

# 第十二章 功率放大器

功率放大器概述

功率放大器分析计算

## 12.1 功率放大器概述

### 12.1.1 功率放大器特点

输出级电路和功率放大器，一般处理的都是大信号。

小信号近似或模型不再适用。

性能指标：输出功率 $P_L$ 和最大功率转换效率 $\eta_{\max}$ 。  
( power-conversion efficiency )

$$\eta_{\max} = \frac{P_{L\max}}{P_S}$$

最大输出功率  $P_{L\max}$  与电源消耗的平均功率  $P_S$  之比。

## 12.1.2 功率放大器分类

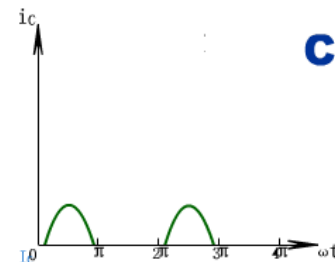
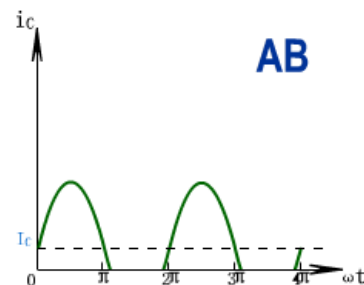
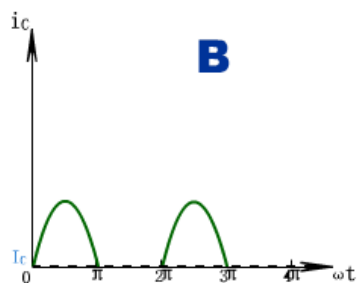
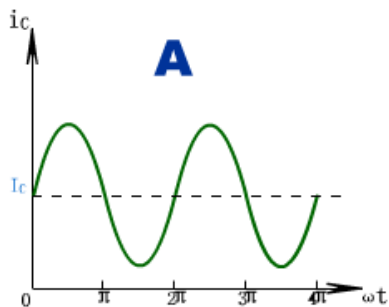
根据电路中晶体管工作点的不同，输出级电路有A类/甲类、B类/乙类、AB类/甲乙类和C类/丙类之分。

**A类：**晶体管在信号的整个周期内均处于导通状态。

**B类：**晶体管仅在信号的半个周期处于导通状态。

**AB类：**晶体管在信号的多半个周期处于导通状态。

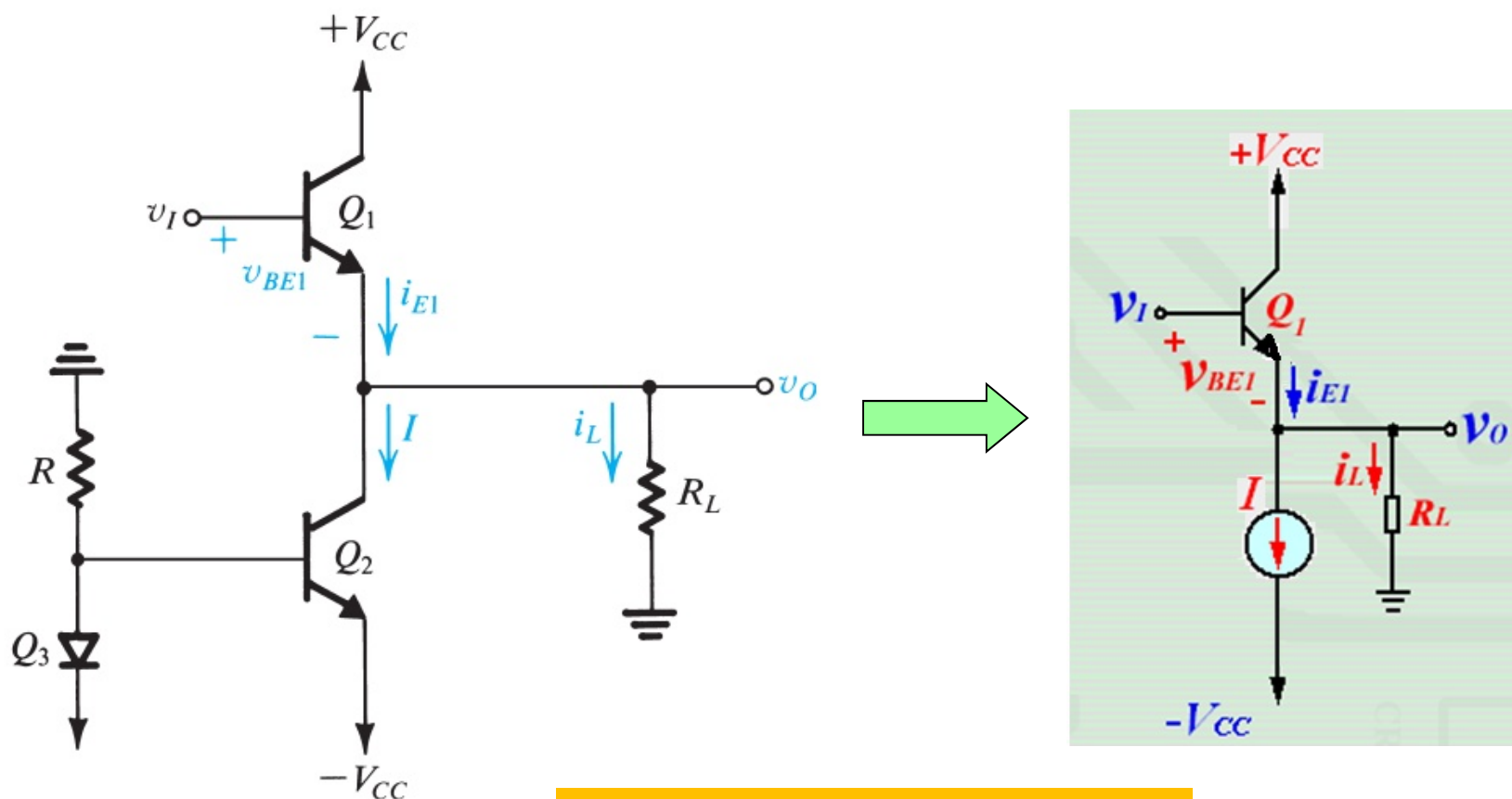
**C类：**晶体管仅在信号的小半个周期处于导通状态。



晶体管导通时间不同

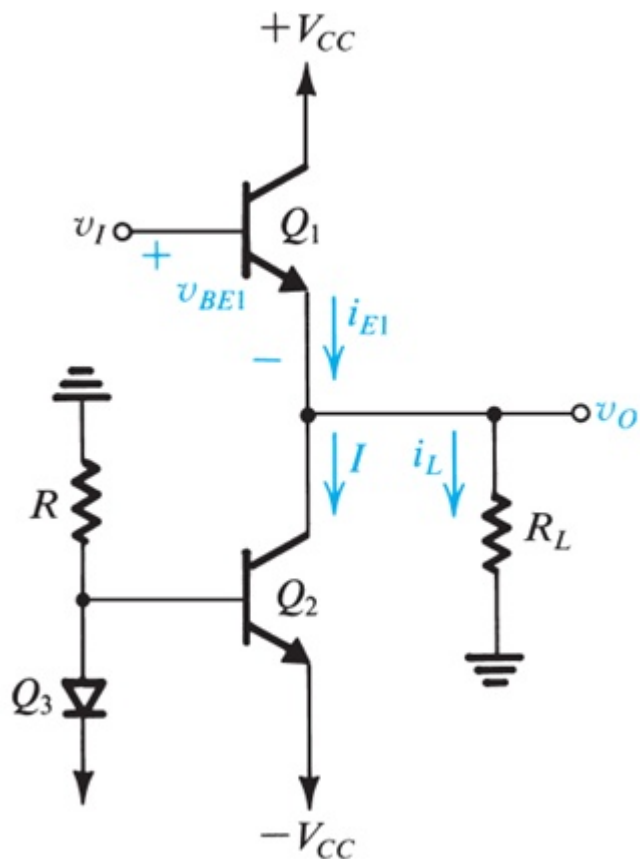
## 12.2 功率放大器分析计算

### 12.2.1 A类功率放大器



共集（跟随）、电流源偏置

Q: 输出信号摆幅?



