

第2章 基本放大电路

本章要求:

- 一、理解放大的概念、放大电路的组成原则及工作原理;
- 二、掌握放大电路的分析方法, 并会分析晶体管单管放大电路两种基本接法(共射和共集)的放大电路;
- 三、理解绝缘栅型场效应管放大电路的工作原理, 并会分析共源和共漏放大电路;
- 四、了解复合管的组成原则和复合管放大电路的特点。

目 录

2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标

2.2 基本共射放大电路的工作原理

2.3 放大电路的分析方法

2.4 放大电路静态工作点的稳定

2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法

2.6 场效应管放大电路

2.7 基本放大电路的派生电路

2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标

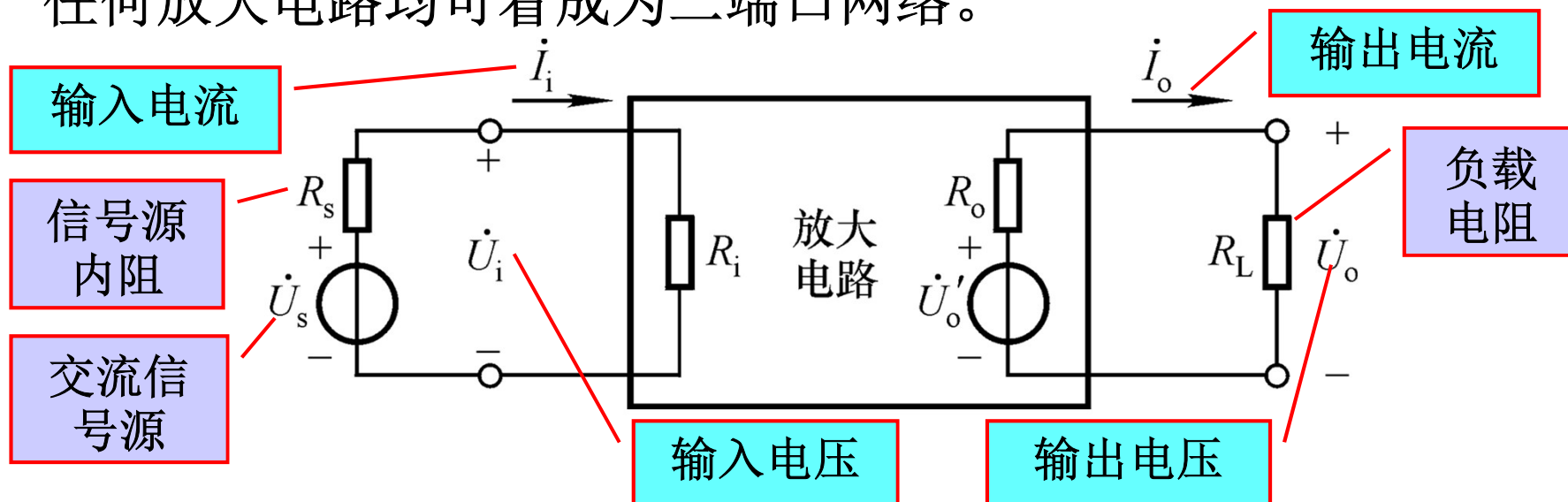
2.1.1 放大的概念



放大电路通过获得直流电源的能量，将微弱变化的电信号转换为较强的电信号，去控制较大功率的负载。放大的基本特征是功率放大。所以放大电路中必须存在能实现功率放大的有源元件，如晶体管和场效应管等。放大的前提是不失真。

2.1.2 放大电路的性能指标

任何放大电路均可看成为二端口网络。



- 1) 放大倍数：输出量与输入量之比 当输入信号为缓慢变化量或直流变化量时， $A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i}$

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

$$\dot{A}_{ii} = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$$

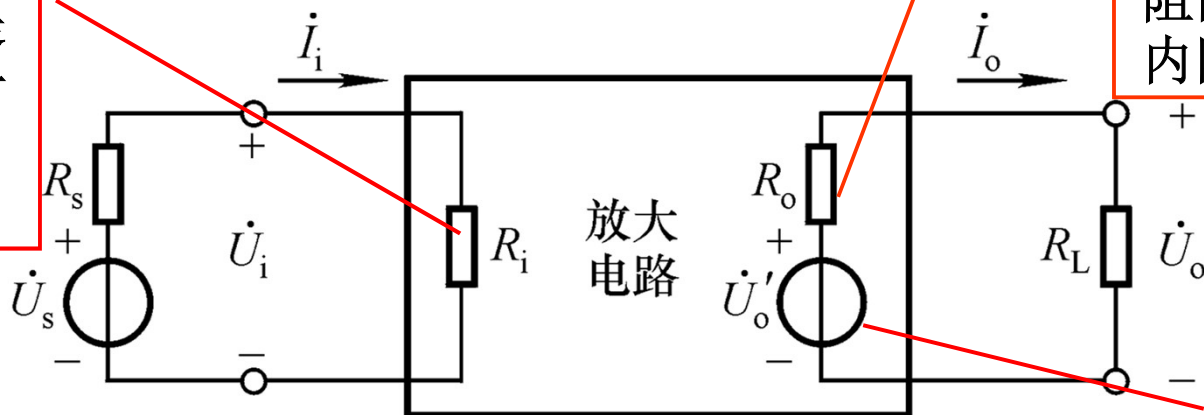
$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数

2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标

2) 输入电阻和输出电阻

输入电阻是从输入端看进去的等效电阻



从输出端看进去可以等效成一个有内阻的电压源，其中内阻就是输出电阻

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{U_i}{I_i}$$

输入电压与输入电流有效值之比

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{-\dot{I}_o} \Big|_{\dot{U}_s=0} = \frac{U_o}{I_o} \Big|_{U_s=0}$$

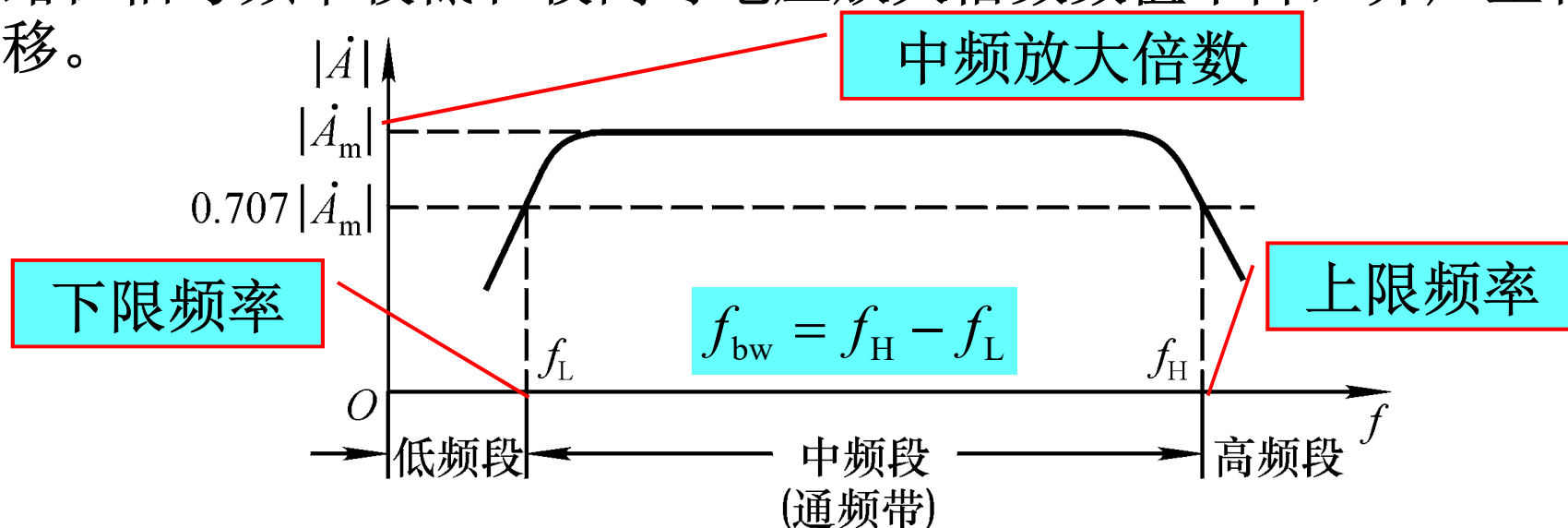
输出端开路时的输出电压

当信号源电压等于0时输出电压与输出电流有效值之比

输入电阻越大，放大电路的输入电压 U_i 就越接近于信号源电压 U_s ，因此通常希望得到较大的输入电阻。
输出电阻越小，负载变化时输出电压的变化就越小，即带负载能力越强，因此通常希望得到较小的输出电阻。

3) 通频带

由于电容、电感及半导体器件PN结的电容效应，使放大电路在信号频率较低和较高时电压放大倍数数值下降，并产生相移。



通频带越宽，表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。

4) 最大不失真输出电压 U_{om} ：当输入电压再增大就会使输出波形产生非线性失真时的输出电压，是交流有效值。

2.2 基本共射放大电路的工作原理

2.2.1 基本共射放大电路的组成及各元件的作用

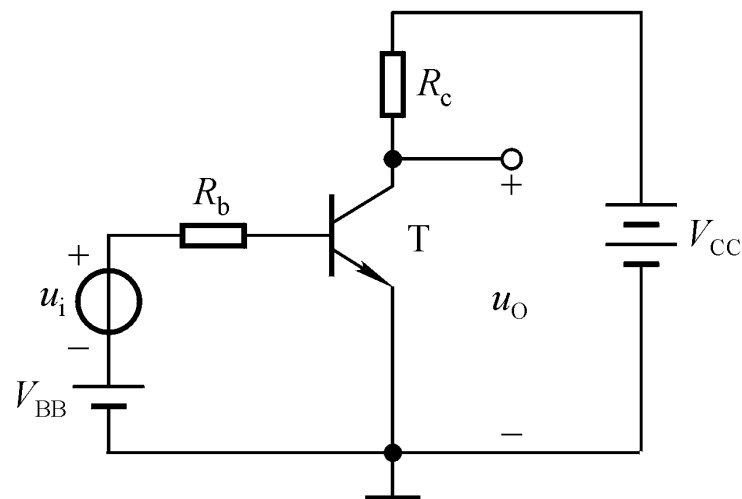
无交流信号输入($u_i = 0$)时, 放大电路处于静态

V_{BB} 、 R_b : 使发射结正偏,

$U_{BE} > U_{on}$, 且有合适的 I_B 。

V_{CC} : 使集电结反偏,

$U_{CE} > U_{BE}$, 保证在放大状态,
同时为输出提供能量。



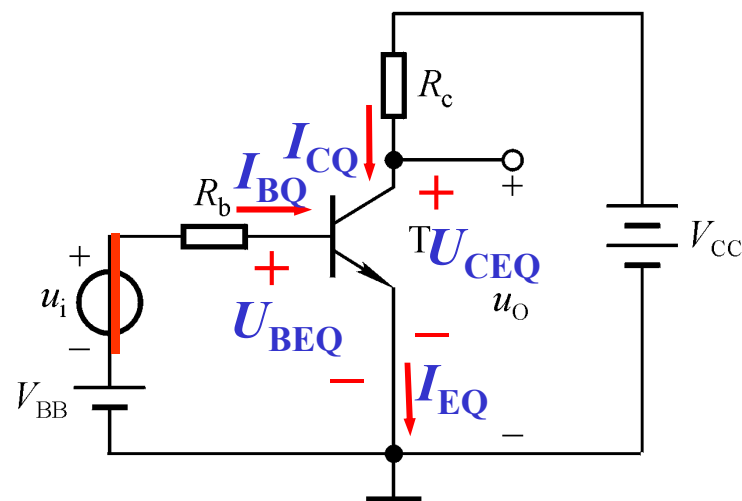
有交流信号输入($u_i \neq 0$)时, 放大电路处于动态

R_c : 将电流变化 i_c 转换成电压变化 $u_{ce}(u_o)$ 。

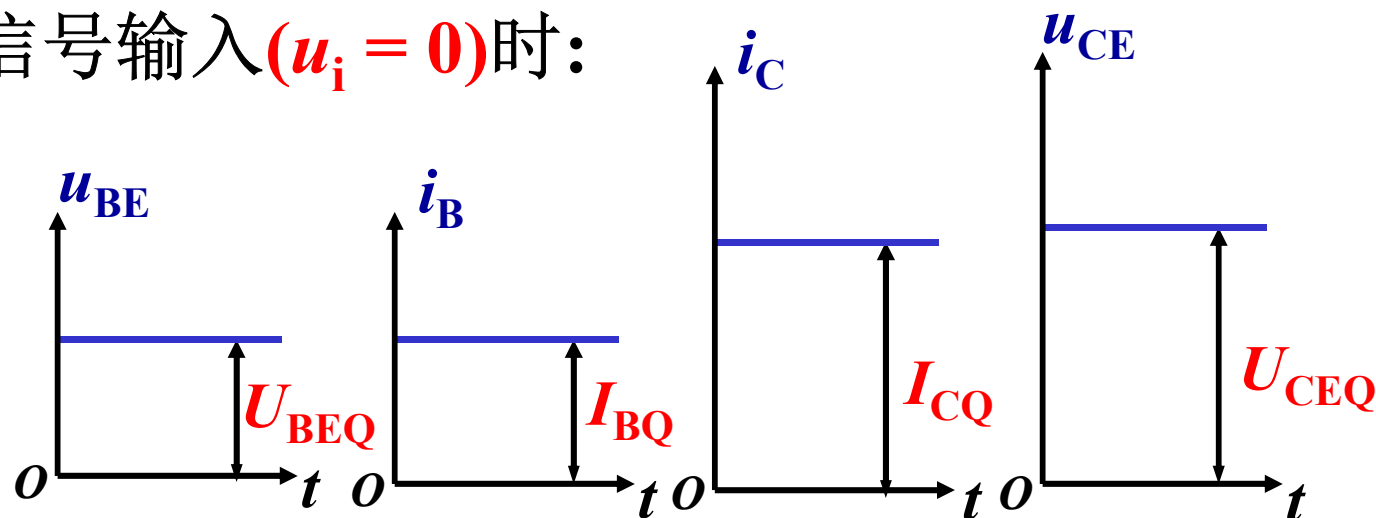
2.2.2 基本共射放大电路的波形分析

静态

此时晶体管的电流和电压为直流分量，称为静态工作点 Q ，记作 I_{BQ} 、 I_{CQ} (I_{EQ})、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。



无交流信号输入 ($u_i = 0$) 时:

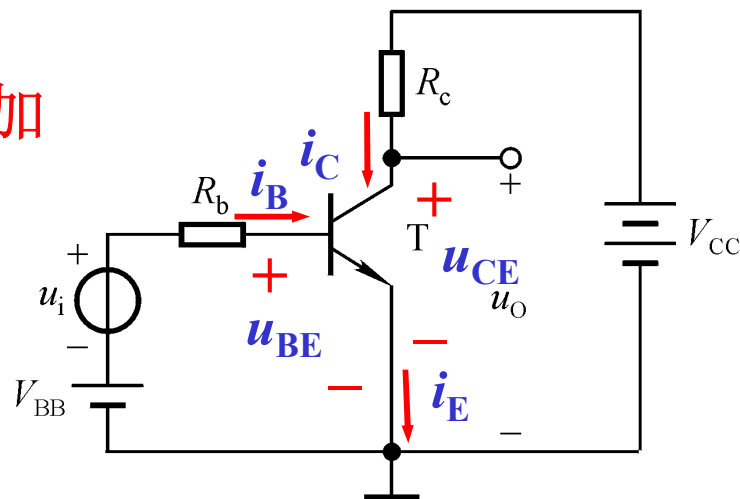


动态 先得到交流小信号单独作用下的交流分量，记作 i_b 、 i_c (i_e)、 u_{be} 、 u_{ce} 。

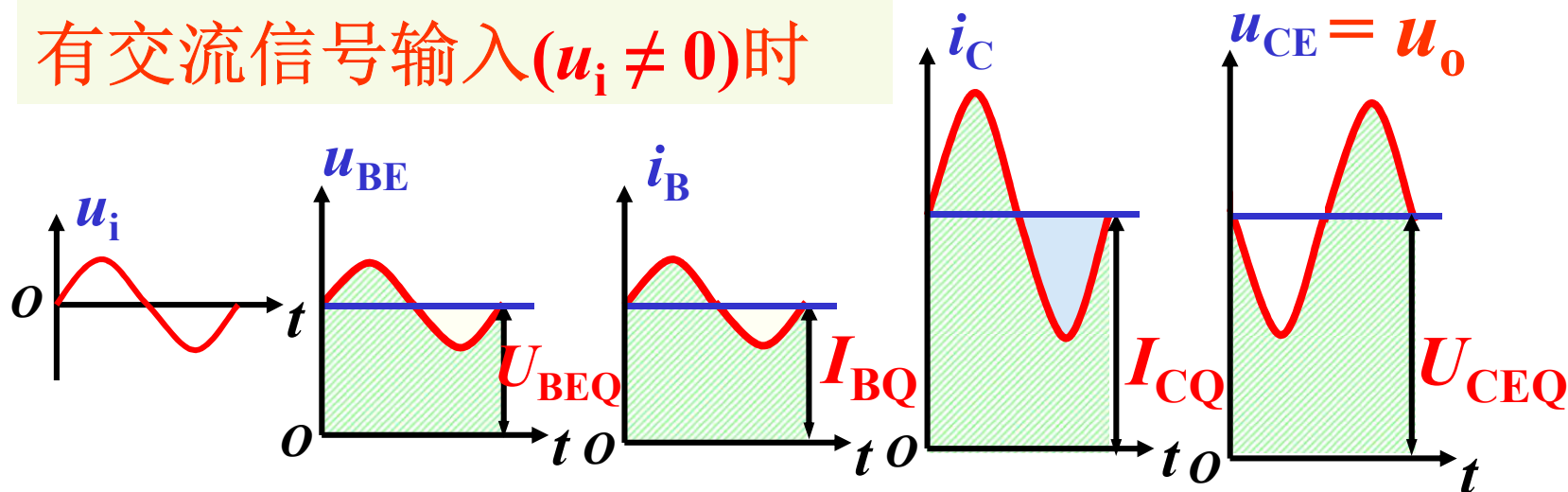
而各电压或电流都是在直流分量上叠加了一个小的交流分量

$$i_B = I_{BQ} + i_b, \quad i_C = I_{CQ} + i_c \quad (i_E = I_{EQ} + i_e)$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}, \quad u_{BE} = U_{BEQ} + u_{be}$$



