

第十三章 功率放大器

功率放大器概述

功率放大器分析计算

13.1 功率放大器概述

13.1.1 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。

13.1.2 功率放大器分类

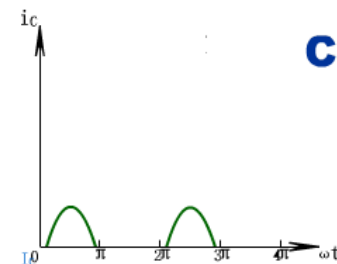
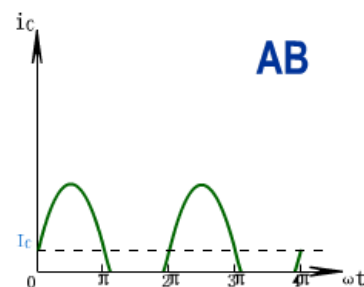
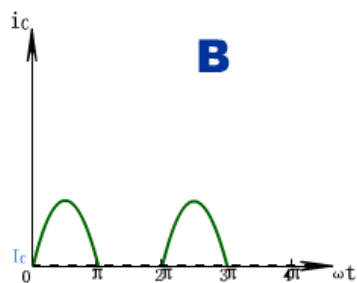
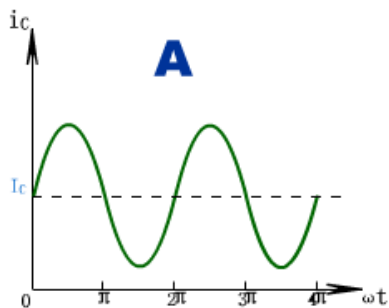
根据电路中晶体管工作点的不同，输出级电路有A类/甲类、B类/乙类、AB类/甲乙类和C类/丙类之分。

