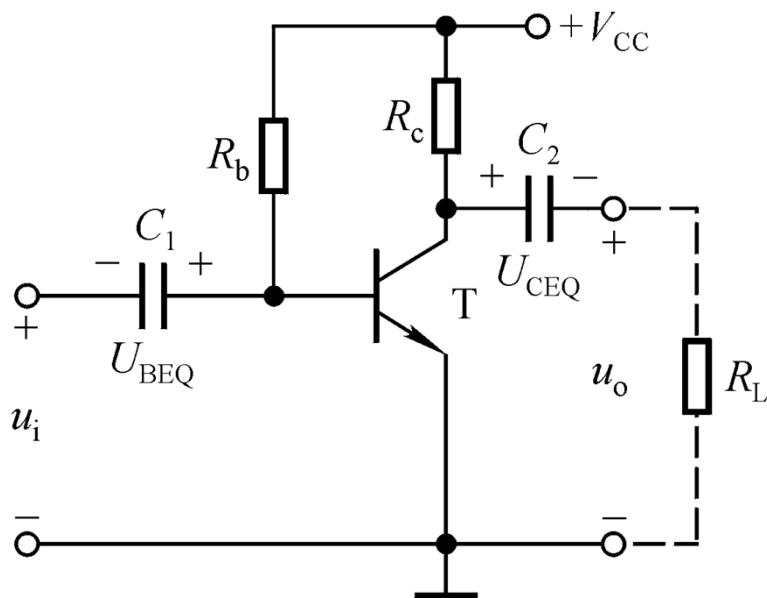
三、等效电路法

一、直流通路与交流通路

将直流电源与输入信号对电路的作用分开考虑。

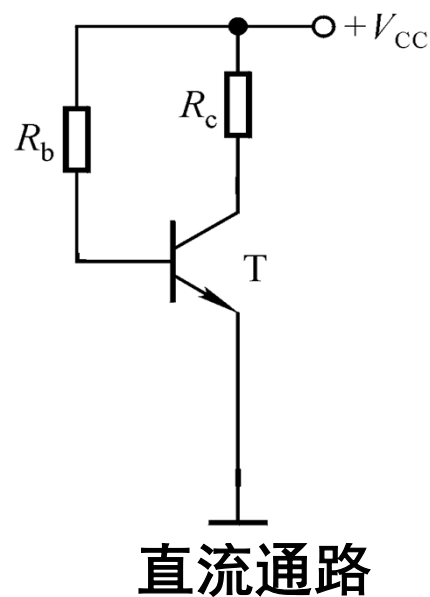
1. 直流通路(DC circuit)

仅在直流电源作用下直流电流流经的通路 ($u_i=0$)。



画直流通路原则：

- ① 信号源 $u_i = 0$ (或 $u_s = 0$)
- ② 电容视为开路
电感视为短路

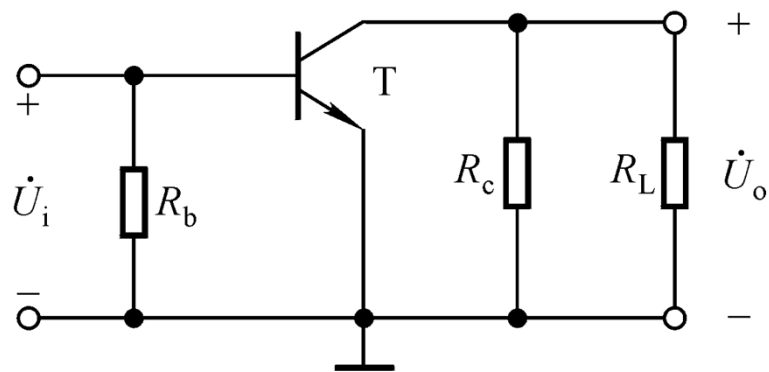
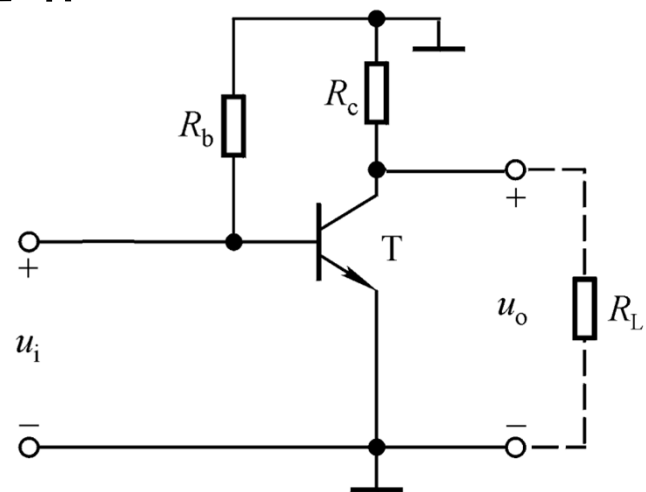
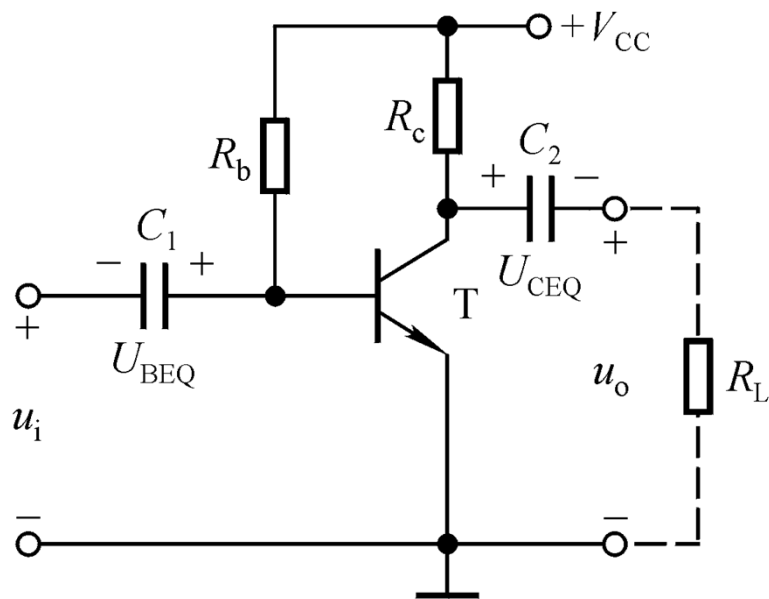


2. 交流通路(AC circuit)

