

The background of the slide is a photograph of the main building of Tsinghua University. It is a large, classical-style building with a prominent central dome and a portico supported by columns. The building is surrounded by green lawns and trees. A flagpole with the Chinese flag is visible on the right side of the image.

第二章 基本放大电路

2001 11 11



第二章 基本放大电路

§ 2.1 放大的概念与放大电路的性能指标

§ 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 静态工作点的稳定

§ 2.5 晶体管放大电路的三种接法

§ 2.6 场效应管及其基本放大电路

§ 2.7 基本放大电路的派生电路





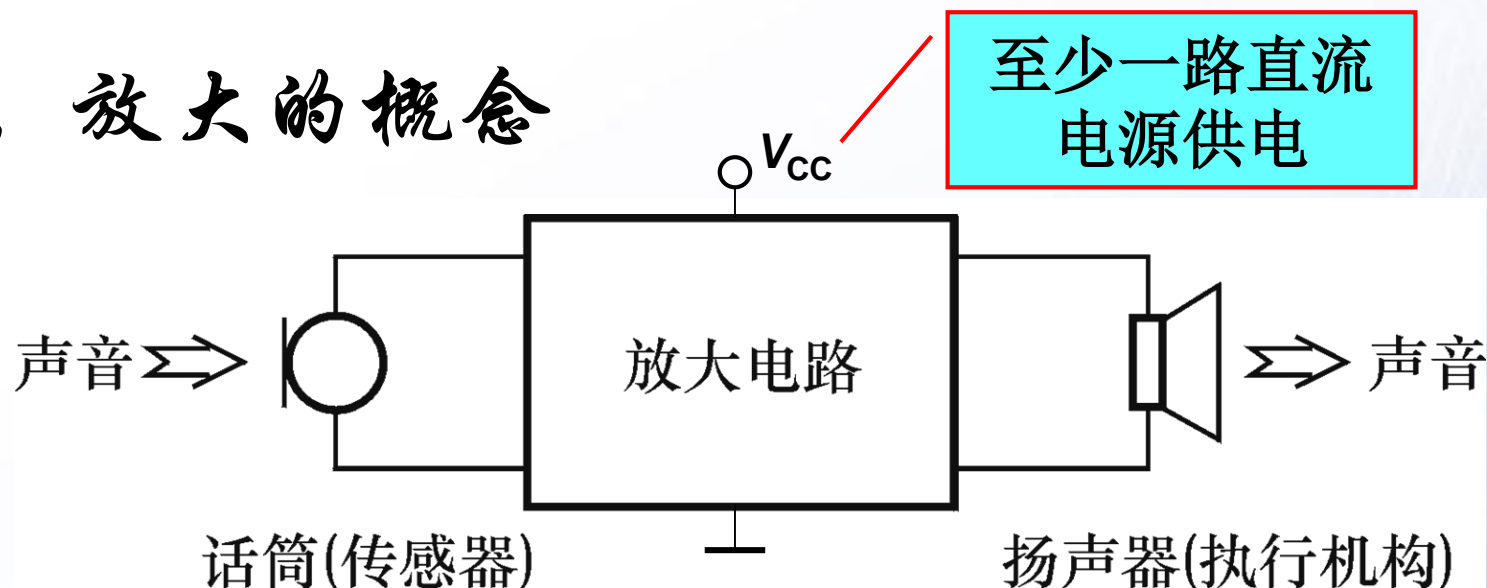
§ 2.1 放大的概念与放大电路 的性能指标

一、放大的概念

二、放大电路的性能指标



一、放大的概念



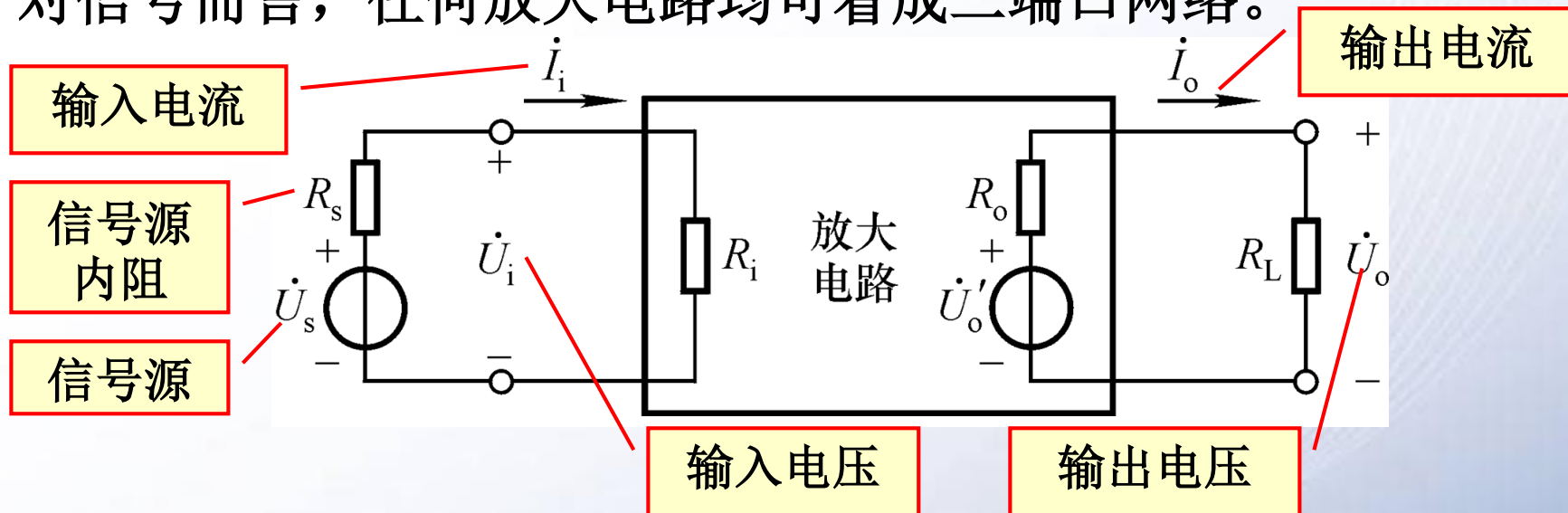
- ◆放大的对象：变化量
- ◆放大的本质：能量的控制
- ◆放大的特征：功率放大
- ◆放大的基本要求：不失真——放大的前提

判断电路能否放大的基本出发点



二、性能指标

对信号而言，任何放大电路均可看成二端口网络。



1. 放大倍数：输出量与输入量之比

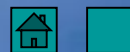
$$\dot{A}_{uu} = \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

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

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

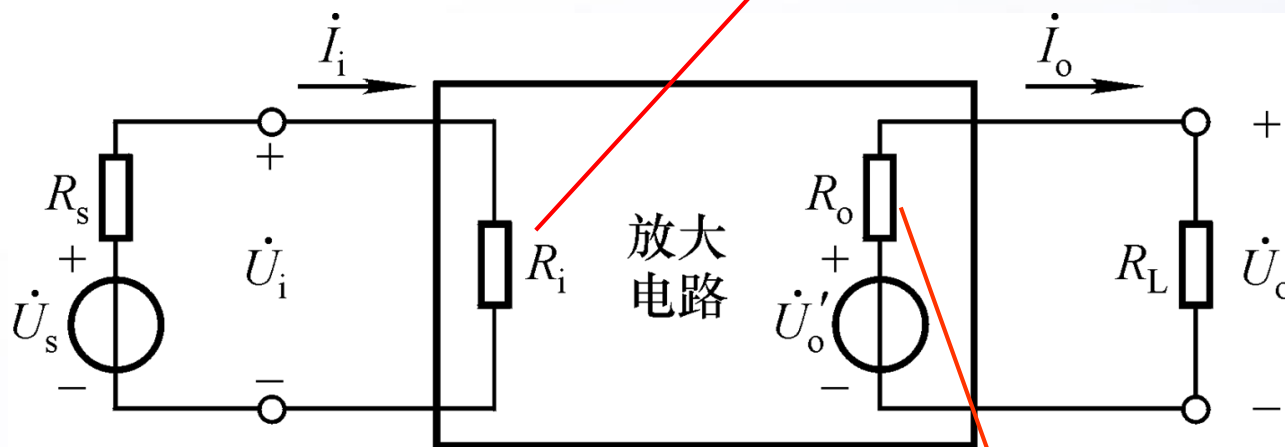
$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数





2. 输入电阻和输出电阻



从输入端看进去的
等效电阻

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

输入电压与
输入电流有
效值之比。

$$R_o = \frac{U'_o - U_o}{\frac{U_o}{R_L}} = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) R_L$$

空载时输出
电压有效值

带 R_L 时的输出电
压有效值

将输出等效
成有内阻的电
压源，内阻就
是输出电阻。

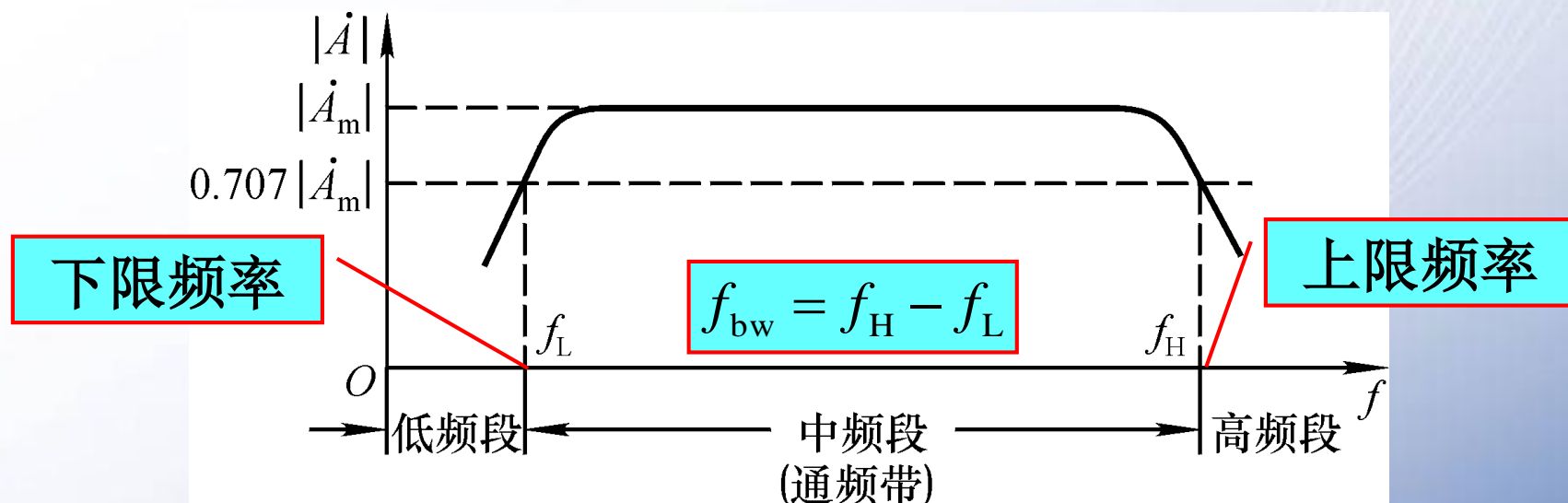




3. 通频带

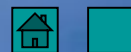
衡量放大电路对不同频率信号的适应能力。

由于电容、电感及放大管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。



4. 最大不失真输出电压 U_{om} ：交流有效值。

5. 最大输出功率 P_{om} 和效率 η ：功率放大电路的参数





§ 2.2 基本共射放大电路的工作原理

- 一、电路的组成及各元件的作用
- 二、设置静态工作点的必要性
- 三、波形分析
- 四、放大电路的组成原则

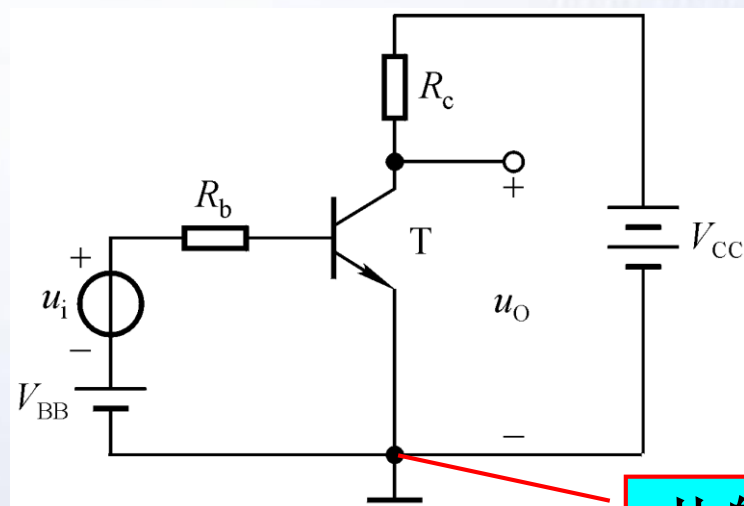


一、电路的组成及各元件的作用

V_{BB} 、 R_b ：使 $U_{BE} > U_{on}$ ，且有合适的 I_B 。

V_{CC} ：使 $U_{CE} \geq U_{BE}$ ，同时作为负载的能源。

R_c ：将 Δi_C 转换成 $\Delta u_{CE}(u_o)$ 。



共射

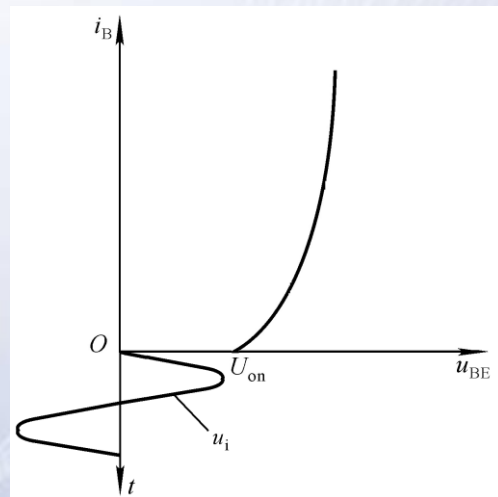
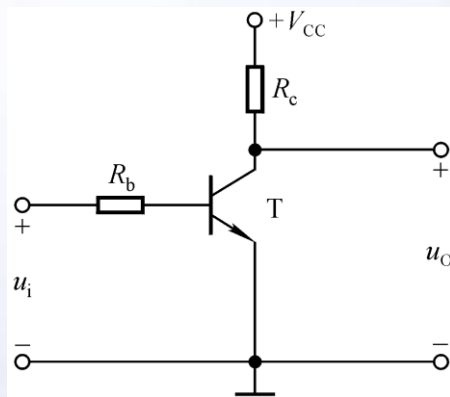
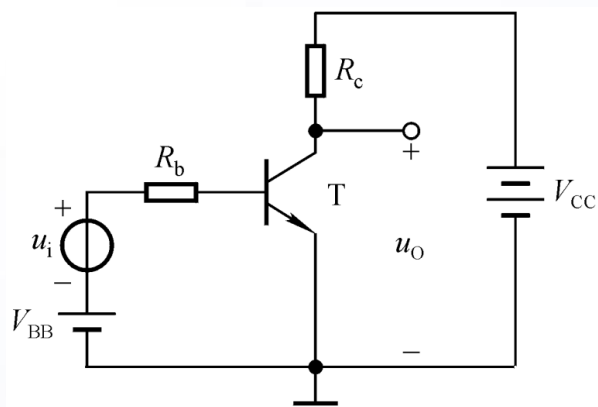
动态信号作用时： $\Delta u_I \rightarrow i_b \rightarrow i_c \rightarrow \Delta u_{R_c} \rightarrow \Delta u_{CE}(u_o)$

输入电压 u_i 为零时，晶体管各极的电流、b-e间的电压、管压降称为静态工作点 Q ，记作 I_{BQ} 、 I_{CQ} (I_{EQ})、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。



二、设置静态工作点的必要性

为什么放大的对象是动态信号，却要晶体管在信号为零时有合适的直流电流和极间电压？



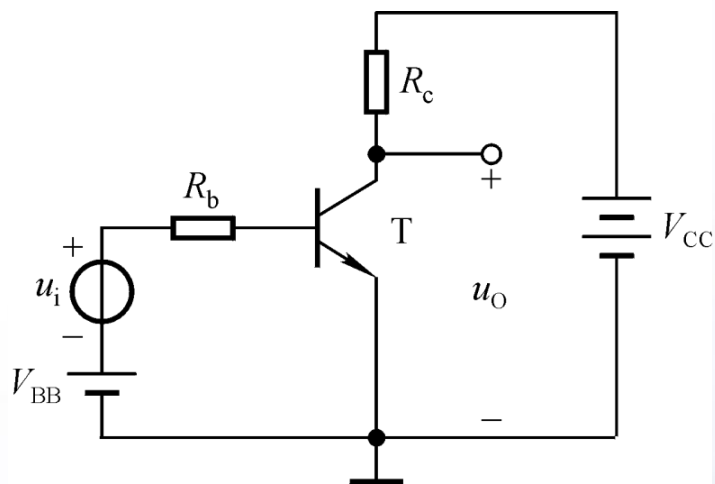
输出电压必然失真！

设置合适的静态工作点，首先要解决失真问题，但 Q 点几乎影响着所有的动态参数！



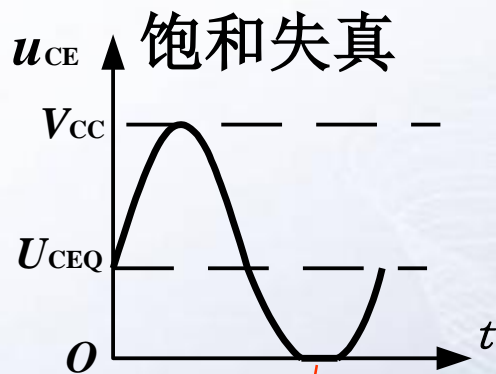
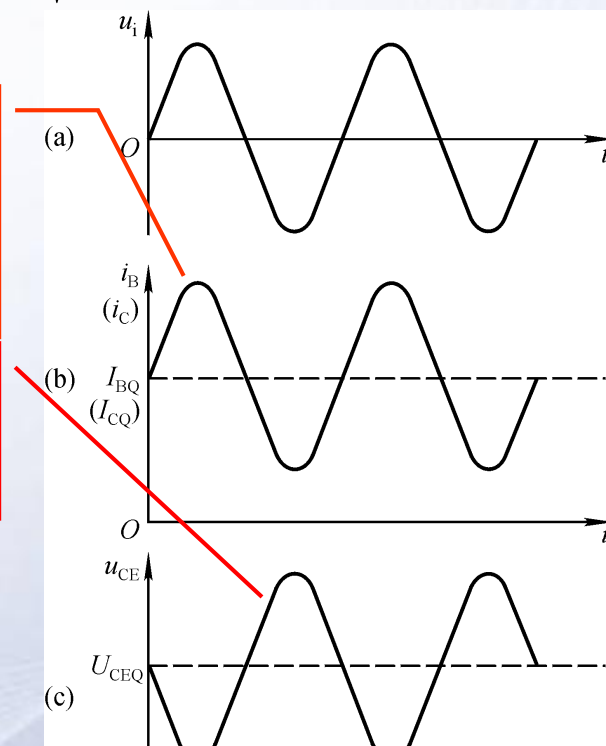


三、基本共射放大电路的波形分析



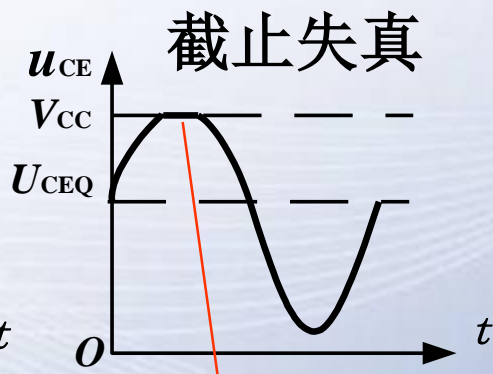
动态信号
驮载在静
态之上

与 i_c 变化
方向相反



饱和失真

底部失真



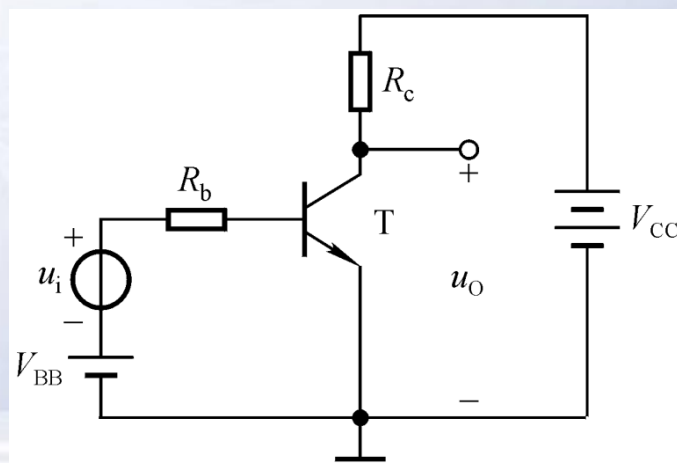
截止失真

顶部失真

要想不失真，就要
在信号的整个周期内
保证晶体管始终工作
在放大区！

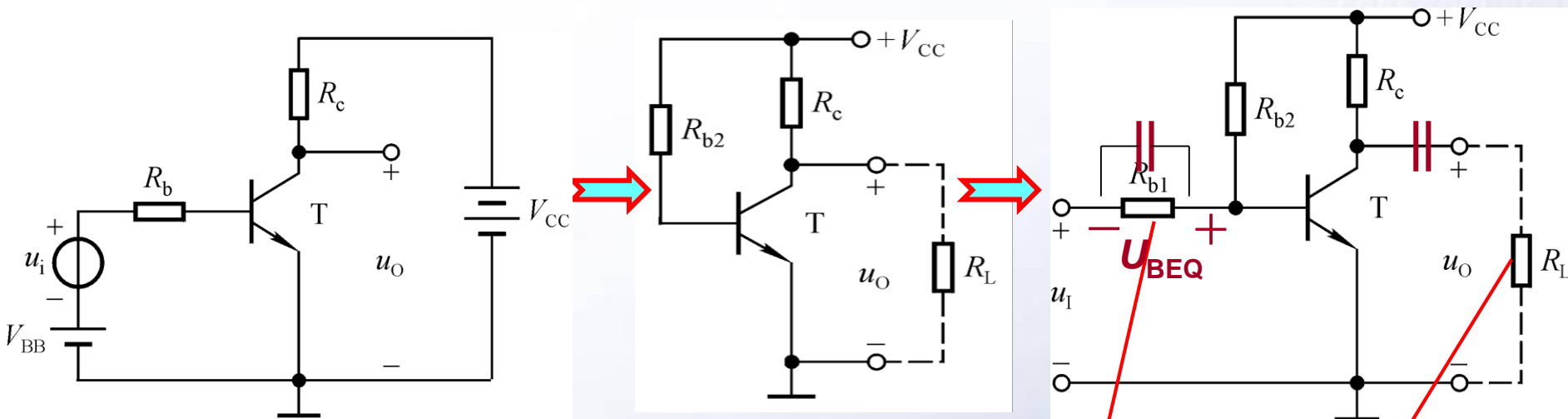
四、放大电路的组成原则

- 静态工作点合适：合适的直流电源、合适的电路参数。
- 动态信号能够作用于晶体管的输入回路，在负载上能够获得放大的动态信号。
- 对实用放大电路的要求：共地、直流电源种类尽可能少、负载上无直流分量。





