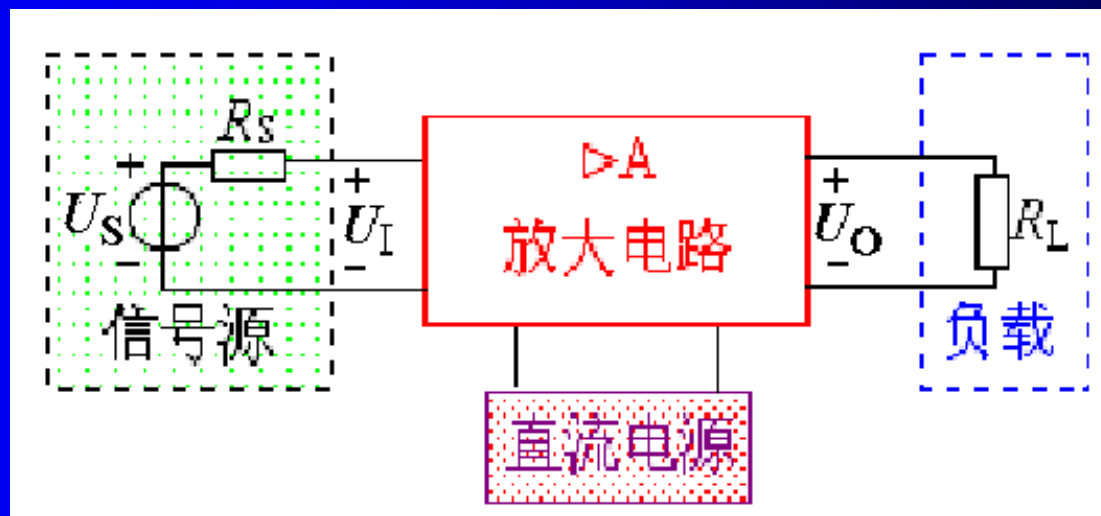


第二章 基本放大电路

主要内容

- 放大电路性能指标
- 晶体管放大器的工作原理
- 放大电路的分析方法
- 静态工作点
- 放大器组态
- 多级放大器
- 场效应管放大器
- 频率响应

放大电路的基本概念



放大电路主要用于放大微弱的电信号，一般是变化的交流信号，输出电压或电流在幅度上得到放大，能量得到增强。

输出信号的能量实际上是由直流电源提供，只是经过**有源器件**控制，使之转换成信号能量，提供给负载。

放大器分类

按器件	按用途	按工作频率	按信号幅度	按工作状态
晶体管放大器 场效应管放大器 电子管放大器 集成运算放大器	电压放大器 电流放大器 功率放大器	直流放大器 音频放大器 视频放大器 宽带放大器 谐振放大器	小信号放大器 大信号放大器	甲类放大器 乙类放大器 甲乙类放大器 丙类放大器

第二章 基本放大电路

2.1 放大电路性能指标

放大电路性能指标主要指交流性能指标

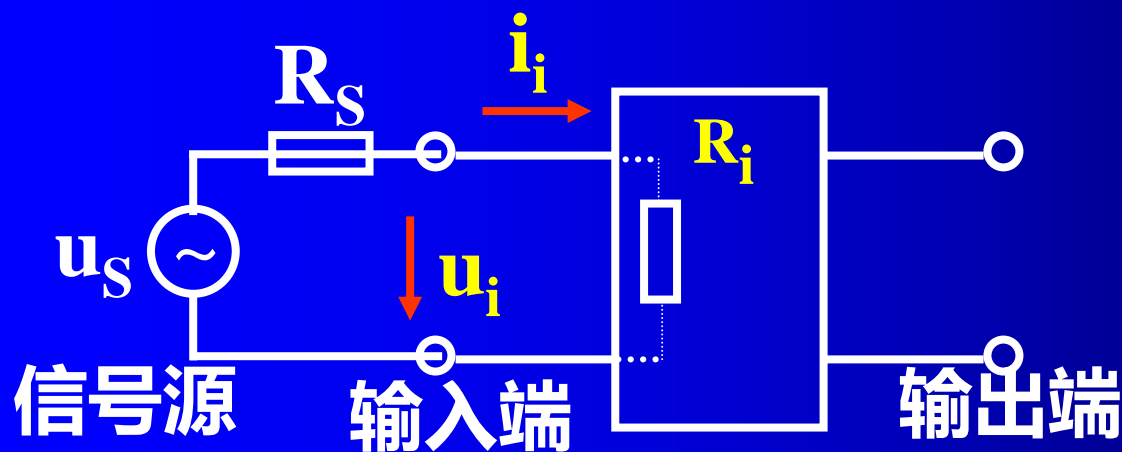
输入电阻

输出电阻

增益

通频带

1) 输入电阻--从放大器输入端看进去的等效电阻



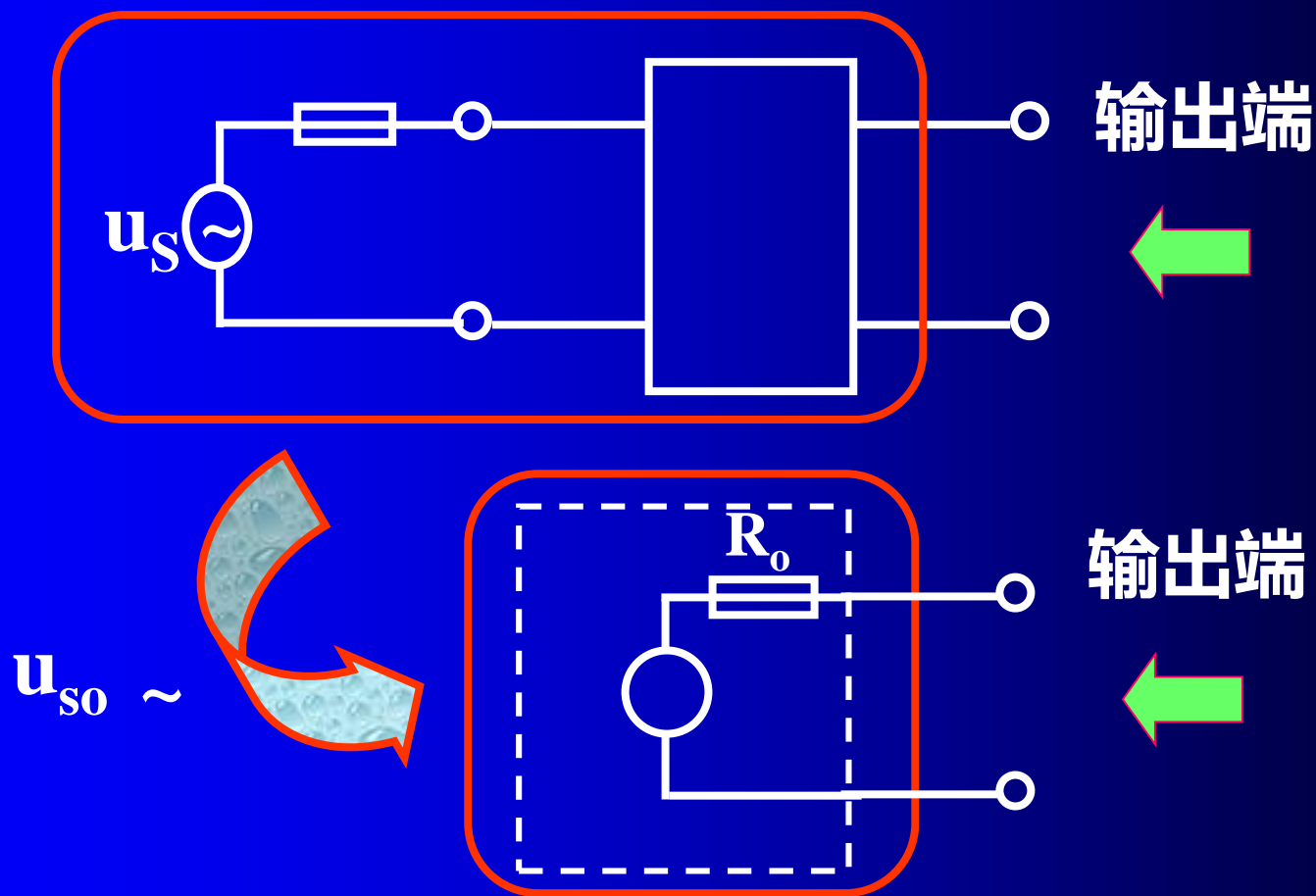
$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

R_i : 表明放大器获取电压、电流信号能力的强弱。

为了获取更大的电压， R_i 越大越好

为了获取更大的电流， R_i 越小越好

2) 输出电阻--从放大器输出端看进去的等效电阻



输出电阻是将输入独立源短接（电压源）或开路（电流源）后从输出端看进去的等效电阻。记为 **R_0**

$$R_o = \frac{U_o'}{I_o'}$$

U_o' : 开路输出电压; I_o' : 短路输出电流

输出电阻衡量放大电路的电流或电压驱动能力

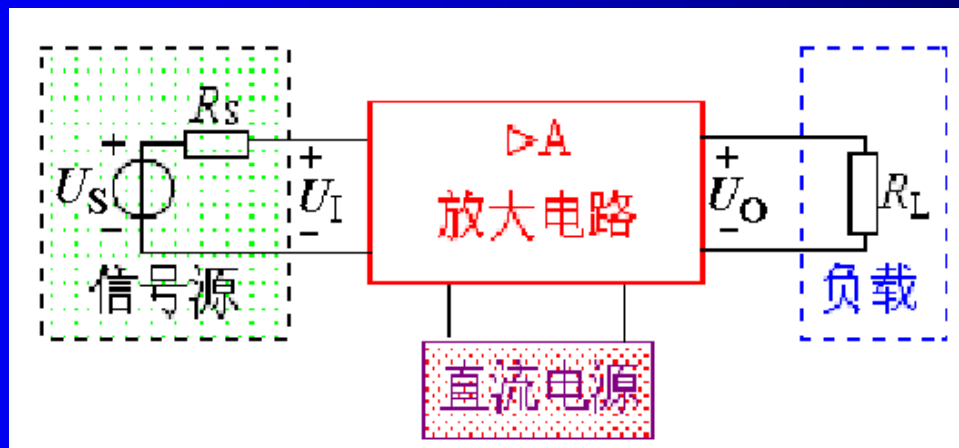
$$U_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot U_o'$$

R_o 越小, 电压驱动能力越大

$$I_o = \frac{R_o}{R_o + R_L} \cdot I_o'$$

R_o 越大, 电流驱动能力越大

3) 增益—放大倍数



- ❖ 衡量放大器放大电信号的能力，为输出量对输入量的比值， A 。
- ❖ 两种增益类型
 - 端口增益（固有增益）
 - 源增益（总增益）
- ❖ 主要针对交流信号（不失真信号）

❖ 端口增益

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdots \cdots \cdots \text{电压增益}$$

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \cdots \cdots \cdots \text{电流增益}$$

$$\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} = \dot{A}_{ui} \cdots \cdots \cdots \text{互阻增益}$$

$$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} = \dot{A}_{iu} \cdots \cdots \cdots \text{互导增益}$$

❖ 源增益

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \cdots \cdots \cdots \text{源电压增益}$$

$$\dot{A}_{is} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_s} \cdots \cdots \cdots \text{源电流增益}$$

$$\dot{A}_{rs} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_s} \cdots \cdots \cdots \text{源互阻增益}$$

$$\dot{A}_{gs} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_s} \cdots \cdots \cdots \text{源互导增益}$$

❖ 负载开路和短路增益

负载开路 $R_L = \infty$

$$\dot{A}'_u = \frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_i} \quad \text{负载开路电压增益}$$

负载短路 $R_L = 0$

$$\dot{A}'_i = \frac{\dot{I}'_o}{\dot{I}_i} \quad \text{负载短路电流增益}$$

U_o' : 开路输出电压; I_o' : 短路输出电流

放大电路所能达到的最大电压和电流增益

❖ 增益之间的关系

$$\dot{A}_{is} = \frac{R_s}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_i$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_u$$

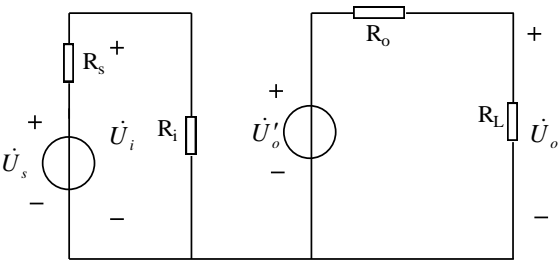
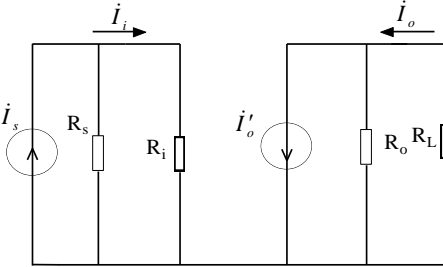
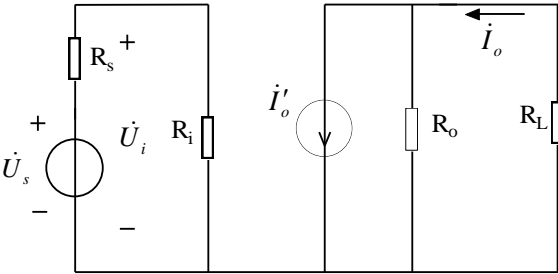
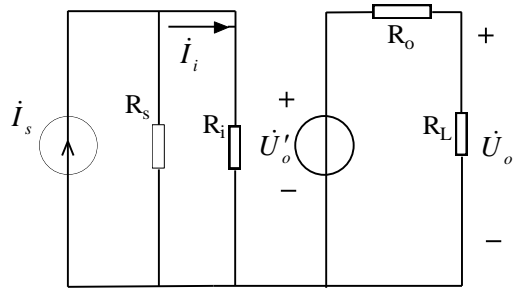
$$\dot{A}_{rs} = \frac{R_s}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_r$$

$$\dot{A}_{gs} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_g$$

$$\dot{A}_u = -\frac{R_L}{R_i} \cdot \dot{A}_i \quad \dot{A}_r = -R_L \cdot \dot{A}_i \quad \dot{A}_g = \frac{1}{R_i} \cdot \dot{A}_i$$

$$\dot{A}_u = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \dot{A}'_u$$

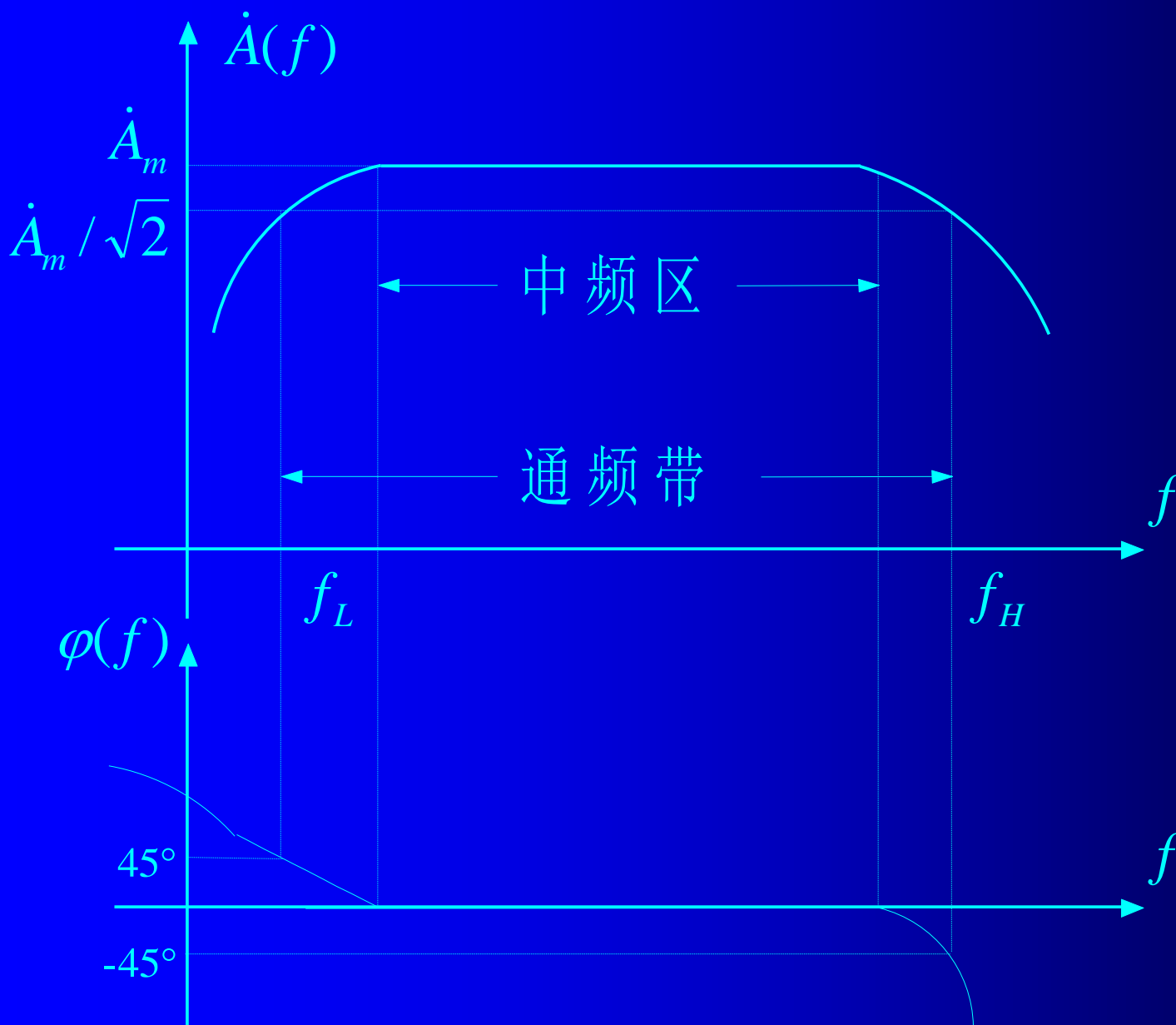
$$\dot{A}_i = \frac{R_o}{R_o + R_L} \cdot \dot{A}'_i$$

类型	模型	增益	R_i 的要求	R_o 的要求
电压放大器		\dot{A}_u \dot{A}_{us}	$R_i \gg R_s$ $R_i \rightarrow \infty$	$R_o \ll R_L$ $R_o \rightarrow 0$
电流放大器		\dot{A}_i \dot{A}_{is}	$R_i \ll R_s$ $R_i \rightarrow 0$	$R_o \gg R_L$ $R_o \rightarrow \infty$
互导放大器		\dot{A}_g \dot{A}_{gs}	$R_i \gg R_s$ $R_i \rightarrow \infty$	$R_o \gg R_L$ $R_o \rightarrow \infty$
互阻放大器		\dot{A}_r \dot{A}_{rs}	$R_i \ll R_s$ $R_i \rightarrow 0$	$R_o \ll R_L$ $R_o \rightarrow 0$

4) 通频带—频率指标

$$\dot{A}(j\omega) = \dot{A}(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

$\dot{A}(\omega)$	幅频特性	} 频率响应
$\varphi(\omega)$	相频特性	



f_L : 下限频率

f_H : 上限频率

通频带:

$$f_{bw} = f_H - f_L$$

要不失真放大信号，放大电路的通频带必须大于输入信号的频率范围

放大电路的频率响应

5) 失真系数

➤ 线性失真

- 幅度失真—幅频特性非恒定产生失真
- 相位失真—相频特性非恒定产生失真

➤ 非线性失真

- 半导体器件的非线性引起，引入新的频率分量
- 非线性失真系数

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nm}^2}}{I_{1m}}$$

I_{1m} : 基波分量幅度（非失真分量）

I_{nm} : 谐波分量幅度（失真分量）

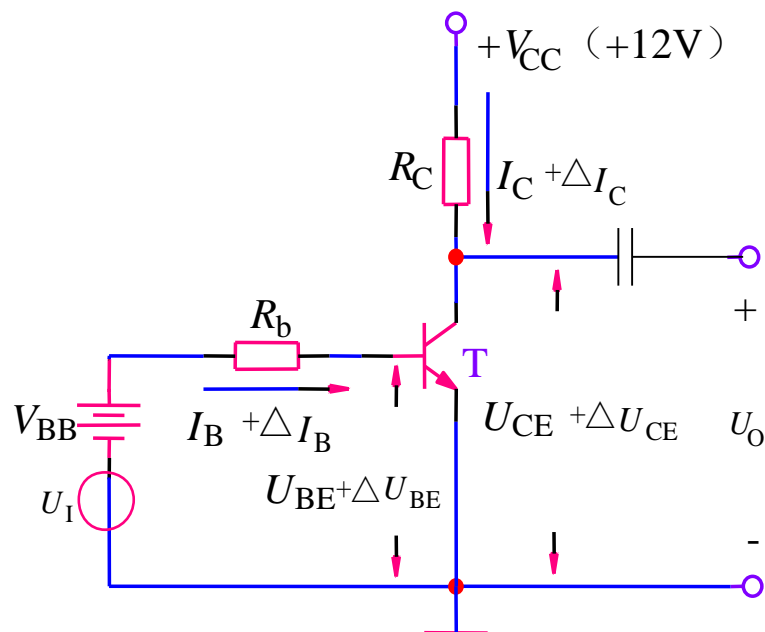
□ 最大不失真输出电压

□ 最大输出功率和效率

2.2 放大器的工作原理

一、晶体管放大电路实现放大的原理

➤基本电路



u_i : 输入交流信号, 需放大信号

u_o : 对 u_i 不失真放大交流信号

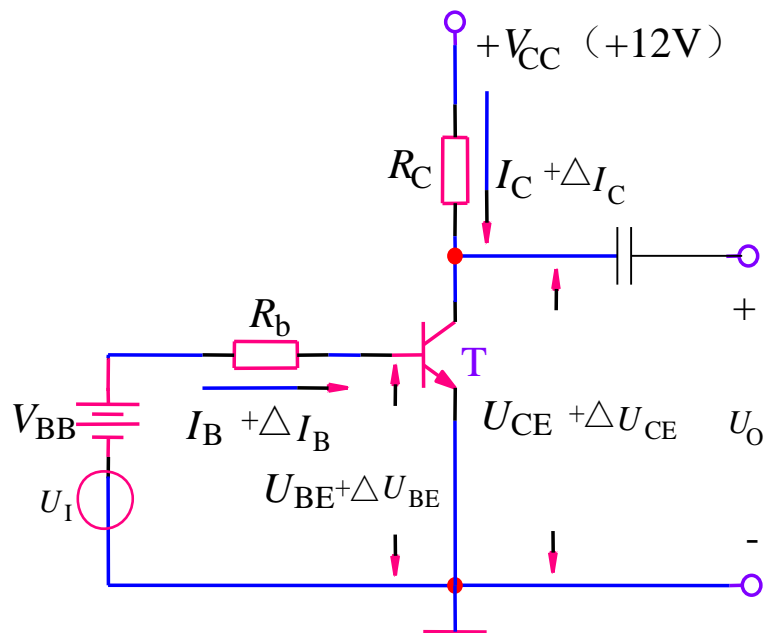
晶体管工作在放大状态。

$u_i = 0$, 静态

I_B, U_{BE}, I_C, U_{CE}

u_i 不等于0, 动态变化

$$\dot{U}_i \rightarrow \Delta U_{BE} \rightarrow \Delta I_B \rightarrow \Delta I_C (\beta \Delta I_B \rightarrow \Delta U_{CE} (-\Delta I_C \times R_c) \rightarrow \dot{U}_o$$

