

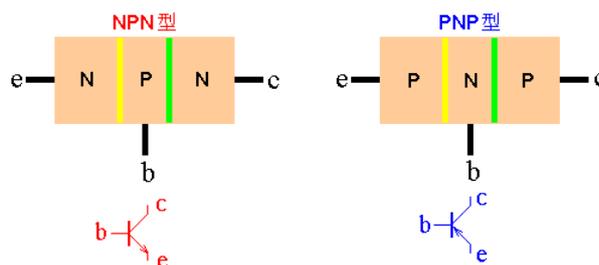
第二章 晶体三极管

知识要点：

双极型晶体管的埃伯尔斯-莫尔模型、小信号模型及其高频参数。

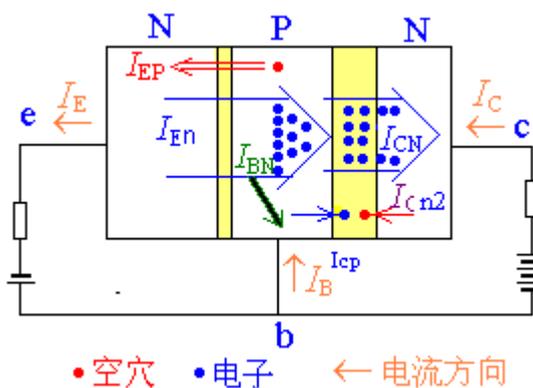
双极型晶体管的基本使用方法

晶体三极管是双极型器件 (Bipolar Junction Transistor, BJT), 由两个 PN 结组成, 三个中性区组成。引出三个电极分别为基极 (Base)、发射极 (Emitter)、集电极 (Collector)。三个中性区分别为发射区、基区、集电区。发射区与基区之间部分称做发射结, 基区与集电区之间的部分称集电结。晶体三极管分 PNP 和 NPN 型两种。结构示意图及符号见图示。



1.1 放大模式下晶体三极管的工作原理

1.1.1 内部载流传输过程



双极型半导体三极管在工作时一定要加上适当的直流偏置电压。若在放大工作状态：发射结加正向电压，集电结加反向电压。现以 NPN 型三极管的放大状态为例，来说明三极管内部的电流关系，

发射结加正偏时，从发射区将有大量的电子向基区扩散，形成的电流为 I_{EN} 。与 PN 结中的情况相同。从基区向发射区也有空穴的扩散运动，但其数量小，形成的电流为 I_{EP} 。这是因为发射区的掺杂浓度远大于基区的掺杂浓度。

进入基区的电子流因基区的空穴浓度低，被复合的机会较少。又因基区很薄，在集电结反偏电压的作用下，电子在基区停留的时间很短，很快就运动到了集电结的边上，进

入集电结的结电场区域，被集电极所收集，形成集电极电流 I_{CN} 。在基区被复合的电子形成的电流是 I_{BN} 。

另外，因集电结反偏，使集电结区的少子形成漂移电流 I_{CBO} 。于是可得如下电流关系式：

$$\begin{aligned} I_E &= I_{EN} + I_{EP} \\ I_C &= I_{CN} + I_{Cn2} + I_{Cp} = I_{Cn1} + I_{CBO} \\ I_{CBO} &= I_{Cn2} + I_{Cp} \end{aligned}$$

总结两个结共同形成基极的电流 I_B 应为：

$$I_B = I_{EP} + (I_{EN} - I_{CN}) - I_{CBO}$$

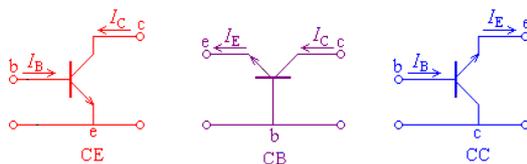
晶体管的三个电极电流满足

$$I_E = I_C + I_B$$

1.1.2 电流传输方程

电流传输方程是指晶体三极管在正向受控过程中各极电流之间的关系式。晶体管使用过程中共有 三种接法也称三种组态，见图示。

- 共发射极接法，发射极作为公共电极，用 CE 表示；
- 共集电极接法，集电极作为公共电极，用 CC 表示；
- 共基极接法，基极作为公共电极，用 CB 表示。