两种实用放大电路：（1）直接耦合放大电路



问题：

1. 两种电源

2. 信号源与放大电路不“共地”

将两个电源
合二为一

有交流损失

有直流分量

共地，且要使信号
驮载在静态之上

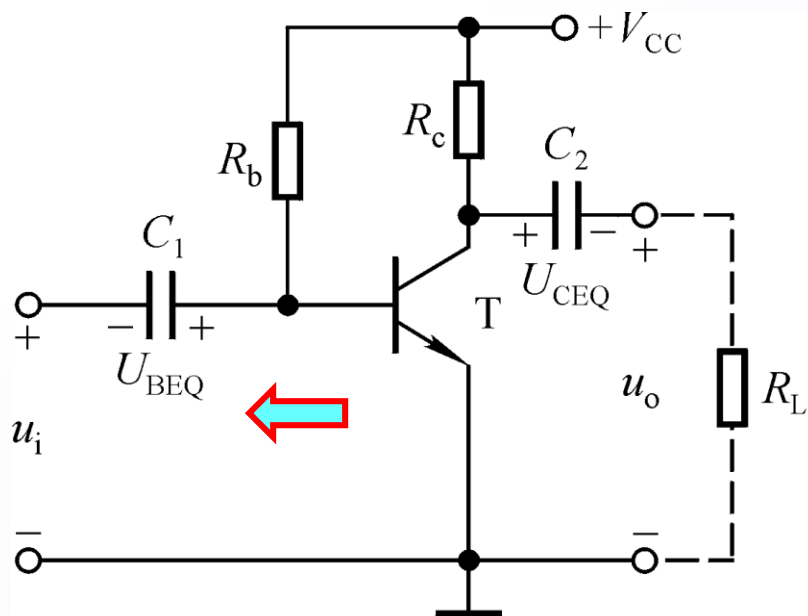
静态时， $U_{BEQ} = U_{R_{b1}}$

动态时， V_{CC} 和 u_I 同时作用于晶体管的输入回路。





两种实用放大电路：（2）阻容耦合放大电路



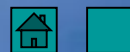
C_1 、 C_2 为耦合电容！

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“隔离直流、通过交流”。

静态时， C_1 、 C_2 上电压？

$$U_{C1} = U_{BEQ}, \quad U_{C2} = U_{CEQ}$$

动态时， $u_{BE} = u_i + U_{BEQ}$ ，信号驮载在静态之上。
负载上只有交流信号。





§ 2.3 放大电路的分析方法

- 一、放大电路的直流通路和交流通路
- 二、图解法
- 三、等效电路法





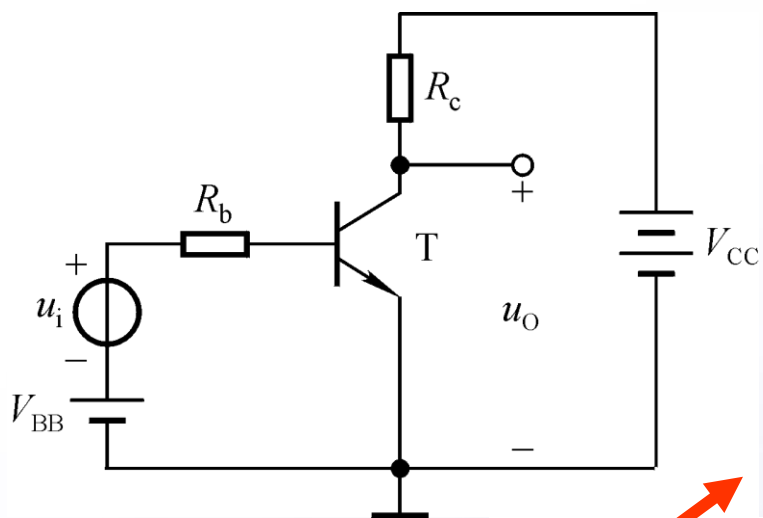
一、放大电路的直流通路和交流通路

通常，放大电路中直流电源的作用和交流信号的作用共存，这使得电路的分析复杂化。为简化分析，将它们分开作用，引入直流通路和交流通路的概念。

1. 直流通路：① $U_s=0$ ，保留 R_s ；② 电容开路；③ 电感相当于短路（线圈电阻近似为0）。
2. 交流通路：① 大容量电容相当于短路；② 直流电源相当于短路（内阻为0）。

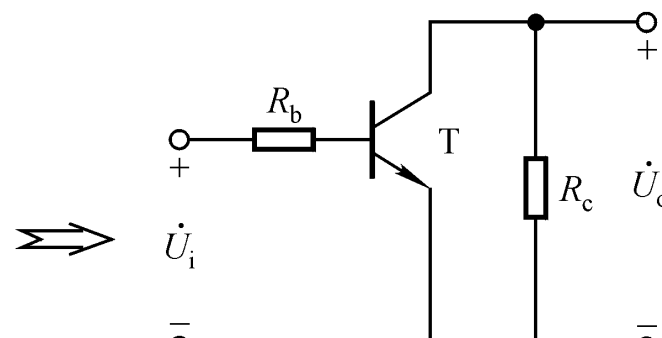
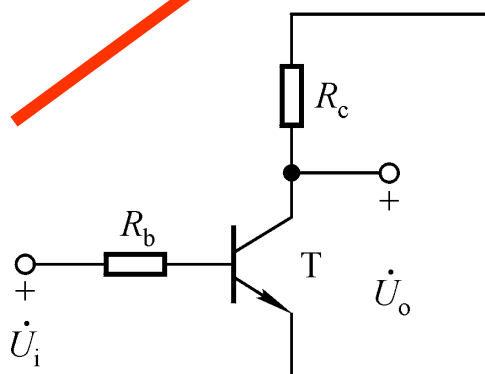
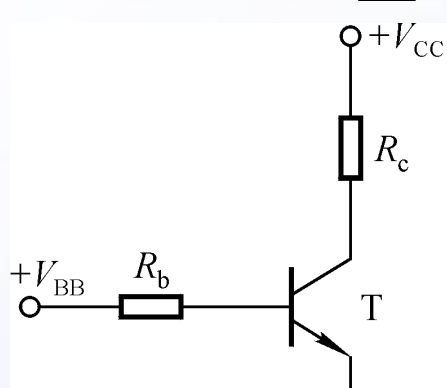


基本共射放大电路的直流通路和交流通路



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

V_{BB} 越大,
 U_{BEQ} 取不同的
值所引起的 I_{BQ}
的误差越小。

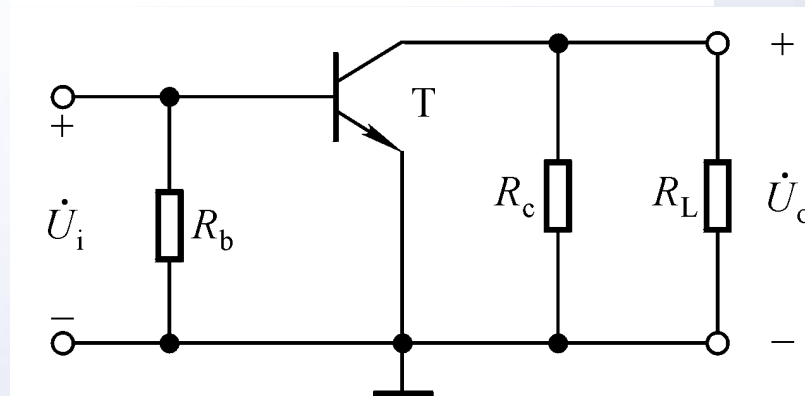
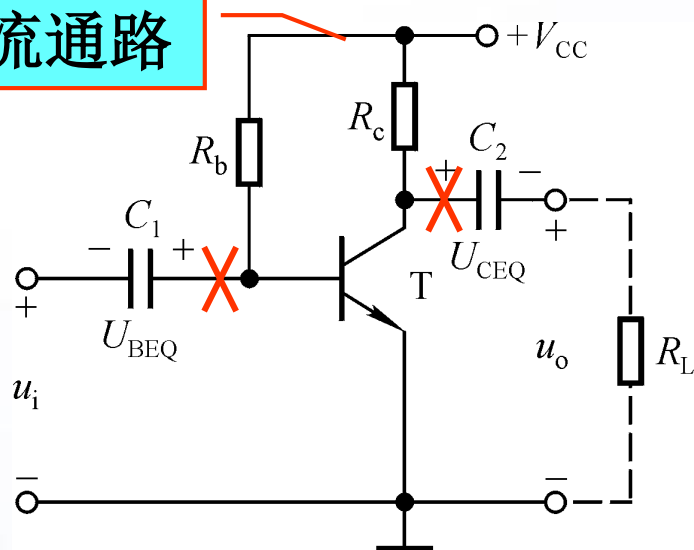


列晶体管输入、输出回路方程，将 U_{BEQ} 作为已知条件，
令 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ，可估算出静态工作点。



阻容耦合单管共射放大电路的直流通路和交流通路

直流通路



$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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

当 $V_{CC} \gg U_{BEQ}$ 时, $I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$

已知: $V_{CC} = 12V$,

$R_b = 600k\Omega$,

$R_c = 3k\Omega$,

$\beta = 100$.

$Q = ?$

β
 Q

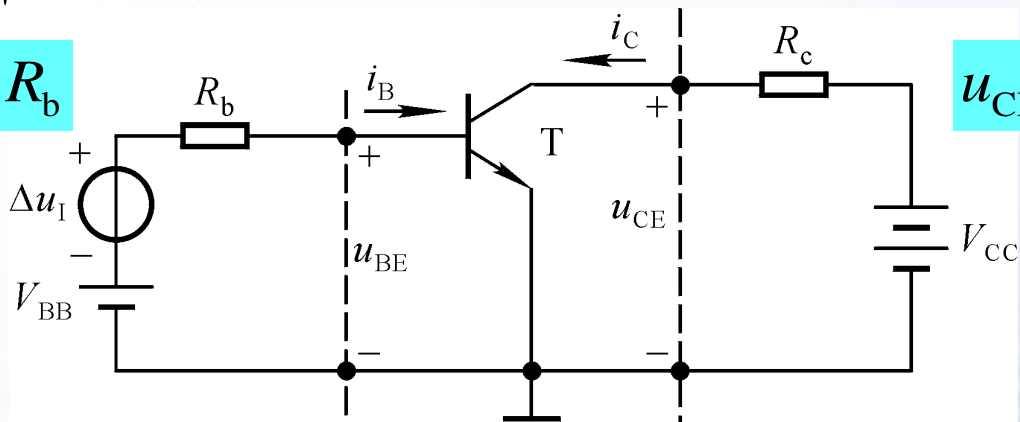




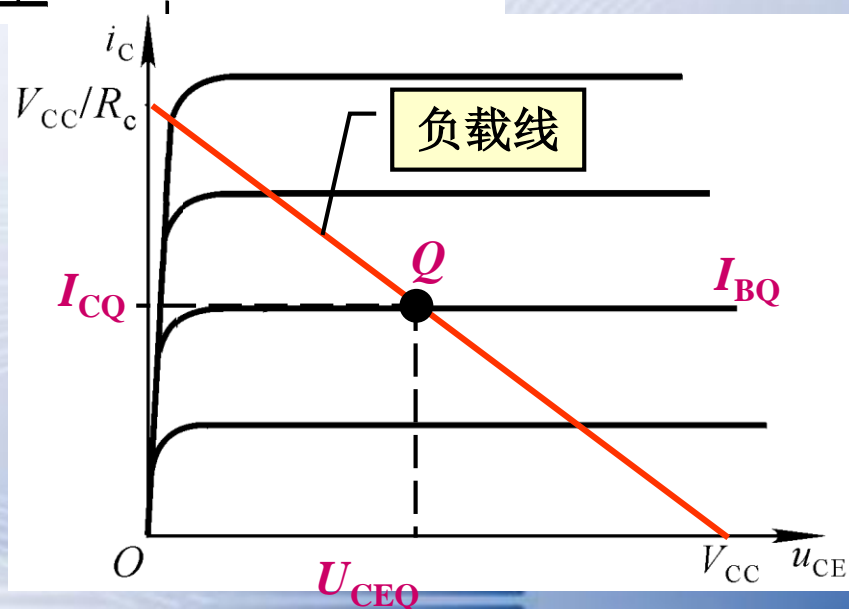
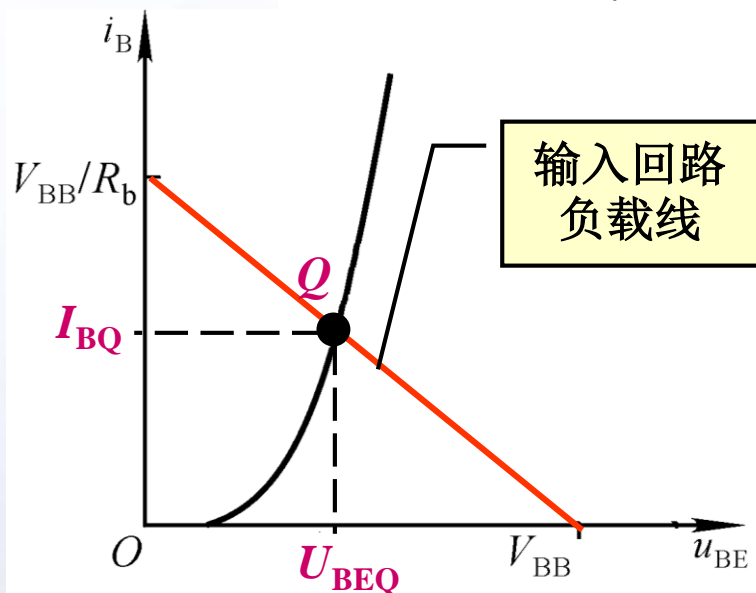
二、图解法 应实测特性曲线

1. 静态分析：图解二元方程

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



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

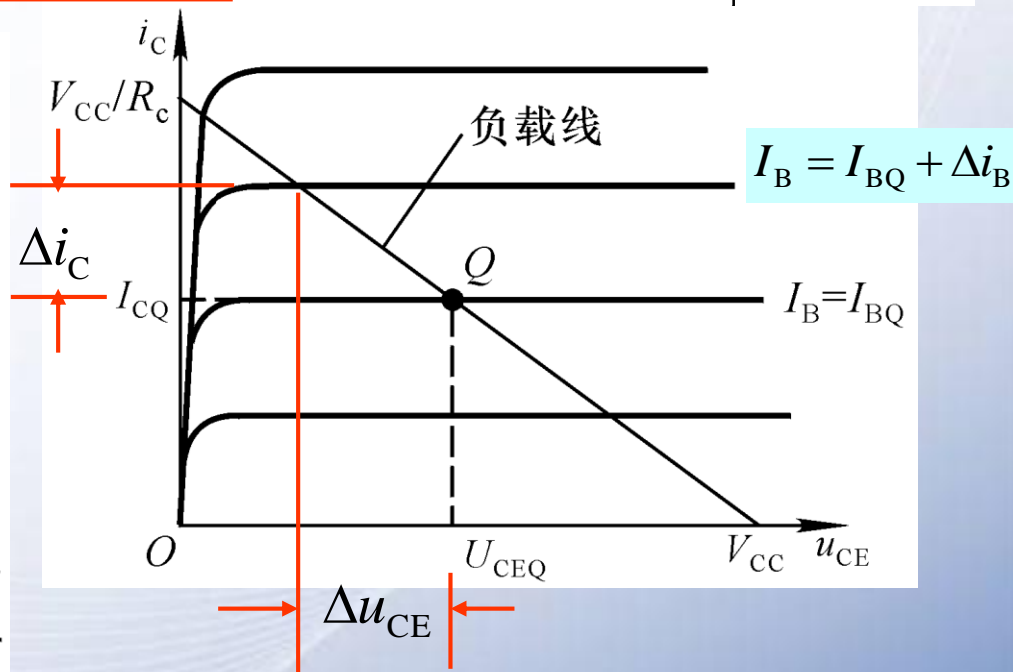
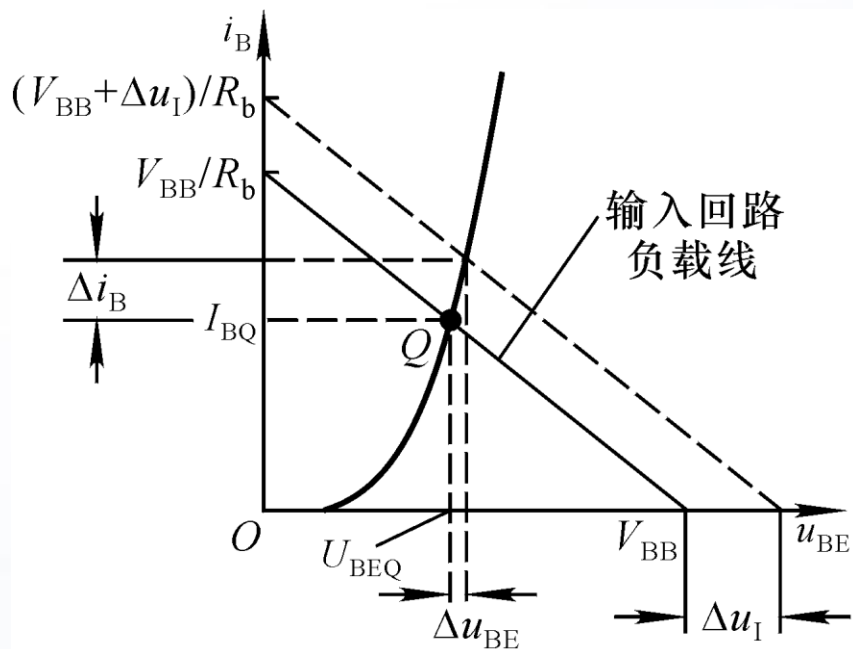




2. 电压放大倍数的分析

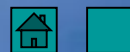
$$u_{BE} = V_{BB} + \Delta u_I - i_B R_b$$

斜率不变



给定 $\Delta u_I \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{CE} (\Delta u_O) \rightarrow A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I}$