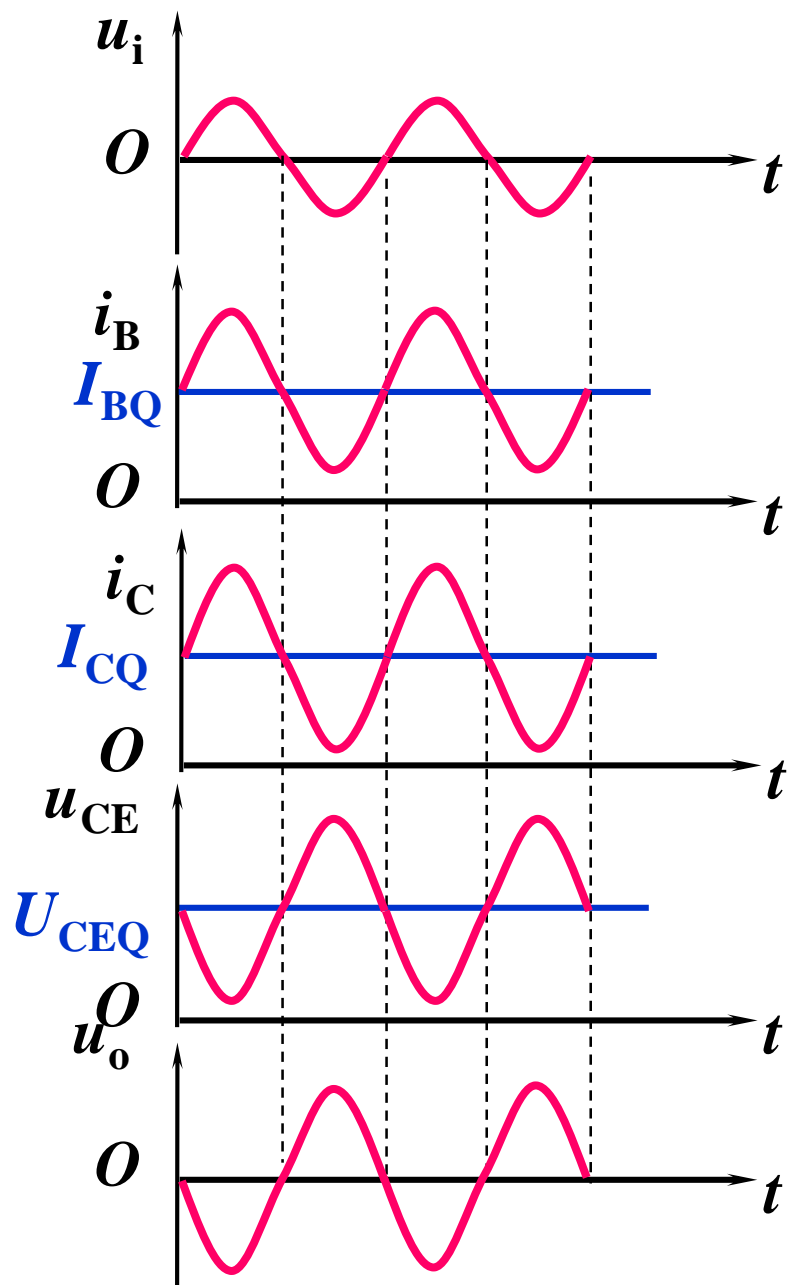


$$u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$$

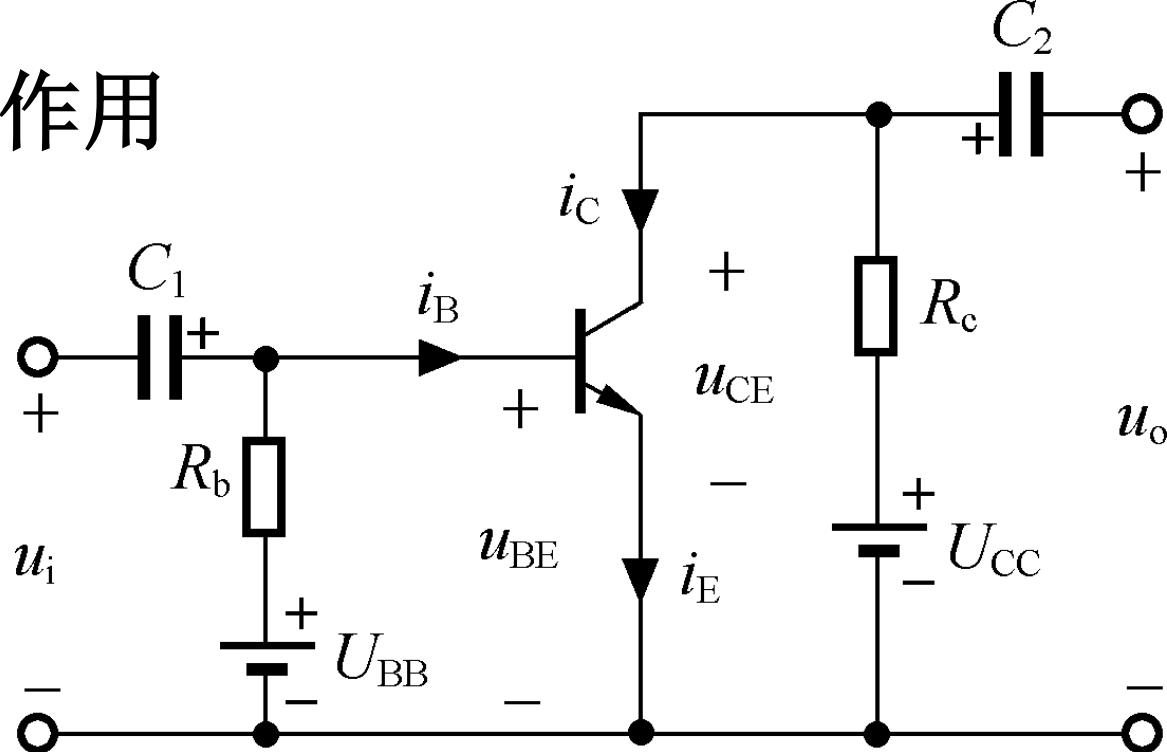
$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

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



➤ 各元件的作用



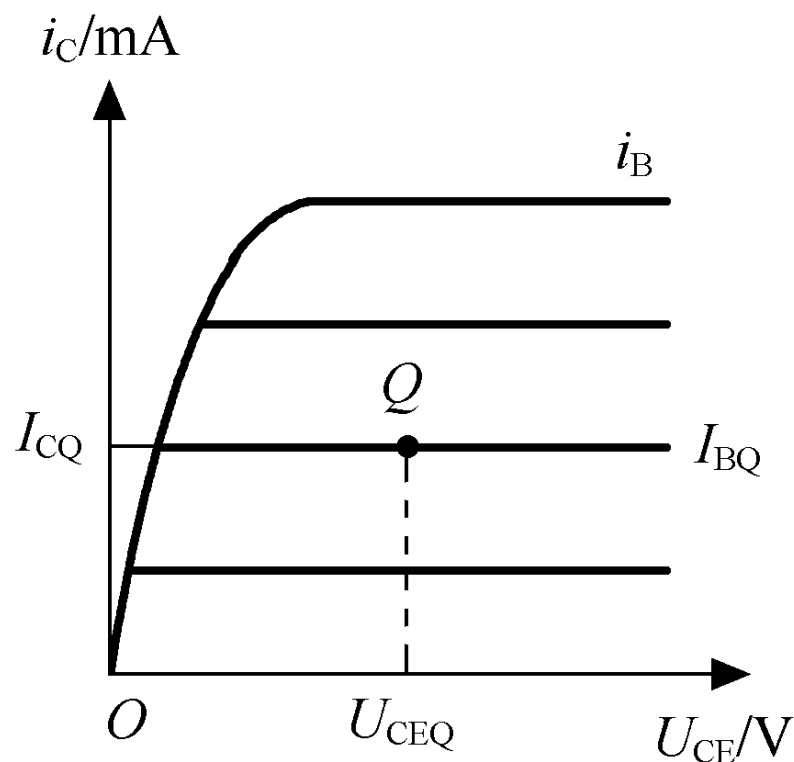
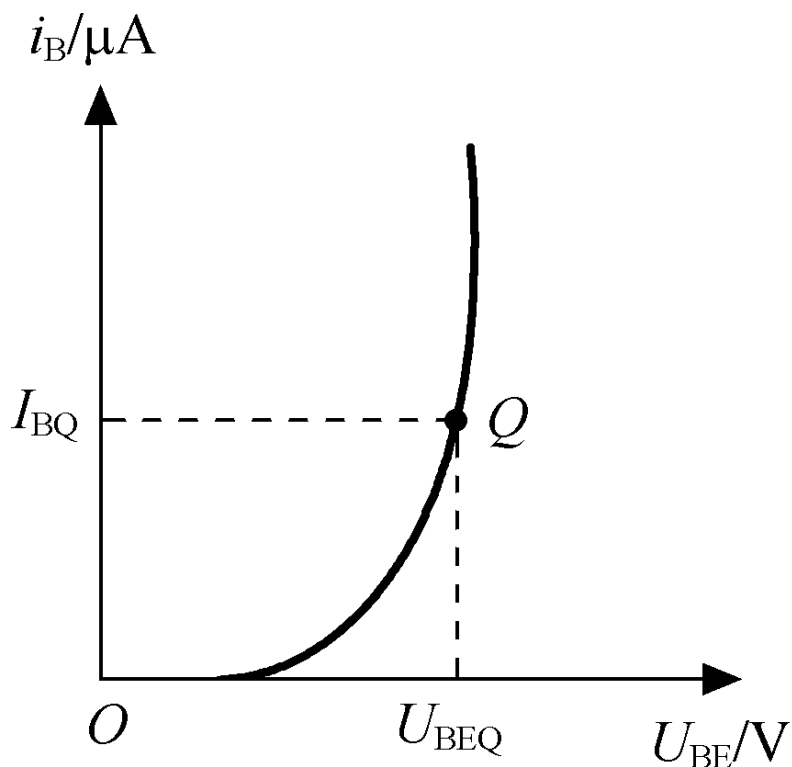
- ✓ **三极管**——放大元件，工作在放大区
- ✓ **U_{BB} , R_b** ——发射结正偏
- ✓ **U_{CC}** ——集电极电源，为电路提供能量。并保证集电结反偏
- ✓ **负载电阻 R_c** ——集电极电阻，将变化的电流转变为变化的电压
- ✓ **耦合电容 C_1 、 C_2** ——**隔直通交**隔离输入输出与电路直流的联系，同时能使信号顺利输入输出

➤放大电路组成

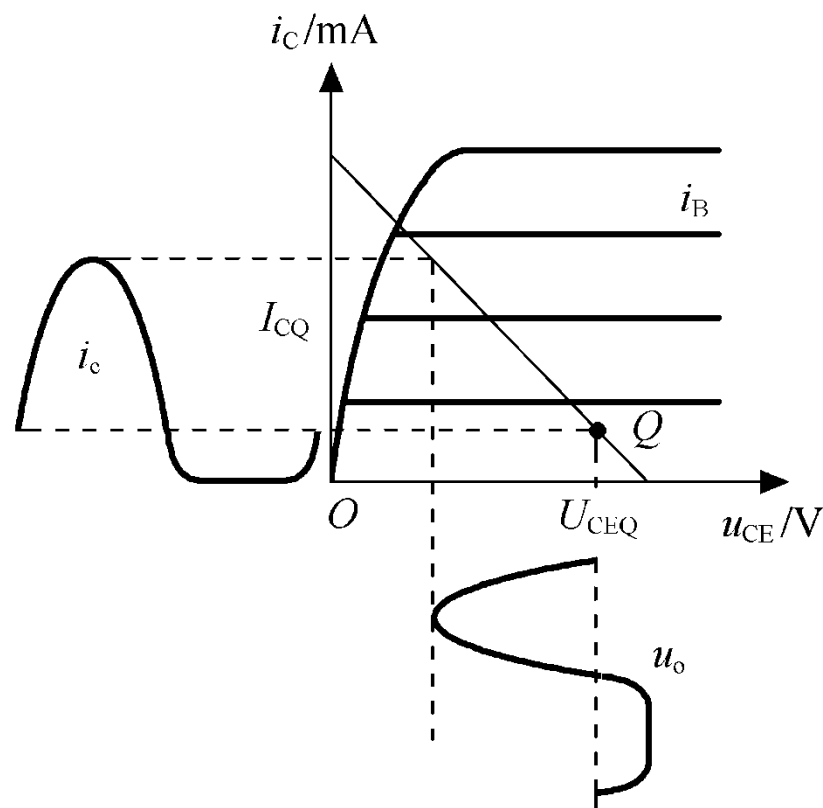
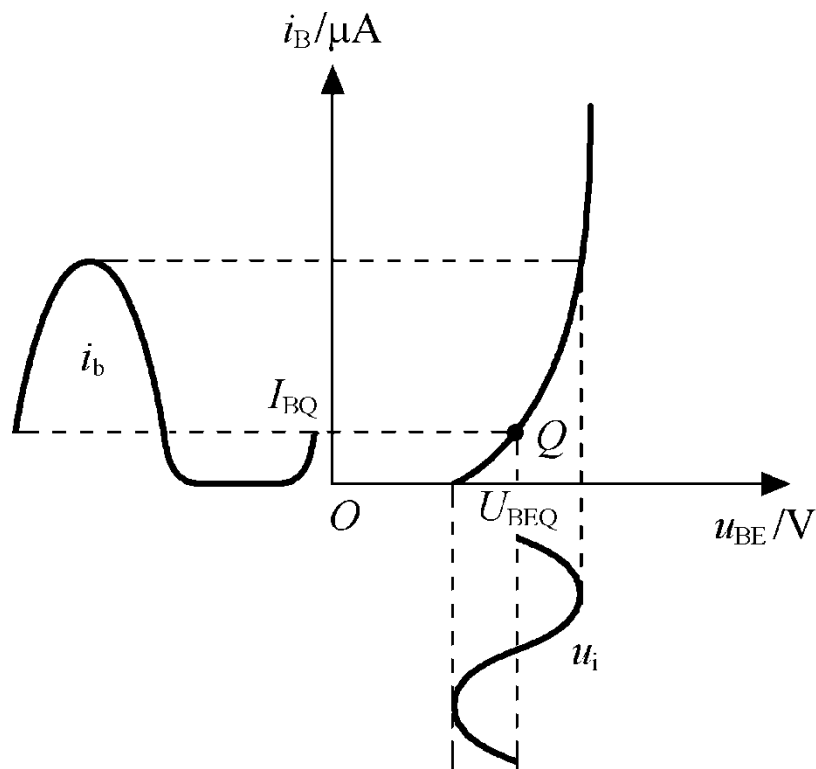
- (1) 外加电源的极性必须保证三极管的发射结正偏，集电结反偏。
- (2) 输入电压 u_i 要能引起三极管的基极电流 i_B 作相应的变化。
- (3) 三极管集电极电流 i_C 的变化要尽可能的转为电压的变化输出。
- (4) 放大电路工作时，直流电源 U_{CC} 要为三极管提供合适的静态工作电流 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和电压 U_{CEQ} ，即电路要有一个合适的静态工作点 Q 。

二、静态工作点

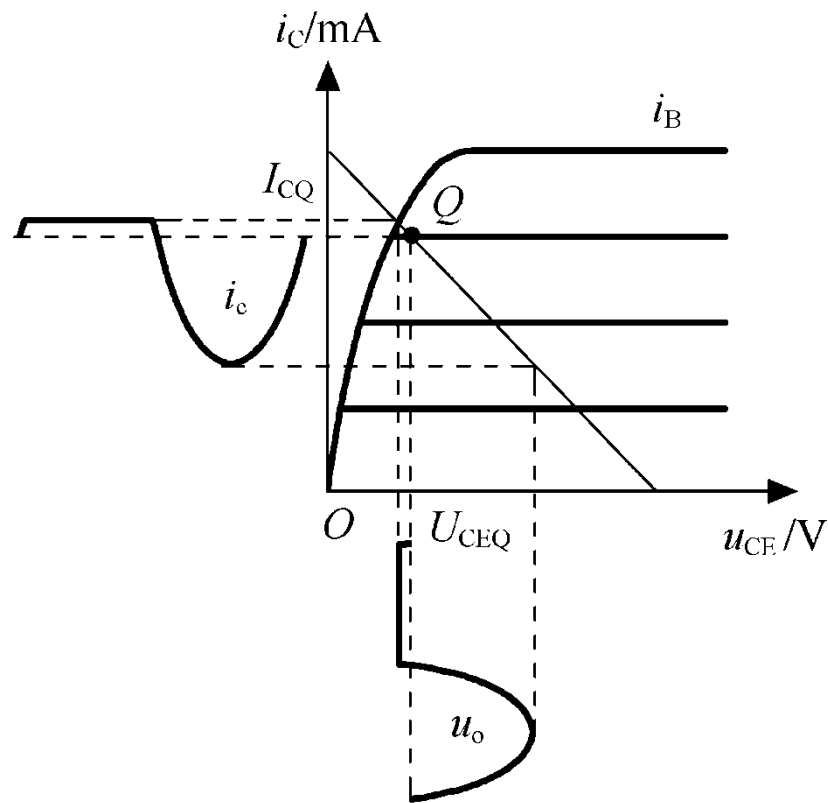
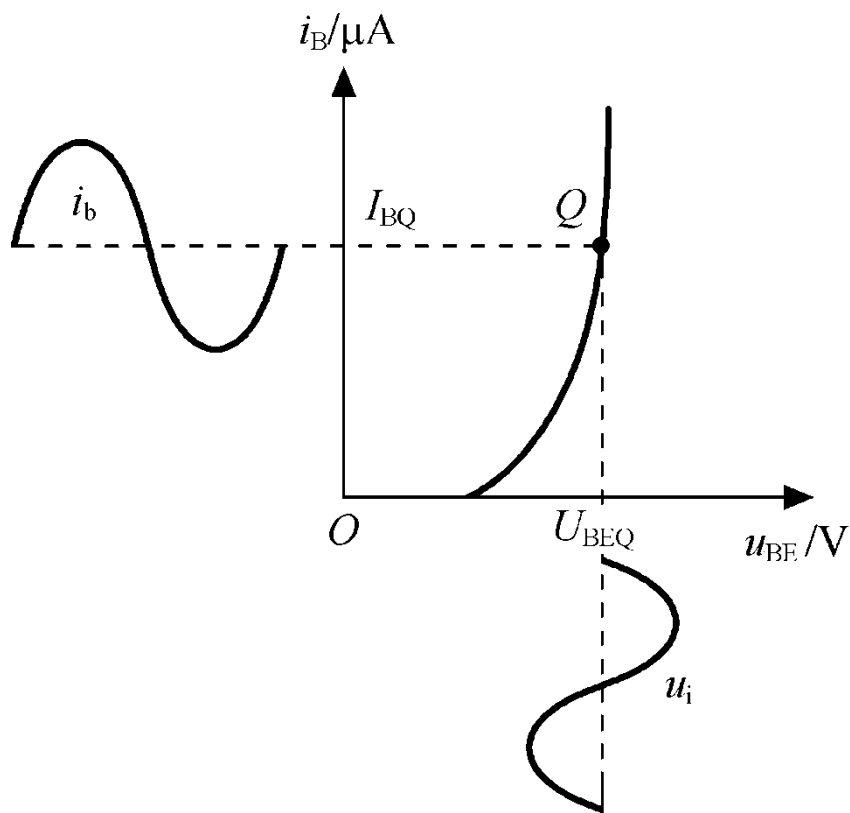
➤ 什么是静态工作点