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。

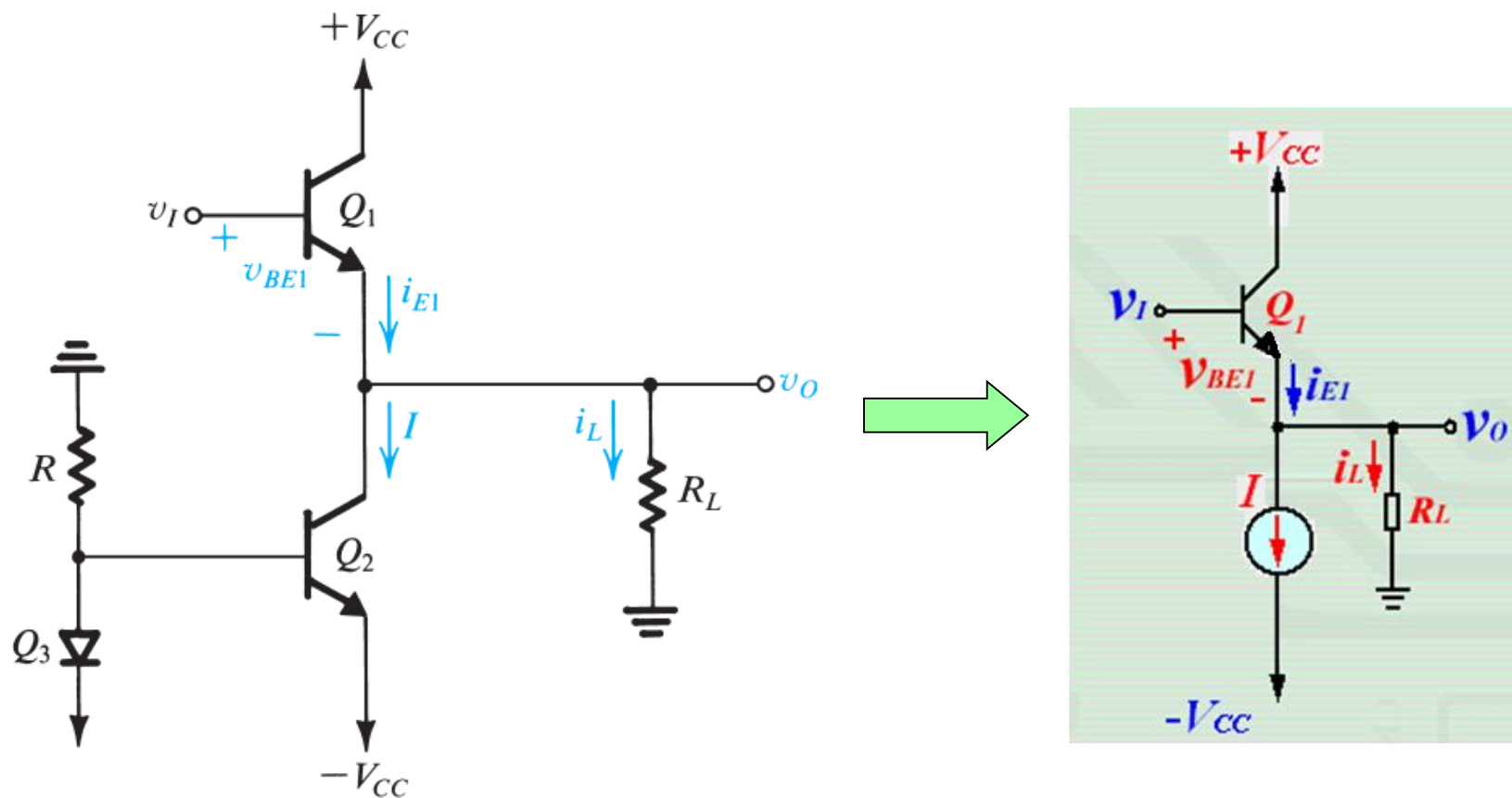
AB类：晶体管在信号的多半个周期处于导通状态。

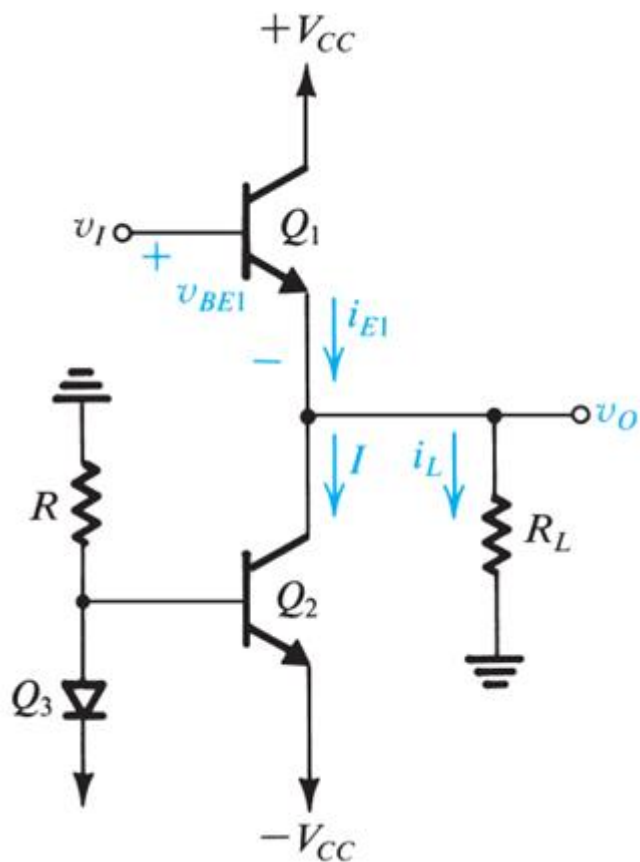
C类：晶体管仅在信号的小半个周期处于导通状态。



13.2 功率放大器分析计算

13.2.1 A类功率放大器





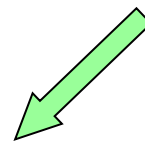
正方向 $v_O = v_I - v_{BE1}$

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

负方向 $v_{O\min} = -IR_L$ 或

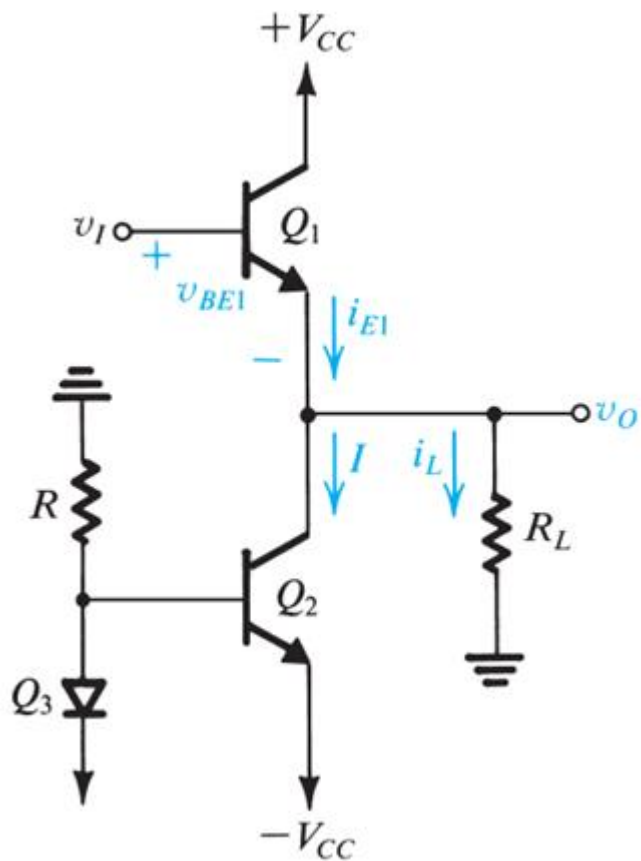
$$v_{O\min} = -V_{CC} + V_{CE2sat}$$

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

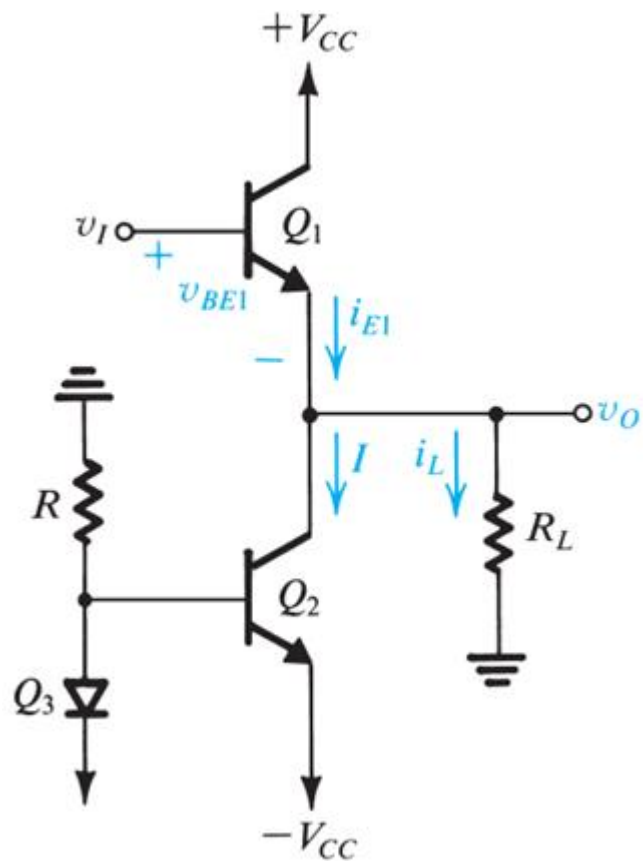
$$v_{O\max} = V_{CC} \quad i_{O\max} = V_{CC} / R_L$$

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

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



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 $\eta_{\max} = \frac{P_{L\max}}{P_S} = 25\%$

