

回顾：★

1. 直流通路和交流通路

画直流通路的原则：

- ① 视电容C开路，电感L短路，
- ② 交流输入信号源视为短路，但保留其内阻

画交流通路的原则：

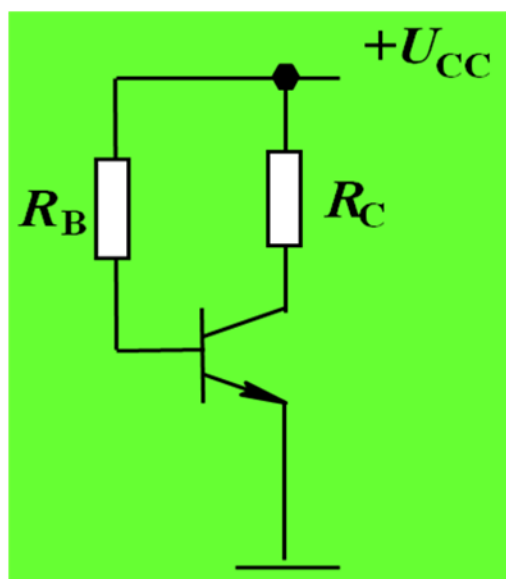
- ① 视电容C短路，电感L开路，
- ② 无内阻的直流电源（如 U_{CC} ）视为短路

静态分析:求静态工作点 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。

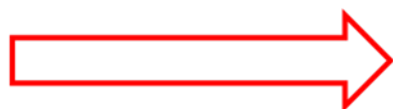
利用近似估算法（等效模型法）、图解法

!!! 先输入，后输出

1. 估算法（等效模型法）（该方法需已知 β 值）



近似估算



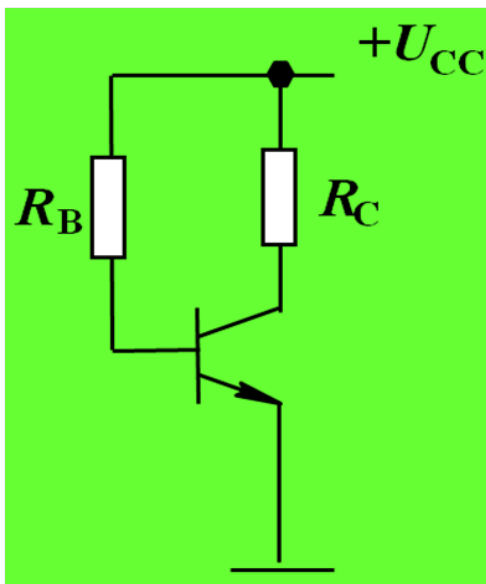
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_B}$$

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

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C$$

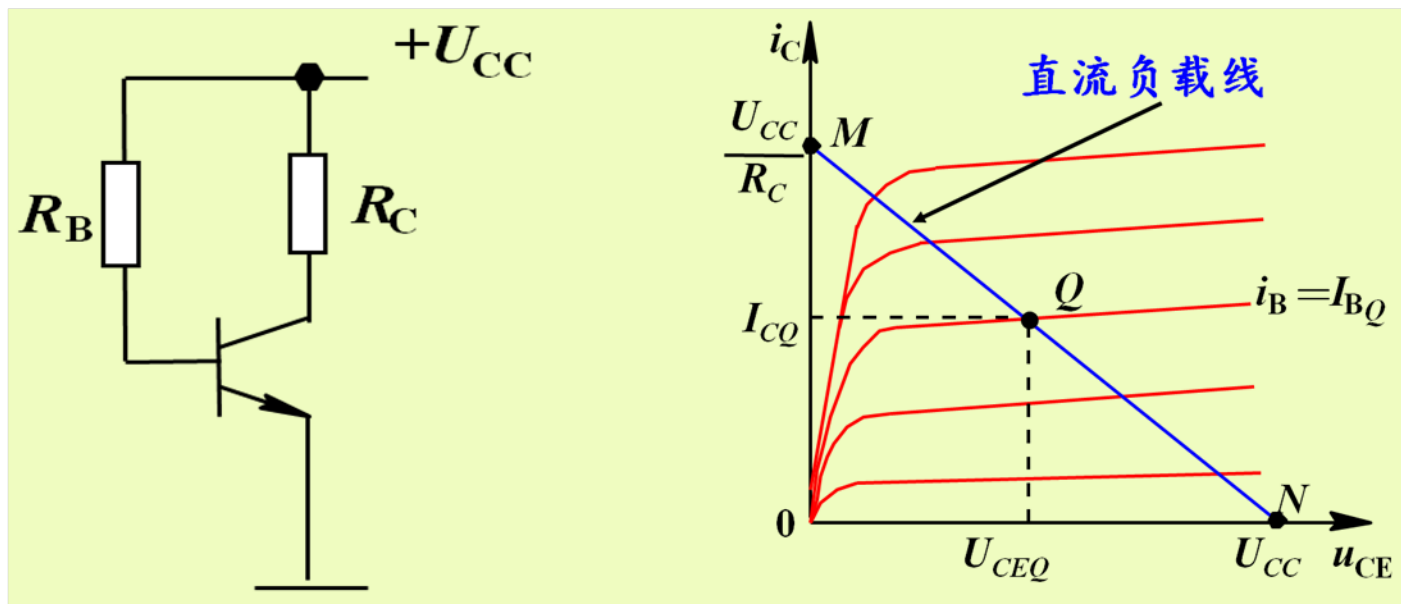
2.图解分析法：以晶体管的曲线为基础，通过作图来分析放大电路性能。

a. 先用近似估算法求输入回路的静态工作点 I_{BQ} , U_{BEQ} ：



$$U_{CC} = I_{BQ} R_B + U_{BE(on)}$$
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_B}$$

b. 再用图解法求**输出回路**的静态工作点 I_{CQ} , U_{CEQ}

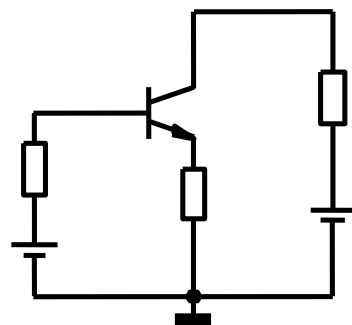


对输出回路, I_C, U_{CE} 同时满足:

$$\begin{cases} I_C = f(U_{CE}) & (\text{晶体管输出特性}) \\ U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C & (\text{输出回路的直流负载线}) \end{cases}$$

直流负载线与参变量 $I_B = I_{BQ}$ 的那条输出特性曲线的交点即为静态工作点 I_{CQ}, U_{CEQ} 。

3. 晶体管工作状态的判断方法



回顾晶体管的三种工作状态：

放大状态：发射结正偏、集电结反偏，输出电流与输入

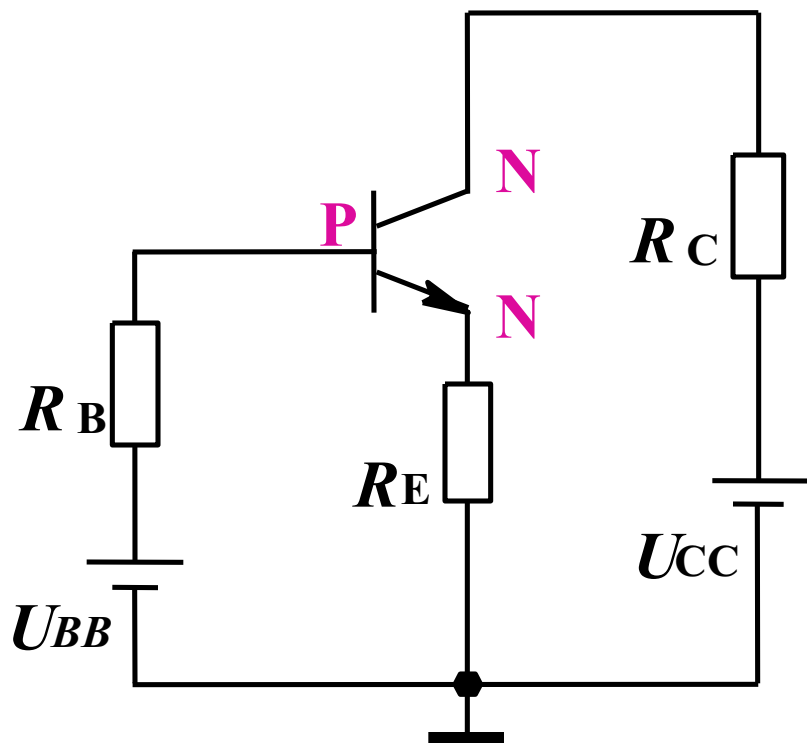
电流满足 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$

