

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 η_{\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

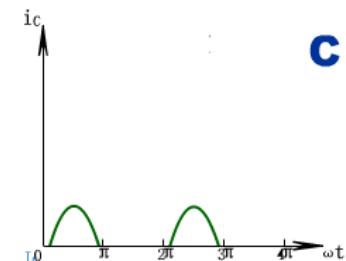
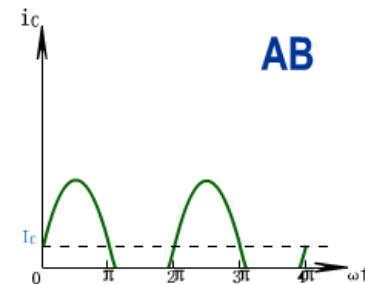
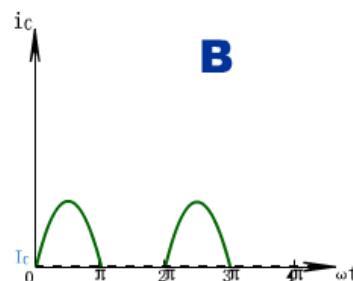
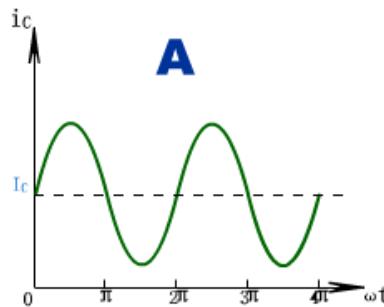
根据电路中晶体管工作点的不同，输出级电路有A类/甲类、B类/乙类、AB类/甲乙类和C类/丙类之分。

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。

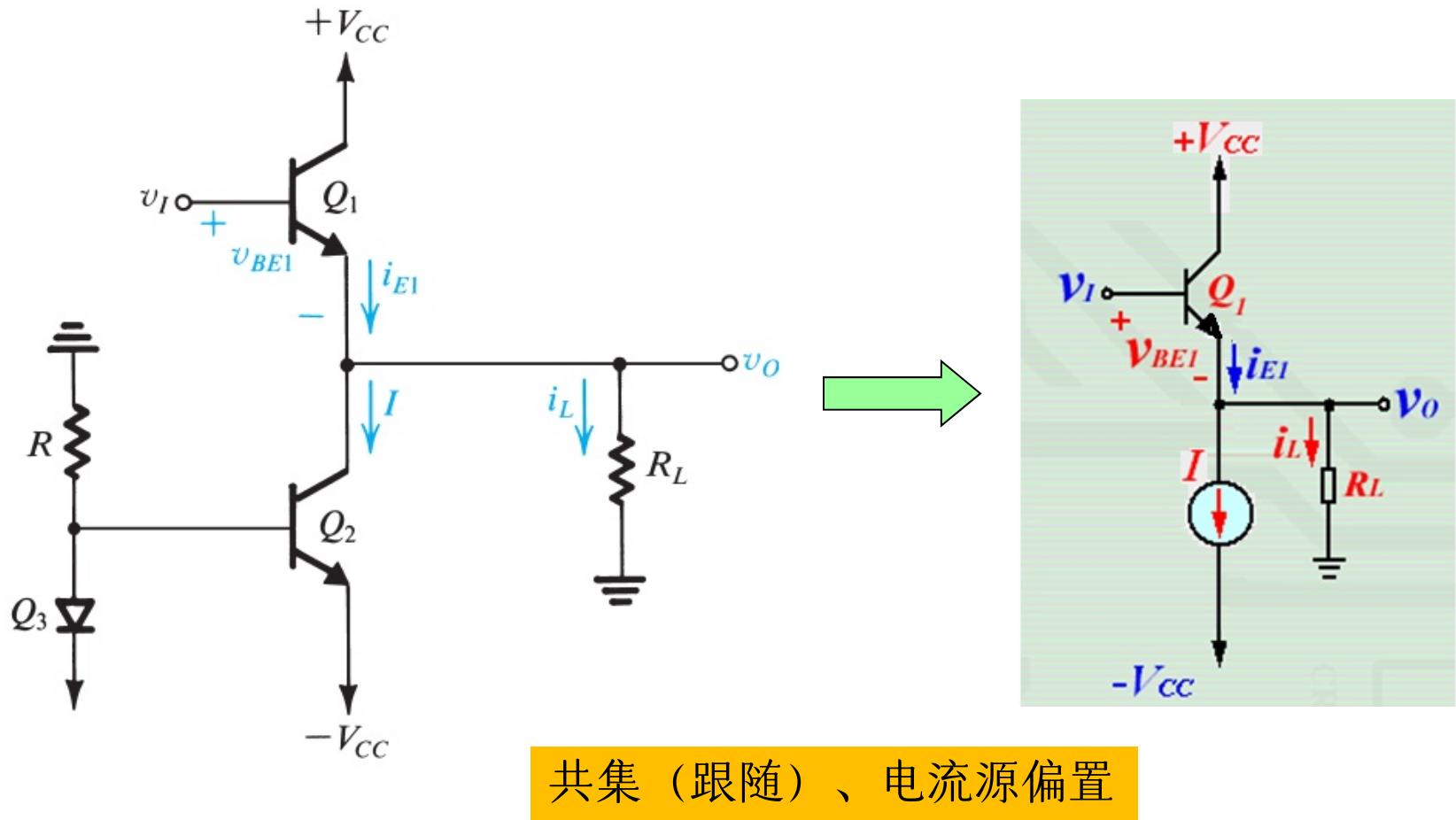
C类：晶体管仅在信号的小半个周期处于导通状态。



晶体管导通时间不同

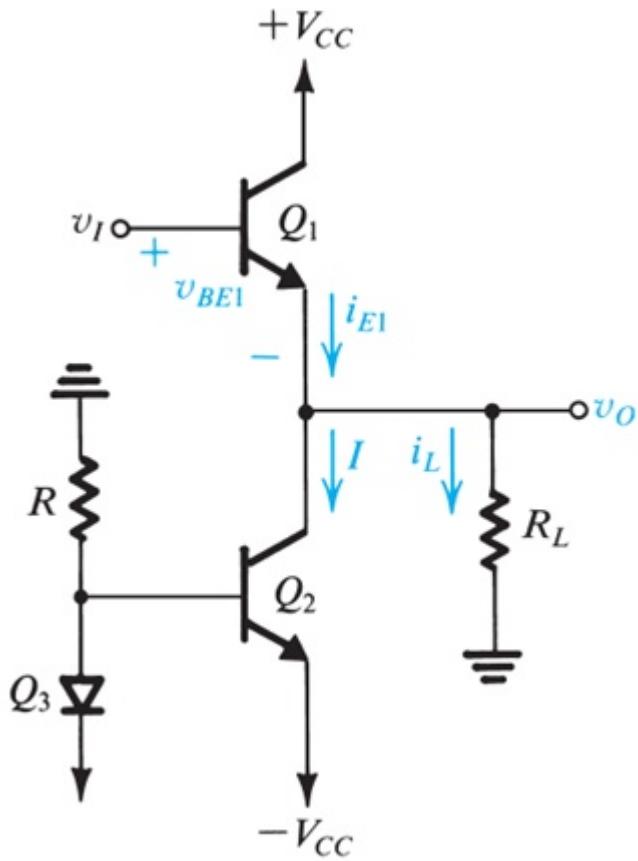
12.2 功率放大器分析计算

12.2.1 A类功率放大器



Q: 输出信号摆幅?