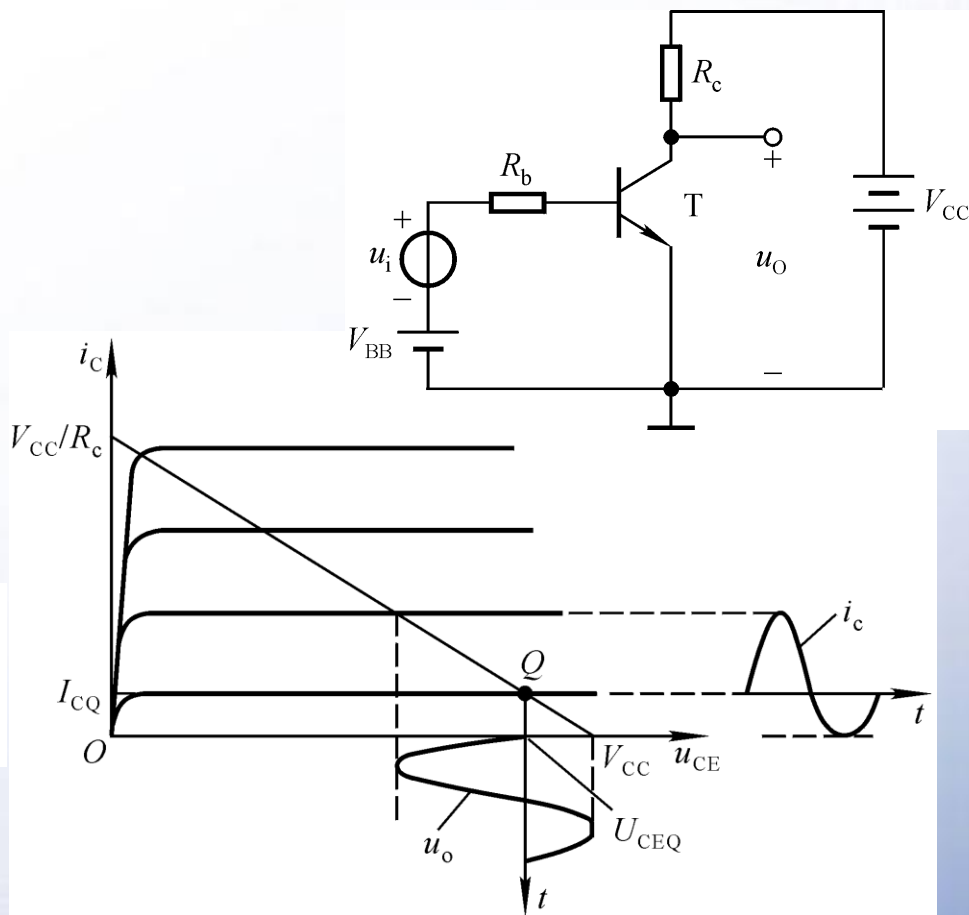
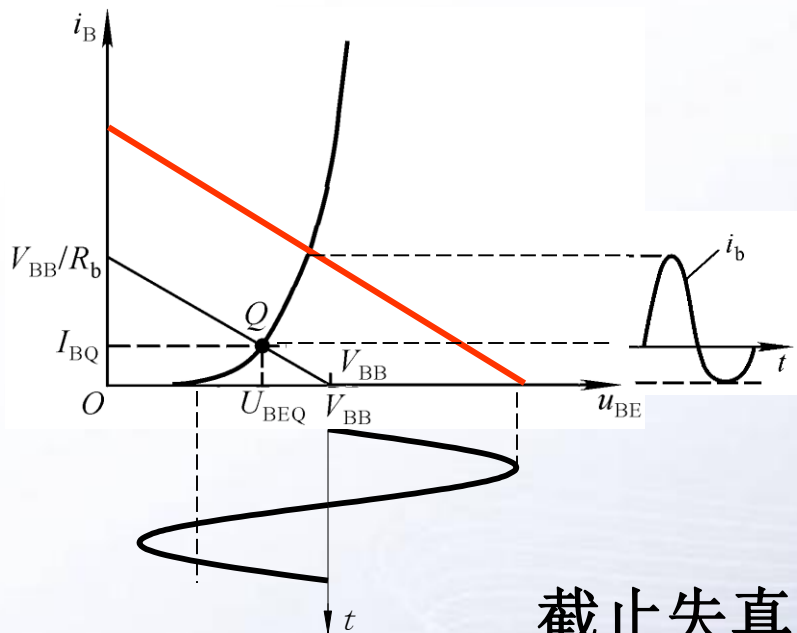
Δu_O 与 Δu_I 反相, A_u 符号为 “-”。





3. 失真分析

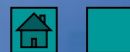
- 截止失真



截止失真是在输入回路首先产生失真！

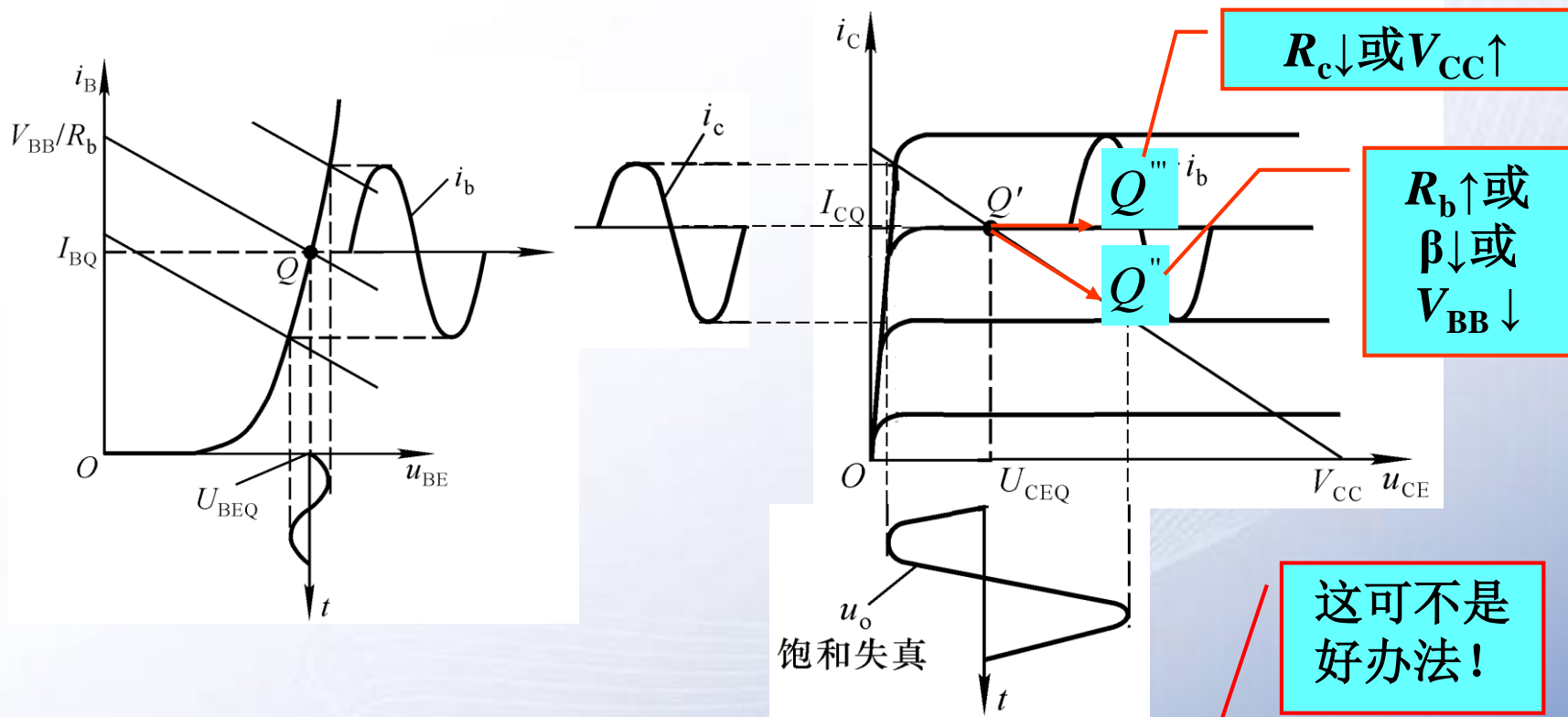
消除方法：增大 V_{BB} ，即向上平移输入回路负载线。

减小 R_b 能消除截止失真吗？

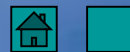




- 饱和失真：饱和失真是输出回路产生失真。

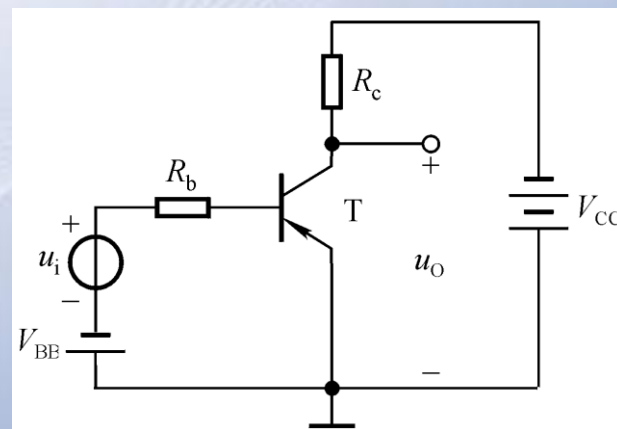
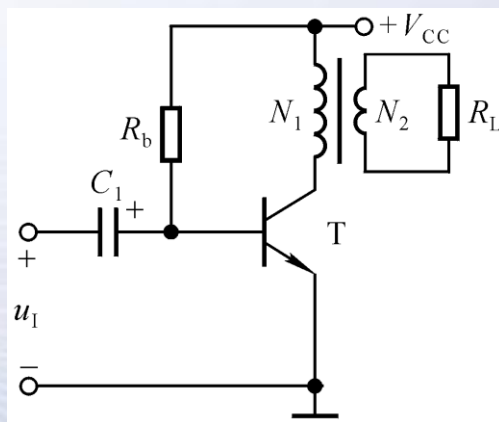
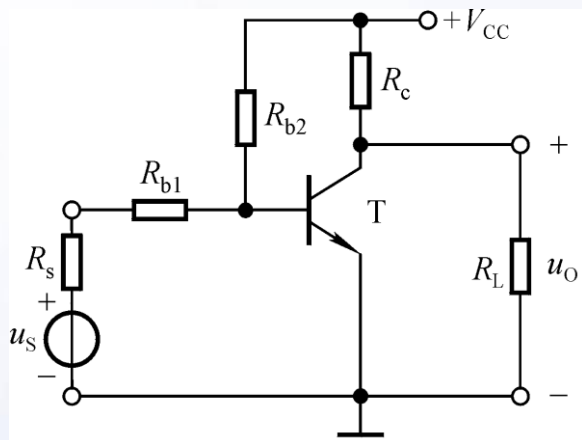


- 消除方法：增大 R_b ，减小 R_c ，减小 β ，减小 V_{BB} ，增大 V_{CC} 。
- 最大不失真输出电压 U_{om} ：比较 U_{CEQ} 与 $(V_{CC} - U_{CEQ})$ ，取其小者，除以 $\sqrt{2}$ 。



讨论一

1. 用**NPN**型晶体管组成一个在本节课中未见过的共射放大电路。
2. 用**PNP**型晶体管组成一个共射放大电路。
3. 画出图示电路的直流通路和交流通路。





三、等效电路法

- 半导体器件的非线性特性使放大电路的利用线性元件建立模型，来描述非线性

1. 直流模型：适于 Q 点的分析

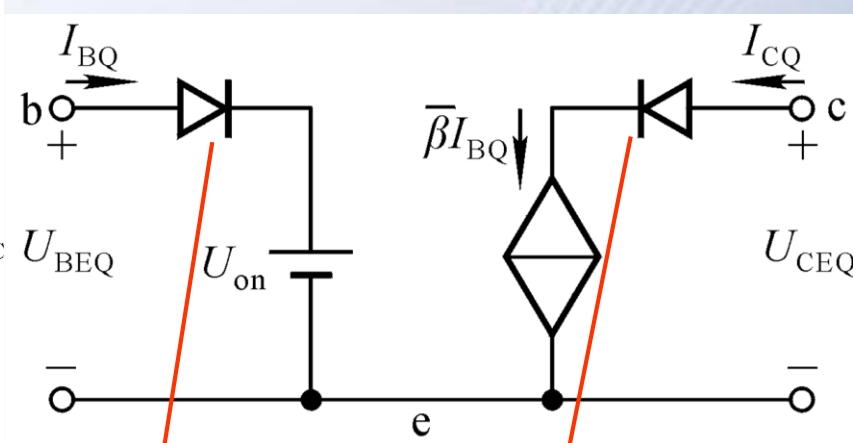
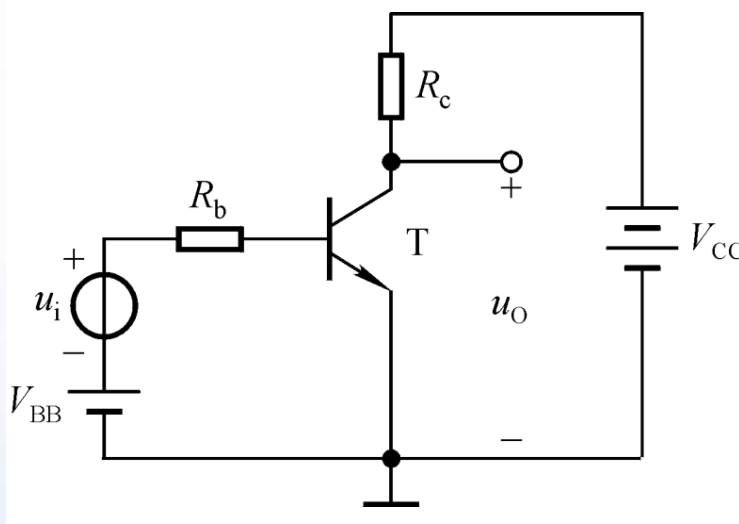
输出回路等效为电流控制的电流源

输入回路等效为恒压源

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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



理想二极管

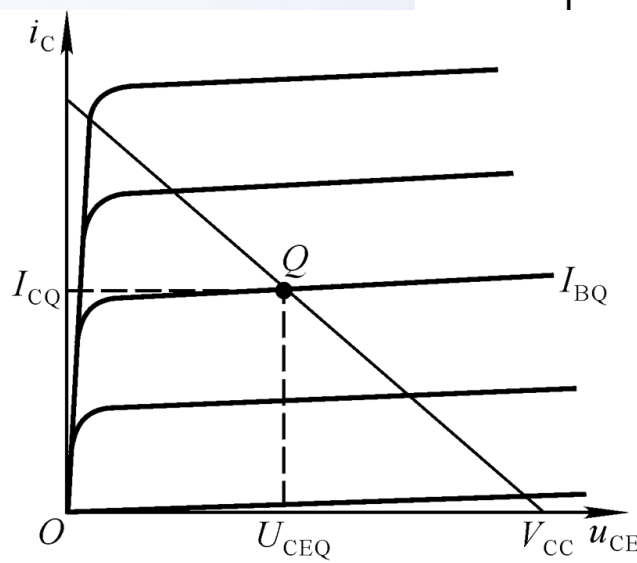
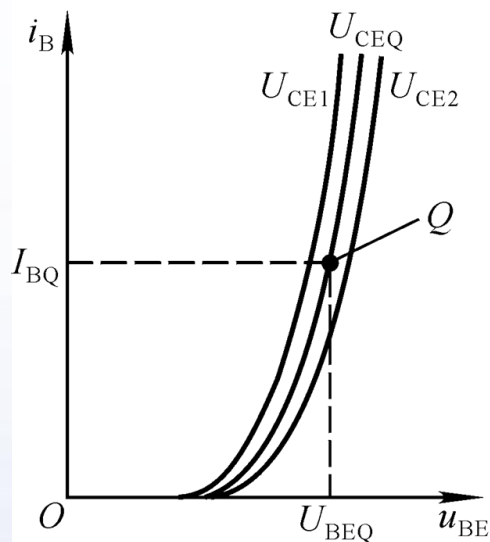
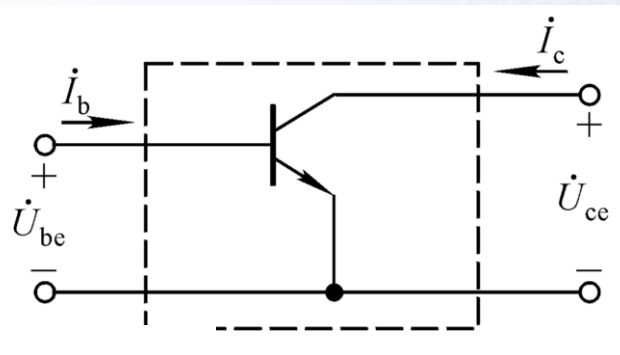
利用估算法求解静态工作点，实质上利用了直流模型。



2. 晶体管的 h 参数等效模型 (交流等效模型)

低频小信号模型

- 在交流通路中可将晶体管看成为一个二端口网络，输入回路、输出回路各为一个端口。



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



在低频、小信号作用下的关系式

$$\begin{cases} du_{BE} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \\ di_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{U_{CE}} di_B + \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \Big|_{I_B} du_{CE} \end{cases}$$

电阻

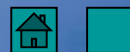
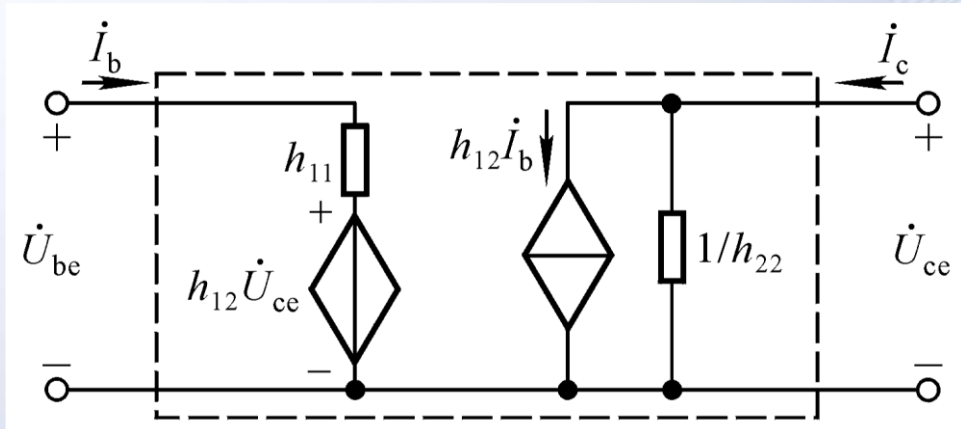
无量纲

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

无量纲

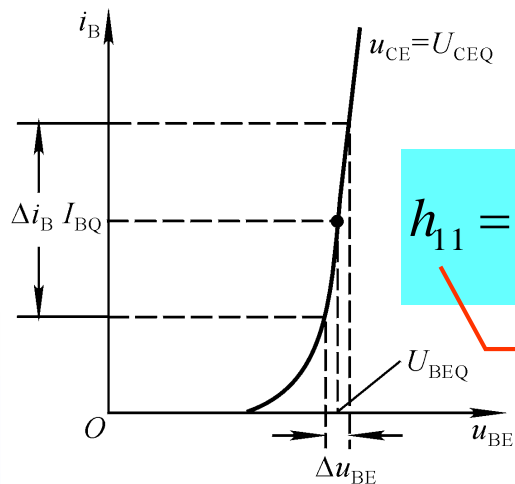
电导

交流等效模型（按式子画模型）



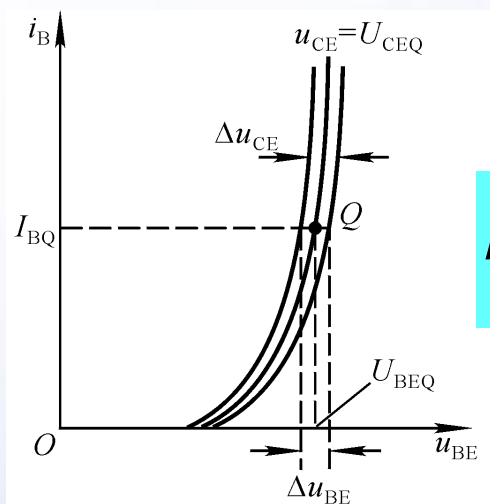


h 参数的物理意义



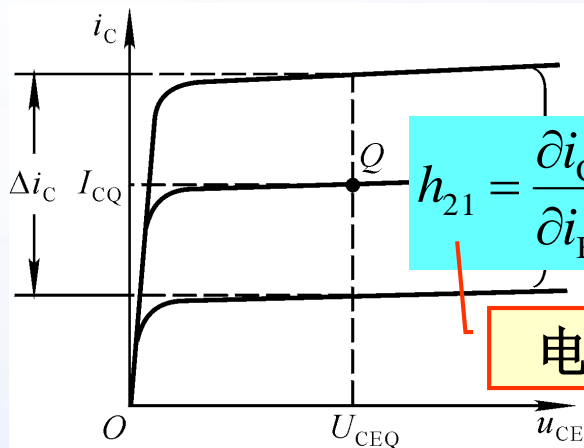
$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} = r_{be}$$

**b-e间的
动态电阻**



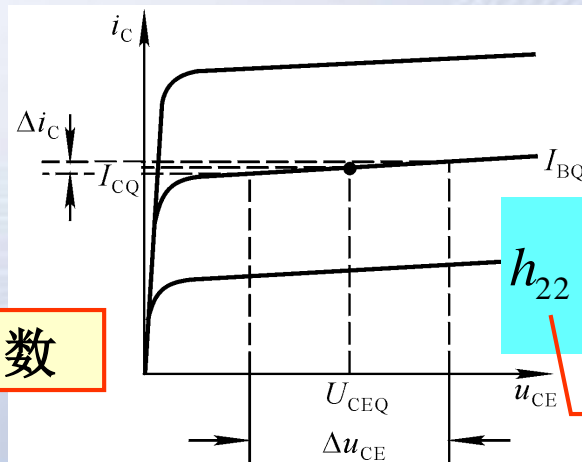
$$h_{12} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