饱和状态：发射结和集电结都正偏，输出电压较低，输出电流较大(“开”态)，只决定于外电路的参量(U_{CC} , R_L), 与输入电流无关。

截止状态：发射结和集电极都反偏，输出电流很小(“关”态)。

晶体管工作状态的判断分析方法（以下图为例）

1. 先判断晶体管是否截止：



(a)电路

若 $U_{BB} \leq U_{BE(on)}$ 且 $U_{BB} < U_{CC}$ ，

晶体管截止，对应的

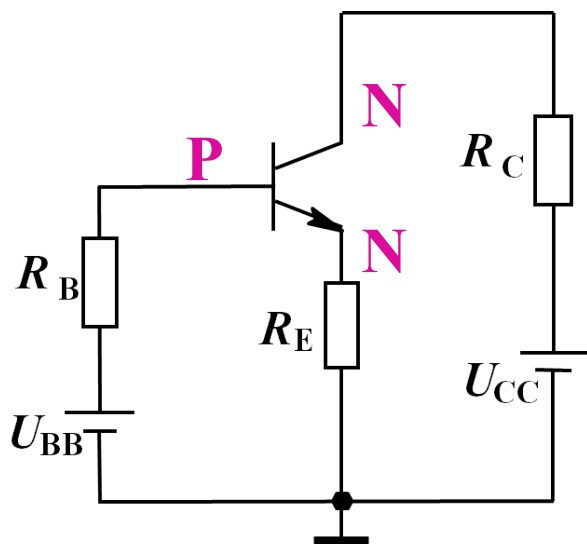
$$I_B = I_C = I_E = 0,$$

$$U_{BE} = U_{BB},$$

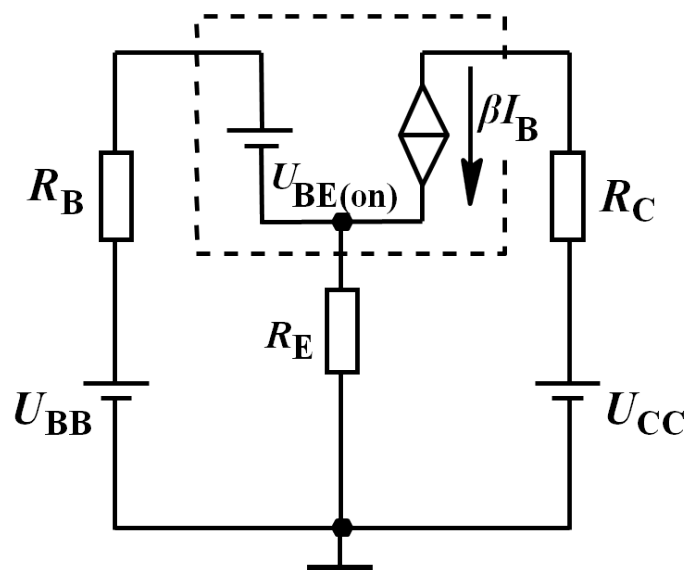
$$U_{CE} = U_{CC}。$$

若 $U_{BB} > U_{BE(on)}$, 则发射结正偏, 下面关键是判断集电结是正偏还是反偏。

2. 利用假设法判断晶体管是处于放大状态还是饱和状态:
首先假设晶体管处于放大状态, 然后画出放大状态下的等效电路(如图(b))

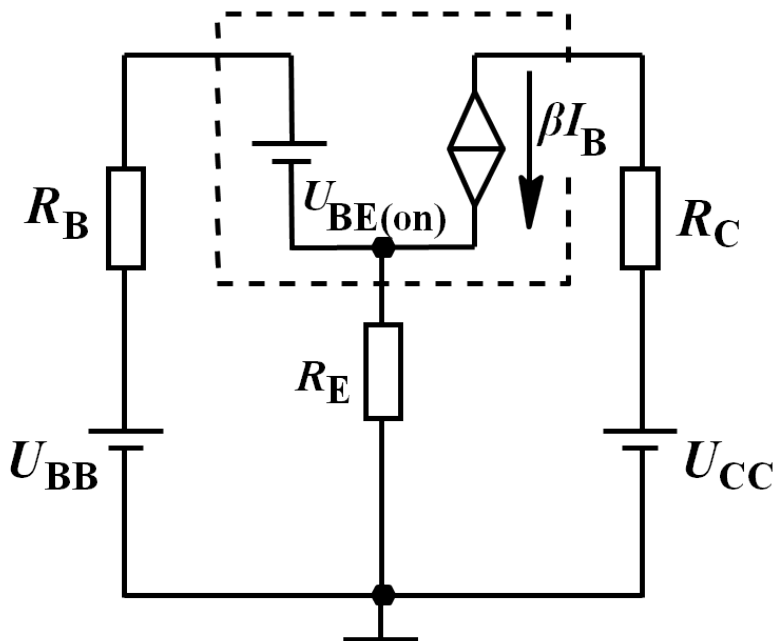


(a) 电路



(b) 放大状态下的等效电路

由图(b)可知：



(b) 放大状态下的等效电路

$$\therefore U_{BB} = I_{BQ} R_B + U_{BE(on)} + (1 + \beta) I_{BQ} R_E$$

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

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

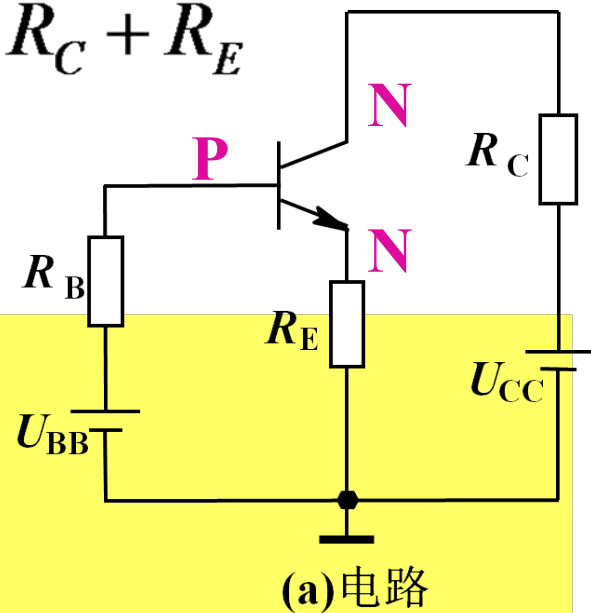
$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E)$$

1. 若 $U_{CEQ} \geq U_{BE(on)}$, 则 $U_{CBQ} \geq 0$, 说明集电结反偏, 与假设相符, 即晶体管处于**放大状态**, 上述计算结果有效;
2. 若 $U_{CEQ} < U_{BE(on)}$, 则晶体管处于**饱和状态**。

若工作在**饱和**状态下，静态工作点的求解可近似为：

$$U_{CEQ} = \overline{U_{CE(sat)}} \quad (\text{硅管为} 0.3\text{V}, \text{锗管为} 0.1\text{V}),$$

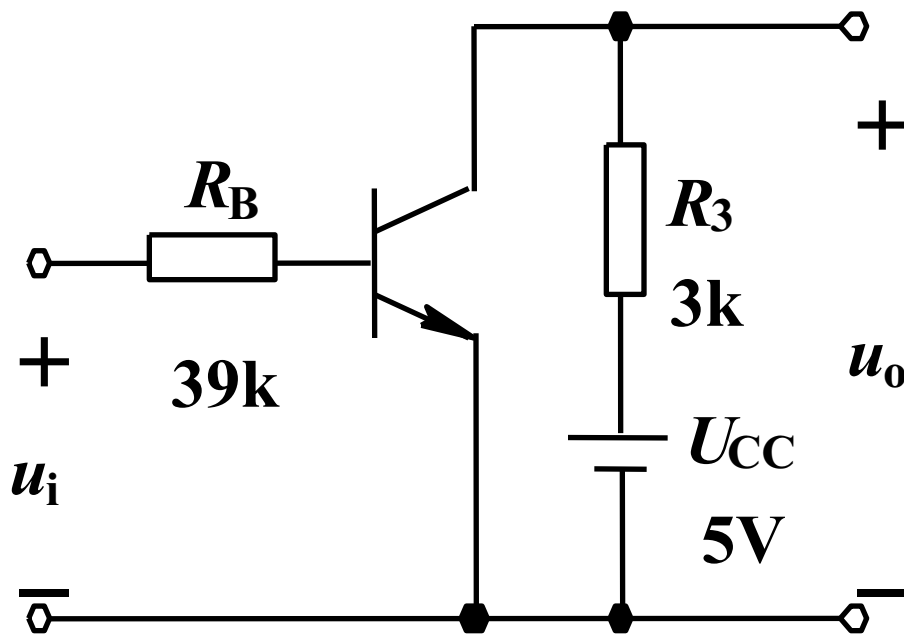
$$I_C \approx I_{C(sat)\text{临界}} = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)\text{临界}}}{R_C + R_E} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_C + R_E}$$