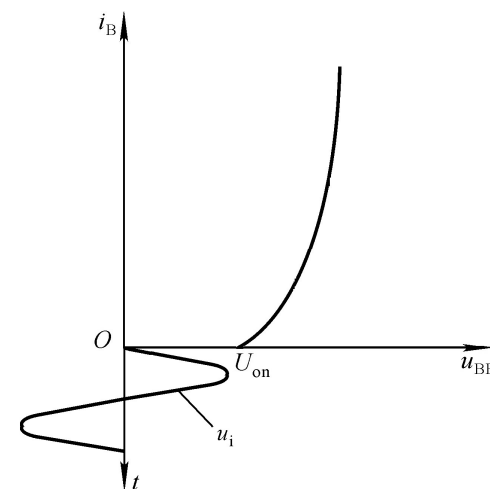
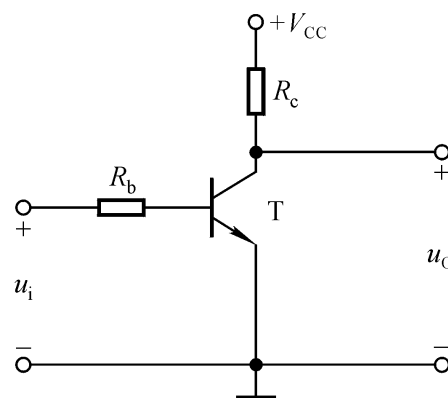
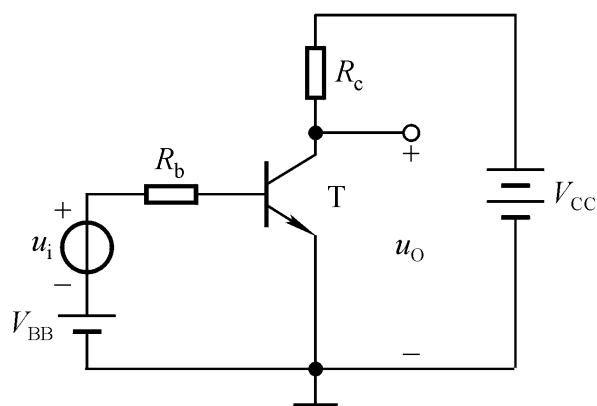
有交流信号输入($u_i \neq 0$)时



2.2.3 设置静态工作点的必要性

既然放大的对象是动态信号，为什么要设置静态工作点呢？

将基极电源去掉



输出电压必然失真！

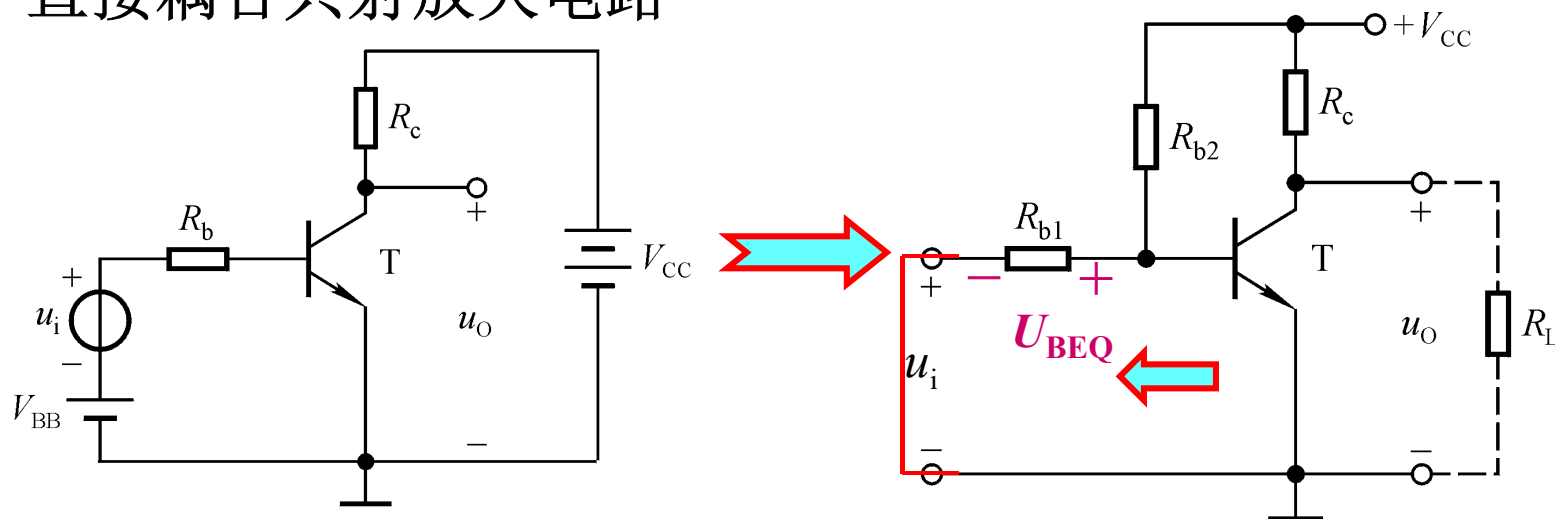
所以要设置**合适的静态工作点**，保证放大管整个周期都工作在**放大状态**，这样输出波形才不会产生**非线性失真**。

在分析放大电路时，要先静态，后动态。
只有静态工作点合适，动态分析才有意义。

2.2.4 放大电路的组成原则

常见的三种共射放大电路

直接耦合共射放大电路



问题：

1. 两种直流电源
2. 信号源与放大电路不“共地”

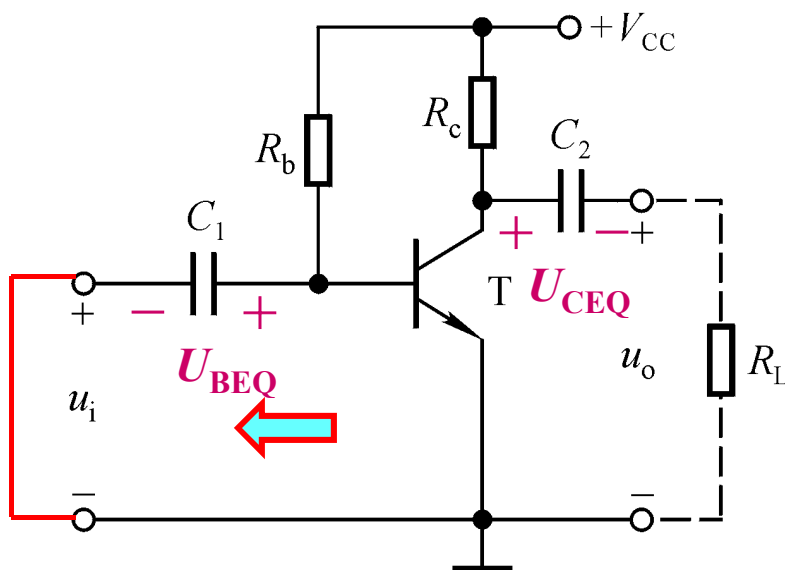
将两个电源
合二为一

共地，且要使信号
驮载在静态之上

静态时， $U_{R_{b1}} = U_{BEQ}$

动态时， $u_{BE} = u_i + U_{BEQ}$ ，
信号驮载在静态之上。

阻容耦合共射放大电路



C_1 、 C_2 为耦合电容！

耦合电容的容量应足够大，即对于交流信号近似为**短路**。其作用是“**隔直通交**”。

静态时， C_1 、 C_2 上电压？

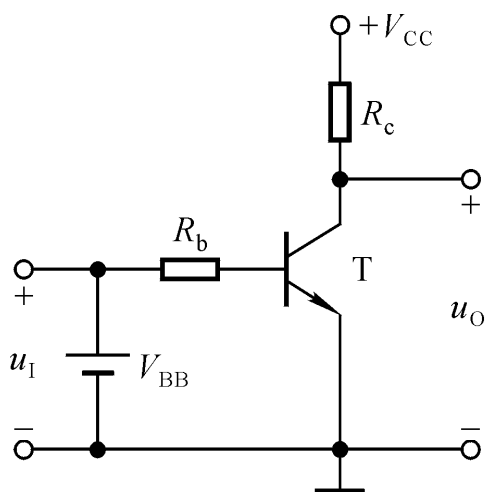
动态时， $u_{BE} = u_i + U_{BEQ}$ ，信号驮载在静态之上；

$u_o = u_{CE} - U_{CEQ} = u_{ce}$ ，负载上只有交流信号。

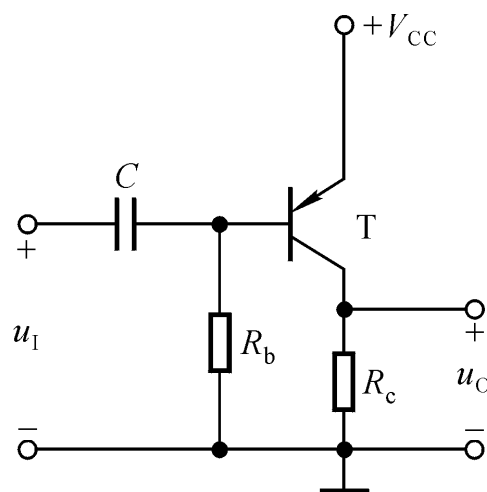
放大电路的组成原则

- 静态工作点合适：使放大管整个周期都工作在放大状态。
- 信号能够驮载在静态之上进入输入端，输出端能够获得放大的动态信号。

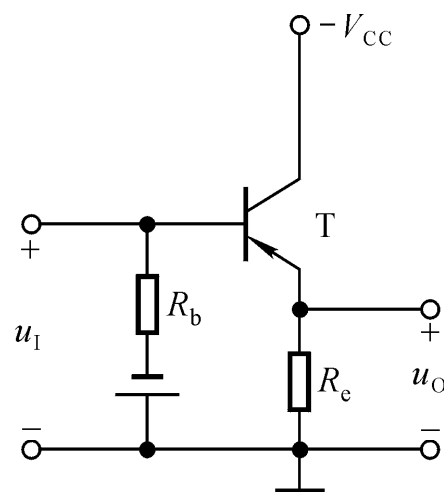
自测题二 试分析图中a、b、g各电路是否能够放大正弦交流信号，简述理由。设图中所有电容对交流信号均可视为短路。



(a)

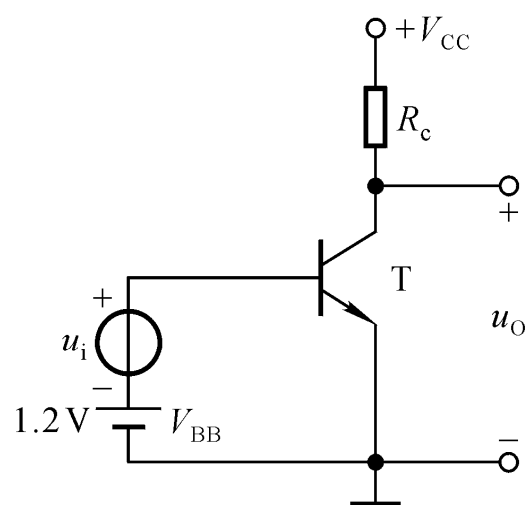


(b)

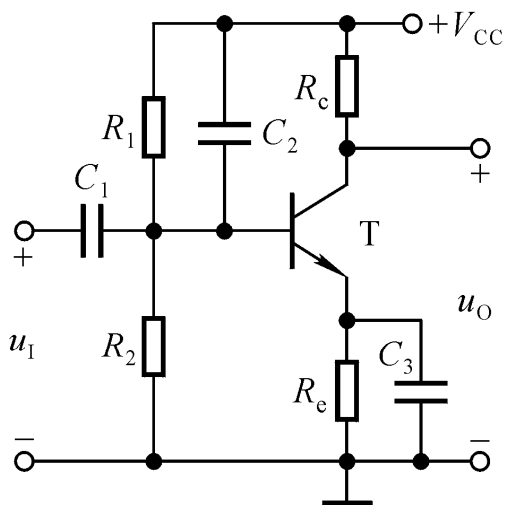


(c)

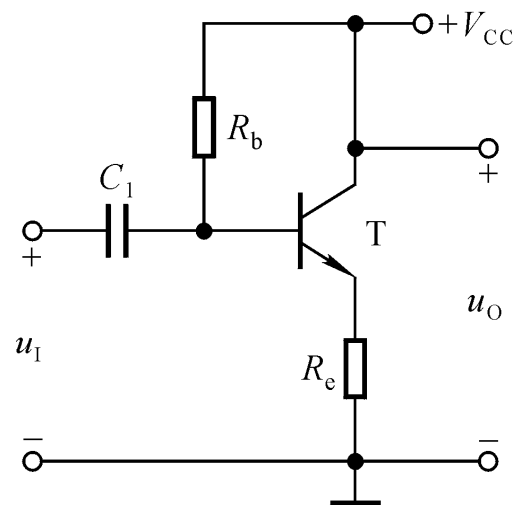
2.2 基本共射放大电路的工作原理



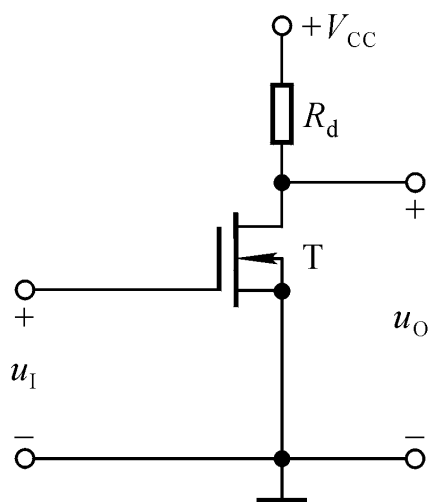
(d)



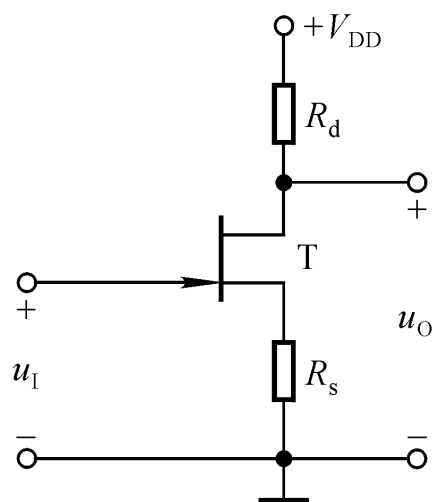
(e)



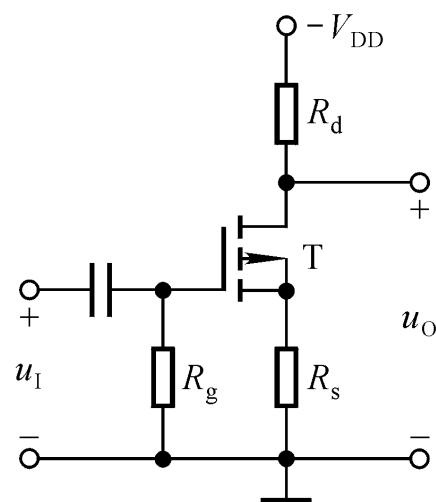
(f)



(g)



(h)



(i)

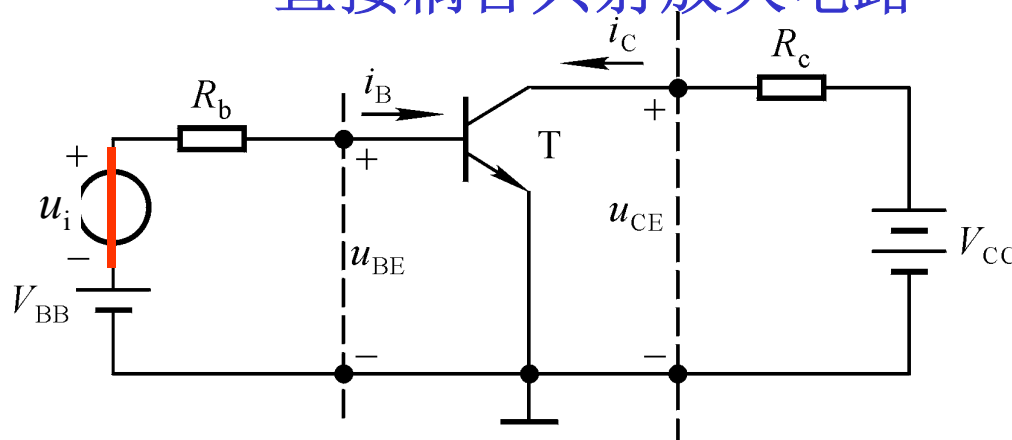
2.3 放大电路的分析方法

2.3.1 图解法

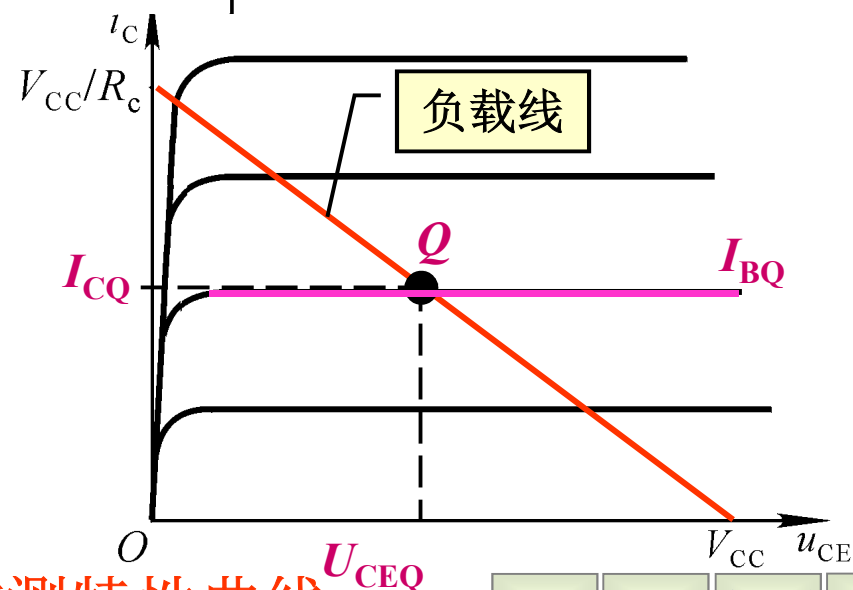
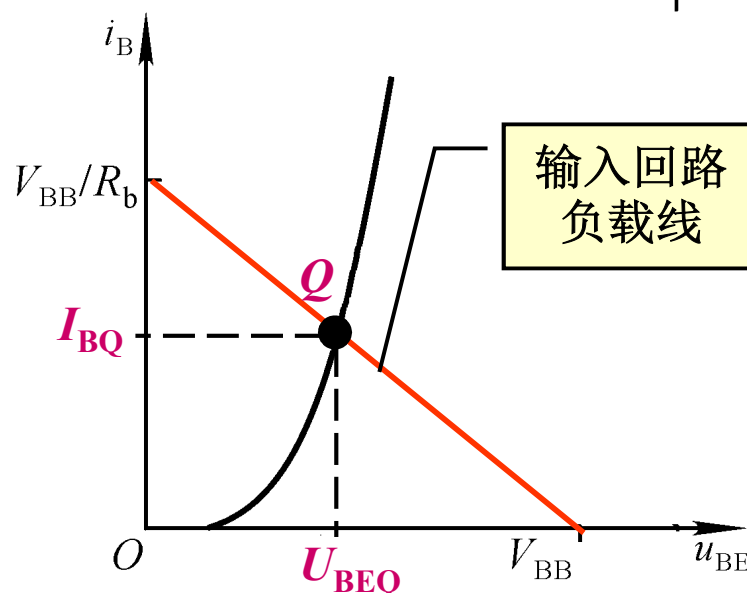
一、静态分析