➤ 设置合适的静态工作点



当放大电路的静态工作点 Q 选取比较低时， I_{BQ} 较小，输入信号的负半周进入截止区而造成的失真称为**截止失真**。



当放大电路的静态工作点 Q 选取比较高时， I_{BQ} 较大， U_{CEQ} 较小，输入信号的正半周进入饱和区而造成的失真称为**饱和失真**。

饱和失真
截止失真

} 平顶失真

合理的静态工作点：

- 合理的工作状态：放大状态
- 合理的位置：防止产生失真并尽可能大的放大信号

动态范围：最大不失真输出电压 U_{om}

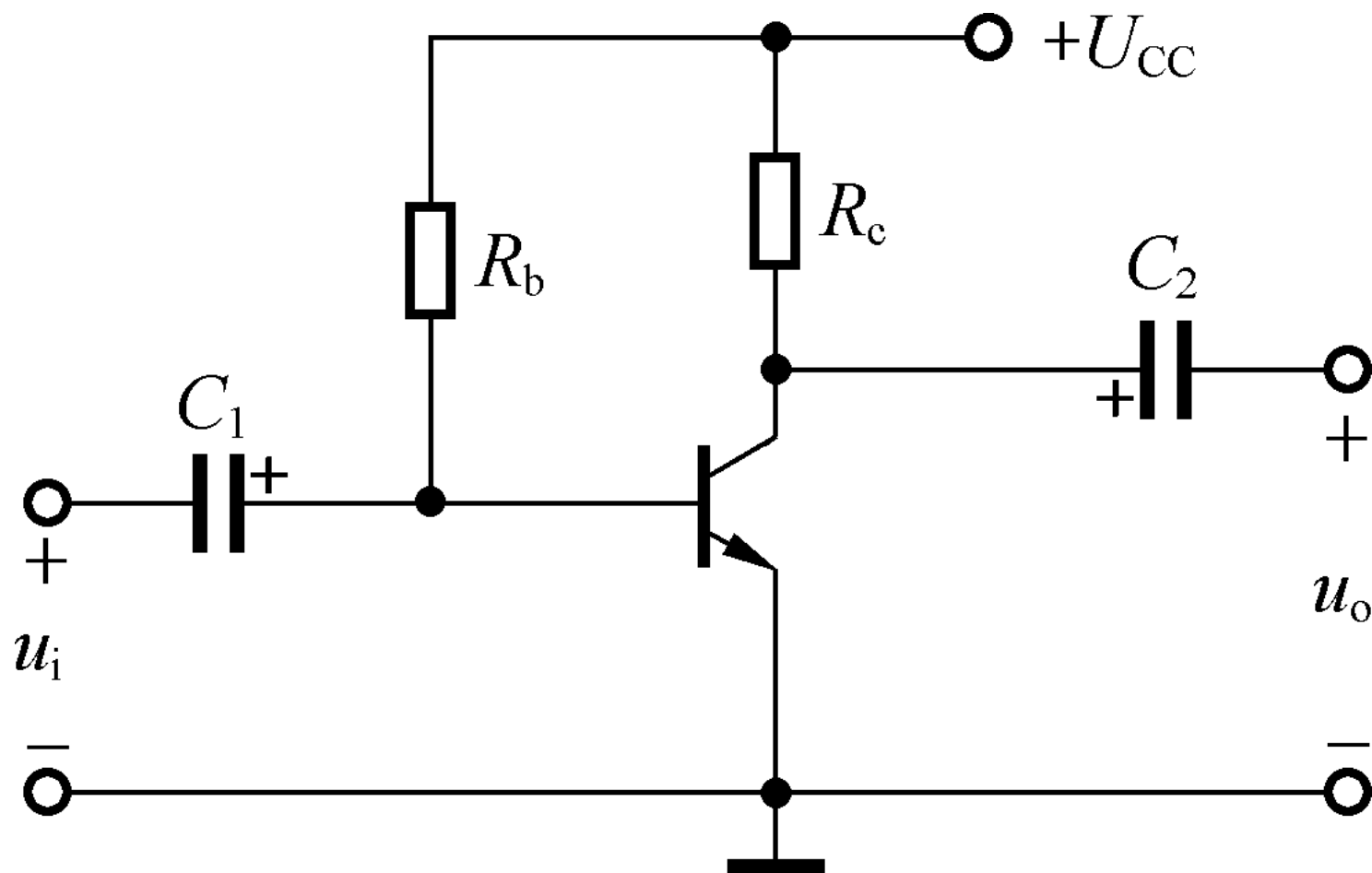
Q点应该处于放大区的中心位置，才会有最大的动态范围

$$U_{CEQ} = \frac{1}{2} V_{CC} \quad U_{om} = \frac{1}{2} V_{CC}$$

考虑晶体管饱和压降，则 $U_{CEQ} = \frac{1}{2} (V_{CC} - U_{CE(sat)}) + U_{CE(sat)}$

$$U_{om} = \min \{ U_{CEQ} - U_{CE(sat)}, V_{CC} - U_{CEQ} \}$$

三、单电源共射放大电路



2.3 放大电路的分析方法

- 非线性电路经适当近似后可按线性电路对待，利用叠加定理，分别分析电路中的交、直流成分，最终各个信号的瞬时值为交流直流之和。
- 直流分析（静态分析）
 - $u_i = 0$
 - 直流通路
 - 计算静态工作点（I, U），确定工作状态，得到直流信号
- 交流分析（动态分析）
 - $u_i \neq 0$ ，只考虑变化的信号之间的关系
 - 交流通路
 - 计算交流性能指标：输入、输出电阻，增益

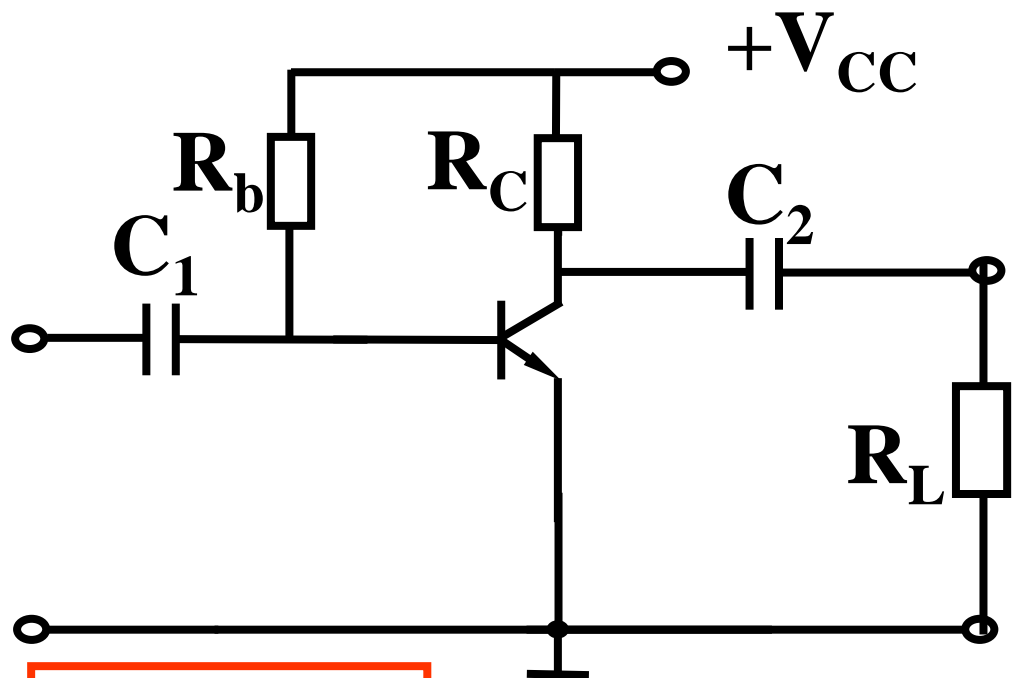
直流通路和交流通路

➤ 直流通路----直流电流流经的通路

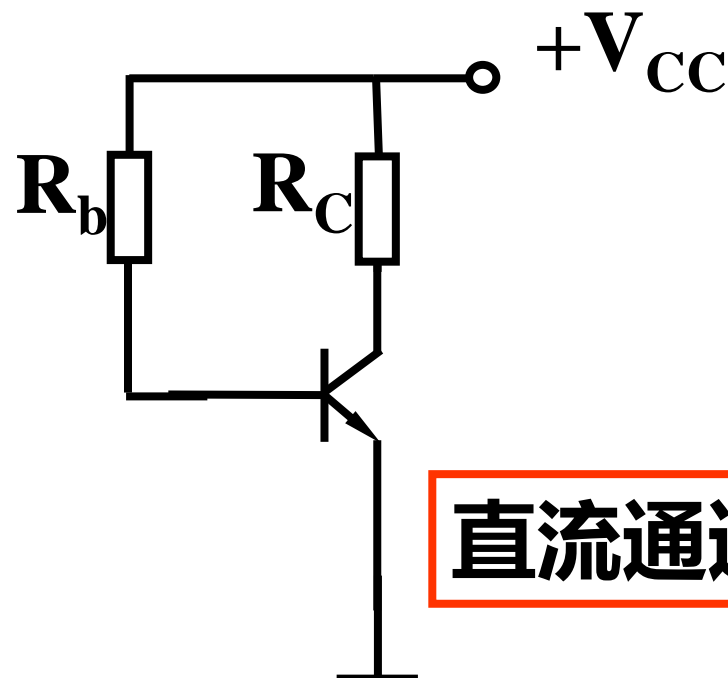
- 将所有的电容开路
- 电感短路
- 交流信号源去掉，但保留内阻

➤ 交流通路----交流信号流经的通路

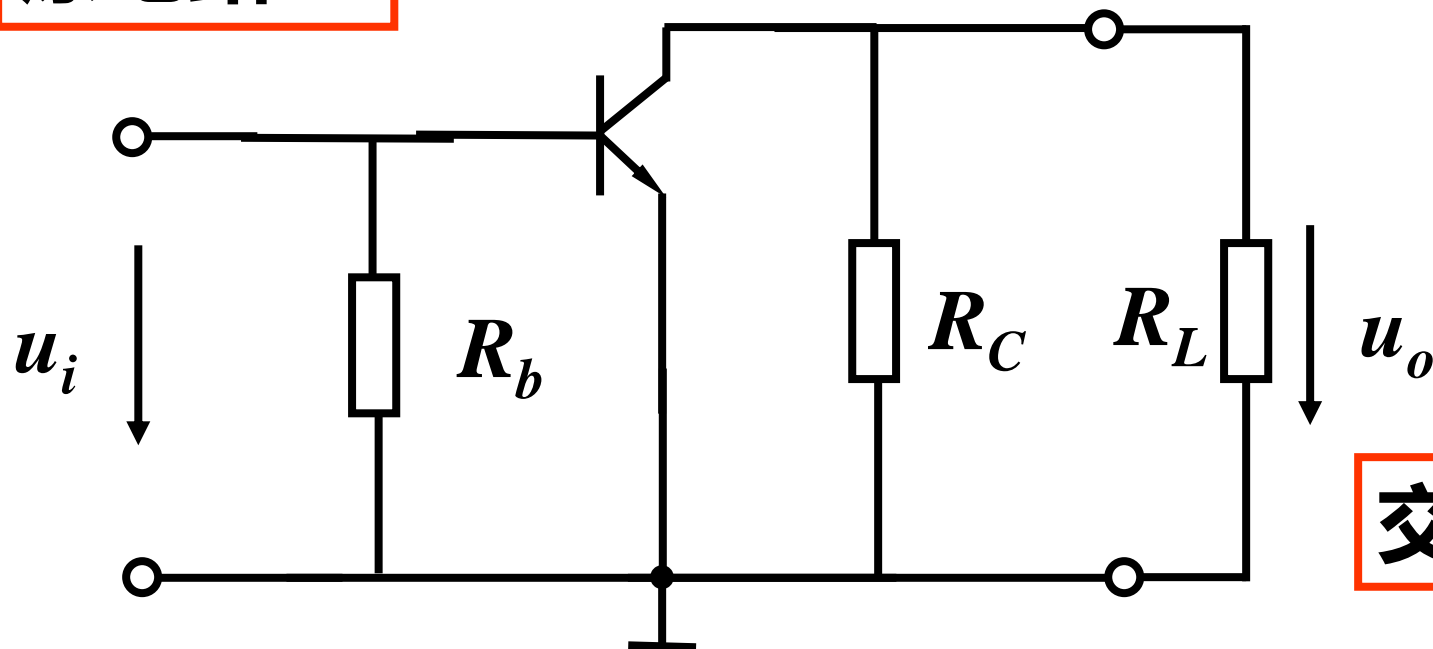
- 耦合电容短路
- 直流电压源短路
- 直流电流源开路



原电路



直流通道



交流通道

一、直流分析

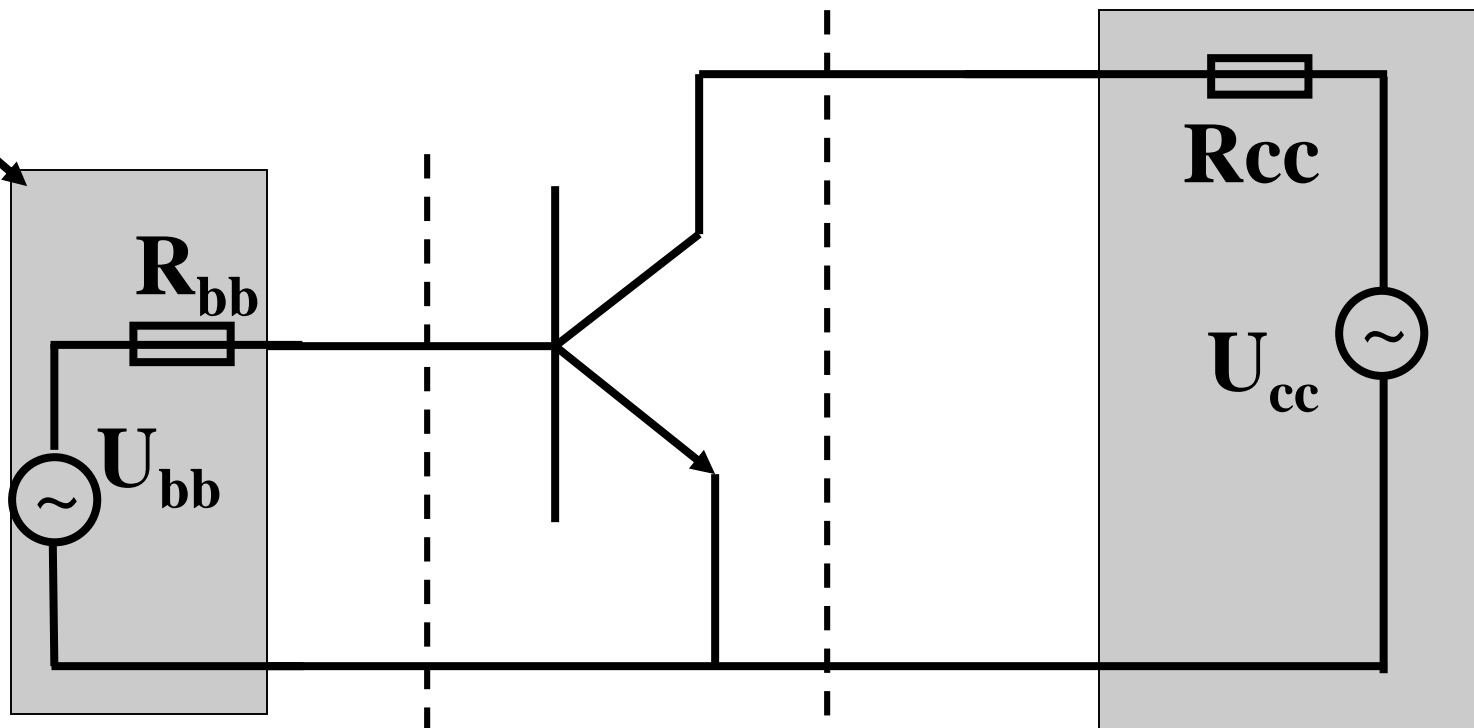
➤ 图解分析法

利用晶体三极管的伏安特性曲线和管外电路的直流负载线得到工作点。

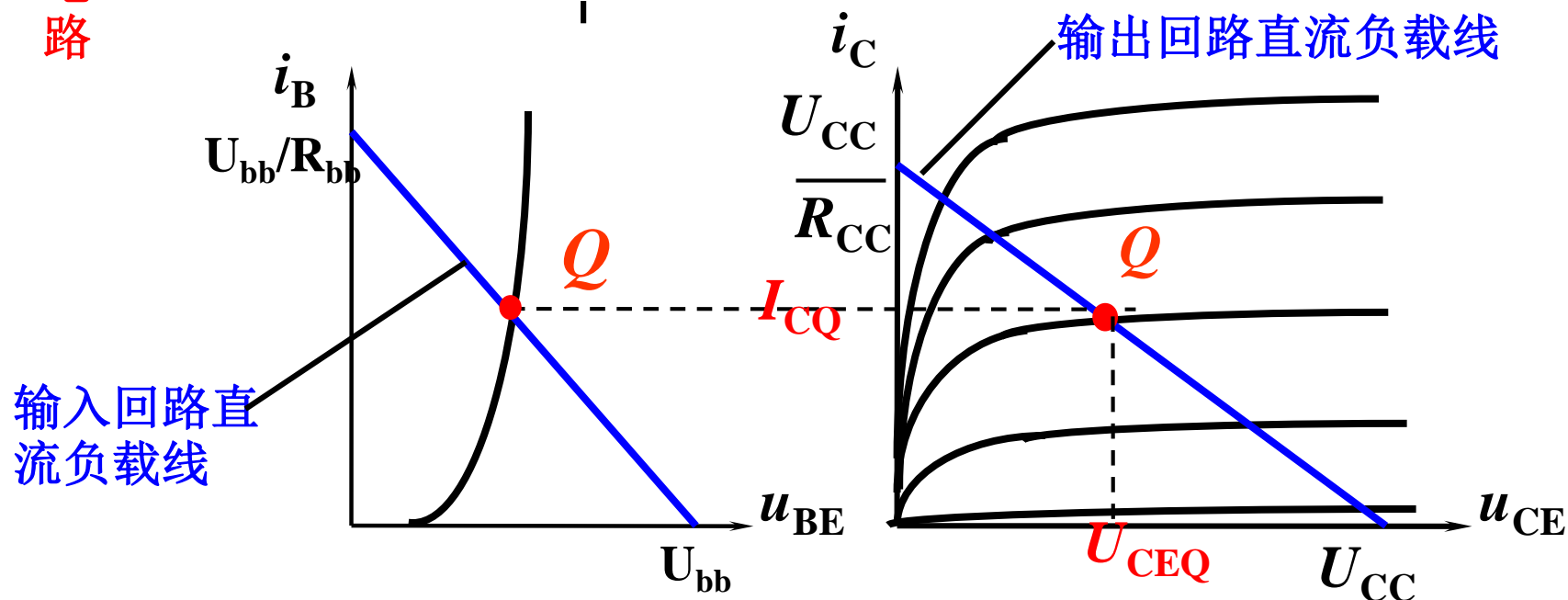
输入特性曲线族，输入回路负载线
输出特性曲线族，输出回路负载线 } Q 工作点

Q 工作点 \rightarrow 其他地方的直流电压以及直流电流

晶体管输入回路的管外电路



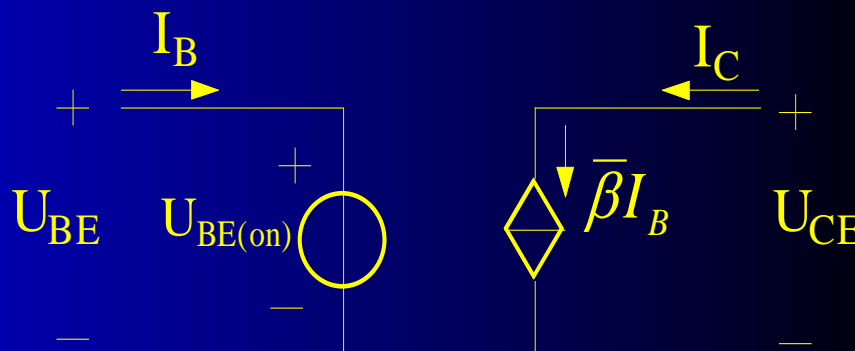
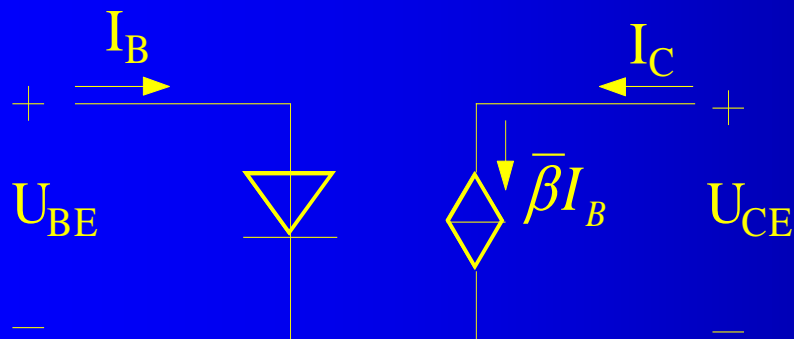
晶体管输出回路的管外电路



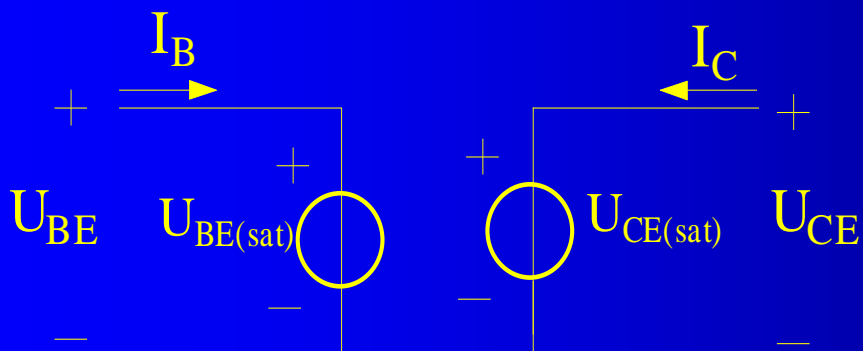
➤ 等效电路法

用等效电路来替代晶体三极管

放大模式



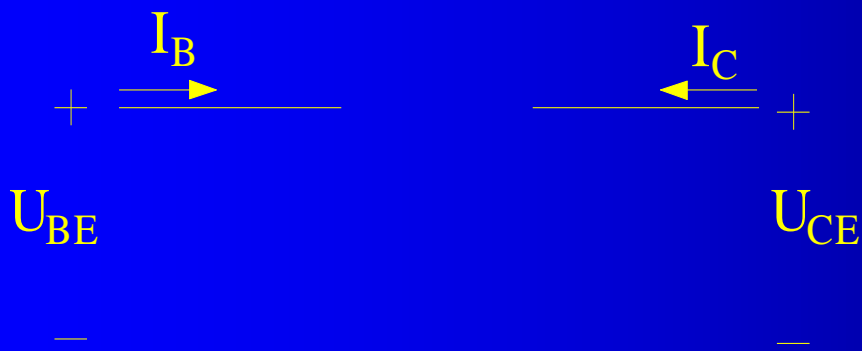
饱和模式



$$U_{BE(sat)} = U_{BE(on)} = 0.7V$$

$$U_{CE(sat)} = U_{BE(on)} - U_{BC(on)} = 0.3V$$

截止模式

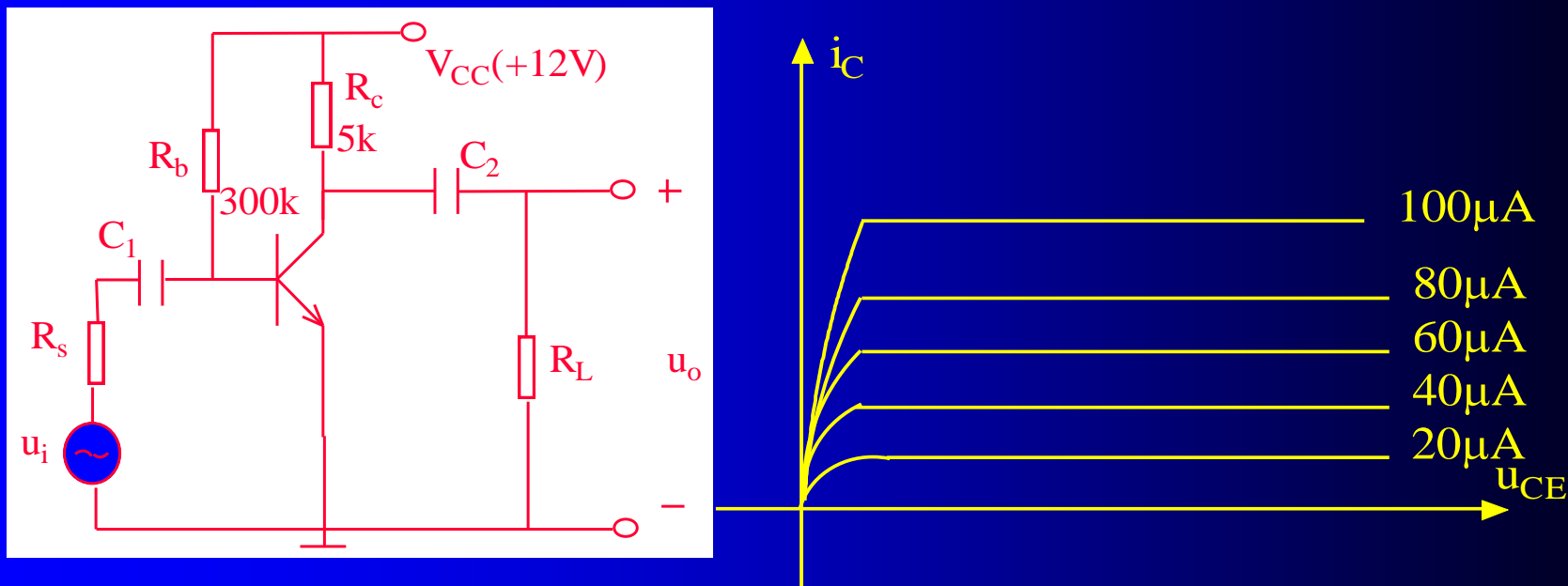


$$I_B = I_C = 0$$

例1:

电路及锗三极管的输出特性曲线如图所示

- (1) 求静态工作点
- (2) 当 R_b 由 $300k\Omega$ 减为 $150k\Omega$ 时, Q点移至何处?
- (3) 当 R_c 由 $5k\Omega$ 减为 $4k\Omega$ 时, Q点移至何处?
- (4) 当电源电压由 $12V$ 减为 $6V$ 时, Q点又如何移动?