晶体管工作状态的判断步骤总结：

1. 先判断晶体管是否截止
2. 利用**假设法**判断晶体管是处于**放大**状态还是**饱和**状态

例：晶体硅管电路如下图所示。已知 $\beta=50$ ，
试求 u_i 分别在 $0V$ 和 $3V$ 时的输出电压 u_o 。

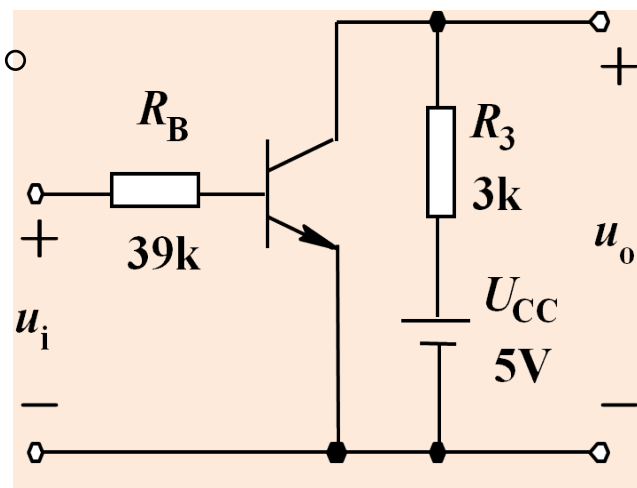


解：当 $u_i=0$ 时， $U_{BE}=0$ ，则晶体管截止。

此时， $I_{CQ}=0$ ， $u_o=U_{CEQ}=U_{CC}=5V$ 。

当 $u_i=3V$ 时，晶体管发射结导通且

$$I_{BQ} = \frac{u_i - U_{BE(on)}}{R_B} = \frac{3 - 0.7}{39} = 0.06mA$$



假设晶体管工作在放大区，则：

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.06 = 3mA$$

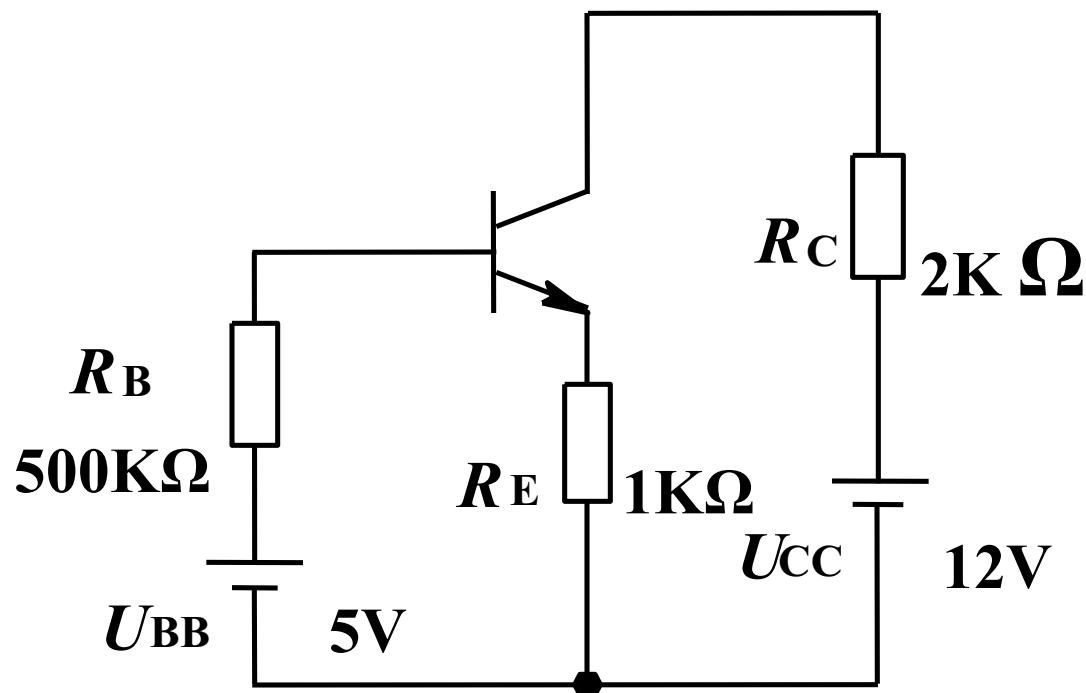
$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} \times R_3 = 5 - 3 \times 3 = -4 < 0.7V$$

因此晶体管处于饱和状态，

$$I_{CQ} \approx I_{C(sat)临界} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_C} = \frac{5 - 0.7}{3} = 1.4mA$$

$$u_o = U_{CEQ} = U_{CE(sat)} = 0.3V。$$

补充例题1、 晶体硅管电路如下图所示。已知 $\beta=100$ ，试判断晶体管的工作状态。

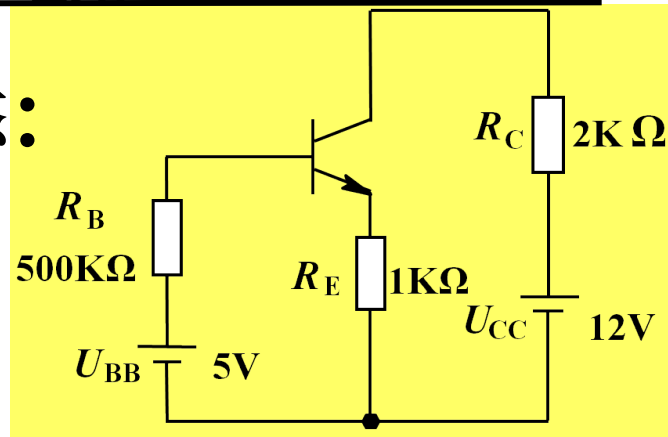


补充例题1电路

解: 1. 先判断晶体管是否处于截止状态:

$$\because U_{BB} > U_{BE(on)}, \text{ 且 } U_{BB} < U_{CC}$$

\therefore 晶体管不处于截止状态;



2. 再判断晶体管是处于放大状态还是饱和状态:

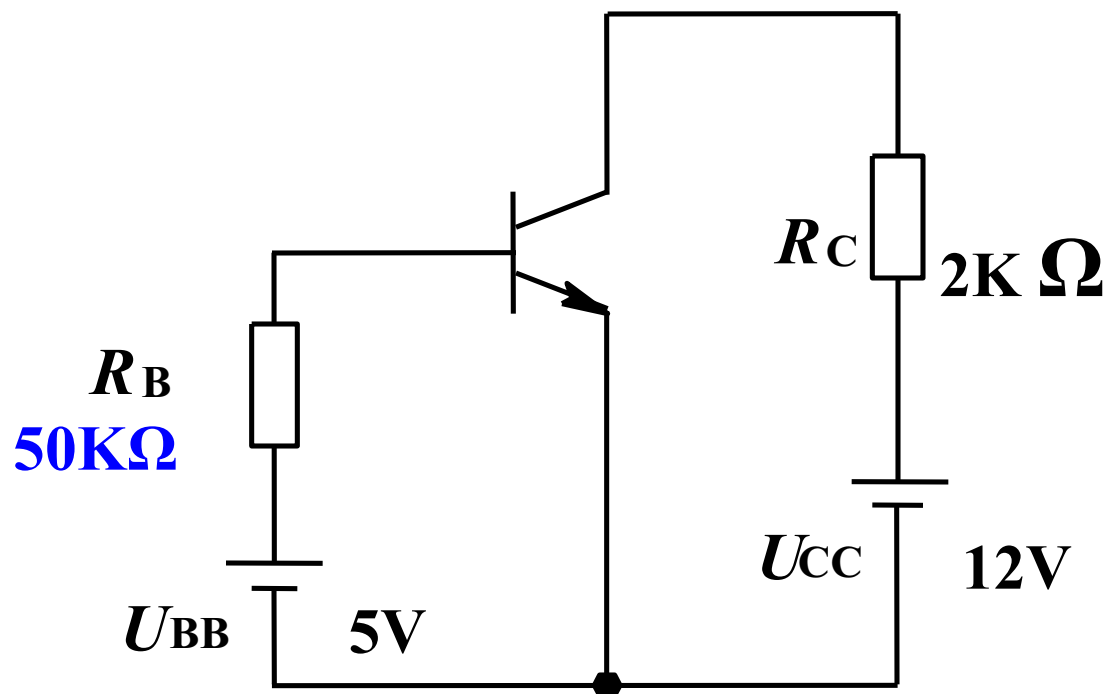
$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE(On)}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{5 - 0.7}{500 + 101} \\ = 0.72 \times 10^{-2} \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 0.72 \times 10^{-2} = 0.72 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad \because U_{CEQ} > U_{BE(on)} \\ = 12 - 0.72 \times 3 \approx 10 \text{ V}$$

\therefore 晶体管处于放大状态;

补充例题2 晶体硅管电路如下图所示。
已知 $\beta=100$ ，试判断晶体管的工作状态。



补充例题2电路

解：1. 先判断晶体管是否处于截止状态：

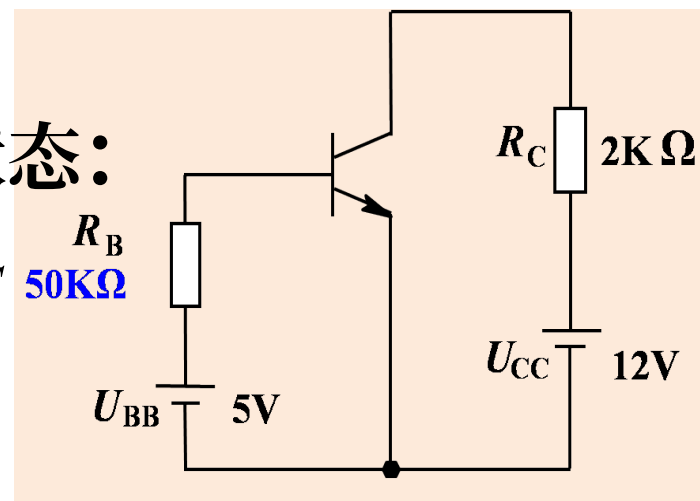
$$\because U_{BB} > U_{BE(on)}, \text{ 且 } U_{BB} < U_{CC}$$