$$i_{E1} = I + i_L > 0, \quad I > -i_L, \quad i_{L\min} = -I$$

跟随

正方向  $v_O = v_I - v_{BE1}$

$Q_1$ 放大区

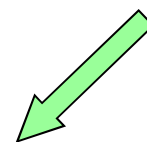
$$v_{O\max} = V_{CC} - V_{CE1sat}$$

负方向  $v_{O\min} = -IR_L$  或

$$v_{O\min} = -V_{CC} + V_{CE2sat}$$

$Q_2$ 放大区

当选择恒流源  $I \geq \left| \frac{-V_{CC} + V_{CE2sat}}{R_L} \right|$



$$v_{O\min} = -V_{CC} + V_{CE2sat}$$

$$|v_{O\min}| = |v_{O\max}|$$

在最大输出情况下，忽略饱和压降

$$v_{O\max} = V_{CC} \quad i_{O\max} = V_{CC} / R_L$$

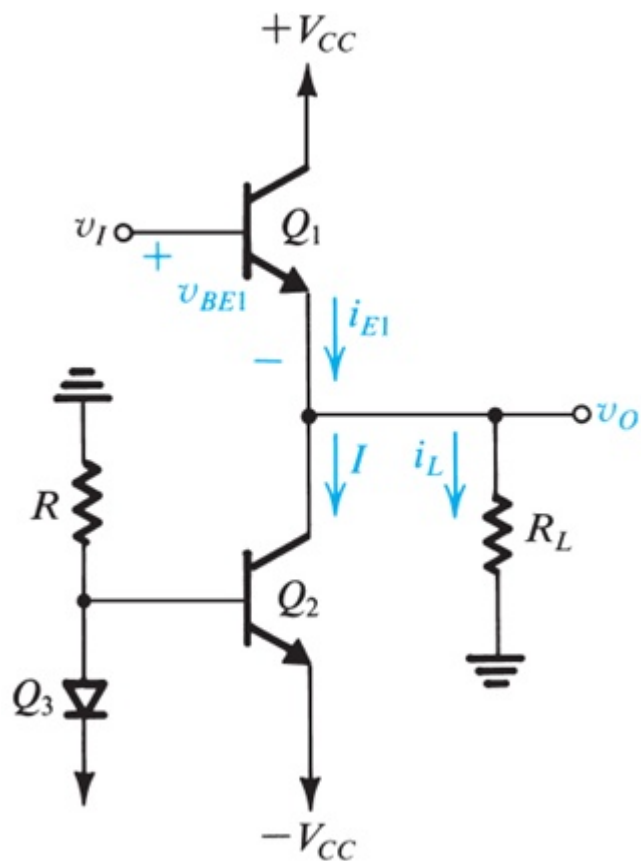
负载上得到的平均输出功率（假设输出正弦信号）

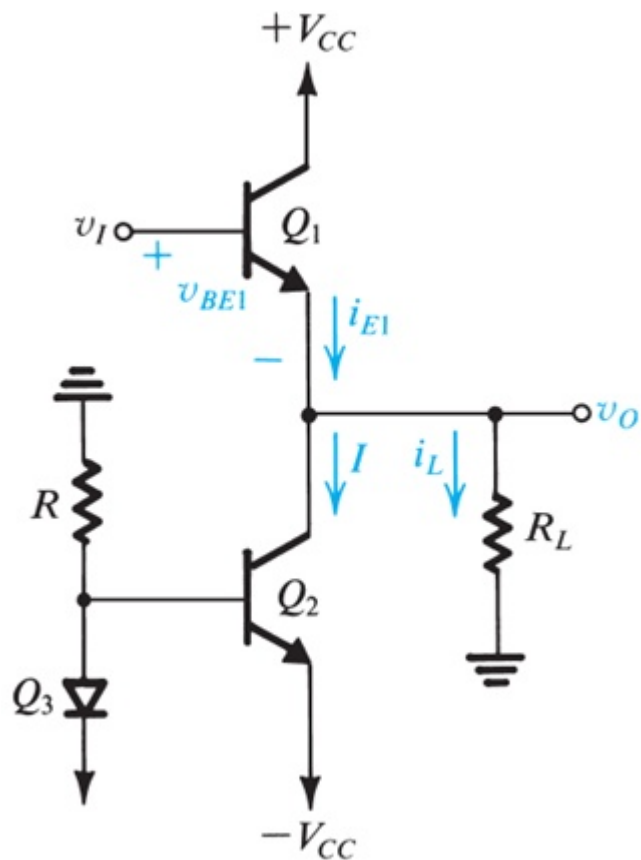
$$P_{L\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{O\max} * \frac{1}{\sqrt{2}} i_{O\max} = \frac{1}{2R_L} V_{CC}^2$$

电源提供的平均功率为

$$P_S = [V_{CC} - (-V_{CC})] I = 2V_{CC} I$$

偏置电流  $I$  越小，效率越大





因要求  $I \geq \left| \frac{-V_{CC} + V_{CE2sat}}{R_L} \right|$  , 忽略饱和

和压降, 则  $I \geq \frac{V_{CC}}{R_L}$

若要获得最大功率转换效率, 取  $I = \frac{V_{CC}}{R_L}$

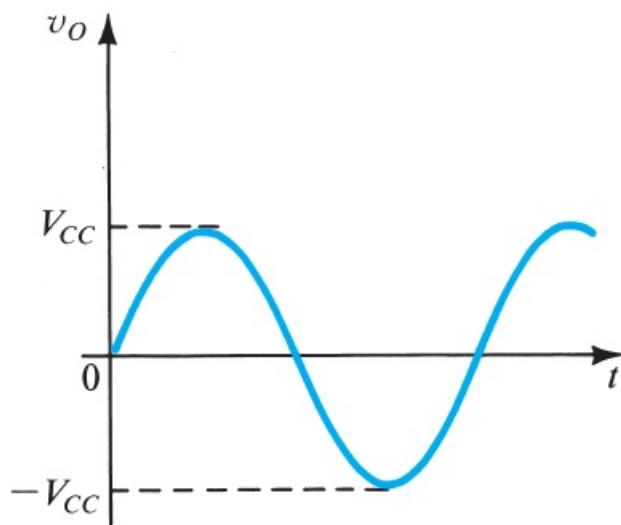
则电源提供的最小平均功率为

$$P_S = 2V_{CC}I = \frac{2V_{CC}^2}{R_L}$$

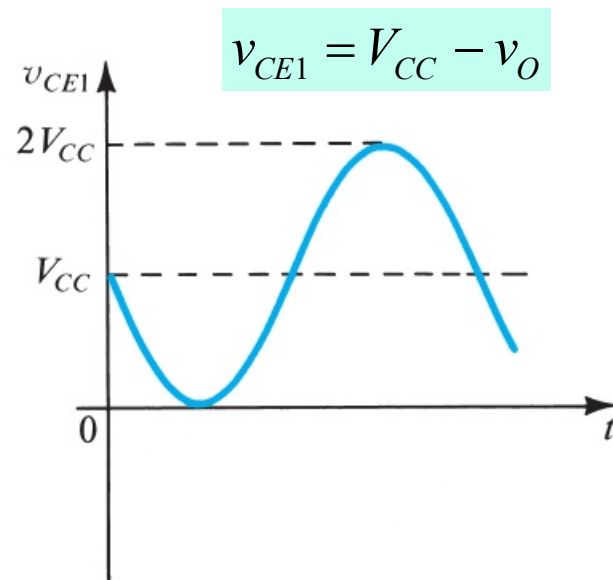
最大功率转换效率  $\eta_{\max} = \frac{P_{L\max}}{P_S} = 25\%$  !!!