晶体管的三种连接方式

一、 各极电流之间的关系式

对于集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 之间的关系可以用系数来说明，定义：

$$\bar{\alpha} = I_{CN} / I_E$$

$\bar{\alpha}$ 称为共基极直流电流放大系数。它表示最后达到集电极的电子电流 I_{CN} 与总发射极电流 I_E 的比值。 I_{CN} 与 I_E 相比，因 I_{CN} 中没有 I_{EP} 和 I_{BN} ，所以 $\bar{\alpha}$ 的值小于 1，但接近 1。由此可得：

$\bar{\alpha}$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} = \bar{\alpha} (I_C + I_B) + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\bar{\alpha} I_B}{1 - \bar{\alpha}} + \frac{I_{CBO}}{1 - \bar{\alpha}}$$

定义：

$$\bar{\beta} = I_C / I_B = (I_{CN} + I_{CBO}) / I_B$$

$\bar{\beta}$ 称为共发射极接法直流电流放大系数。于是

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \left(\frac{\bar{\alpha} I_B}{1 - \bar{\alpha}} + \frac{I_{CBO}}{1 - \bar{\alpha}} \right) \frac{1}{I_B}$$

$$= \left(\frac{\bar{\alpha} I_B}{1 - \bar{\alpha}} \right) \frac{1}{I_B}$$

$$= \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

因 $\bar{\alpha} \approx 1$, $\beta \gg 1$

$$\bar{I}_C = \bar{\beta} I_B$$

$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B + I_{CBO} \approx (1 + \bar{\beta}) I_B + I_{CEO}$$

忽略 I_{CEO} 其近表达式为

$$I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

二、 $\bar{\beta}$ 和 I_{CEO} 的物理含义

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

上式表明 $\bar{\beta}$ 实际上表示 I_B 中受发射结电压控制的电流成分 $I_B - I_{CBO}$ 对集电极正向受控电流成分 $I_{CN} = I_C - I_{CBO}$ 的控制能力。通常 I_{CBO} 很小，可忽略， $\bar{\beta}$ 可简化为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

1.1.3 一般模型

一、指数模型

$$I_E = I_{EBS} (e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1) \approx I_{EBS} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

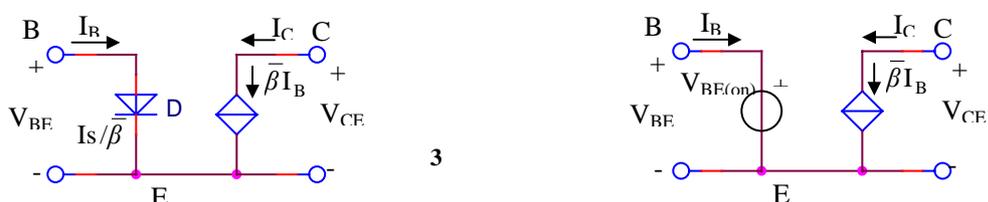
$$I_C = \bar{\alpha} I_E = \bar{\alpha} I_{EBS} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_S = \bar{\alpha} I_{EBS}$$

二、简化电路模型

晶体管在共发射极连接时，可以用简化电路表示。如下面图(a)示。

在工程分析时，输入二极管还可以进一步用简化二极管模型表示 (b)，其中 $V_{BE(on)} = 0.7V$ 。



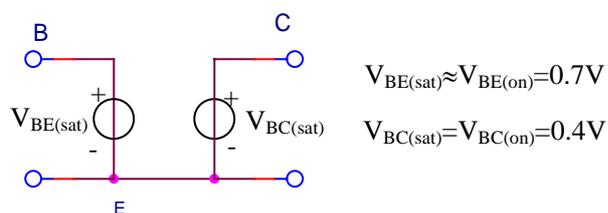
(a)

(b)

