∂

这部分算是要开始放大电路的学习了，实际上教材上这一章的全程叫做 **"双极结型三极 及其放大电路"**，

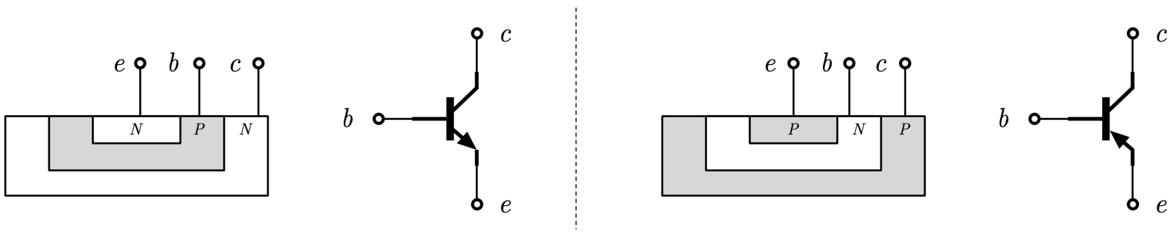
笔记内容的放大电路分析我们主要放在笔记的 chapter 3

Part 1 晶体

• 原理

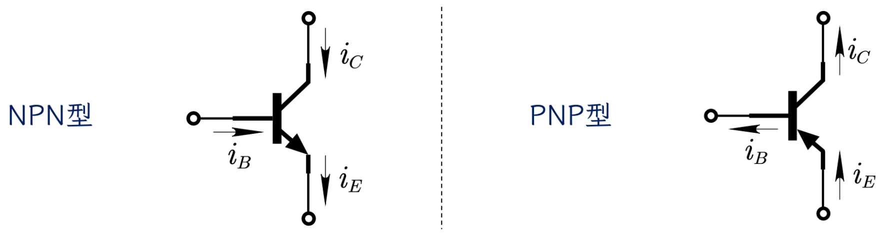
晶体管的结构原理：

9

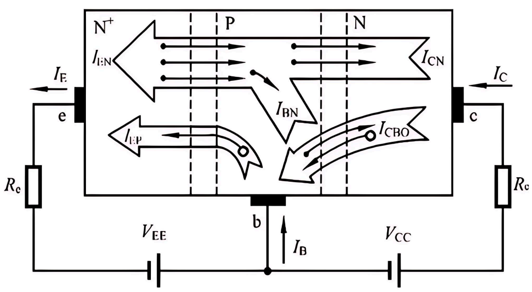


三极管的放大作用是在一定的外部条件控制下，通过载流子传输体现出来的。

外部条件：发射结正偏，集电结反偏.



BTJ 的内部原理如下：



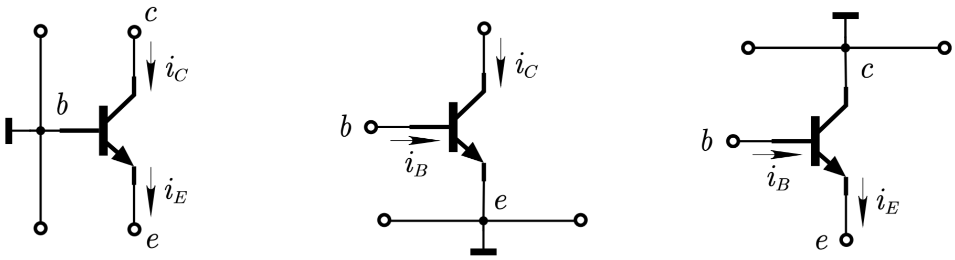
fih5˜ff–.33 h e t33 …e“31g61œt ff—U33 ÕDÍP 34sffiF6˜rœe“318 7%e6 USW –f“Oc&fi3VfffÓ ö‡33 c34