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

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。

- 2、考虑负载开路的极端情况

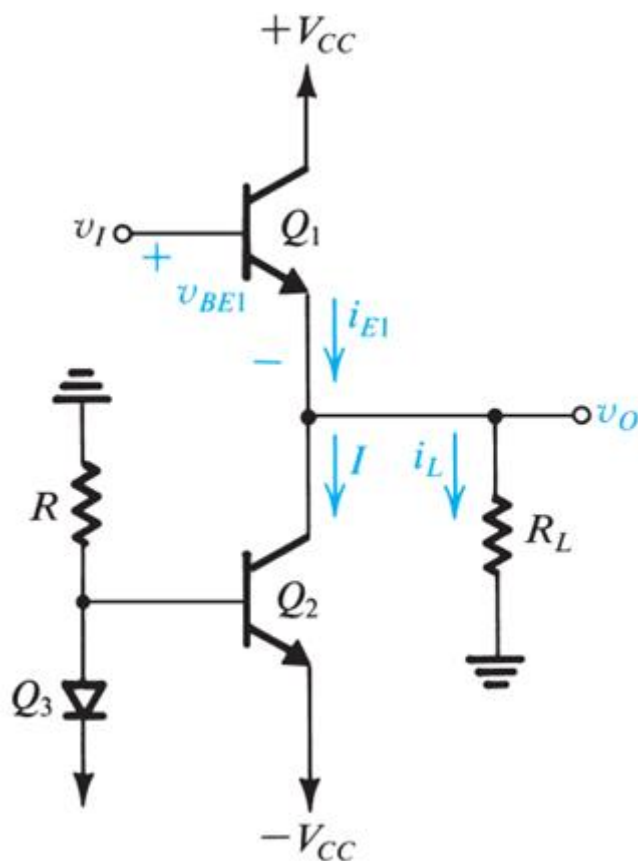
最大功耗出现在 $v_o = -V_{CC}$

此时 Q_1 承受最大功耗为 $2V_{CC} I$

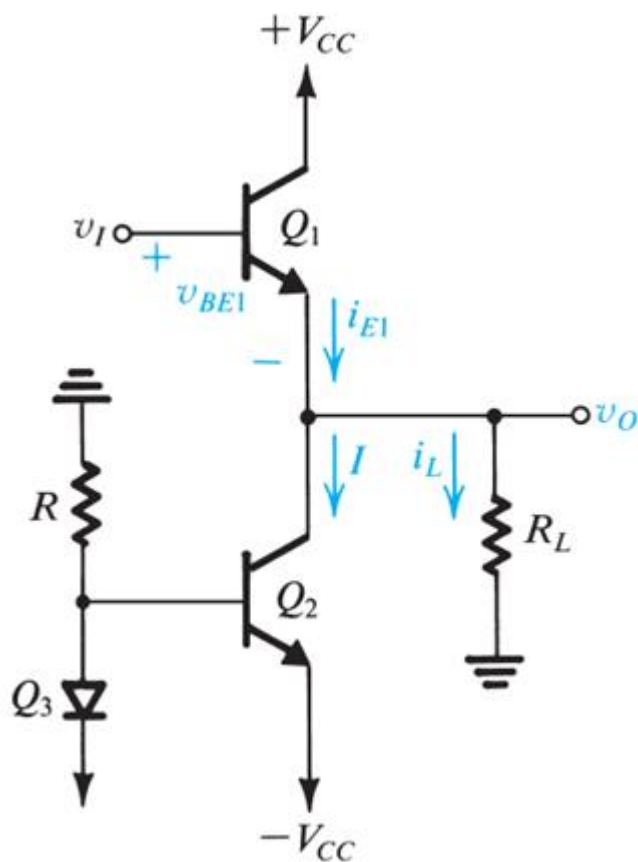
这种情况一般不会持续很长时间，设计时不必受此约束。其平均功耗为 $V_{CC} I$

- 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

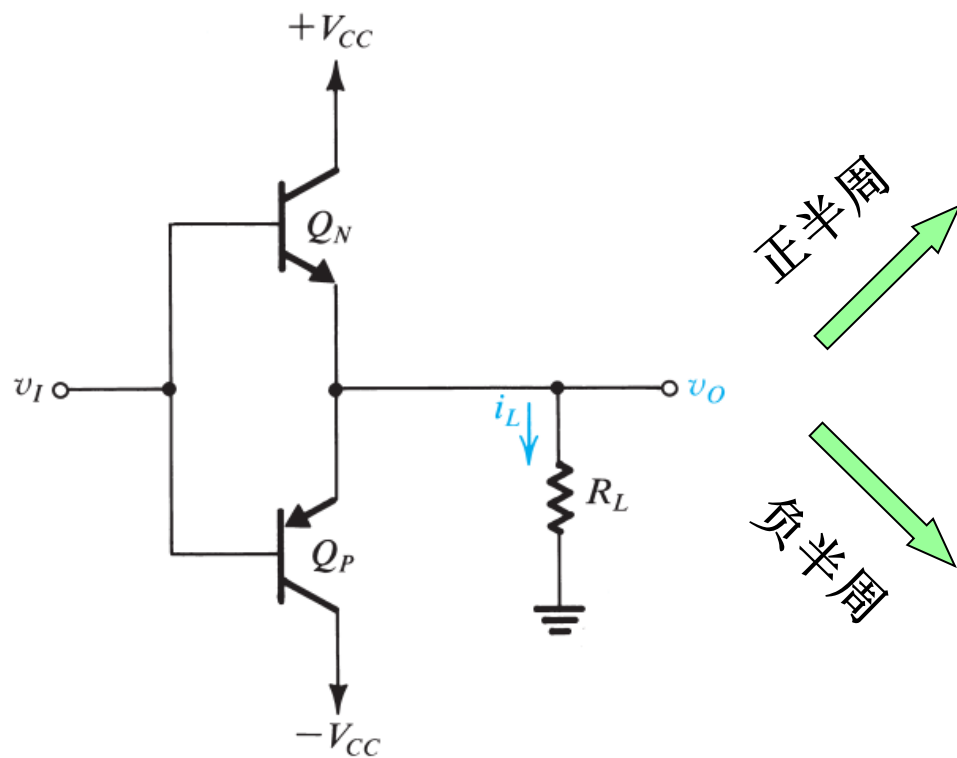
最大功耗出现在 $v_{CE2} = 2V_{CC}$

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

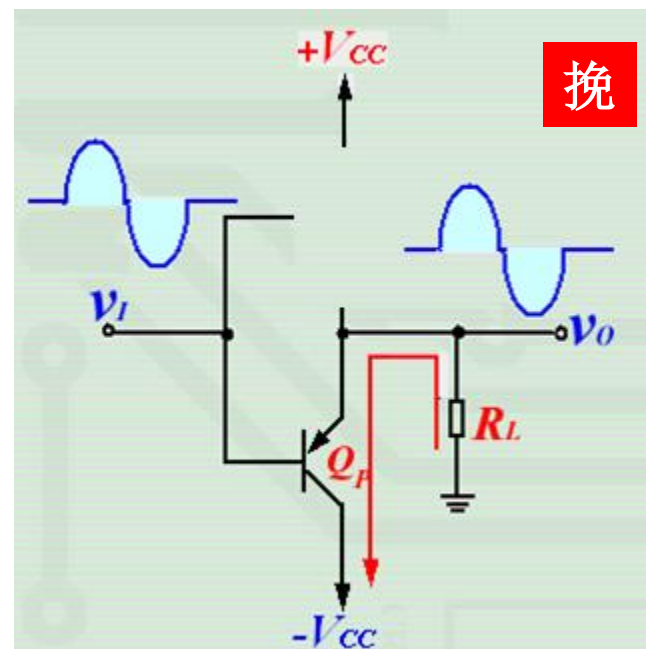
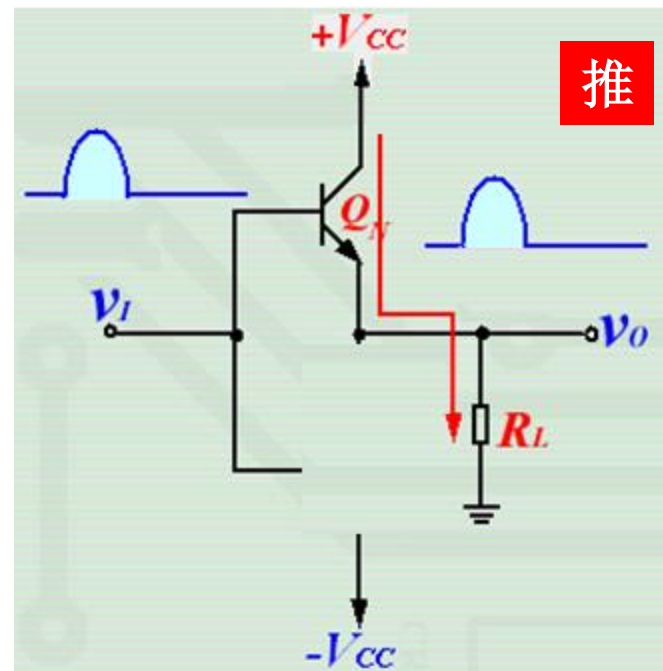
这种情况一般不会持续很长时间，
设计时不必受此约束。