此时  $Q_1$  最大管压降为  $v_{CE} = 2V_{CC}$  , 集电极最大电流为  $i_C = 2I$

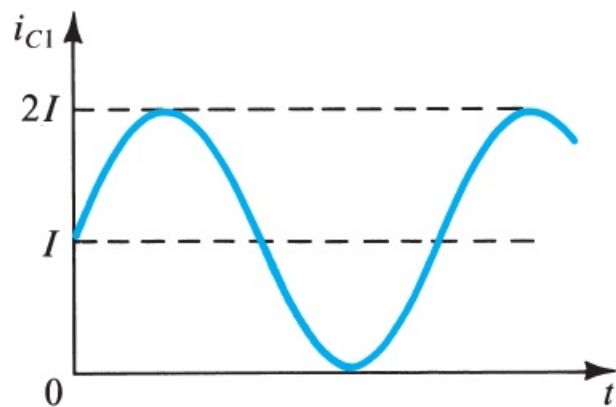
## 信号波形



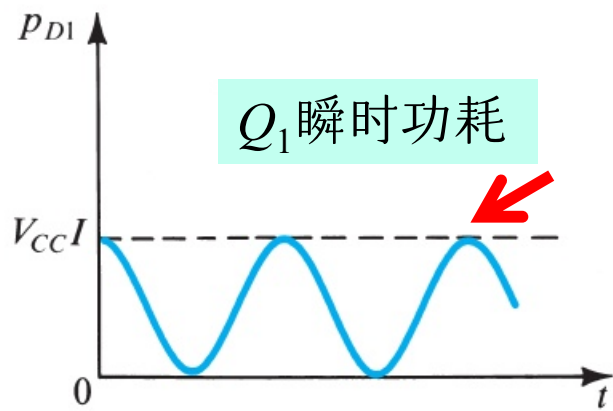
(a)



(b)



(c)



(d)



## 晶体管 $Q_1$ 的瞬时功耗

$$P_{D1} = v_{CE1} i_{C1}$$

- 1、当  $v_o = 0$  时， $Q_1$  承受最大功耗为  $V_{CC} I$   
这种情况可能持续很长时间，因此，晶体管  $Q_1$  必须能承受该功率。=静态功耗

- 2、考虑负载开路的极端情况

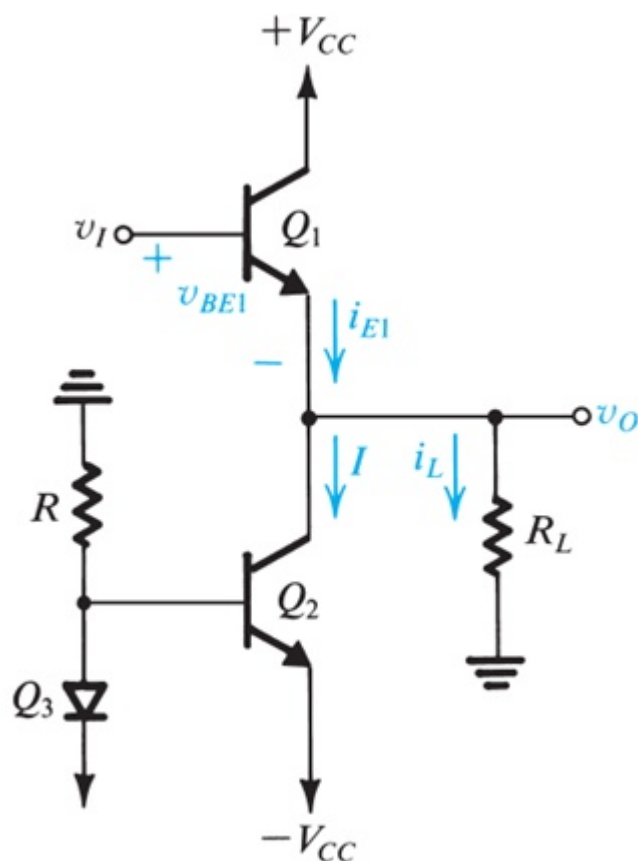
最大功耗出现在  $v_o = -V_{CC}$

此时  $Q_1$  承受最大功耗为  $2V_{CC} I$

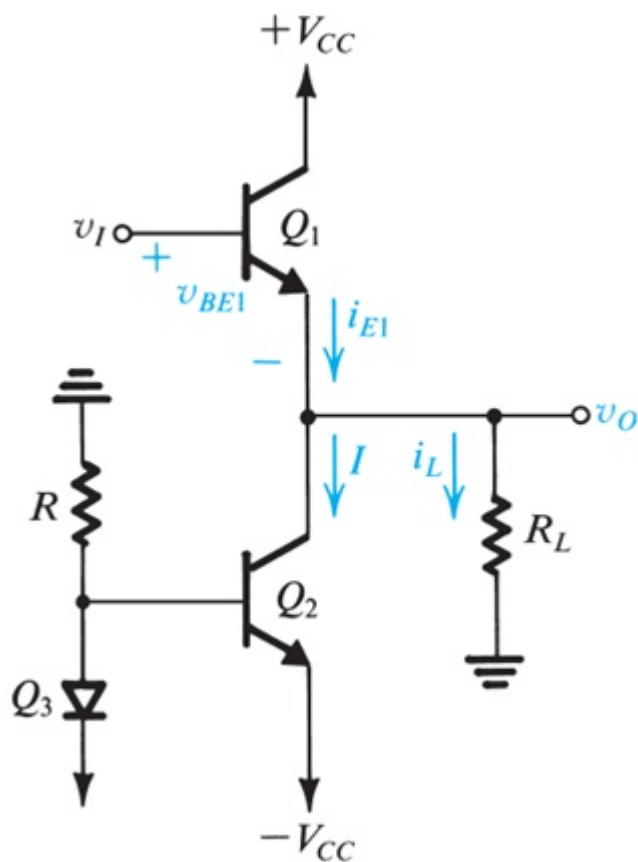
这种情况一般不会持续很长时间，设计时不必受此约束。此时平均功耗为  $V_{CC} I$

