

第8章 功率放大器

功率放大器概述

功率放大器分析计算

2. 对功率放大电路的要求

- (1) 在电源电压一定的情况下，最大不失真输出电压最大，即输出功率尽可能大。
- (2) 效率尽可能高，因而电路损耗的直流功率尽可能小，静态时功放管的集电极电流近似为0。

3. 晶体管的工作方式

- (1) 甲类方式：晶体管在信号的整个周期内均处于导通状态
- (2) 乙类方式：晶体管仅在信号的半个周期处于导通状态
- (3) 甲乙类方式：晶体管在信号的多半个周期处于导通状态

一、概述

1. 功率放大电路研究的问题

- (1) 性能指标：输出功率和效率。

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

若已知 U_{om} ，则可得 P_{om} 。

最大输出功率与电源损耗的平均功率之比为效率。

- (2) 分析方法：因大信号作用，故应采用图解法。

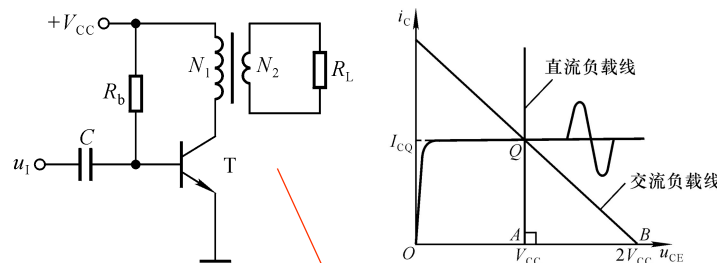
- (3) 晶体管的选用：根据极限参数选择晶体管。

在功放中，晶体管通过的最大集电极或射极电流接近最大集电极电流，承受的最大管压降接近c-e反向击穿电压，消耗的最大功率接近集电极最大耗散功率。称为工作在尽限状态。

4. 功率放大电路的种类

- (1) 变压器耦合功率放大电路

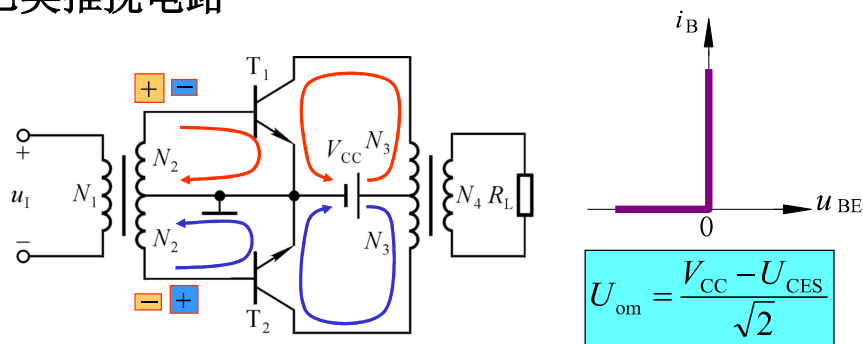
单管甲类电路



适合做功放吗？

- ① 输入信号增大，输出功率如何变化？
- ② 输入信号增大，管子的平均电流如何变化？
- ③ 输入信号增大，电源提供的功率如何变化？效率如何变化？

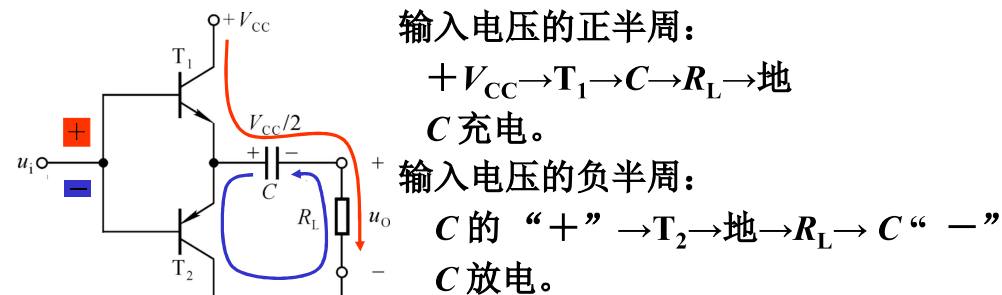
乙类推挽电路



信号的正半周 T_1 导通、 T_2 截止；负半周 T_2 导通、 T_1 截止。两只管子交替工作，称为“推挽”。设 β 为常量，则负载上可获得正弦波。输入信号越大，电源提供的功率也越大。

(2) OTL电路

因变压器耦合功放笨重、自身损耗大，故选用OTL电路。

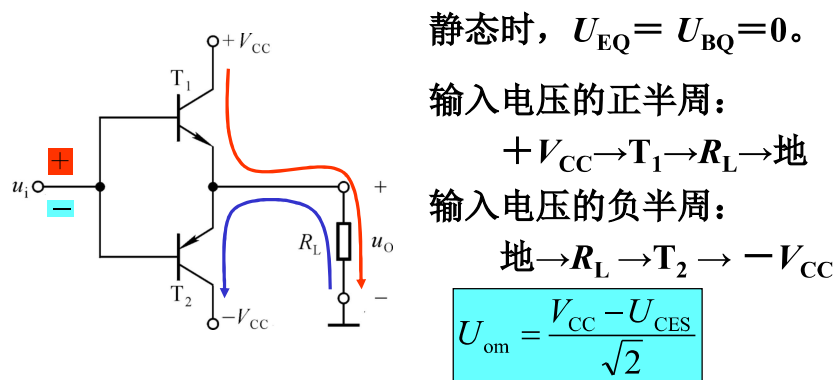


静态时， $u_i = U_B = U_E = +\frac{V_{CC}}{2}$

$$U_{om} = \frac{(V_{CC}/2) - U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