其平均功耗为 $V_{CC}I$

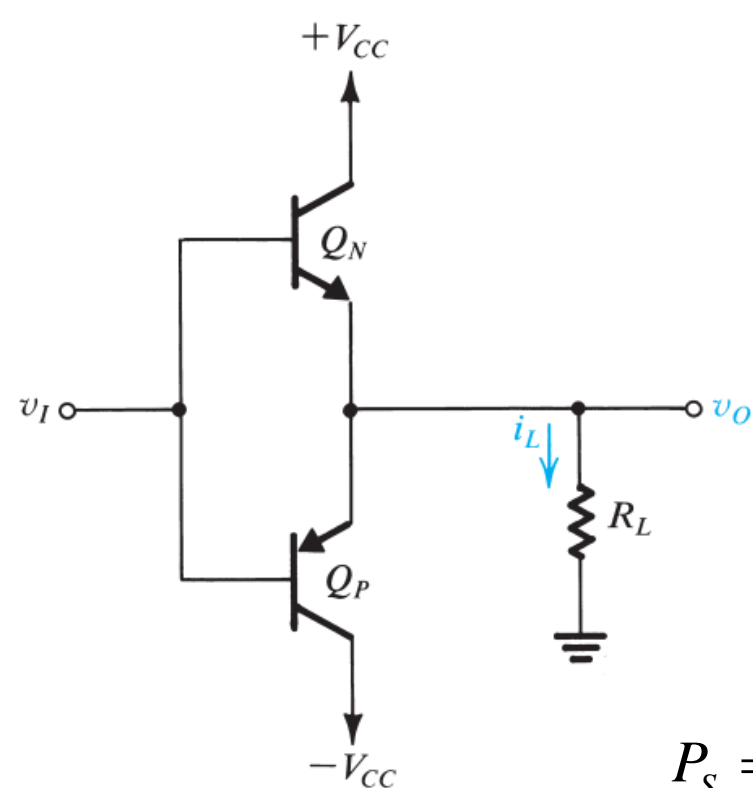
13.2.2 B类功率放大器



电路工作在推挽 (push-pull) 模式



理想情况下，不考虑饱和压降



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

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

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

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

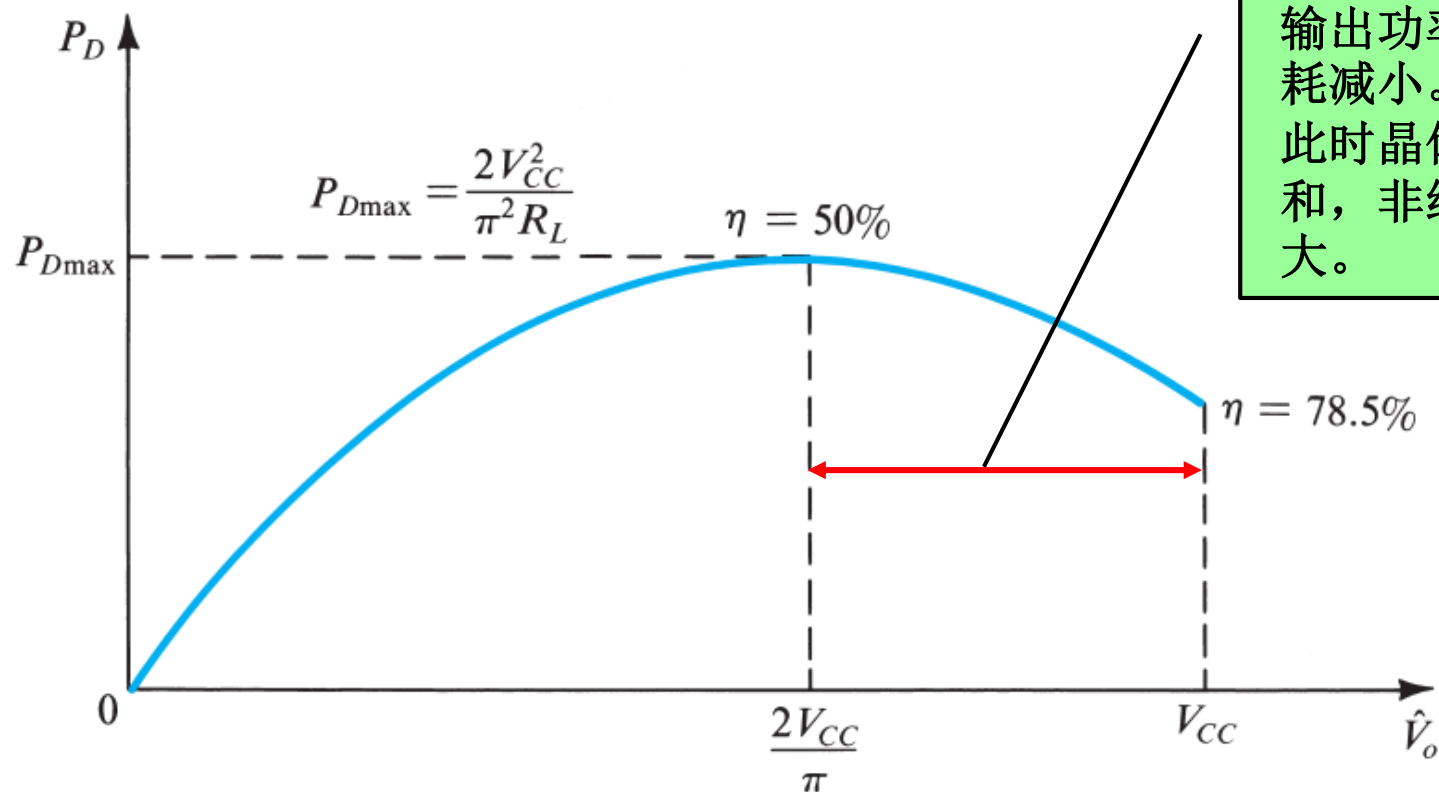
$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_O}{V_{CC}} \xrightarrow{\quad} \eta_{\max} \big|_{\hat{V}_O = V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