- 3、考虑负载短路的极端情况

可能会导致晶体管  $Q_1$  烧毁。



$$\text{取 } I = \frac{V_{CC}}{R_L}$$



取  $I = \frac{V_{CC}}{R_L}$

考虑晶体管  $Q_2$  的功耗

$Q_2$  导通的电流为  $I$

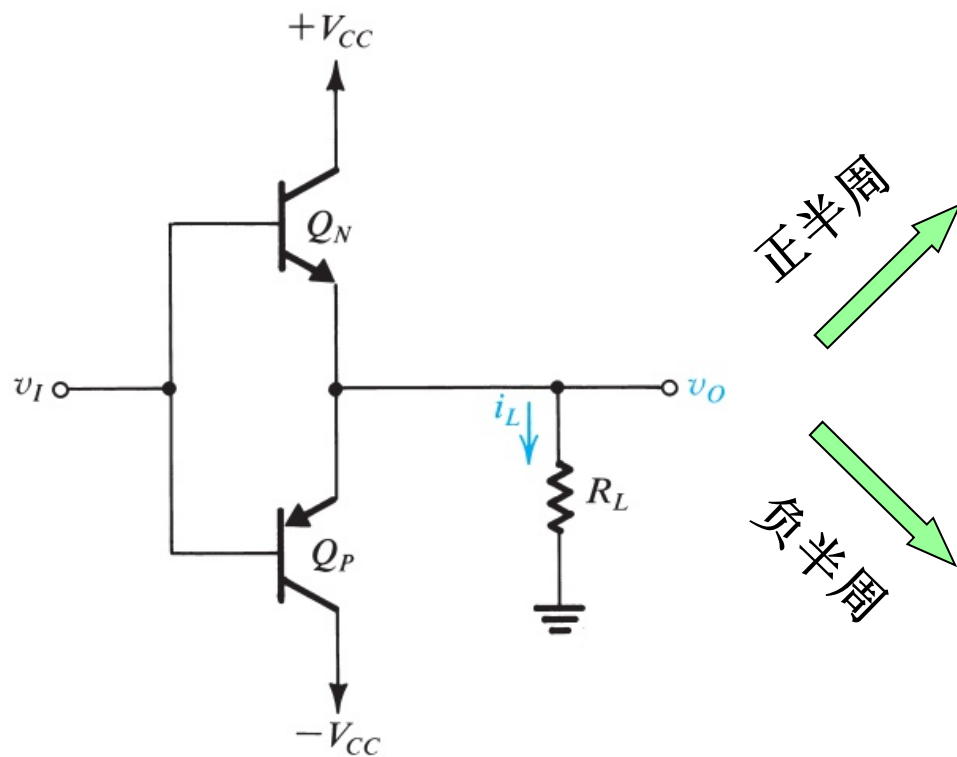
最大功耗出现在  $v_{CE2} = 2V_{CC}$

$$P_{D2\max} = 2V_{CC}I$$

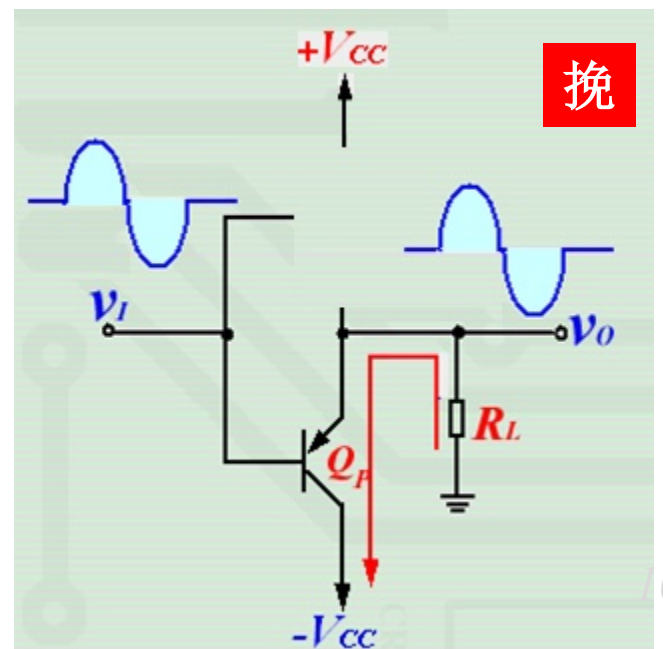
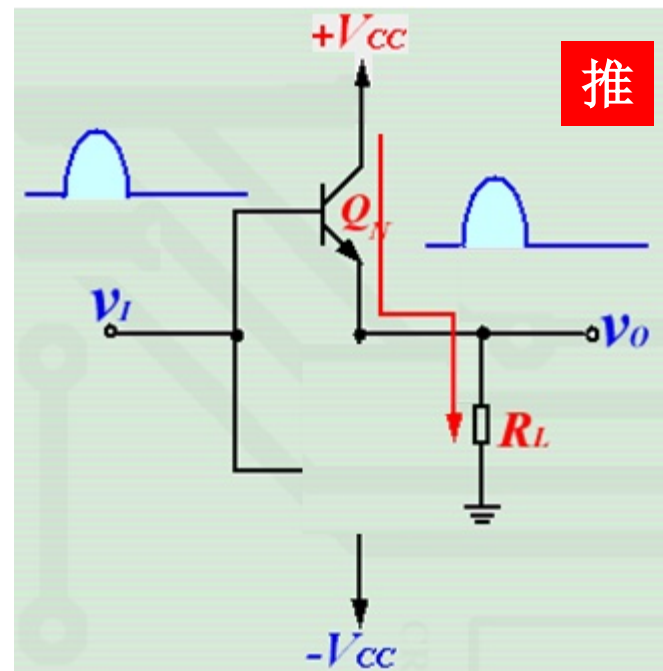
这种情况一般不会持续很长时间，  
设计时不必受此约束。

其平均功耗为  $V_{CC}I$

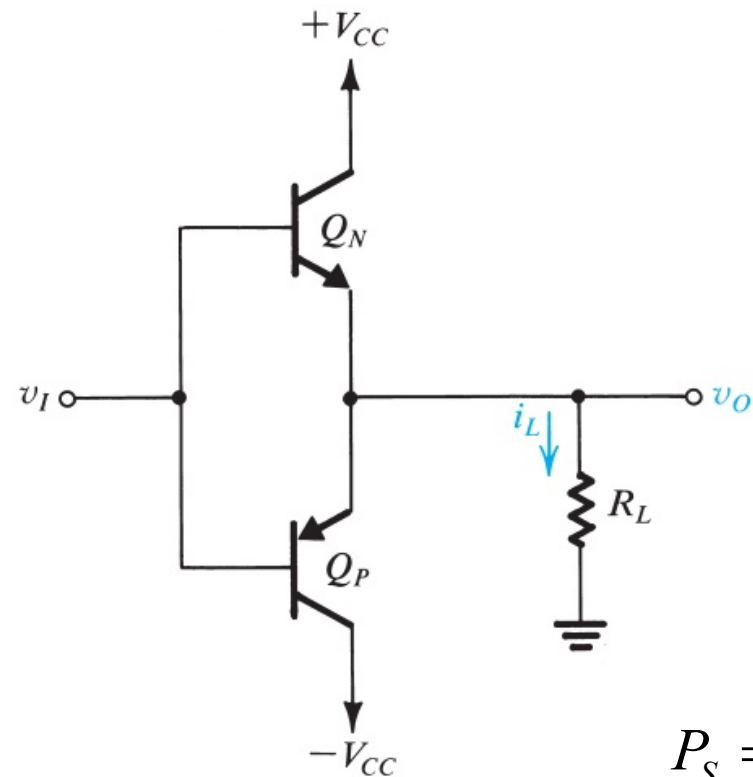
## 12.2.2 B类功率放大器



电路工作在推挽 (push-pull) 模式



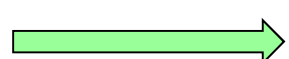
理想情况下，不考虑饱和压降



$$v_{O\max} = V_{CC}$$

$$i_{O\max} = V_{CC}/R_L$$

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$



$$P_{L\max} \big|_{\hat{V}_O=V_{CC}} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

电流（半正弦波）平均值

$$P_S = P_{S+} + P_{S-} = 2V_{CC} \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\hat{V}_O \sin(\theta)}{R_L} d\theta = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}}{R_L} \hat{V}_O$$



$$P_{S\max} \big|_{\hat{V}_O=V_{CC}} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

$$\hat{V}_O = v_{O\max} = V_{CC}$$

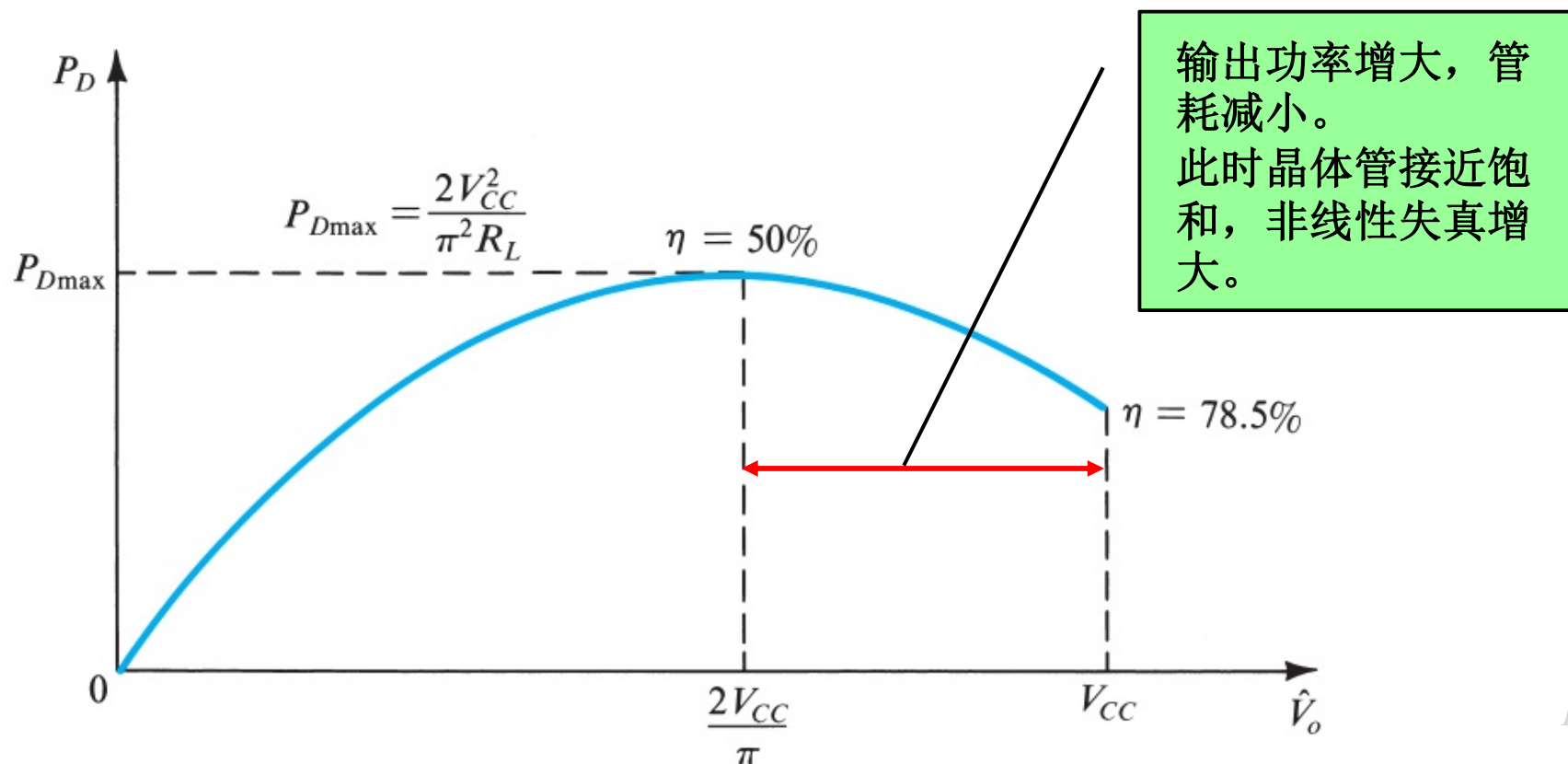
$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_O}{V_{CC}} \longrightarrow \eta_{\max} \big|_{\hat{V}_O=V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