跟随



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

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

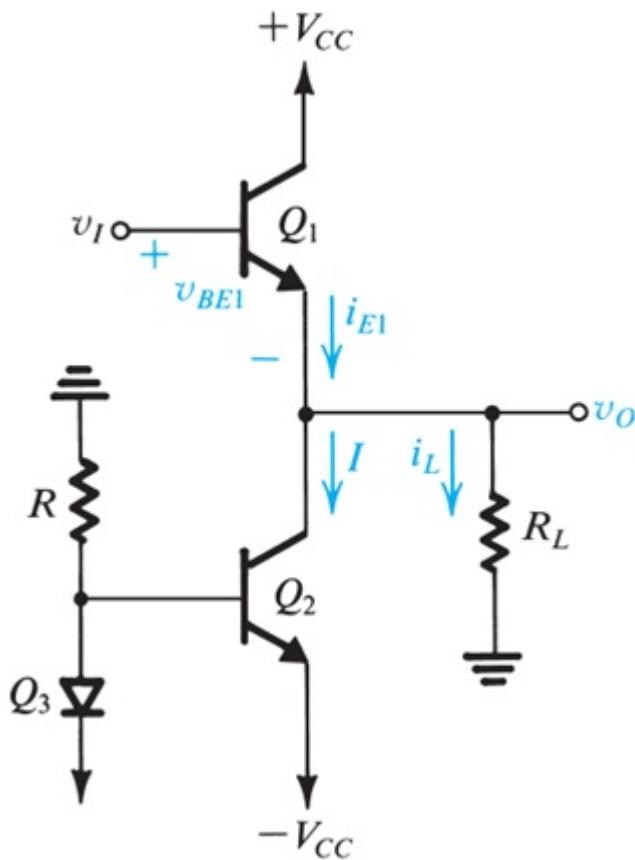
$$v_{O\min} = -V_{CC} + V_{CE2sat}$$

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

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

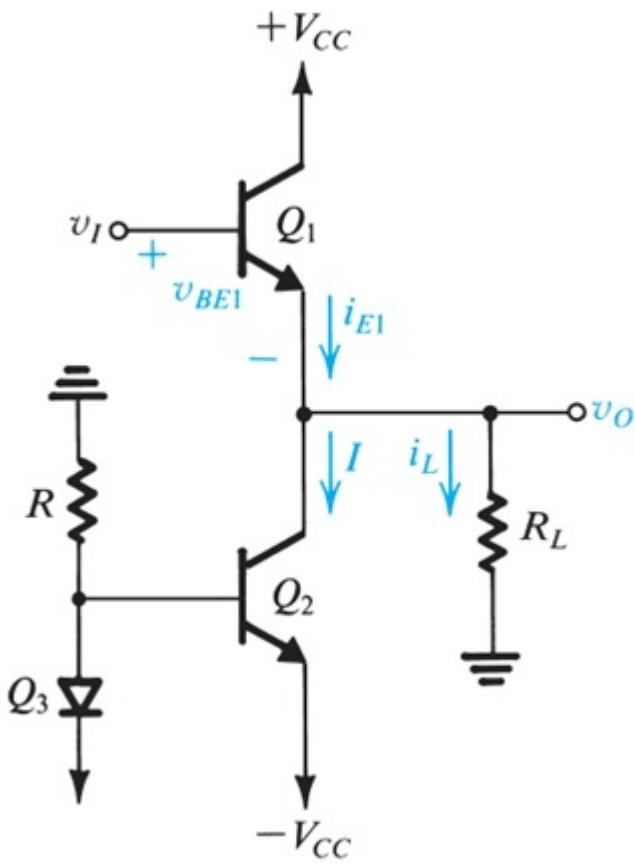
负载上得到的平均输出功率（假设输出正弦信号）

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

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

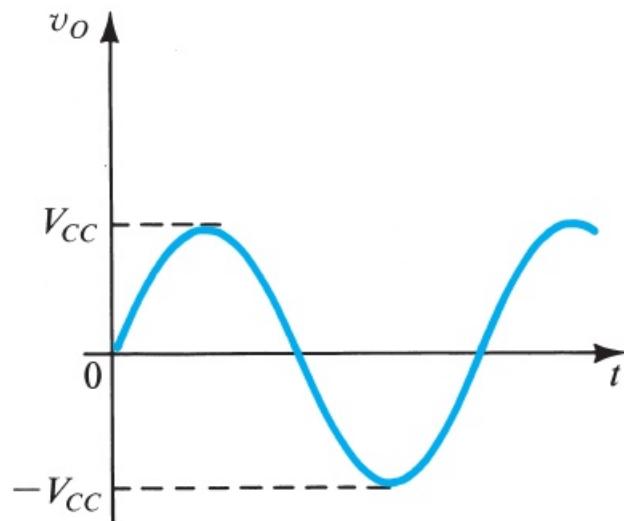
$$P_S = 2V_{CC}I = \frac{2V_{CC}^2}{R_L}$$

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

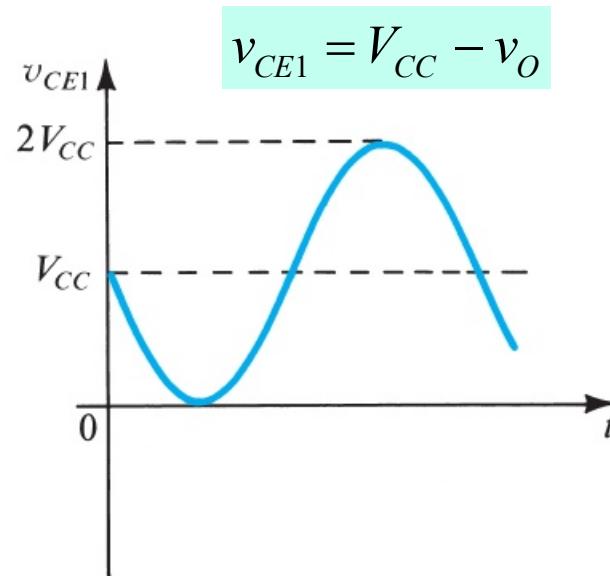
!!!