直接耦合共射放大电路

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



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



前提是先实测特性曲线

二、动态分析

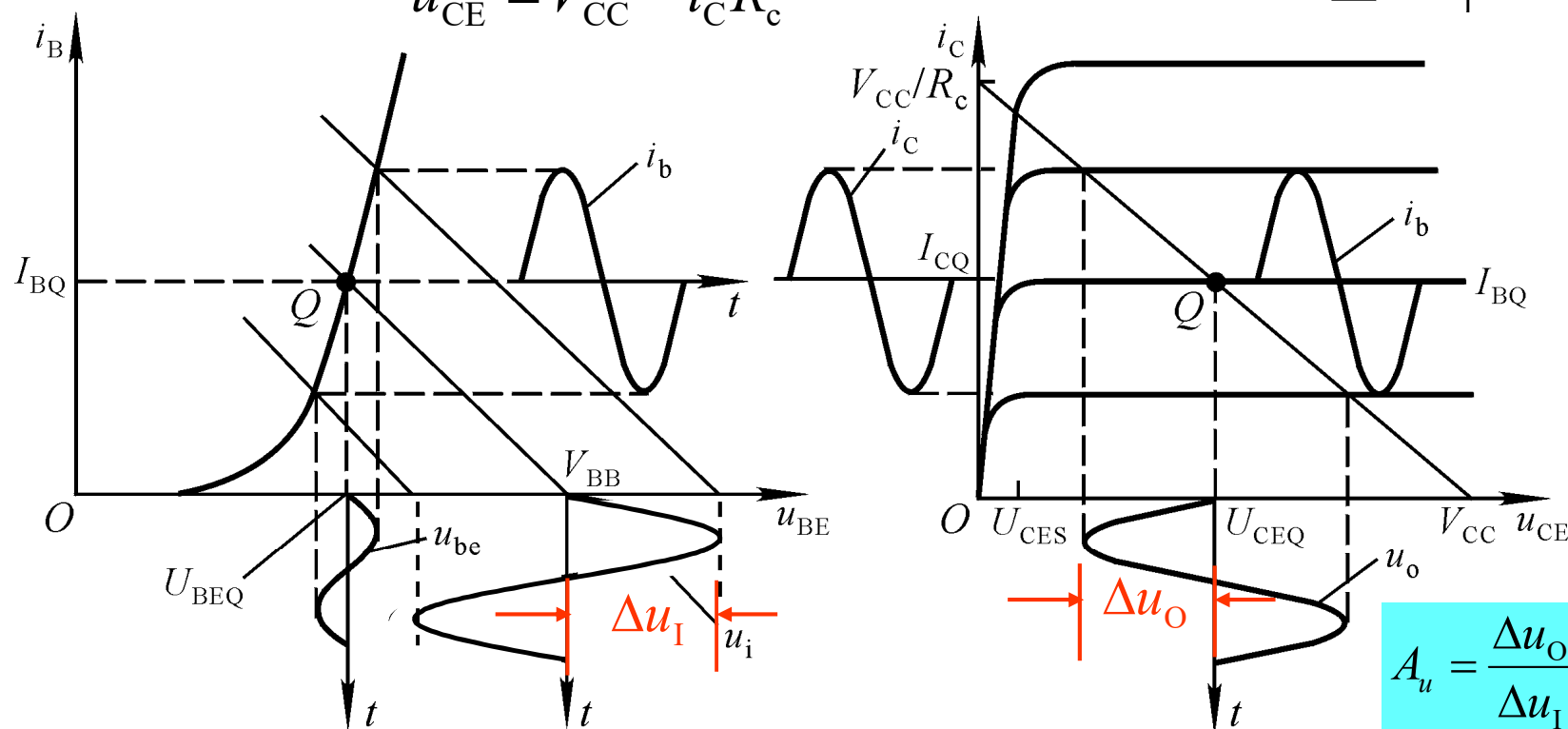
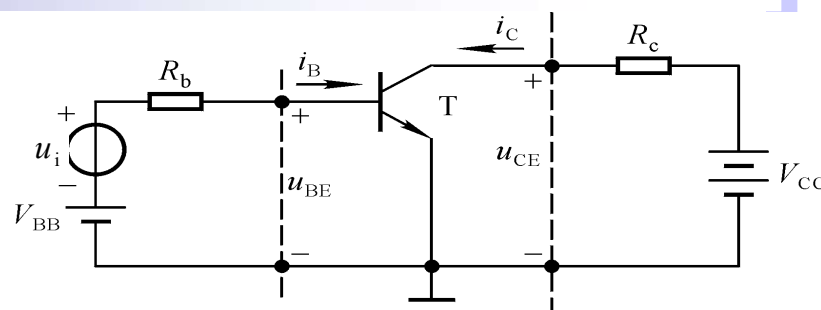
斜率不变

波形分析

方程不变

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

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



$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} \text{ 为负值}$$

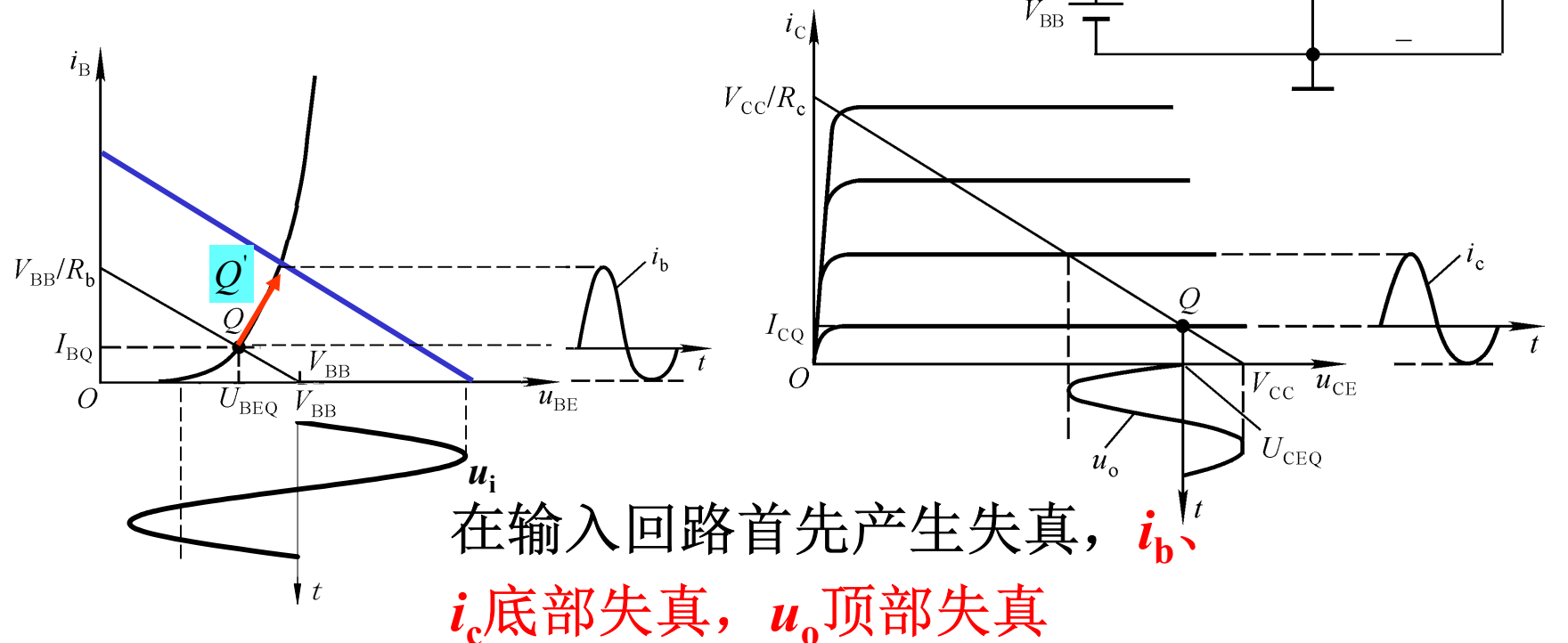
交流信号的传输: $u_i \rightarrow u_{be} \rightarrow i_b \rightarrow i_C \rightarrow u_o$ (即 u_{ce}) u_i 和 u_o 相位相反

电压和电流都含有直流分量和交流分量

非线性失真分析

- 截止失真 **Q 点过低**

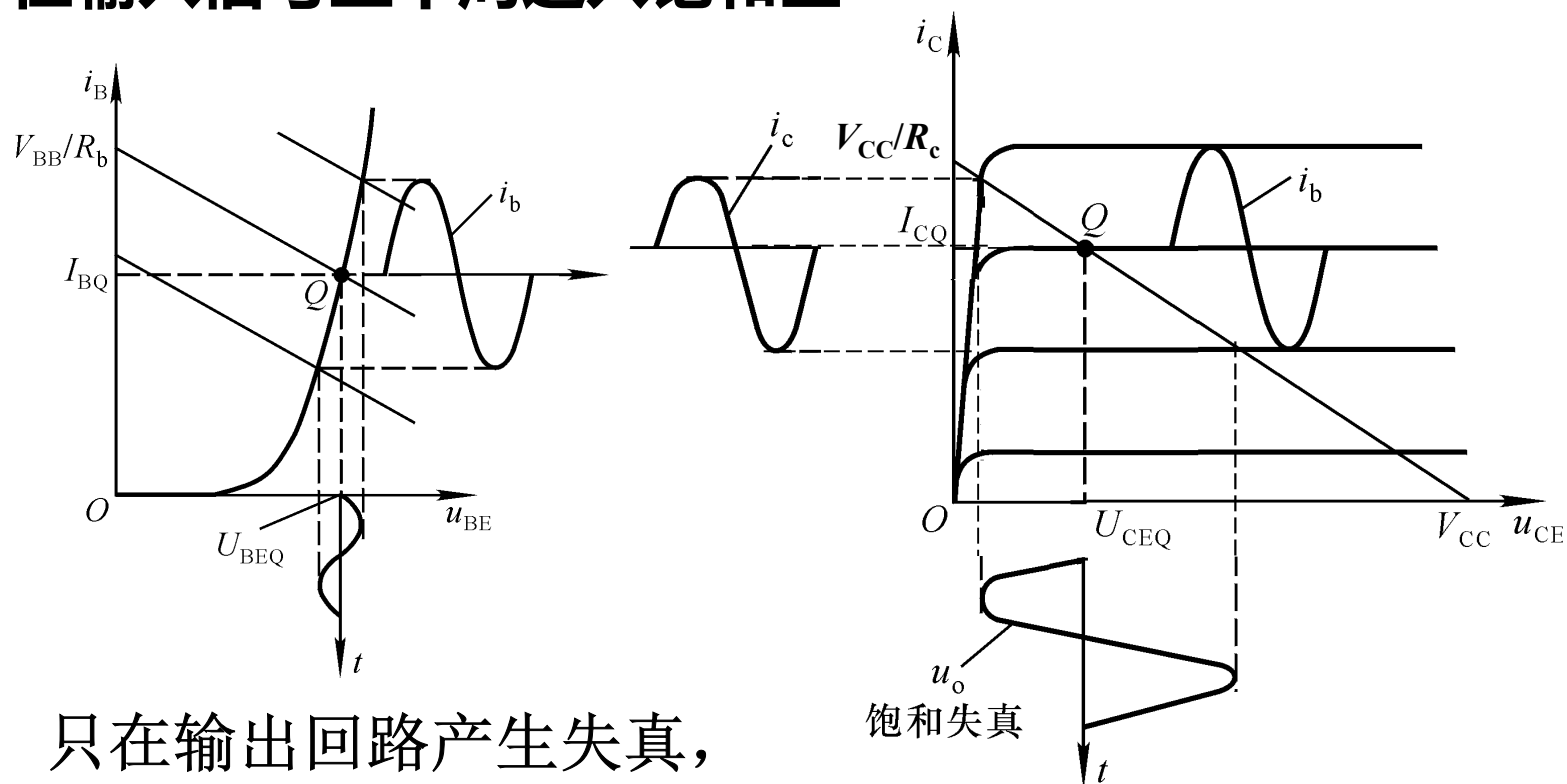
在输入信号负半周进入截止区



消除截止失真的方法: 从输入特性着手, 使 **Q 点上移**

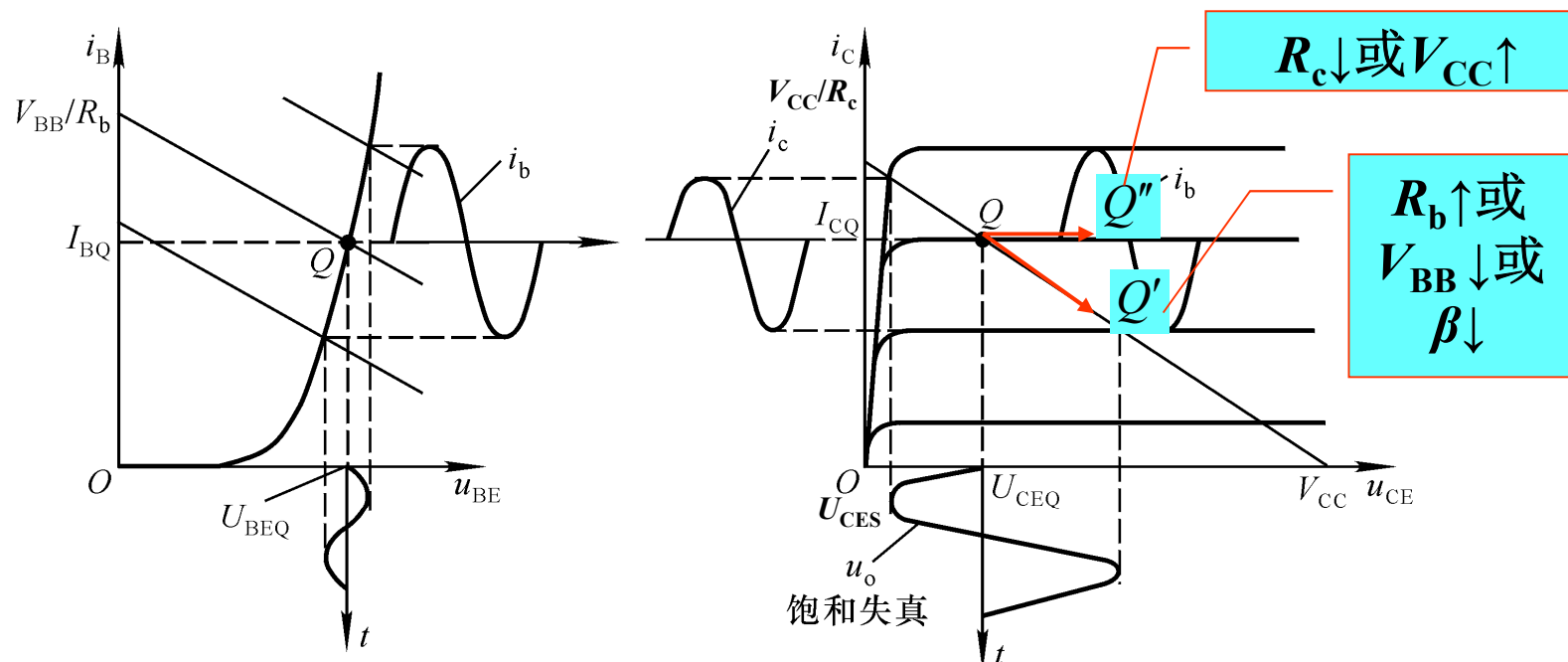
增大 V_{BB} (减小 R_b 可以吗?)