## 管耗问题

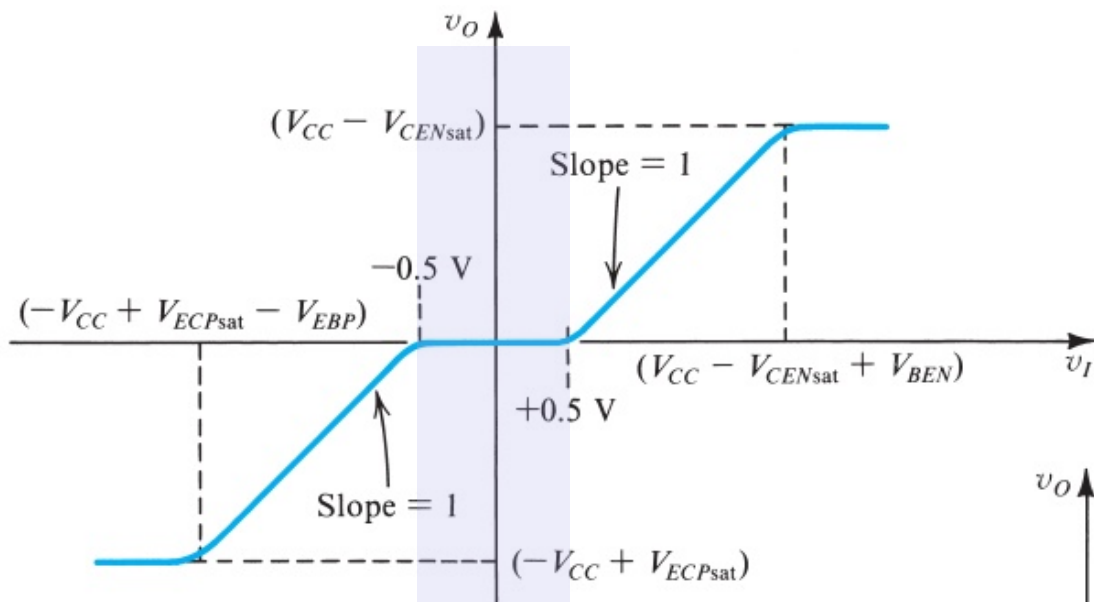
$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$

$$P_S = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{V}_O}{R_L} V_{CC}$$

$$P_D = P_S - P_L = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{V}_O}{R_L} V_{CC} - \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$

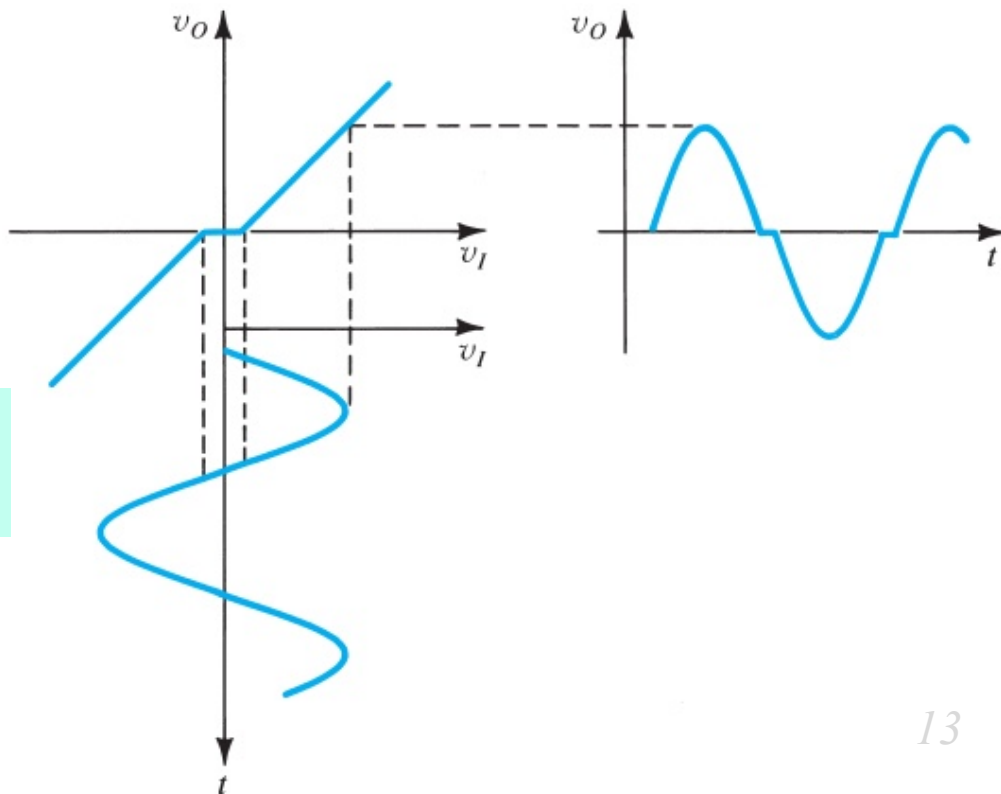


## 交越失真 (Crossover Distortion)

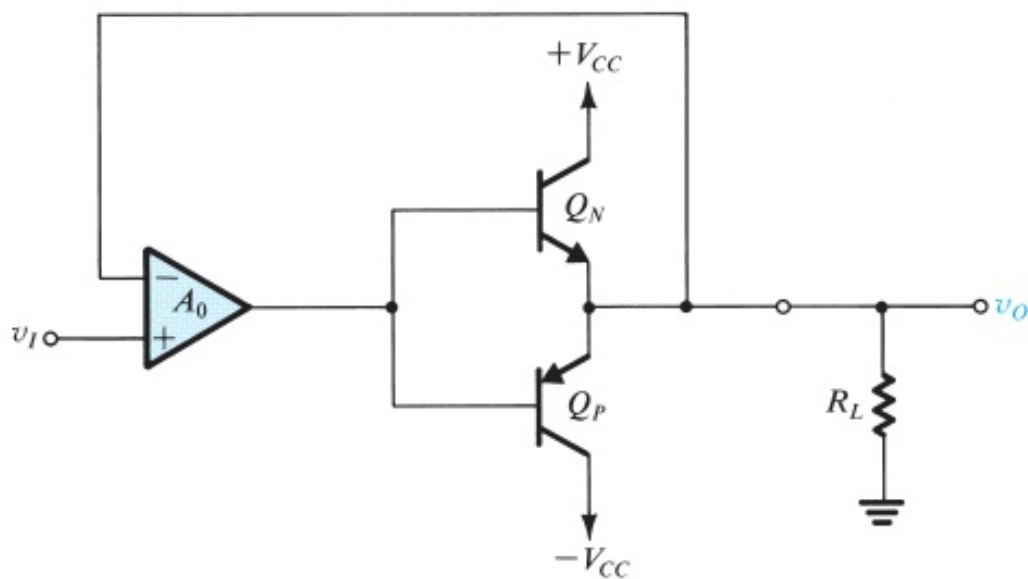


输入输出特性

$Q_1$ 、 $Q_2$ 都不导通，输出为零  
(增益=0)