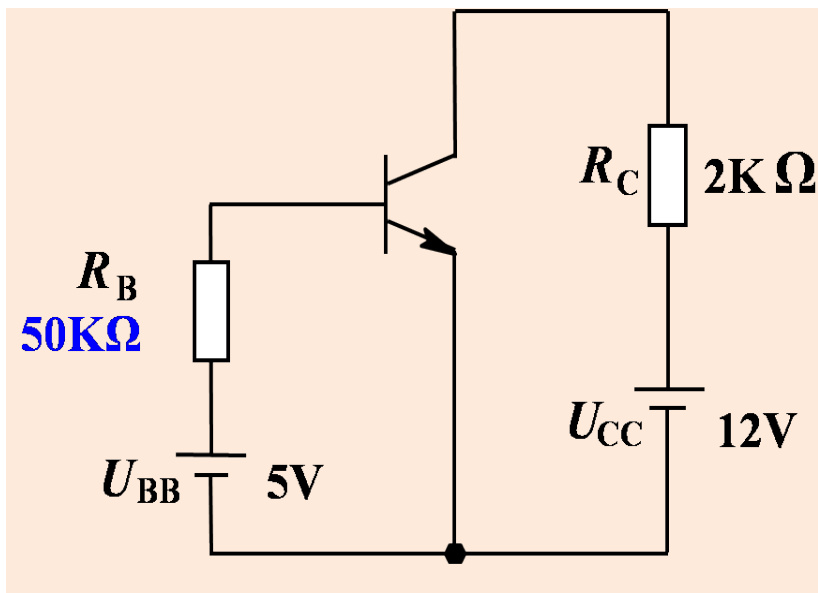
\therefore 晶体管不处于截止状态；

2. 再判断晶体管是处于放大状态还是饱和状态：

$$\because U_{BB} - U_{BE(on)} = I_{BQ} R_B$$

$$\begin{aligned} \therefore I_{BQ} &= \frac{U_{BB} - U_{BE(on)}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{50} \\ &= 8.6 \times 10^{-2} \text{ mA} \end{aligned}$$





$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 8.6 \times 10^{-2} = 8.6 \text{mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C = 12 - 8.6 \times 2 = -5.2 \text{V}$$

$$\because U_{CEQ} < U_{BE(\text{on})}$$

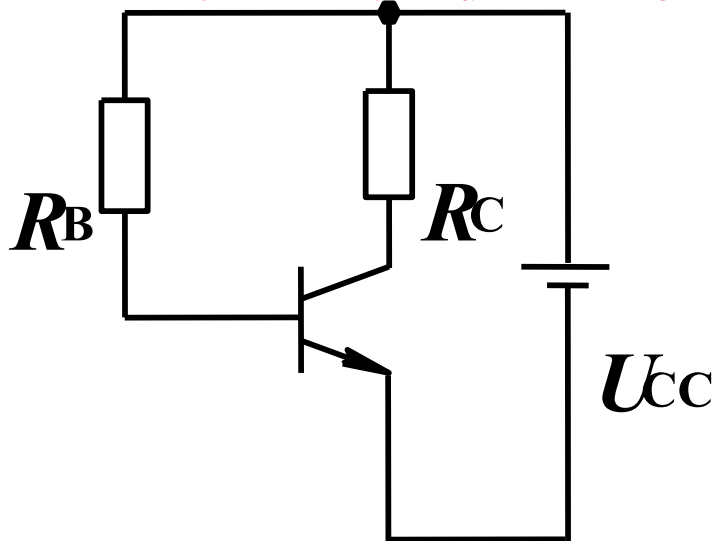
\therefore 晶体管不可能处于放大区，而应工作在饱和区；

4. 放大状态下的直流偏置电路

对偏置电路的要求是：

- ①**电路形式要简单**。例如采用一路电源，尽可能少用电阻等；
- ②偏置下的**工作点**在环境温度变化或更换管子时应力求保持**稳定**；
- ③对信号的**传输损耗应尽可能小**。下面将介绍几种常用的偏置电路。

一、固定偏流电路



由图知：

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B} \text{ 定值}$$

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

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= U_{CC} - I_{CQ} R_C \\ &= U_{CC} \left(1 - \beta \frac{R_C}{R_B} \right) \end{aligned}$$

可见，只要合理选择 R_B ， R_C 的阻值，晶体管将处于放大状态。

图 2.4.7 固定偏流电路

优点：电路结构简单

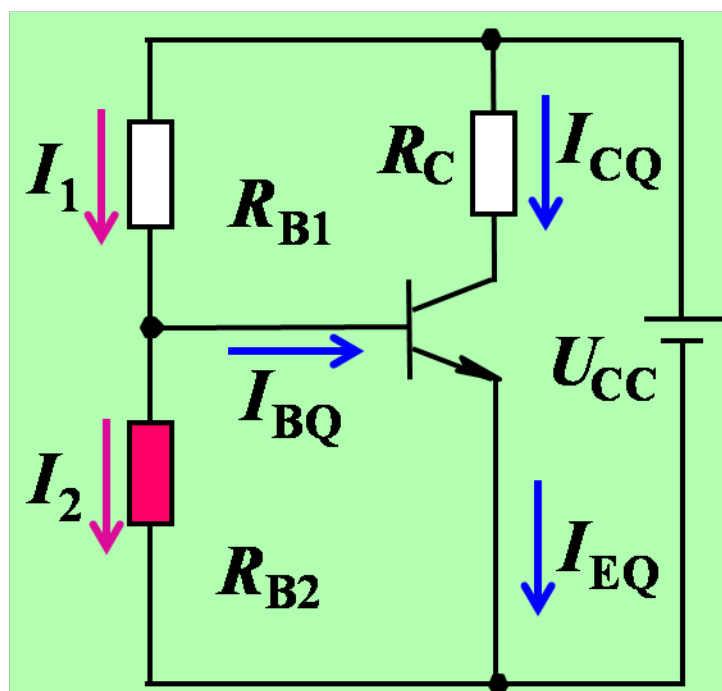
缺点：工作点稳定性差（ \because 当温度变化或更换管子时会引起 β , I_{CBO} 等变化 $\rightarrow I_{CQ}$, U_{CEQ} 变化 \rightarrow 工作点产生较大的漂移 \rightarrow 甚至使管子进入饱和区或截止区）

二、分压式直流负反馈偏置电路



(把固定偏流电路做以下改进: 稳压+负反馈)

① 为了稳定基极电位 U_{BQ} , 引入了电阻 R_{B2}



分压式偏置电路

当 $I_1, I_2 \gg I_{BQ}$ 时, $I_1 \approx I_2$

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

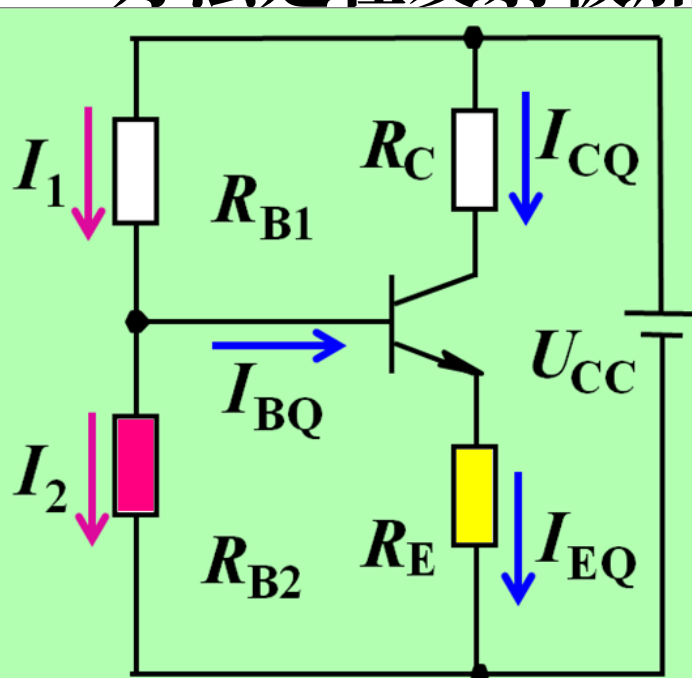
即基极电位近似等于分压回路中 R_{B2} 上的压降, 于是基极电压得到稳定。

2. 为了抑制工作点因外界变化引起的漂移, 在电路中引入自动调节机制, 用 I_{BQ} 的相反变化去自动抑制 I_{CQ} 的变化, 从而使 I_{CQ} 稳定。这种机制通常称为负反馈。实现方法是在发射极加一个电阻 R_E 。

抑制工作点漂移过程如下:

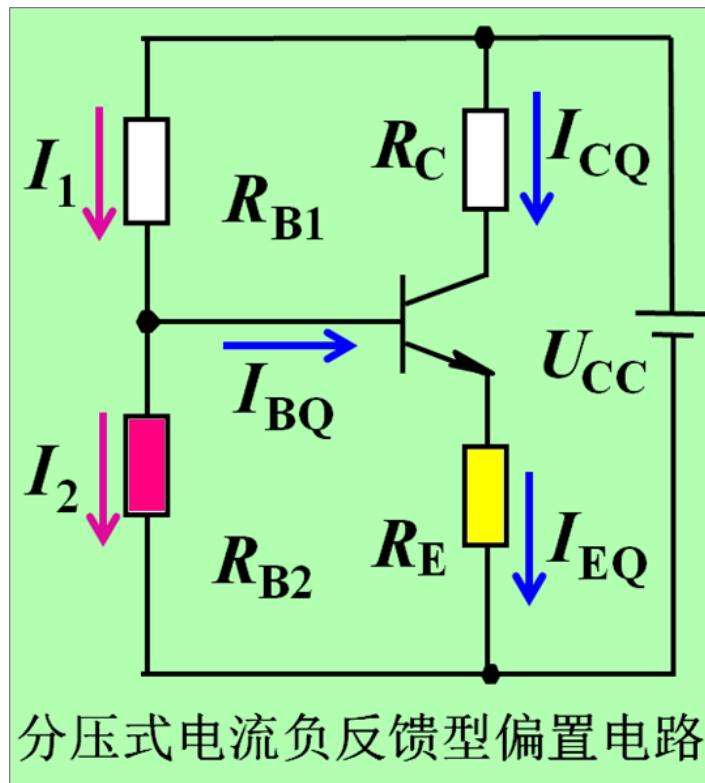
$$T \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow I_{CQ} \uparrow \Rightarrow I_{EQ} \uparrow \Rightarrow U_{EQ}(I_{EQ}R_E) \uparrow \\ \Rightarrow U_{BEQ}(= U_{BQ} - U_{EQ}) \downarrow \Rightarrow I_{BQ} \downarrow \Rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

结果 I_{CQ} 基本不变, U_{CEQ} 也基本不变, 从而克服了Q点的漂移。



分压式电流负反馈型偏置电路

分压式直流负反馈偏置电路**工作点Q**:



当 I_1 、 $I_2 \gg I_{BQ}$ 时，基极电位为

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

集电极与发射极电流为

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BE(on)}}{R_E}$$

管压降为 $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$

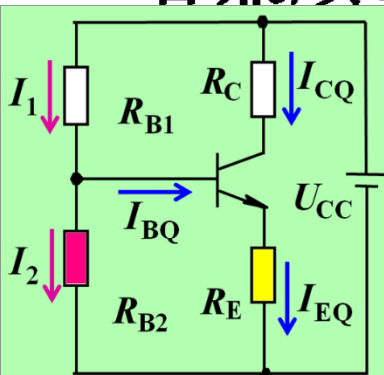
基极电流管为 $I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$

1. 为**稳定基极电压**，应满足流过 R_{B1} 、 R_{B2} 的电流 $I_1 \gg I_{BQ}$ ，这就要求 R_{B1} 、 R_{B2} 的取值愈小愈好。

2. 为了**抑制工作点的变化**通常用大的 R_E 来引入大的电流负反馈

但是 R_{B1} 、 R_{B2} 过小，将增大电源 U_{CC} 的无谓损耗；

R_E 过大会造成输出信号动态范围减小，因此要二者兼顾。通常选取



分压式电流负反馈型偏置电路

$$I_1 = (5 \sim 10) I_{BQ} (\text{硅管})$$

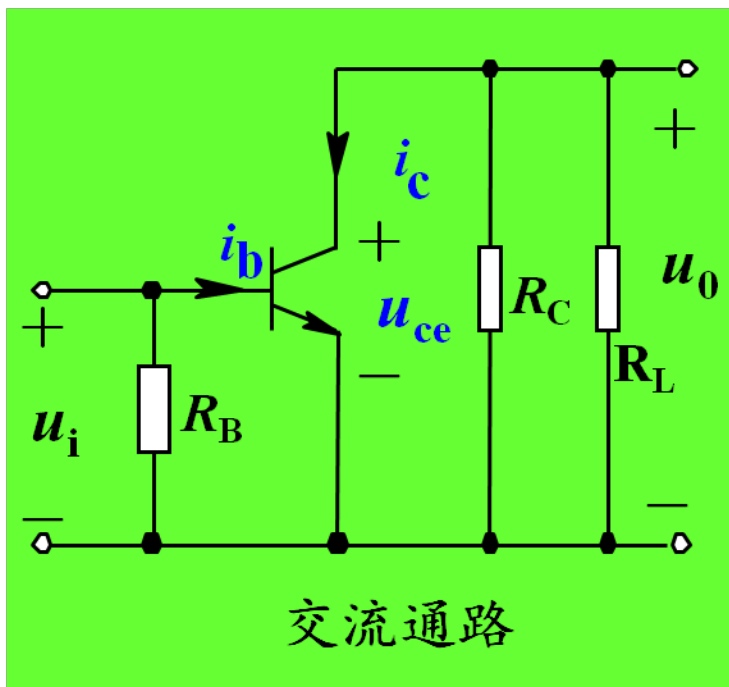
$$I_{CQ} R_E = (5 \sim 10) U_{BEQ} \approx (2 \sim 5) V$$

§3.5 共射放大电路的动态分析和设计

动态分析 { 分析指标: 放大倍数、输入电阻、输出电阻
分析方法: 图解法、小信号等效电路法

1. 交流图解分析法

是指在输入信号作用下，通过作图来确定放大管各级电流和极间电压的变化量。由于交流信号是叠加在静态工作点上的，因此交流图解法须在直流状态的基础上分析。



动态特性是由交流通路决定的

由图知 $i_c = -\frac{u_{ce}}{R_L'}$ --- 交流负载方程

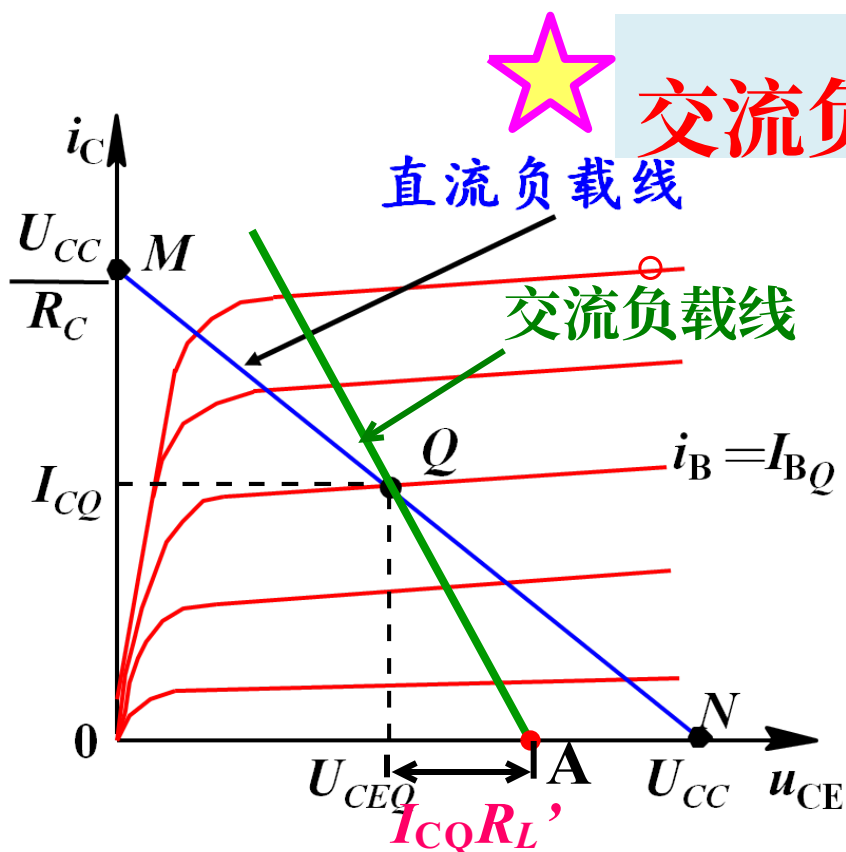
$$\therefore i_C = I_{CQ} + i_c, u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$$

$$\therefore i_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_L'} (u_{CE} - U_{CEQ})$$

其中 $R_L' = R_C // R_L$ ---- 交流负载

交流负载线 $i_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_L'} (u_{CE} - U_{CEQ})$