输入信号作用下交流信号流经的通路。

画交流通路原则：

- ① 直流电压源相当于短路
(理想电源, 无内阻)
- ② 耦合电容 (较大电容) 视为短路



交流通路习惯画法

讨论1：利用交、直流通路理解放大电路的组成原则

- 静态时晶体管工作在放大区、有合适的 Q 点

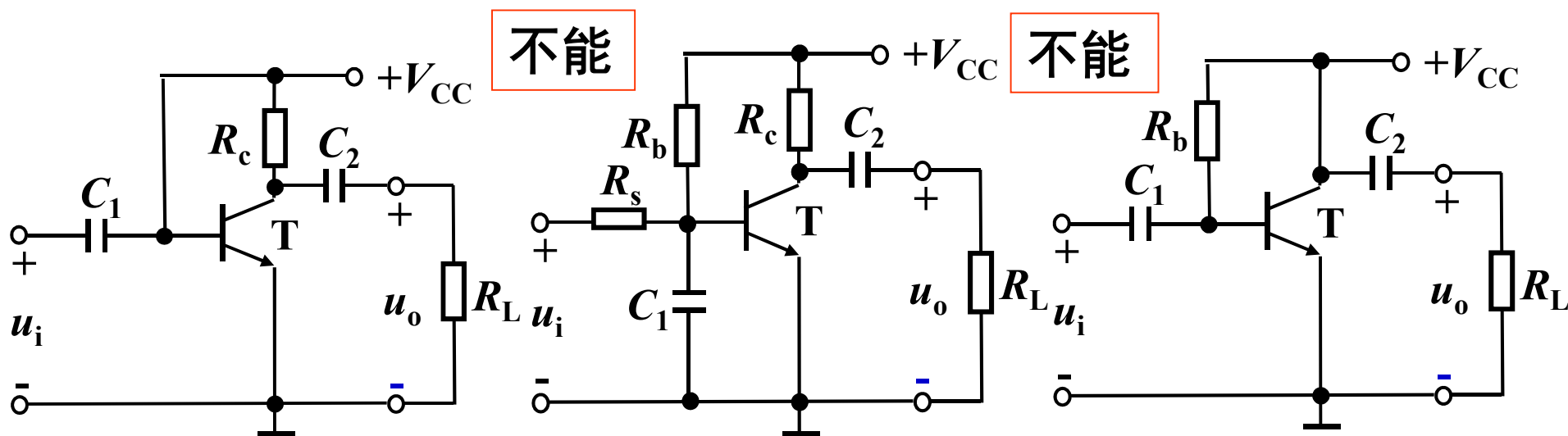
从直流通路分析

- 保证交流信号的有效传输

从交流通路分析

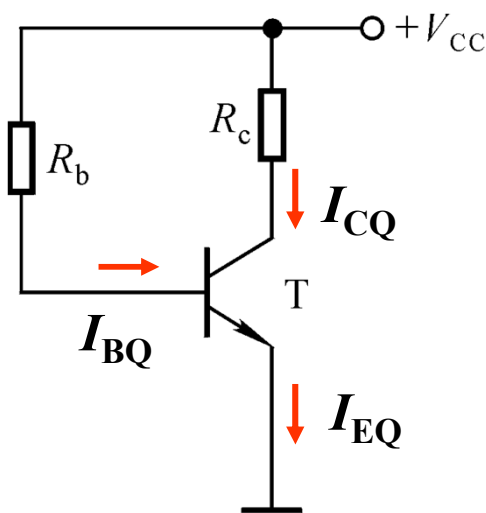
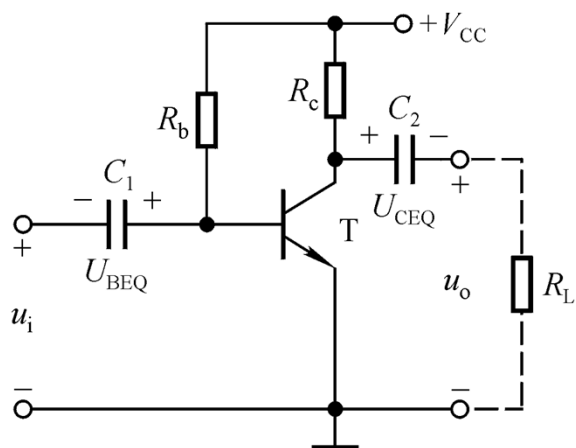
例：以下电路能否正常放大输入信号？

若不能，如何改正电路？



讨论2：估算静态工作点 – 利用直流通路和直流模型

$R_b \uparrow$ ，晶体管工作状态？ $R_c \uparrow$ ，晶体管工作状态？



直流通路

静态时设 $U_{BEQ} \approx 0.7V$

1) 由输入回路求 I_{BQ}

$$I_{BQ} = (V_{CC} - U_{BEQ}) / R_b$$

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

$$I_{EQ} = I_{BQ} + I_{CQ} \approx (1 + \beta) I_{BQ}$$

3) 由输出回路求 U_{CEQ}

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_c \approx V_{CC} - \beta I_{BQ} \cdot R_c$$