• 饱和失真

Q点过高**在输入信号正半周进入饱和区**

只在输出回路产生失真，
 i_c 顶部失真， u_o 底部失真

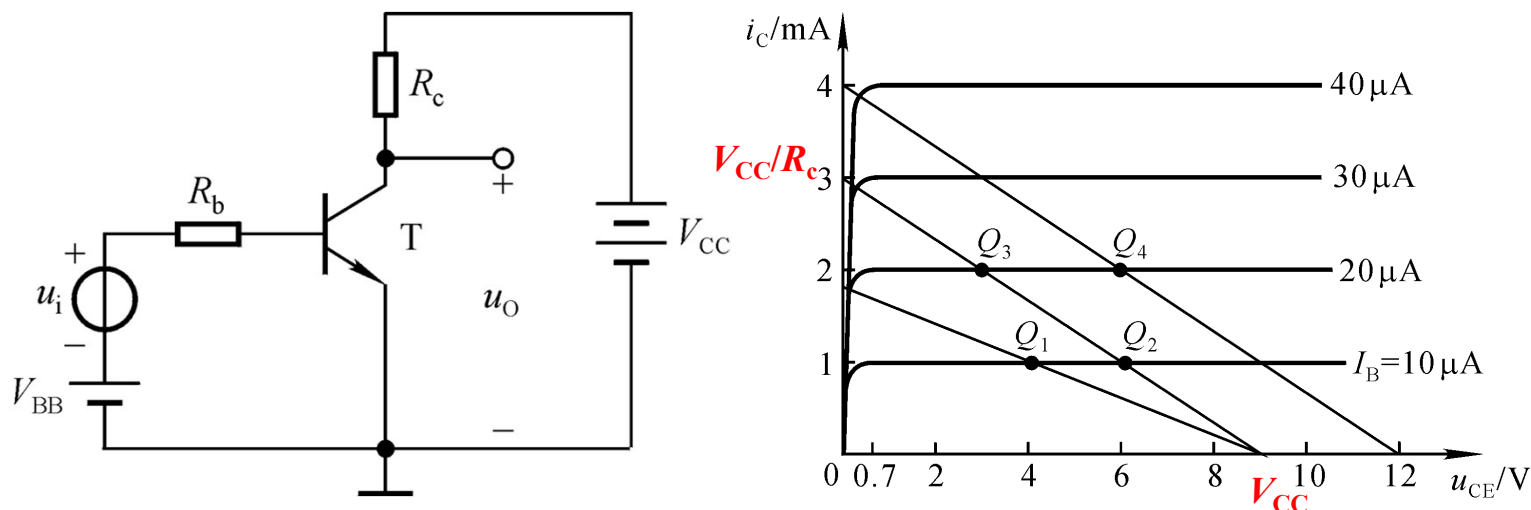
消除饱和失真的方法：从输出特性着手，使Q点下移或右平移



- 消除方法：增大 R_b ，或减小 V_{BB} ，或减小 β ，或减小 R_c ，或增大 V_{CC} 。
- 最大不失真输出电压 U_{om} ：比较 $(U_{CEQ} - U_{CES})$ 与 $(V_{CC} - U_{CEQ})$ ，取其小者，除以 $\sqrt{2}$ 。

Q 点在什么位置 U_{om} 最大？此时 $U_{CEQ} = \frac{V_{CC} + U_{CES}}{2}$

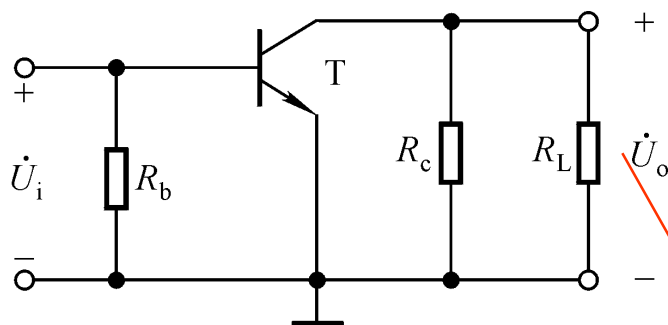
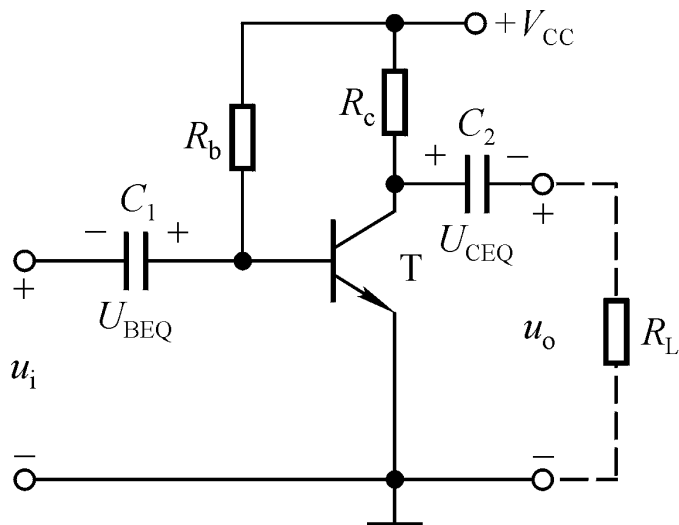
例2.3.1



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, 哪个 Q 点下最易产生截止失真? 哪个 Q 点下最易产生饱和失真? 哪个 Q 点下 U_{om} 最大, 并求其值?
3. 静态工作点为 Q_4 时, 求 V_{CC} 和 R_c ?

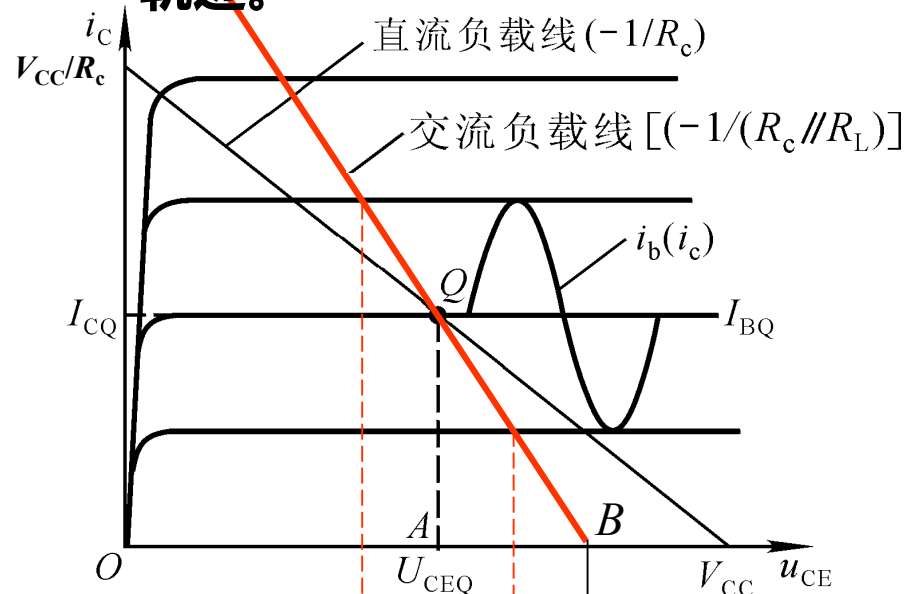
2.3 放大电路的分析方法

阻容耦合共射放大电路的图解分析



U_{om} : 比较 $(U_{CEQ} - U_{CES})$ 与 $(I_{CQ} R'_L)$, 取其小者, 除以 $\sqrt{2}$ 。

交流负载线反映动态时电流 i_c 和电压 u_{CE} 的变化关系,是实际工作点的运动轨迹。



$U_{om}=?$

R_L 越小, 输出电压越小

交流负载线应过 Q 点, 且斜率决定于 $R'_L=R_c // R_L$

2.3.3 等效电路法

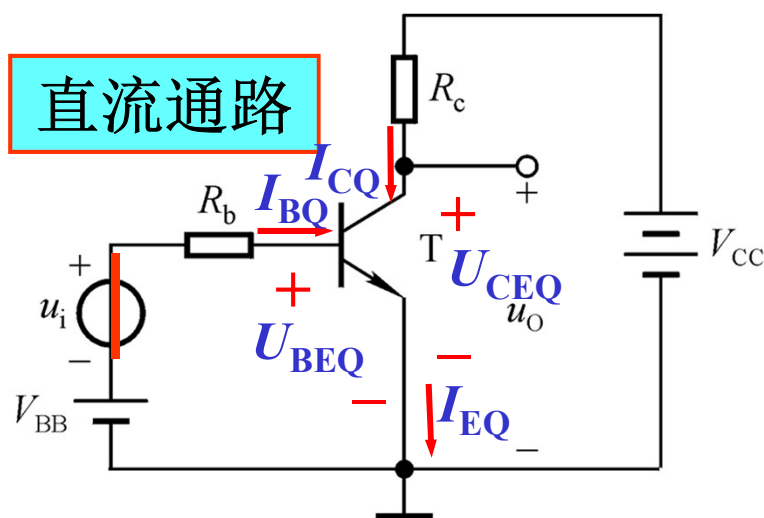
为了简化分析，用**线性电路**来描述半导体器件的**非线性特性**，建立线性模型，就可应用**线性电路的分析方法**来分析放大电路了。

一、静态分析

画出直流通路：直流电源单独作用，①交流信号源视为短路；②电容视为开路。

由直流通路估算直流分量（即Q点）。

直接耦合共射放大电路的静态分析



用直流通路估算Q点

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b}$$
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

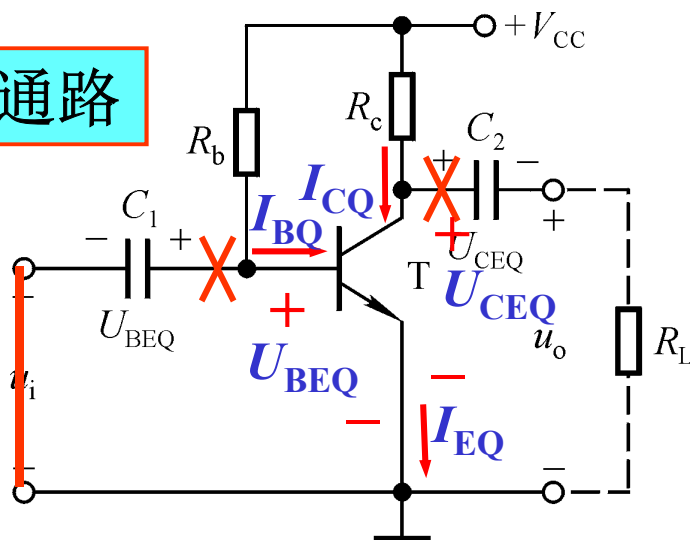
估算时认为
 U_{BEQ} 为已知量

$$\text{一般取 } |U_{BEQ}| = \begin{cases} 0.7\text{V} & (\text{Si管}) \\ 0.2\text{V} & (\text{Ge管}) \end{cases}$$

利用估算法求解静态工作点，实质上利用了晶体管的直流模型。

阻容耦合共射放大电路的静态分析

直流通路



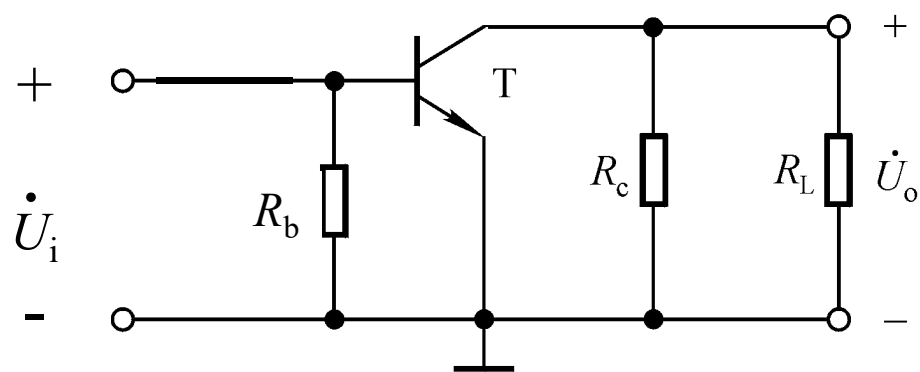
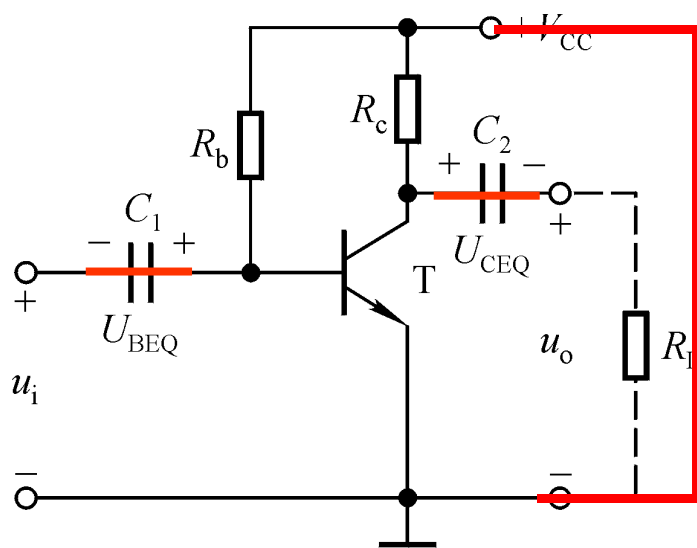
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

二、动态分析

1. 画出**交流通路**：交流信号源单独作用，①直流电源视为短路；②大容量电容视为短路。

由交流通路求交流分量（性能指标）。

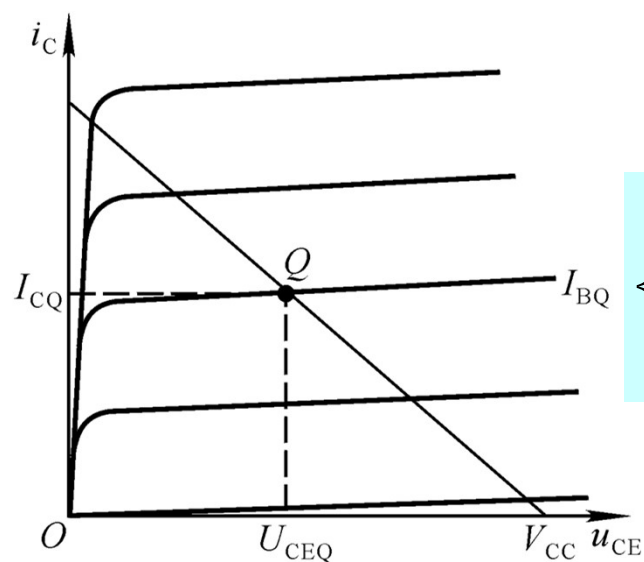
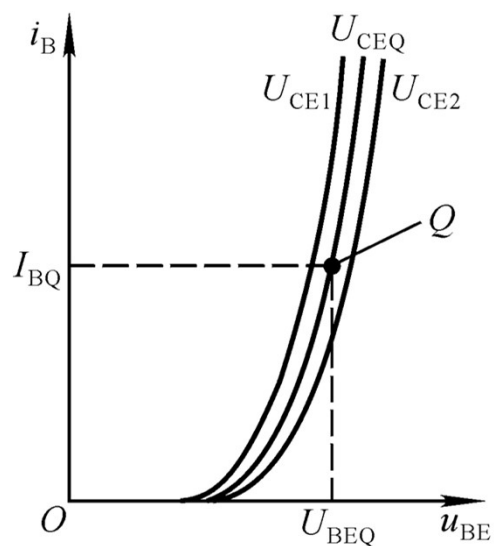
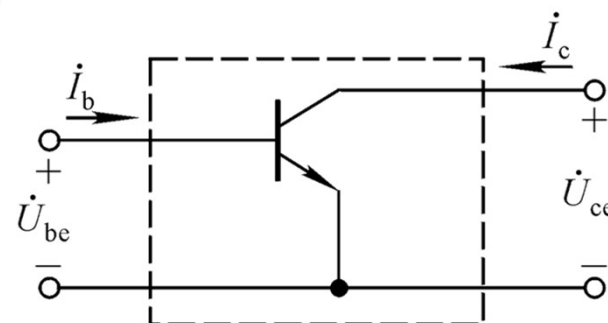
例 画出图示电路的交流通路。



交流通路

2. 晶体管 h 参数等效模型

低频小信号时，在交流通路中将晶体管看成一个线性二端口网络。



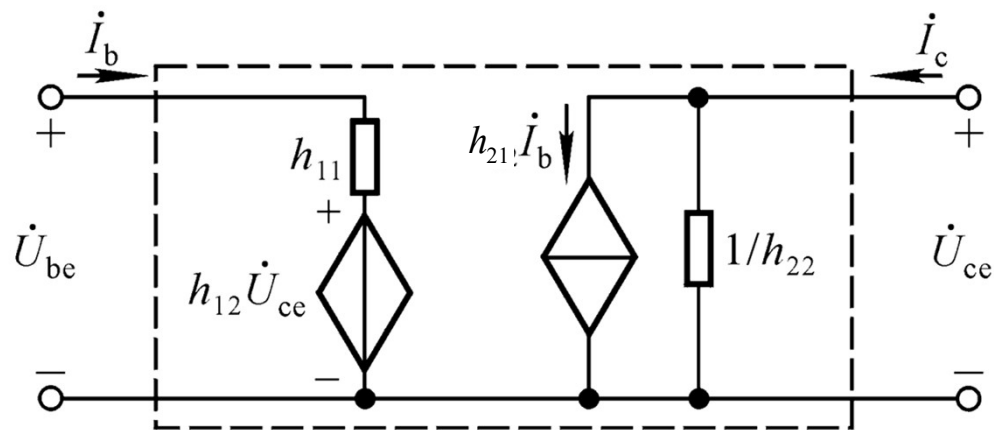
$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

在低频小信号作用下，对上边两式求全微分：

$$\begin{cases} du_{BE} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \\ di_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{U}_{be} = h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce} \end{cases}$$

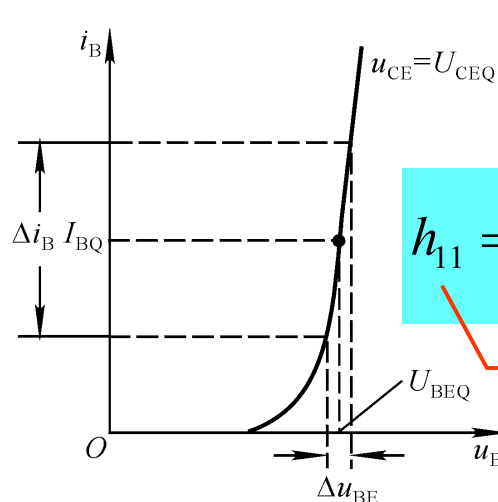
电阻 无量纲 无量纲 电导

按上式画 h 参数等效模型：



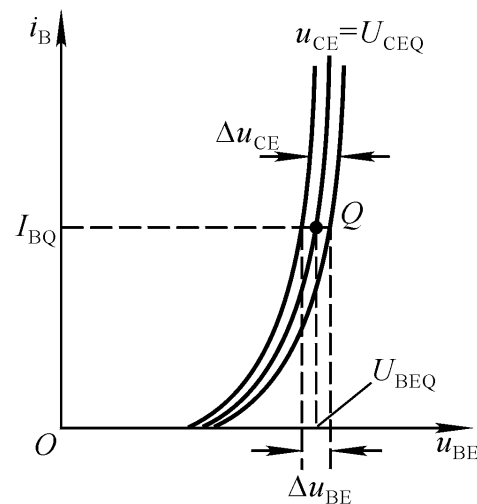
2.3 放大电路的分析方法

h 参数的物理意义



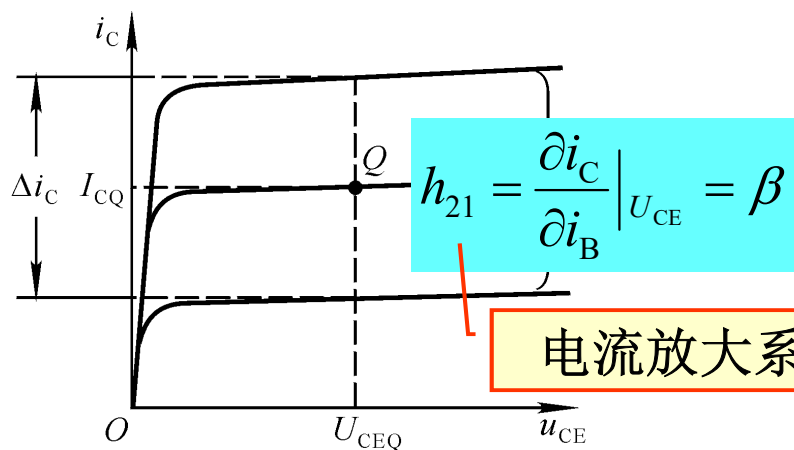
$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} = r_{be}$$

b-e间的
动态电阻



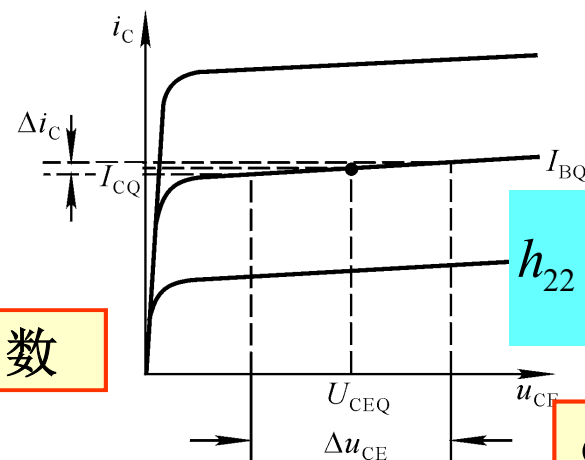
$$h_{12} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