1.2 晶体三极管的其它工作模式

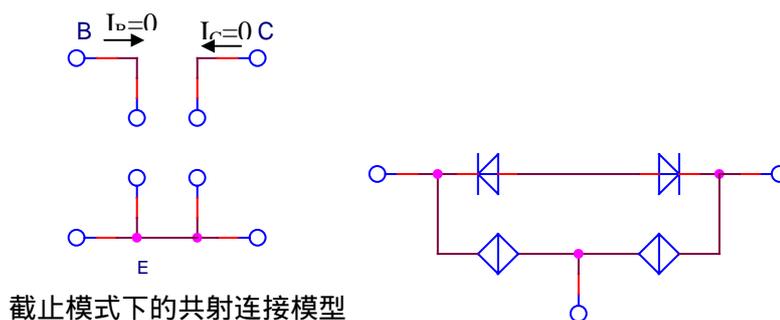
1.2.1 饱和模式

饱和模式下两个结均正偏，且已失去正向受控作用。可近似用两个导通电压表示，分别为 $V_{BE(sat)}$ 和 $V_{BC(sat)}$ 称为饱和导通电压。对于硅管，一般取



1.2.2 截止模式

在截止模式下，两个结均反向偏置，简化电路用两段开路线表示。



1.3 埃伯尔斯-莫尔模型

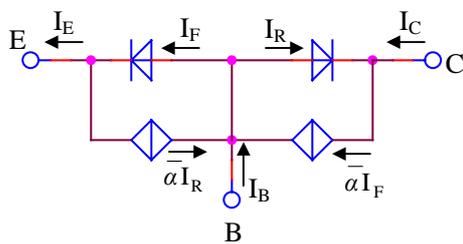
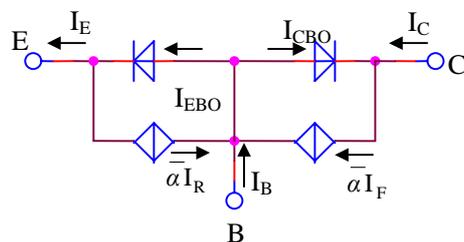


图 2-3-1(a)



(2-3-1)(b)

$$\left. \begin{aligned} I_F &= I_{EBS} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \\ I_R &= I_{CBS} \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-3-1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_C &= \bar{\alpha}_F I_F - I_R = \bar{\alpha}_F I_{EBS} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) - I_{CBS} \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) \\ I_E &= I_F - \bar{\alpha}_R I_R = I_{EBS} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) - \bar{\alpha}_R I_{CBS} \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-3-2)$$

$$I_B = I_E - I_C = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{EBS} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CBS} \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) \quad (2-3-3)$$

上述公式模型如图 2-3-1(a) 示, 称为埃伯尔斯-莫尔模型 (Ebers-Moll Model), 图 2-3-1(b) 所示模型的数学方程可从上述三个式子变换而来。

$$\left. \begin{aligned} I_E &= (1 - \bar{\alpha}_R I_F) + \bar{\alpha}_R I_C = I_{CBO} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) + \bar{\alpha}_R I_C \\ I_C &= \bar{\alpha}_F I_E - (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_R = \bar{\alpha}_F I_E - I_{CBO} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \end{aligned} \right\}$$

$$I_{EBO} = (1 - \bar{\alpha}_R I_F) I_{EBS}, I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_{CBS}$$

1.4 晶体三极管的伏安特性曲线

伏安特性曲线也是用来描述三极管各极电流与两个结电压之间的关系的。

特性曲线分输入特性曲线和输出特性曲线，即（共发射极连接时）

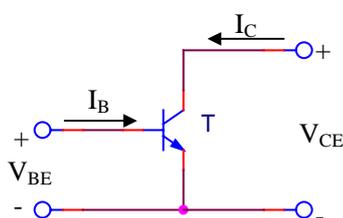
输入特性曲线—— $i_B = f(v_{BE}) \Big|_{v_{CE} = \text{const}}$