**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



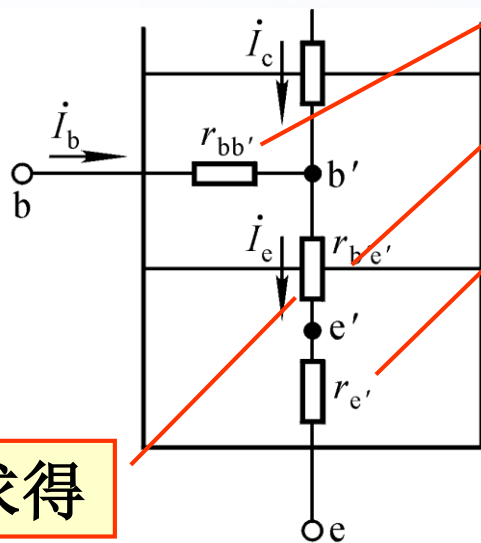
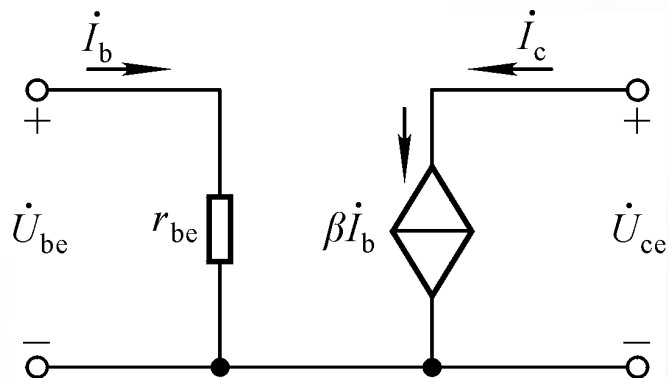
$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{i_B} = \frac{1}{r_{ce}}$$

c-e间的电导

分清主次，合理近似！什么情况下 h_{12} 和 h_{22} 的作用可忽略不计？



简化的 h 参数等效电路—交流等效模型



基区体电阻

发射结电阻

发射区体电阻
数值小可忽略

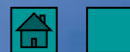
利用PN结的电流方程可求得

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

查阅手册

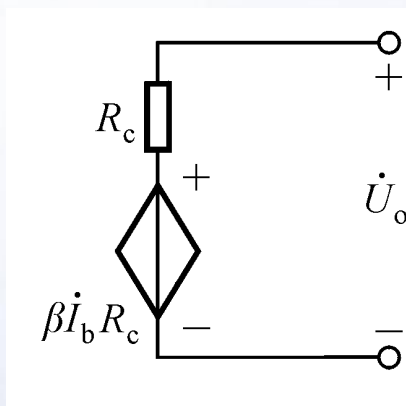
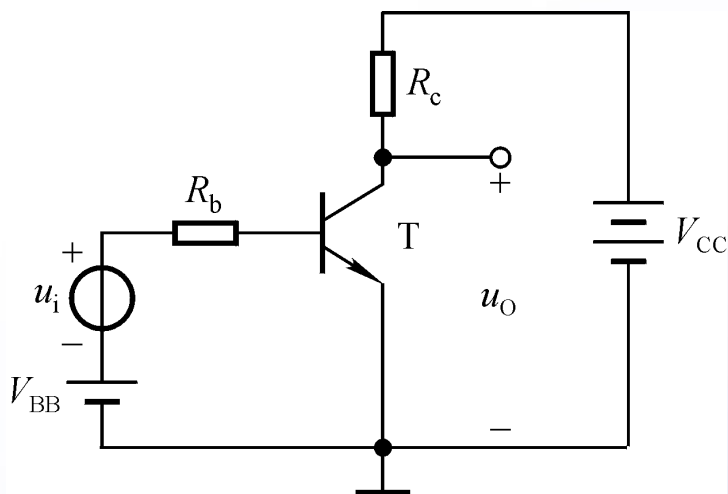
由 I_{EQ} 算出

在输入特性曲线上， Q 点越高， r_{be} 越小！



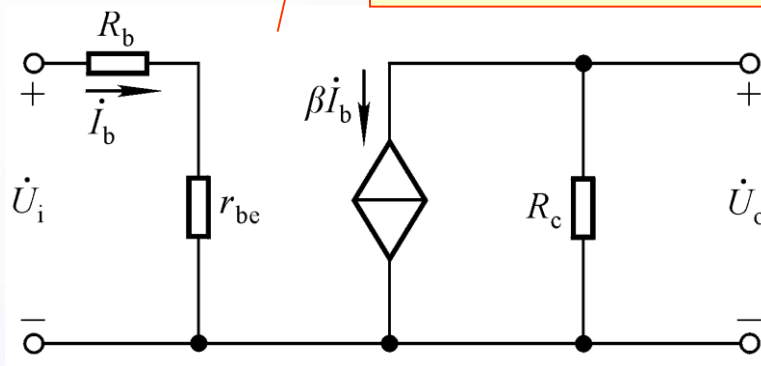


3. 放大电路的动态分析



$$R_o = R_c$$

放大电路的交流等效电路



$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (R_b + r_{be}) = \dot{I}_b (R_b + r_{be})$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R_c$$

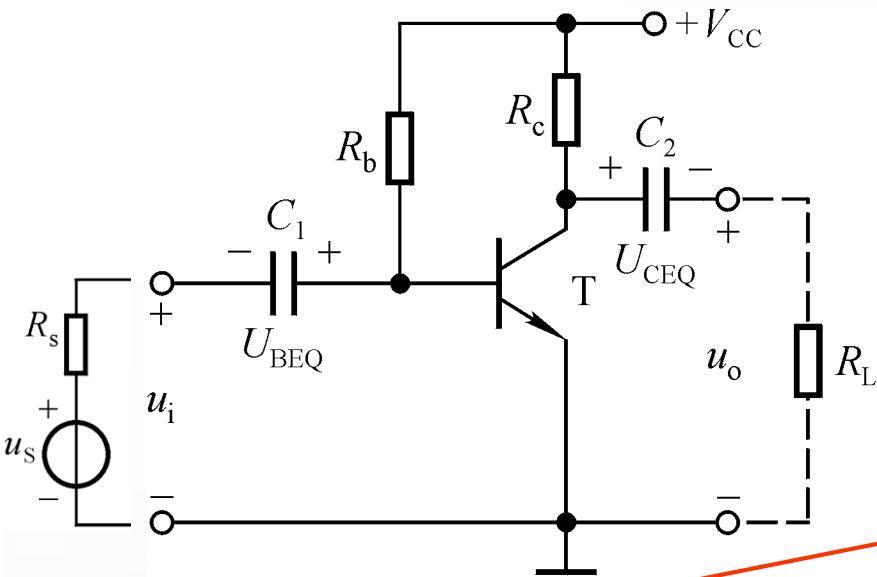
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b + r_{be}$$





阻容耦合共射放大电路的动态分析



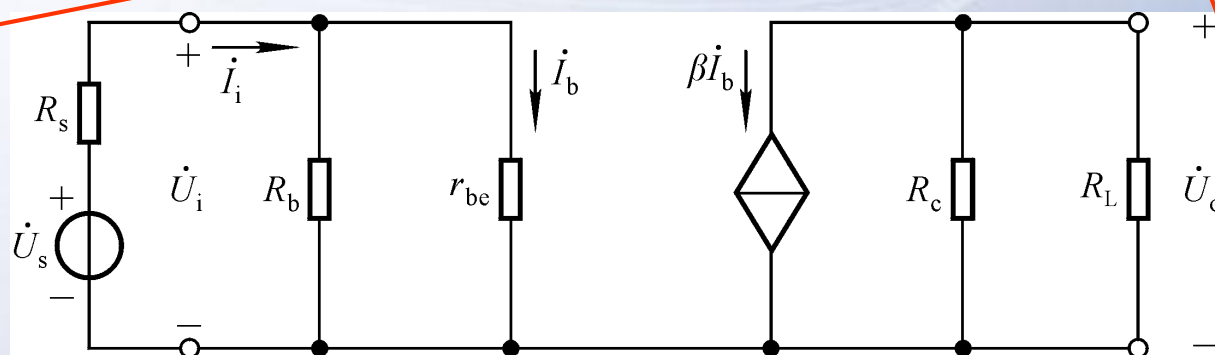
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

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

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

$$R_o = R_c$$

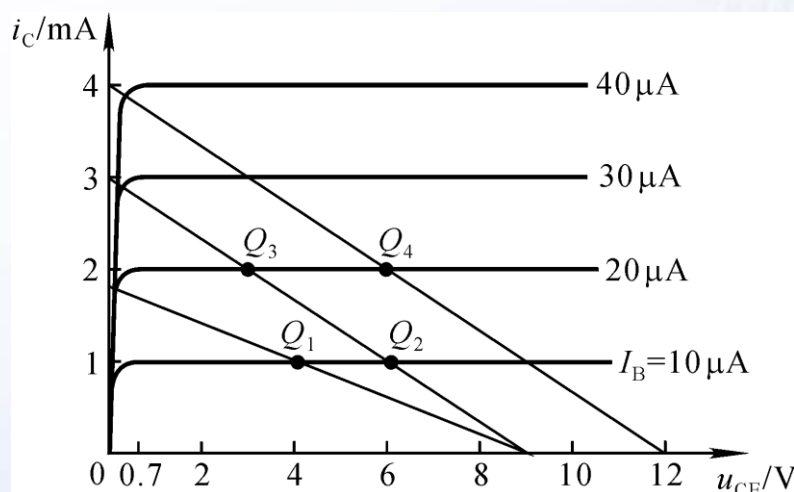
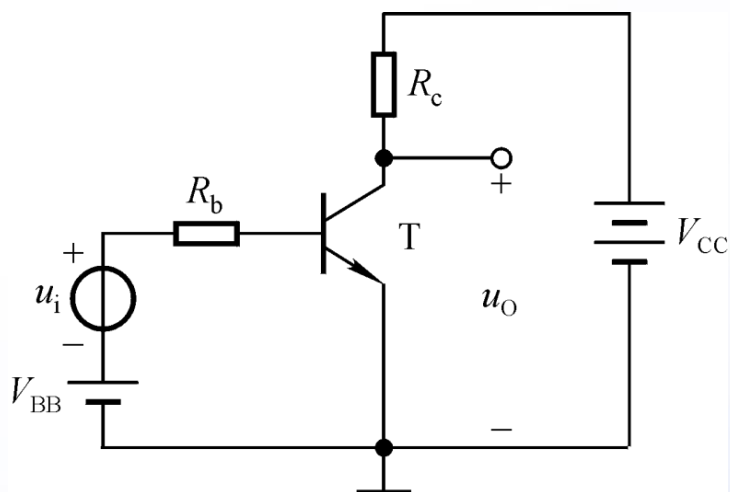
输入电阻中不应含有 R_s !



输出电阻中不应含有 R_L !



讨论一



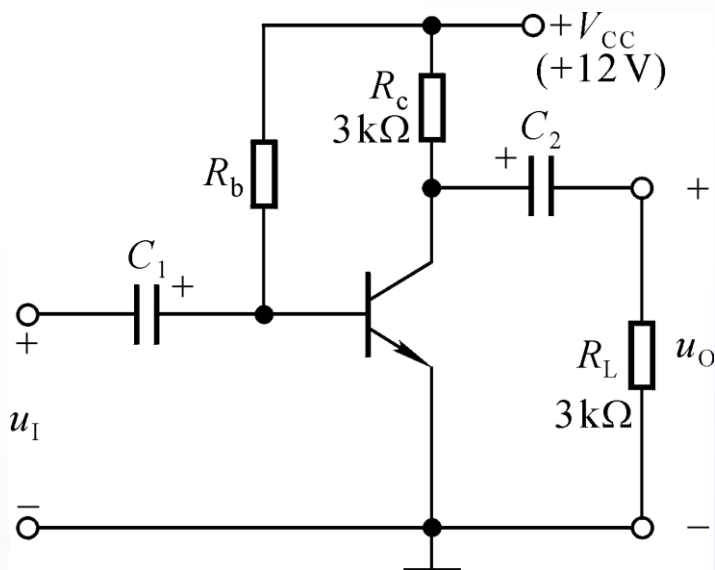
1. 在什么参数、如何变化时 $Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4$?
2. 从输出电压上看, 哪个 Q 点下最易产生截止失真? 哪个 Q 点下最易产生饱和失真? 哪个 Q 点下 U_{om} 最大?
3. 设计放大电路时, 应根据什么选择 V_{CC} ?



讨论二

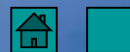
$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

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



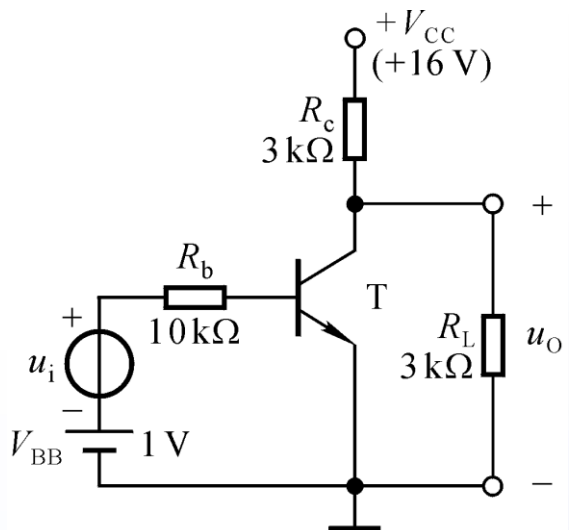
已知 $I_{CQ} = 2\text{mA}$, $U_{CES} = 0.7\text{V}$ 。

1. 在空载情况下，当输入信号增大时，电路首先出现饱和失真还是截止失真？若带负载的情况下呢？
2. 空载和带载两种情况下 U_{om} 分别为多少？
3. 在图示电路中，有无可能在空载时输出电压失真，而带上负载后这种失真消除？
4. 增强电压放大能力的方法？



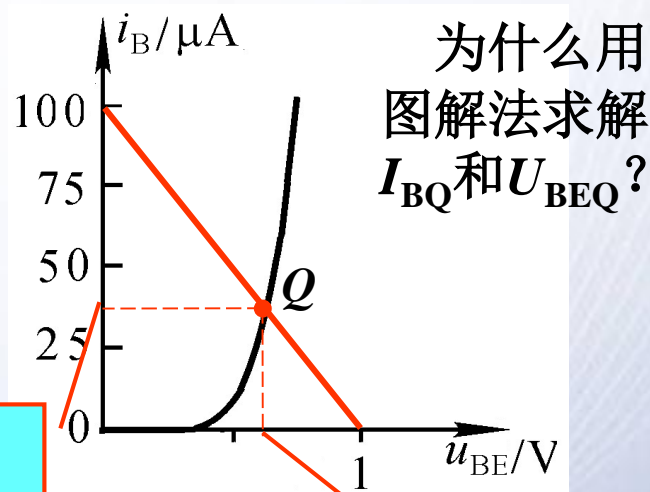


讨论三：基本共射放大电路的静态分析和动态分析



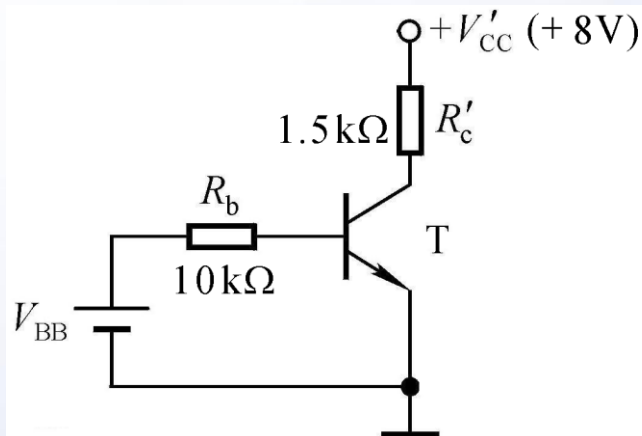
$$\beta = 80$$

$$r_{bb'} = 200\Omega$$



$$I_{BQ} \approx 35\mu A$$

$$U_{BEQ} \approx 0.65V$$



$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 2.8mA$$

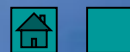
$$U_{CEQ} = V_{CC}' - I_{CQ} R_c' \approx 3.8V$$

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \approx 952\Omega$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}} \approx -11$$

$$R_i = R_b + r_{be} \approx 11k\Omega$$

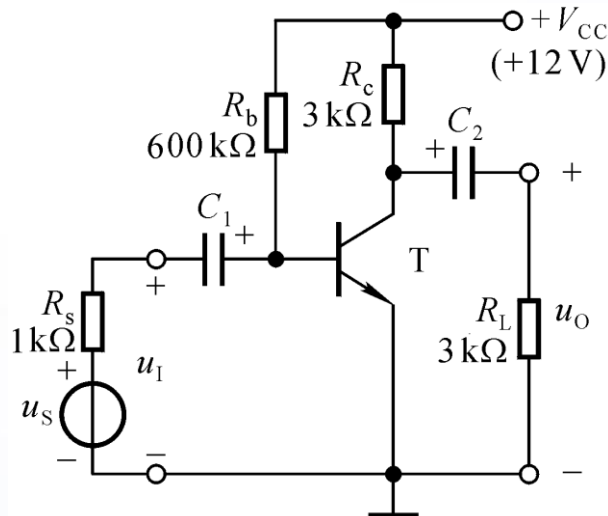
$$R_o = R_c = 3k\Omega$$





讨论四：阻容耦合共射放大电路的静态分析和动态分析

$$\beta = 80, r_{be} = 1\text{k}\Omega$$



$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = 20\mu\text{A}$$

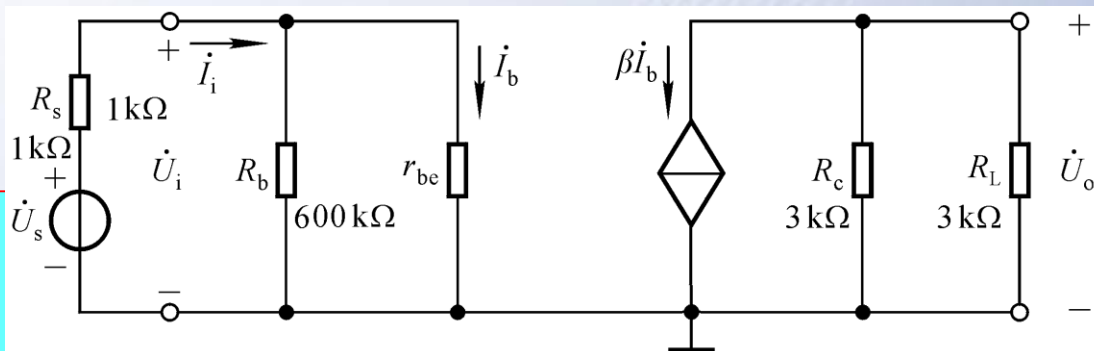
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 1.6\text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \approx 7.2\text{V}$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -120$$

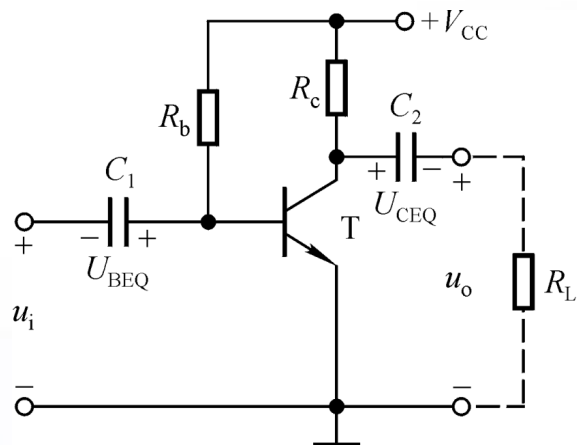
$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} = -60$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 1\text{k}\Omega \quad R_o = R_c = 3\text{k}\Omega$$