解:

$$(1) \quad I_B = \frac{12 - 0.3}{300} = 40 \mu\text{A}$$

输出负载线 $V_{CC} - I_C R_c - U_{CE} = 0$

$$(2) \quad R_b \rightarrow 150\text{k}$$

$$I_B = \frac{12 - 0.3}{150} = 80 \mu\text{A}$$

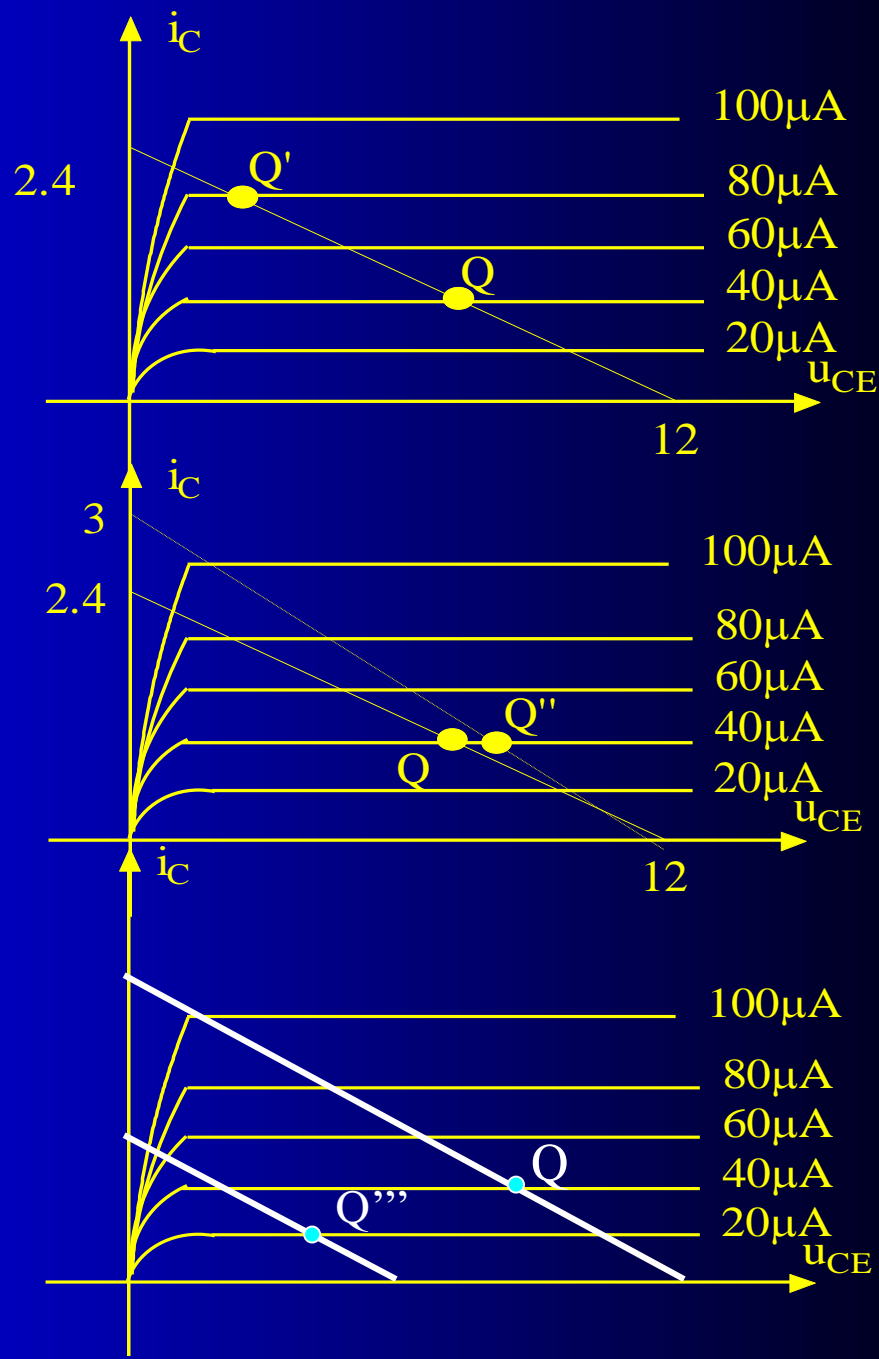
得Q'

$$(3) \quad R_c \rightarrow 4\text{k}$$

$$V_{CC} - I_C R_c - U_{CE} = 0 \quad \text{得Q''}$$

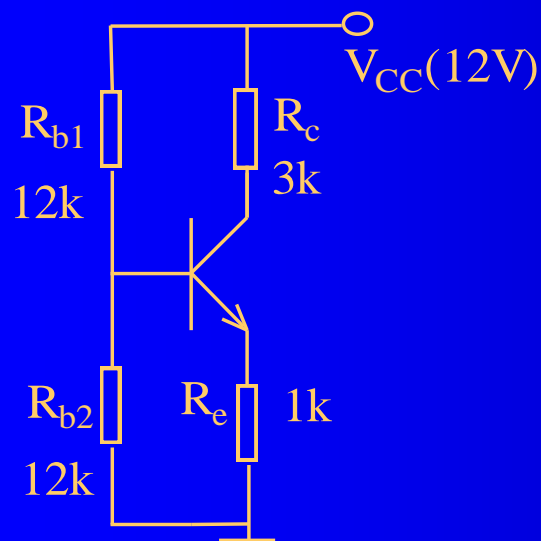
$$(4) \quad V_{CC} \rightarrow 6\text{V}$$

得Q'''

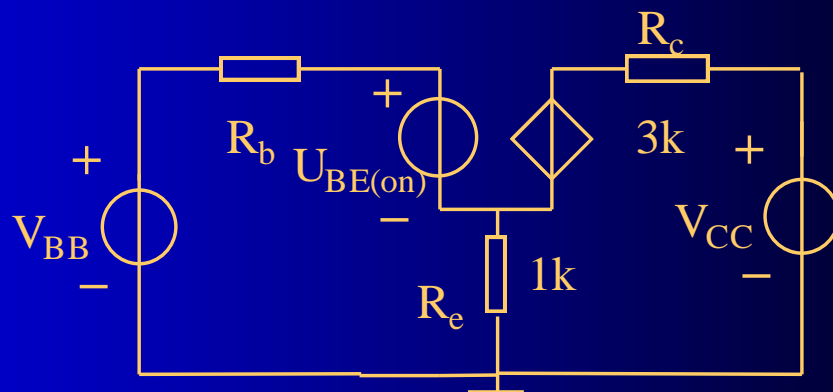
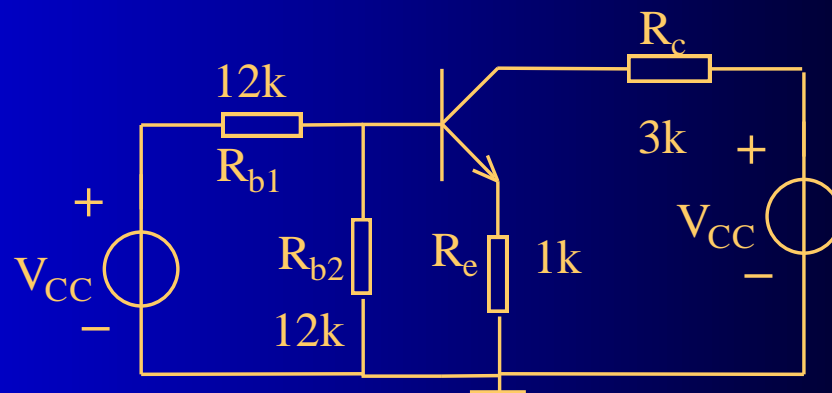


例2:

如图所示电路，求 I_{CQ} 与 U_{CEQ} ，已知 $\beta=20$



解:



$$V_{BB}=6V, R_b=6k\Omega$$

$$\begin{cases} V_{BB} = I_B R_b + U_{BE(\text{on})} + I_E R_e \\ I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE(\text{on})}}{R_b + (1 + \beta) R_e} \quad \text{或} \quad I_E = \frac{V_{BB} - U_{BE(\text{on})}}{R_e + \frac{R_b}{(1 + \beta)}}$$

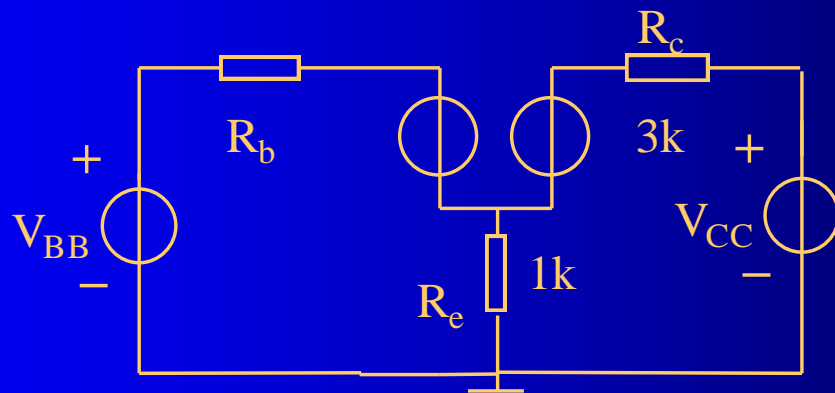
$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e = V_{CC} - I_C (R_c + R_e)$$

代入数值，可得

$$I_{EQ} = 4.12 \text{mA} \quad U_{CEQ} = -4.49 \text{V} < 0$$

说明不工作在放大区

假设工作在饱和区，利用饱和压降 $U_{CE(sat)}=0.3V$



$$\begin{cases} V_{BB} = I_B R_b + U_{BE(sat)} + I_E R_e \\ V_{CC} = I_C R_c + I_E R_e + U_{CE(sat)} \\ I_E = I_B + I_C \end{cases}$$

代入求解得

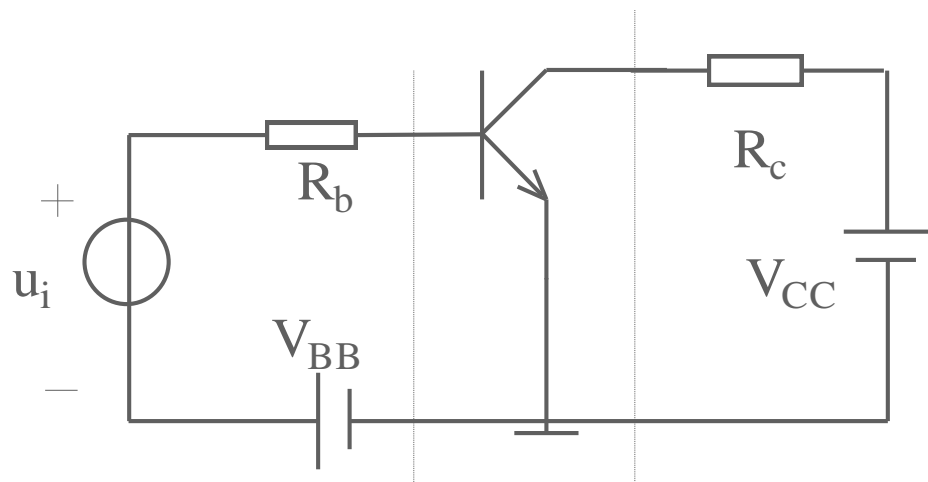
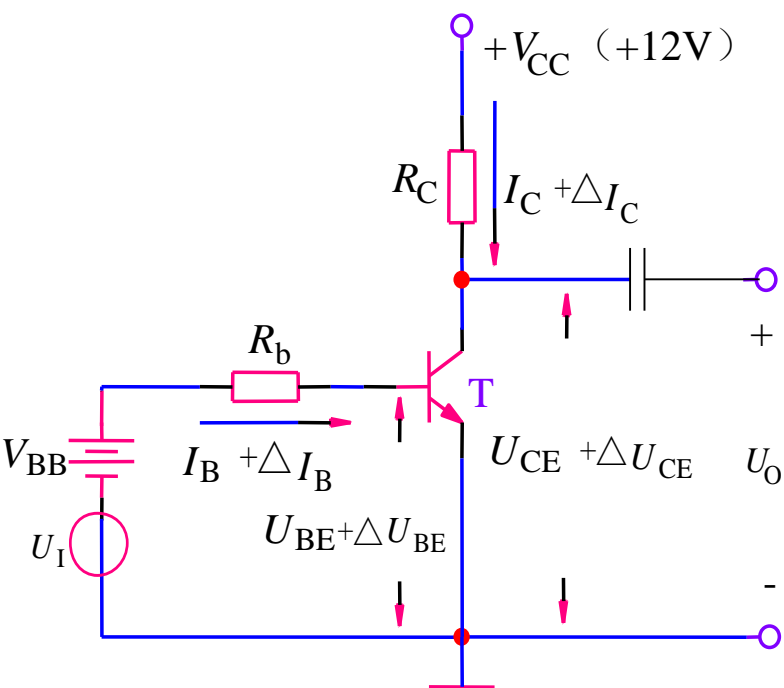
$$I_{CQ} = 2.83\text{mA} \quad U_{CEQ} = 0.3V$$

$$I_{BQ} = 0.32\text{mA}$$

二、交流分析

➤ 图解法

❑ 空载情况

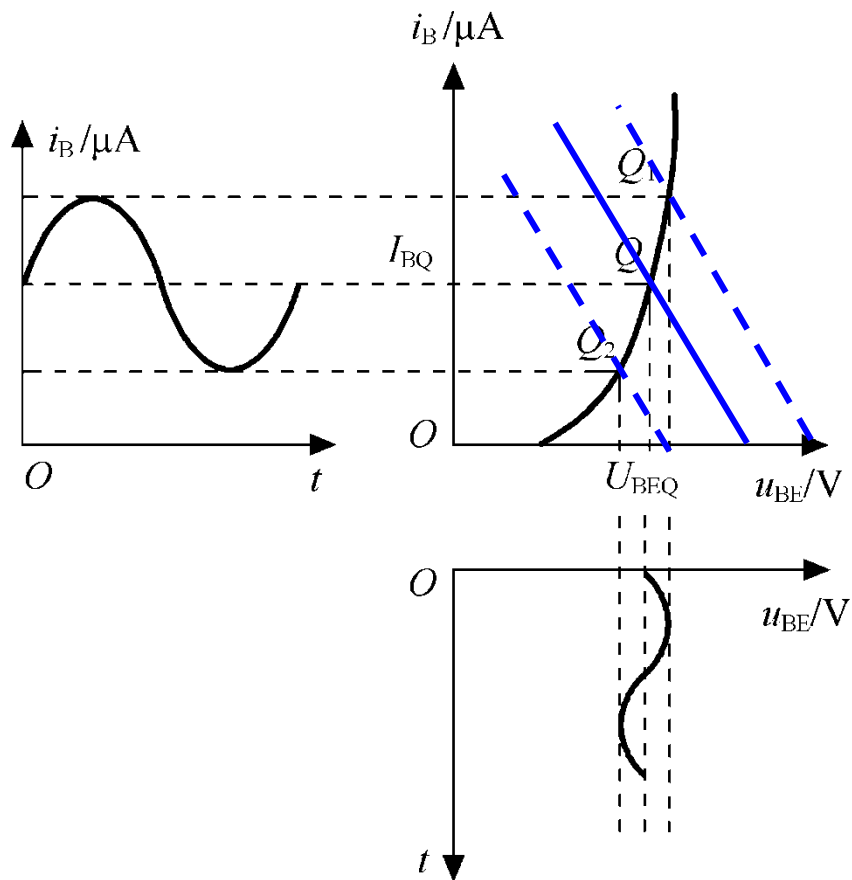


输入负载线

$$u_{BE} = V_{BB} + u_i - i_B R_b$$

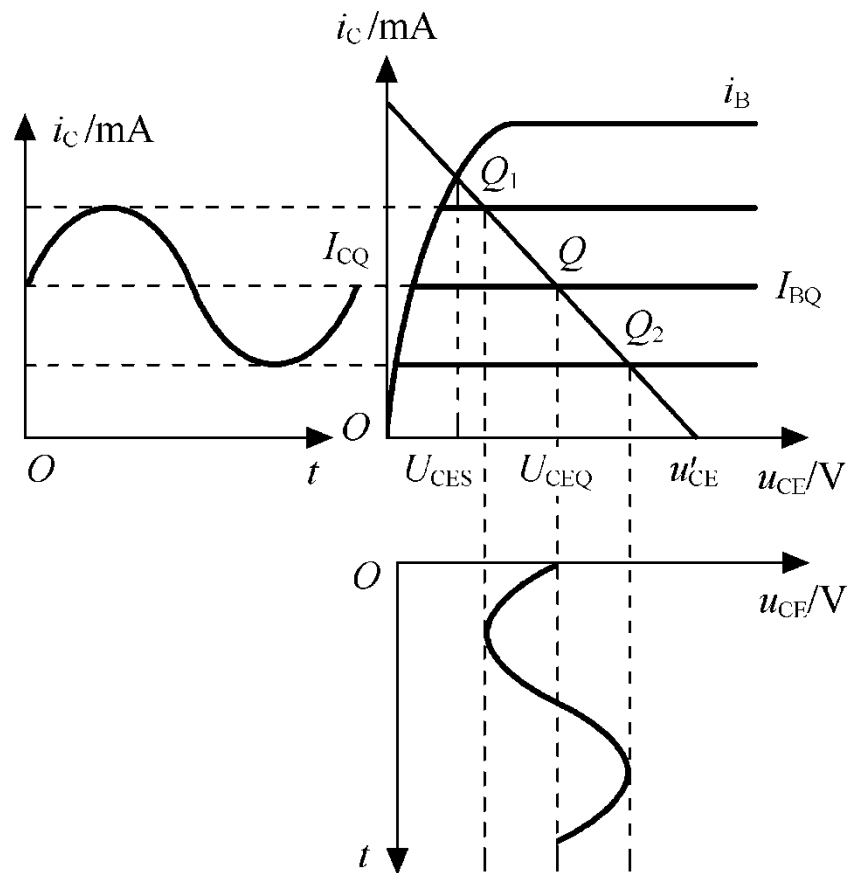
输出负载线

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$



$$u_{BE} = V_{BB} + u_i - i_B R_b$$

输入回路的动态变化



$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$$

输出回路的动态变化

□ 带负载情况

交流负载线

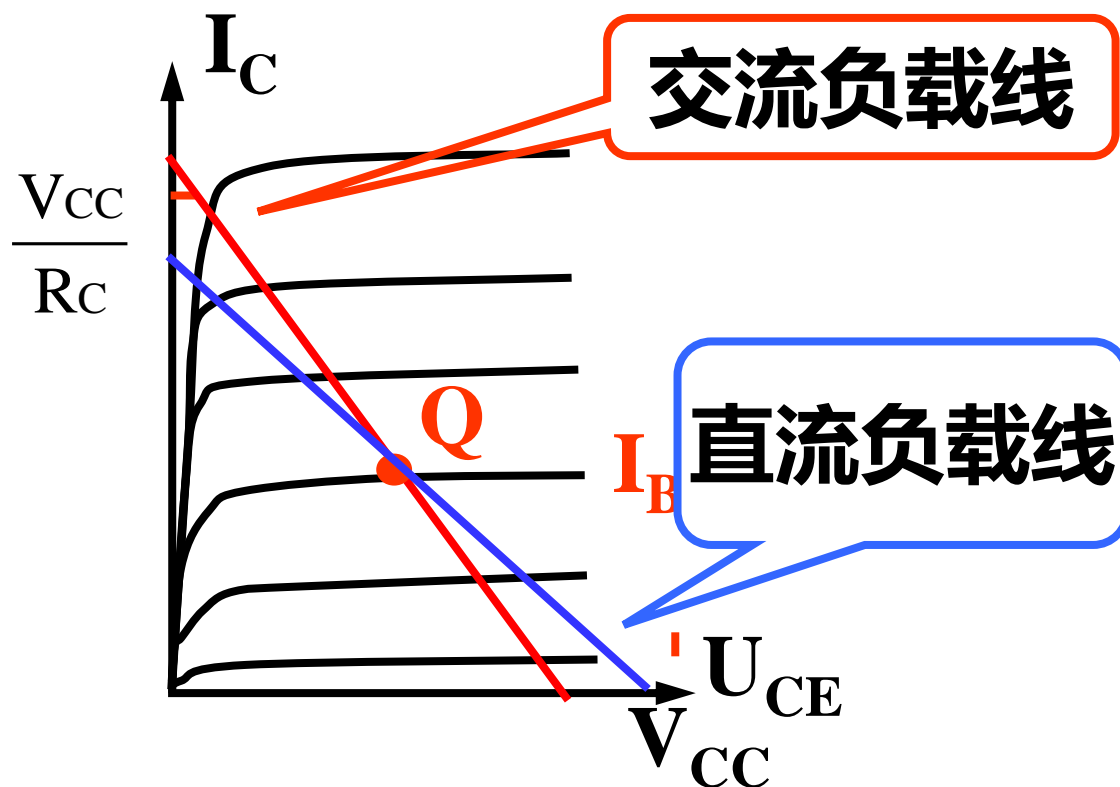
①斜 率为 $-1/R'_L$ 。

($R'_L = R_L // R_c$)