管耗问题

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

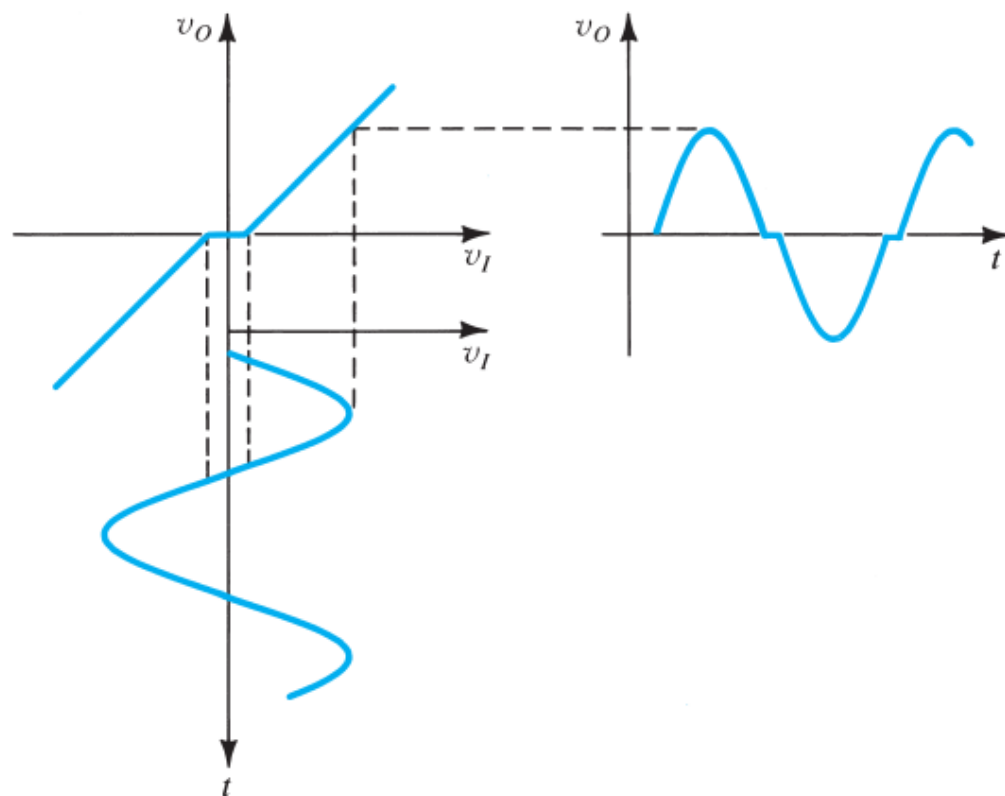
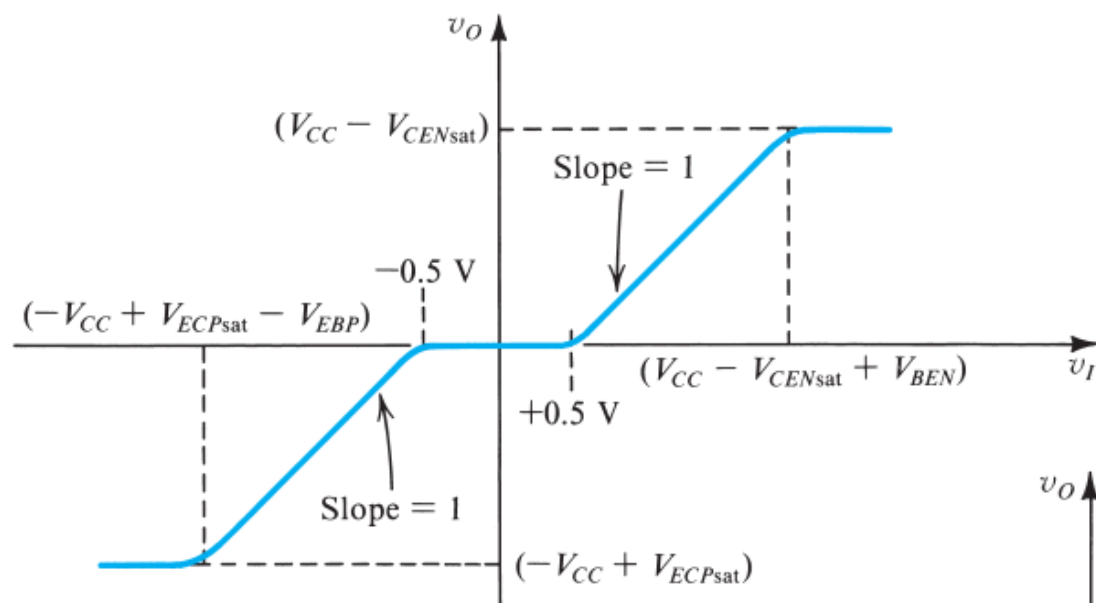
$$P_S = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{V}_O}{R_L} V_{CC}$$

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

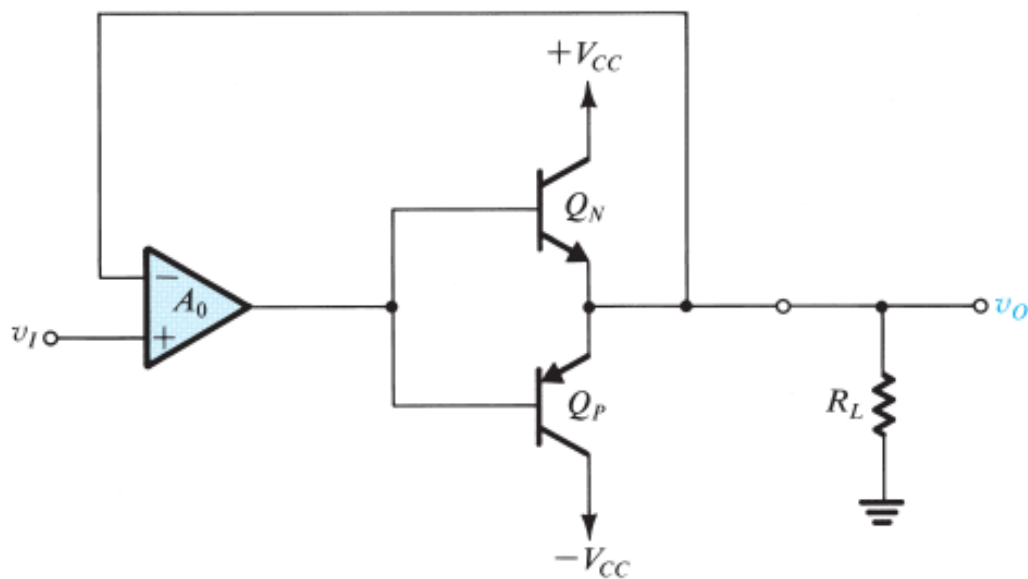


输出功率增大，管耗减小。
此时晶体管接近饱和，非线性失真增大。

交越失真 (Crossover Distortion)