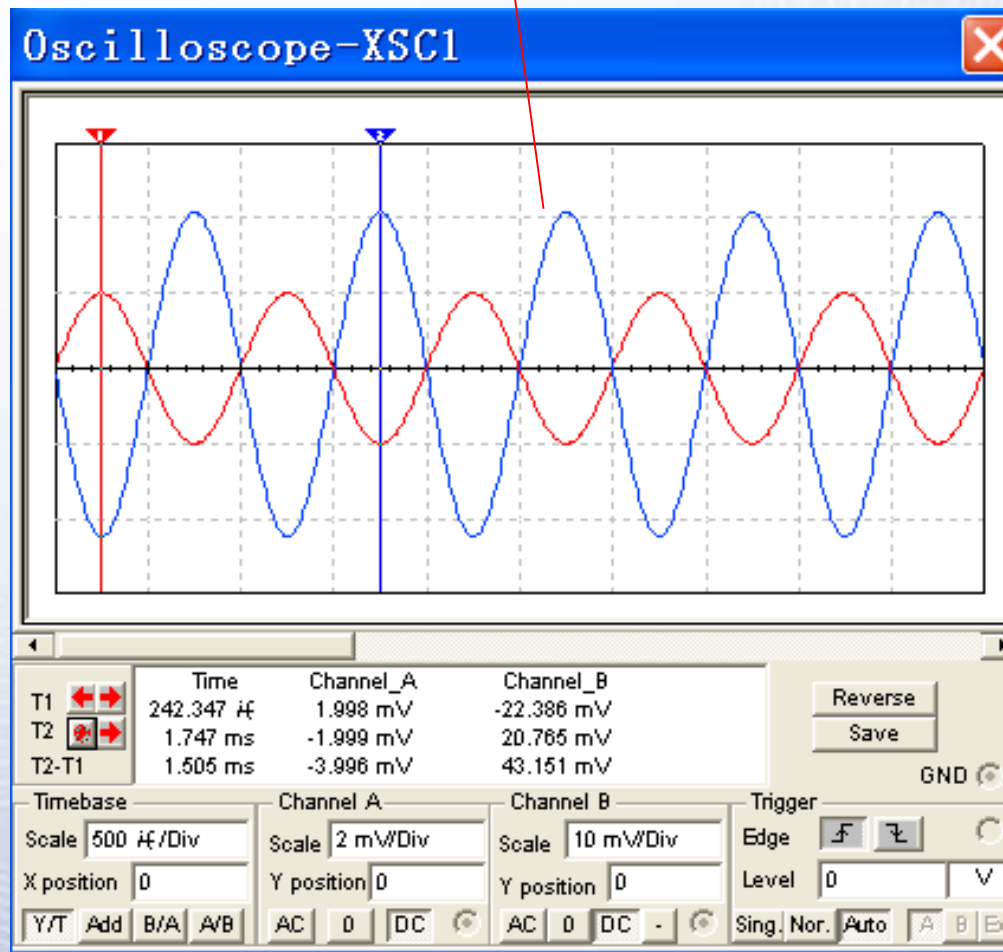




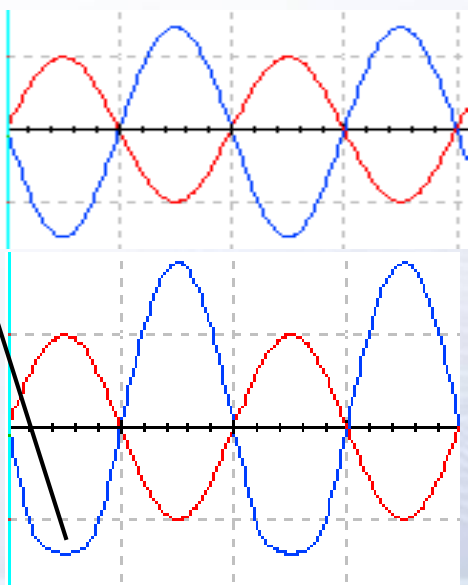
讨论五：波形分析



失真了吗？如何判断？原因？



饱和失真





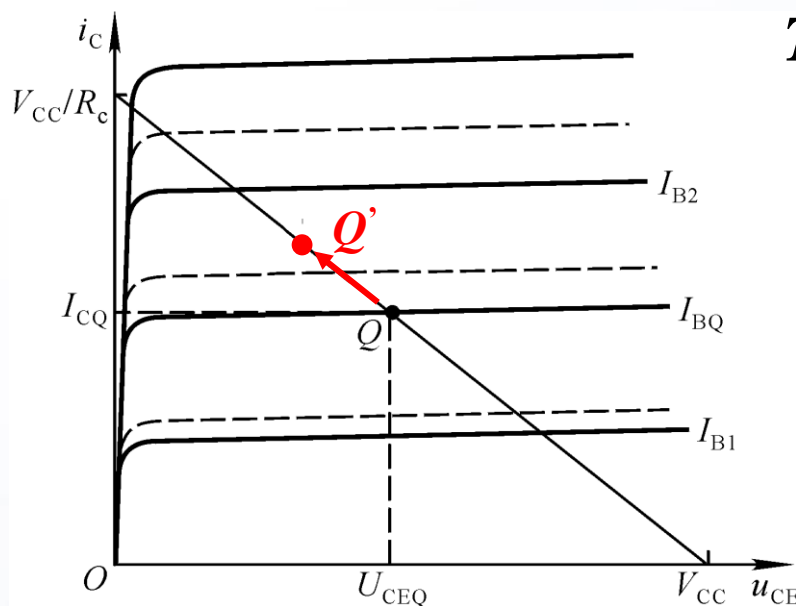
§ 2.4 静态工作点的稳定

- 一、温度对静态工作点的影响
- 二、静态工作点稳定的典型电路
- 三、稳定静态工作点的方法





一、温度对静态工作点的影响



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

$I_{CEO} \uparrow$
若 U_{BEQ} 不变 $I_{BQ} \uparrow$

若温度升高时要 Q' 回到 Q ,
则只有减小 I_{BQ}

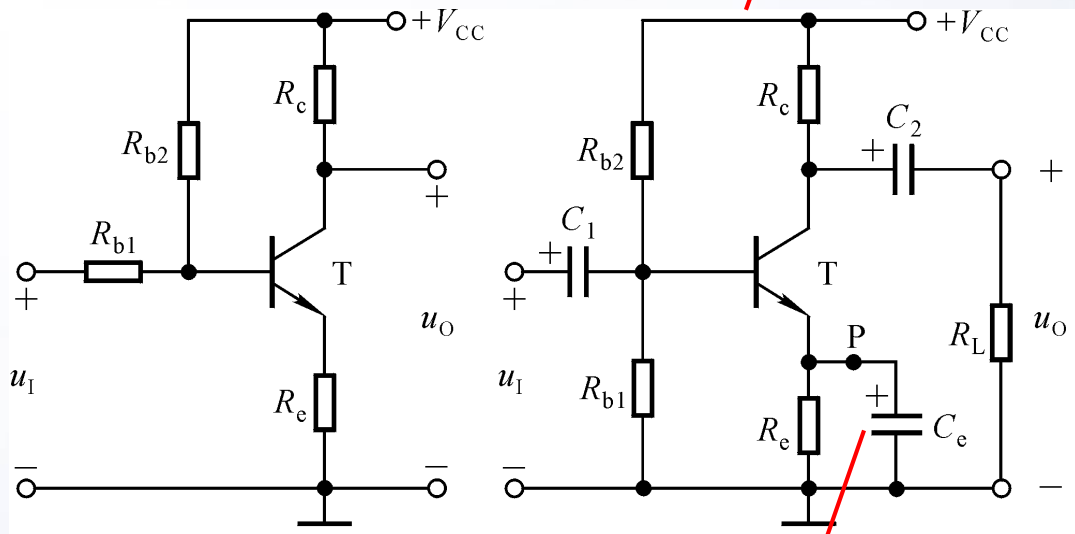
所谓 Q 点稳定, 是指 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 在温度变化时基本不变,
这是靠 I_{BQ} 的变化得来的。





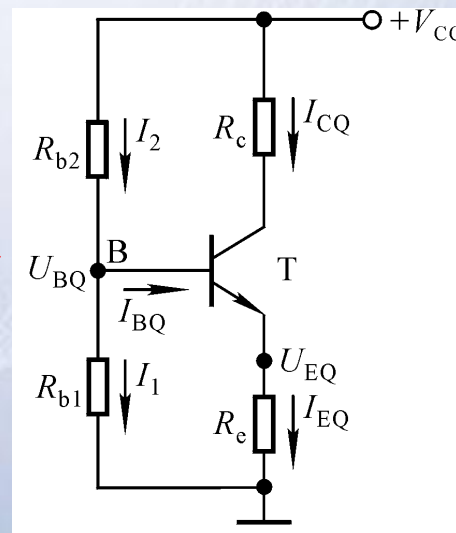
二、静态工作点稳定的典型电路

1. 电路组成



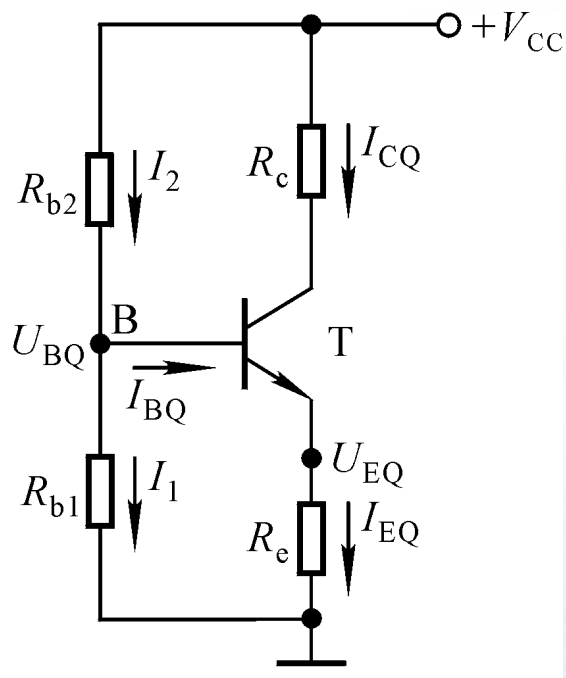
直流通路?

C_e 为旁路电容，在交流通路中可视为短路





2. 稳定原理



为了稳定 Q 点, 通常 $I_1 \gg I_B$, 即 $I_1 \approx I_2$; 因此

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

基本不随温度变化。

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

设 $U_{BEQ} = U_{BE} + \Delta U_{BE}$, 若 $U_{BQ} - U_{BE} \gg \Delta U_{BE}$, 则 I_{EQ} 稳定。





R_e 的作用

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \quad (U_B \text{基本不变}) \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

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。

直流通路中的反馈称为直流反馈。

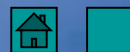
反馈的结果使输出量的变化减小的称为负反馈，反之称为正反馈。

I_C 通过 R_e 转换为 ΔU_E 影响 U_{BE}

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。

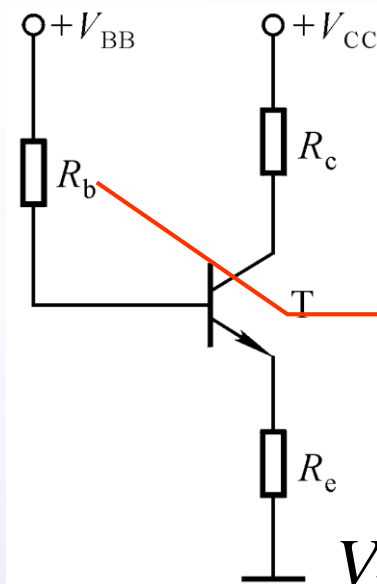
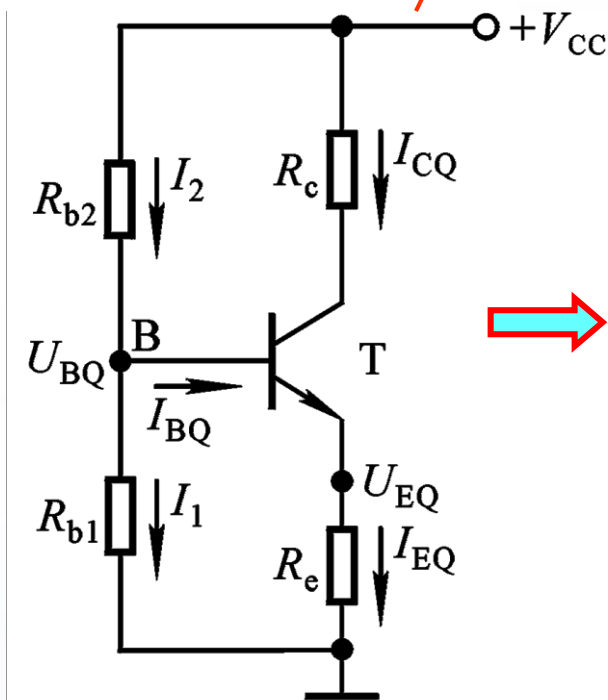
R_e 有上限值吗？





3. Q 点分析

分压式电流负反馈工作点稳定电路



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

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

R_b 上静态电压是否可忽略不计?

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

判断方法: $R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta) R_e$?

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

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

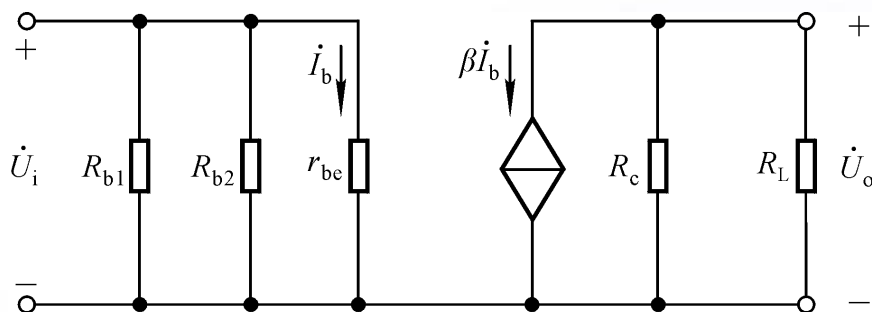
$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

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

$$\approx V_{CC} - I_{EQ} (R_c + R_e)$$



4. 动态分析



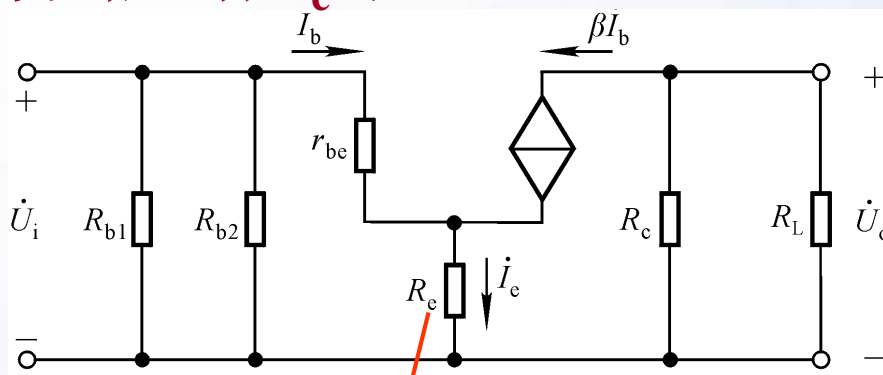
如何提高电压放大能力？

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

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

$$R_o = R_c$$

无旁路电容 C_e 时：

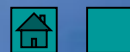


$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

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

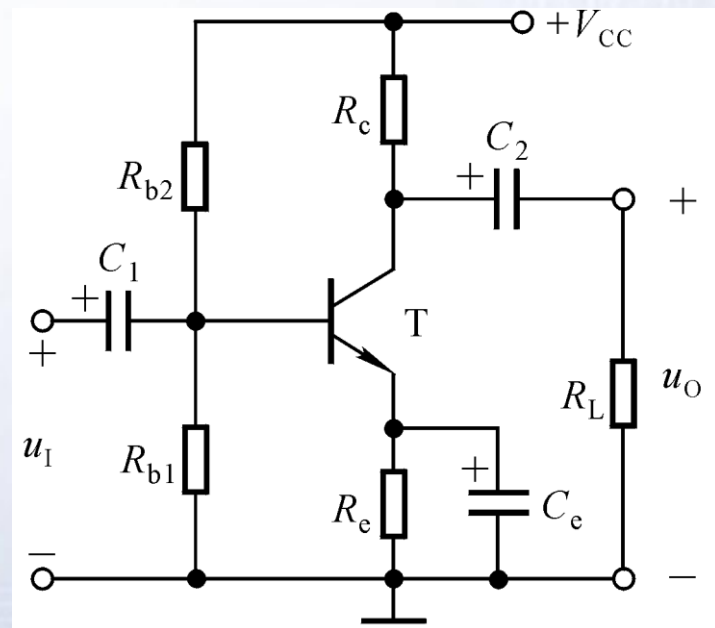
利？弊？

若 $(1 + \beta)R_e \gg r_{be}$ ，则 $A_u \approx -\frac{R'_L}{R_e}$



三、稳定静态工作点的方法

- 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。它们的温度系数？

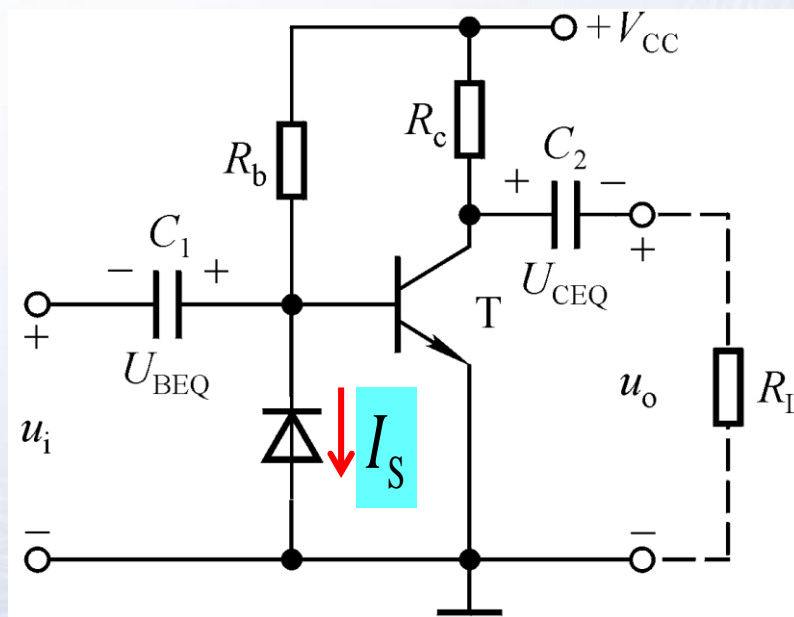
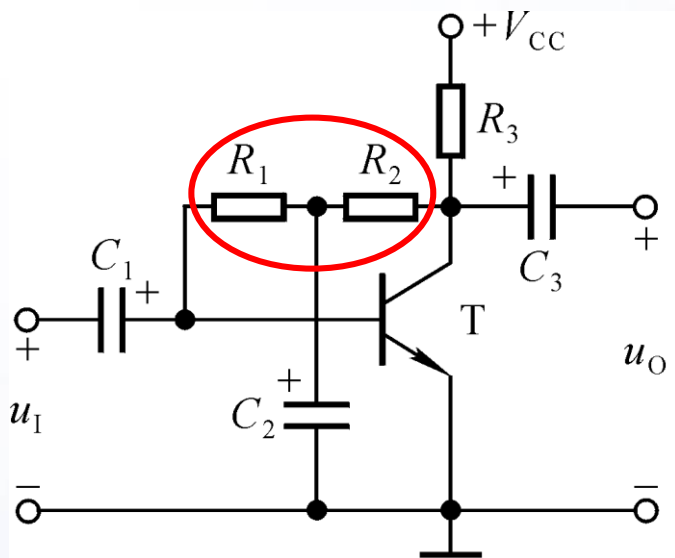


$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

$$\quad \quad \quad \searrow \quad \quad \quad R_{b1} \downarrow \rightarrow U_B \downarrow \nearrow$$

讨论一

图示两个电路中是否采用了措施来稳定静态工作点？



若采用了措施，则是什么措施？



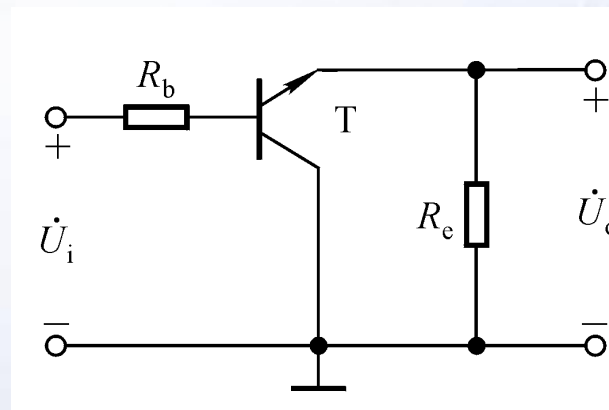
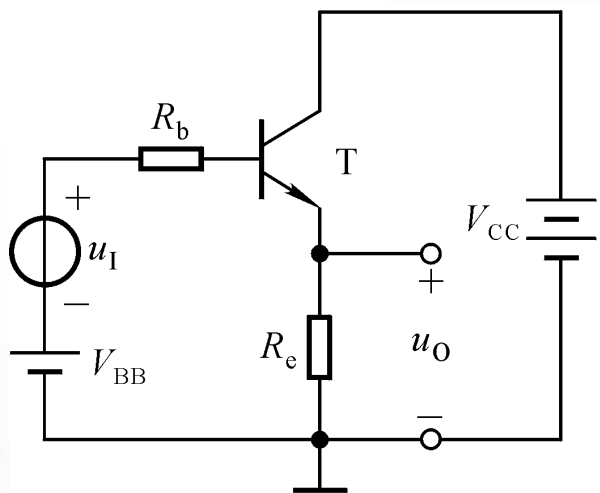
§ 2.5 晶体管放大电路的三种接法

- 一、基本共集放大电路
- 二、基本共基放大电路
- 三、三种接法放大电路的比较





一、基本共集放大电路



1. 静态分析

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

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

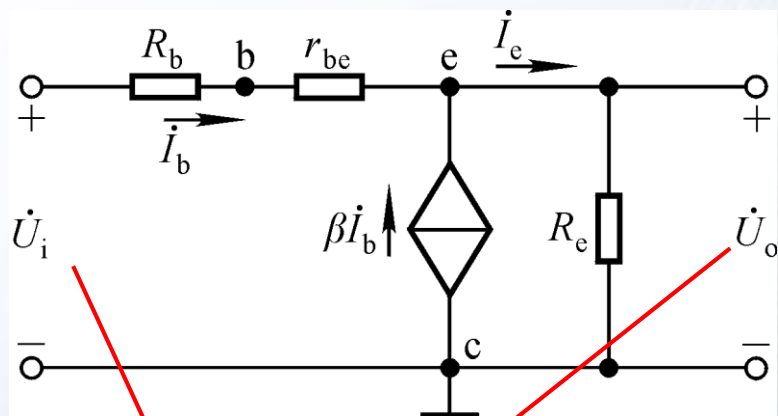
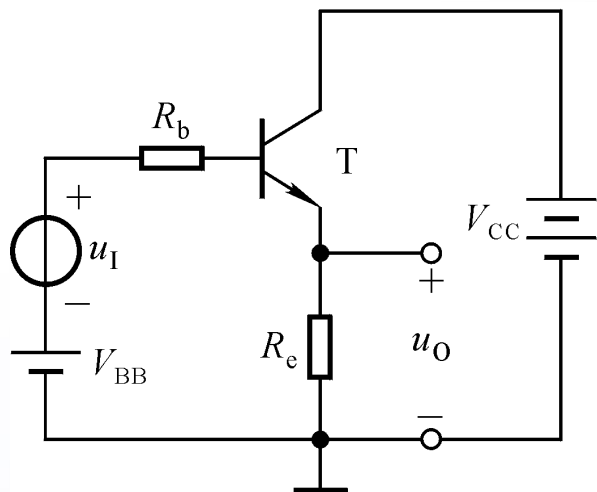
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