②经过Q点。

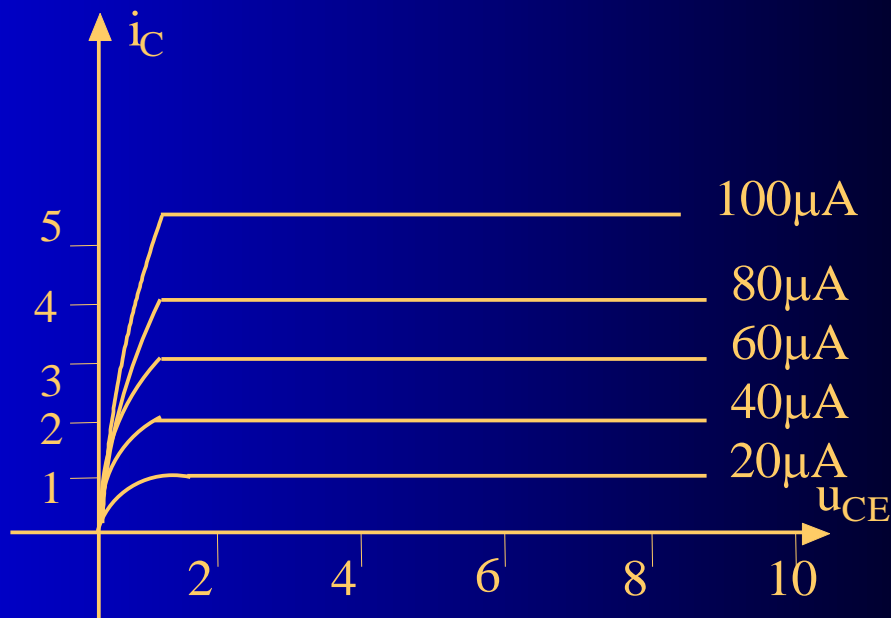
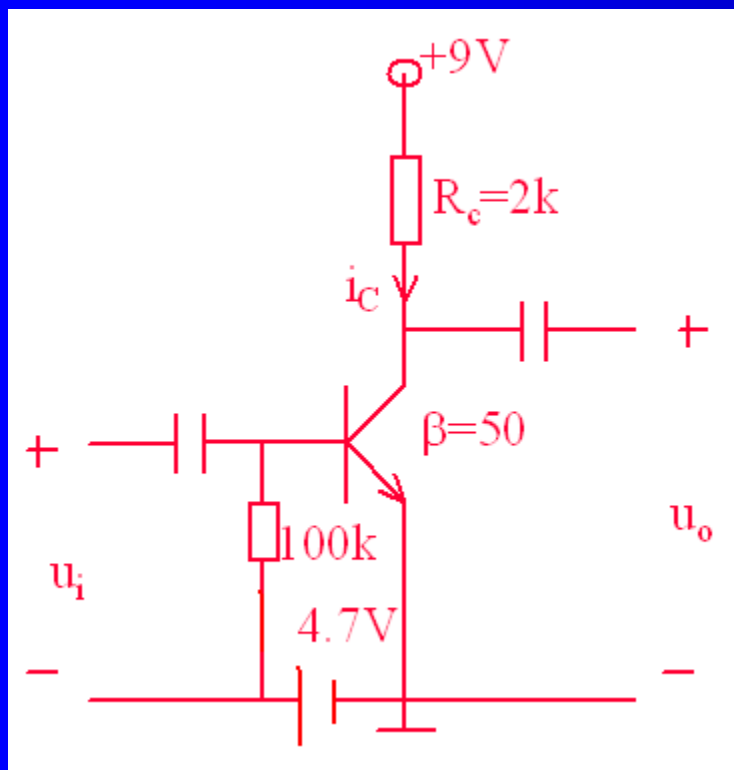
注意：

- (1) 交流负载线是有交流 输入信号时工作点的运动轨迹。
- (2) 空载时，交流负载线与直流负载线重合（对于电容耦合方式），如果是直接耦合，则始终重合。



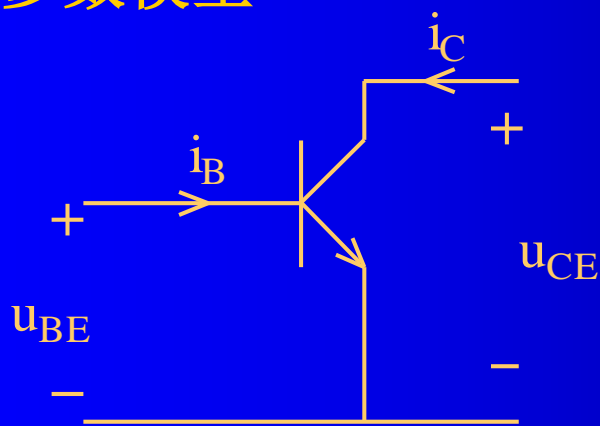
例3:

如图所示电路，输入端加上一正弦信号后，基极电流 i_B 的交流分量为 $i_b = 20\sin\omega t$ (μA)，三极管输出特性曲线如图，试画出 i_c ， u_{CE} ，和 u_o 波形。



➤ 小信号等效电路分析（线性化处理）

1、h参数模型



$$\begin{cases} u_{BE} = f_1(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f_2(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{BEQ} + u_{be} = f_1(I_{BQ} + i_b, U_{CEQ} + u_{ce}) \\ I_{CQ} + i_c = f_2(I_{BQ} + i_b, U_{CEQ} + u_{ce}) \end{cases}$$

在Q点幂级数展开

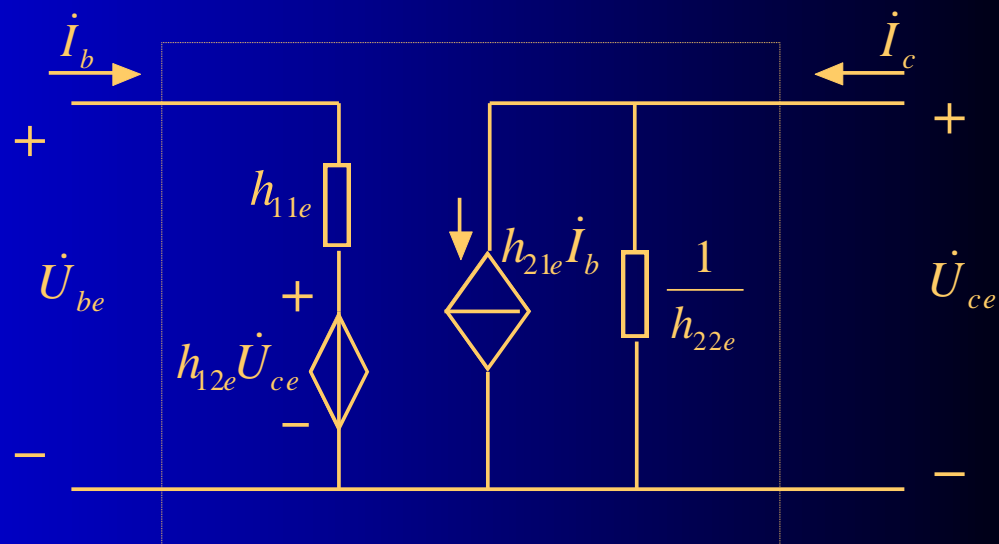
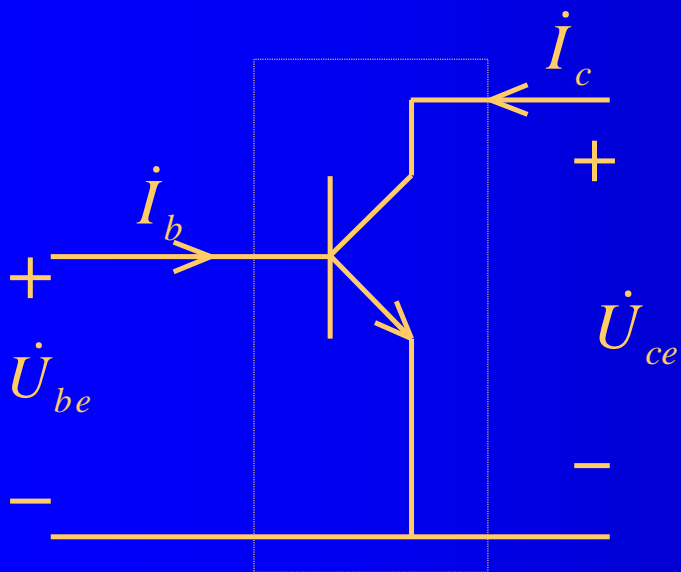
$$\begin{cases} u_{BE} = f_1(I_{BQ}, U_{CEQ}) + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q \cdot i_b + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_Q \cdot u_{ce} + \text{高阶项} \\ i_C = f_2(I_{BQ}, U_{CEQ}) + \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_Q \cdot i_b + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_Q \cdot u_{ce} + \text{高阶项} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{be} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q \cdot \dot{I}_b + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_Q \cdot \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_Q \cdot \dot{I}_b + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_Q \cdot \dot{U}_{ce} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{be} = h_{11e} \cdot \dot{I}_b + h_{12e} \cdot \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = h_{21e} \cdot \dot{I}_b + h_{22e} \cdot \dot{U}_{ce} \end{array} \right.$$

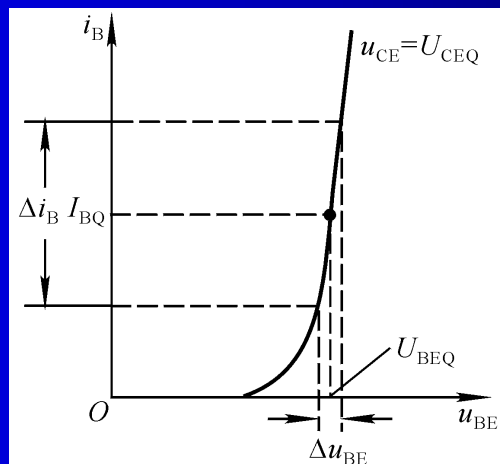
$$\left\{ \begin{array}{l} h_{11e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q \\ h_{12e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_Q \\ h_{21e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_Q \\ h_{22e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_Q \end{array} \right.$$

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

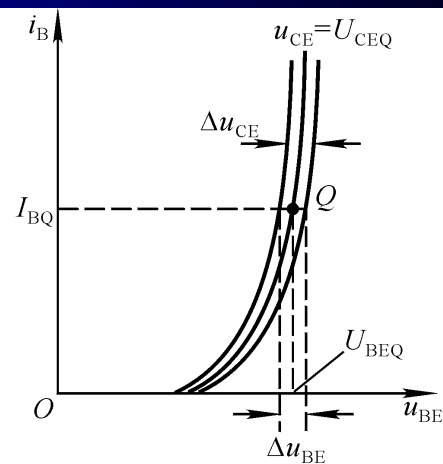


2、h参数含义

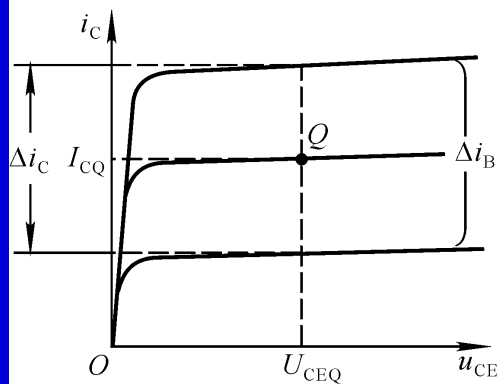
$$\left\{ \begin{array}{l} h_{11e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q \\ h_{12e} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_Q \\ h_{21e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_Q \\ h_{22e} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_Q \end{array} \right.$$



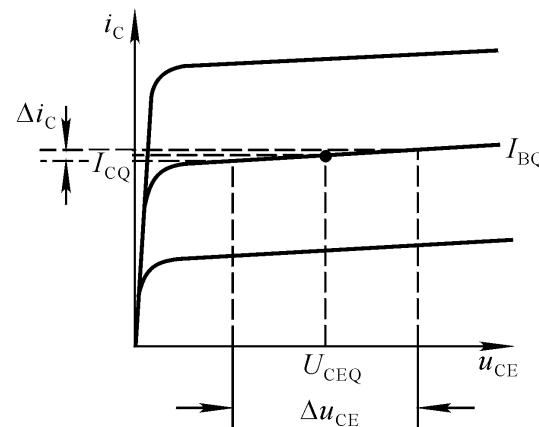
(a)



(b)



(c)



(d)

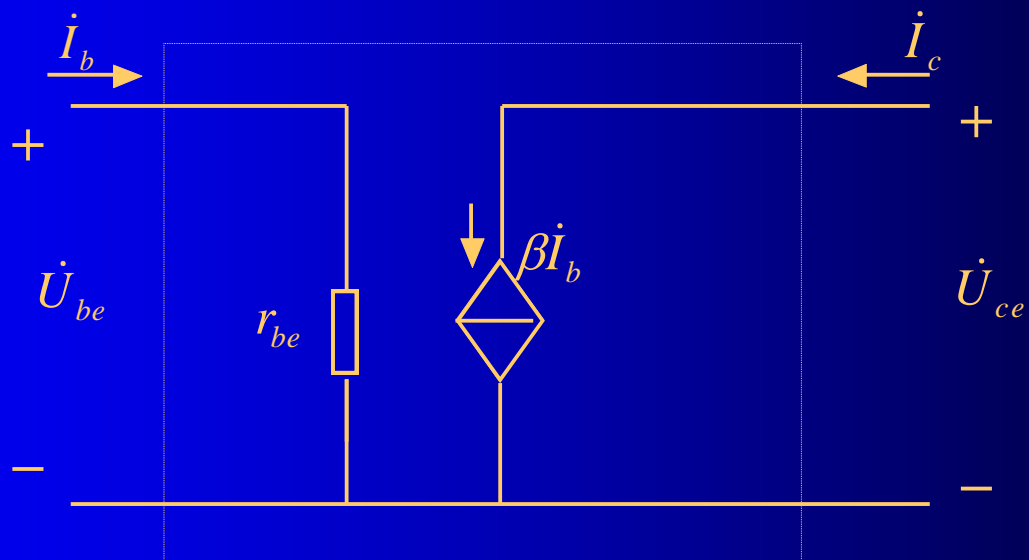
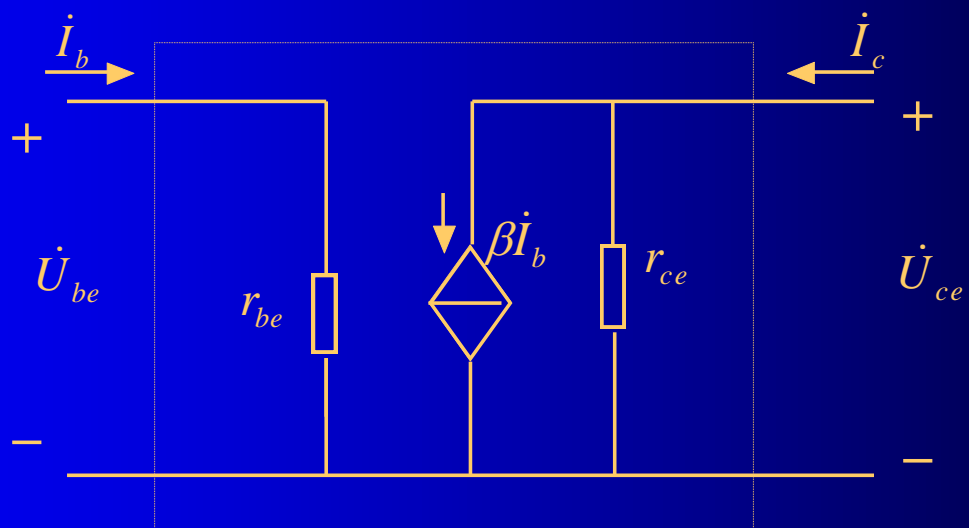
h_{11} : 输入端的动态电阻, r_{be}

h_{12} : 为0

h_{21} : 交流电流放大系数, β

h_{22} : 输出端动态导纳, g_{ce} 。

简化的H参数模型



3、参数值

β

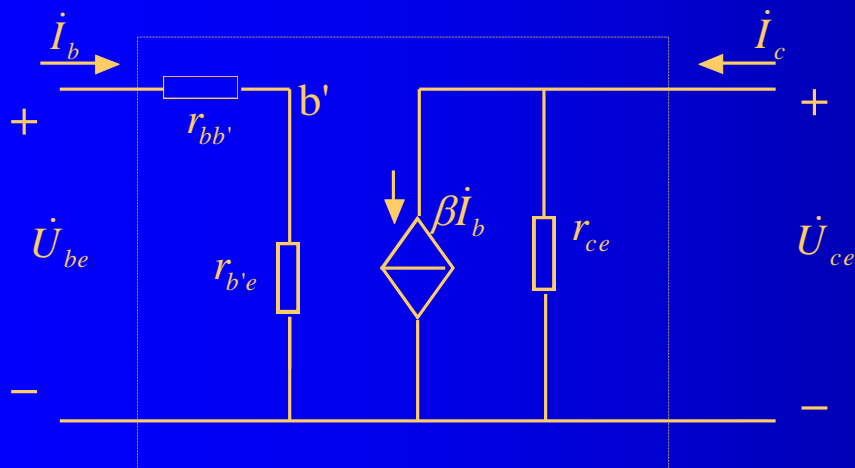
$$\begin{aligned} r_{be} &= \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q = \left[\left. \frac{\partial i_B}{\partial u_{BE}} \right|_Q \right]^{-1} = \left[\frac{1}{1 + \beta} \left. \frac{\partial i_E}{\partial u_{BE}} \right|_Q \right]^{-1} \\ &= \left[\frac{1}{1 + \beta} \frac{\partial}{\partial u_{BE}} (I_{EBS} e^{u_{BE}/U_T}) \right]^{-1} \bigg|_Q \\ &= (1 + \beta) \cdot \left[\frac{I_{EBS}}{U_T} e^{U_{BEQ}/U_T} \right]^{-1} = \frac{(1 + \beta) \cdot U_T}{I_{EQ}} \end{aligned}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + \frac{(1 + \beta) \cdot U_T}{I_{EQ}}$$

$$r_{ce} \approx \frac{|V_A|}{I_{CQ}}$$

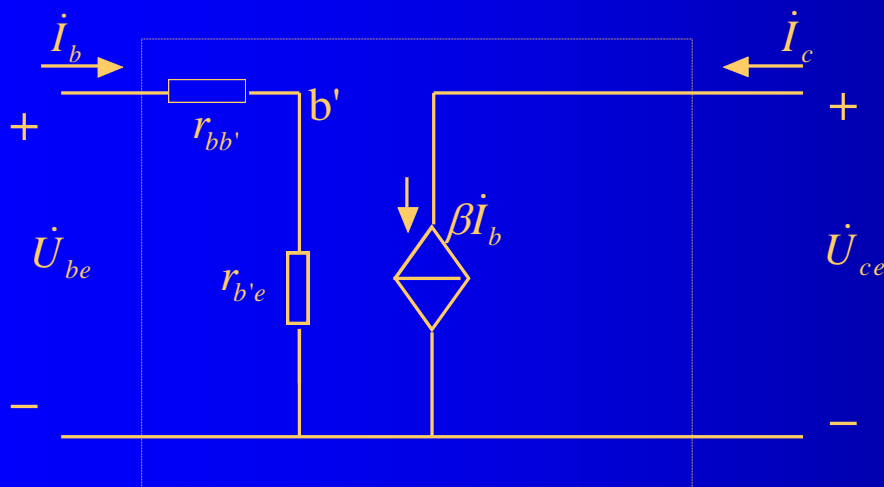
V_A : 厄尔利电压

r_{ce} : 一般为几百千欧到几兆欧



注意:

- 1、只有在分析三极管上的动态变化的小信号时才能用这个模型
- 2、低频信号时适用
- 3、模型参数与静态工作点有关

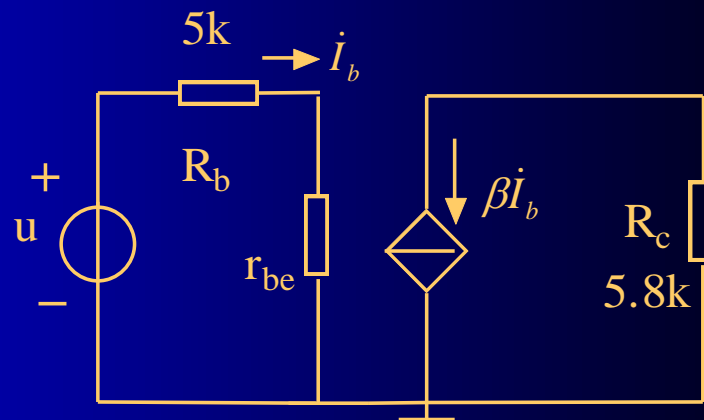
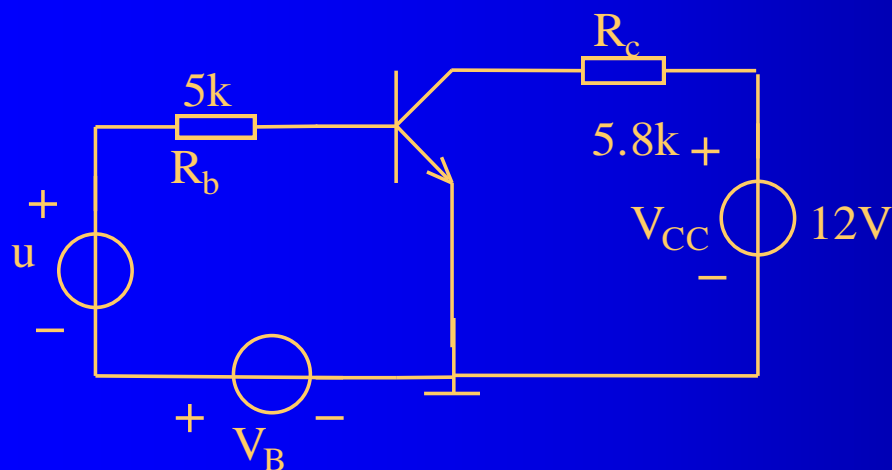


交流分析的步骤

- 静态工作点分析，得到静态电流、电压值
- 得到交流通路，并用H参数模型替代晶体三极管，得到交流等效电路
- 利用静态电流和电压求得H参数模型中的各个参数
- 对交流等效电路进行分析，计算交流性能参数，得到交流电压和电流值
- 各个信号的瞬时值等于直流加上交流量

例4:

如图所示电路，已知 $u=20\sin\omega t$ (mV)， $\beta=100$ ， $I_{CQ}=1\text{mA}$ ，求各极交流电流和电压值。



解:

1) 得到等效电路参数

$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx \frac{(1 + \beta) \cdot U_T}{I_{EQ}} = 2.63\text{k}\Omega$$

2) 画出交流等效电路

3) 分析各极电流和电压

2.4 静态工作点的偏置电路

- 偏置电路
 - 直流电路
 - 设置静态工作点
- 对偏置电路的要求
 - 为晶体管提供合适的静态工作点
 - 确保Q点稳定，使其不随温度变化而移动
- 温度影响参数