输出特性曲线—— $i_C = f(v_{CE}) \Big|_{i_B = \text{const}}$

i_B 是输入电流， v_{BE} 是输入电压，加在 B、E 两电极之间。

i_C 是输出电流， v_{CE} 是输出电压，从 C、E 两电极取出。

共发射极接法的供电电路和电-压电流关系如图示。

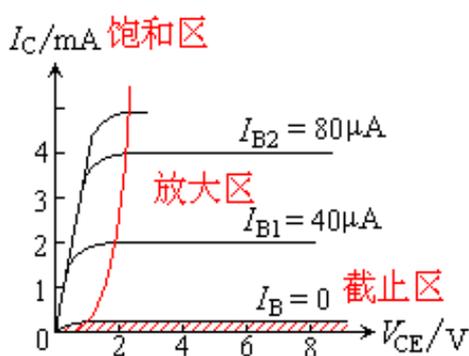


一、 输入特性曲线

当 v_{BE} 一定时，随着 v_{CE} 的增大， i_B 将响应减小，其中， v_{CE} 在 (0-0.3V) 范围内变化时，集电结为正偏，晶体管工作在饱和模式，因而，当 v_{BE} 一定时， v_{CE} 自 0.3V 减小到 0V 时，集电结正偏电压增大，饱和加深，导致 i_B 迅速增大。当 v_{CE} 大于 0.3V 时，集电结反偏，晶体管工作在放大模式， i_B 几乎不随 v_{CE} 变化。

输入特性曲线的多条曲线系基区宽度调制效应所致。

二、 输出特性曲线



共发射极接法的输出特性曲线是以 i_B 为参变量的一族特性曲线。现以其中任何一条加以说明，当 $v_{CE}=0V$ 时，因集电极无收集作用， $i_C=0$ 。当 v_{CE} 微微增大时，发射结虽处于正向电压之下，但集电结反偏电压很小，如 $v_{CE}<1V$ ； $v_{BE}=0.7V$ ； $v_{CB}=v_{CE}-v_{BE} \approx -0.7V$ 。集电区收集电子的能力很弱， i_C 主要由 v_{CE} 决定。当 v_{CE} 增加到使集电结反偏电压较大时，如 $v_{CE} \approx 1V$ ， $v_{BE} \approx 0.7V$ ，运动到集电结的电子基本上都可以被集电区收集，此后 v_{CE} 再增加，电流也没有明显的增加，特性曲线进入与 v_{CE} 轴基本平行的区域（这与输入特性曲线随 v_{CE} 增大而右

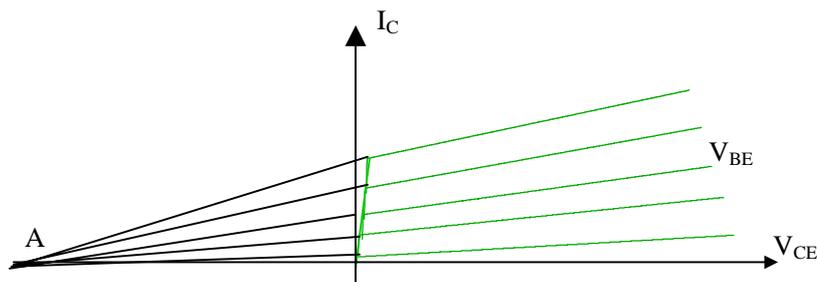
移的原因是一致的)。

输出特性曲线可以分为三个区域

饱和区—— i_C 受 v_{CE} 显著控制的区域,该区域内 v_{CE} 的数值较小,一般 $v_{CE} < 0.7V$ (硅管)。此时发射结正偏,集电结正偏或反偏电压很小。

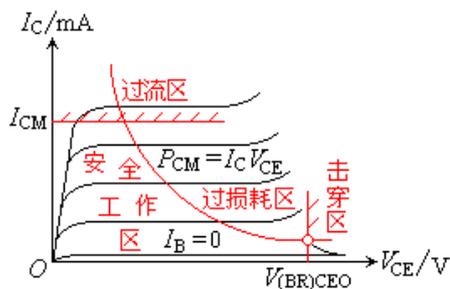
截止区—— i_C 接近零的区域,相当 $i_B=0$ 的曲线的下方。此时,发射结反偏,集电结反偏。

放大区—— i_C 平行于 v_{CE} 轴的区域,曲线基本平行等距。此时,发射结正偏,集电结反偏,电压大于 $0.7V$ 左右(硅管)