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

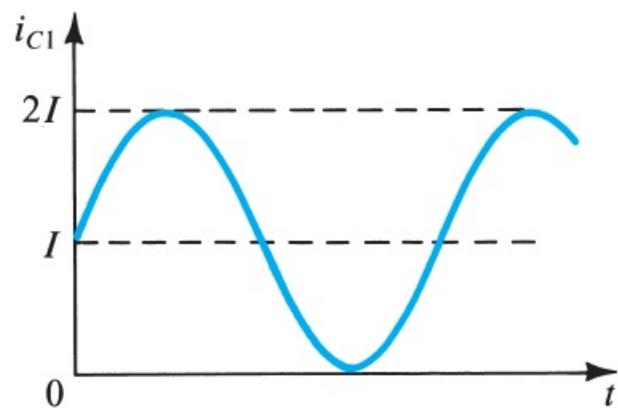
信号波形



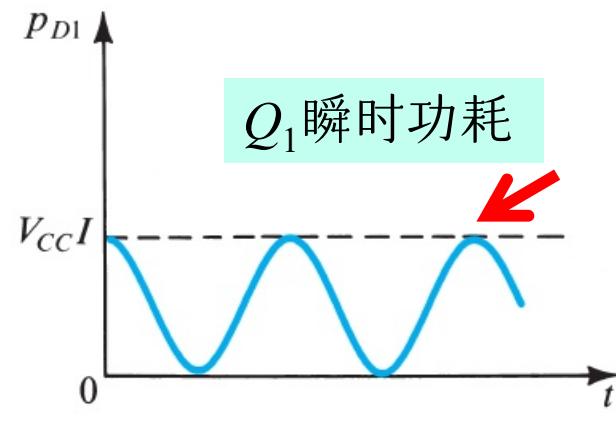
(a)



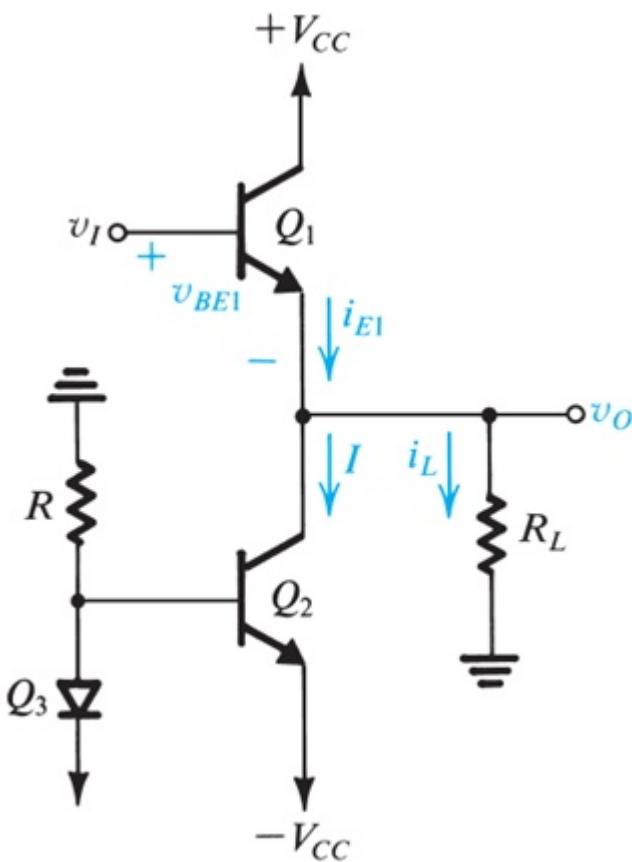
(b)



(c)



(d)