一 温度对静态工作点的影响

1 温度对晶体管参数的影响

$T \uparrow \rightarrow I_{CB0} \uparrow$, 温度每升高 10°C , $I_{CB0} \uparrow$ 一倍

$T \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$, 温度每升高 1°C , $U_{BE} \downarrow 2.5\text{mV}$

$T \uparrow \rightarrow \beta \uparrow$, 温度每升高 1°C , $\Delta \beta / \beta \uparrow 0.5\text{—}1\%$

2 温度对静态工作点的影响

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} + (1 + \beta) I_{CB0}$$

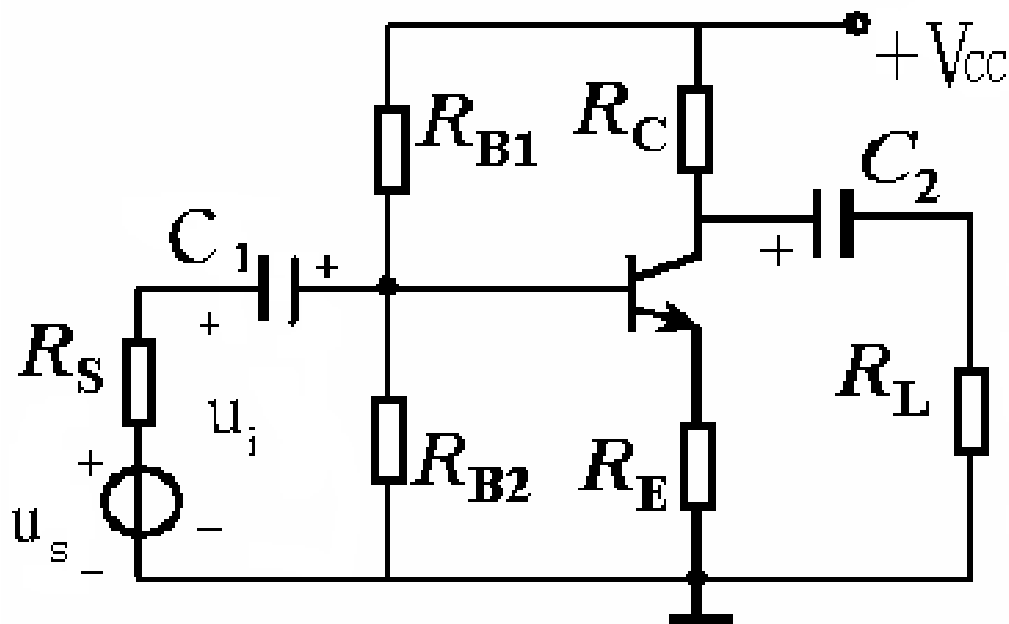
$$I_{BQ} = (V_{CC} - U_{BE}) / R_B$$

$$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow Q \uparrow$$

$$T \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow \rightarrow Q \downarrow$$

二 稳定静态工作点的偏置电路

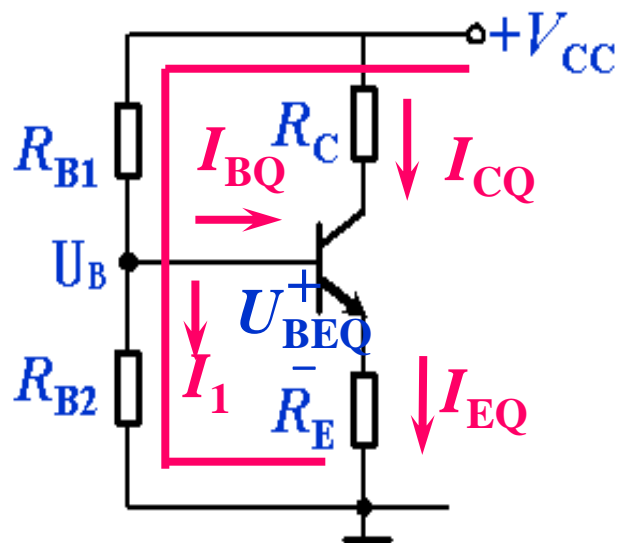
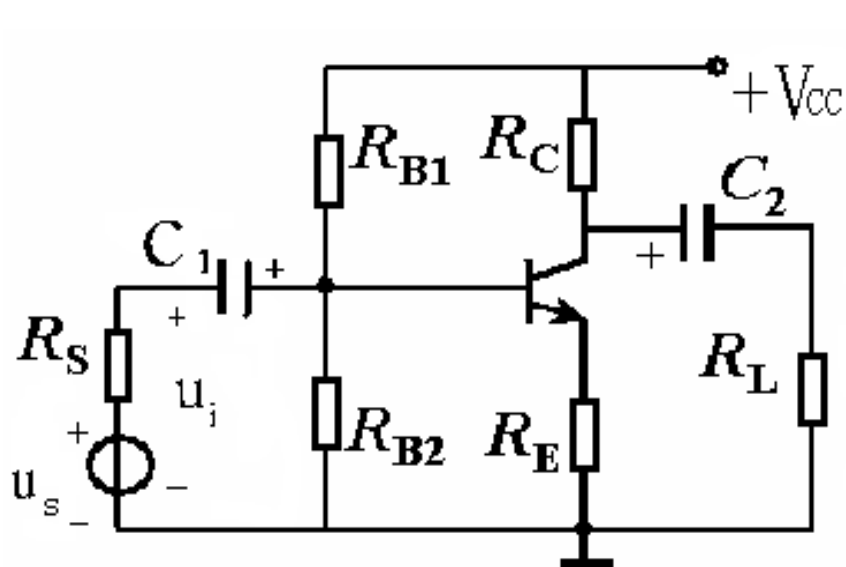
➤ 分压式偏置电路



R_{B1} ——上偏流电阻、
 R_{B2} ——下偏流电阻、
 R_E ——发射极电阻

共发射极电路

直流通路



稳定原理

$$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{CQ} \times R_E \uparrow \rightarrow U_B \text{ 固定} \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

若电路调整适当，可以使 I_{CQ} 基本不变。

参数选择

□ U_B 固定 $U_B = V_{CC} \times R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$

❖ $I_1 \gg I_B$ 硅管 $I_1 = (5--10) I_{BQ}$
锗管 $I_1 = (10--20) I_{BQ}$

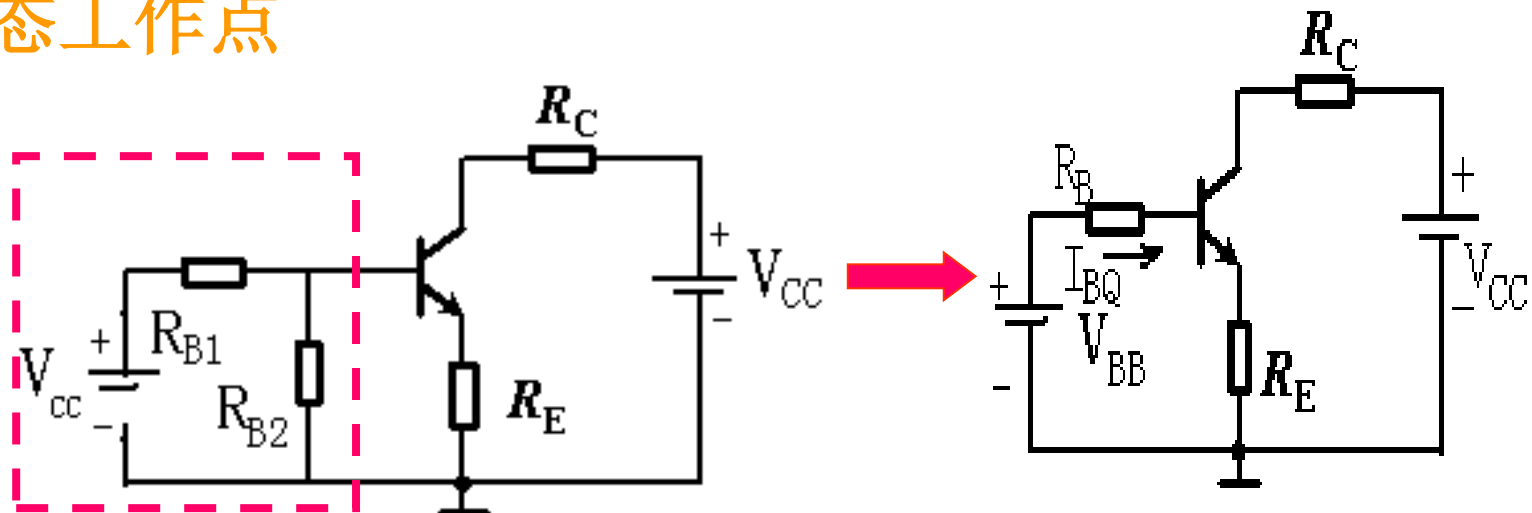
❖ $U_B \gg U_{BE}$ 硅管 $U_B = (3--5) V$
锗管 $U_B = (1--3) V$

□ R_E 负反馈电阻

❖ $R_E \uparrow \rightarrow$ 工作点越稳定

❖ $R_E \uparrow \rightarrow$ 工作点越偏向饱和区

静态工作点



$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE(on)}}{R_B + (1 + \beta) R_E} \quad I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE(on)}}{R_E + \frac{R_B}{(1 + \beta)}}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C - I_{EQ} R_E = V_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E)$$

其中：

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$

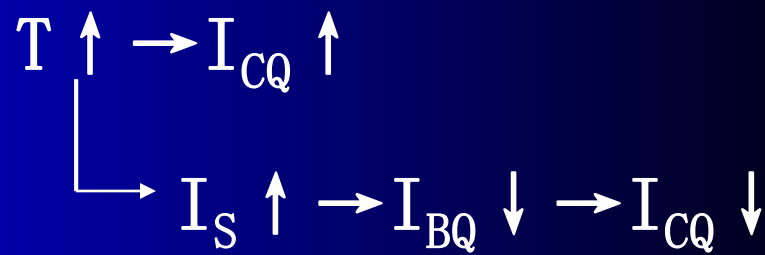
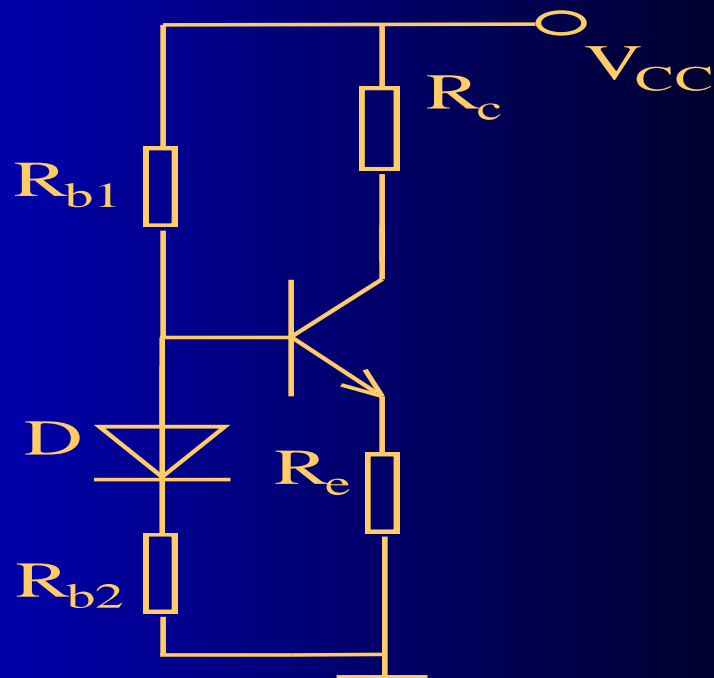
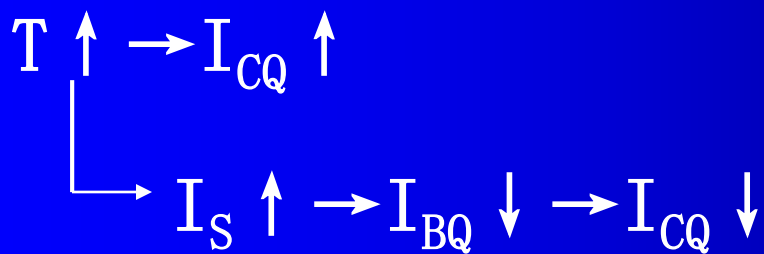
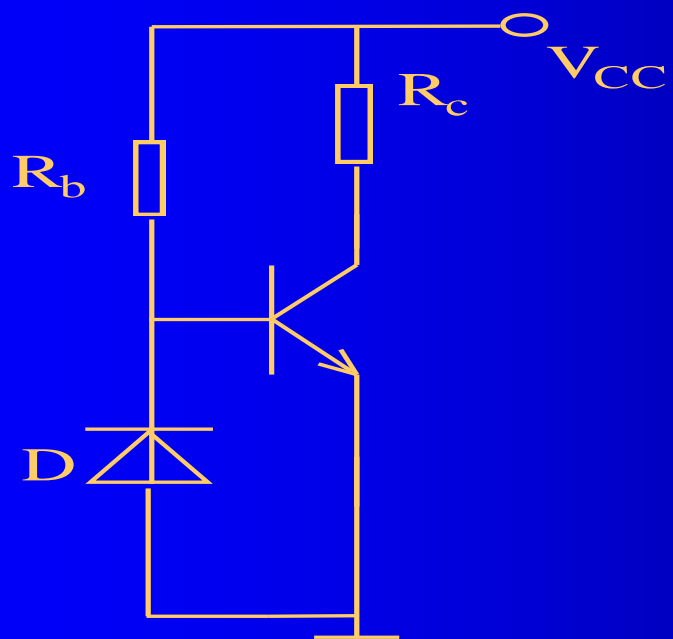
当 $(1 + \beta) R_E \gg R_B$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E} \quad I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

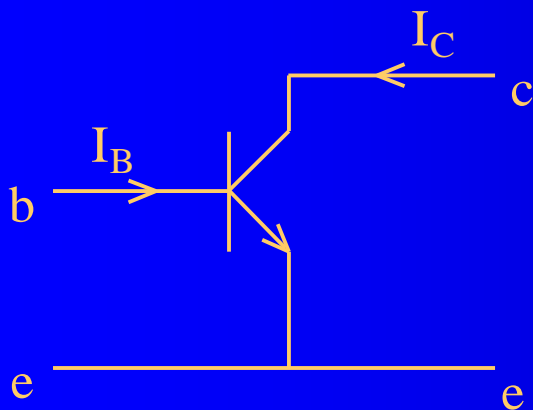
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E)$$

$$U_{BQ} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

➤ 温度补偿偏置电路

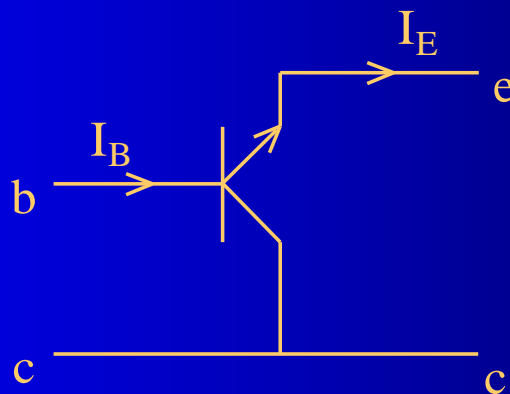


2.5 放大电路的基本组态



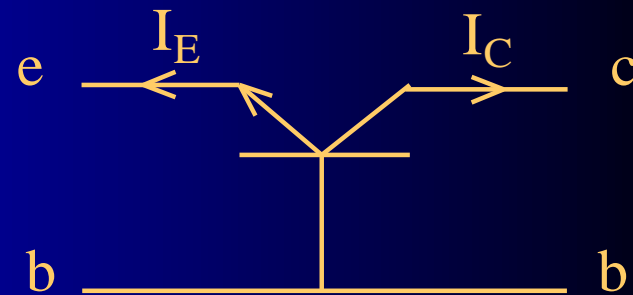
共射放大电路

CE组态



共集放大电路

CC组态

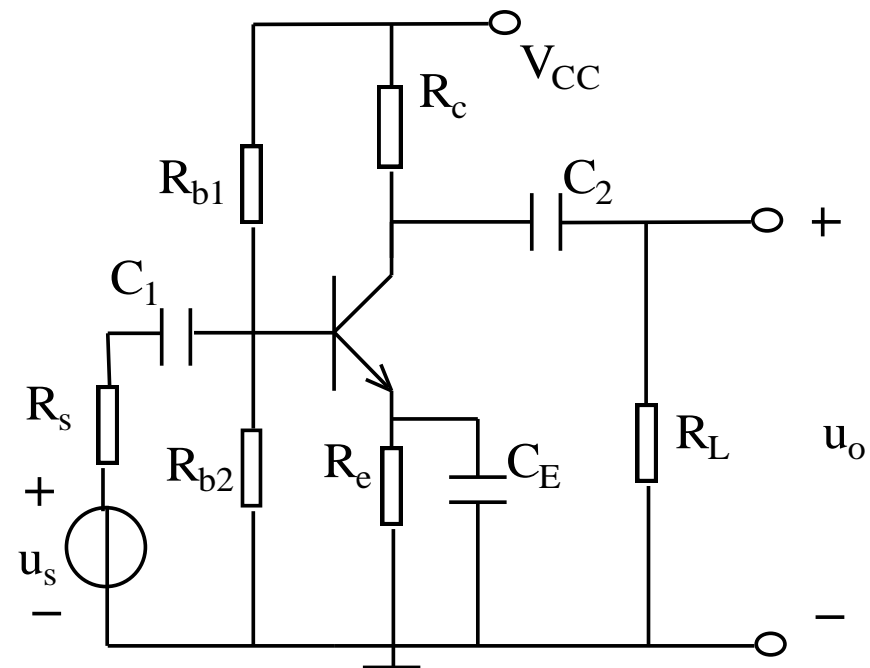


共基放大电路

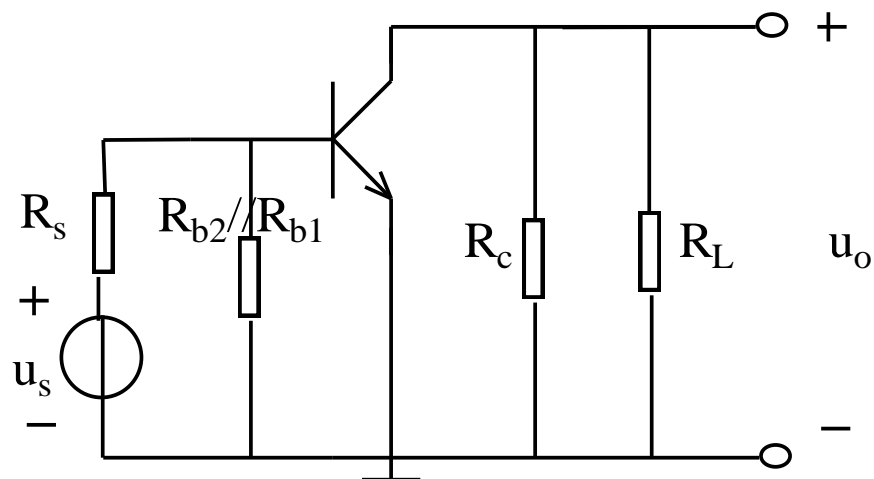
CB组态

放大电路的组态需要从放大电路的**交流通路的连接方式**来判断

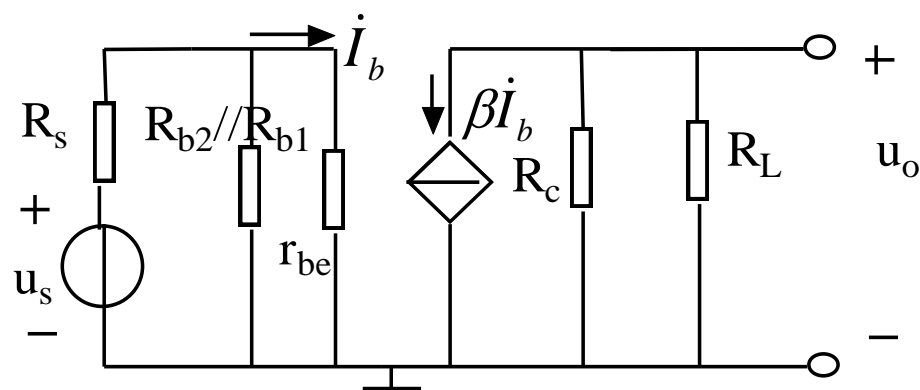
1、共射组态放大电路



基本电路



交流通路



交流等效电路

交流性能分析:

a) 输入电阻

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = R_{b1} // R_{b2} // (r_{bb'} + r_{b'e})$$

b) 输出电阻

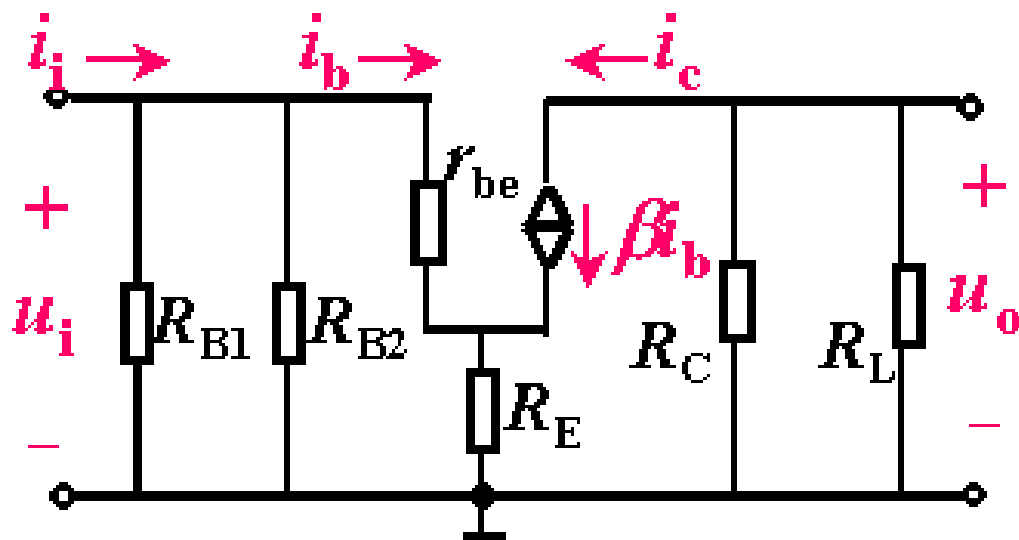
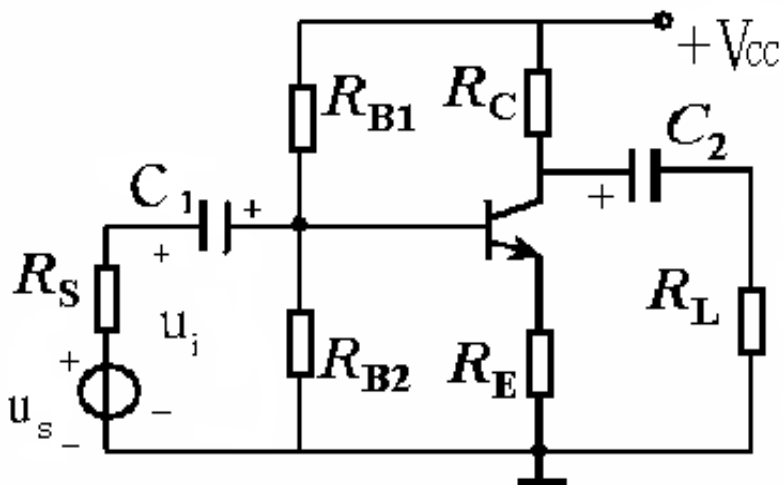
$$R_o = R_c$$

c) 电压增益

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

特点: 1) 反相放大电路, 增益与静态工作点有关
2) 输入电阻与负载无关
3) 输出电阻与源内阻无关

无 C_E 电容



$$A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} \approx -\frac{R_C // R_L}{R_E}$$