若参变量 I_B 变为 V_{BE} ,并将不同的 V_{BE} 各条输出特性曲线向负方向延伸,它们将近似相交于公共点A 上。对应的电压用 V_A 表示,称为厄尔利电压(Early Voltage)。

三、极限参数



$V_{(BR)CEO}$,

I_{CM} (Maximum Collector Current)

P_{CM} (Maximum Power Dissipation)

由最大集电极功率损耗 P_{CM} 、 I_{CM} 和击穿电压 $V_{(BR)CEO}$, 在输出特性曲线上还可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。

1.5 晶体三极管的小信号电路模型

设晶体管的各极电压和电流均为直流量上迭加交流量组成,其中直流量时直流工作点Q所确定的电压和电流,即

$$i_B = I_{BQ} + i_b ; v_{BE} = V_{BEQ} + v_{be} ;$$

$$i_C = I_{CQ} + i_c ; v_{CE} = V_{CEQ} + v_{ce} ;$$

数学上,晶体三极管的小信号模型可由下列分析步骤导出。

$$i_B = f_1(v_{BE}, v_{CE}), i_C = f_2(v_{BE}, v_{CE})$$

$$i_B = f_1(v_{BE}, v_{CE}) = f_1(V_{BEQ}, V_{CEQ}) + \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right|_Q v_{be} + \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{CE}} \right|_Q v_{ce}$$

$$i_C = f_2(v_{BE}, v_{CE}) = f_2(V_{BEQ}, V_{CEQ}) + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q v_{be} + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_Q v_{ce}$$

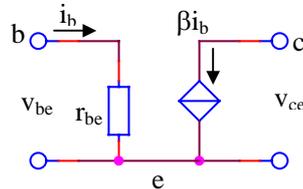
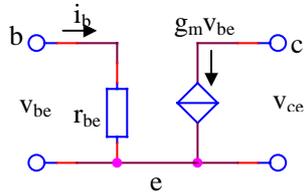
上述各式交流量之间的关系为:

$$i_b = \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right|_Q v_{be} + \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{CE}} \right|_Q v_{ce} = g_{be} v_{be} + g_{bc} v_{ce}$$

$$i_c = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q v_{be} + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_Q v_{ce} = g_m v_{be} + g_{ce} v_{ce}$$

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_E} \frac{\partial i_E}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{\alpha}{r_e}$$

$$g_{be} = \left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \left. \frac{\partial i_E}{\partial v_{BE}} \frac{\partial i_C}{\partial i_E} \frac{\partial i_B}{\partial i_C} \right|_Q = \frac{\alpha}{r_e \beta} = \frac{1}{(1+\beta)r_e}$$



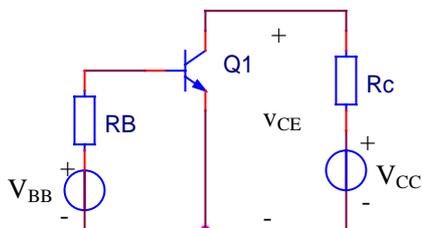
$$\frac{1}{r_e} = \left. \frac{\partial i_E}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{\partial}{\partial v_{BE}} [I_{EBS} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}] \Big|_{v_{BE}=V_{BEQ}} = \frac{I_{EQ}}{V_T}$$