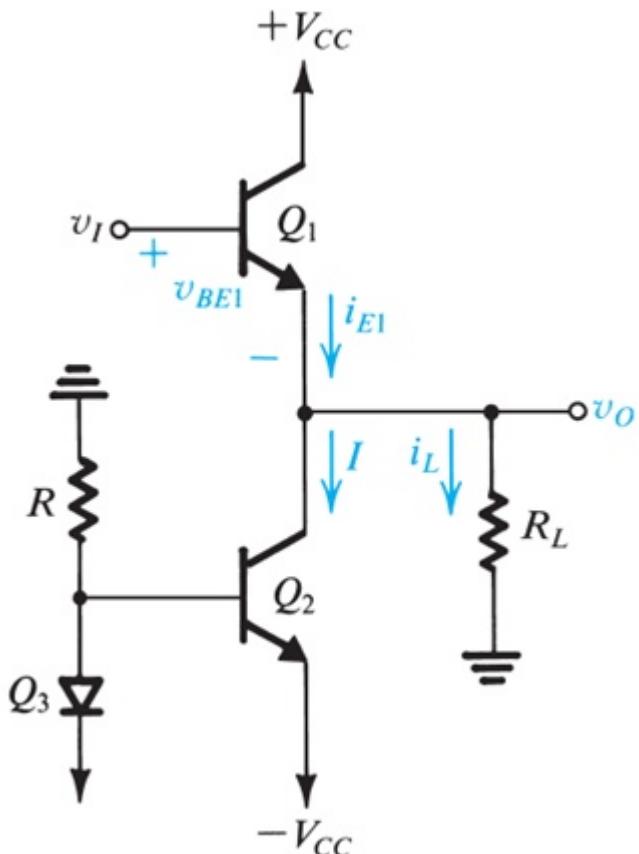


$$\text{取 } I = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

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。



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 $v_{CE2} = 2V_{CC}$

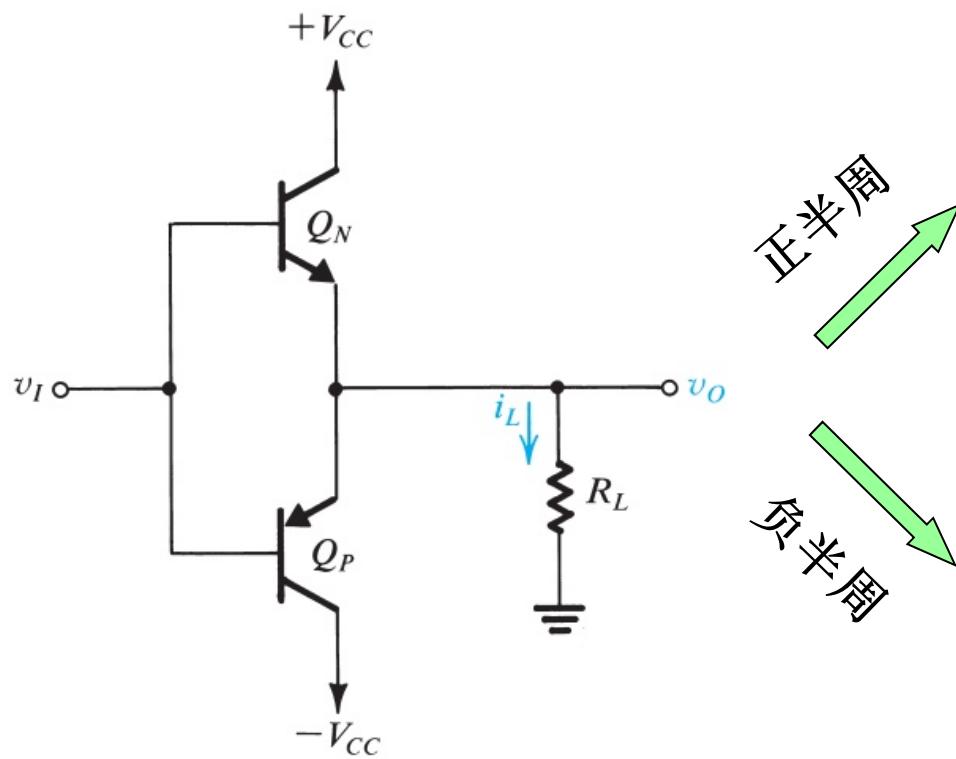
$$P_{D2\max} = 2V_{CC}I$$

这种情况一般不会持续很长时间，
设计时不必受此约束。

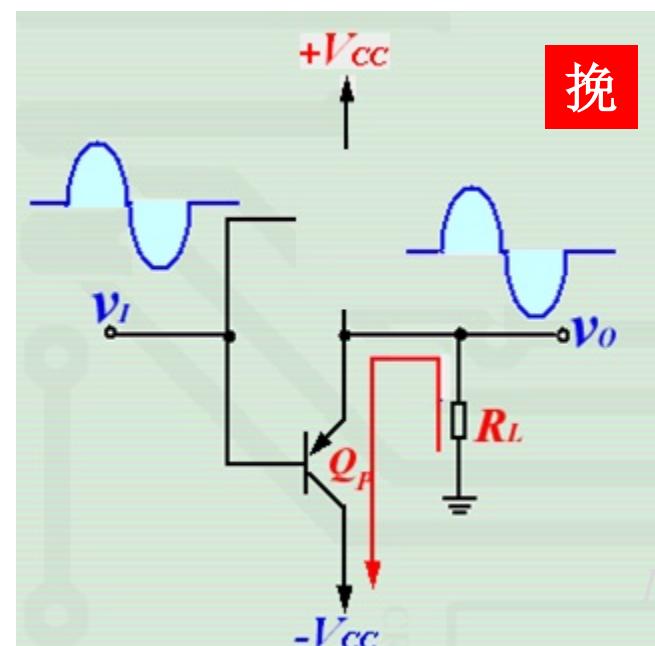
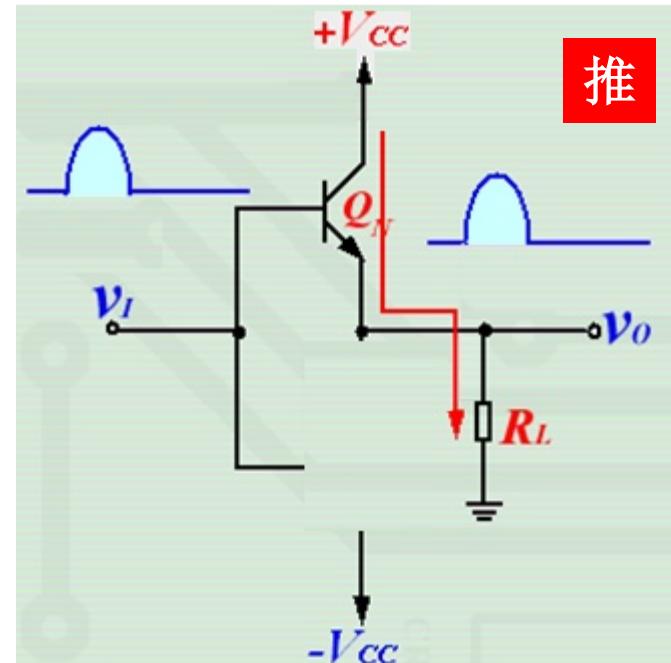
其平均功耗为 $V_{CC}I$

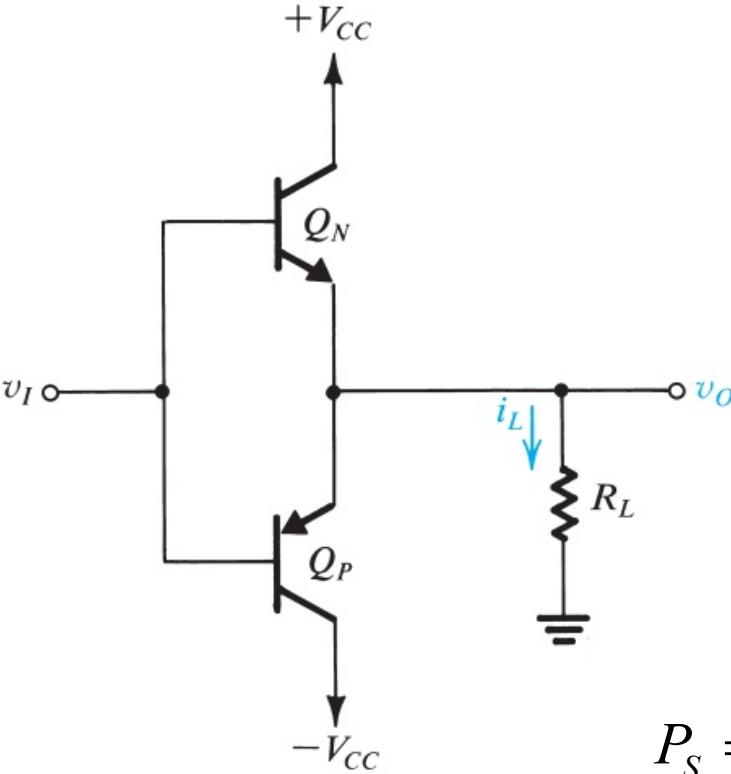
$$\text{取 } I = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

12.2.2 B类功率放大器



电路工作在**推挽** (push-pull) 模式



$+V_{CC}$ 

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

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

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

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

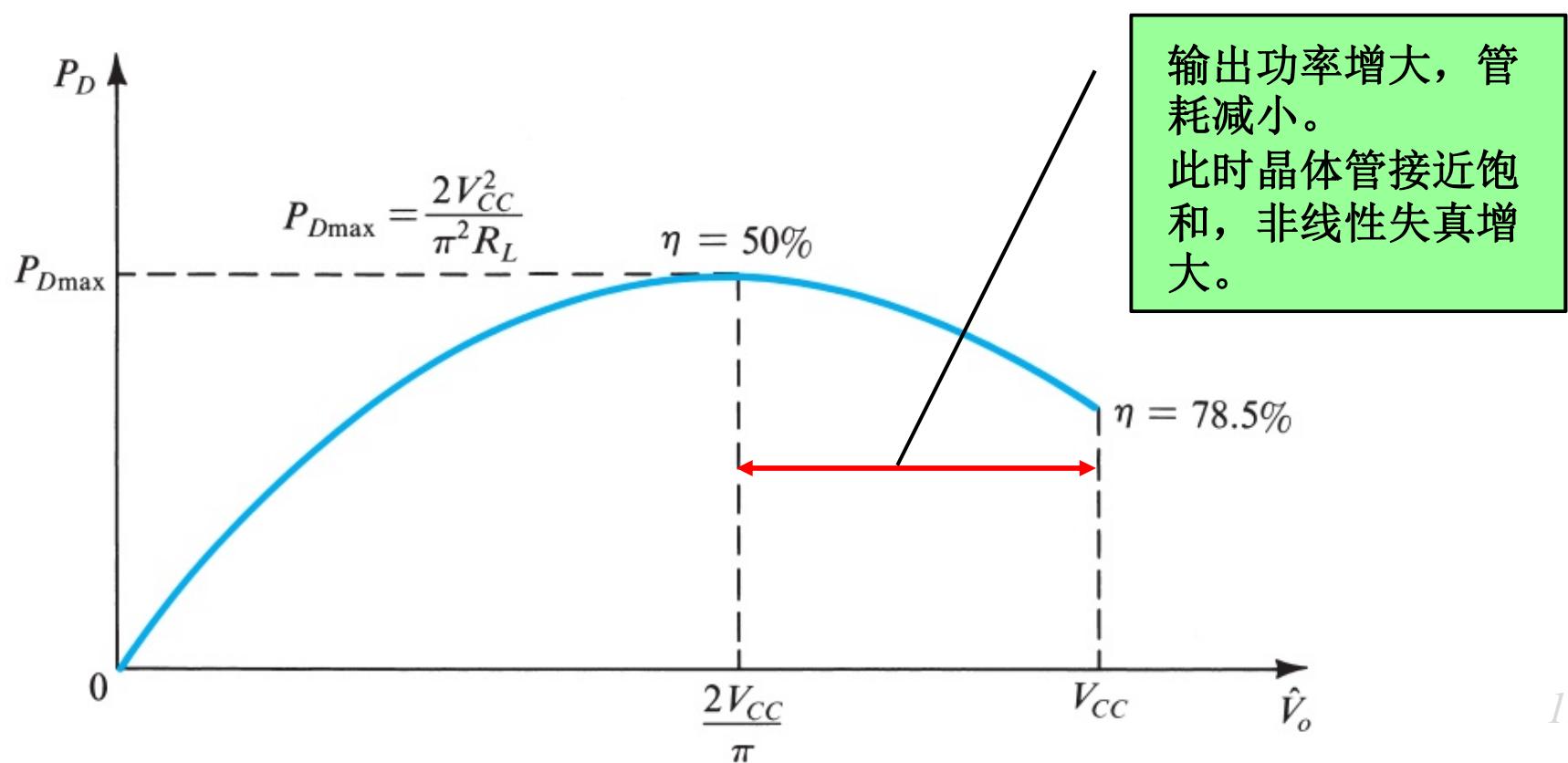
$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_O}{V_{CC}} \quad \longrightarrow \quad \eta_{\max} \Big|_{\hat{V}_O=V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