> I_{CBO}

内部载流子流向过程如下 (以NPN为例)：

> **发射区** **集电区** **基区**
>
> $$I_E = I_B + I_C, \quad I_C = I_{NC} + I_{CBO}$$
>
> α
>
> $$\alpha = \frac{I_{nC}}{I_E}$$
>
> $$I_C >> I_{CBO}$$
>
> $$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E}$$
>
> > α α
>
> $$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$
>
> $$I_E = I_B + I_C, \quad I_C = I_{nC} + I_{CBO}, \quad \alpha = \frac{I_{nC}}{I_E}$$
>
> $$I_{CEO} = (1+\beta)I_{CBO}$$
>
> I_{CEO}
>
> $$\beta = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad \text{当 } I_C >> I_{CEO} \text{ 时，} \beta \approx \frac{I_C}{I_B}$$
>
> > β
> > $\beta >> 1$

在此给出三极管的接法：



共基极 (CB) 共发射极 (CB) 共集电极 (CC)

综上所述，三极管的放大作用，主要是依靠它的发射极电流能够通过基区传输，然后到达集电极而实现的。实现这一传输过程的两个条件是：

总结晶体管的基本电流关系 (放大状态)：

$$
i_E = i_B + i_C \\
i_C = \beta i_B \\
i_B : i_C : i_E = 1 : \beta : (1+\beta)
$$

β

Important

关于电流放大系数 β

没有特殊表明是共基电流放大系数 α 的前提下，默认晶体管的放大系数指代的都是 β；

放大系数定义式中的电流是“通指”——既可以代表直流电流，也可以代表交流电流：

$$
i_C = \beta i_B \quad \begin{cases} I_C = \bar{\beta} I_B \\ i_c = \beta i_b \quad (\Delta i_c = \beta \Delta i_b) \end{cases}
$$

认为直流放大系数等于交流放大系数，统一以 β 表示；

（实际当集电极电流过大时交流放大系数会明显减小，与直流放大系数的偏差加剧）

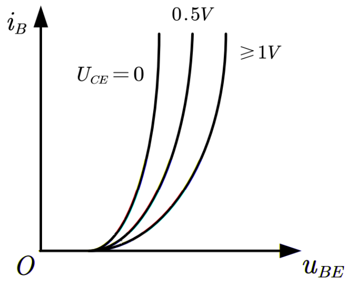
一般情况实际的晶体管均满足 $\beta \gg 1$；

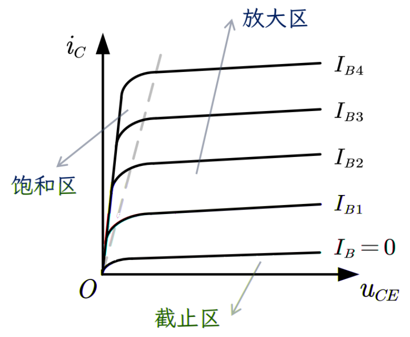
- ## 伏安特性

晶体管的工作特性通常用两个伏安特性来描述——输入伏安特性与输出伏安特性；

输入伏安特性——基极电流 i_B 和 发射结电压 u_{BE} 的关系；

输出伏安特性——集电极电流 i_C 和 管压降 u_{CE} 的关系；





晶体管的输入伏安特性 i_B - u_{BE} (以NPN型晶体管为例)

> $$i_B = f(v_{BE})\Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$
>
> $v_{CE} = 0\,\text{V}$
>
> $v_{CE} \geq 1\,\text{V}$ $v_{CB} = v_{CE} - v_{BE} > 0$
>
> v_{BE} I_B

晶体管的输出伏安特性 i_C - u_{CE} (以NPN型晶体管为例)

> $$i_C = f(v_{CE})\Big|_{I_B=\text{const}}$$
>
> i_C $i_B = 0$
>
> v_{BE}
>
> i_C v_{CE}
>
> i_C v_{CE}
>
> $v_{CE} < 0.7\,\text{V}$

> **Caution**
>
> 这部分结论只适用于填空题和选择题，在解决计算分析题时结论并不严谨
>
> > **不同工作区 电位特点**
> >
> > **放大区 点位特点**
> >
> > $$u_C \geq u_B > u_E, \quad u_{BE} = 0.7V/0.2V$$