$$\beta = g_m r_{be}$$

混合π型电路模型

1.6 晶体三极管电路分析方法

1.6.1 图解分析法



1. 直流分析

输入回路：

$$V_{BE} = V_{BB} - I_B R_B,$$

$$I_B = 0, V_{BE} = V_{BB}$$

$$V_{BE} = 0, I_B = V_{BB} / R_B;$$

直流负载线

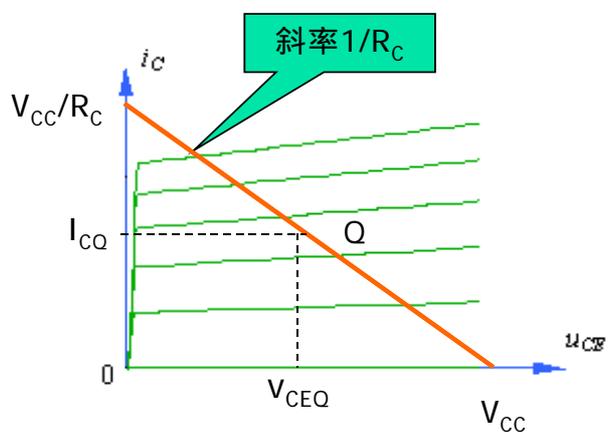
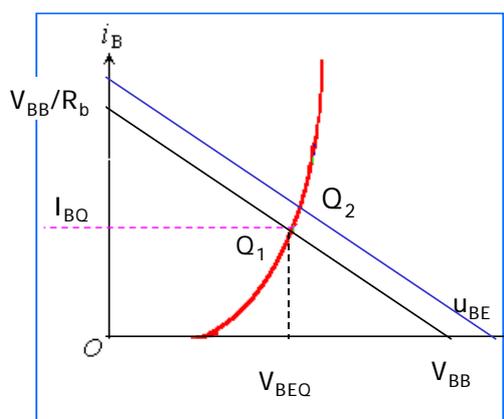
输出回路

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

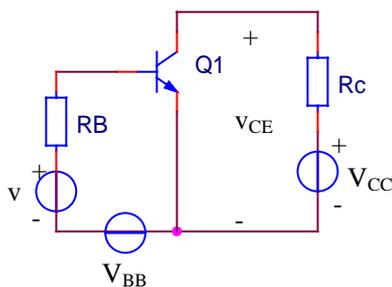
$$I_C = 0, V_{CE} = V_{CC}$$

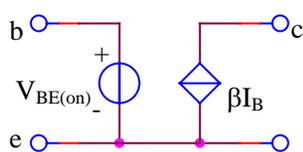
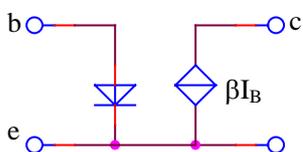
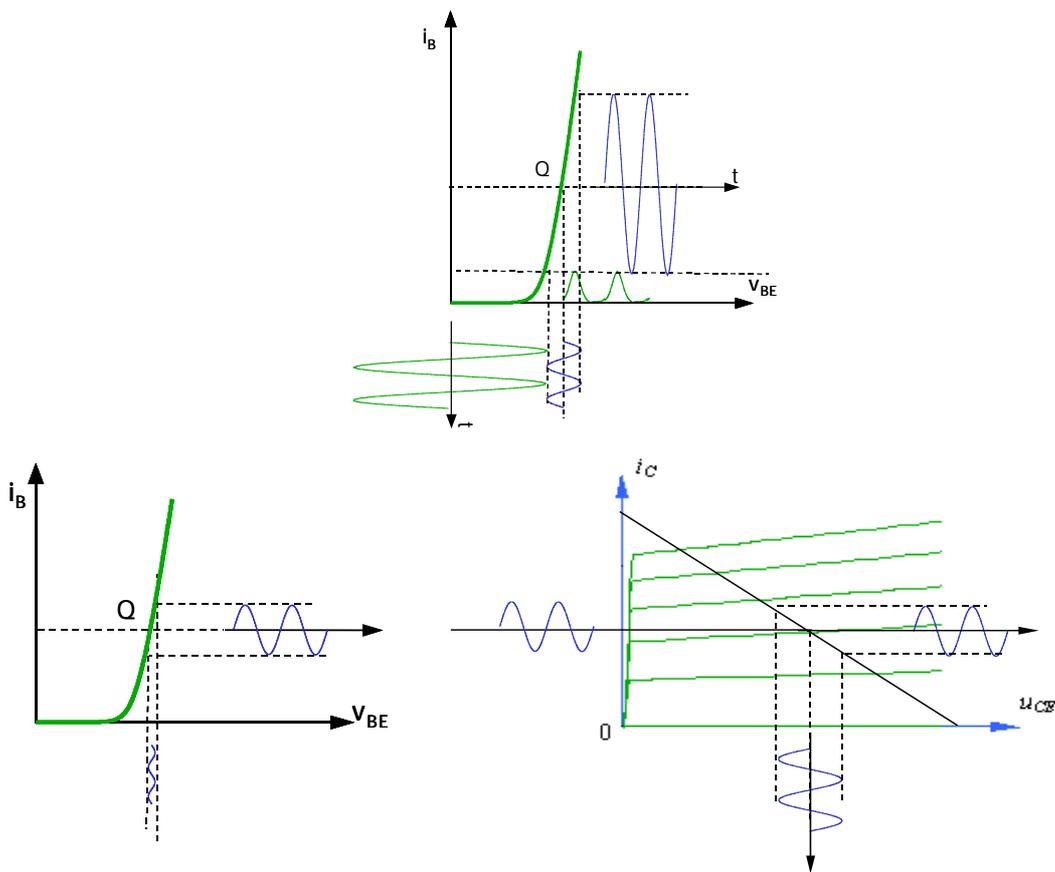
$$V_{CE} = 0, I_C = V_{CC} / R_C$$