估算的前提条件是晶体管处于放大状态！

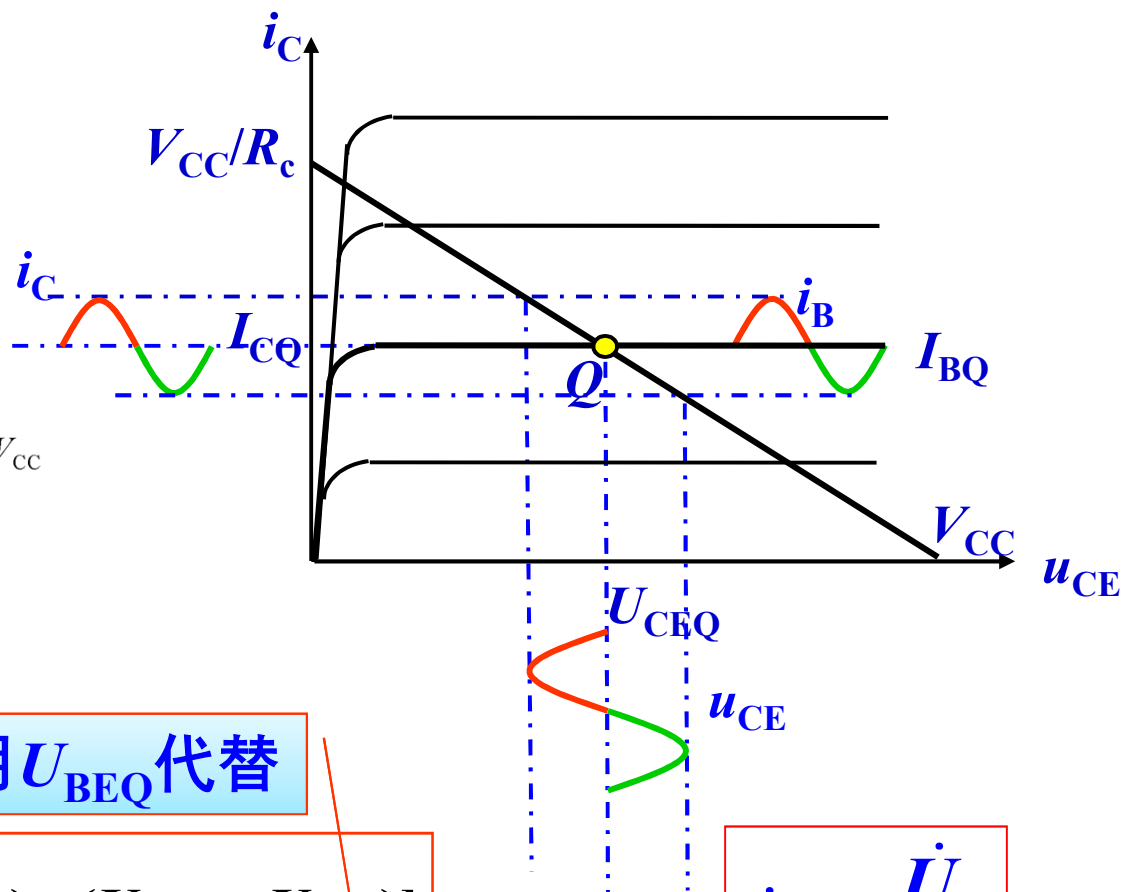
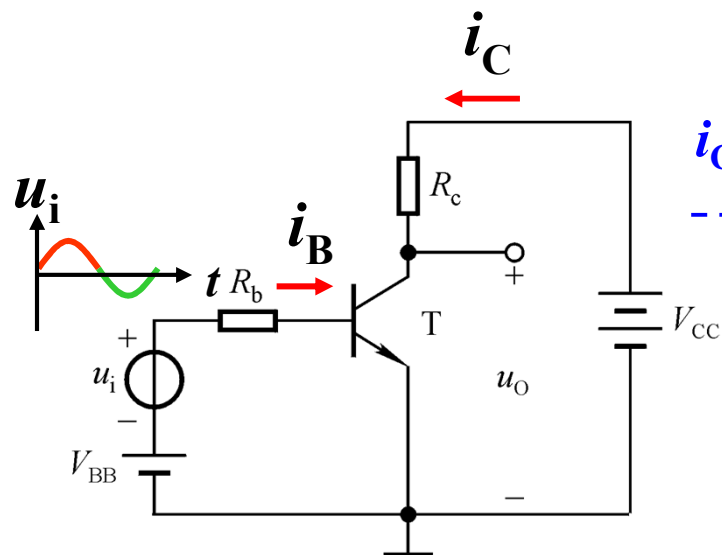
二、图解法(Graphical Analysis)

在已知晶体管的输入、输出特性以及电路中其它元器件参数时，利用作图的方法来分析放大电路。

- 分析 Q 点
- 分析大信号的 A_u 、失真情况
- 分析最大不失真输出电压 U_{om}

二、图解法(Graphical Analysis)

分析 A_u 和 U_{om}



有效值

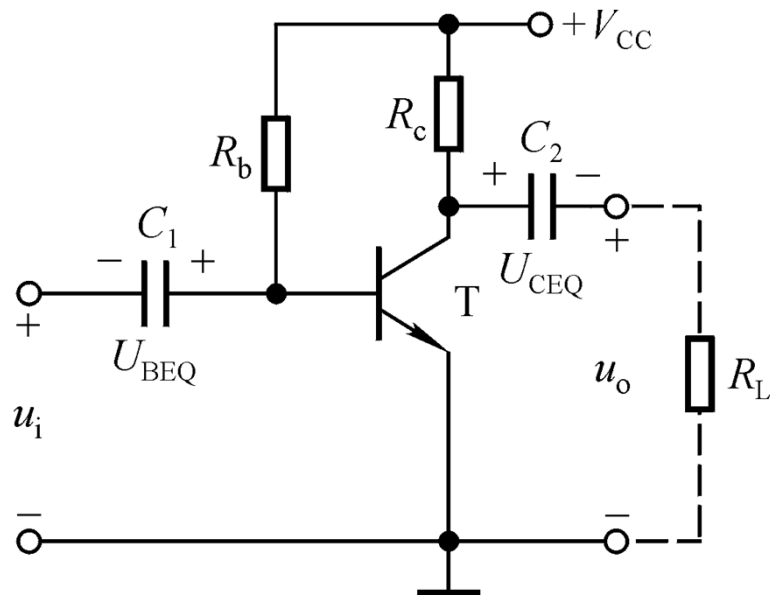
可用 U_{BEQ} 代替

$$U_{om} = \frac{\min[(V_{CC} - U_{CEQ}), (U_{CEQ} - U_{CES})]}{\sqrt{2}}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