## 减小交越失真的方法之一

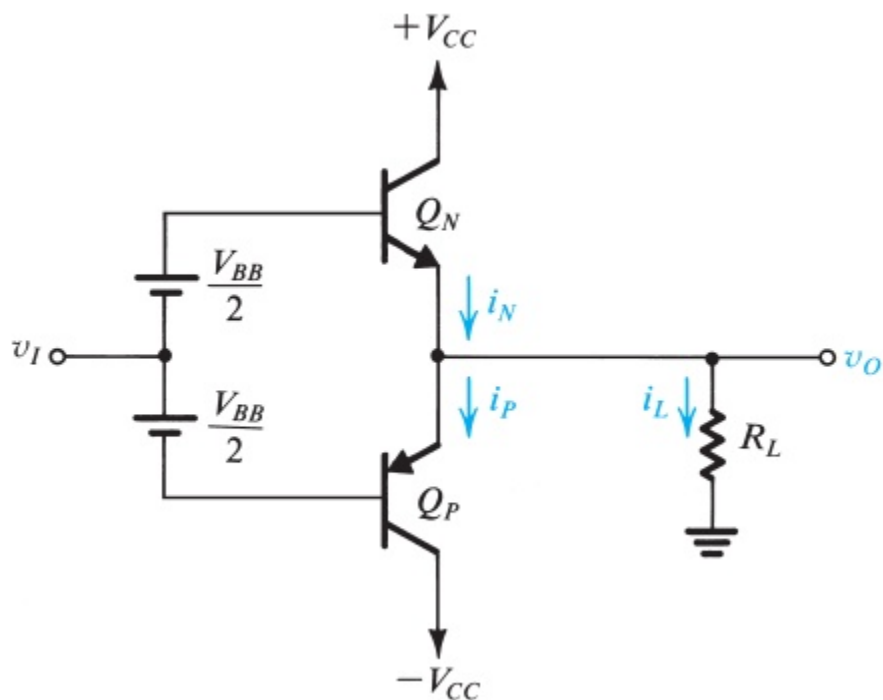


$\pm 0.7 \text{ V}$  的死区电压被降低至  $\pm 0.7/A_0 \text{ V}$ ，  
但无法从根本上消除。

## 12.2.3 AB类功率放大器

### 一、工作原理

为了较好地克服交越失真，为B类放大器的输出晶体管加上一定的静态工作电流  $I_Q$ 。  $V_{BB}$  数值由  $I_Q$  决定



当  $v_I = 0$ ,  $v_O = 0$  时

$$i_N = i_P = I_Q = I_S e^{V_{BB}/2V_T}$$

考虑输入正半周信号情况 ( $v_i > 0$ )

$$v_O = v_I + \frac{V_{BB}}{2} - v_{BEN}$$

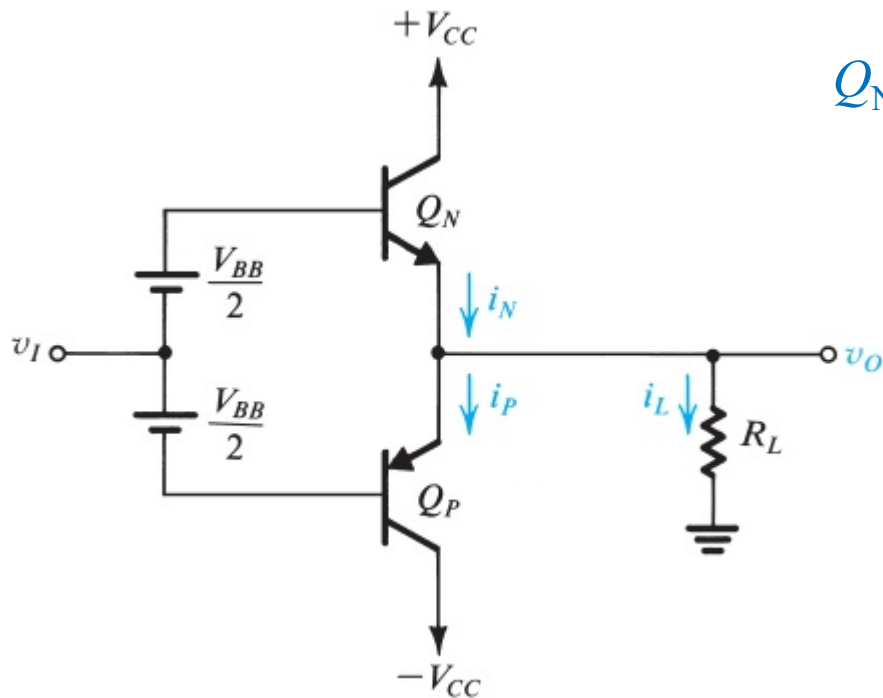
$$i_N = i_P + i_L$$



$$v_{BEN} + v_{EBP} = V_{BB}$$

$$V_T \ln \frac{i_N}{I_S} + V_T \ln \frac{i_P}{I_S} = 2V_T \ln \frac{I_Q}{I_S}$$

$Q_N$ 、 $Q_P$  电流关系  $i_N i_P = I_Q^2$



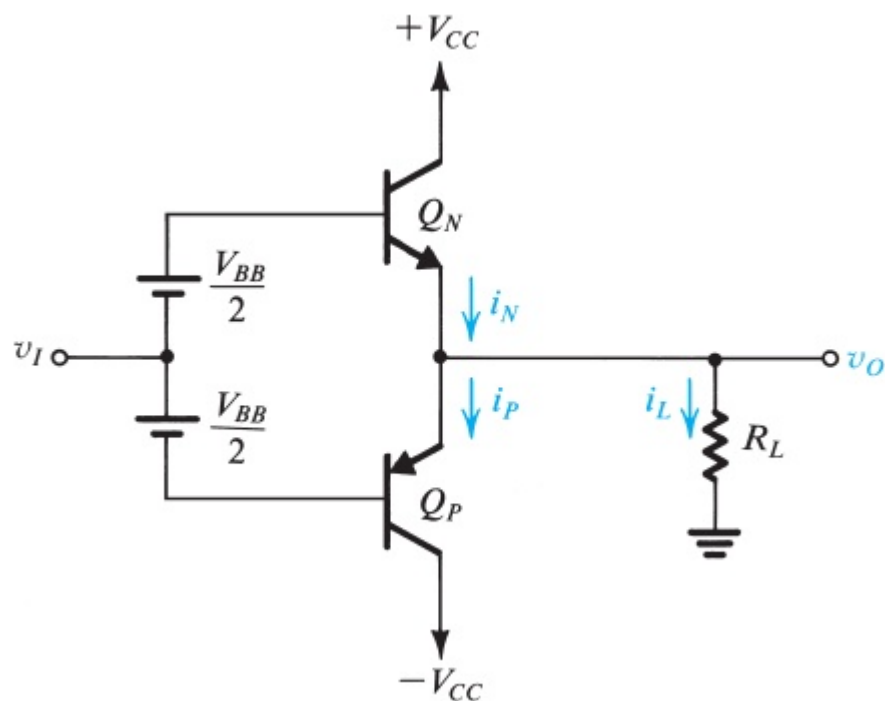
1、当输入正信号较大时，负载电流由  $Q_N$  提供， $Q_P$  电流可以忽略。

2、当输入负信号的绝对值较大时，负载电流由  $Q_P$  提供， $Q_N$  电流可以忽略。

## 输出电阻

$$R_O = r_{eN} // r_{eP} = \frac{V_T}{i_N} // \frac{V_T}{i_P} = \frac{V_T}{i_N + i_P}$$