确定交流负载线



2. 交流分析





1.6.2 工程分析法

例：已知电路， $\beta=100$, $V_{BE(on)}=0.7V$, $V_{BB}=1.7V$, $V_{CC}=12V$, $R_B=100K$, $R_C=5.8K$, 求静态工

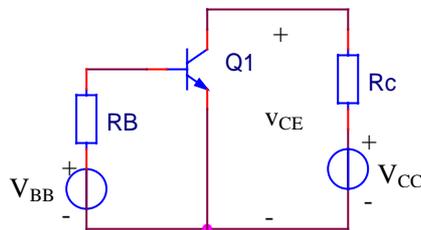
解：

$$I_B = [V_{BB} - V_{BE(on)}] / R_B = 10\mu A;$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 10\mu A = 1mA;$$

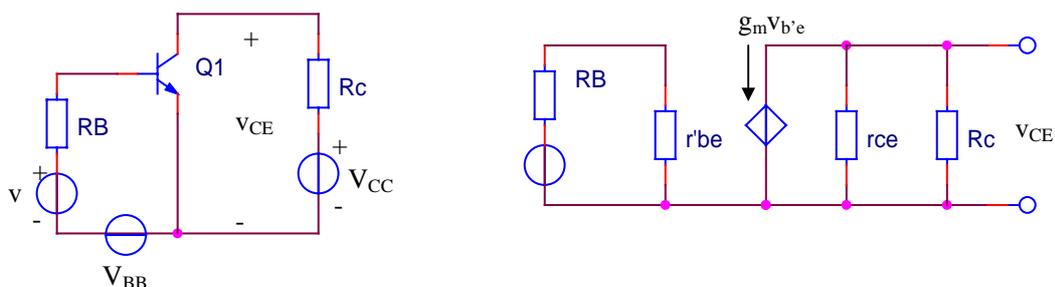
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12V - 5.8k \times 1mA = 6.2V$$

作点。



1.6.3 小信号等效电路分析法

例：如图。已知 $V_A=-100V$, $V_{BB}=0.75V$, $V_{CC}=12V$, $R_C=5.8k$, $R_B=5k$, $\beta=100$, 求各级交流电流和电压值。



解：

$$I_{BQ} = [V_{BB} - V_{BE(on)}] / R_B = (0.75 - 0.7) / 5 = 10 \mu A ;$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = 100 \times 10 \mu A = 1 mA ;$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 12V - 1 \times 5.8 = 6.2V$$

$$V_{BEQ} = 0.7V$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta) r_e = 101 \times (V_T / I_{EQ}) = 101 \times 26 / 1 = 2.63k ;$$

$$g_m = 1 / r_e = 38.3mS ;$$

$$r_{ce} = |V_A| / I_{CQ} = 100V / 1mA = 100k ;$$

$$i_b = v / (R_B + r_{b'e}) = 20 \sin \omega t (mV) / (5 + 2.63)k = 2.6 \sin \omega t ;$$

$$v_{be} = i_b r_{b'e} = 2.6 \times 10^{-6} \times 2.63 \times 10^3 \sin \omega t = 6.9 \sin \omega t ;$$