特点：通过静态工作点Q + 斜率为 $-1/R_L'$

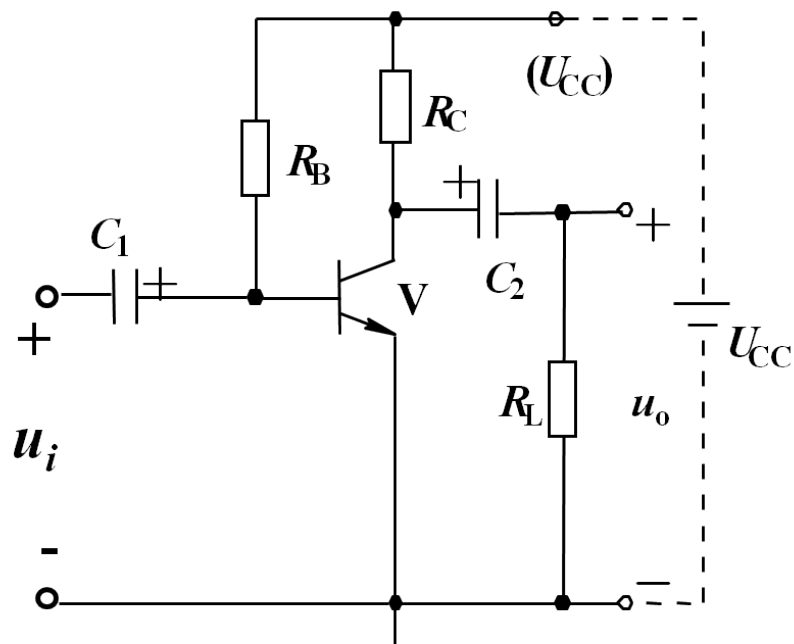


交流负载线比直流负载线 陡峭

作图方法：

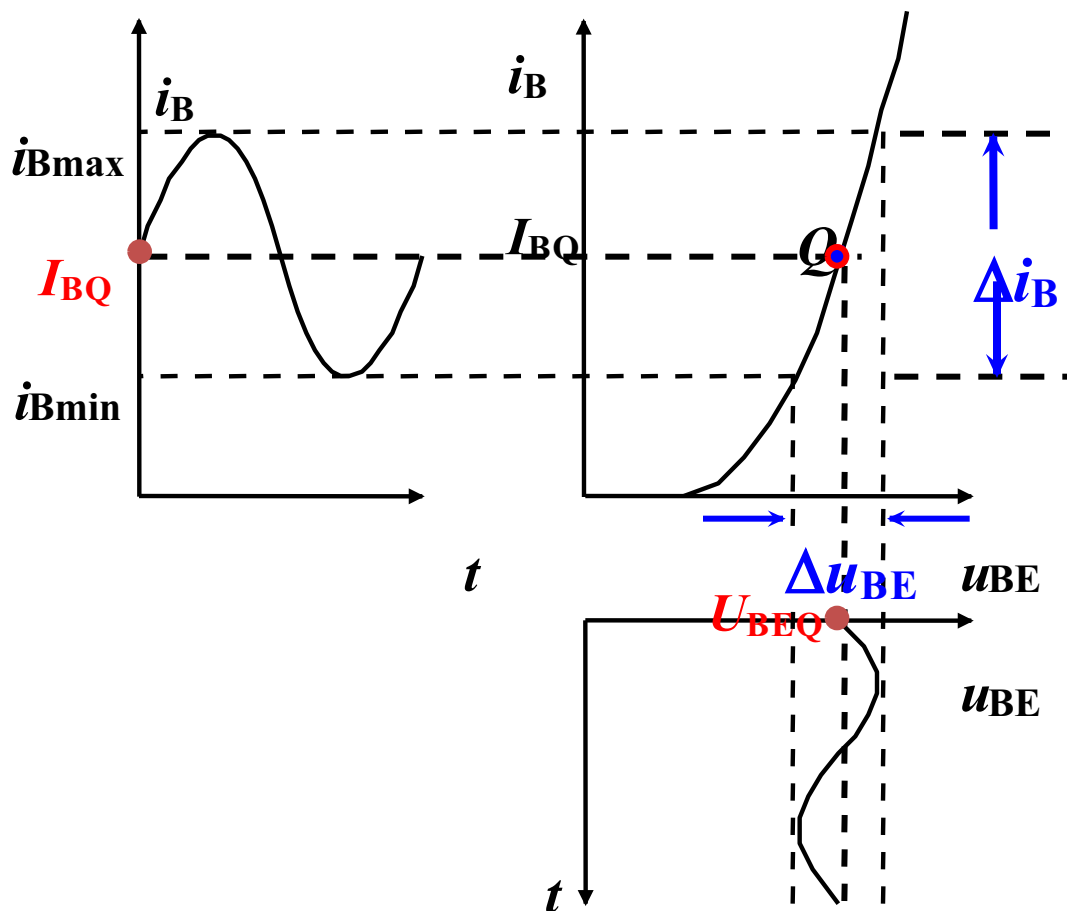
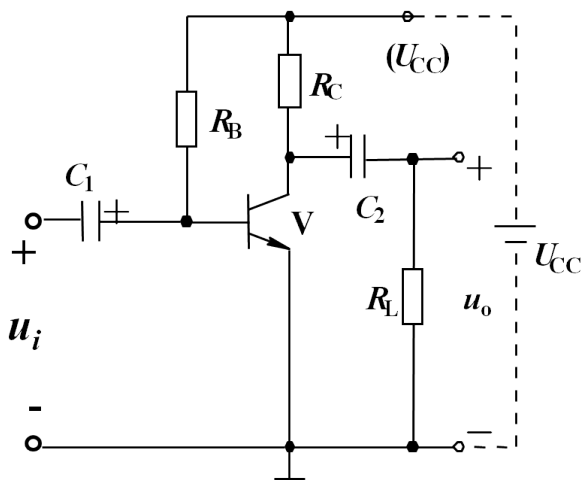
∴ 当 $i_C=0$ 时, $u_{CE}=U_{CEQ}+I_{CQ}R_L'$
-- 横轴截距

∴ 连接AQ的直线即为交流负载线, A ($0, U_{CEQ}+I_{CQ}R_L'$)

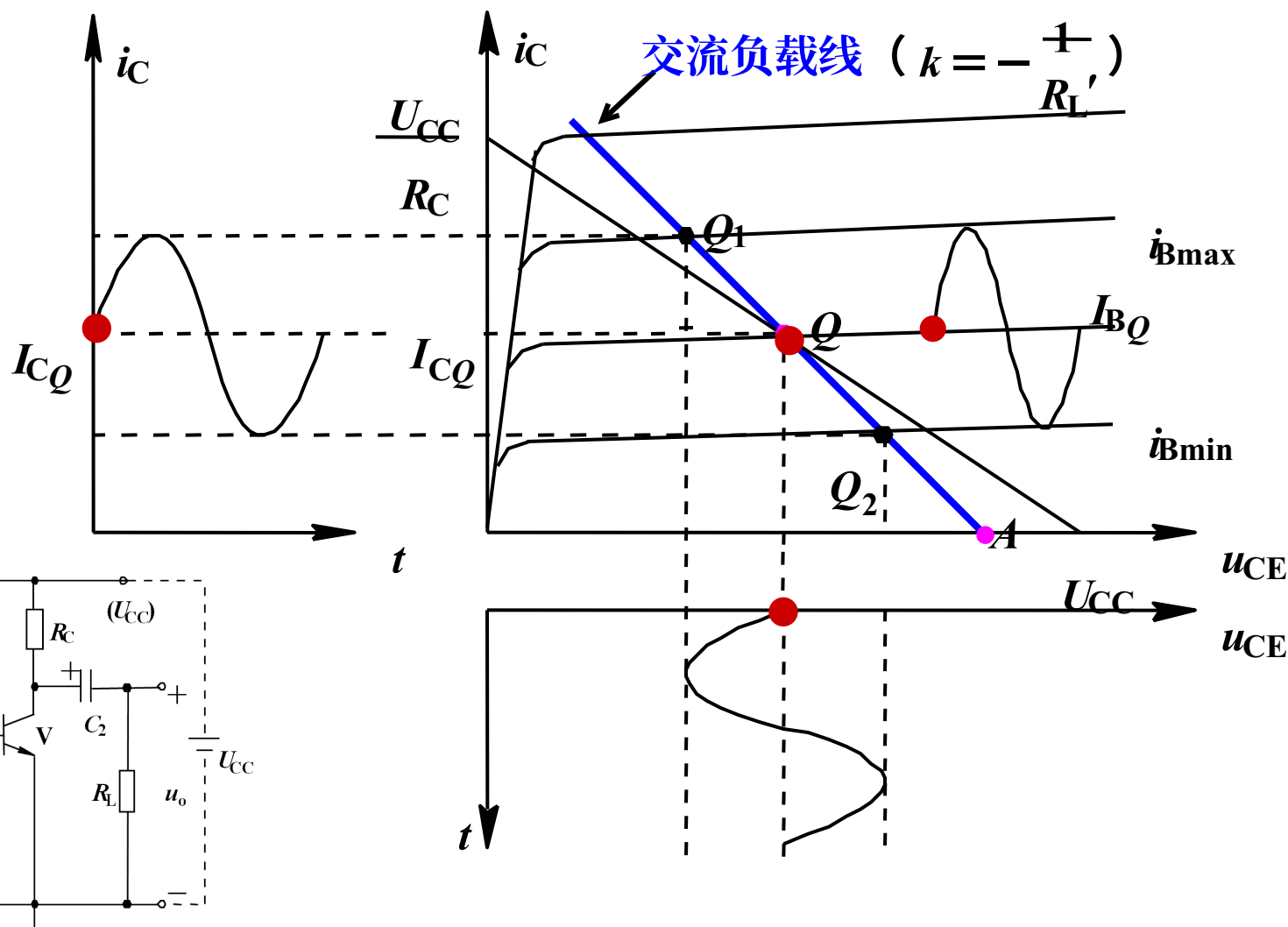


画出交流负载线之后，就可根据电流 i_B 的变化规律画出对应的 i_C 和 u_{CE} 的波形。

(a) 输入波形
(电流 i_B 的变化)



(b) 输出波形 (对应的 i_C 和 u_{CE} 的变化)