内反馈
系数



$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} = \beta$$

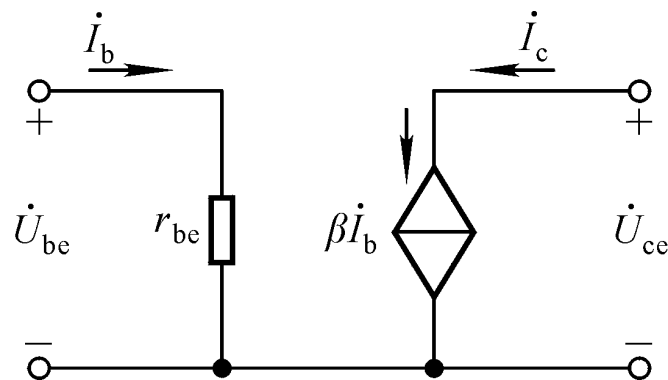
电流放大系数



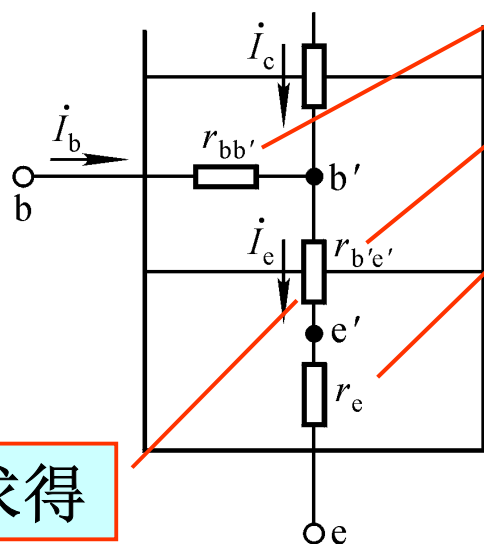
$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} = \frac{1}{r_{ce}}$$

c-e间的动
态电阻

h_{12} 和 h_{22} 的值很小，近似分析中其作用可忽略不计。

简化的 h 参数等效模型

利用PN结的电流方程可求得



基区体电阻

发射结电阻

发射区体电阻,
数值小可忽略

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

查阅手册,常设为
100~300Ω

由 I_{EQ} 算出

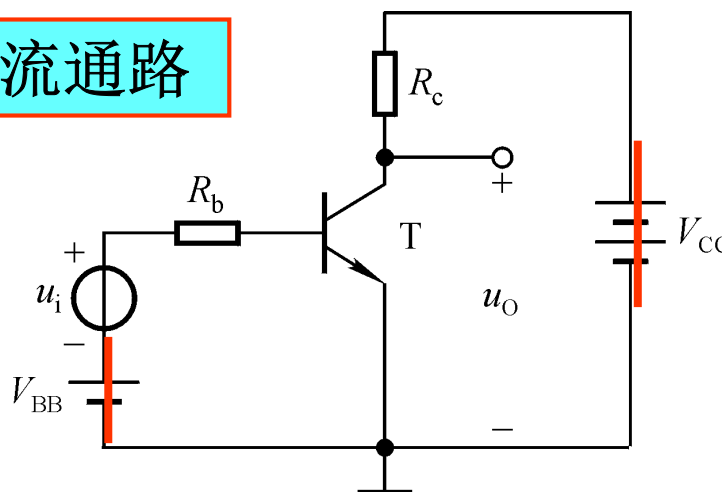
在输入特性曲线上, Q 点越高, r_{be} 越小!

晶体管的 h 参数等效模型只适用于在**低频小信号**的情况下研究**动态参数**。

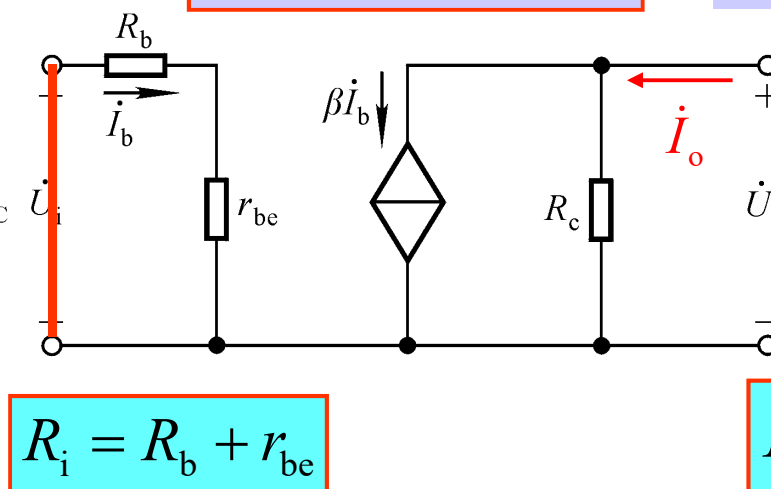
3. 放大电路的动态分析

直接耦合共射放大电路的动态分析

交流通路



交流等效电路



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_i &= \dot{I}_b (R_b + r_{be}) \\ \dot{U}_o &= -\beta \dot{I}_b R_c\end{aligned}$$

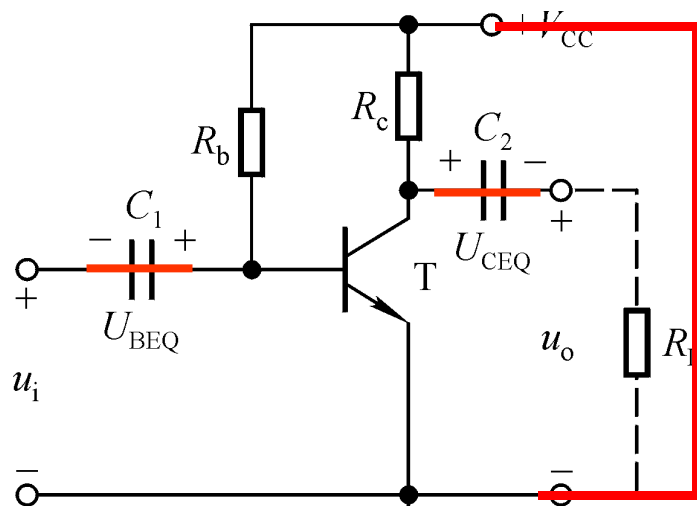
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$|\dot{A}_u| \gg 1$ 故具有电压放大作用，且输入输出反相。

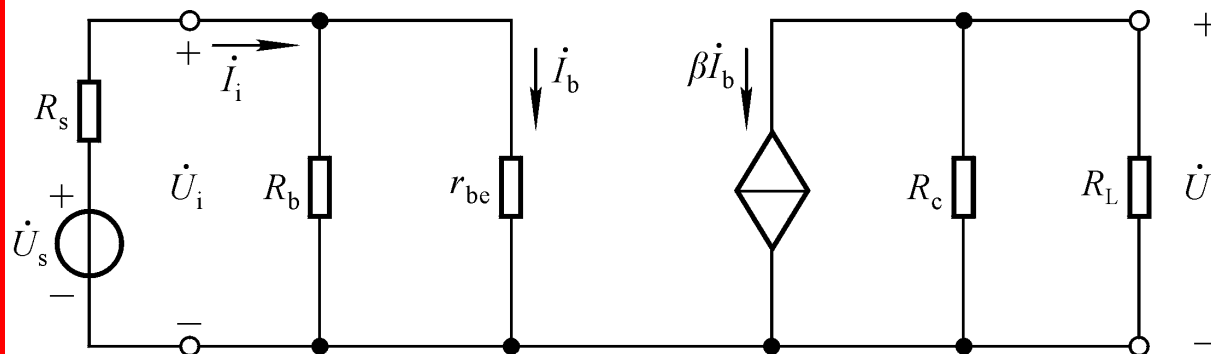
2.3 放大电路的分析方法

阻容耦合共射放大电路的动态分析

交流等效电路



交流通路



$$R_i = R_b // r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

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

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_u$$

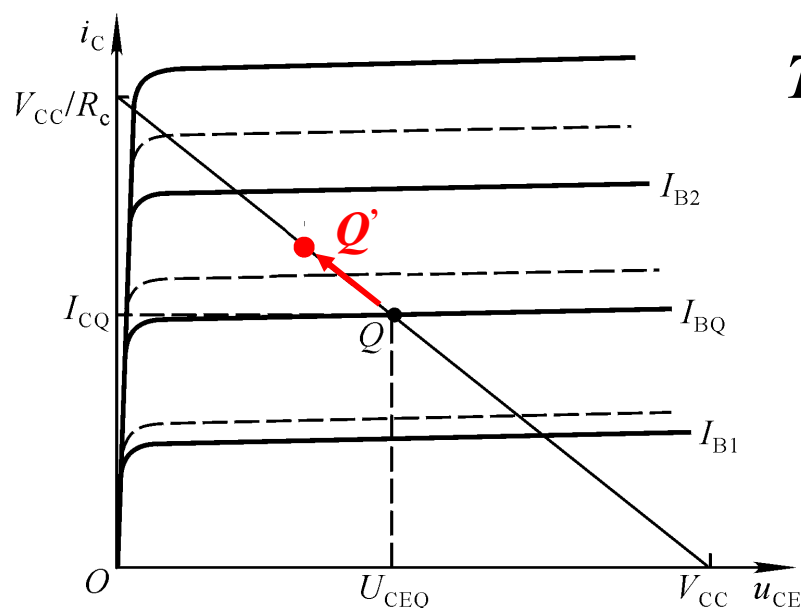
例2.3.3

电压放大倍数与 R_L 、 β 和 r_{be} 有关。 R_L 越小，电压放大倍数越低。

静态工作点不但决定了电路是否会产生失真，而且还影响电压放大倍数、输入电阻等动态参数。

2.4 放大电路静态工作点的稳定

2.4.1 温度对静态工作点的影响



$$T (^\circ\text{C}) \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow Q'$$

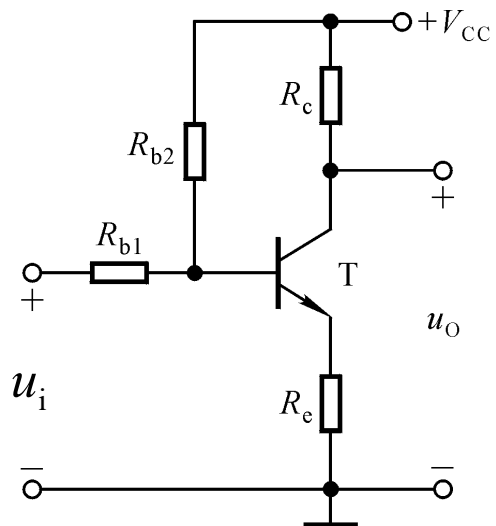
容易产生饱和失真，要 Q' 回到 Q ，必须减小 I_{BQ}

所谓**稳定Q点**，是指在**直流通路**中 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 在温度变化时**基本不变**，这是靠 I_{BQ} 的**变化**得来的。

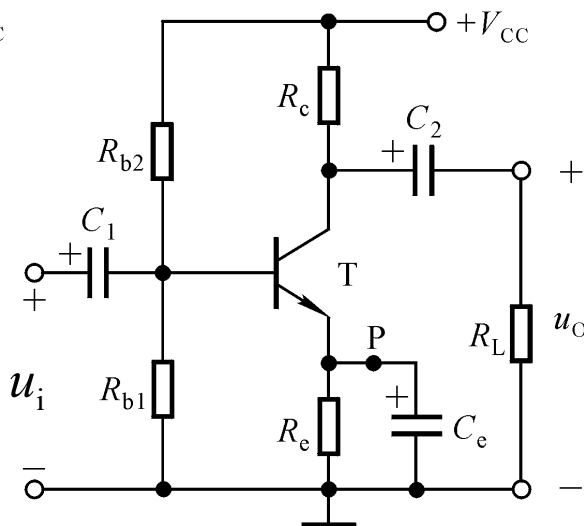
2.4.2 静态工作点稳定的典型电路

一、电路组成

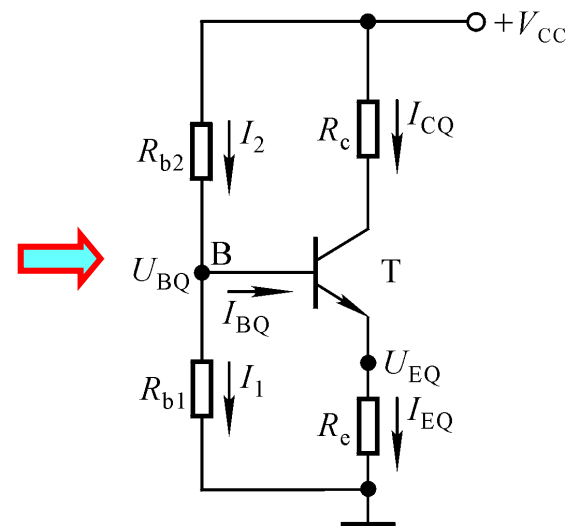
直接耦合方式

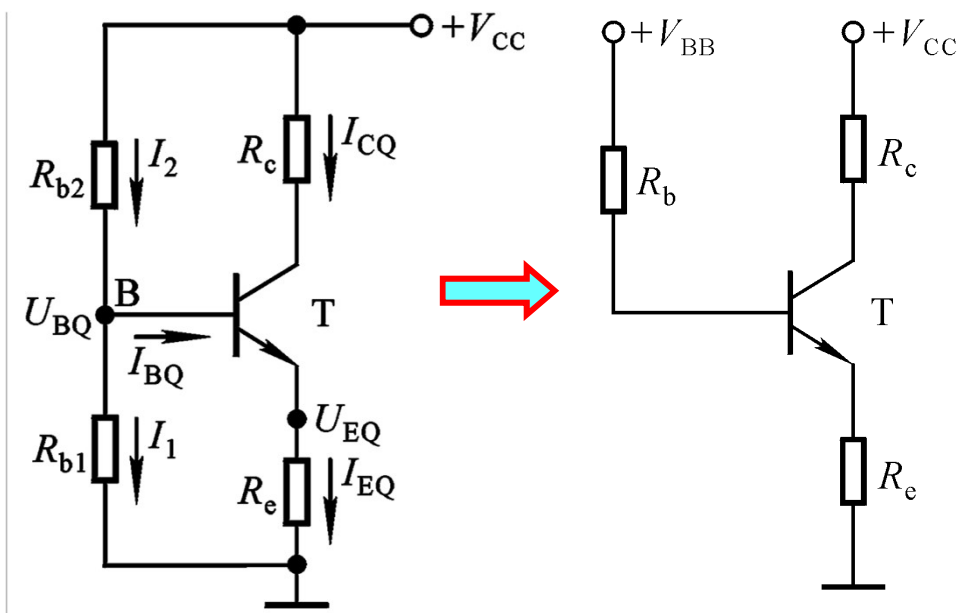


阻容耦合方式



两者的直流通路相同



利用戴维宁定理求解 Q 点

$$V_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

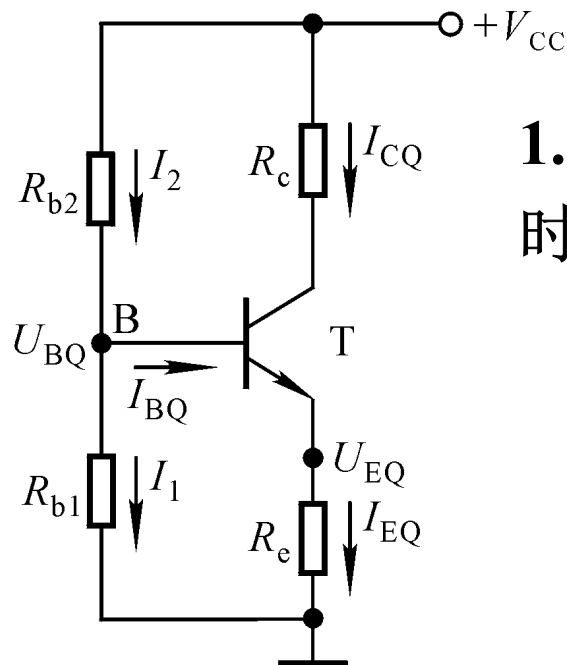
$$R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

$$V_{BB} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + (1 + \beta) I_{BQ} R_e$$

若 $(1 + \beta) R_e \gg R_b$, 则 $V_{BB} \approx U_{BEQ} + (1 + \beta) I_{BQ} R_e = U_{BQ}$

$$\therefore \text{若 } (1 + \beta) R_e \gg R_b, \text{ 则 } U_{BQ} \approx V_{BB} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

二、Q点稳定原理



1. 为了稳定Q点, 使得 $(1+\beta)R_e \gg (R_{b1} // R_{b2})$, 此时 $I_1 \gg I_{BQ}$, 即 $I_1 \approx I_2$, 因此:

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC} \quad \text{基本不随温度变化}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

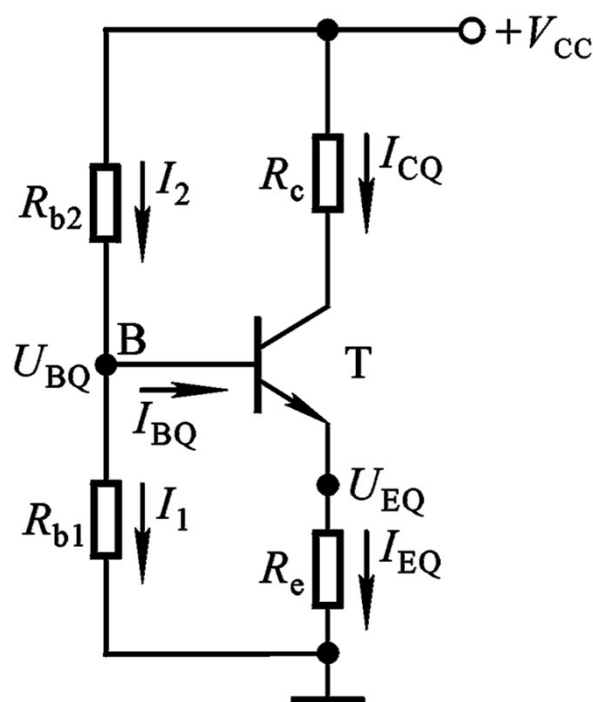
2. R_e 的作用

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow (U_{BQ} \text{基本不变}) \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$