讨论3：分析阻容耦合带负载电路的最大不失真输出电压 U_{om}

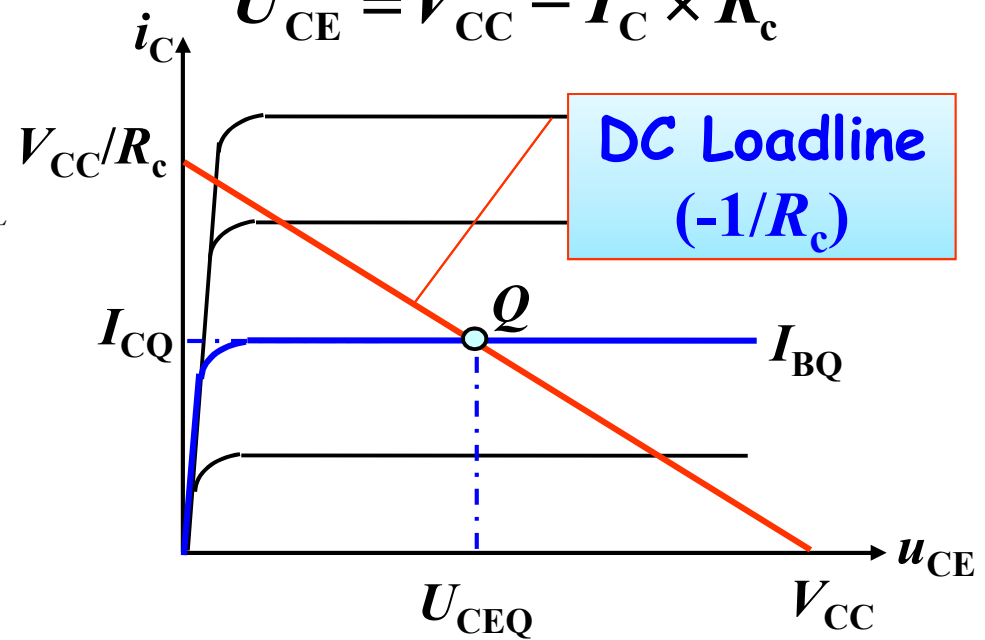
➤ 分析静态工作点



a. 画直流通路

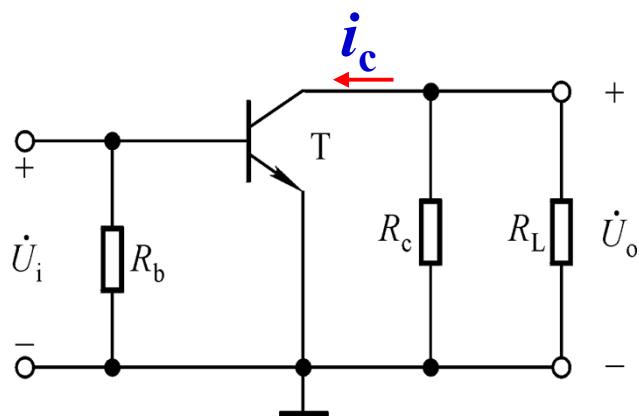
b. 在输出特性上作直流负载线

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_c$$



➤ 分析交流输出信号

a. 画交流通路



$$u_{ce} = -i_c \times (R_c // R_L) \quad R_L'$$

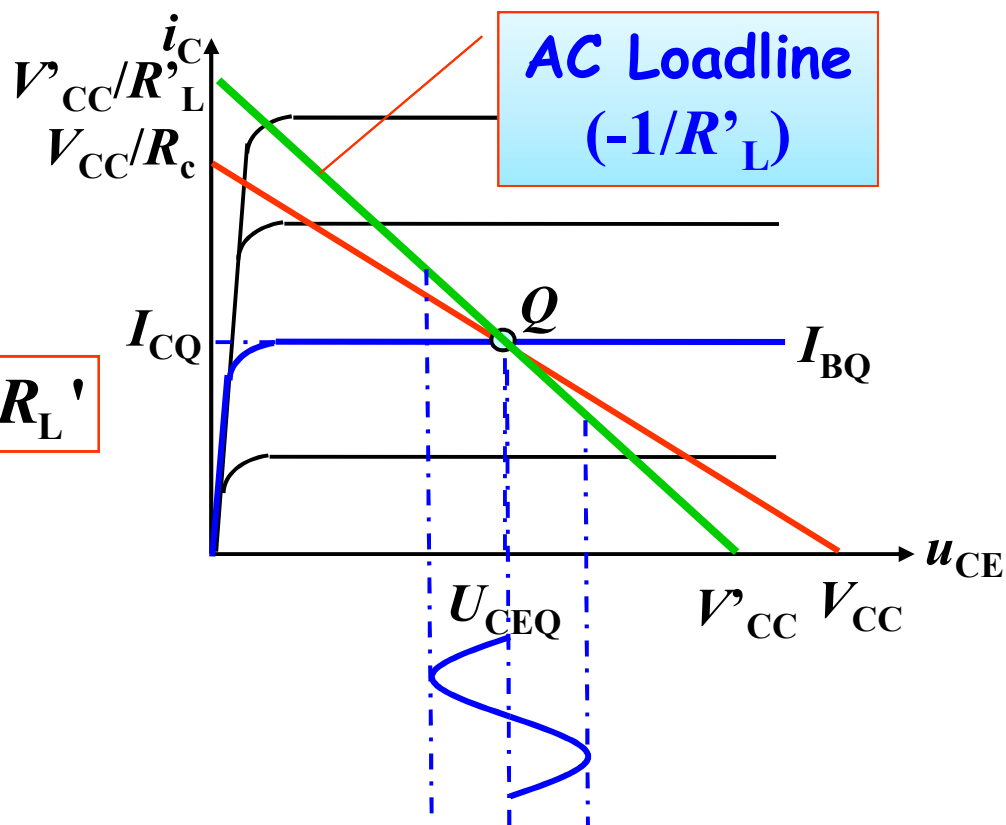
$$u_{CE} = V_{CC}' - i_C * R_L'$$

$$R_L' = R_c // R_L$$

$$V_{CC}' = U_{CEQ} + I_{CQ} \times R_L'$$