输出电阻在  $v_I = 0$  附近近似为常数（ $i_N i_P = I_Q^2$ ），或者说，电压增益近似为 1，这是交越失真能被消除的根本原因。



## 射级跟随器增益

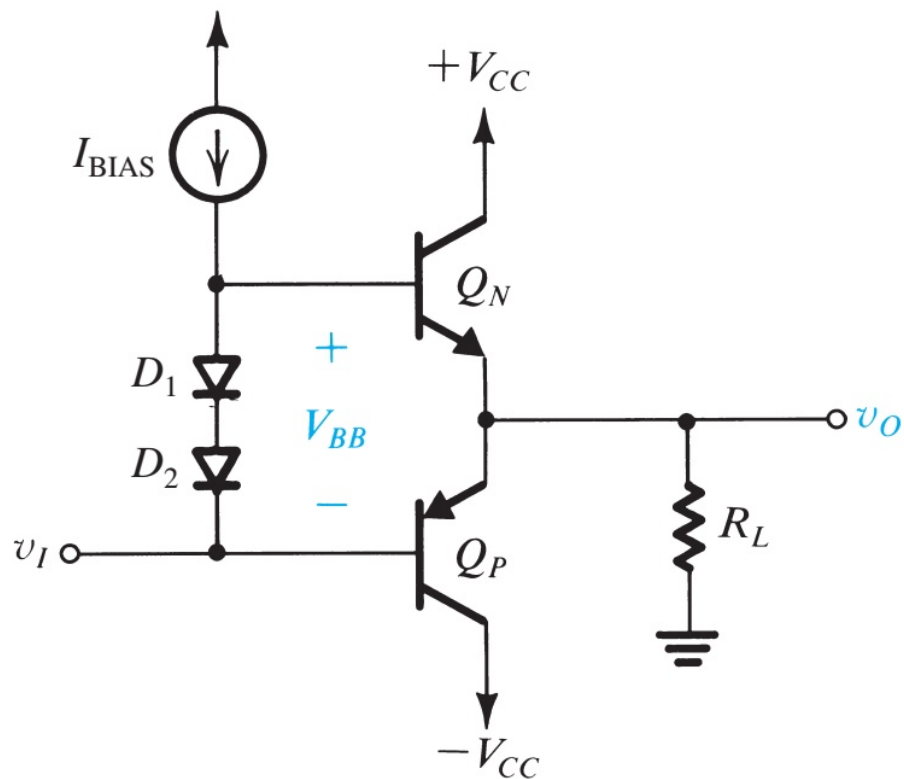
$$A_v = \frac{R_L // r_o}{r_e + R_L // r_o} \approx 1$$

$$R_O < R_L$$

为了减小失真，要求

## 二、偏置方式

### 1、二极管偏置

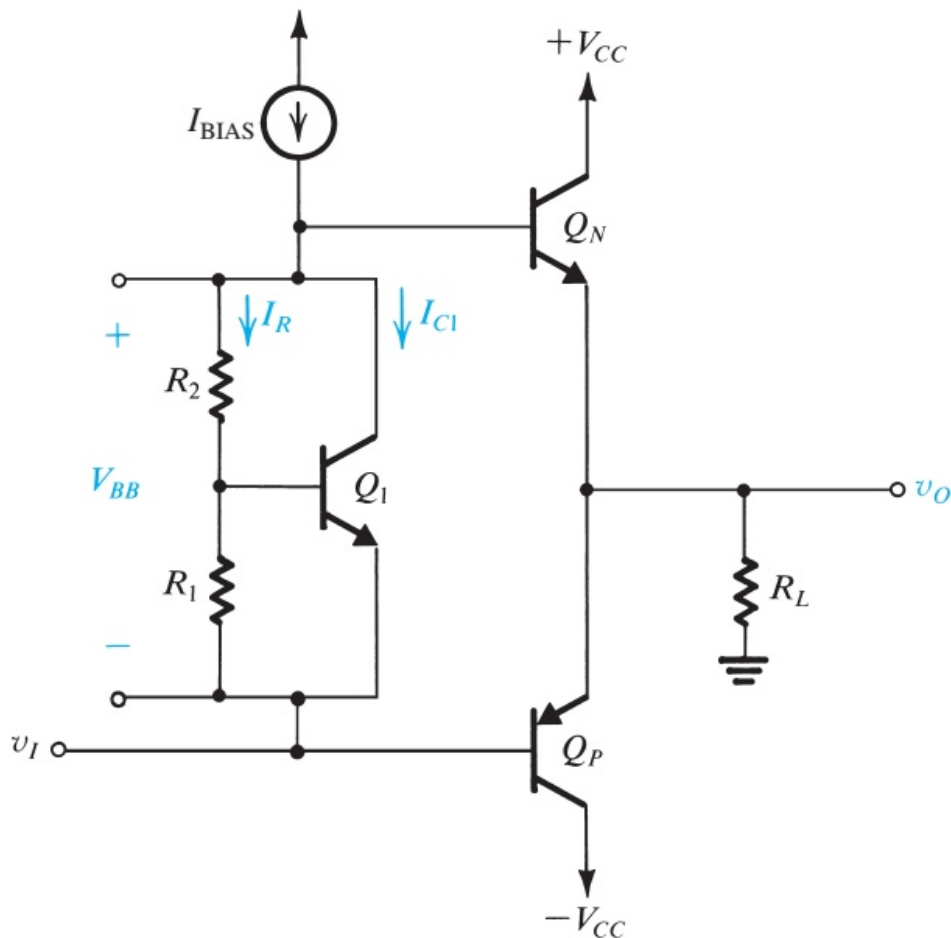


功率放大器，热稳定非常重要

- 1、温度升高，将使通过  $Q_N$  和  $Q_P$  的静态偏置电流  $I_Q$  增大，导致**热失控**（thermal runaway）。
- 2、若二极管  $D_1$  和  $D_2$  靠近  $Q_N$  和  $Q_P$  放置，则温度升高将导致  $V_{BB}$  减小，从而减小  $I_Q$ ，防止热失控的发生，提高输出级晶体管偏置电流的热稳定性。

偏置二极管与放大管靠近放置，有利于热稳定

## 2、晶体管偏置（又称为 $V_{BE}$ 电压倍增器偏置）



忽略晶体管  $Q_1$  的基极电流

$$I_R = \frac{V_{BE}}{R_1}$$

$$V_{BB} = I_R (R_1 + R_2) = V_{BE} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