减小交越失真的方法之一

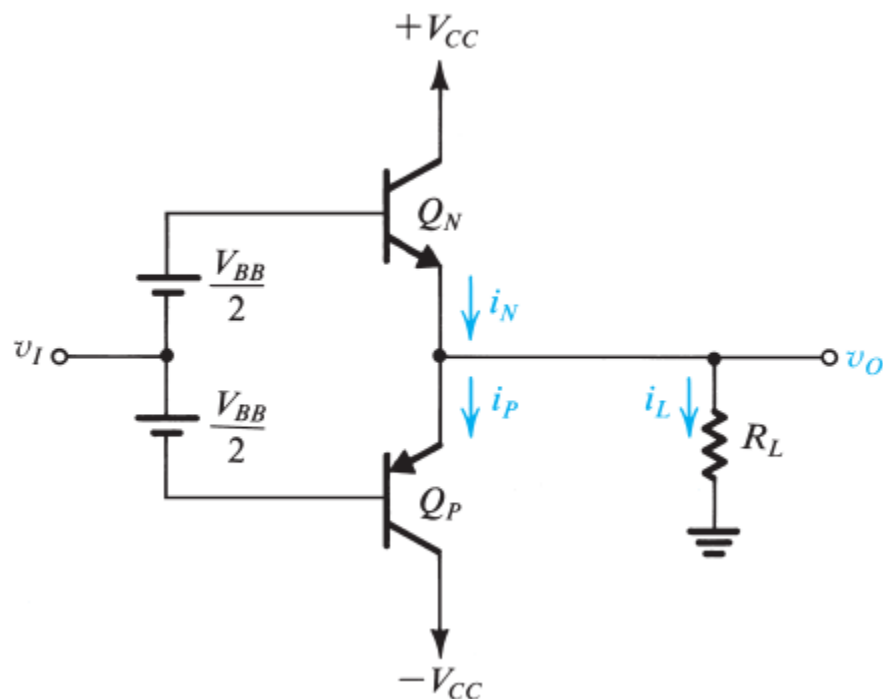


± 0.7 V 的死区电压被降低至 $\pm 0.7/A_0$ V，
但无法从根本上消除。

13.2.3 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 。



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

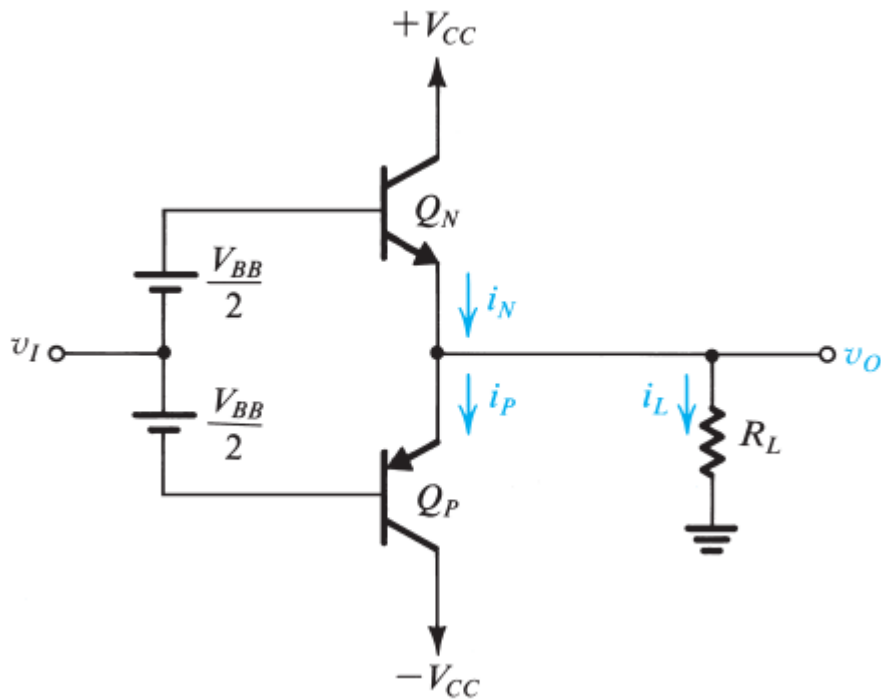
$$v_O = v_I + \frac{V_{BB}}{2} - v_{BEN}$$

$$i_N = i_P + i_L$$

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

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

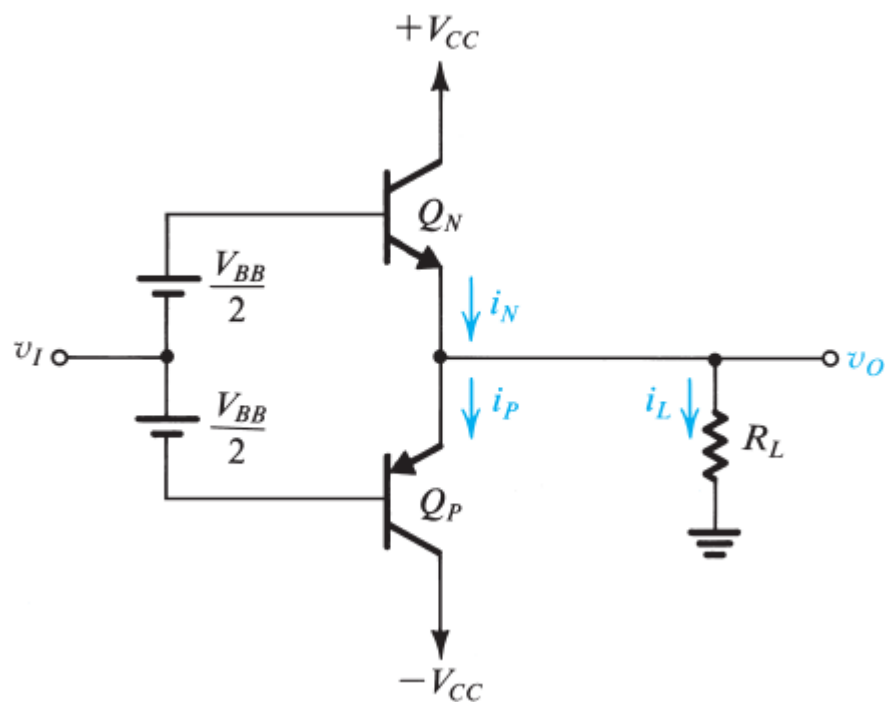
$$i_N i_P = I_Q^2$$



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、当输入正信号较小时，负载电流由 Q_P 提供， Q_N 电流可以忽略。

输出电阻



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

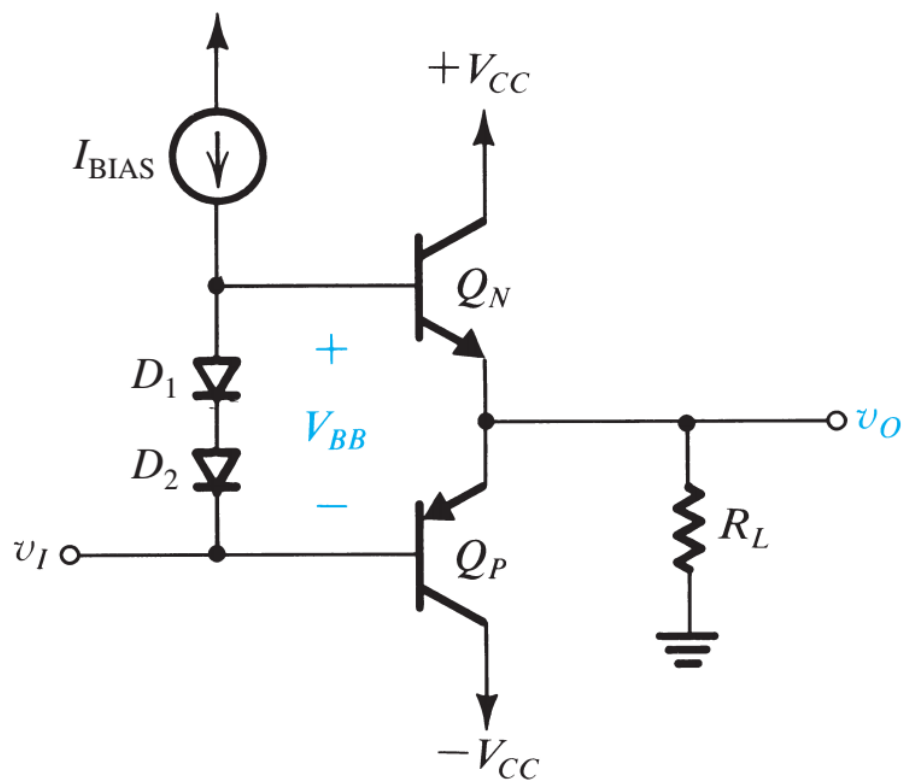
输出电阻在 $v_I = 0$ 附近近似为常数，或者说，电压增益近似为1，这是交越失真能被消除的根本原因。