管耗问题

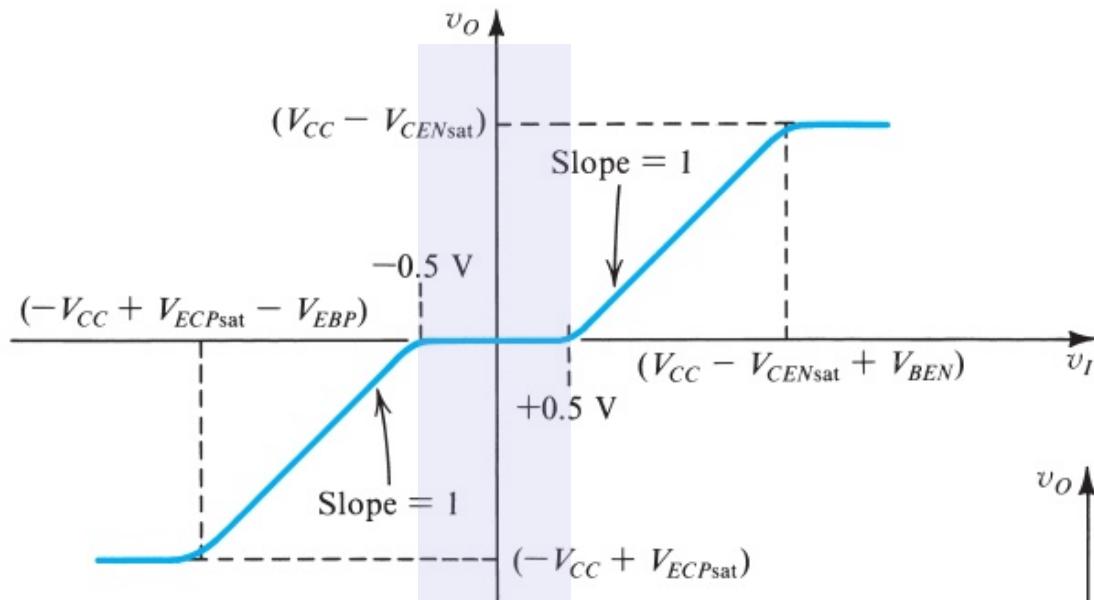
$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$

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

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

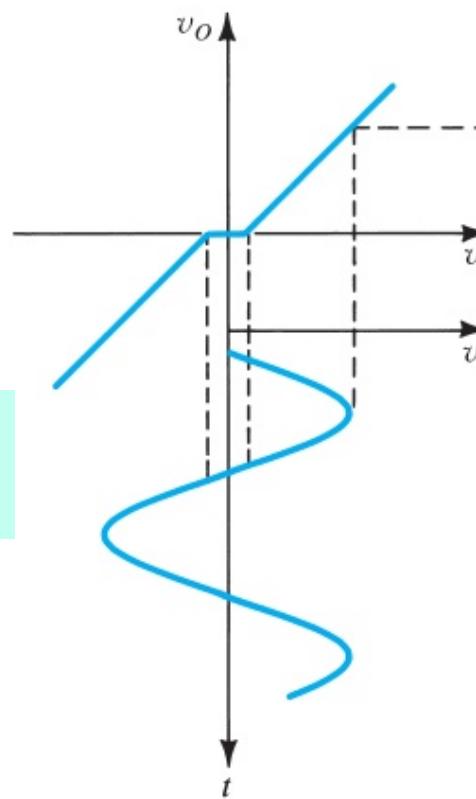


交越失真 (Crossover Distortion)