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

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



2. 动态分析：电压放大倍数



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

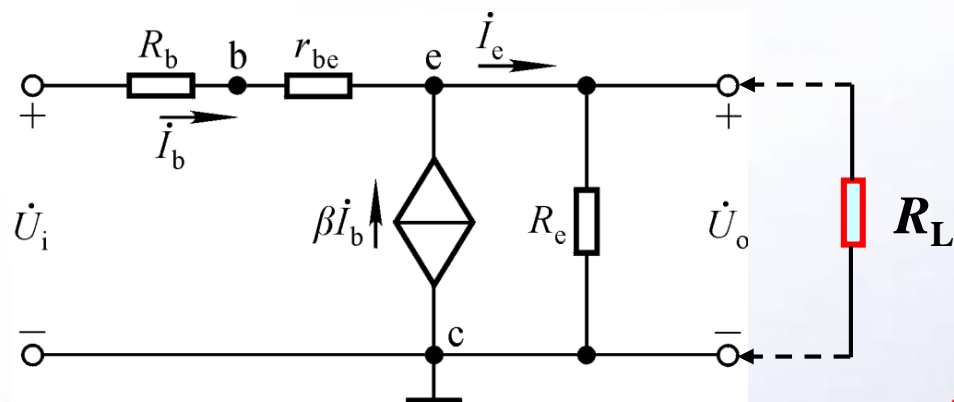
$$U_o < U_i$$

故称之为射
极跟随器

若 $(1 + \beta) R_e \gg R_b + r_{be}$, 则 $\dot{A}_u \approx 1$, 即 $U_o \approx U_i$ 。



2. 动态分析：输入电阻的分析



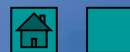
$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e$$

从基极看 R_e ，被增大到 $(1 + \beta)$ 倍

带负载电阻后

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

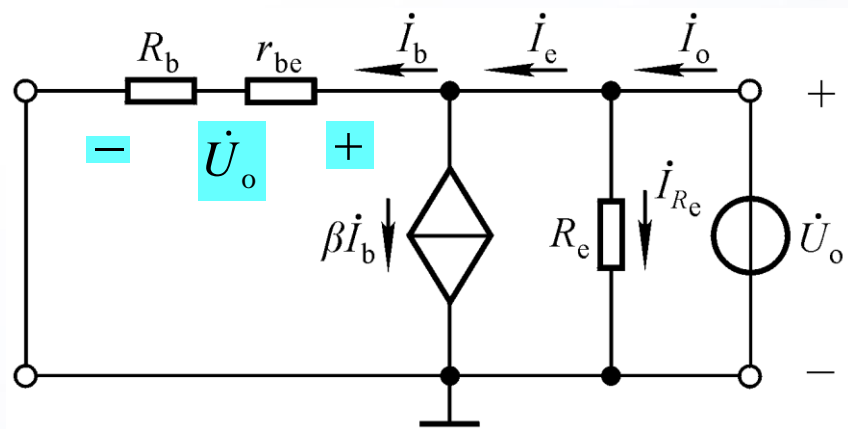
R_i 与负载有关！





2. 动态分析：输出电阻的分析

令 U_s 为零，保留 R_s ，在输出端加 U_o ，产生 I_o ， $R_o = U_o / I_o$ 。

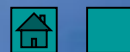


R_o 与信号源内阻有关！

从射极看基极回路电阻，被减小到 $(1+\beta)$ 倍

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{I_{R_e} + I_e} \\ &= \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_e} + (1+\beta)\frac{U_o}{R_b + r_{be}}} \\ &= R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1+\beta} \end{aligned}$$

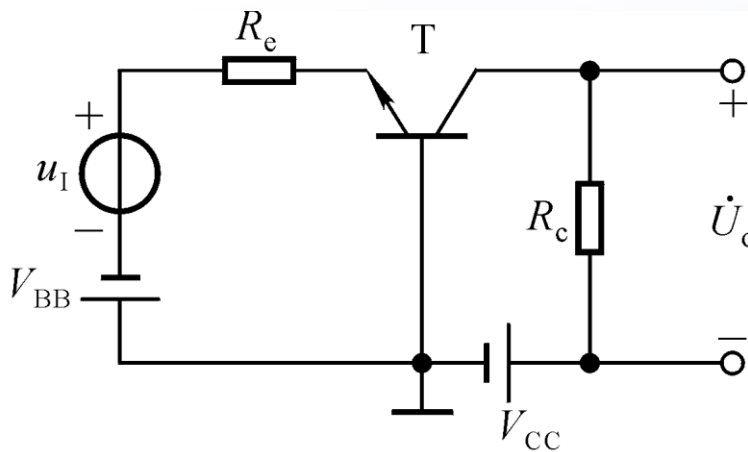
3. 特点：输入电阻大，输出电阻小；只放大电流，不放大电压；在一定条件下有电压跟随作用！





二、基本共基放大电路

1. 静态分析



$$\begin{cases} U_{\text{BEQ}} + I_{\text{EQ}} R_e = V_{\text{BB}} \\ I_{\text{CQ}} R_c + U_{\text{CEQ}} - U_{\text{BEQ}} = V_{\text{CC}} \end{cases}$$

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

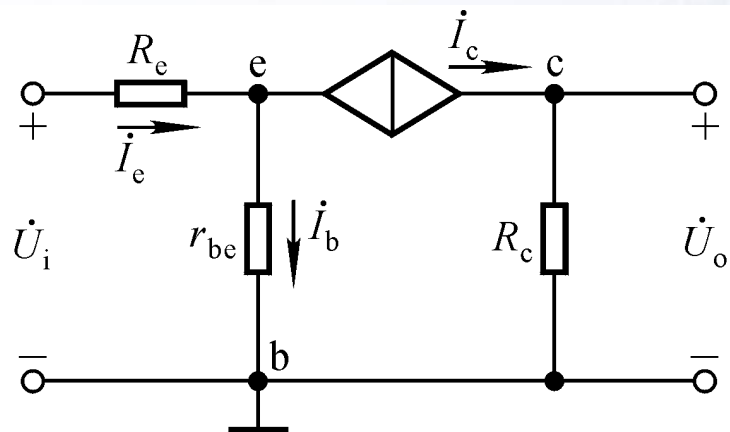
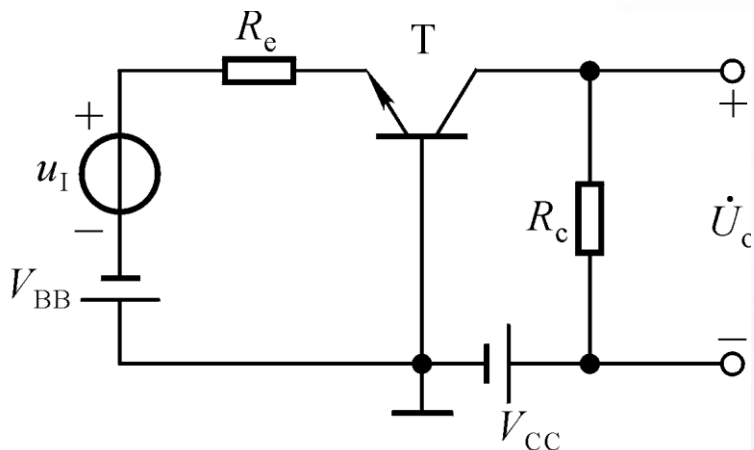
$$I_{\text{BQ}} = \frac{I_{\text{EQ}}}{1 + \beta}$$

$$U_{\text{CEQ}} \approx V_{\text{CC}} - I_{\text{EQ}} R_c + U_{\text{BEQ}}$$





2. 动态分析



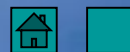
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_e R_e + \dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

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

$$R_o = R_c$$

3. 特点:

输入电阻小，频带宽！只放大电压，不放大电流！





三、三种接法的比较：空载情况下

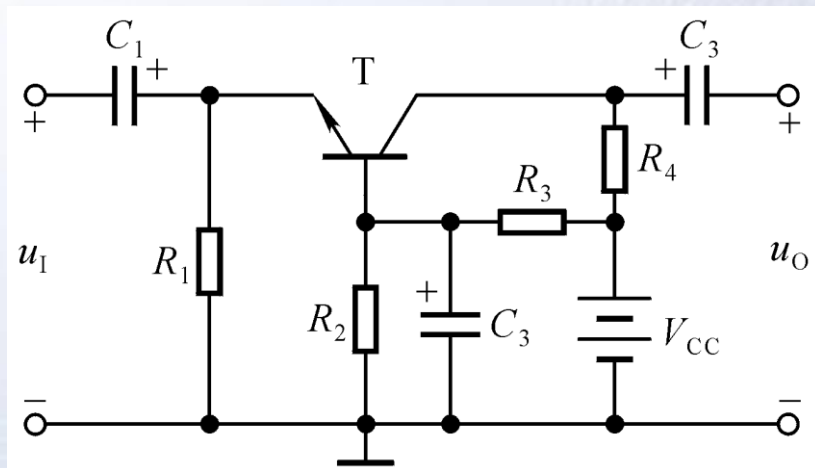
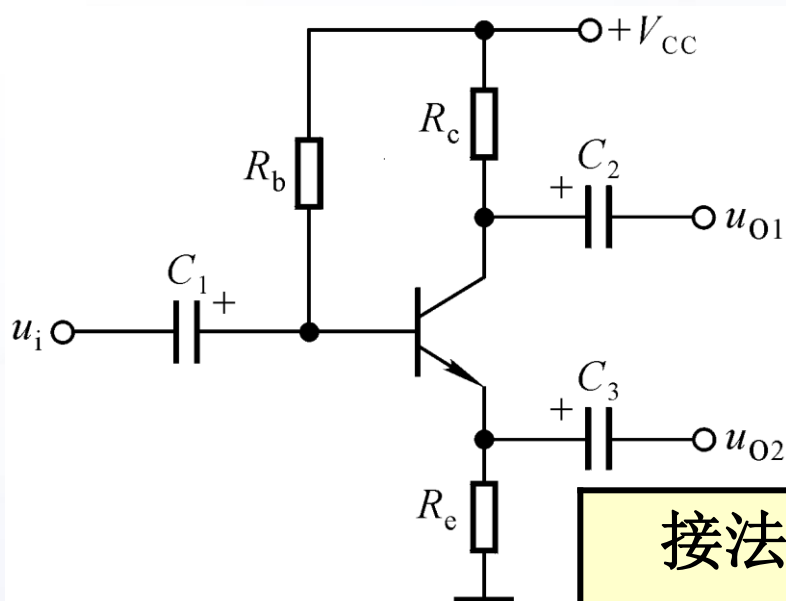
接法	共射	共集	共基
A_u	大	小于1	大
A_i	β	$1 + \beta$	α
R_i	中	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中	宽





讨论一：

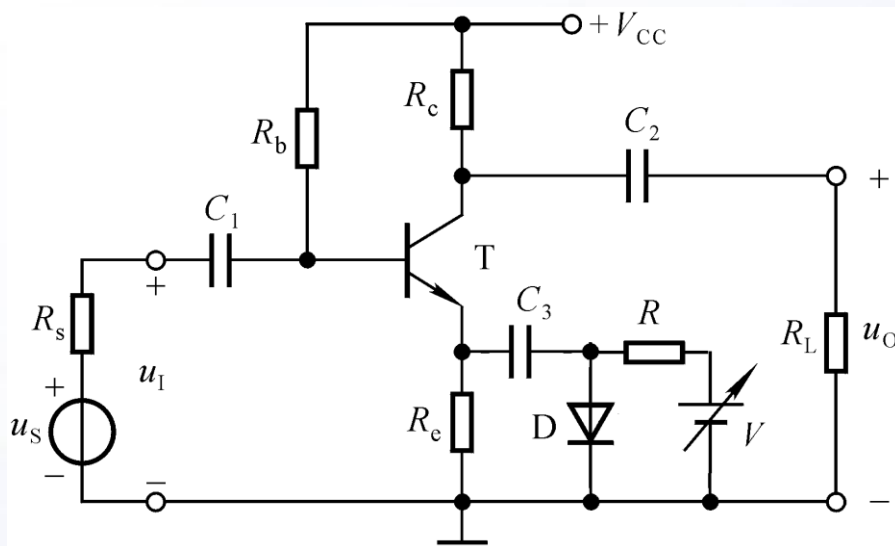
图示电路为哪种基本接法的放大电路？它们的静态工作点有可能稳定吗？求解静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的表达式。



接法	共射	共集	共基
输入	b	b	e
输出	c	e	c

讨论二

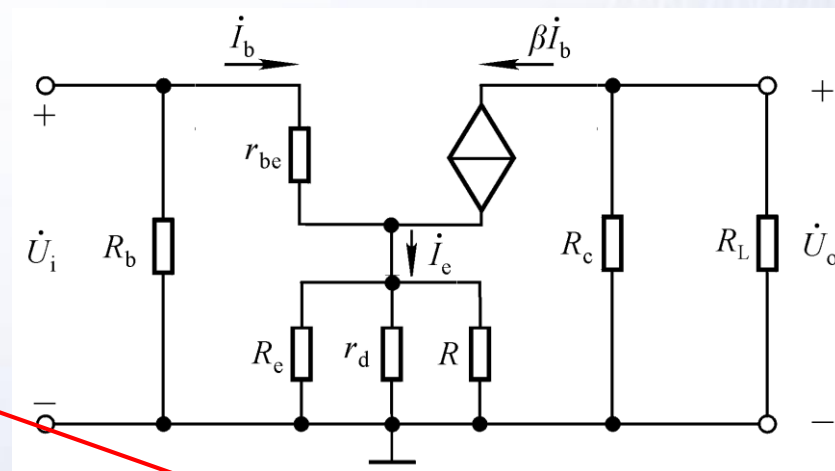
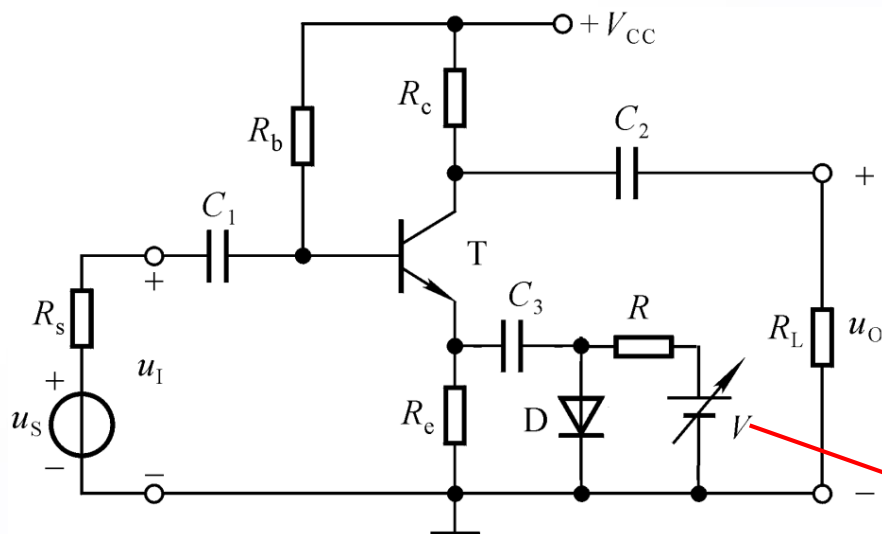
电路如图，所有电容对交流信号均可视为短路。



1. Q 为多少?
2. R_e 有稳定 Q 点的作用吗?
3. 电路的交流等效电路?
4. V 变化时，电压放大倍数如何变化?



讨论二

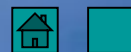


$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // r_D // R)}$$

改变电压放大倍数

当 $R_e // R \gg r_D$ 时,

$$\dot{A}_u \approx -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)r_D}, \quad V \uparrow \rightarrow r_D \downarrow \rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$





§ 2.6 场效应管及其基本放大电路

一、场效应管

二、场效应管放大电路静态工作点的设置方法

三、场效应管放大电路的动态分析



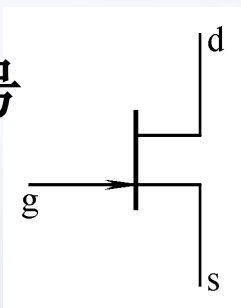
一、场效应管（以N沟道为例）

单极型管：噪声小、抗辐射能力强、低电压工作

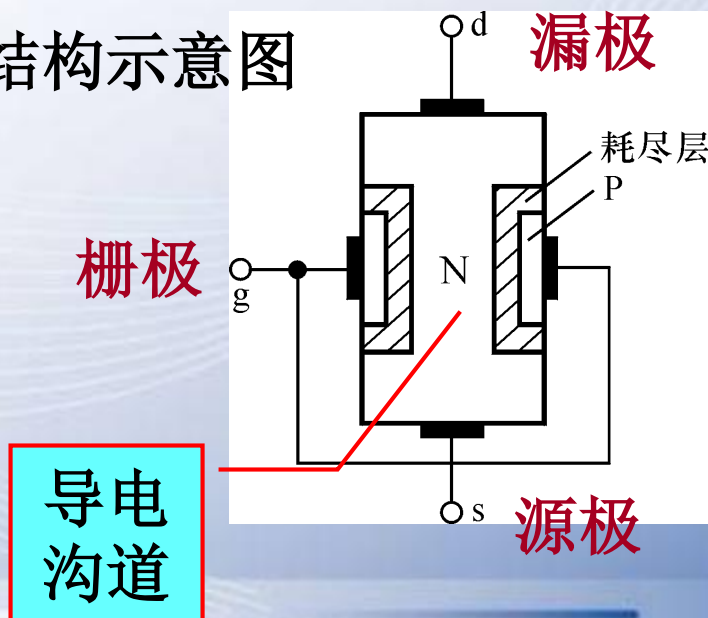
场效应管有三个极：源极（s）、栅极（g）、漏极（d），对应于晶体管的e、b、c；有三个工作区域：截止区、恒流区、可变电阻区，对应于晶体管的截止区、放大区、饱和区。