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$$

$$R_o \approx R_C$$

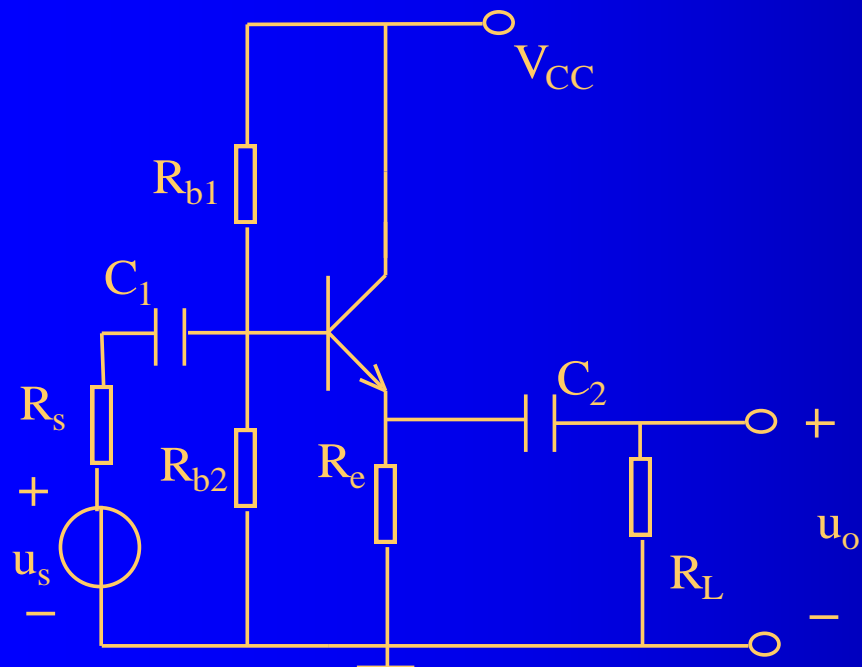
特点:

A_U 变小, 但稳定性好

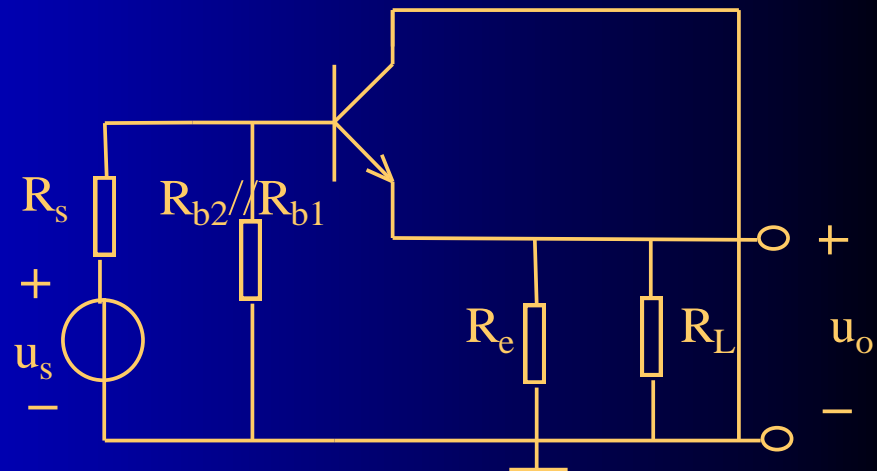
R_i 增大

R_o 不变

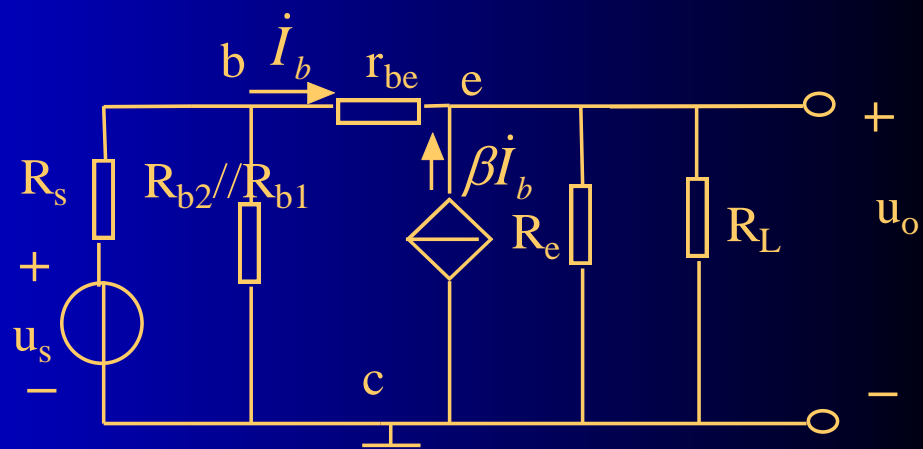
2、共集组态放大电路



基本电路



交流通路



交流等效电路

交流性能分析:

a) 输入电阻

$$\begin{aligned} R_i &= R_{b1} // R_{b2} // R_i' = R_{b1} // R_{b2} // \frac{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}{\dot{I}_b} \\ &= R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)] \end{aligned}$$

b) 输出电阻

$$R_o = R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_{b1} // R_{b2}}{1 + \beta}$$

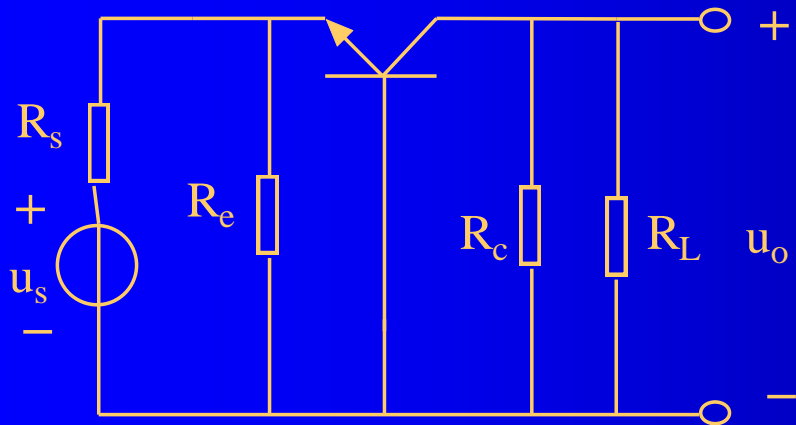
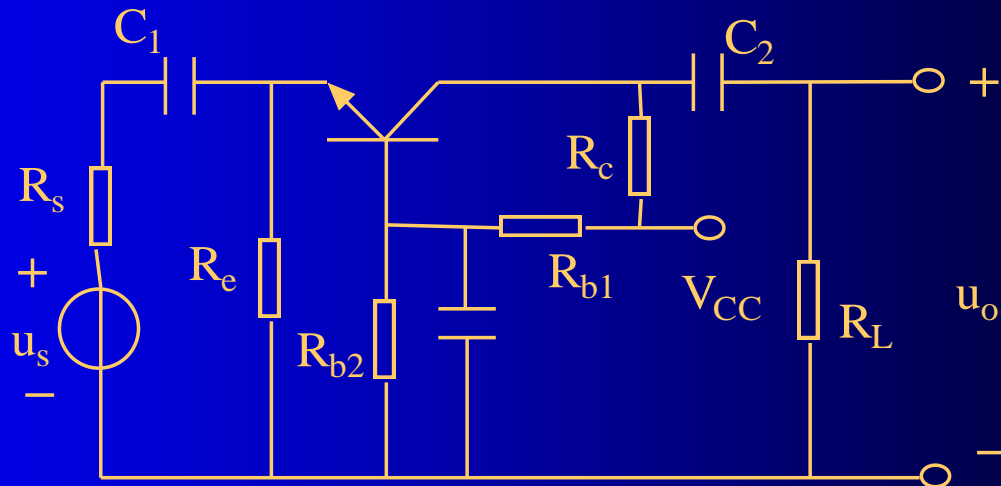
c) 电压增益

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = (1 + \beta) \frac{R_e // R_L}{r_{be} + (1 + \beta) \cdot (R_e // R_L)}$$

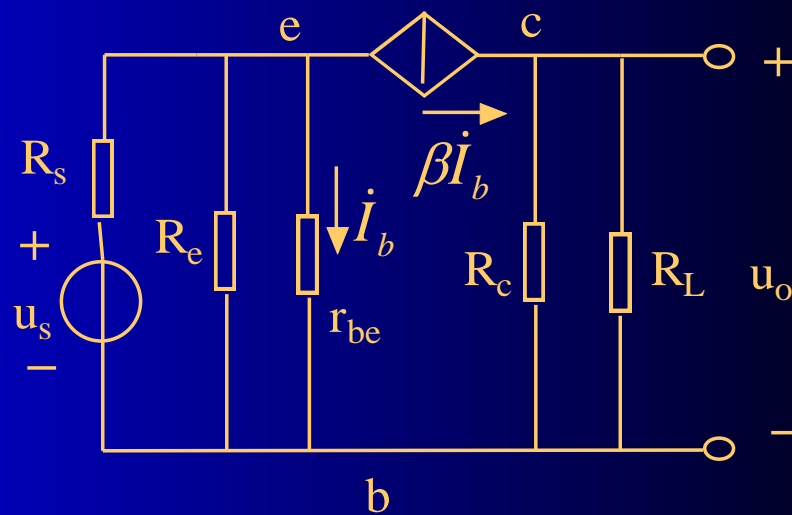
$A_u \leq 1$ 不具有电压放大能力，同相放大电路；
 R_i 高，与负载有关； R_o 低，与源内阻有关

3、共基组态放大电路

基本电路



交流通路



交流等效电路

交流性能分析:

a) 输入电阻

$$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

b) 输出电阻

$$R_o = R_c$$

c) 电压增益

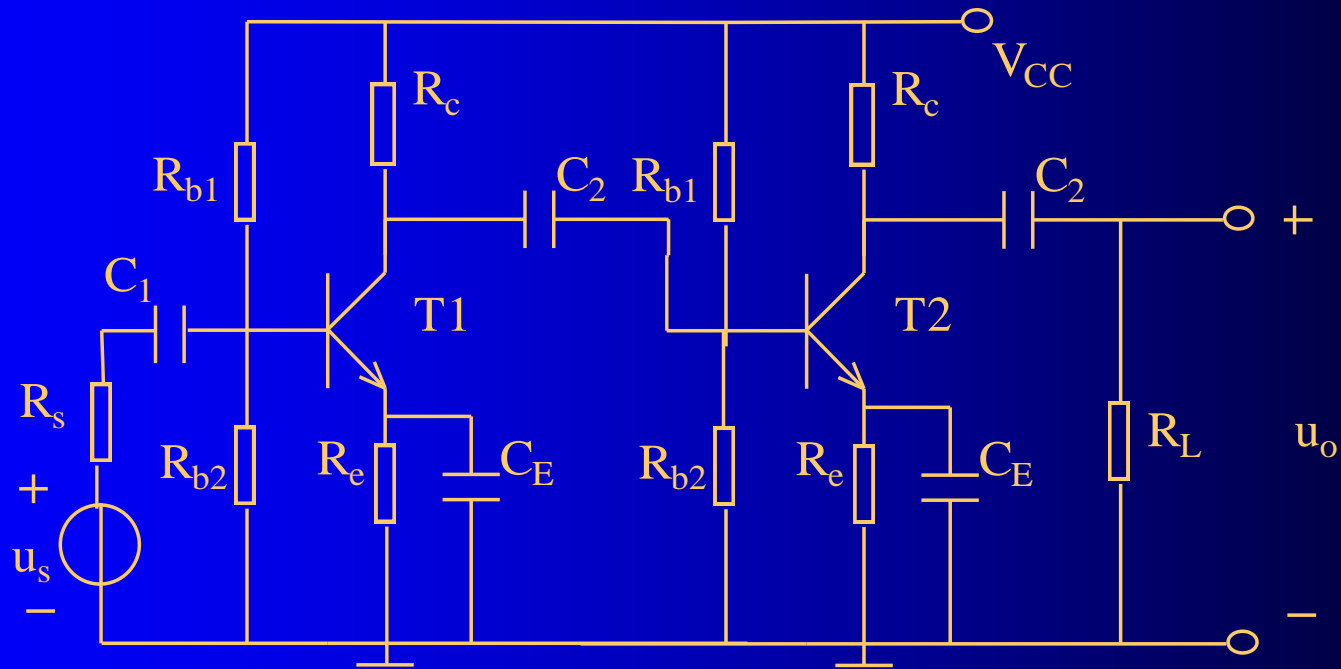
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = \frac{\beta (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

A_u 大小同CE组态, 同相放大电路;
 $A_i \leq 1$ 不具有电流放大能力
 R_i 小, 与负载无关; R_o 大, 与源内阻无关

三种组态放大电路的比较：

- a) 共射电路具有电压、电流放大能力，输入、输出电阻大小居中；用作放大单元。
- b) 共集电路具有电流放大能力，不具有电压放大能力，输入电阻高，输出电阻低，称为**电压射随器**，可以将高阻输入端电压几乎不衰减的被跟随到低阻输出端。常用作多级放大器中的隔离级使用。
- c) 共基电路具有电压放大能力，不具有电流放大能力，输入电阻低，输出电阻高，称为**电流接续器**，可以将低阻输入端电流几乎不衰减地接续到高阻输出端。

例5:



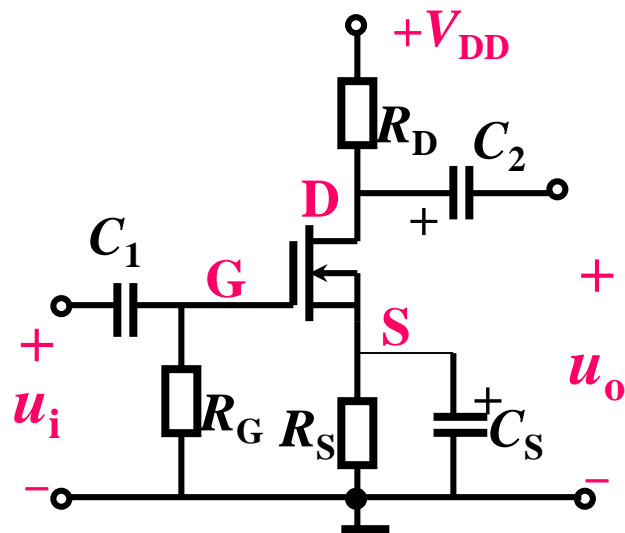
$$V_{CC}=15\text{V}, R_{b1}=100\text{k}, R_{b2}=47\text{k}, R_e=3.9\text{k}, R_c=6.8\text{k}, \beta=100$$

2.6 场效应管放大电路

特点： 输入电阻极高， 噪声低， 热稳定性好

一、直流偏置电路

1. 自给偏压电路



栅极电阻 R_G

(1) 为栅偏压提供通路

(2) 泻放栅极积累电荷

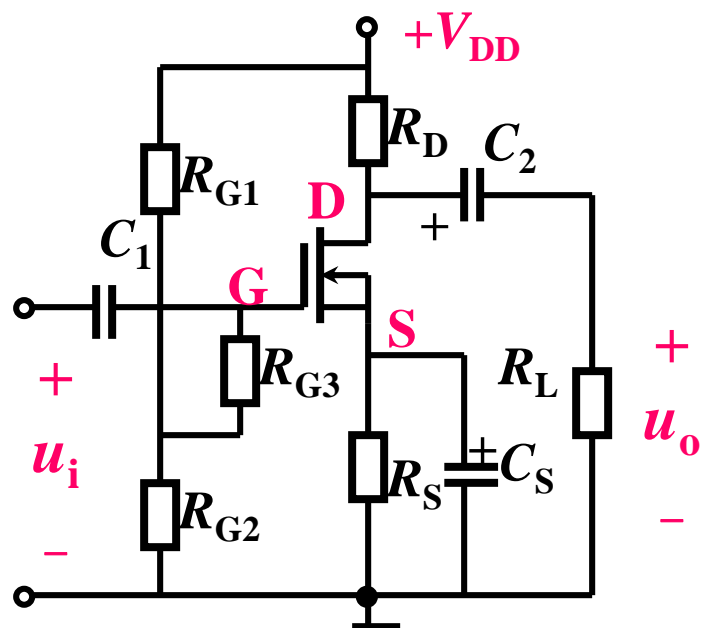
源极电阻 R_S

提供负栅偏压

漏极电阻 R_D

把 i_D 的变化变为 u_{DS} 的变化

2. 分压式自偏压电路



$$U_{GSQ} = \frac{V_{DD} \cdot R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_{DQ} R_S$$

场效应管放大电路分析

1、静态工作点

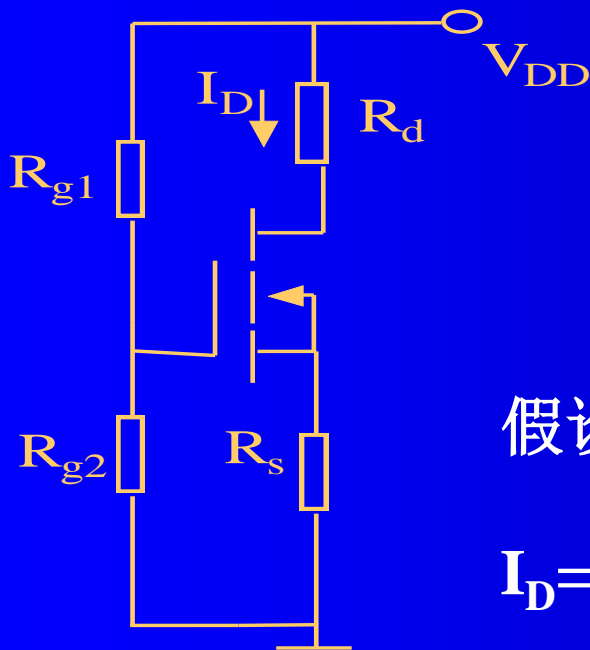
2、直流分析

图解法

数学分析法

例6:

如图电路, 已知 $R_{g1}=1.2\text{M}\Omega$, $R_{g2}=0.8\text{M}\Omega$, $R_s=4\text{k}\Omega$, $R_d=10\text{k}\Omega$, $V_{DD}=20\text{V}$, 管子参数 $I_{D0}=1\text{mA}$, $U_{GS(th)}=2\text{V}$, 求 I_D



解: 由于 $I_G=0$, 所以有

$$U_G = V_{DD} \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} = 8\text{V} \quad U_S = I_D R_s = 4I_D$$

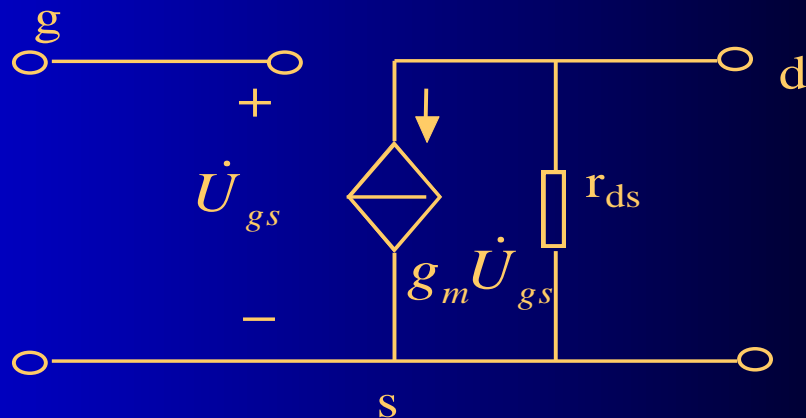
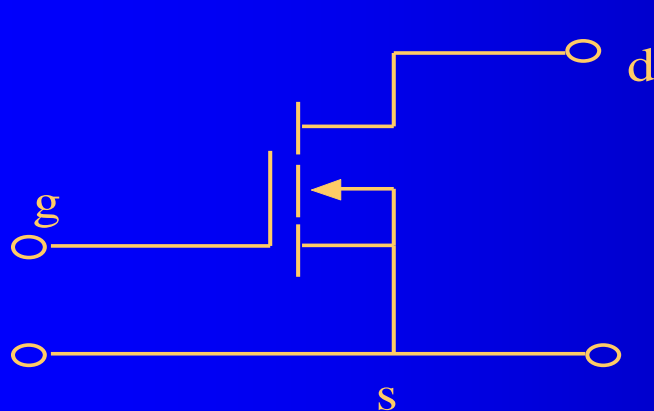
假设MOS管工作在饱和区, 则