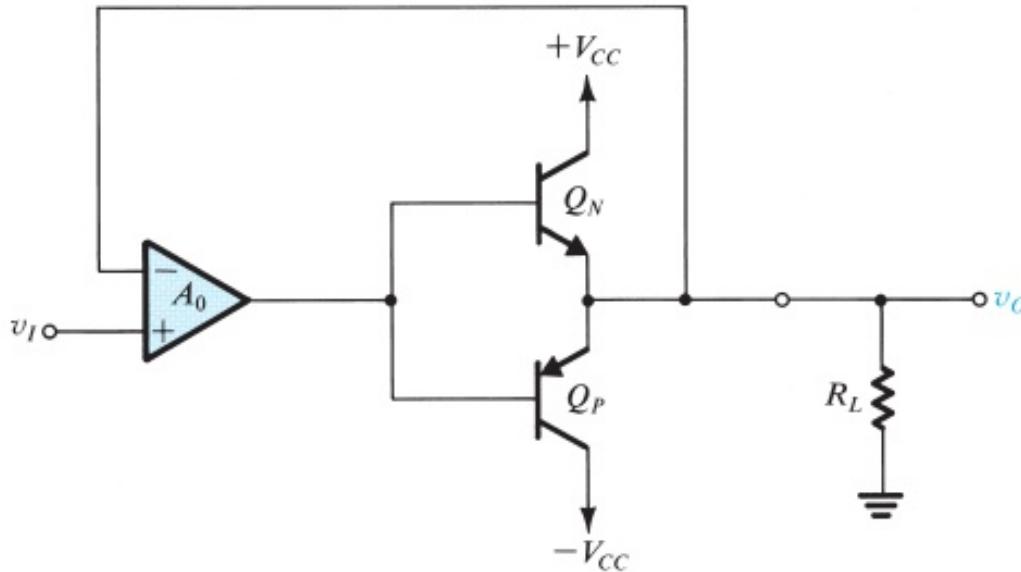


输入输出特性

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

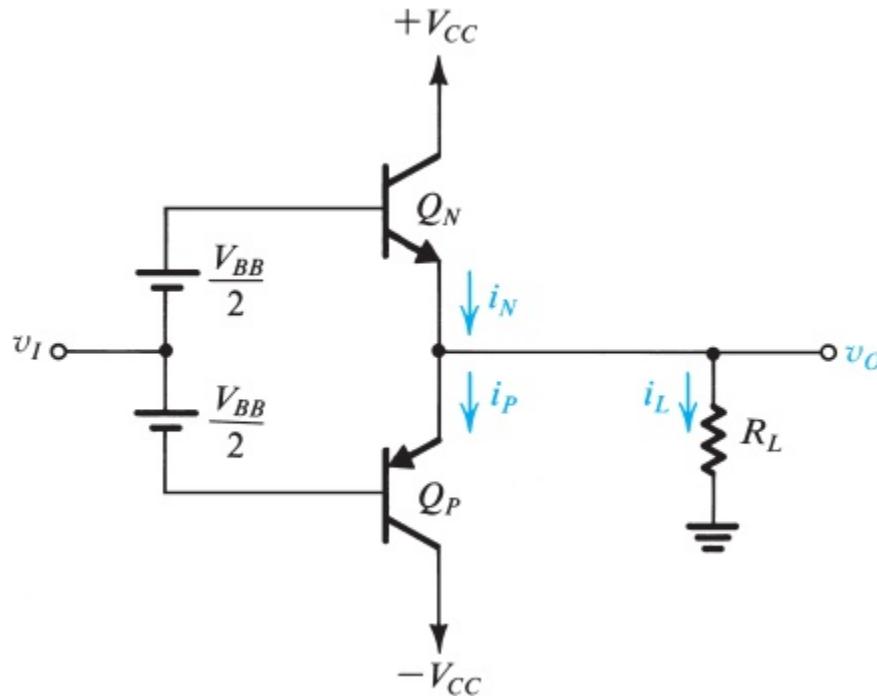


± 0.7 V 的死区电压被降低至 $\pm 0.7/A_0$ V，
但无法从根本上消除。

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

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

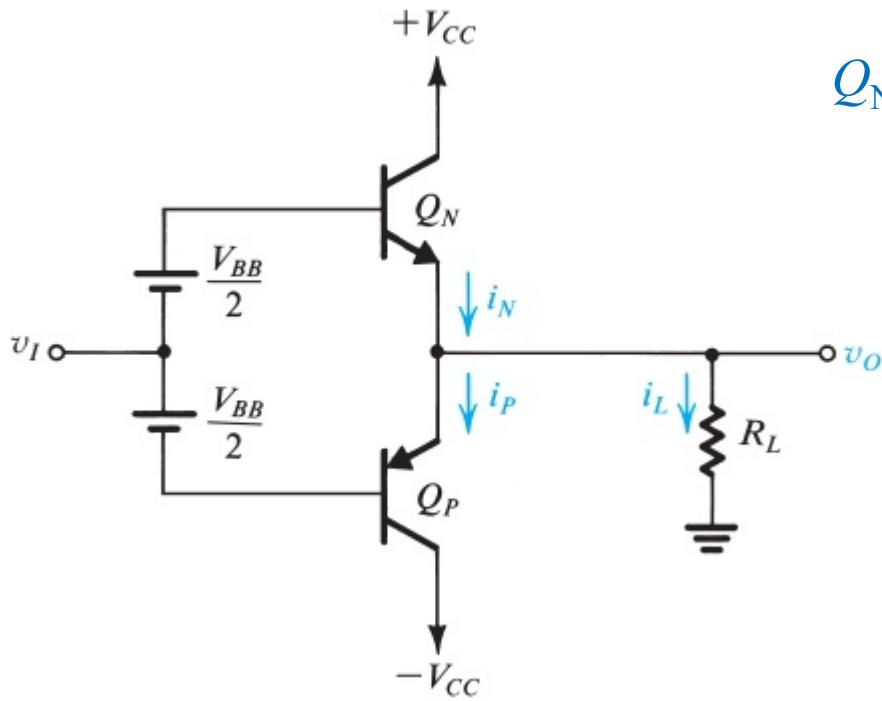
考虑输入正半周信号情况 ($v_I > 0$)

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

$$i_N = i_P + i_L$$

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

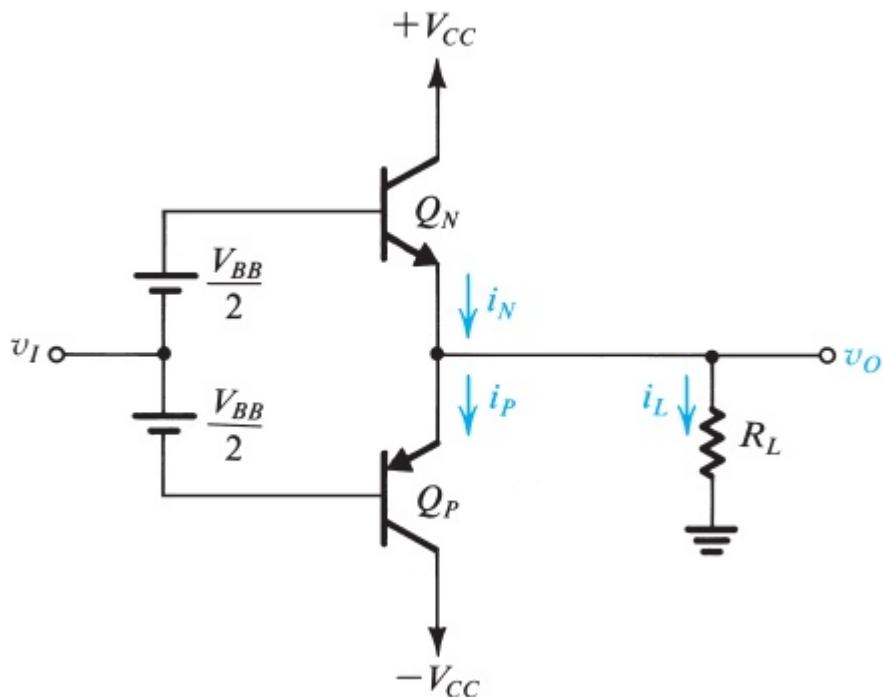
$$V_T \ln \frac{i_N}{I_S} + V_T \ln \frac{i_P}{I_S} = 2V_T \ln \frac{I_Q}{I_S}$$



Q_N 、 Q_P 电流关系 $i_N i_P = I_Q^2$

- 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。
- 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