R_e 起电流负反馈作用, 其值越大, 反馈越强, Q点越稳定; 但太大将使输出电压降低。一般取几百欧~几千欧。

三、Q点的分析

估算法求解Q点



$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

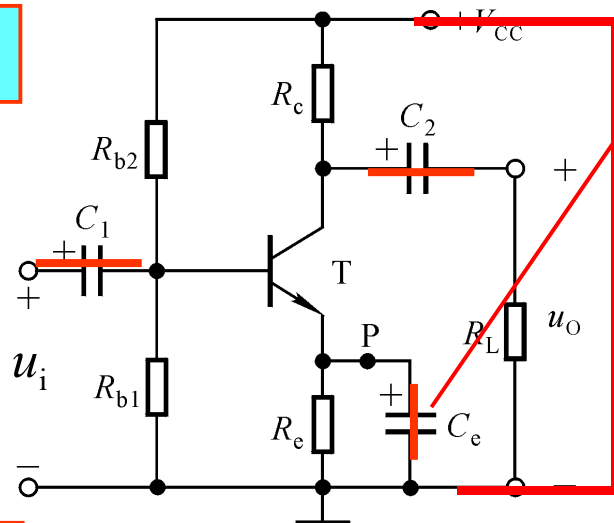
$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \\ \approx V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_e)$$

所以，又称为分压式偏置电路。

四、动态分析

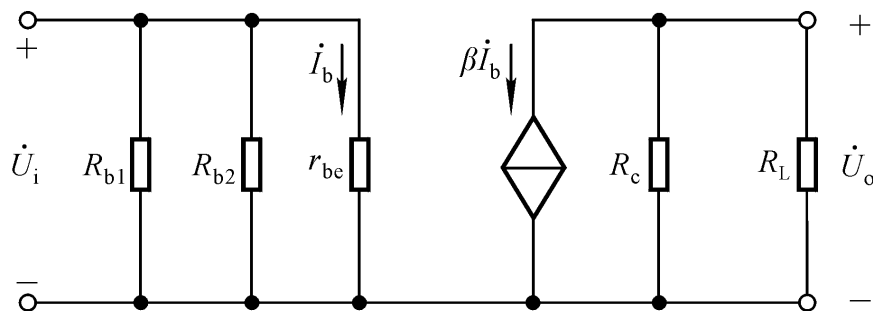
交流通路



C_e 为旁路电容，
在交流通路中可
视为短路

R_e 对交流不起作用，只有直流电流负反馈，稳定Q点，对 A_u ， R_i ， R_o 没有影响。

交流等效电路



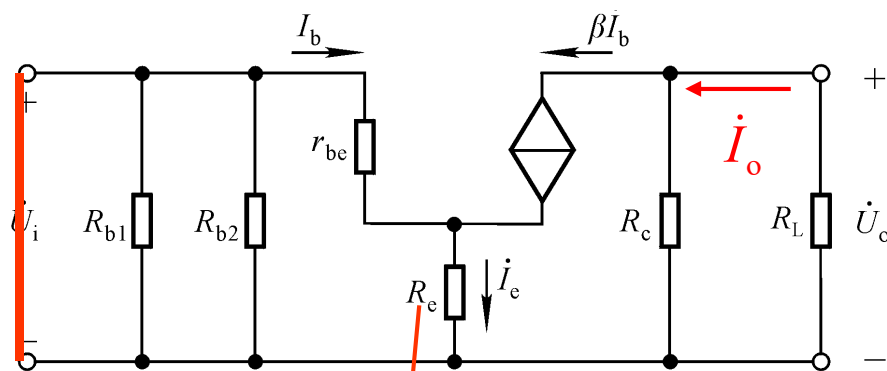
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

无旁路电容 C_e 时:

交流等效电路



存在交流负反馈，
利？弊？

$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

A_u
减小

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

$$R_o = R_c$$

R_o
不变

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

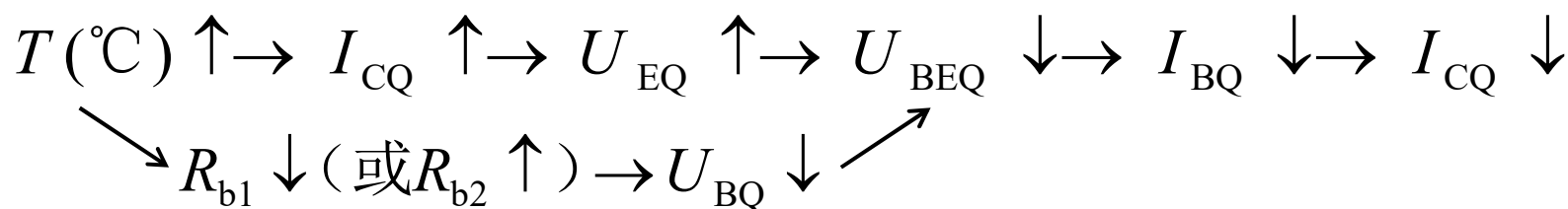
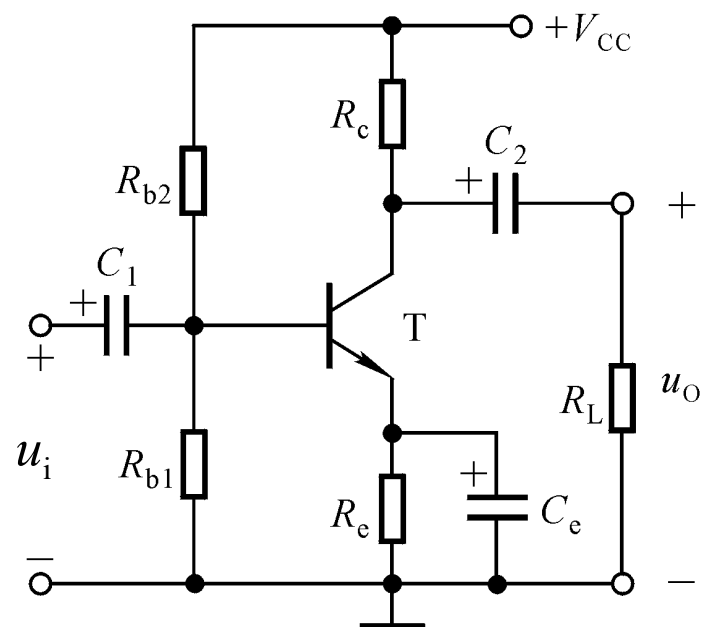
若 $(1 + \beta) R_e \gg r_{be}$ ，则 $\dot{A}_u \approx -\frac{R'_L}{R_e}$ ，温度稳定性好。

R_i
提高

2.4.3 稳定静态工作点的措施

- 引入直流负反馈
- 温度补偿：利用对温度敏感的元件，在温度变化时直接影响输入回路。

例如， R_{b1} 或 R_{b2} 采用热敏电阻（或二极管）。 R_{b1} 应具有负温度系数， R_{b2} 应具有正温度系数。



共射放大电路的特点

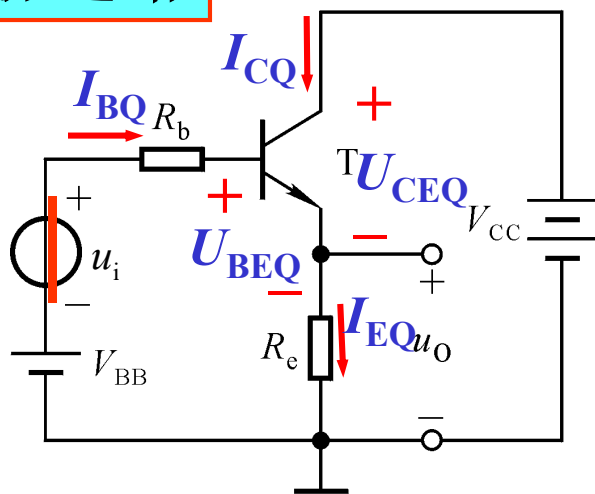
有电压放大能力，也有电流放大能力，输出电压与输入电压反相；输入电阻不大，输出电阻较大，频带较窄，常作为低频电压放大电路。

2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法

2.5.1 基本共集放大电路

一、静态分析

直流通路



$$V_{BB} = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + I_{EQ}R_e$$

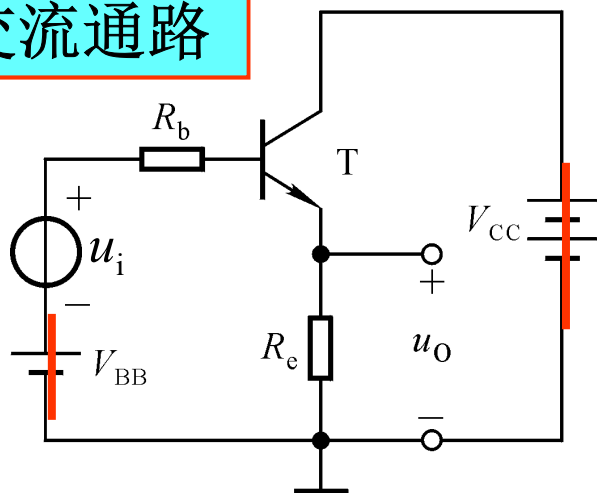
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

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

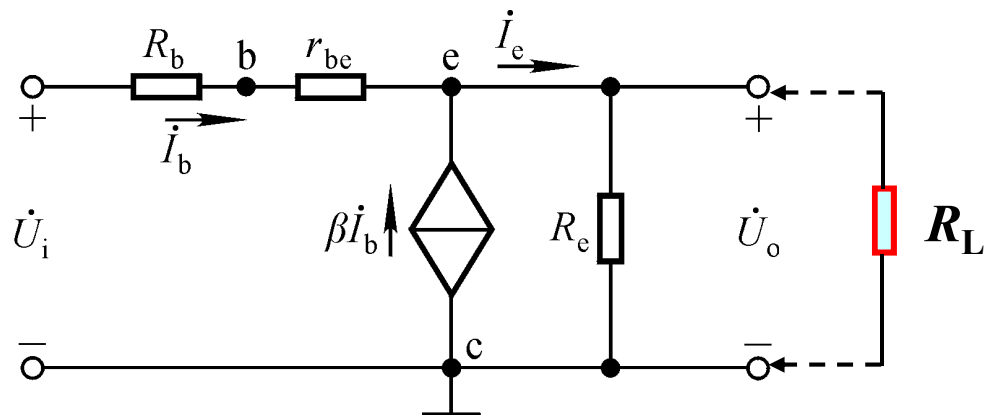
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e$$

二、动态分析

交流通路



交流等效电路



带负载电阻后

电压放大倍数

$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e} \\ &= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

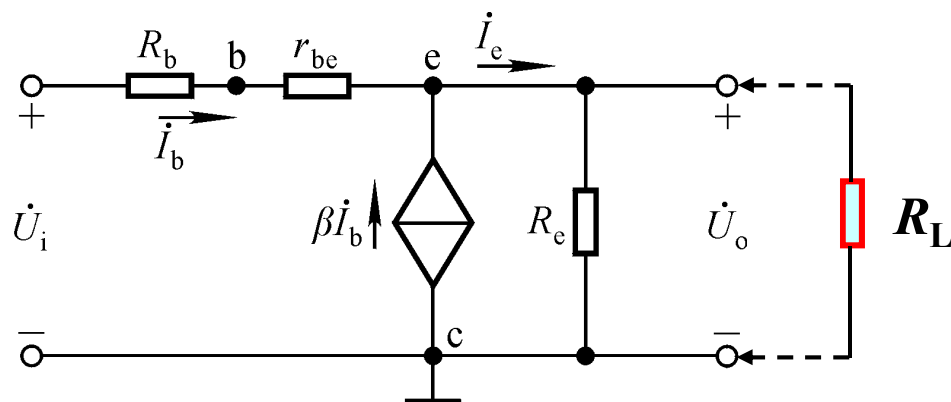
$$\dot{A}_u = \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}$$

 \dot{A}_u 与负载有关!

若 $(1 + \beta) R_e \gg (R_b + r_{be})$,
则 $\dot{A}_u \approx 1$ (且 < 1) , 即 $\dot{U}_o \approx \dot{U}_i$ 。

故称之为射极跟随器

输入电阻



$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_c R_e} \\ &= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e$$

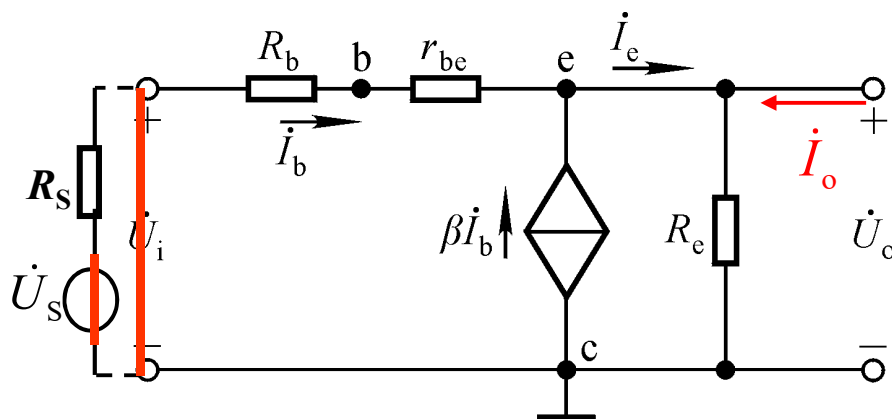
带负载电阻后

$$R_i = R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)$$

R_i 与负载有关!

2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法

输出电阻



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

$$\begin{aligned} R_o &= R_e // \frac{\dot{U}_o}{-\dot{I}_e} \\ &= R_e // \frac{-(R_b + r_{be})\dot{I}_b}{-\dot{I}_e} \\ &= R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1 + \beta} \end{aligned}$$

若考虑信号源内阻 R_s ，则令 U_s 为零，保留 R_s ，得：

$$R_o = R_e // \frac{R_b + r_{be} + R_s}{1 + \beta}$$

R_o 与信号源内阻有关！

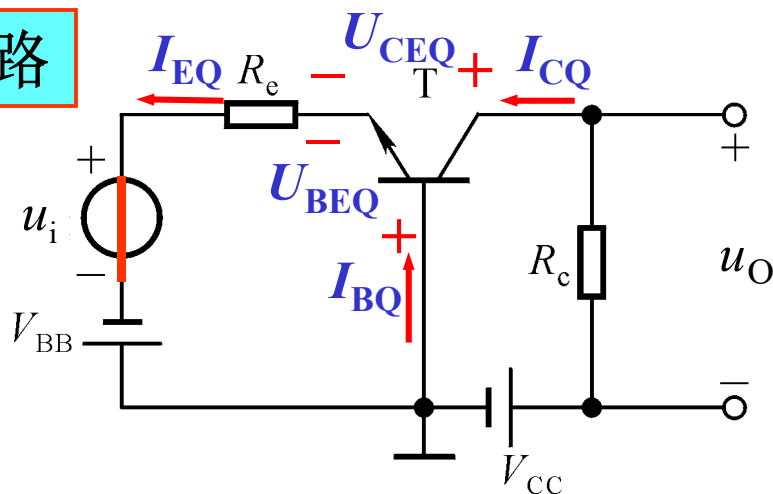
共集放大电路的特点

无电压放大能力，只有电流放大能力，有电压跟随作用，可用于连接两电路，起缓冲作用；输入电阻大，输出电阻小，常用于多级放大电路的输入级和输出级。

2.5.2 基本共基放大电路

一、静态分析

直流通路



$$V_{BB} = R_e I_{EQ} + U_{BEQ}$$

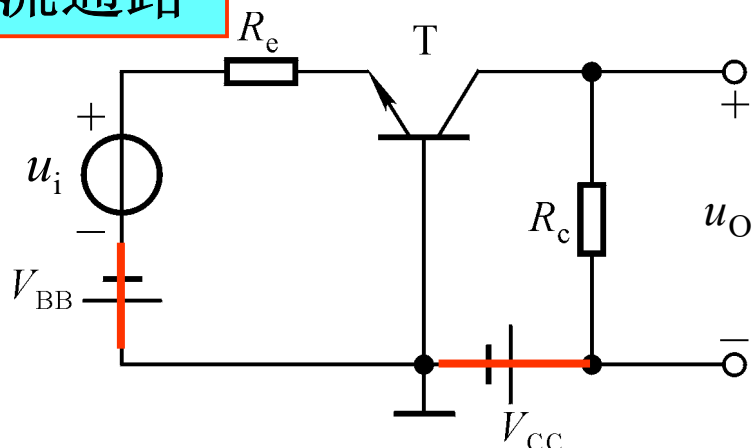
$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

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

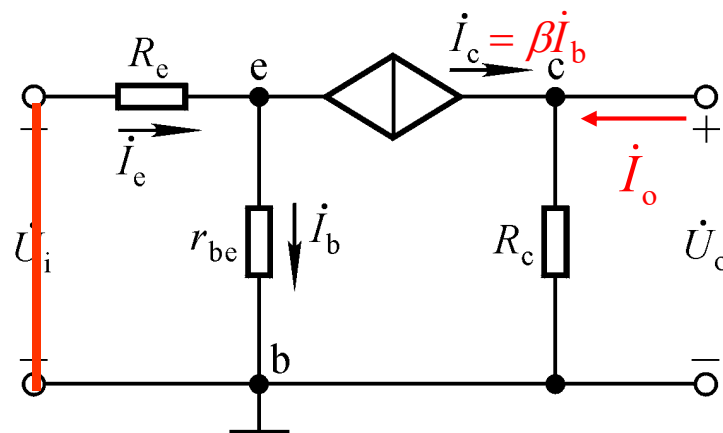
二、动态分析

交流通路



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

交流等效电路



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

$$R_o = R_c$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_e} = R_e + \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$$

共基放大电路的特点

只有电压放大能力，无电流放大能力，输出电压与输入电压同相；输入电阻小，电压放大倍数和输出电阻与共射电路相当，**频带宽**，常作为**宽频带放大电路**。

2.5.3 三种接法的比较

接法	共射 b入c出	共集 b入e出	共基 e入c出
$ \dot{A}_u $	大	小于1	大
$ \dot{A}_i $	β	$1+\beta$	$\alpha \approx 1$
R_i	中	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中	宽
用途	低频电压放大	输入级输出级	宽频带放大