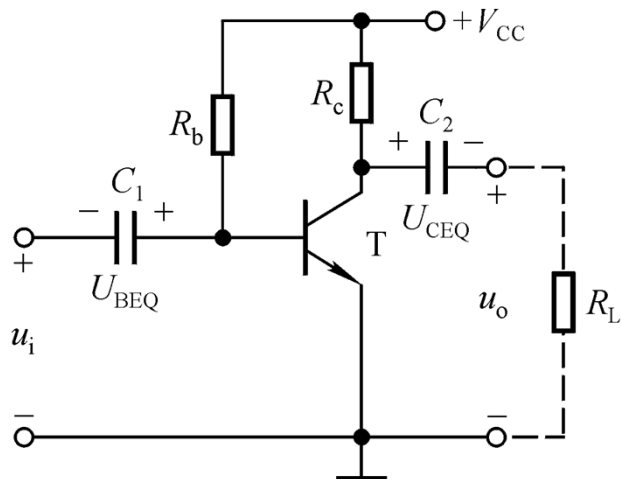
b. 在输出特性上作交流负载线

- 过 Q 点
- 斜率为 $-1/R_L'$



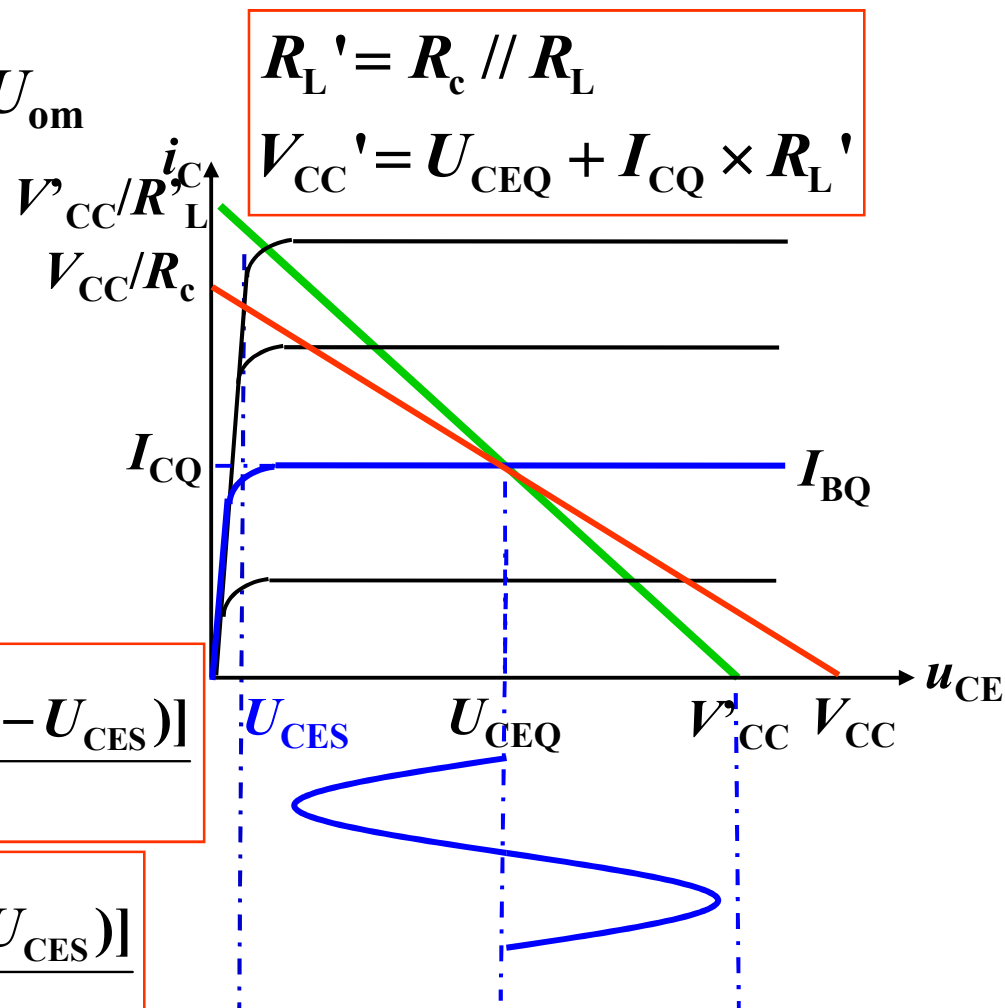
交流负载线是动态输出信号变化所遵循的轨迹

➤ 求最大不失真输出电压 U_{om}



$$U_{om} = \frac{\min[(V_{CC}' - U_{CEQ}), (U_{CEQ} - U_{CES})]}{\sqrt{2}}$$

$$U_{om} = \frac{\min[I_{CQ} * R_L', (U_{CEQ} - U_{CES})]}{\sqrt{2}}$$



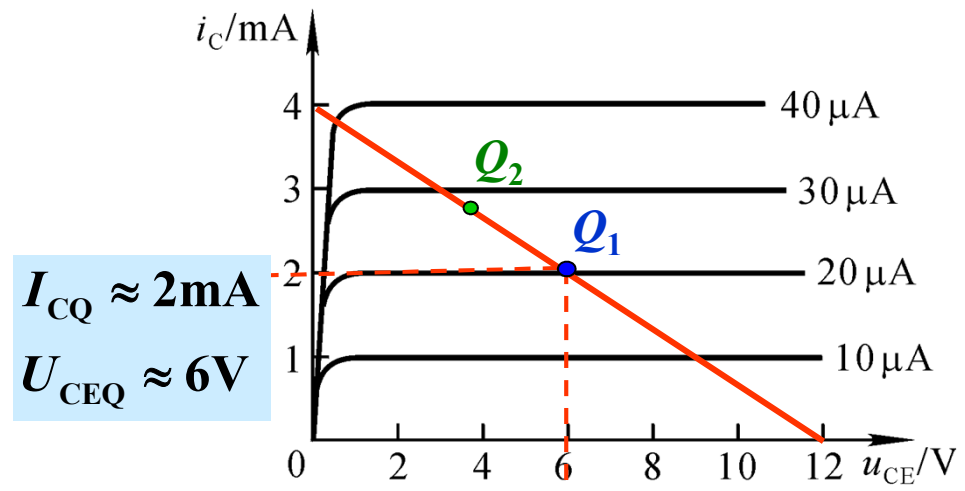
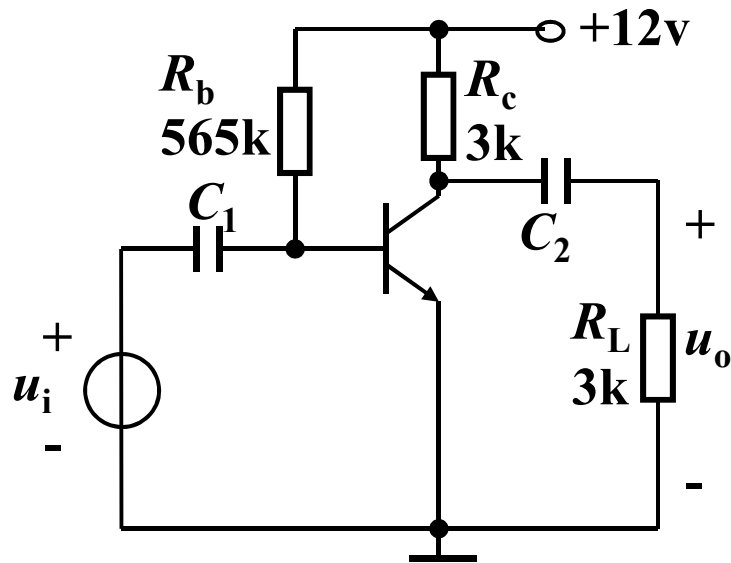
问题： 1) 为使 U_{om} 达到最大，应如何设置 Q 点？