通过将  $Q_1$  靠近  $Q_N$  和  $Q_P$  放置，同样可提高输出级晶体管偏置电流的热稳定性。

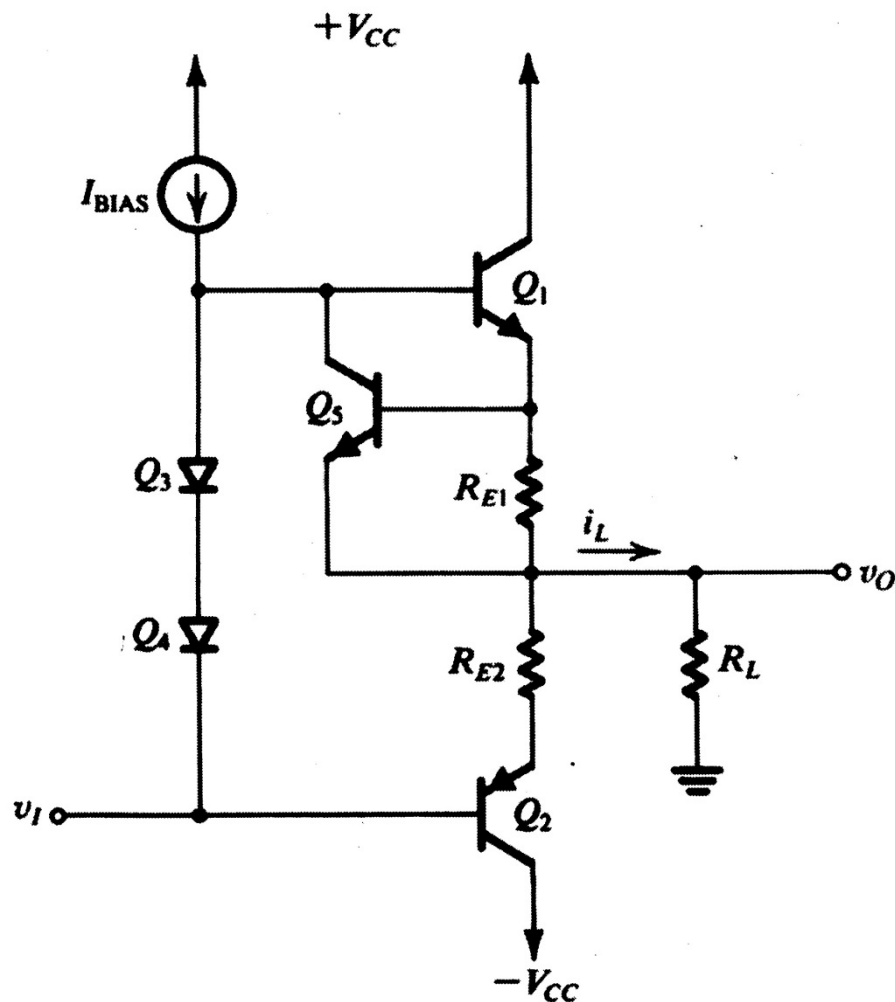
### 三、短路保护

$Q_1$  电流过大

$\Rightarrow R_{E1}$  压降增大

$\Rightarrow Q_5$  导通，分走  $Q_1$  基极电流

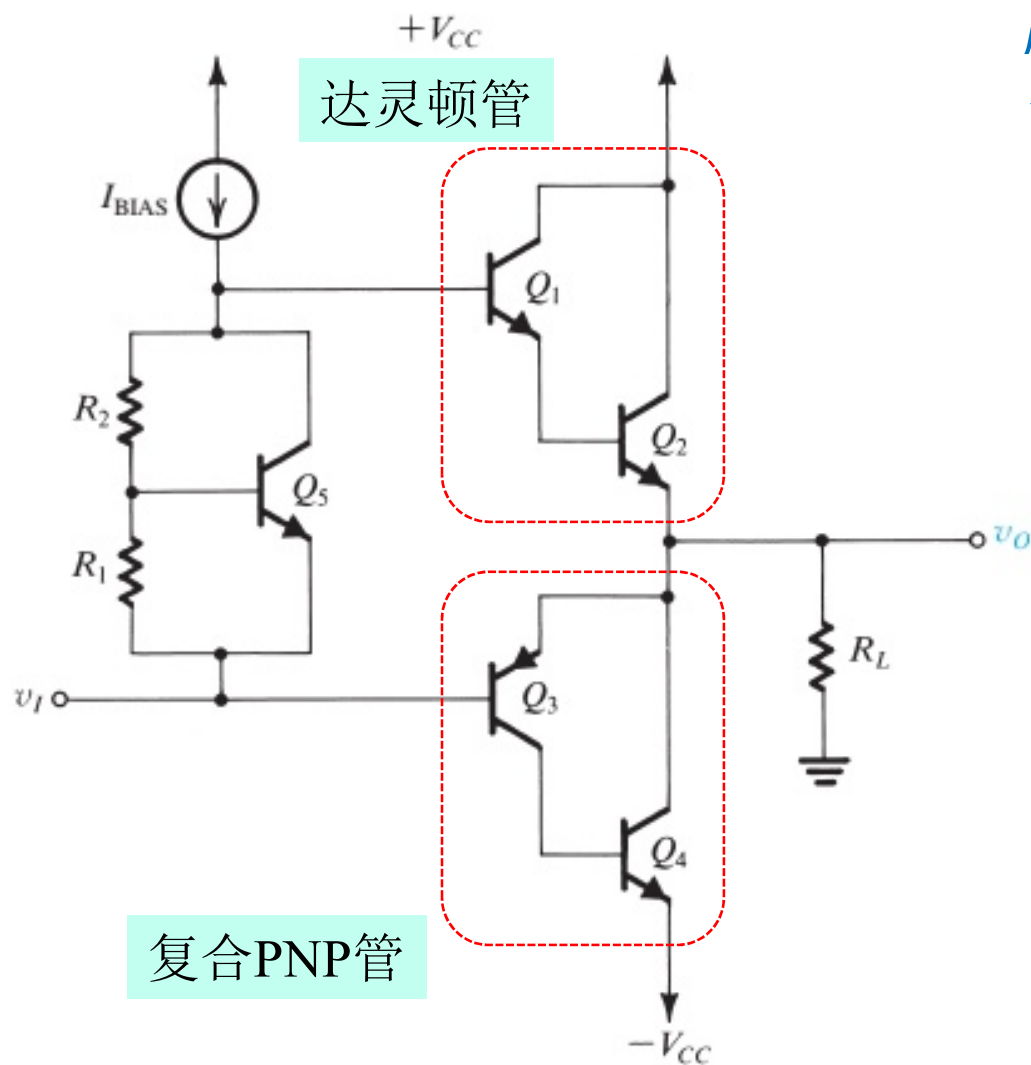
$\Rightarrow Q_1$  电流回到安全水平



好处：保护输出晶体管不出现热失控。

不足：输出电压的摆幅将下降。

## 四、使用复合管

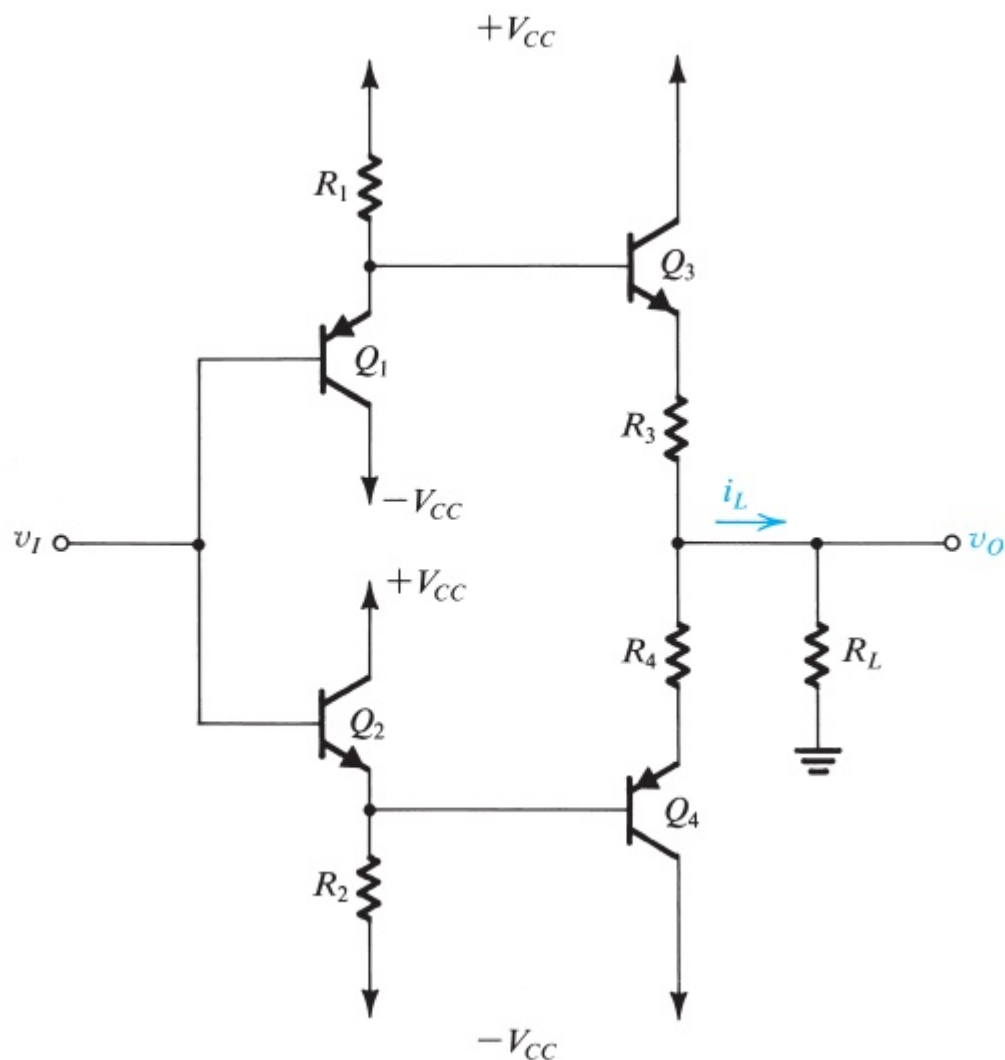


$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

$V_{BE}$  约为普通BJT的2倍

复合管输出级可提高晶体管的电流增益，减小基极驱动电流。

## 五、输入端引入射级跟随器



- 1、输入端引入射级跟随器，可增大输入电阻。
- 2、 $R_3$  和  $R_4$  电阻很小，主要是为了补偿  $Q_3$  和  $Q_4$  的失配，使输出信号的正负幅度相同。
- 3、 $R_3$  还可以提供负反馈，稳定通过  $Q_3$  的电流，防止热失控。