- ## 工作状态判断

根据电流判断：

> NPN
>
> Step 1 u_{BE} $|U_{BEQ}|$
>
> $u_{BE} < |U_{BEQ}|$ **截止区**
>
> $u_{BE} \geq |U_{BEQ}|$ **放大区或饱和区**
>
> Step 2 I_{BS}
>
> $u_{CE} = |U_{CES}|$ $|U_{CES}|$ $u_C = u_B$ $u_{CE} = u_{BE} = |U_{BEQ}|$
>
> I_{CS}
>
> $$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta}$$
>
> - $i_B > I_{BS}$ **饱和区**
> - $i_B \leq I_{BS}$ **放大区**
>
> PNP

根据电位判断：

> NPN
>
> Step 1 u_{BE} $|U_{BEQ}|$
>
> - $u_{BE} < |U_{BEQ}|$ **截止区**
> - $u_{BE} \geq |U_{BEQ}|$ **放大区或饱和区**
>
> Step 2 $i_B : i_C : i_E = 1 : \beta : 1 + \beta$ u_{CE}
>
> - $u_{CE} \geq |U_{CES}|$ **放大区**
> - $u_{CE} < |U_{CES}|$ **饱和区** $u_{CE} = |U_{CES}|$
>
> $|U_{CES}|$ u_{CE} u_{BE} u_{CE} $|U_{BEQ}|$
>
> PNP

- ## 主要 数

> β
>
> f_T
>
> P_{CM}
>
> I_{CM}
>
> $U_{(BR)CEO}$

这里针对某些参数[redacted]展开：

电流放大系数：

> $\bar{\beta}$
>
> $$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}\Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$
>
> β
>
> $$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$
>
> $\bar{\alpha}$
>
> $$\bar{\alpha} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E}$$
>
> α
>
> $$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\Big|_{v_{CB}=\text{const}}$$
>
> > I_{CBO} I_{CE}[redacted] $\bar{\alpha} \approx \alpha$ $\bar{\beta} \approx \beta$

极间反向电流 (NPN为例)：

[redacted]

极限[redacted]

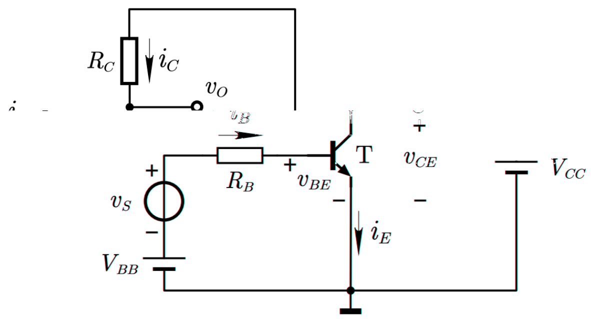
[redacted]

Part 2[redacted]

名[redacted]

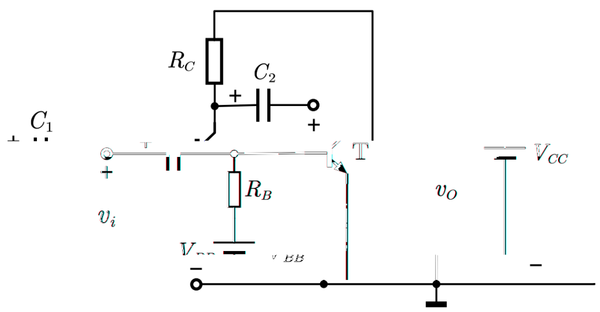
[redacted]