为了减小失真，要求

$$R_O < R_L$$

二、偏置方式

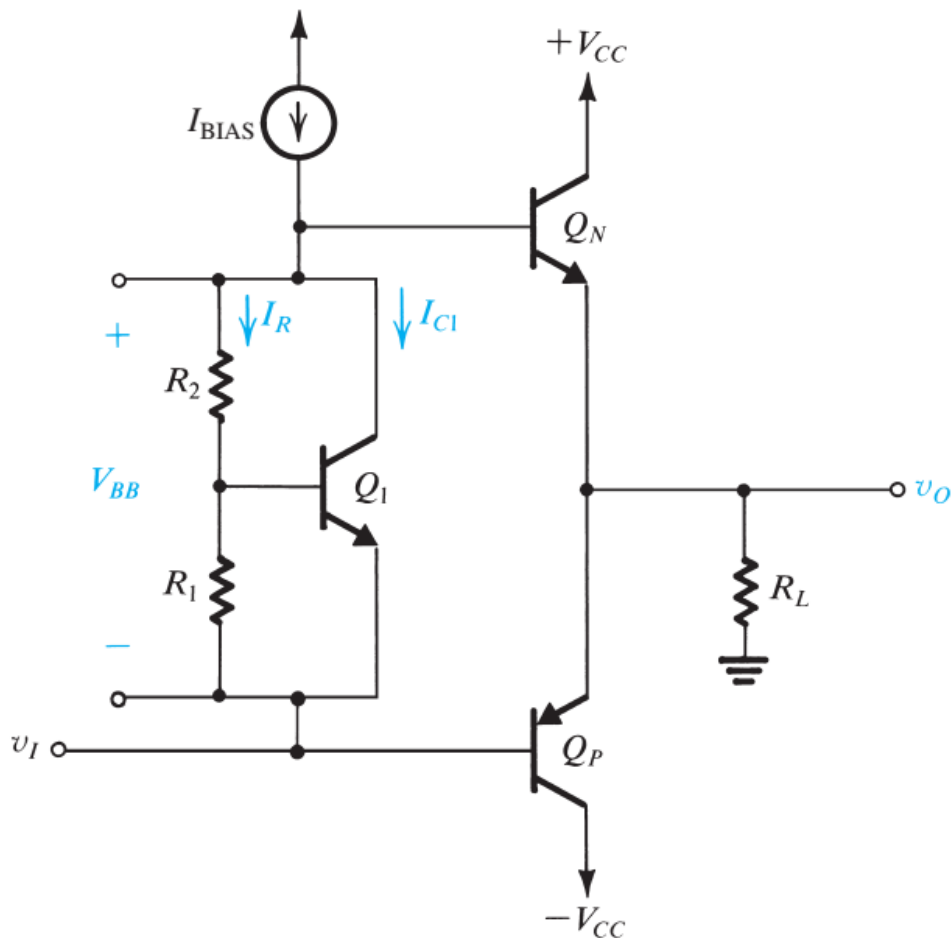
1、二极管偏置



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。

2、晶体管偏置（又称为 V_{BE} 电压倍增器偏置）



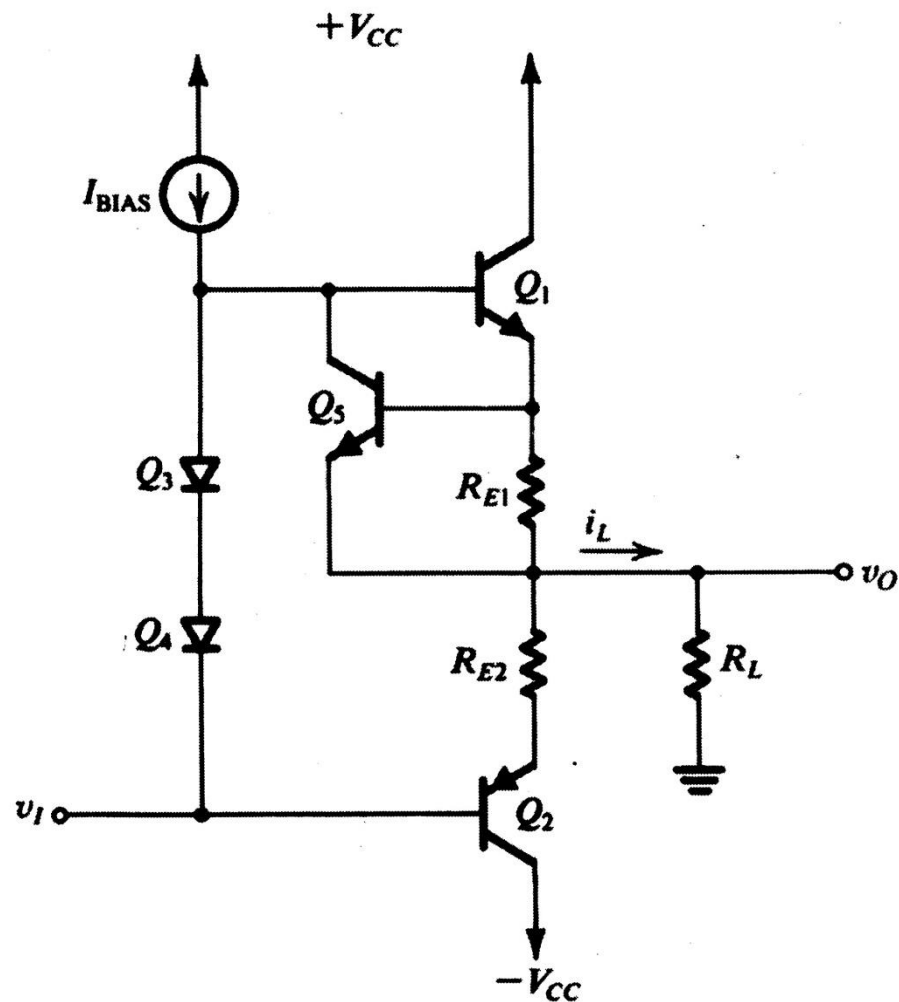
忽略晶体管 Q 的基极电流

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