$$i_c = g_m v_{b'e} = 38.4mS \times 6.9(mV) \times \sin \omega t = 265 \sin \omega t (\mu A) ;$$

$$v_{ce} = -i_c (R_C // r_{ce}) \approx -i_c R_C = -265 \times 10^{-6} \times 5.8 \times 10^3$$

$$i_B = I_{BQ} + i_b$$

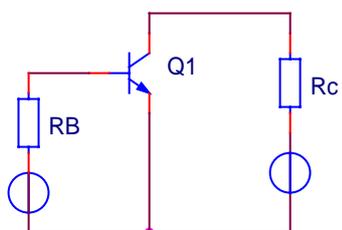
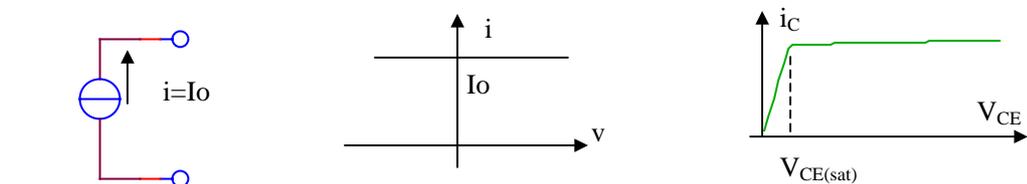
$$i_C = I_{CQ} + i_c$$

$$v_{BE} = V_{BEQ} + v_{be}$$

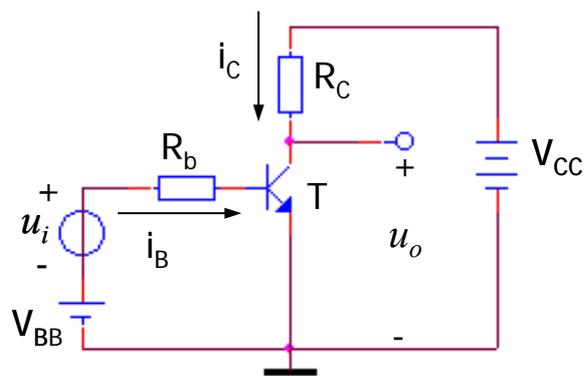
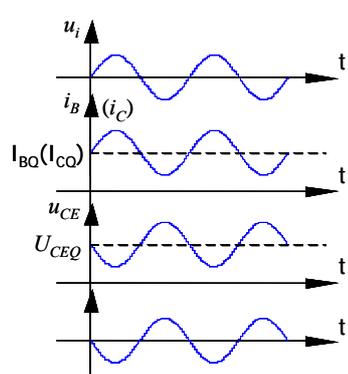
$$v_{ce} = V_{CEQ} + v_{ce}$$

1.7 晶体三极管应用原理

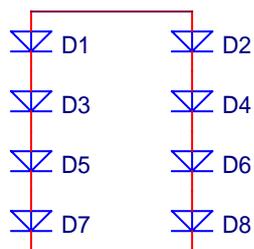
1.7.1 电流源



1.7.2 放大器



1.7.3 跨导线性电路



$$\sum_{CW} V_{BEk} = \sum_{CCW} V_{BEj}$$

$$i_c = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad V_{BE} = V_T \ln \frac{i_c}{I_S}$$

$$\sum_{CW} V_T \ln \frac{i_{ck}}{I_{Sk}} = \sum_{CCW} V_T \ln \frac{i_{cj}}{I_{Sj}}$$

$$\ln \prod_{CW} \frac{i_{ck}}{I_{Sk}} = \ln \prod_{CCW} \frac{i_{cj}}{I_{Sj}} \quad \prod_{CW} \frac{i_{ck}}{I_{Sk}} = \prod_{CCW} \frac{i_{cj}}{I_{Sj}}$$

$$\prod_{CW} i_{ck} = \lambda \prod_{CCW} i_{cj} \quad \lambda = \frac{\prod_{CW} S_k}{\prod_{CCW} S_j}, \text{ 其中: } S \text{ 为发射结面积。}$$

BE 结相串联组成对称环，相应集电极电流乘积相等。