名称	总电压或总电流	直流	交流　时值	交流有效值	基

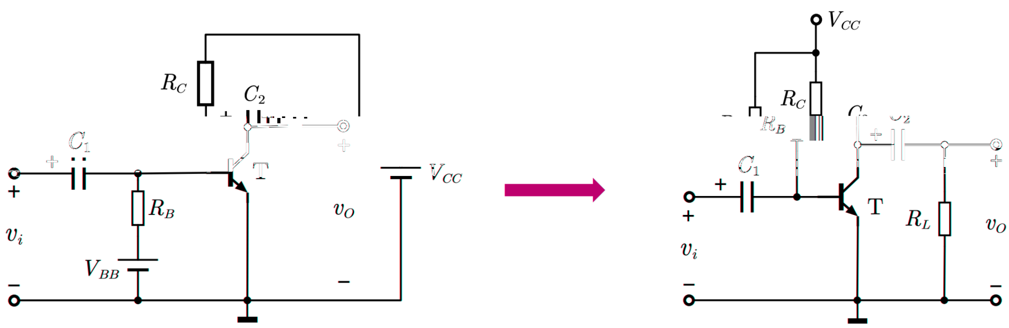


$i_C = \beta i_B$

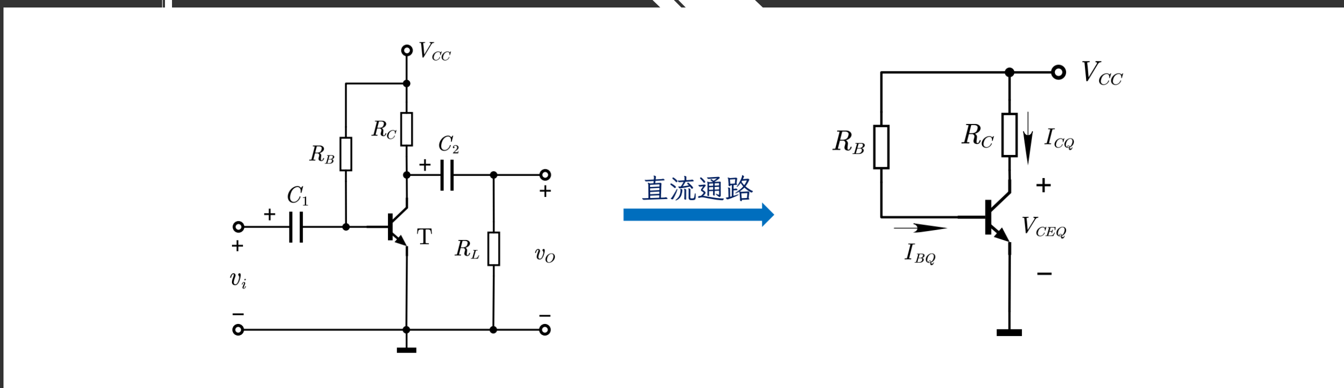
v_S V_{BB}



C_1 C_2

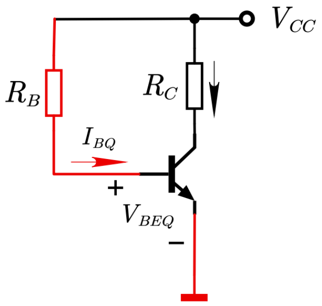


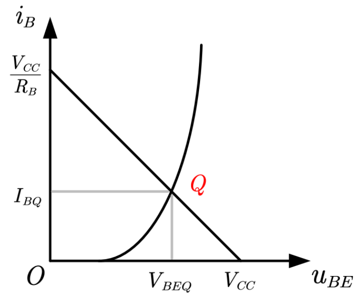
[redacted]



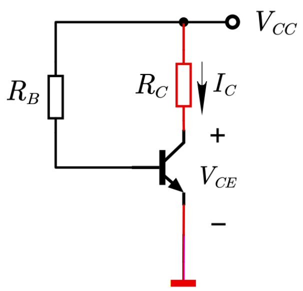
[redacted]

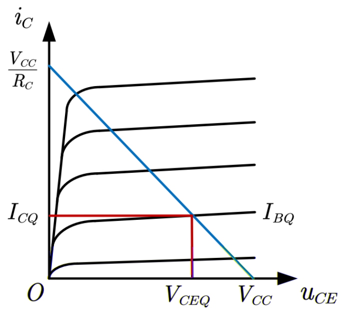
> $$V_{BE} = V_{CC} - i_B R_B$$
>
> -





> $i_C \sim V_{CE}$
>
> R_C
>
> $$V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$
>
> - I_{BQ}