1. 结型场效应管

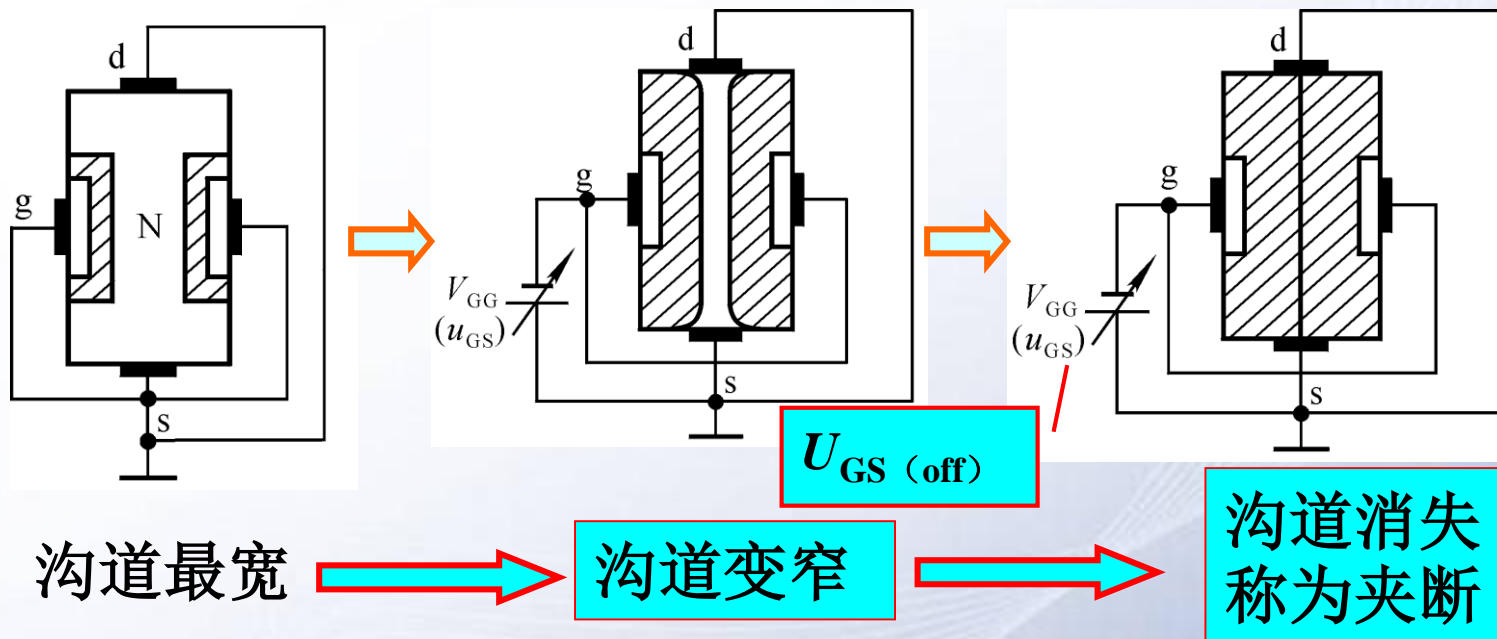
符号



结构示意图



栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用

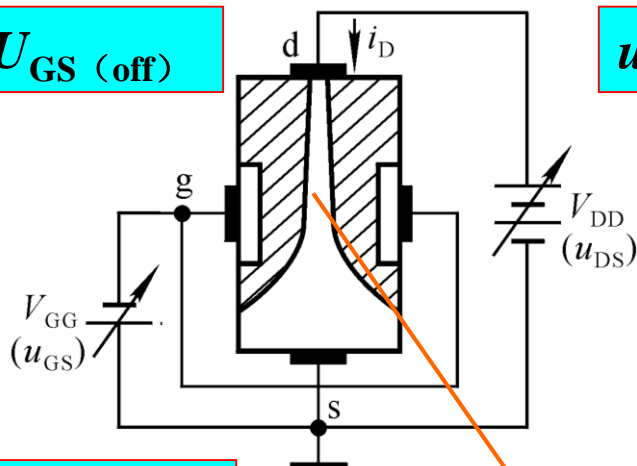


u_{GS} 可以控制导电沟道的宽度。为什么g-s必须加负电压？

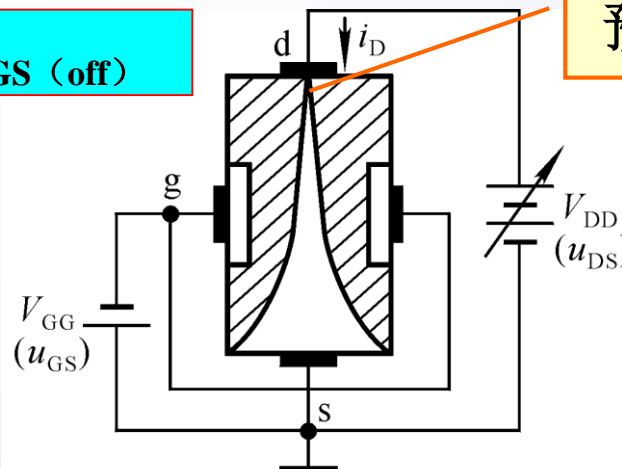


漏-源电压对漏极电流的影响

$$u_{GD} > U_{GS}(\text{off})$$

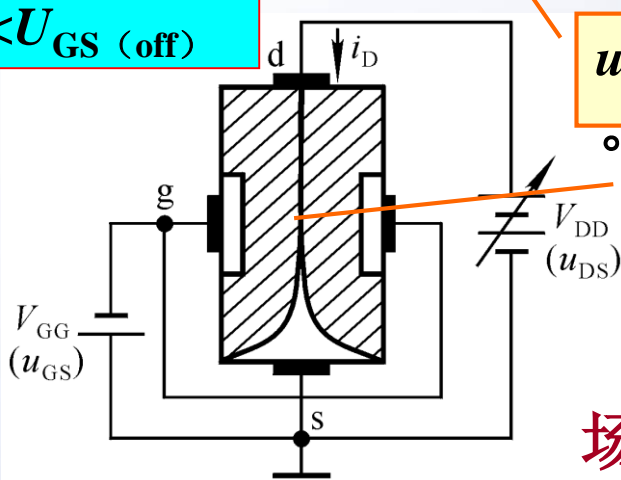


$$u_{GD} = U_{GS}(\text{off})$$



预夹断

$$u_{GD} < U_{GS}(\text{off})$$



$u_{GS} > U_{GS}(\text{off})$ 且不变, V_{DD} 增大, i_D 增大

V_{DD} 的增大, 几乎全部用来克服沟道的电阻, i_D 几乎不变, 进入恒流区, i_D 几乎仅仅决定于 u_{GS} 。

场效应管工作在恒流区的条件是什么?

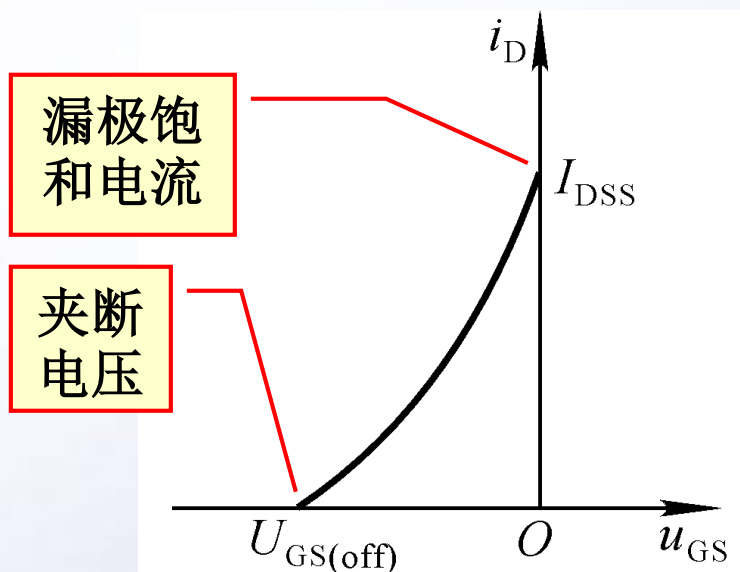




转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

场效应管工作在恒流区，因而 $u_{GS} > U_{GS(\text{off})}$ 且 $u_{GD} < U_{GS(\text{off})}$ 。



$$u_{DG} > -U_{GS(\text{off})}$$

$$u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(\text{off})}$$

在恒流区时

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(\text{off})}}\right)^2$$



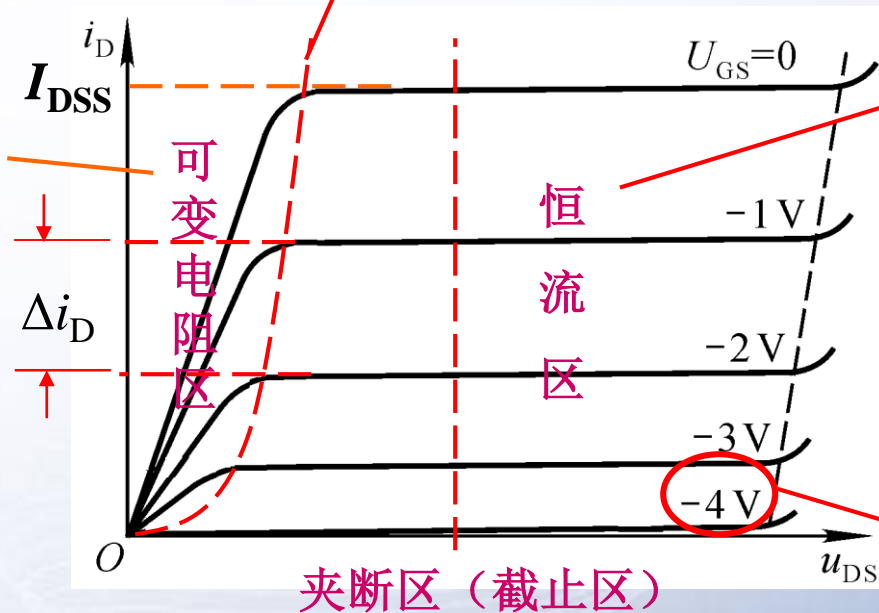


输出特性

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=\text{常量}}$$

预夹断轨迹, $u_{GD} = U_{GS(\text{off})}$

g-s电压控制d-s的等效电阻



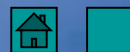
i_D 几乎仅决定于 u_{GS}

夹断电压

低频跨导:

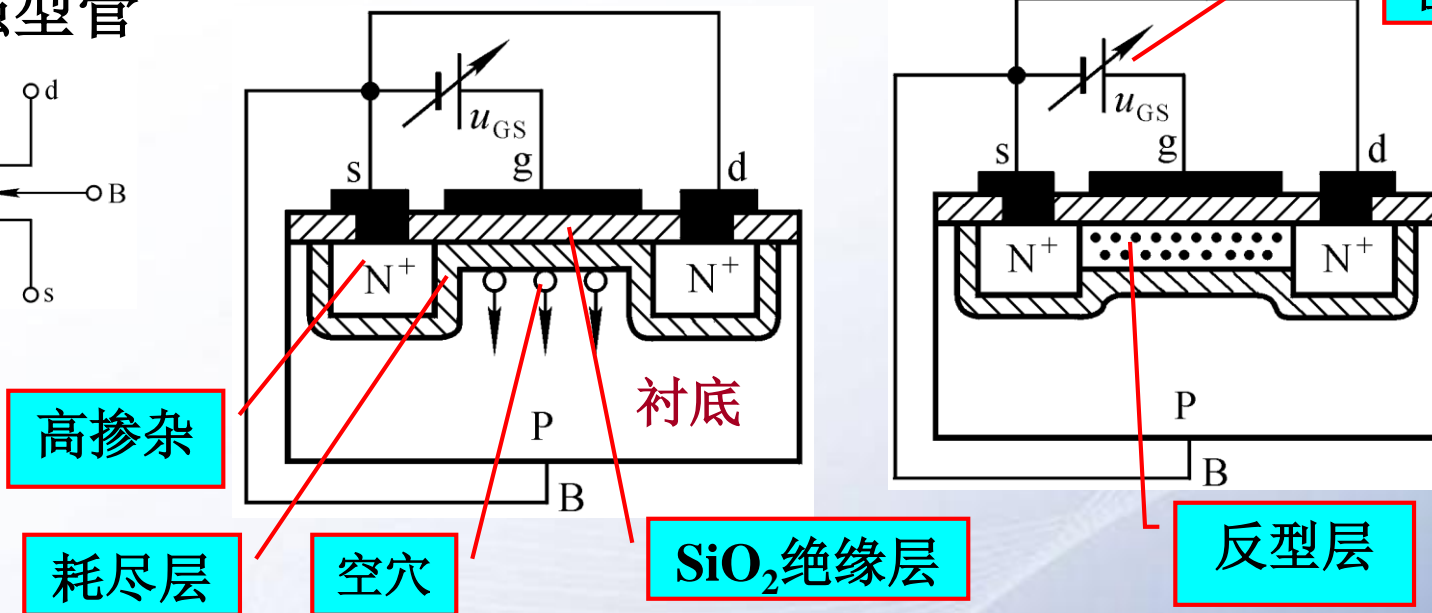
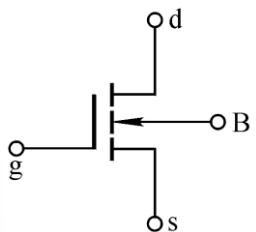
$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

不同型号的管子 $U_{GS(\text{off})}$ 、 I_{DSS} 将不同。



2. 绝缘栅型场效应管

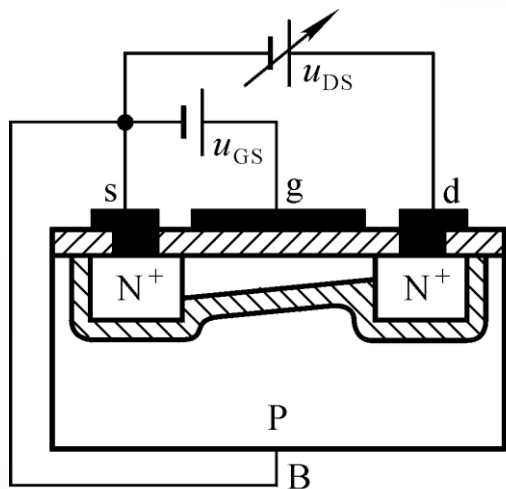
增强型管



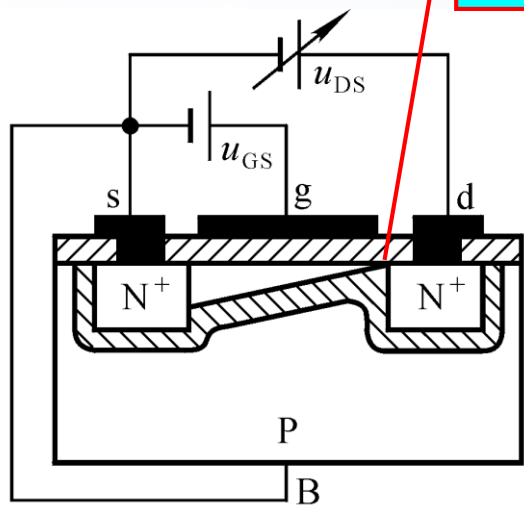
u_{GS} 增大，反型层（导电沟道）将变厚变长。当反型层将两个N区相接时，形成导电沟道。

增强型MOS管 u_{DS} 对 i_D 的影响

刚出现夹断

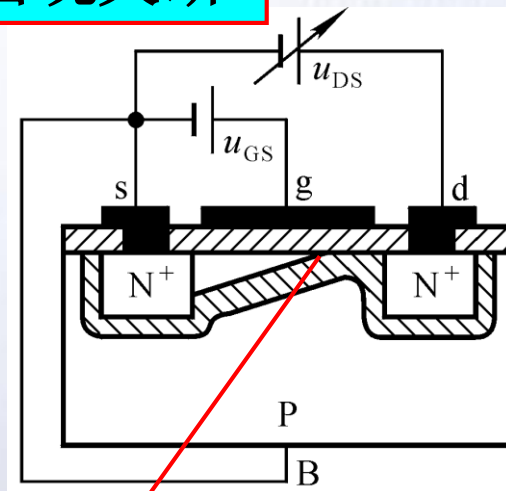


i_D 随 u_{DS} 的增大而增大，可变电阻区



$u_{GD} = U_{GS(th)}$ ，预夹断

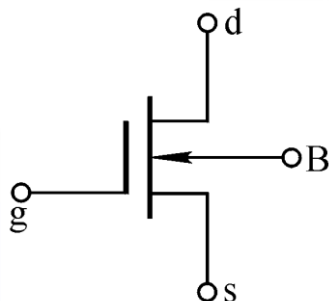
u_{GS} 的增大几乎全部用来克服夹断区的电阻



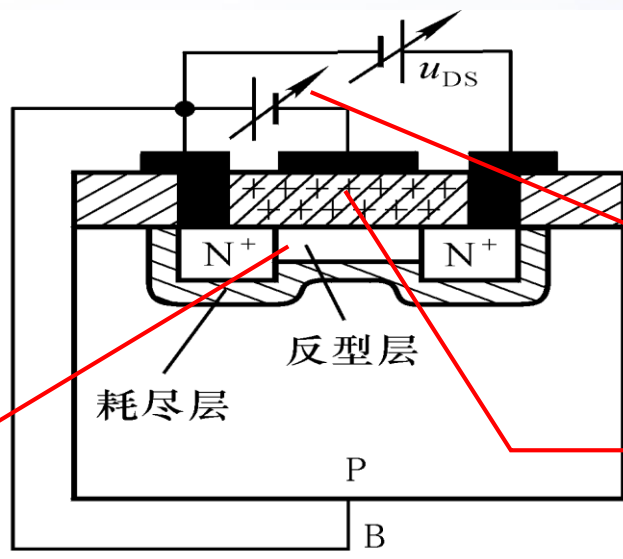
i_D 几乎仅仅受控于 u_{GS} ，恒流区

用场效应管组成放大电路时应使之工作在恒流区。N沟道增强型MOS管工作在恒流区的条件是什么？

耗尽型 MOS 管



$u_{GS}=0$ 时就存在
导电沟道



小到一定
值才夹断

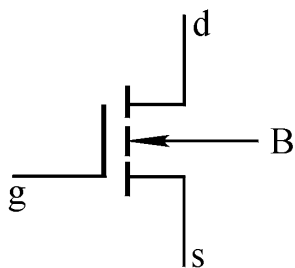
加正离子

耗尽型MOS管在 $u_{GS} > 0$ 、 $u_{GS} < 0$ 、 $u_{GS} = 0$ 时均可导通，且与结型场效应管不同，由于 SiO_2 绝缘层的存在，在 $u_{GS} > 0$ 时仍保持g-s间电阻非常大的特点。

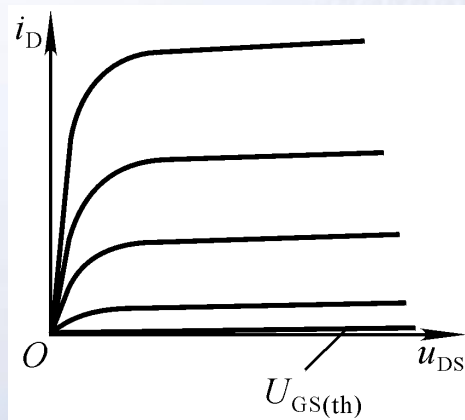
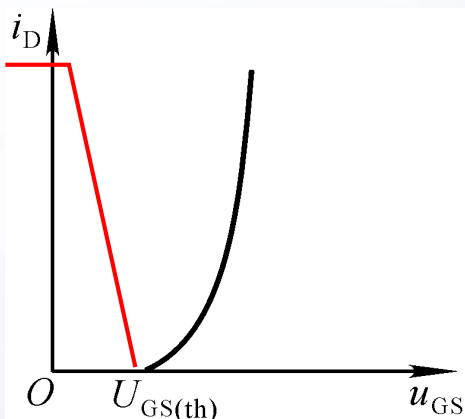


MOS管的特性

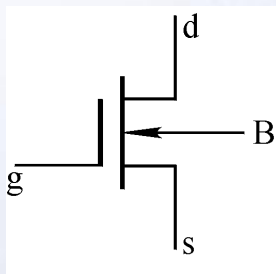
1) 增强型MOS管



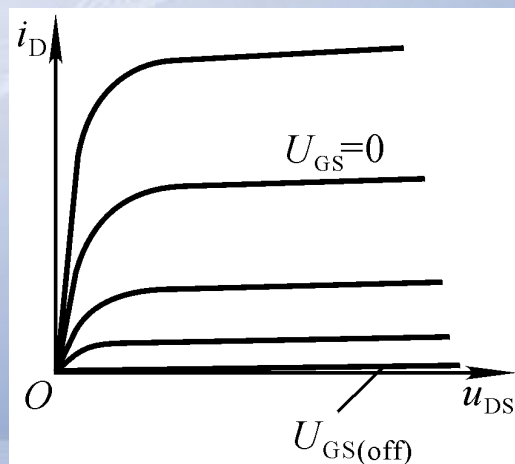
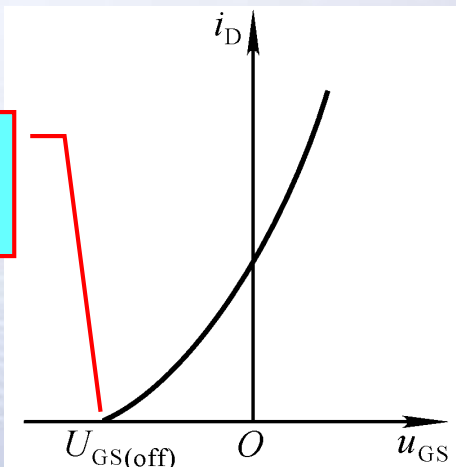
开启电压



2) 耗尽型MOS管



夹断电压

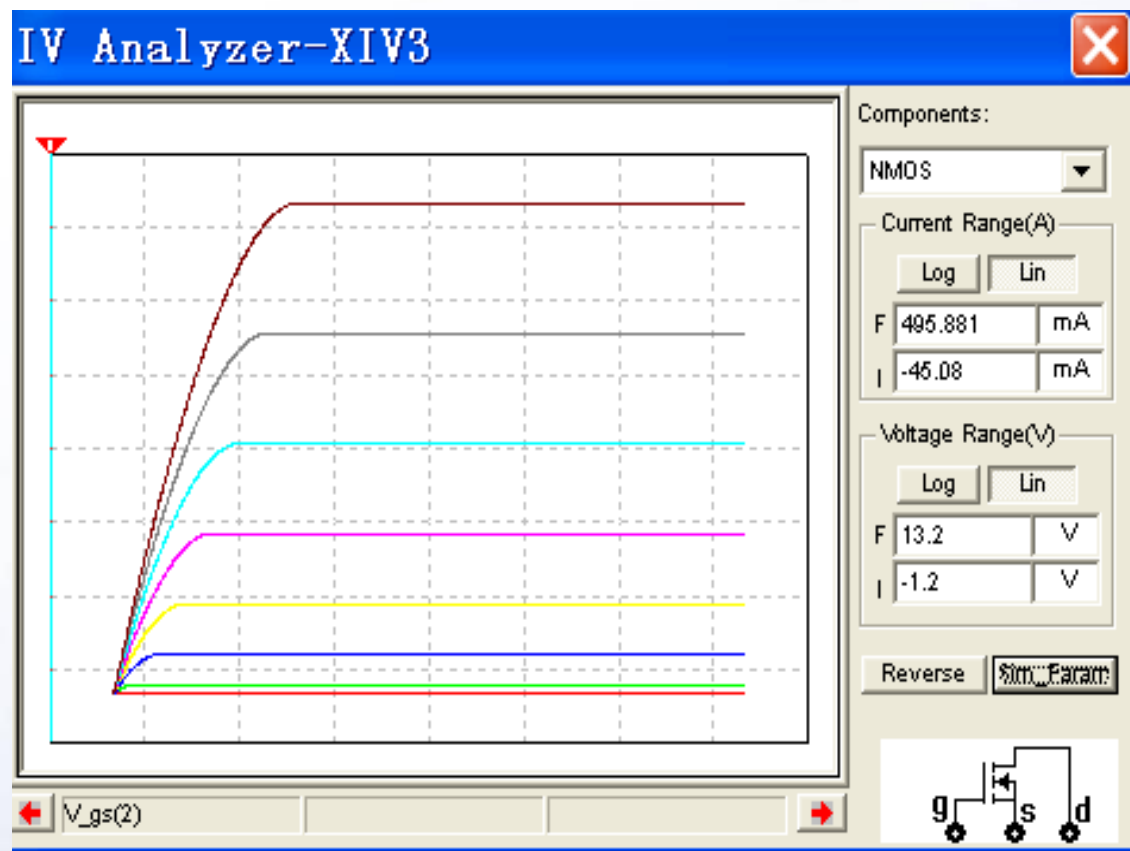


在恒流区时, $i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$

式中 I_{DO} 为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 i_D



利用 Multisim 测试场效应管的输出特性



从输出特性曲线说明场效应管的哪些特点？



3. 场效应管的分类

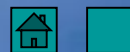
工作在恒流区时**g-s**、**d-s**间的电压极性

场效应管	结型	N沟道	$u_{GS} < 0, u_{DS} > 0$
		P沟道	$u_{GS} > 0, u_{DS} < 0$
	绝缘栅型	增强型	$u_{GS} > 0, u_{DS} > 0$
		P沟道	$u_{GS} < 0, u_{DS} < 0$
		耗尽型	u_{GS} 极性任意, $u_{DS} > 0$
			u_{GS} 极性任意, $u_{DS} < 0$