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

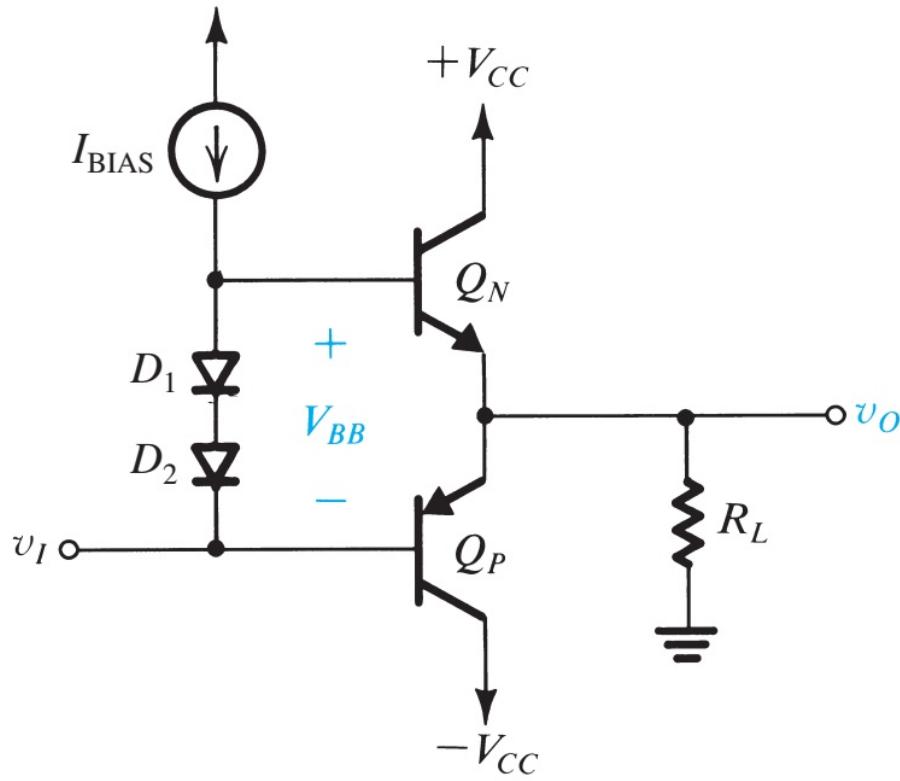
为了减小失真，要求

$$R_O < R_L$$

二、偏置方式

1、二极管偏置

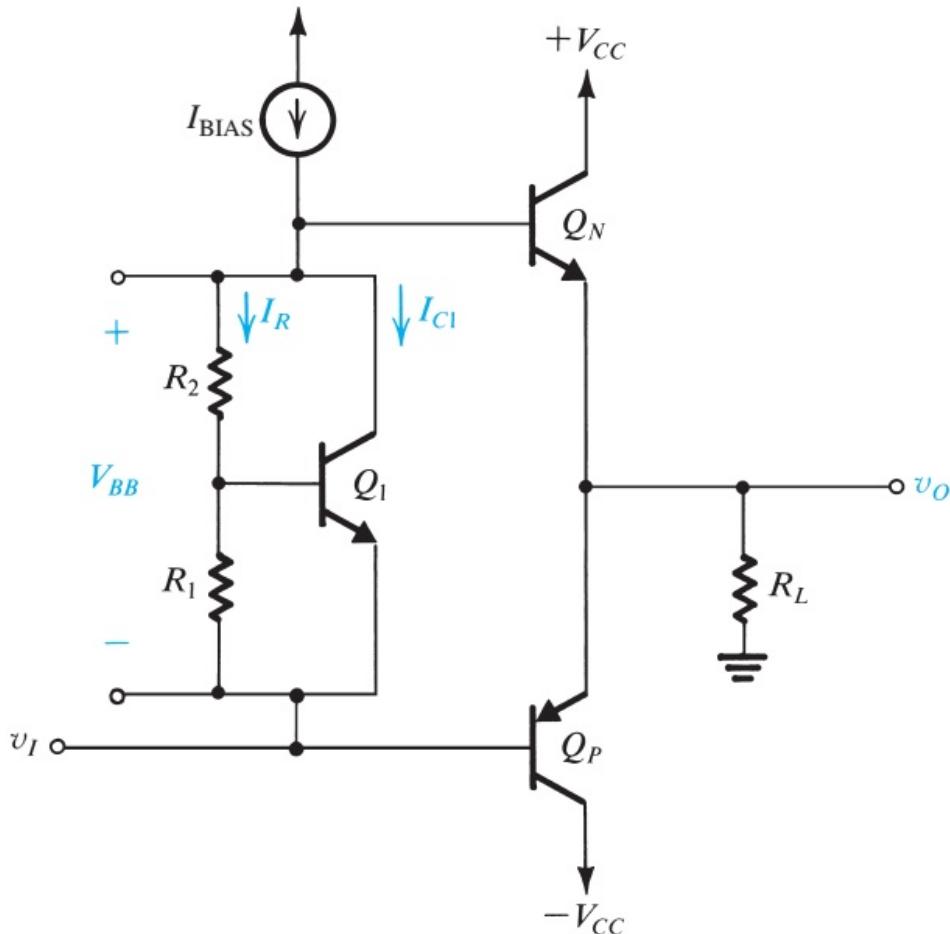
功率放大器，热稳定非常重要



- 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。

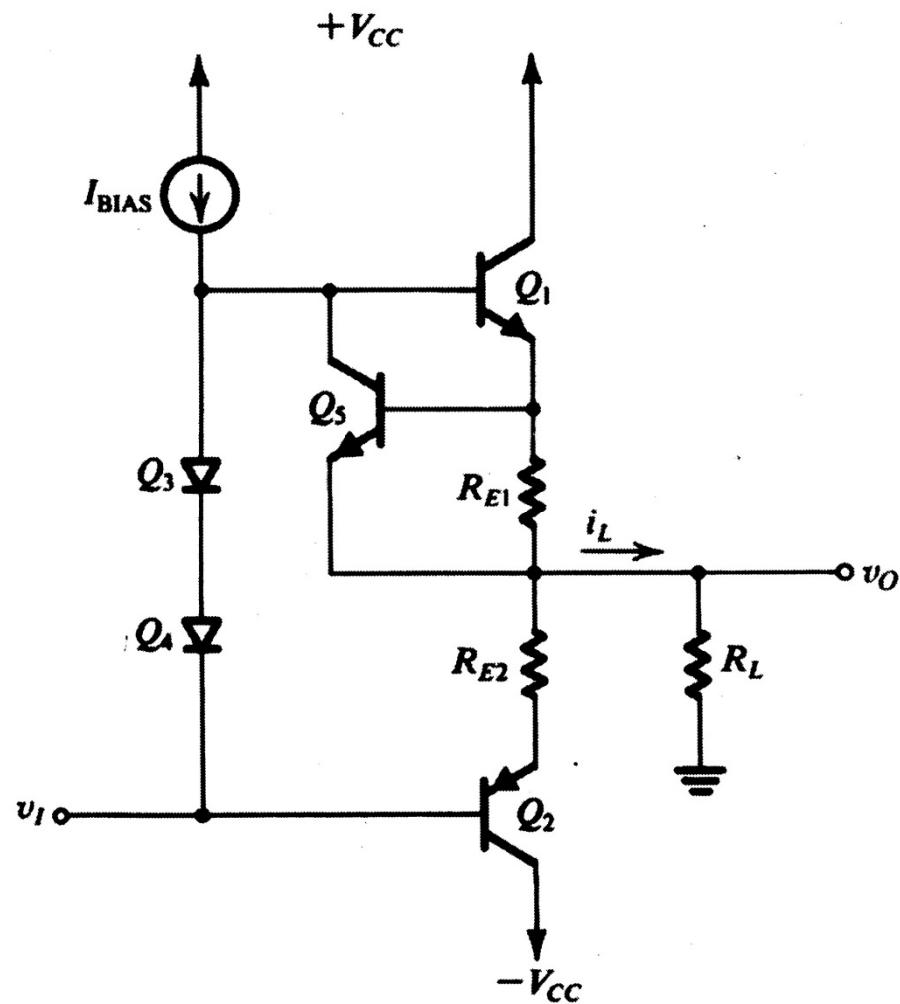
三、短路保护