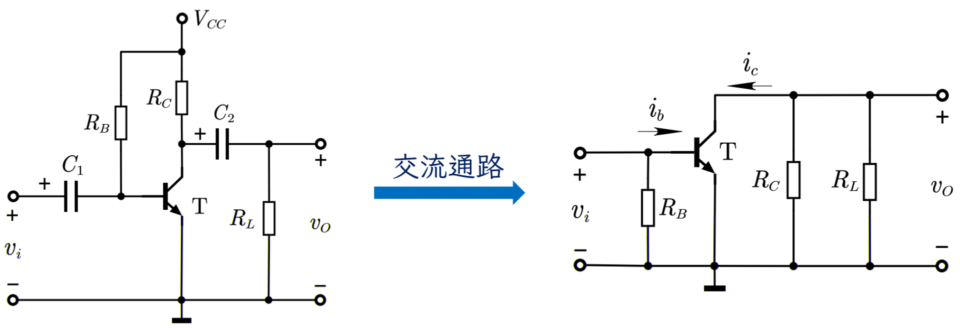


- **动态分析**

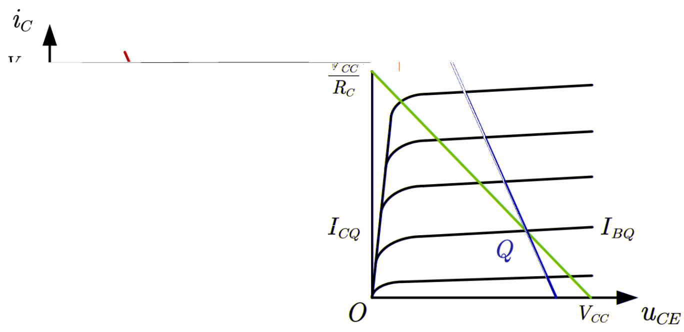
动态分析有两种方法：图解分析法；小信号模型分析法（微变等效电路法）

分析路径为交流通路，分析对象如下：

> $\dot{A}_V$ R_i R_O



交流通路下：电阻、晶体管不变；旁路、耦合电容短路；直流电压源置零（短路）



红色线为交流负载线，

$$v_o = v_{ce} = -i_c R_L'$$

易知：

$$R_L' = R_C \parallel R_L$$

过Q点作交流负载线，斜率为：

$$-\frac{1}{R_L'}$$

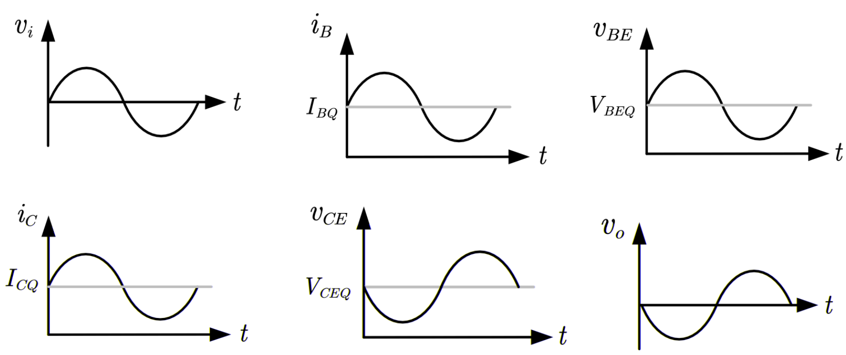
> $$-\frac{1}{R_C}$$

假设 v_{BE} 有一微小的变化，

$v_o = v_{ce}$ 如何变化？

$$v_o = v_{ce} = -i_c R_L'$$

由此可知 v_{CE} 反相，我们可以给出以下波形关系：



- ## 失真分析

> ⓘ Caution
>
> 静态工作点对波形失真的影响：

> 在放大电路中，输出信号应该成比例地放大输入信号（即线性放大）；如果两者不成比例，则输出信号不能反映输入信号的情况，放大电路产生非线性失真。为了得到尽量大的输出信号，要把静态工作点Q设置在交流负载线的中间部分。如果Q点设置不合理，信号进入截止区或饱和区，造成非线性失真。
>
> Q点过低，输入信号进入截止区，输入 i_b 底部截止失真，v_{ce} 失真，共射放大输出信号 v_o 顶部失真。
>
> > i_b v_{BE}
> >
> > i_C v_o V_{CC}
>
> Q点过高，输出信号进入饱和区，输出饱和失真，共射放大器输出信号底部失真
>
> > $\sim V_{CC}/R_C$ v_{CE} V_{CES}