交流图解分析法步骤总结：

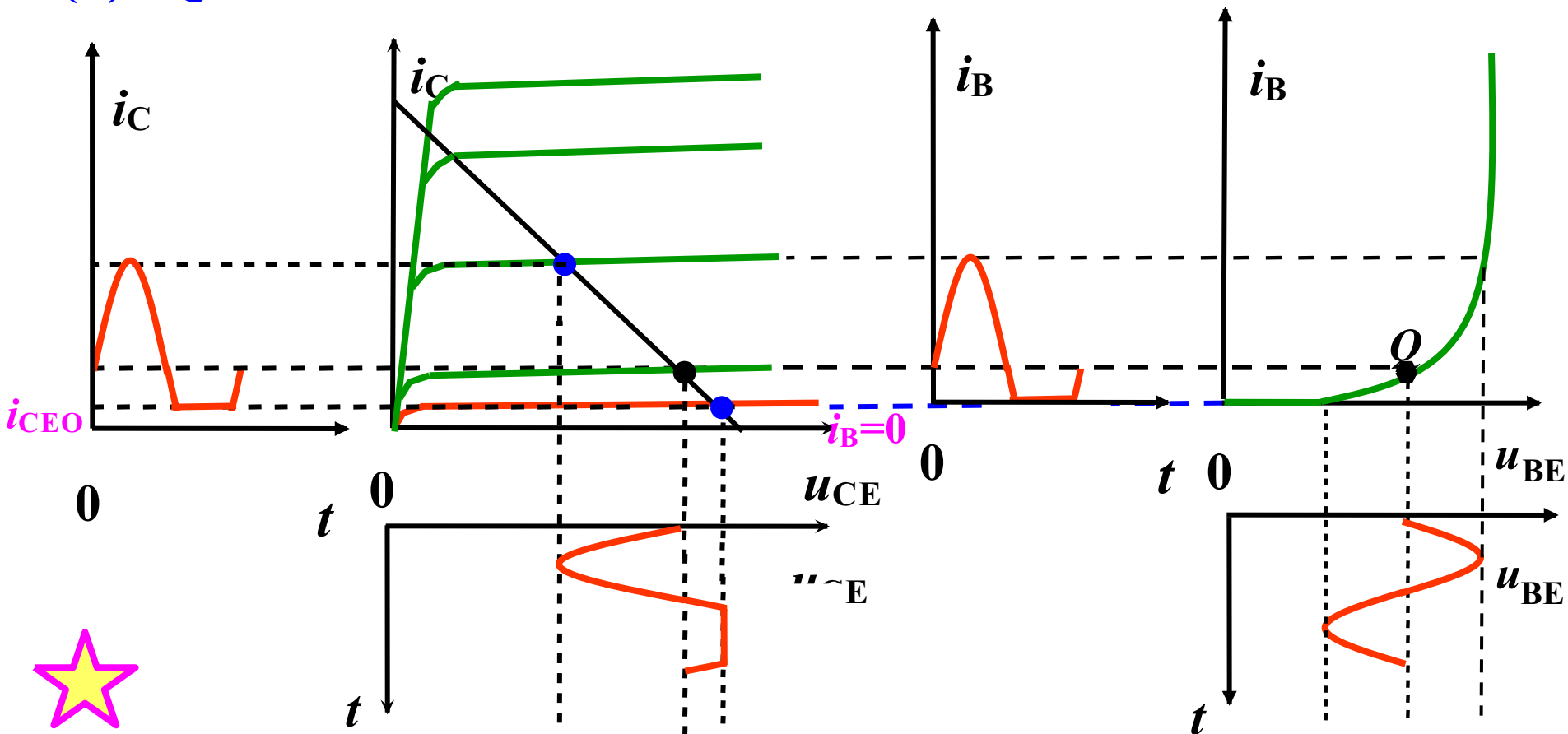
- 1、画直流通路和直流负载线；
- 2、确定静态工作点；
- 3、画交流通路和交流负载线；
4. 根据输入交流信号 u_{BE} 的变化求输入电流 i_B ；
5. 根据 i_B 的变化范围和交流负载线确定输出参数 i_C 和 u_{CE} 。

2. 放大电路的动态范围和非线性失真

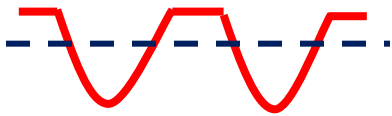
一个理想的放大器，其输出信号应当如实的反映输入信号，即波形应当是相同的。但是，在实际放大器中，由于种种原因，输入信号不可能与输入信号的波形完全相同，这种现象叫做失真。

晶体管工作在非线性区所引起的失真称为非线性失真。产生非线性失真的原因来自两个方面：一是晶体管特性的非线性；二是Q点设置不合适或输入信号过大。

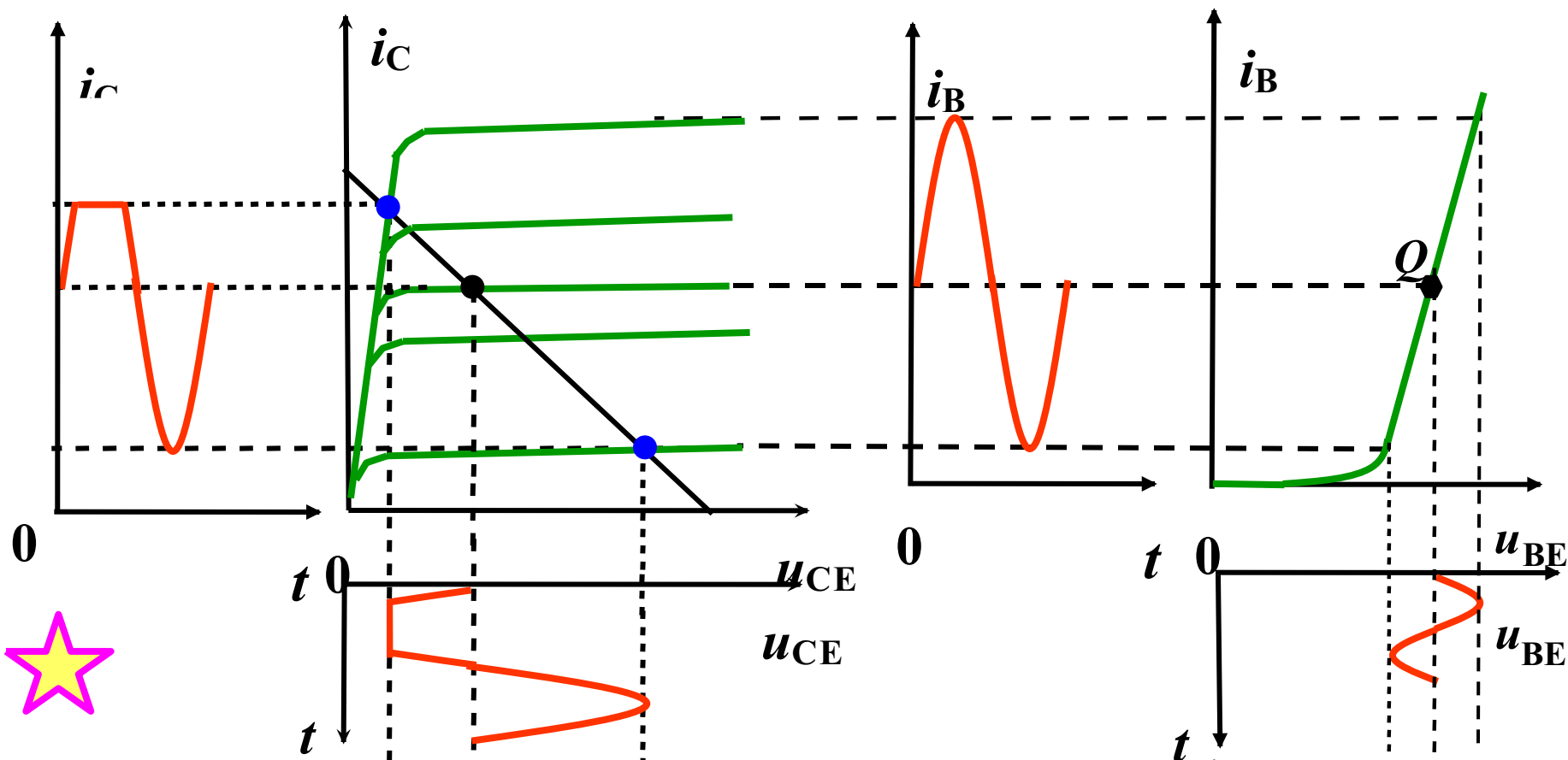
(1). Q点过低 --截止失真是在输入回路首先产生!