2.6 场效应管放大电路

2.6.1 场效应管放大电路静态工作点的设置及分析

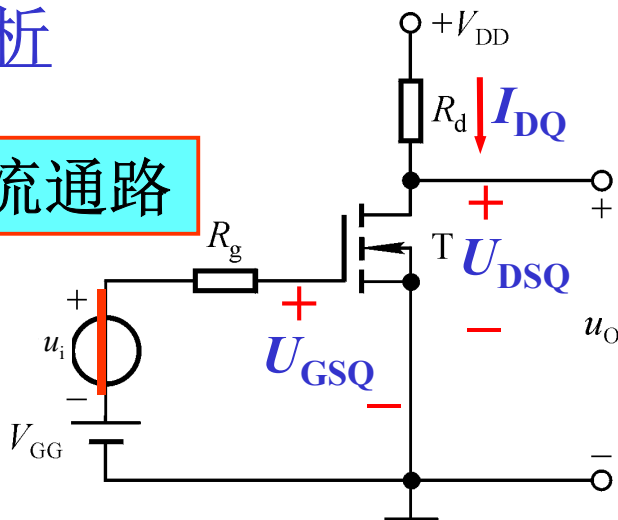
一、基本共源放大电路

根据场效应管工作在恒流区的条件，
在g-s、d-s间加极性合适的电源

也可用图解
法求Q点

静态分析

直流通路



$$U_{GSQ} = V_{GG}$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

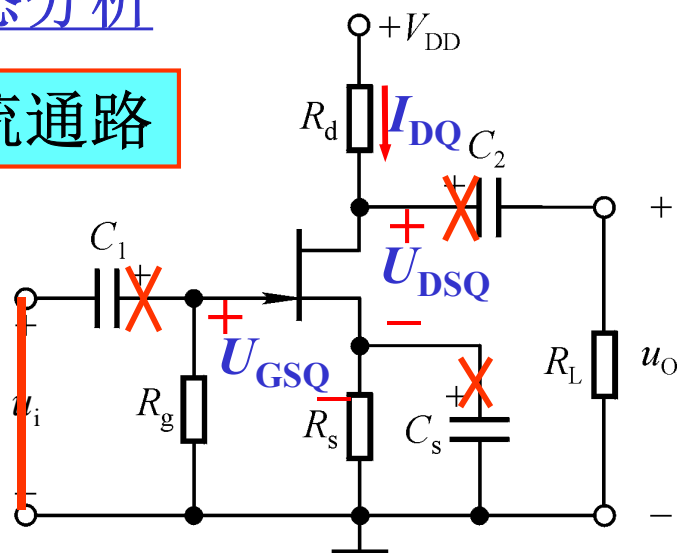
哪种场效应管能够采用这种电路？

增强型或耗尽型**MOS**管

二、自给偏压电路

静态分析

直流通路



$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = 0 - I_{DQ}R_s$$

由正电源获得负偏压
称为自给偏压

$$U_{GSQ} = -I_{DQ}R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_d + R_s)$$

哪种场效应管能够采用这种电路？

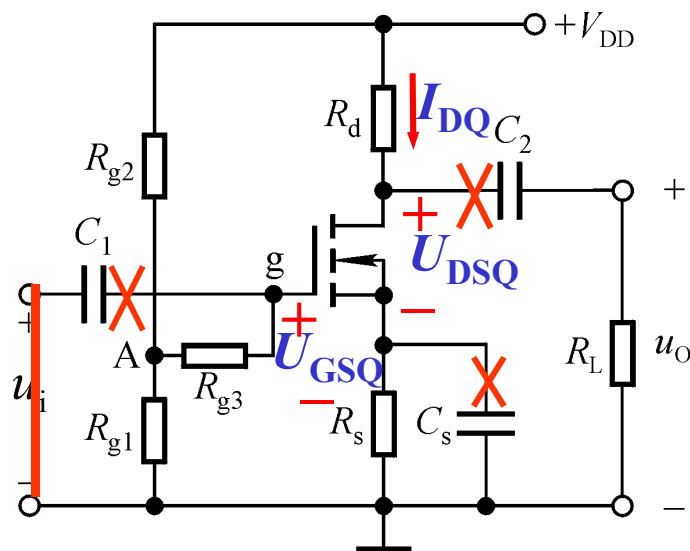
耗尽型**MOS**管或结型场效应管

三、分压式偏置电路

即典型的 Q 点稳定电路

静态分析

直流通路



$$U_{GQ} = U_{AQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD}$$

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD} - I_{DQ} R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

可以获得
任意栅压

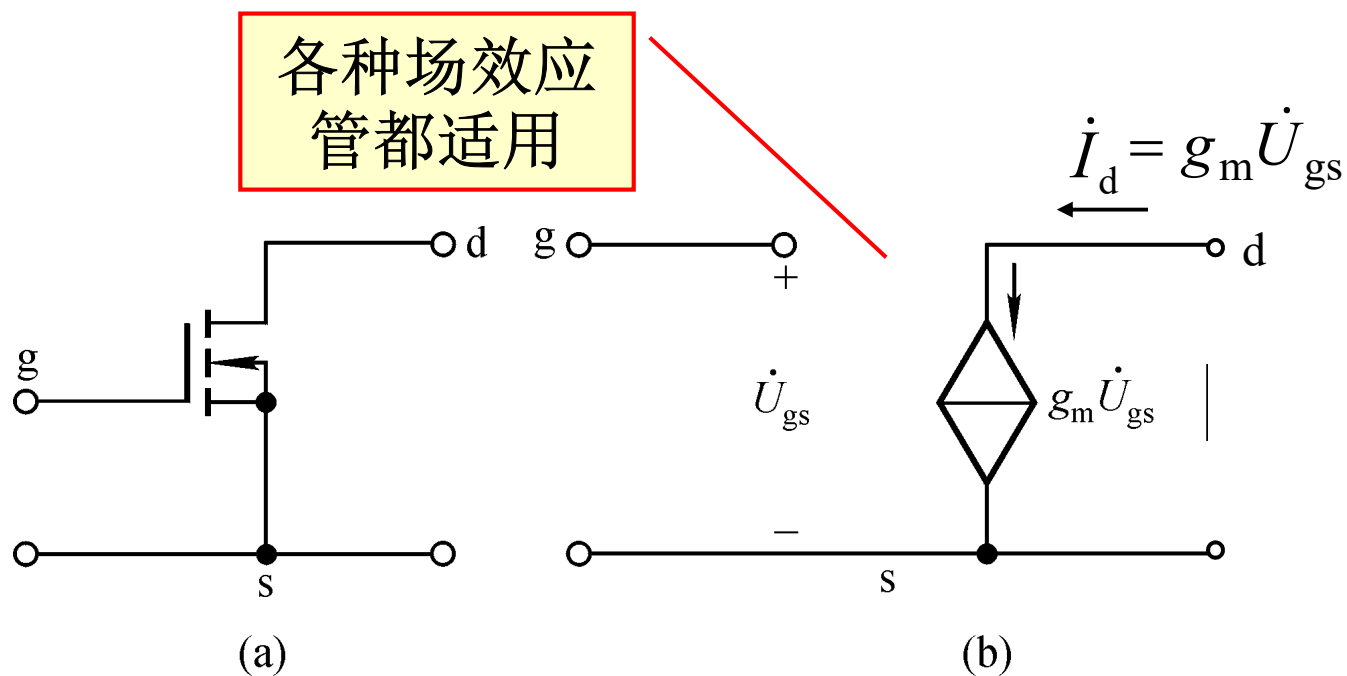
哪种场效应管能够采用这种电路？

各种场效应管

2.6.2 场效应管放大电路的动态分析

一、场效应管的低频小信号等效模型

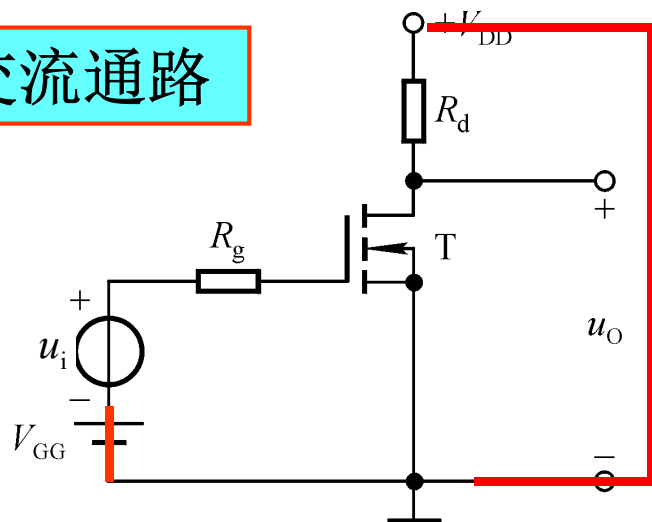
各种场效应管都适用



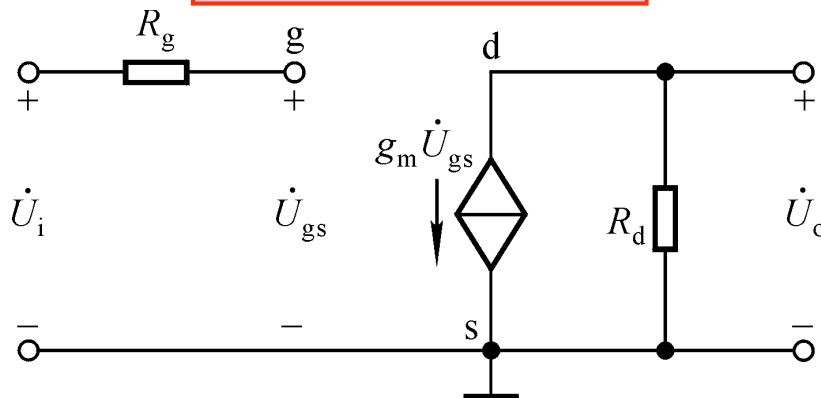
对于增强型MOS管， $g_m \approx \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DQ} I_{DQ}}$

二、基本共源放大电路的动态分析

交流通路



交流等效电路



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} R_d}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R_d$$

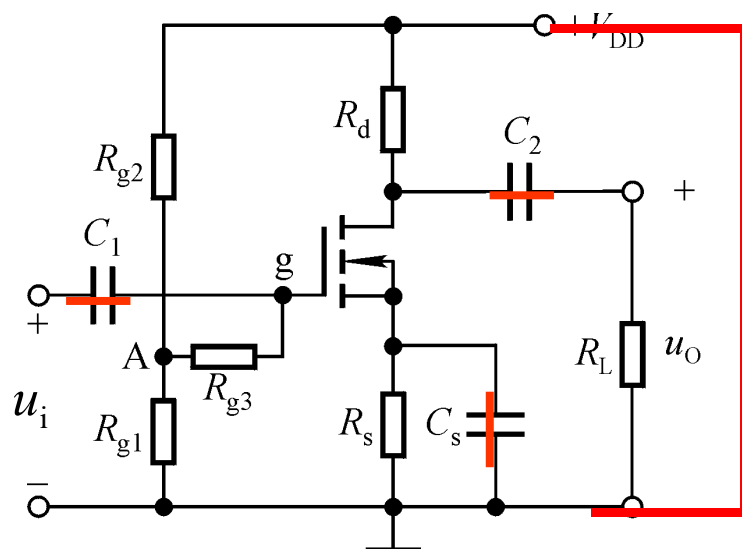
$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_d$$

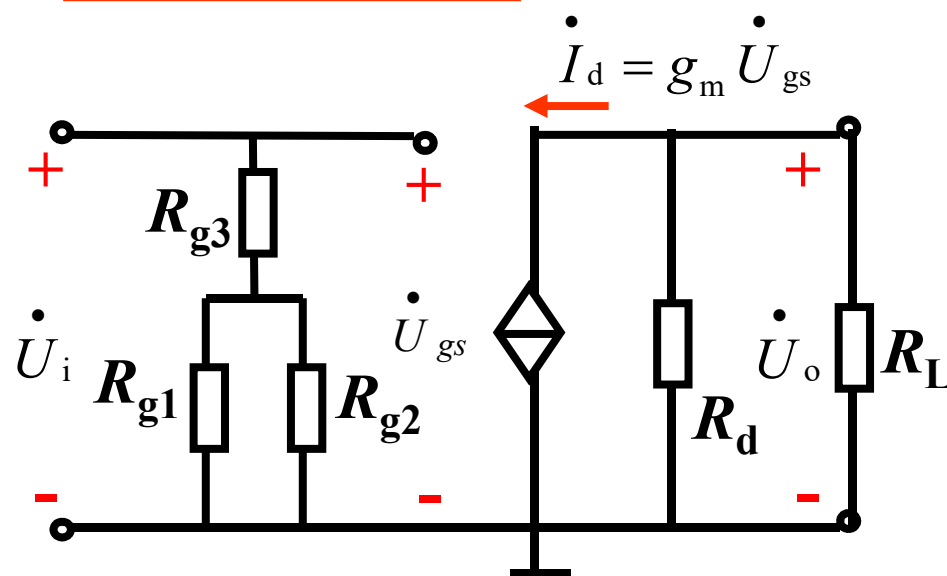
共源放大电路与共射放大电路类似，
但输入电阻大很多。

三、分压式偏置共源放大电路的动态分析

交流通路



交流等效电路



$$\dot{A}_u = -g_m (R_d // R_L) = -g_m R'_L$$

加 R_{g3} 以增大输入电阻

$$R_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = R_d$$

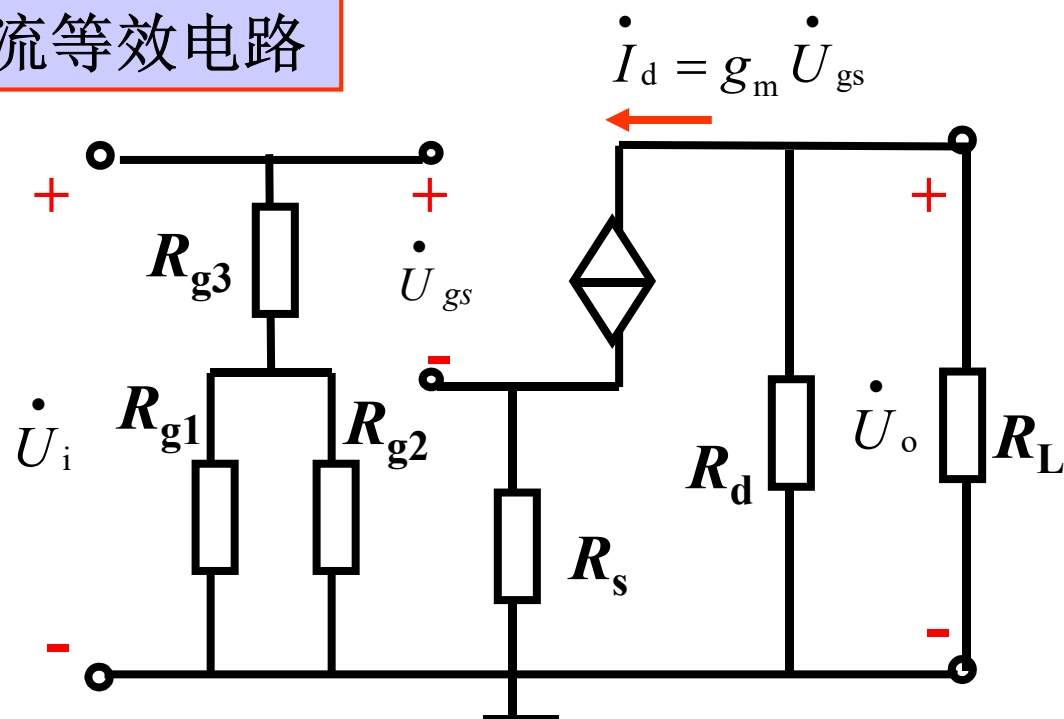
无Cs时

交流等效电路

$$\dot{A}_u = \frac{-g_m R'_L}{1 + g_m R_s}$$

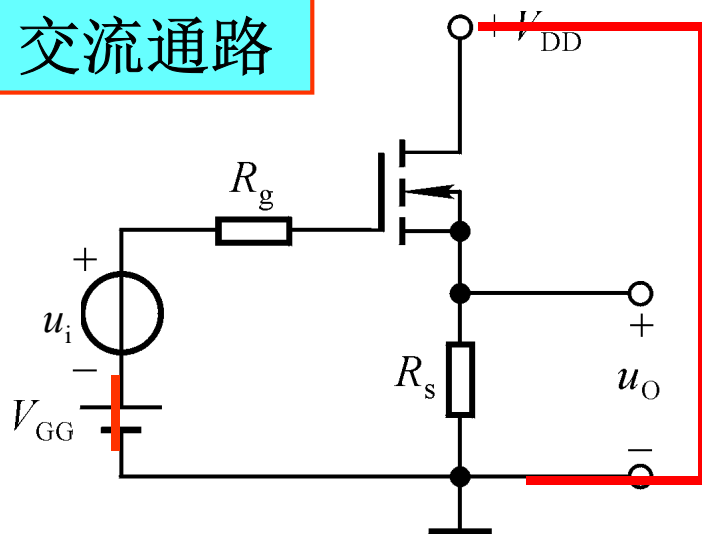
$$R_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2}$$

$$R_o = R_d$$

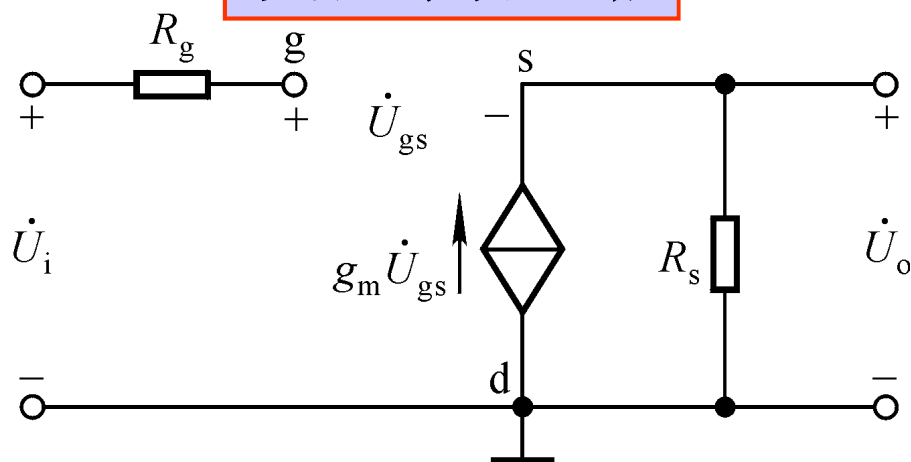


三、基本共漏放大电路的动态分析

交流通路



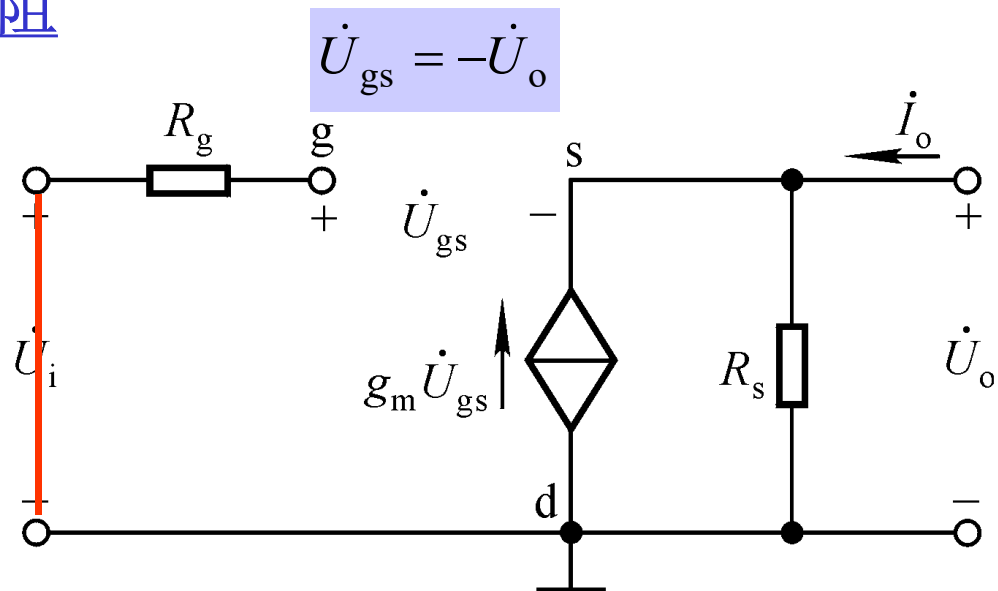
交流等效电路



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} R_s}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} R_s} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$
$$R_i = \infty$$