$$I_D = I_{D0} (U_{GS}/U_{GS(th)} - 1)^2 = ((8 - 4I_D)/2 - 1)^2$$

$$I_D = 2.25\text{mA}(\text{不合理}), 1\text{mA}$$

3、交流分析

➤ 场效应管小信号电路模型

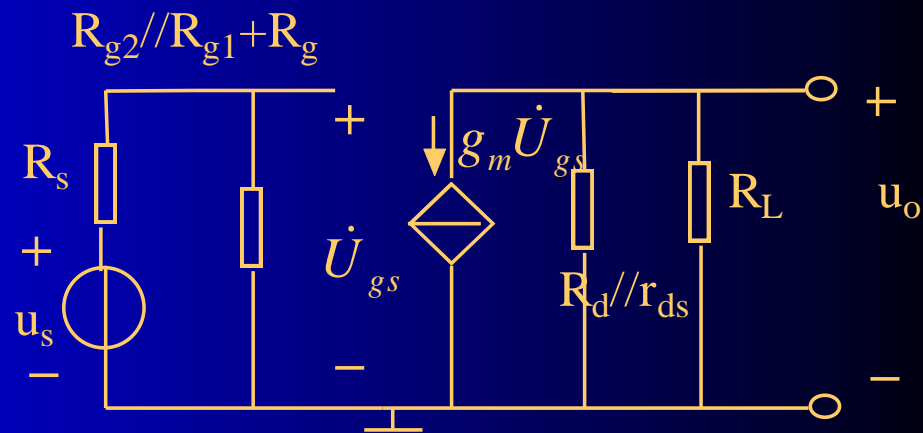
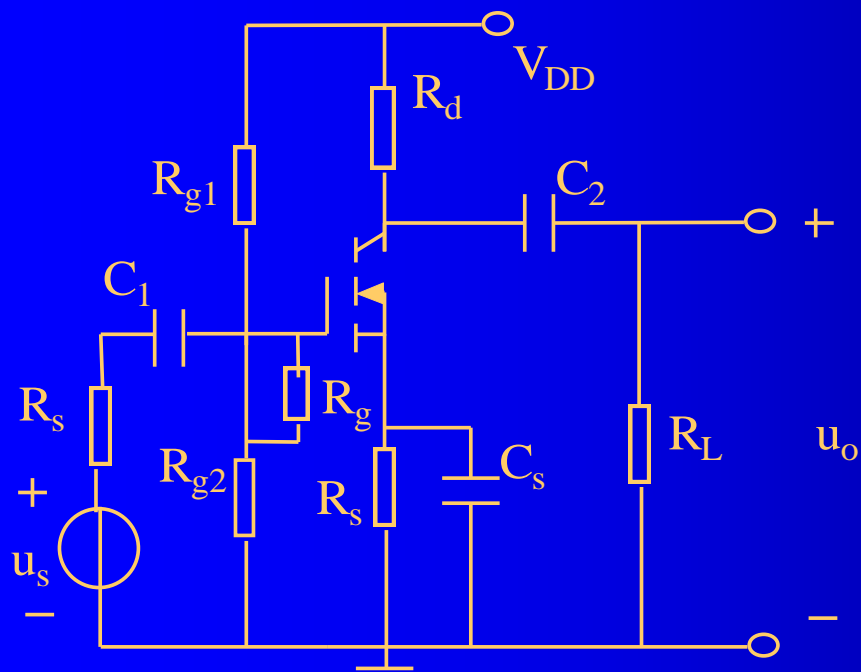


$$g_m = 2\sqrt{I_{D0}I_{DQ}}/U_{GS(th)}$$

$$r_{ds} = \frac{|V_A|}{I_{DQ}}$$

➤场效应管放大电路组态

a) 共源放大电路

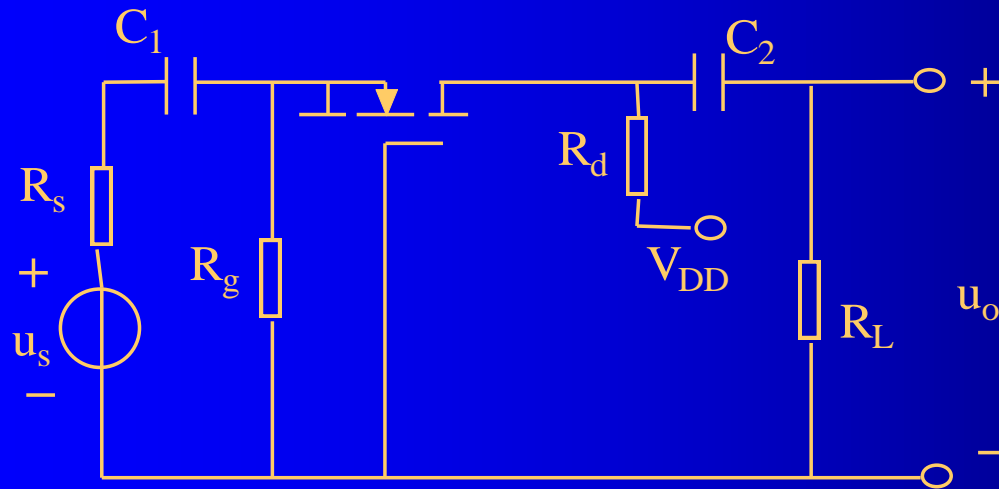


$$R_i = R_{g1} // R_{g2} + R_g$$

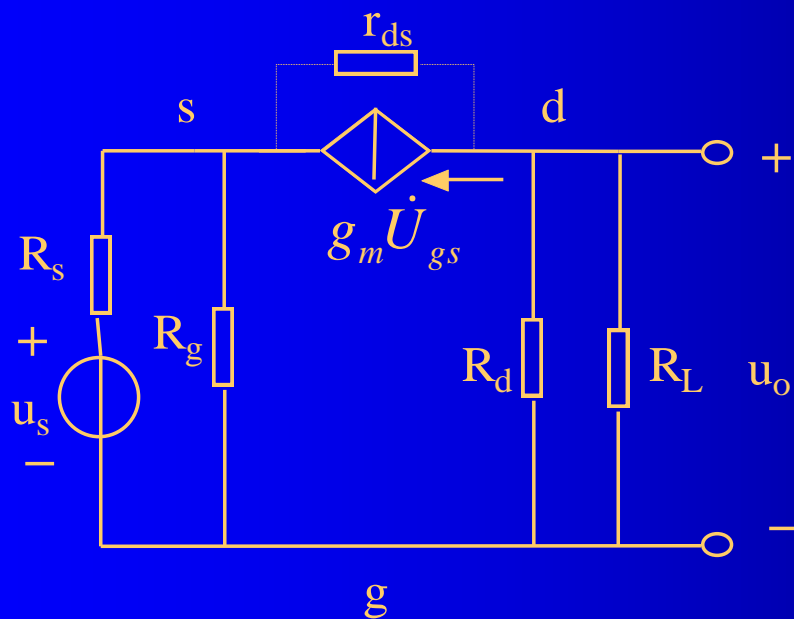
$$R_o = R_d // r_{ds}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m (r_{ds} // R_d // R_L)$$

b) 共栅放大电路



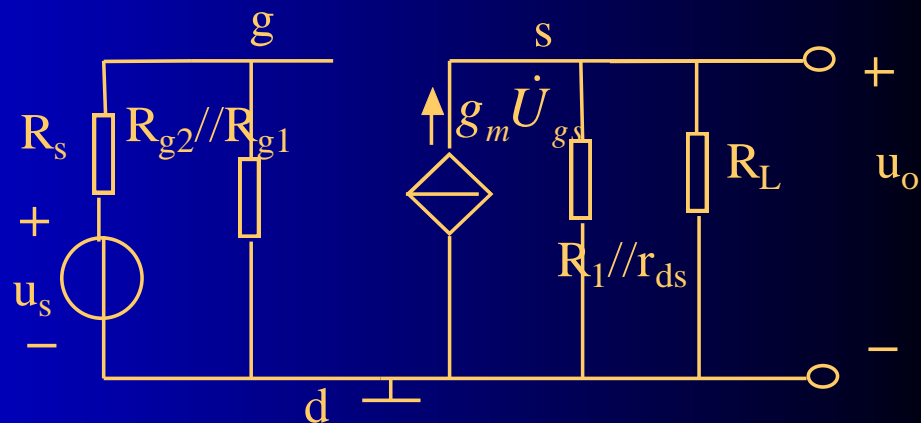
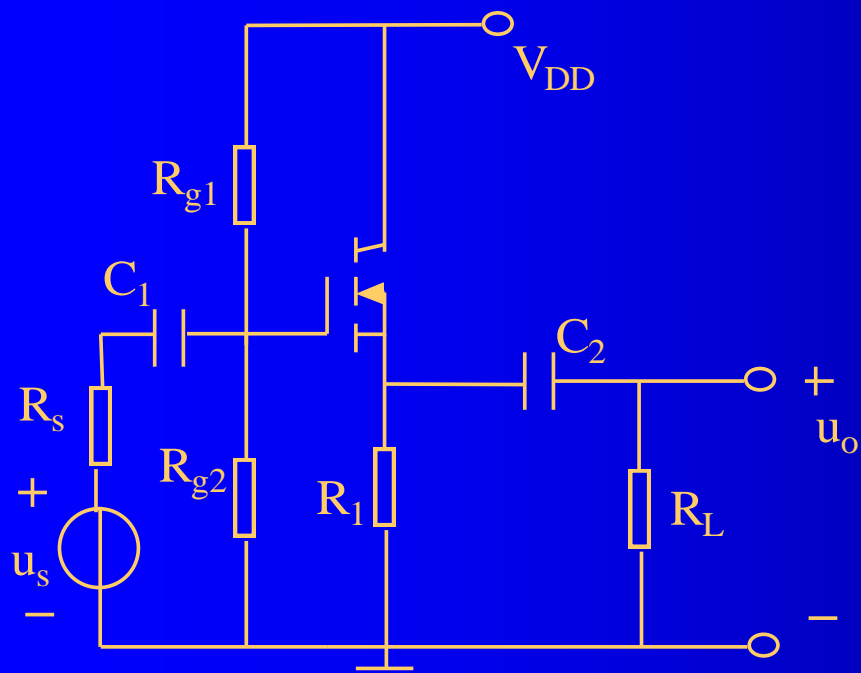
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = g_m (r_{ds} // R_d // R_L)$$



$$R_i$$

$$R_o$$

c) 共漏放大电路（源极跟随器）



$$R_i = R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = R_1 // r_{ds} // \frac{1}{g_m}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m (r_{ds} // R_1 // R_L)}{1 + g_m (r_{ds} // R_1 // R_L)}$$

场效应管放大电路特点

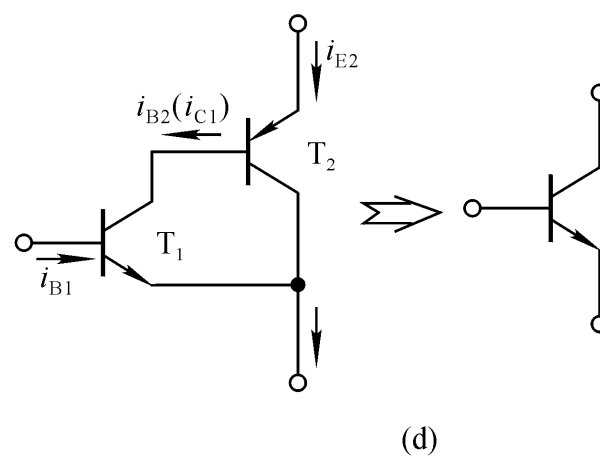
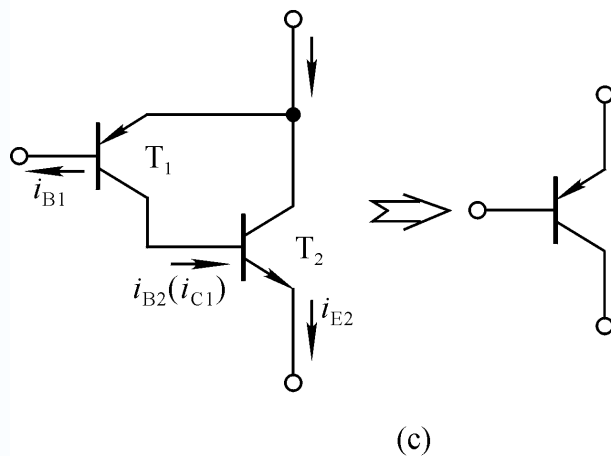
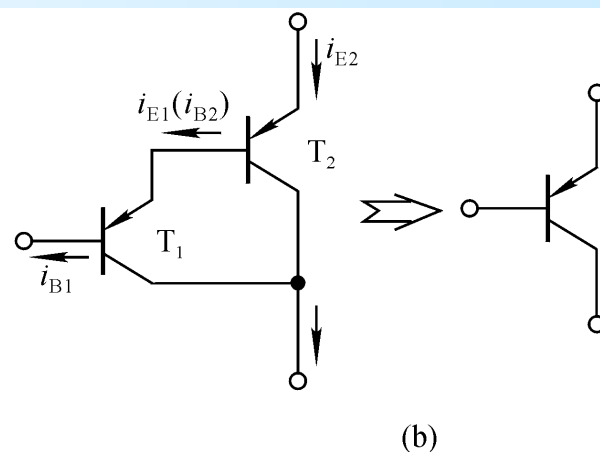
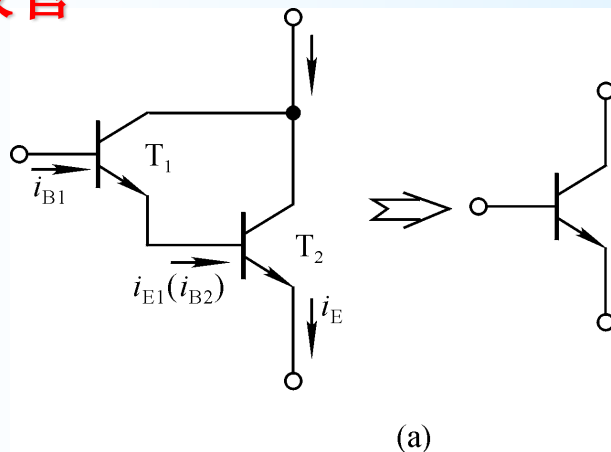
- 与三极管构成的放大电路有类似特性
 - 共源 \leftrightarrow 共射 反相放大电路
 - 共栅 \leftrightarrow 共基 同相放大电路
 - 共漏 \leftrightarrow 共集 电压跟随器
- 具有比三极管放大电路更大的输入电阻
- 比三极管放大电路的增益要小

2.7 组合放大电路

1、复合管

复合管是由两个或两个以上的三极管按照一定的连接组成的
等效三极管

四种常见的复合管结构



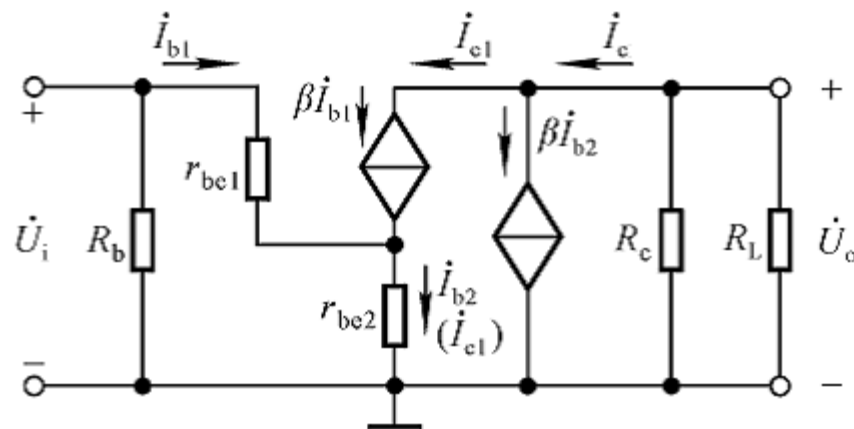
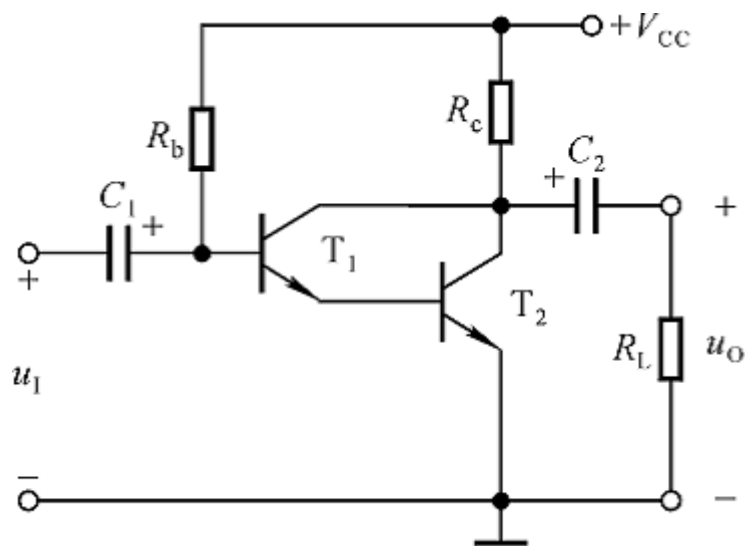
复合管构成原则：

- 1、复合管可以由相同类型的管子复合而成，也可以由不同类型的管子复合连接而成；
- 2、基本的连接规律为小功率管放在前面，大功率管放在后面；
- 3、连接时应保证每个管子都工作在放大区域，并保证每个管子具有合适的电流通路；
- 4、应将前一个管子的集电极电流或发射极电流作为后面管子的基极电流。

➤ 复合管的电流放大系数 β

$$\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2$$

➤ 复合管共射放大电路

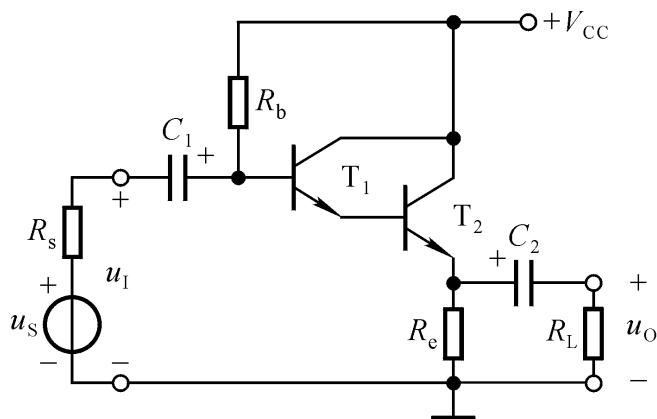


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx - \frac{\beta_1 \beta_2 (R_c // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}}$$

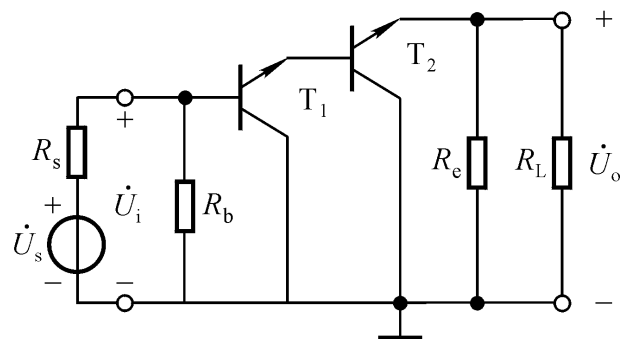
$$R_i = R_b // [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$$

可以提高输入电阻

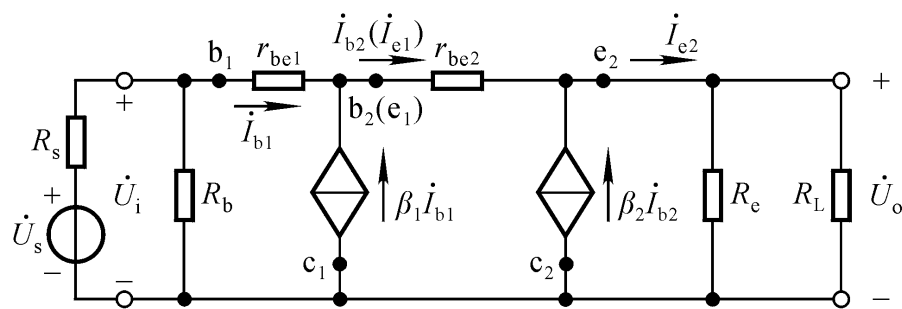
➤ 复合管共集放大电路



(a)



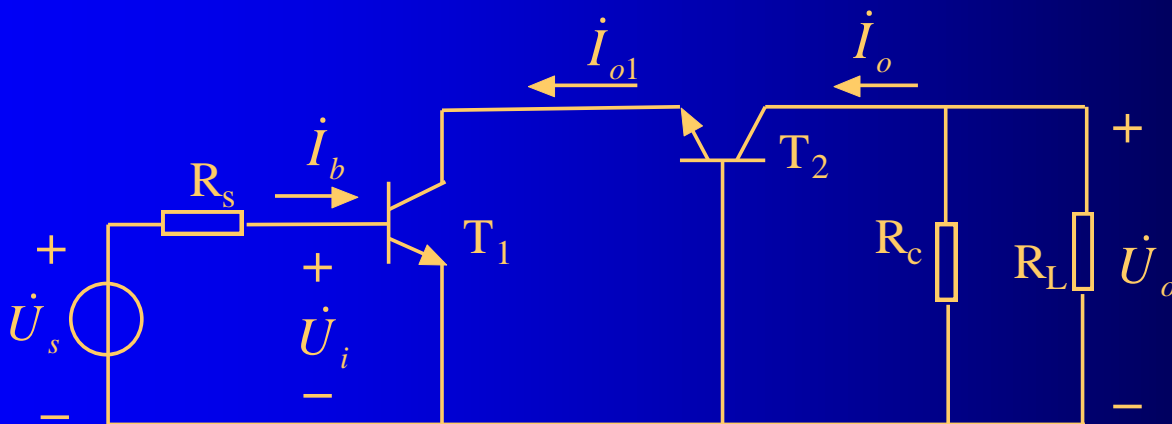
(b)



(c)

输入电阻增大，输出电阻减小

2、共射-共基放大电路



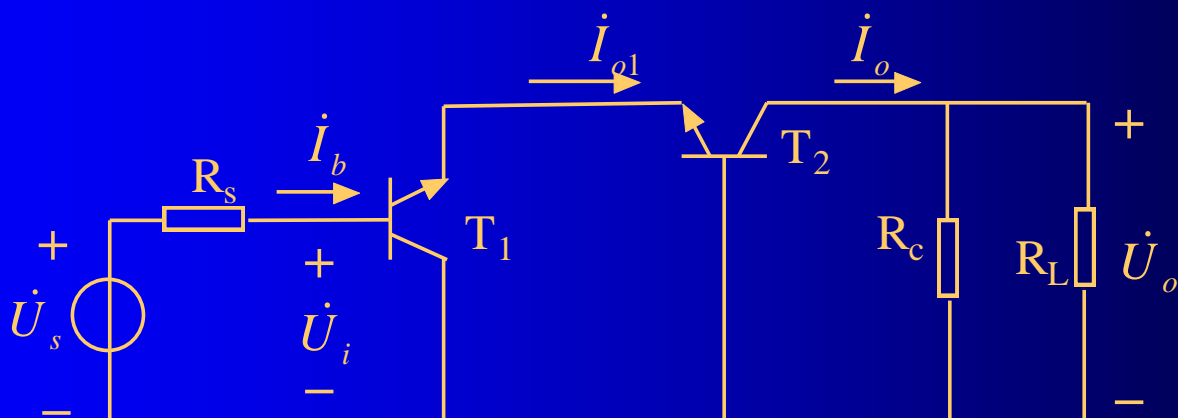
交流性能

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_o (R_c // R_L) \approx -\dot{I}_{o1} (R_c // R_L) = -\beta_1 \dot{I}_b (R_c // R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta_1 \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta_1 (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

与单级CE电路的电压增益相同，但输出电阻大大提高

3、共集-共基放大电路



交流性能

$$\dot{A}_{u1} = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L} = \frac{(1+\beta)\frac{r_{be}}{1+\beta}}{r_{be} + (1+\beta)\frac{r_{be}}{1+\beta}} = \frac{1}{2}$$
$$\dot{A}_u = \frac{1}{2} \dot{A}_{u2}$$

该组合电路具有高输入电阻、输出电阻，但增益太低