Q 点应位于交流负载线的中点！

2) 若为直接耦合，则交流与直流负载线有何关系？

讨论4: 已知 $U_{BEQ} \approx 0.7V$

- 1) 在输出特性上确定 Q 点: I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} ;
- 2) 当 R_b 减小时 Q 点如何变化;
- 3) 空载时, 以上两种情况哪种更容易出现失真? 何种失真?
- 4) 带负载求 U_{om} , 并分析为使 U_{om} 达到最大, 应如何调节 R_b 。



4) 带负载求 U_{om} , 并分析为使 U_{om} 达到最大, 应如何调节 R_b

过 Q_1 点作交流负载线

$$R_L' = R_c // R_L = 1.5k\Omega$$

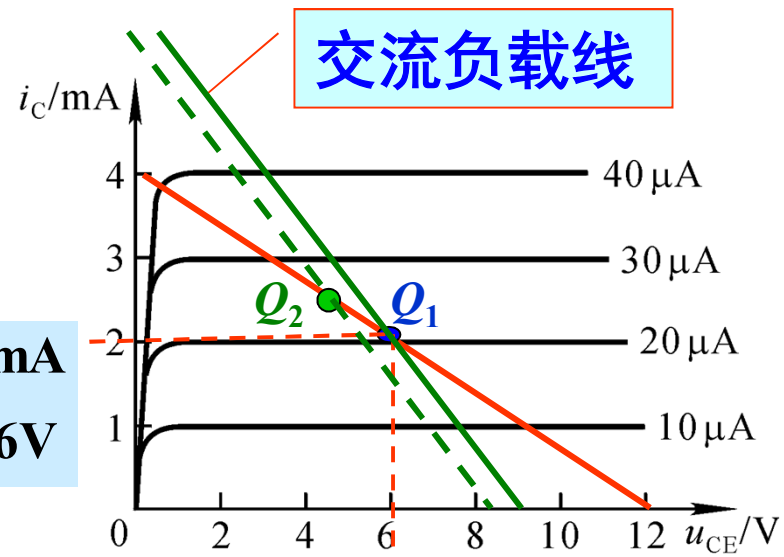
$$V_{CC}' = U_{CEQ} + I_{CQ} * R_L' = 9V$$

$$I_{CQ} \approx 2mA$$

$$U_{CEQ} \approx 6V$$

$$U_{om} = \frac{\min[I_{CQ} \times R_L', (U_{CEQ} - U_{CES})]}{\sqrt{2}}$$

$$U_{om} = \frac{3}{\sqrt{2}} \approx 2.1V$$



减小 R_b 使 Q 点位于交流负载线中点

$$V_{CC}' - U_{CEQ} = U_{CEQ} - U_{CES}$$

$$\text{即: } I_{CQ} * R_L' = U_{CEQ} - U_{CES}$$

二、图解法(Graphical Analysis)

- 分析 Q 点
- 分析大信号的 A_u 、失真情况
- 分析最大不失真输出电压 U_{om}

优点：能比较直观、全面地反映晶体管的工作情况；

缺点：①不方便，晶体管特性曲线不易得到；
②当输入信号较小或者频率较高时不准确，只适用于信号幅度较大、变化较慢的信号（中低频大幅值信号）。

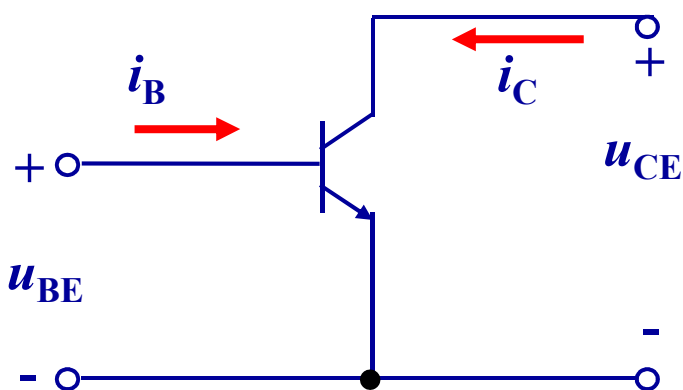
三、等效电路法

晶体管的微变等效模型

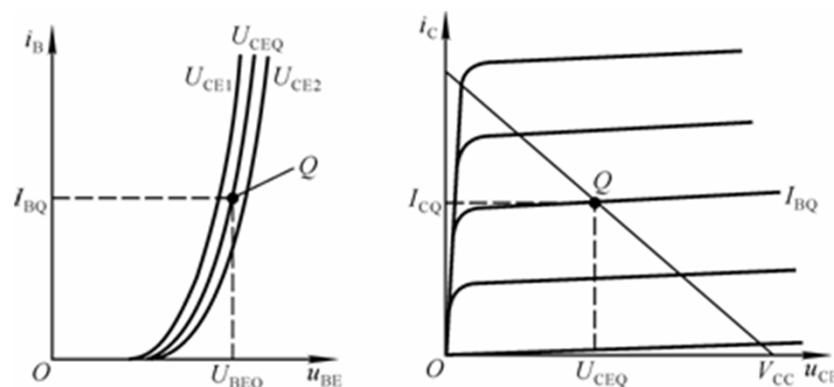
当放大电路的输入信号 u_i 很小时，可以认为晶体管在静态工作点附近工作时，其特性曲线在小范围内近似为线性的。

1. 晶体管共射 h 参数等效模型(h parameter equivalent circuit)

➤ h 参数的推导



将晶体管视为一个双口网络



$$u_{BE} = f(i_B, u_{CE})$$

$$i_C = f(i_B, u_{CE})$$

均为瞬
时总量

↓ 求全微分

微变是在Q点附近变化

$$du_{BE} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \times di_B + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} \times du_{CE}$$

$$di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \times di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} \times du_{CE}$$