$u_{GS}=0$ 可工作在恒流区的场效应管有哪几种？

$u_{GS}>0$ 才可能工作在恒流区的场效应管有哪几种？

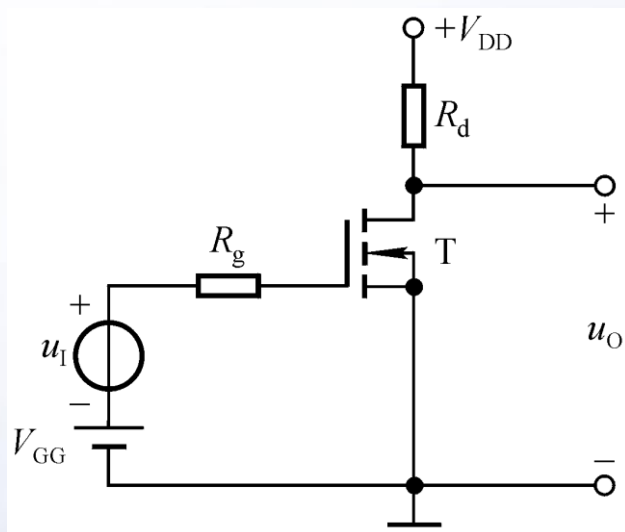
$u_{GS}<0$ 才可能工作在恒流区的场效应管有哪几种？



二、场效应管静态工作点的设置方法

1. 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

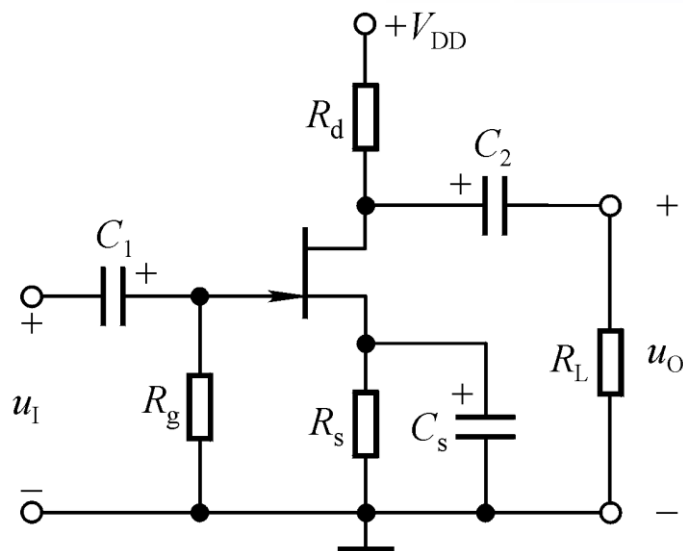


$$U_{GSQ} = V_{BB}$$

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

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

2. 自给偏压电路



$$U_{GQ} = 0, \quad U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

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

由正电源获得负偏压
称为自给偏压

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

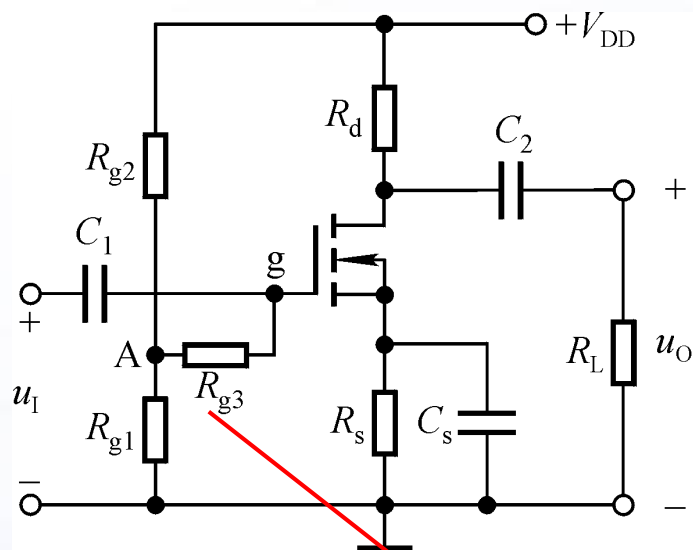
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点？



3. 分压式偏置电路

即典型的 Q 点稳定电路



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

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

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

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

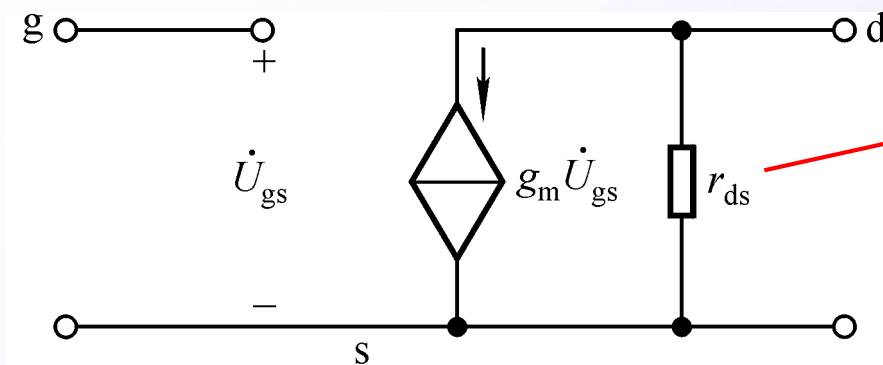
为什么加 R_{g3} ?其数值应大些小些?

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点?

三、场效应管放大电路的动态分析

1. 场效应管的交流等效模型

与晶体管的 h 参数等效模型类比：



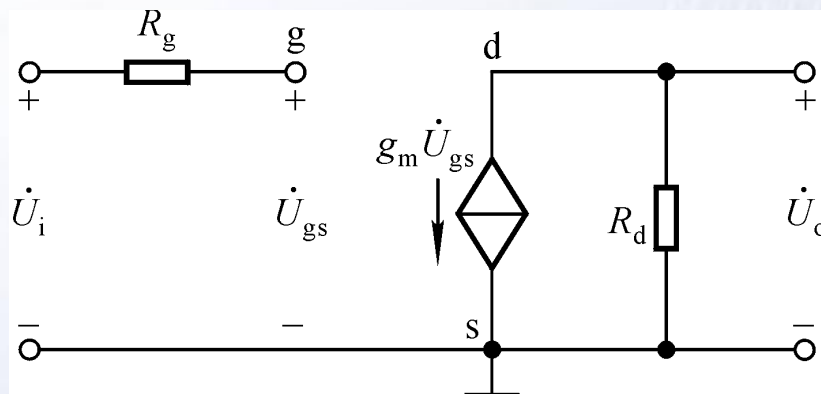
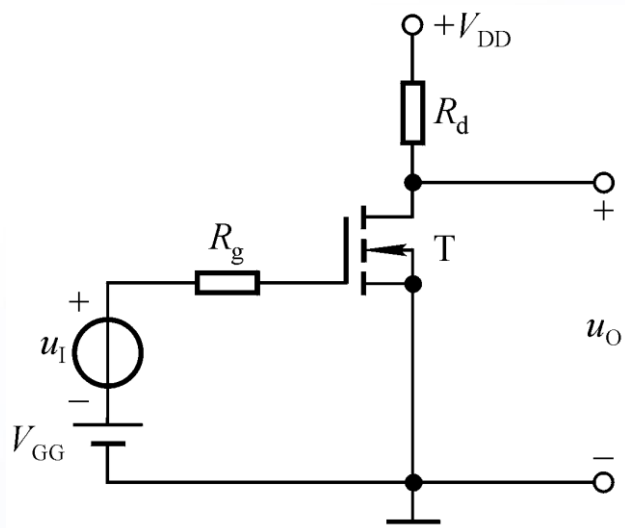
近似分析时可认为其为无穷大！

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}}$$

根据 i_D 的表达式或转移特性可求得 g_m 。



2. 基本共源放大电路的动态分析



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

$$R_i = \infty$$

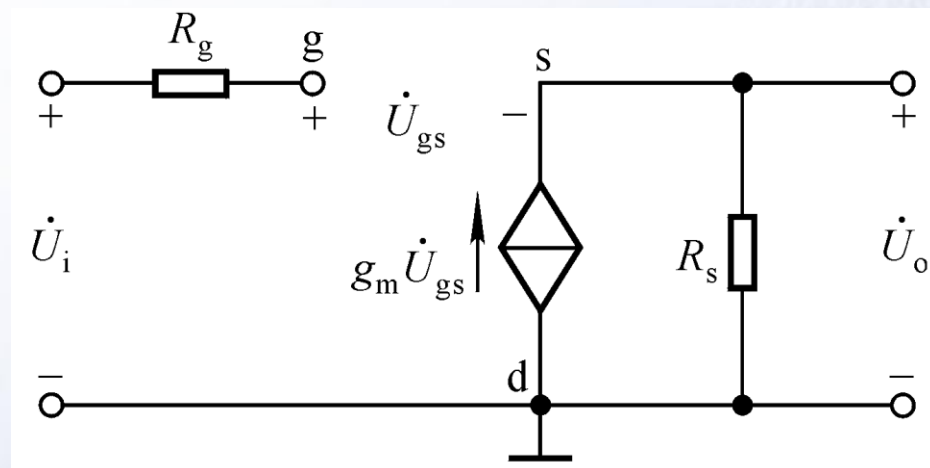
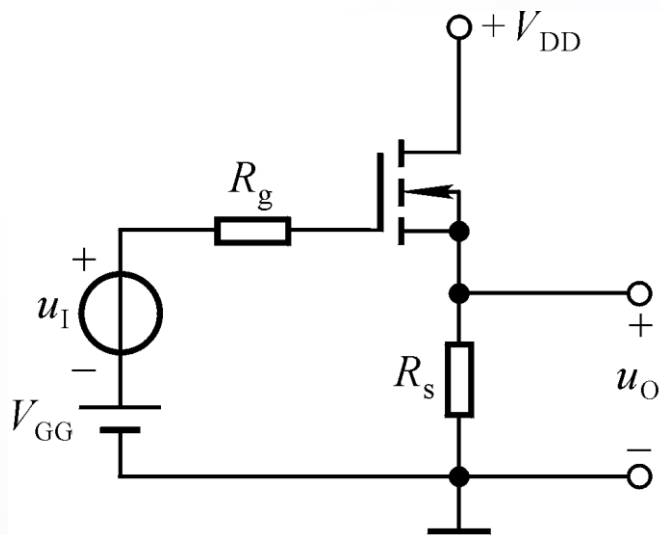
$$R_o = R_d$$

若 $R_d=3\text{k}\Omega$, $R_g=5\text{k}\Omega$,
 $g_m=2\text{mS}$, 则 $\dot{A}_u = ?$
与共射电路比较。





3. 基本共漏放大电路的动态分析

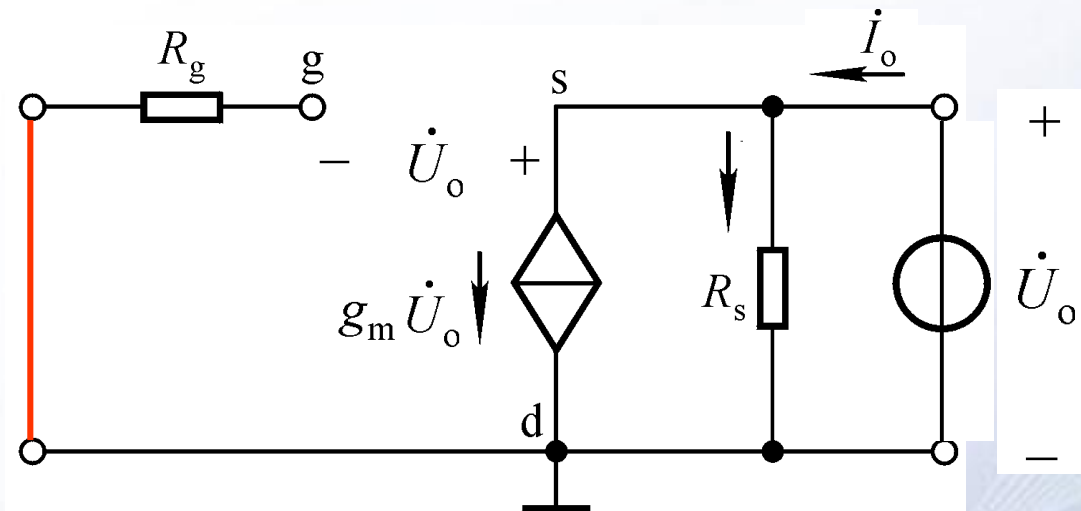


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_d R_s}{\dot{U}_{gs} + \dot{I}_d R_s} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$
$$R_i = \infty$$

若 $R_s = 3\text{k}\Omega$, $g_m = 2\text{mS}$, 则
 $\dot{A}_u = ?$



基本共漏放大电路输出电阻的分析



$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_s} + g_m U_o} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

若 $R_s = 3\text{k}\Omega$, $g_m = 2\text{mS}$,
则 $R_o = ?$



§ 2.7 派生电路

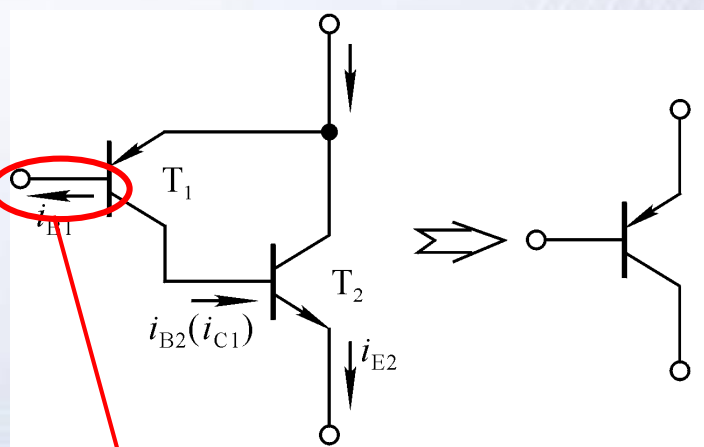
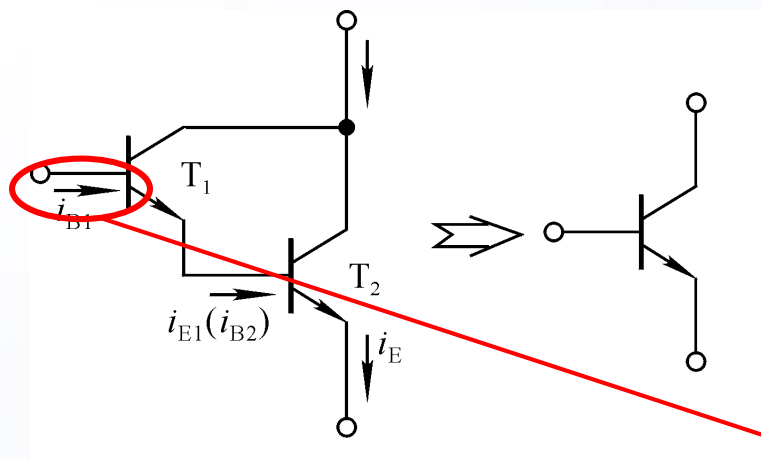
一、复合管

二、派生电路举例



一、复合管

复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。
目的：增大 β ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。



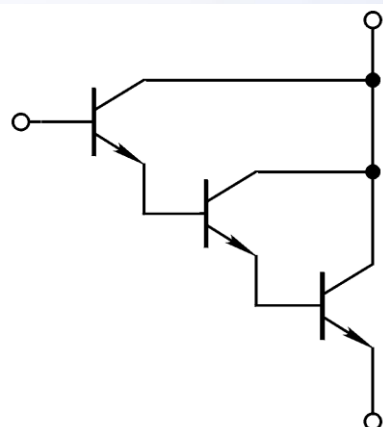
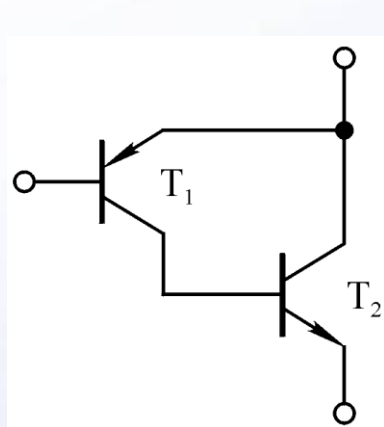
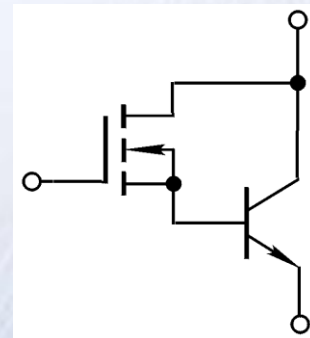
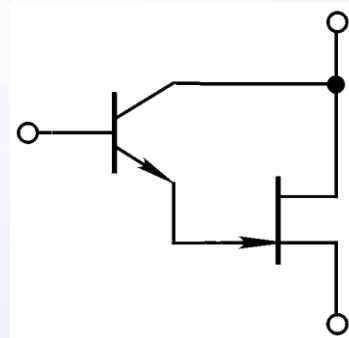
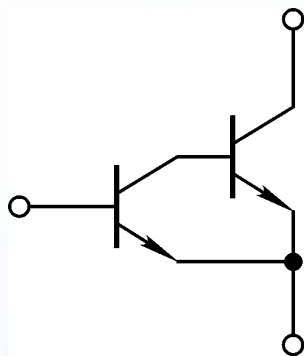
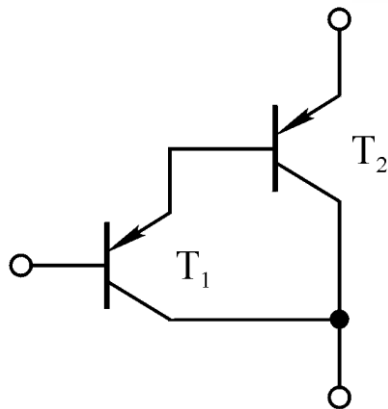
$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

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

i_B 方向决定复合管的类型

不同类型的管子复合后，其类型决定于 T_1 管。

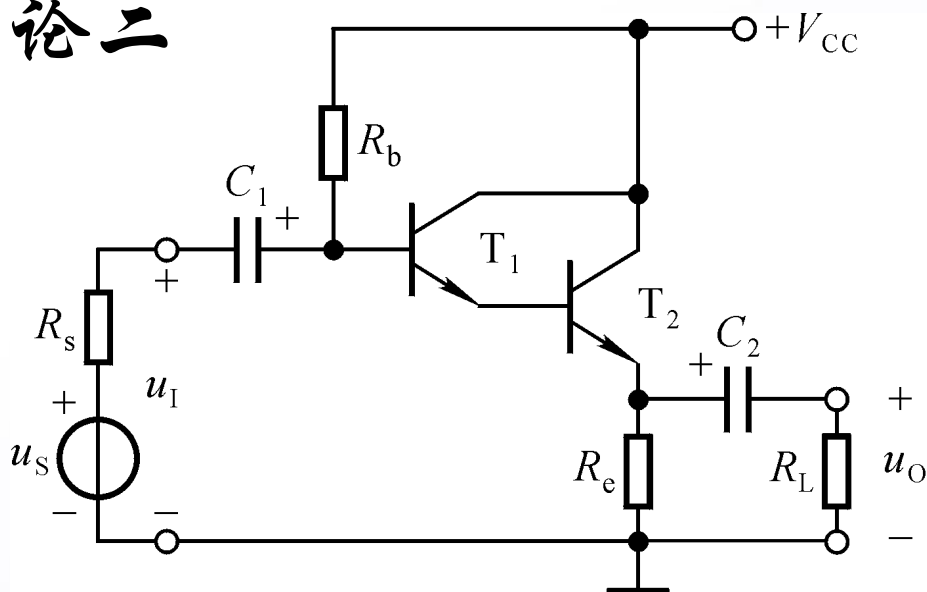
讨论一：判断下列各图是否能组成复合管



在合适的外加电压下，每只管子的电流都有合适的通路，才能组成复合管。



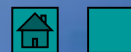
讨论二



$$R_i = ? \quad R_o = ?$$

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

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





二、派生电路举例：组合的结果带来什么好处？