> 为了充分利用晶体管的放大区，使输出动态范围最大，直流工作点应选在交流负载线的中点处。

由于受晶体管截止和饱和限制，放大器不失真输出电压有一[illegible]范围，其最大值称为放大器输出动态范围。

- 静态工作点偏低时，因受截止失真限制，其最大不[illegible]输出电压的幅度为

$$V_{om} \approx [illegible] R'_L$$

- 工作点偏高时而因饱和失真的限制，最大不失真输[illegible]的幅度为（ V_{CES} 是临界饱和压降，一般1V左右）

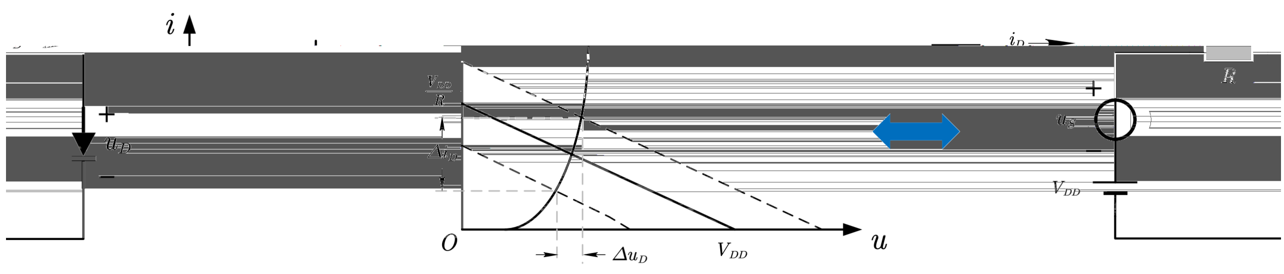
$$V_{om} = V [illegible] V_{CES}$$

- 输出动态范围（最大值—最小值）

$$V_{OP-} [illegible]$$

- 最大不失真输出电压

$$U_{om} = \min \left\{ [illegible] \right.$$



$U-I$

对于小信号分析，我们无法直接使用叠加定理

小信号分析法的基本思想：小信号输入单独作用时，将小信号输入看作是静态工作点附近的扰动对小信号响应线性化处理，可以得到静态工作点处对应的动态电阻/电导进而得到小信号等效电路（线性）

全响应即为静态工作点与小信号响应的叠加对小信号分析法的概括 —— 静态叠加动态

在二极管中我们给出了如下关系：

$$R=\frac{U}{I}$$

$$r=\frac{\Delta u}{\Delta i}\bigg|_{u=U,i=I}$$

下面我们将会尝试将其放在三极管电路中。

(1). H　数　引出（从数学模型角度）

适用范围：低频（忽略寄生电容）交流小信号分析；基本思想为小范围内，可以把非线性问题进行线性化处理。小信号分析的数学实质是在静态工作点处求偏导数。

BJT双口网络，以共发射极连接为例：

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

$$i_c=f_2(i_B,v_{CE})$$

对正弦信号，用小信号交流分量表示

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

i o r f e

h_{ie} $v_{ce} = 0$ $v_{CE} = V_{CEQ}$

$$h_{ie} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\Big|_{v_{CEQ}}$$

h_{fe} β

$$h_{fe} = \frac{\partial i_c}{\partial i_B}\Big|_{v_{CEQ}}$$

h_{re} $i_B = 0$ $i_B = I_{BQ}$ μ_r

$$h_{re} = \partial$$

r_{be} $\Omega \sim$ Ω

v_{CE} i_B

$$\mu_r = 10^{-3} \sim 10^{-4}$$

---

i_b $i_c = \beta i_b$

v_{CE} i_c r_{ce}

$$r_{ce} = \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_c}\Big|_{I_{BQ}} \approx \frac{\Delta}{}$$ [redacted]

i_c r_{ce} $M\Omega$ [redacted]

$$i_{be} = r_{bb'} + (1+\beta)V$$ [redacted]