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

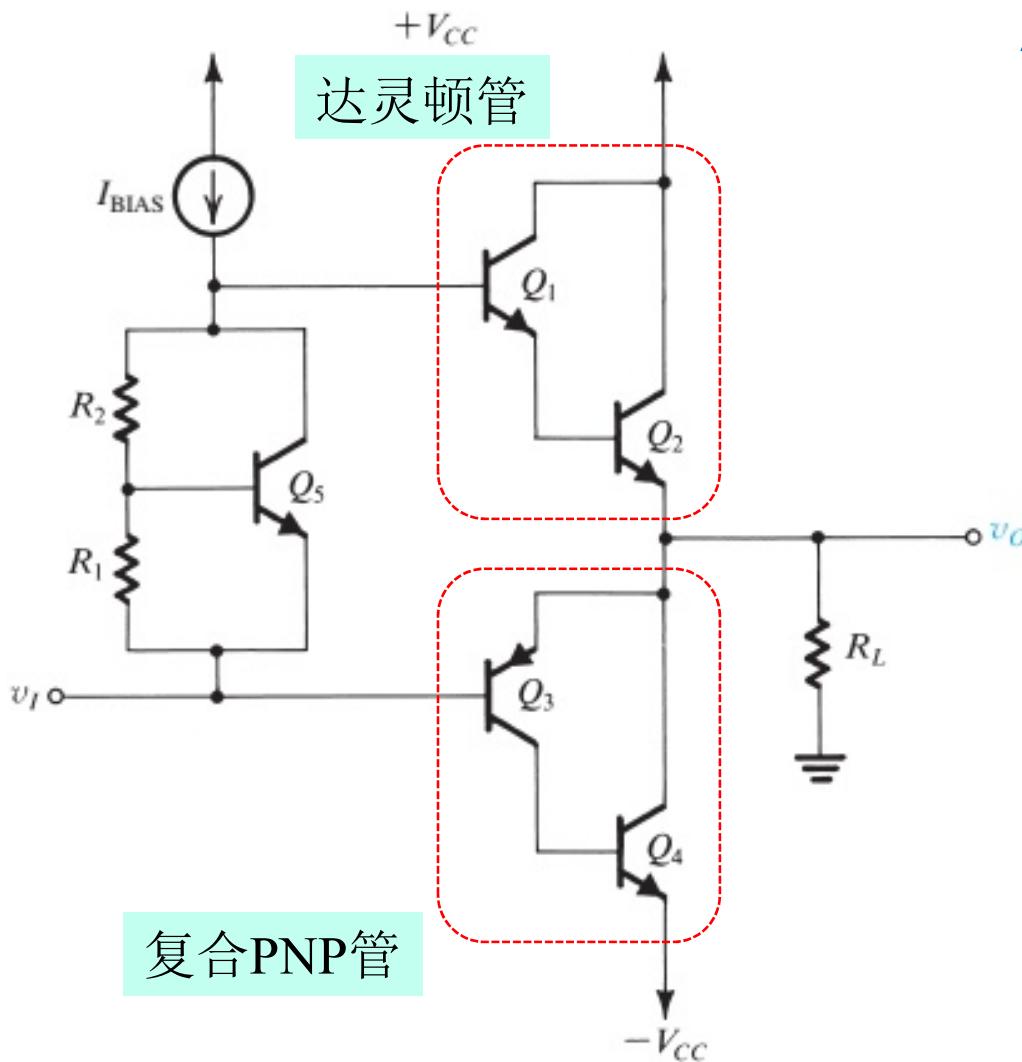
$\Rightarrow Q_1$ 电流回到安全水平



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

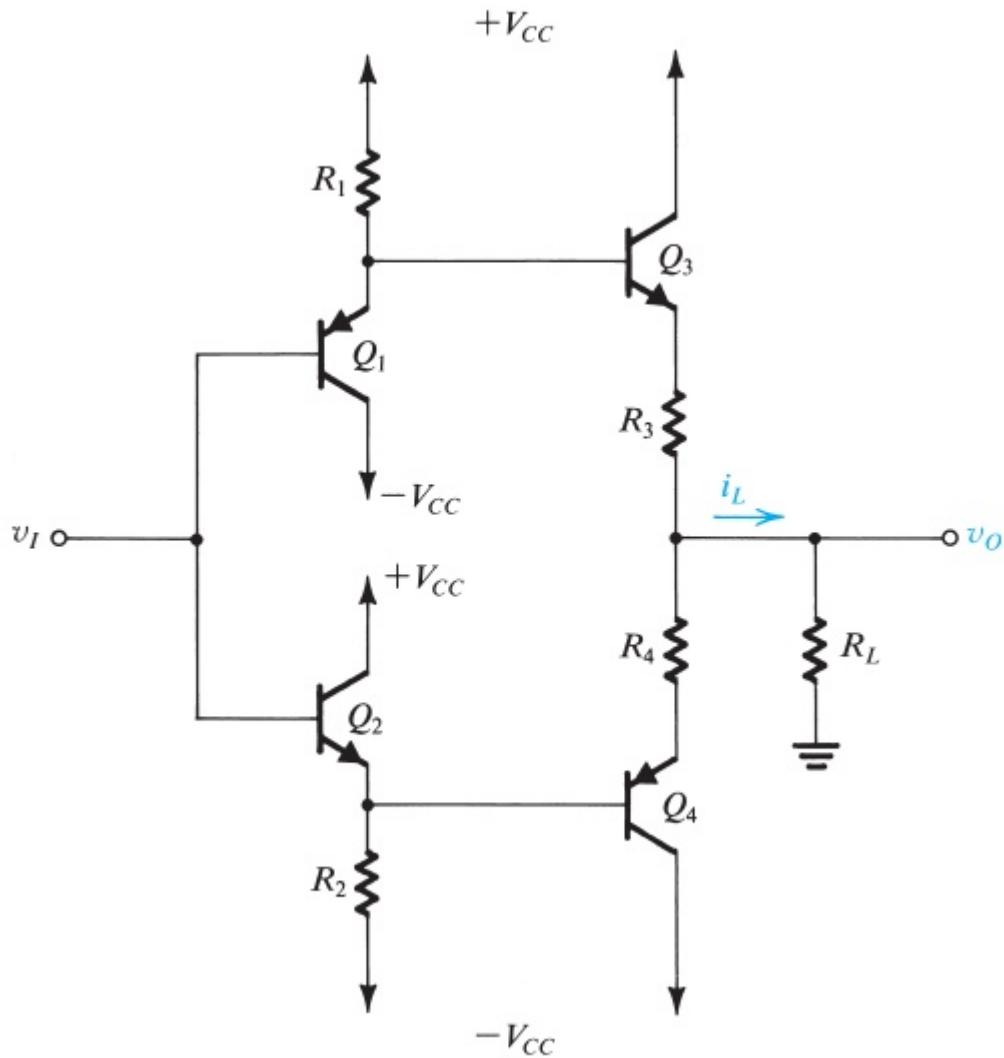


$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

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。