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

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。

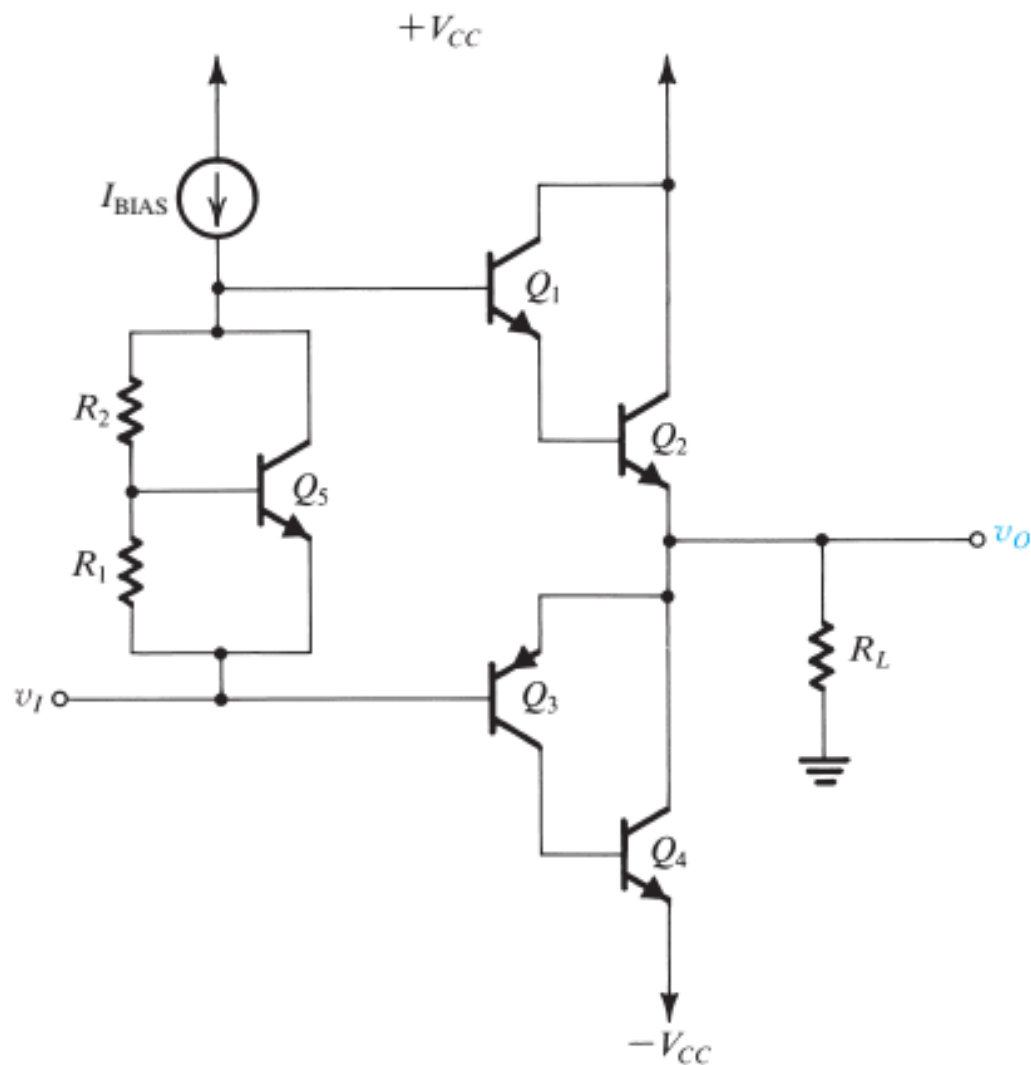
三、短路保护



好处：保护输出晶体管不出现热失控。

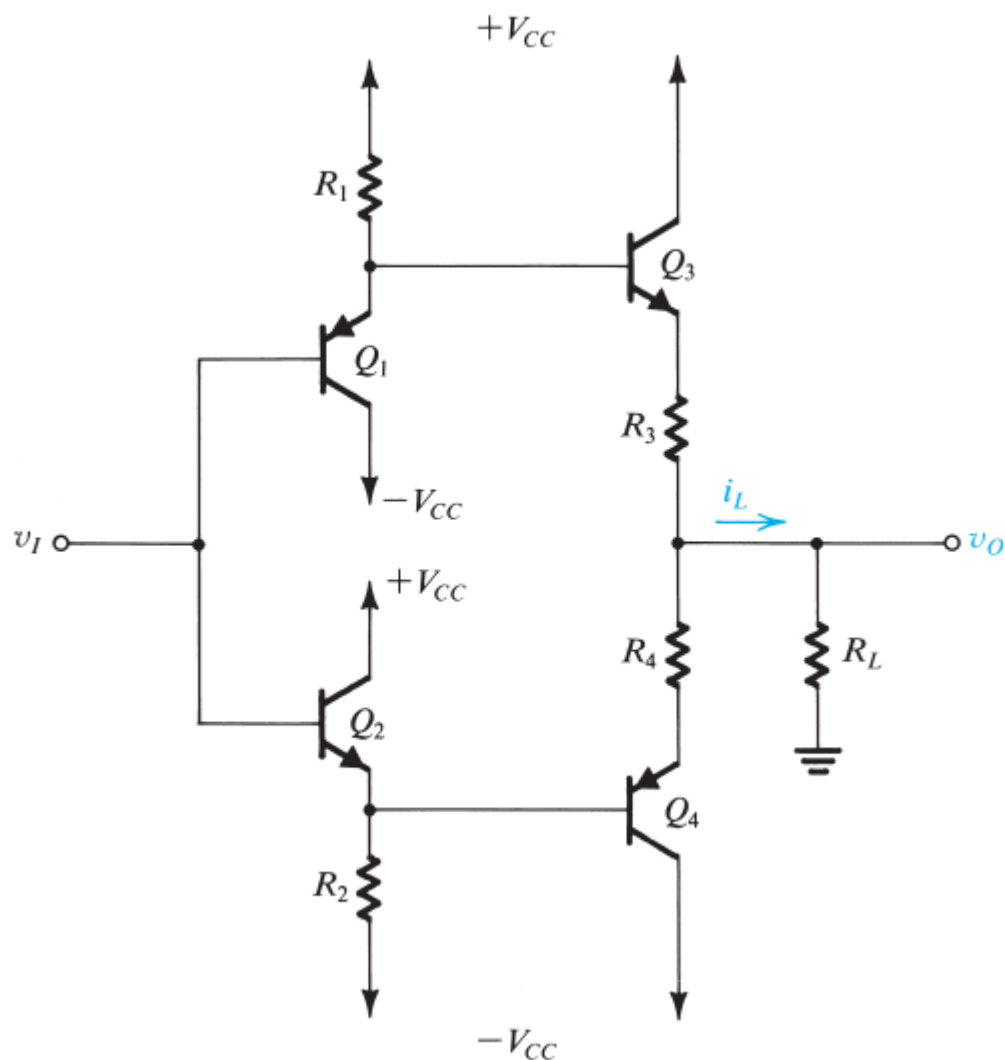
不足：输出电压的摆幅将下降。

四、使用复合管



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。