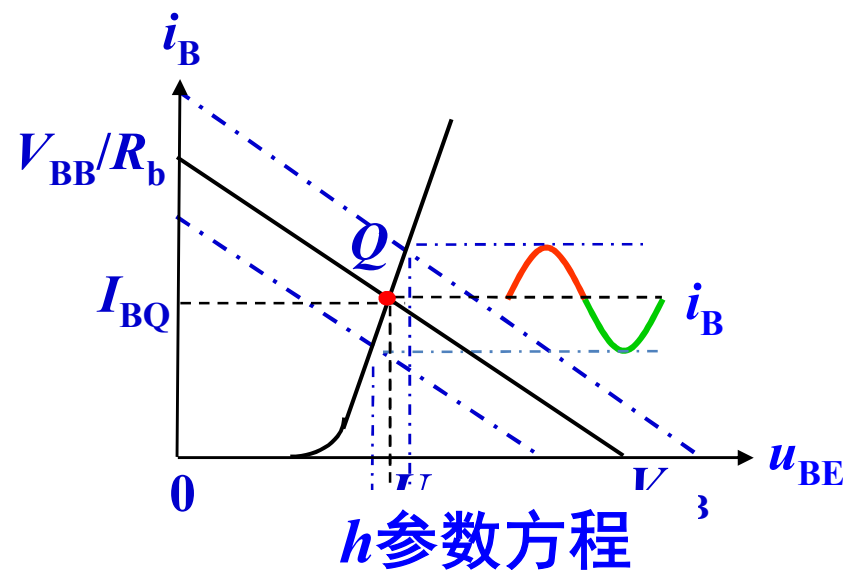
取变化量

$$\dot{U}_{be} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CEQ}} \times \dot{I}_b + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_{BQ}} \times \dot{U}_{ce}$$

$$\dot{I}_c = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CEQ}} \times \dot{I}_b + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_{BQ}} \times \dot{U}_{ce}$$

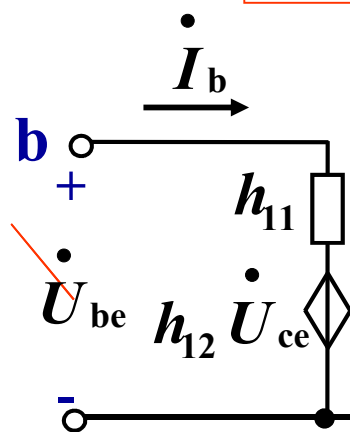
• h 参数等效模型

正弦向量



$$\dot{U}_{be} = h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce}$$

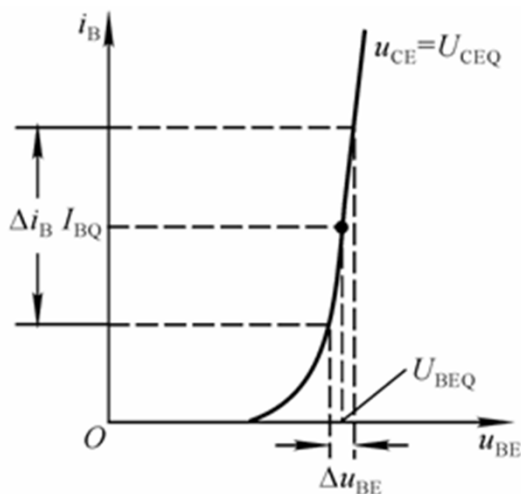
$$\dot{I}_c = h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce}$$



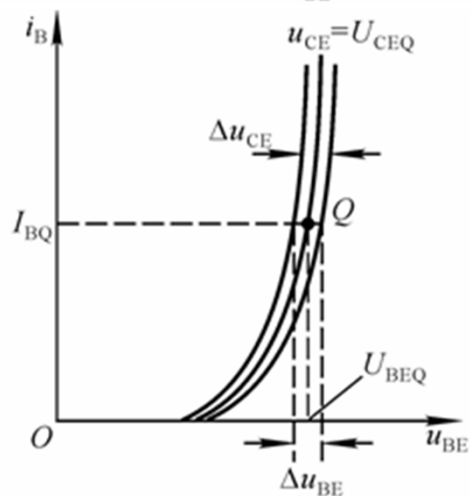
• h 参数的物理意义

$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \quad h_{12} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

h_{11} =发射
结电阻 r_{be}

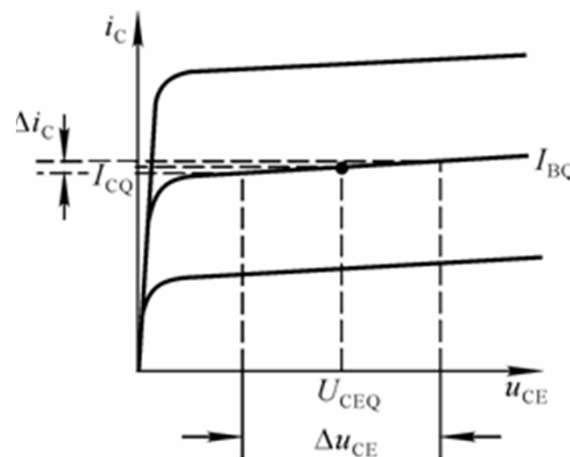
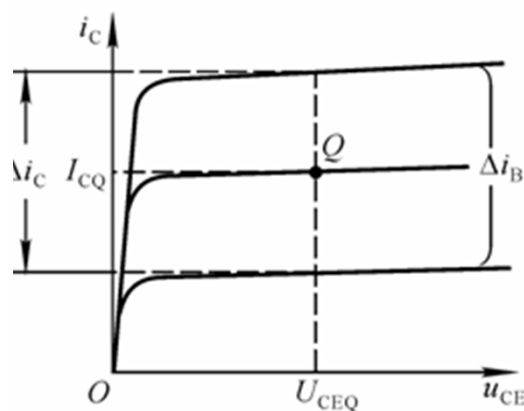


h_{12} =内反
馈系数
 ≈ 0



$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \quad h_{22} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