Q点过低→动态工作点进入截止区，出现截止失真。对NPN管的共射极放大器，发生截止失真时，其输出电压出现“胖顶”的现象（顶部限幅）。

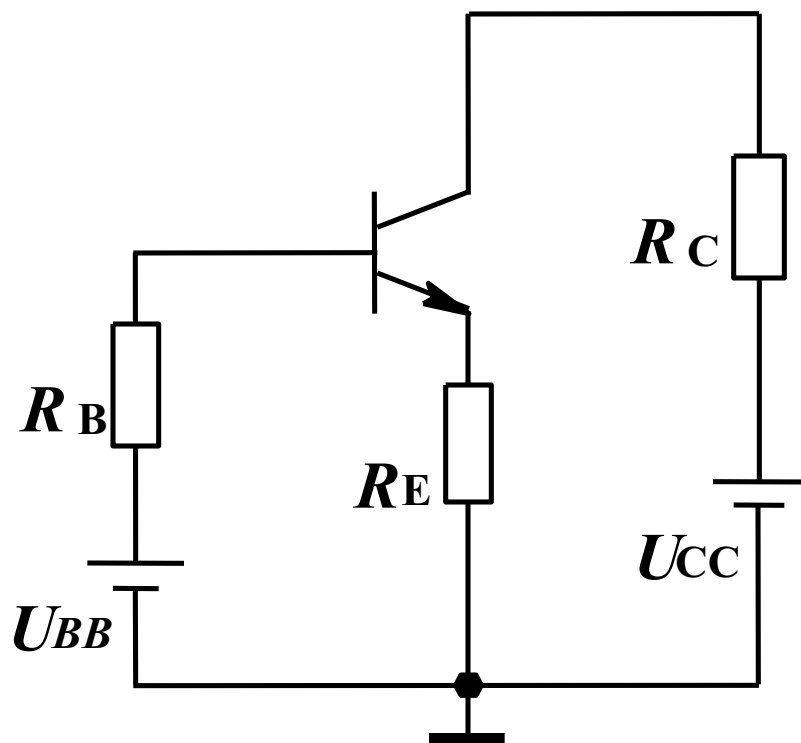


(2). Q点过高 -- 饱和失真产生于晶体管的输出回路

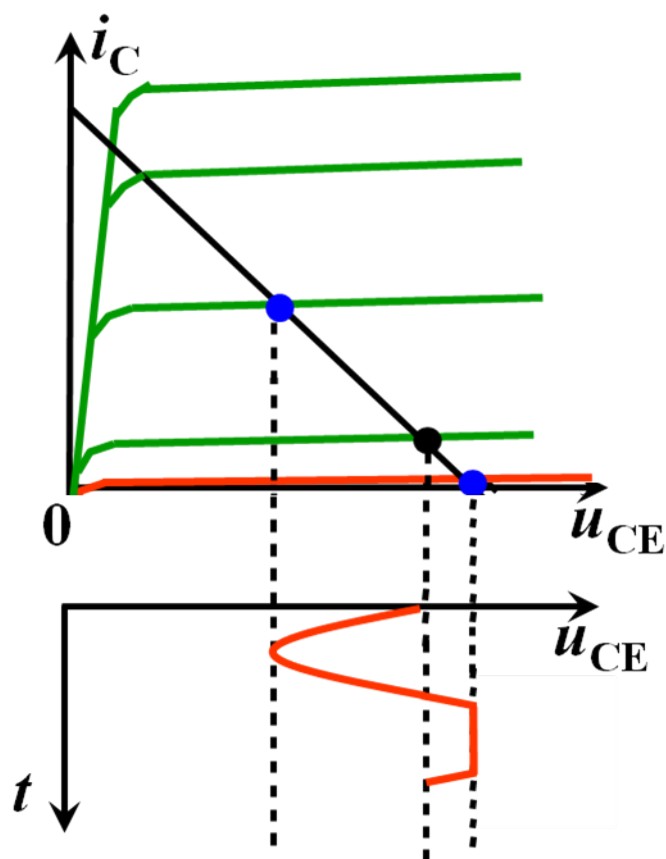


Q点过高→动态工作点进入饱和区，出现饱和失真。对NPN管的共射极放大器，发生饱和失真时，其输出电压出现“削底”现象（底部限幅）。





放大电路输出电压的幅度受到饱和区和截止区的限制。



受截止失真限制，其最大不失真输出电压的幅度为：

$$U_{om} = I_{CQ} R'_L$$



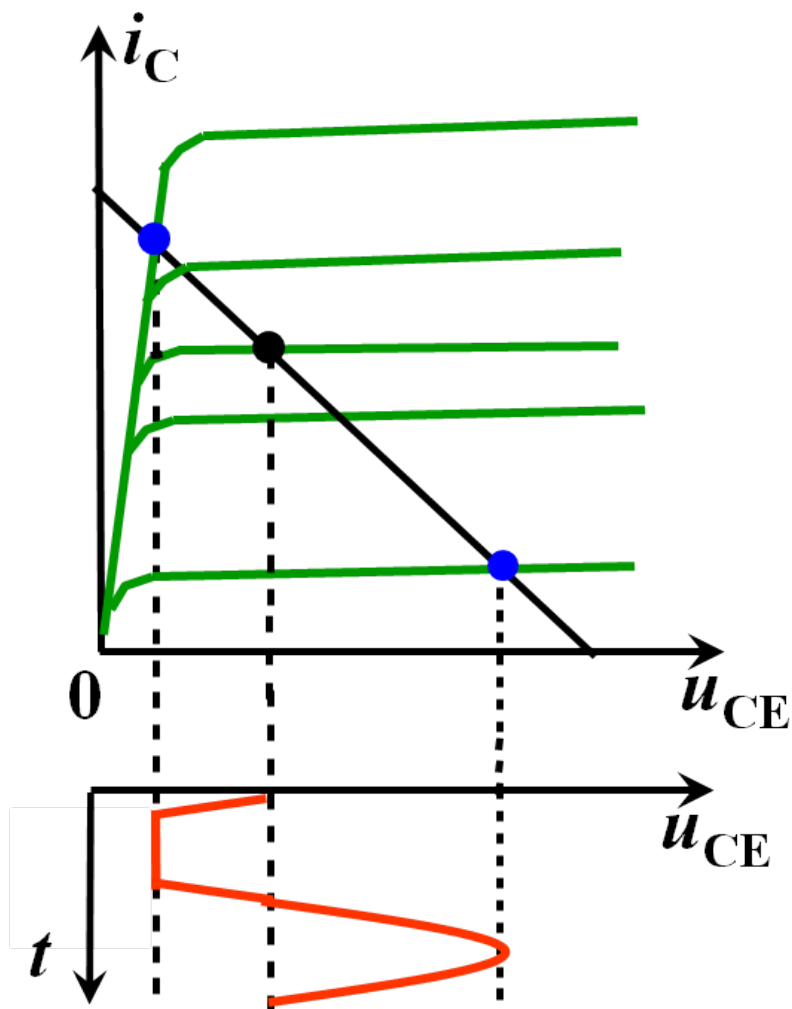
因饱和失真的限制，最大不失真输出电压的幅度为

:

$$U_{om} = U_{CEQ} - U_{cesat \text{ 临界}}$$

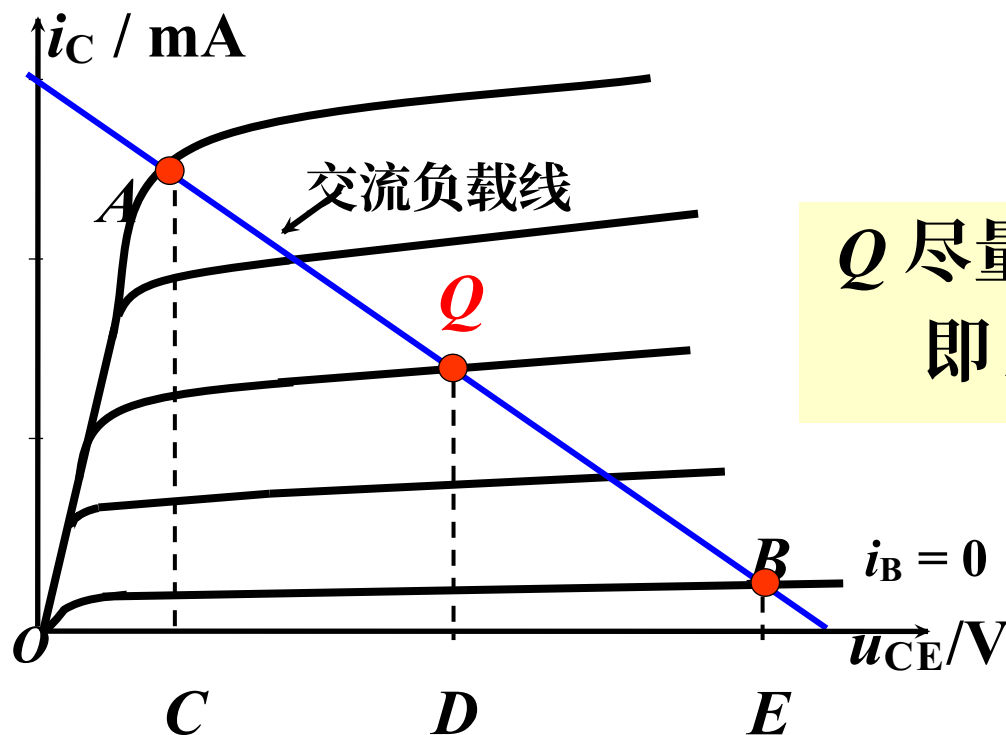
硅： $U_{cesat \text{ 临界}} = 0.7V$

锗： $U_{cesat \text{ 临界}} = 0.3V$



上述两者中较小的即为放大器最大不失真输出电压的幅度，而输出动态范围 U_{opp} 则为该幅度的两倍，即

$$U_{opp} = 2 \min [(U_{CEQ} - U_{ces\text{临界}}), I_{CQ} R_L']$$



Q 尽量设在线段 AB 的中点。
即 $AQ = QB, CD = DE$

作业:

- 3.7
- 3.9
- 3.18
- 3.20