共漏放大电路与共集放大电路类似，
但输入电阻大很多。

输出电阻



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

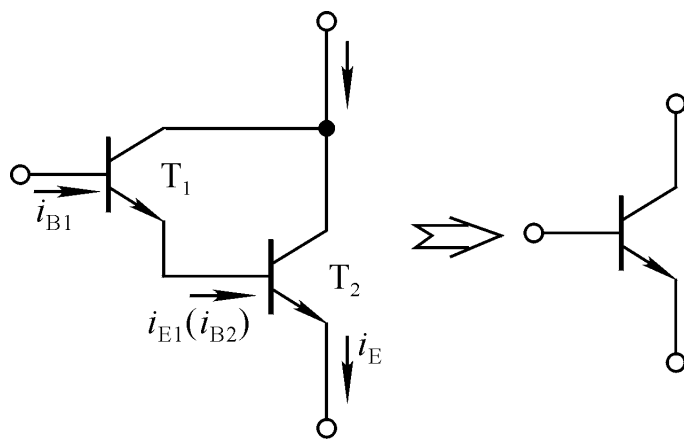
$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{\dot{U}_o}{R_s} - g_m \dot{U}_{gs}} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{\dot{U}_o}{R_s} + g_m \dot{U}_o} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

2.7 基本放大电路的派生电路

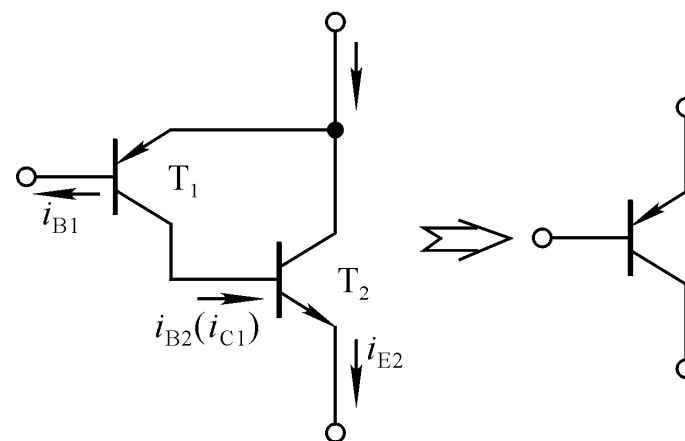
2.7.1 复合管放大电路

一、复合管

晶体管组成的复合管



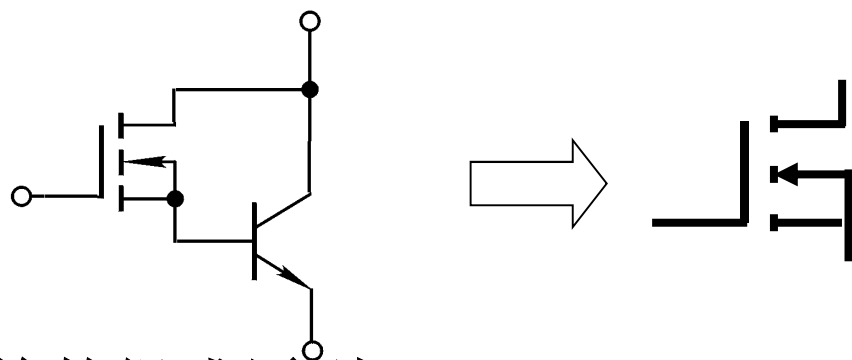
$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$



不同类型的管子复合后，
其类型决定于 T_1 管。

目的：增大 β ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。

场效应管与晶体管组成的复合管

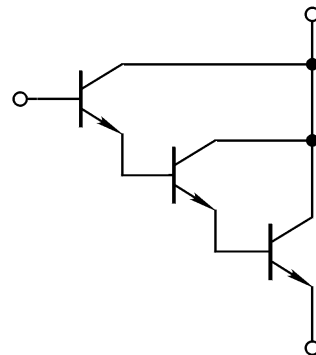
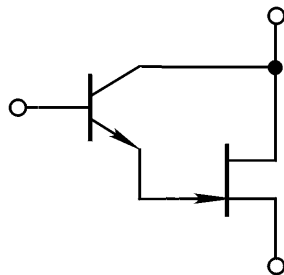
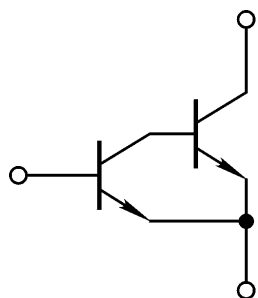


两只管子的位置
不能互换

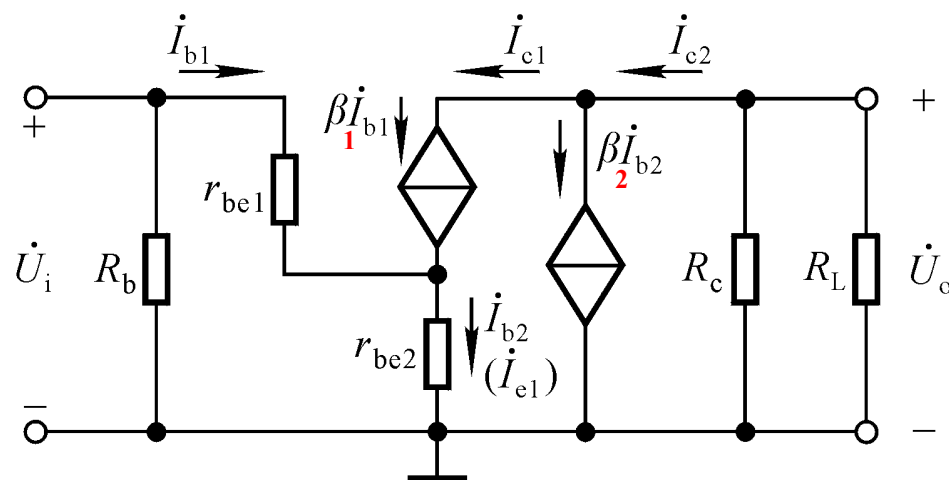
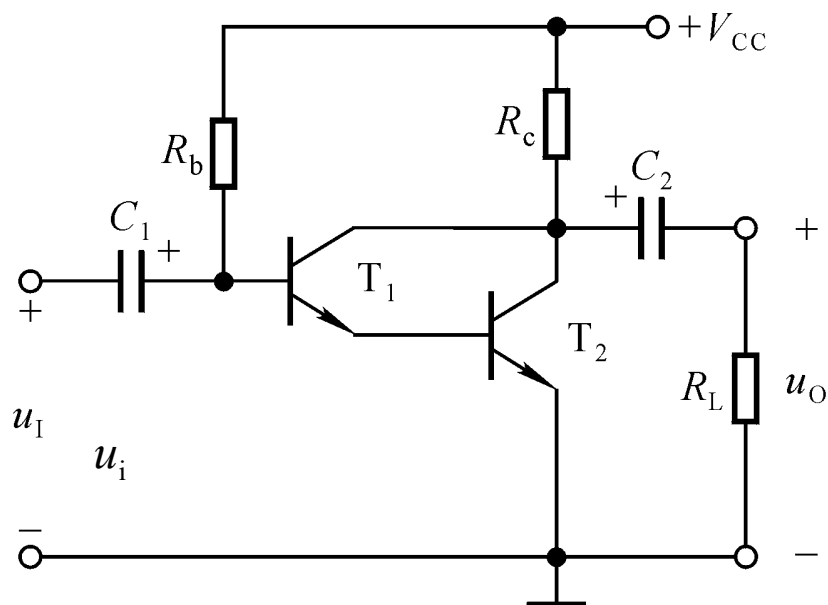
复合管的组成原则：

为了实现电流放大，第一只管子的**c(d)**或**e(s)**接第二只管子的**b**极；在正确的外加电压下，每只管子的各极电流均有合适的通路，且均工作在放大区或恒流区。

判断下列各图是否能组成复合管



二、阻容耦合复合管共射放大电路



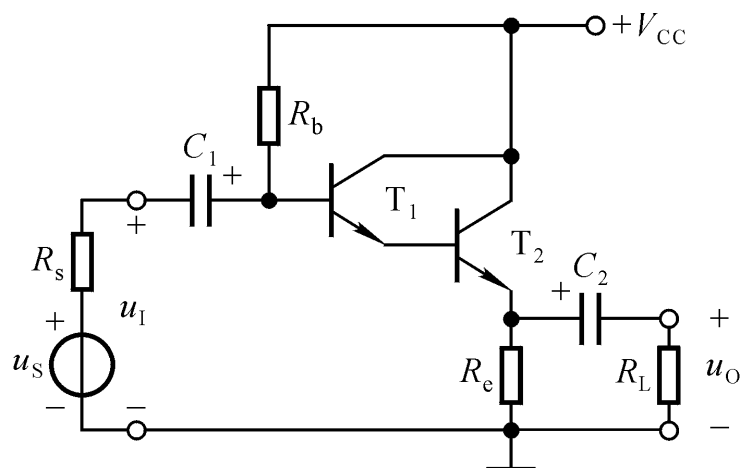
(b)

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

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

复合管共射放大电路增强了电压放大能力，输入电阻也明显增大。

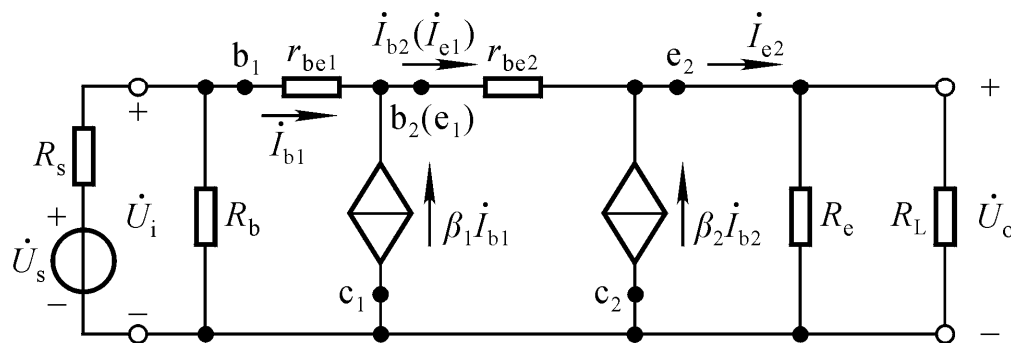
三、阻容耦合复合管共集放大电路



(a)

$$R_o = R_e // \frac{r_{be2} + \frac{r_{be1} + R_b // R_s}{1 + \beta_1}}{1 + \beta_2}$$

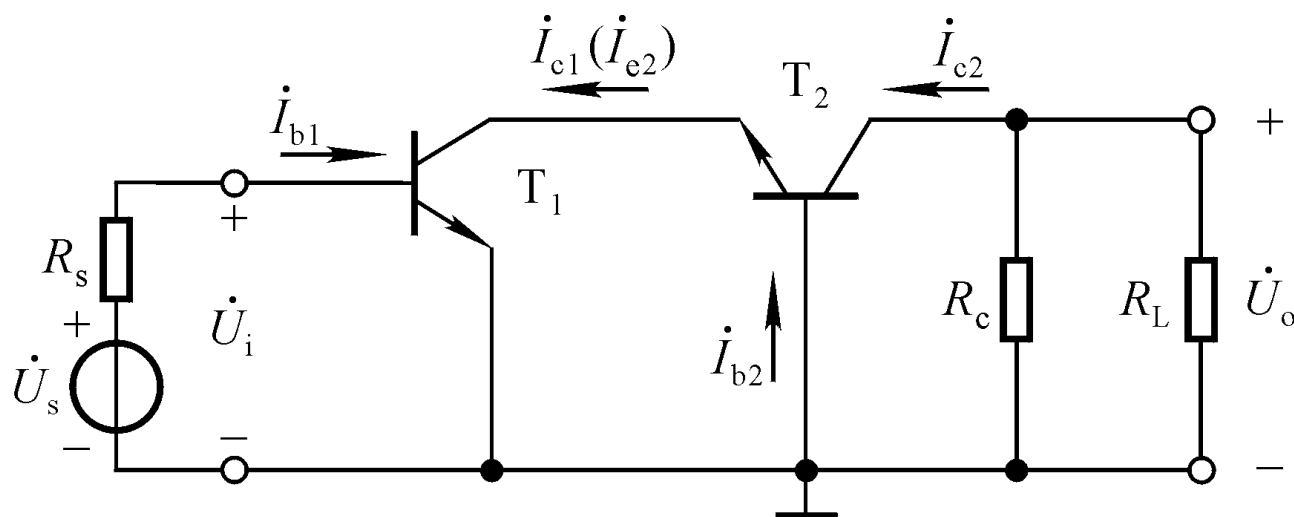
$$R_i = R_b // \{r_{be1} + (1 + \beta_1)[r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_e // R_L)]\}$$



复合管共集放大电路使输入电阻更大，输出电阻更小。

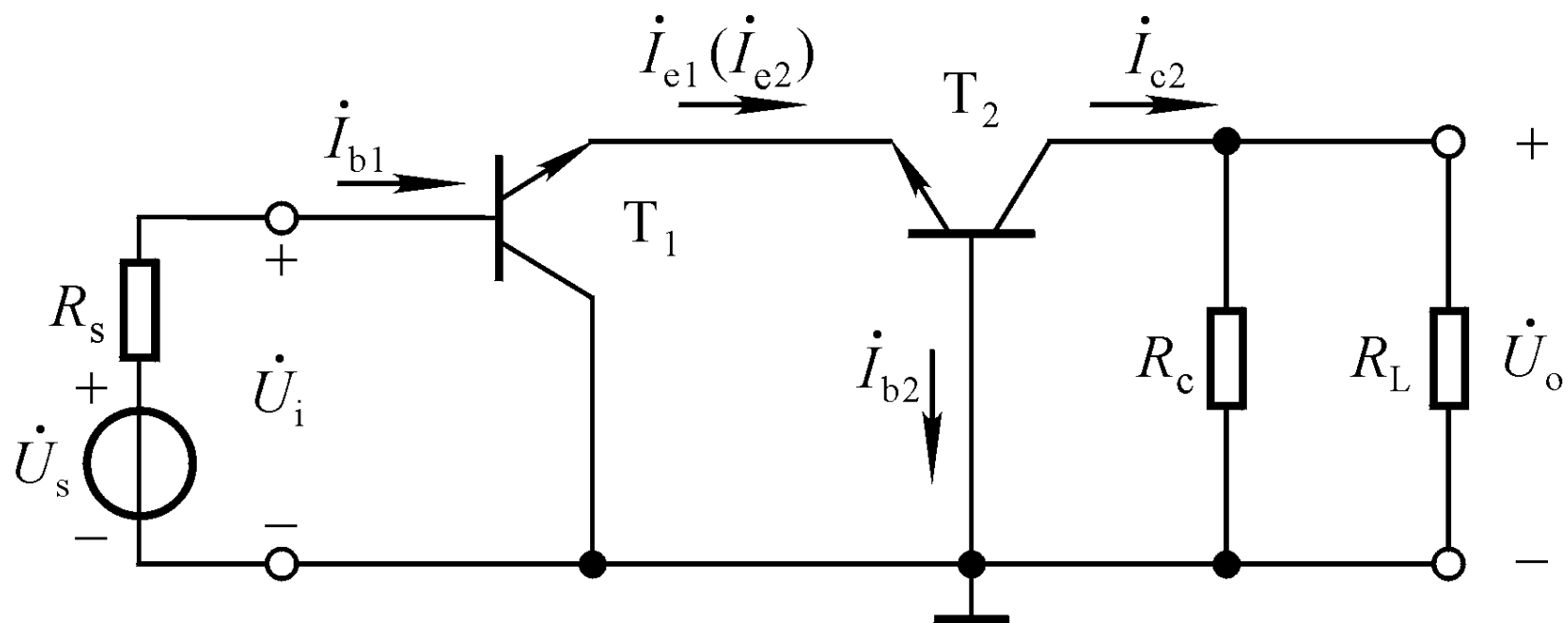
2.7.2 三种基本接法组合后的放大电路

- 为使单级放大电路具有多方面的优良性能，有时采用组合接法。



共射一共基放大电路的交流通路

既保持共射放大电路电压放大能力较强的优点，
又获得共基放大电路较好的高频特性。



共集一共基放大电路的交流通路

共集放大电路作为输入端，使输入电阻较大；共基放大电路作为输出端，具有一定的电压放大能力；有较宽的通频带。

第 2 章

结 束