h_{21} =电流放
大倍数 β



h_{22} =c-e间
电导= $1/r_{ce}$
 $\approx I_{CQ}/V_A$

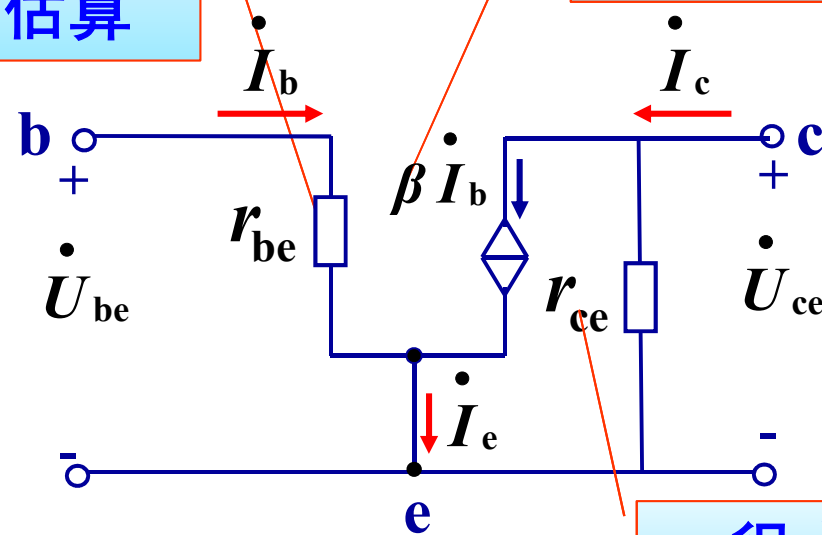
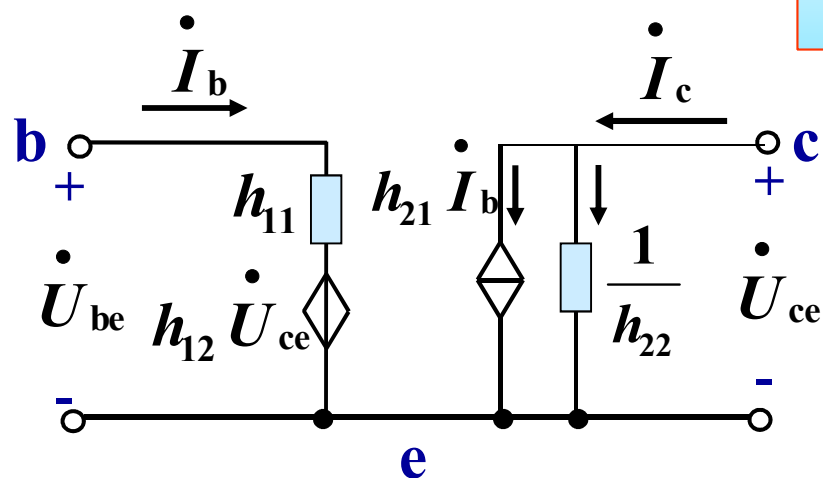
简化的 h 参数等效模型

$$\begin{aligned}\dot{U}_{be} &= h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c &= h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{be} &= r_{be} * \dot{I}_b \\ \dot{I}_c &\approx \beta \dot{I}_b\end{aligned}$$

r_{be} 需要
估算

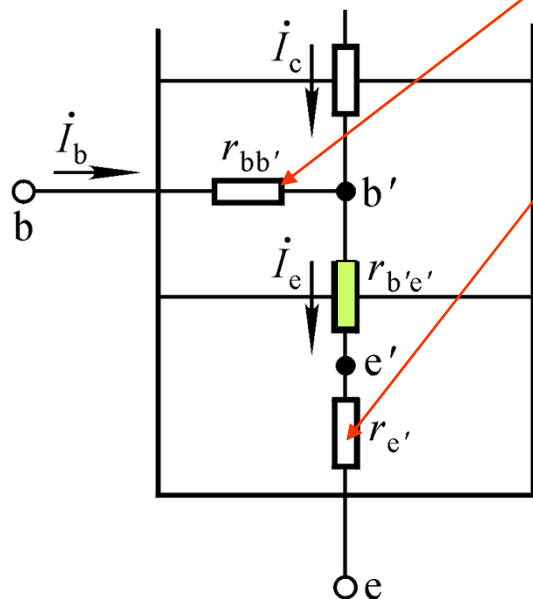
β 可从手
册查到



r_{ce} 很大

- 为交流低、中频小信号模型
- 适用于NPN和PNP型管

估算 r_{be} :



晶体管输入回路结构

$r_{bb'}$: 基区体电阻, 一般由制造工艺决定, 为几十 Ω ~几百 Ω ;

$r_{e'}$: 发射区体电阻, 也与制造工艺有关, 通常很小, 为几个 Ω ;

$r_{b'e'}$: 发射结电阻。

发射结电阻

$$r_{b'e'} = \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$r_{be} = \frac{\dot{U}_{be}}{\dot{I}_b} \approx \frac{\dot{U}_{bb'} + \dot{U}_{b'e'}}{\dot{I}_b} = \frac{\dot{U}_{bb'}}{\dot{I}_b} + \frac{\dot{I}_e r_{b'e'}}{\dot{I}_b}$$

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

Q 点影响 r_{be} !



2.4 单管放大电路的三种基本接法

三种基本接法：共射 共集 共基

共射(CE, Common-emitter): 以e为输入回路和输出回路的公共端，用来实现 i_B 对 i_C 的控制。

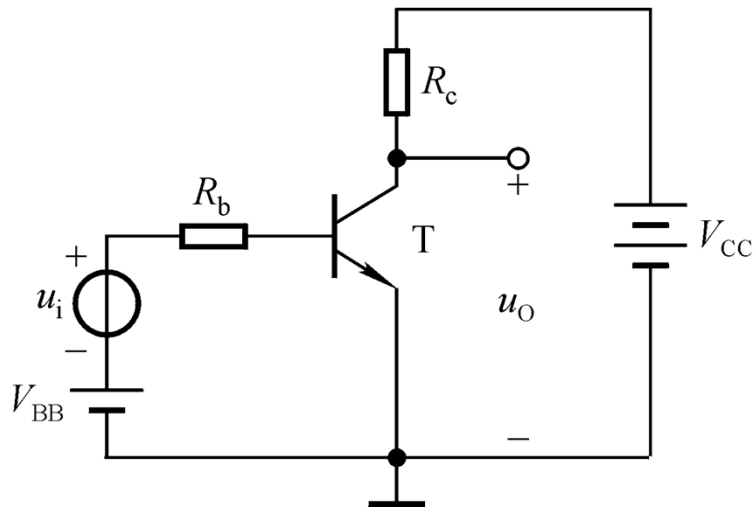
共集(CC, Common-collector):
以c为公共端的接法，用来实现 i_B 对 i_E 的控制。

共基(CB, Common-base):
以b为公共端的接法，用来实现 i_E 对 i_C (或 i_C 对 i_E)的控制。

注意：三种接法都是从交流通路中定义的，即输入回路和输出回路是指交流通路中的。

一、基本共射放大电路分析

1. 基本共射放大电路



• 画交流等效电路 (AC Equivalent Circuit)

h 参数等效模型

- 交流通路中的晶体管
- 交流等效电路

① 求 Q 点:
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b}$$

直流通路
$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \approx I_{EQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

② 动态: 求 A_u 、 R_i 、 R_o .

• 画交流通路