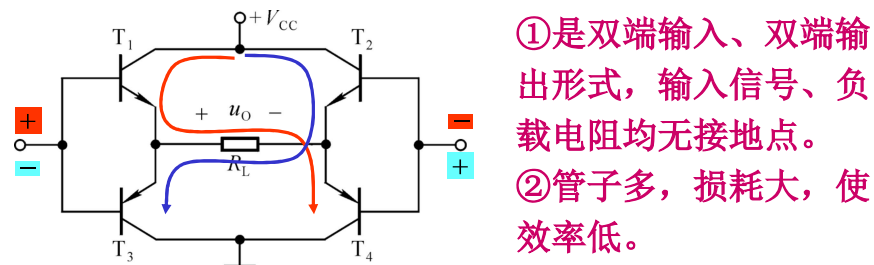
C 足够大，才能认为其对交流信号相当于短路。
 OTL电路低频特性差。

(3) OCL电路



两只管子交替导通，两路电源交替供电，双向跟随。

(4) BTL电路



输入电压的正半周： $+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow T_4 \rightarrow \text{地}$

输入电压的负半周： $+V_{CC} \rightarrow T_2 \rightarrow R_L \rightarrow T_3 \rightarrow \text{地}$

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - 2U_{CES}}{\sqrt{2}}$$

几种电路的比较

变压器耦合乙类推挽：单电源供电，笨重，效率低，低频特性差。

OTL电路：单电源供电，低频特性差。

OCL电路：双电源供电，效率高，低频特性好。

BTL电路：单电源供电，低频特性好；双端输入双端输出。

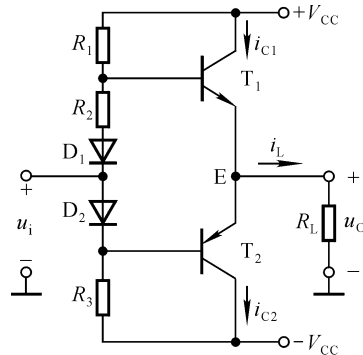
2. 效率

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$

$$P_V = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L} \cdot \sin \omega t \cdot V_{CC} d(\omega t)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{R_L}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - U_{CES}}{V_{CC}}$$



二、互补输出级的分析估算

求解输出功率和效率的方法：

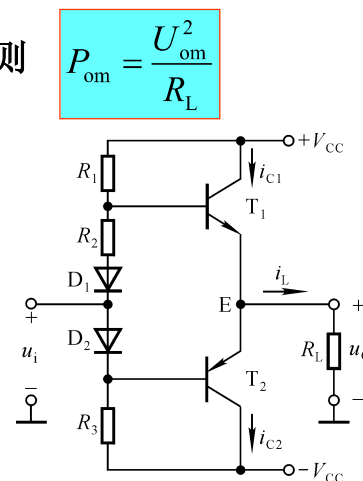
在已知 R_L 的情况下，先求出 U_{om} ，则然后求出电源的平均功率，

$$P_V = I_{C(AV)} \cdot V_{CC}$$

$$\text{效率 } \eta = P_{om} / P_V$$

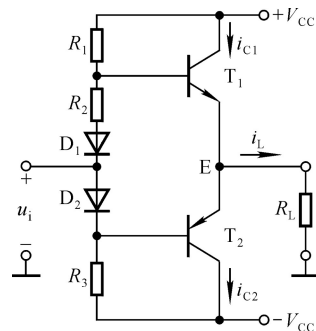
1. 输出功率

$$U_{om} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \quad P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L}$$



$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

3. 晶体管的极限参数



$$i_{Cmax} \approx \frac{V_{CC}}{R_L} < I_{CM} \quad u_{CEmax} \approx 2V_{CC} < U_{CEO(BR)}$$

在输出功率最大时，因管压降最小，故管子损耗不大；输出功率最小时，因集电极电流最小，故管子损耗也不大。

管子功耗与输出电压峰值的关系为

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{CC} - U_{OM} \sin \omega t) \cdot \frac{U_{OM}}{R_L} \cdot \sin \omega t d\omega t$$

$$P_T \text{ 对 } U_{OM} \text{ 求导，并令其为0，可得 } U_{OM} = \frac{2}{\pi} \cdot V_{CC} \approx 0.6 V_{CC}$$

将 U_{OM} 代入 P_T 的表达式, 可得

$$P_{Tmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$$

$$\text{若 } U_{CES} = 0, \text{ 则 } P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}, P_{Tmax} = \frac{2}{\pi^2} \cdot P_{om} \approx 0.2P_{om}$$

因此, 选择晶体管时, 其极限参数

$$\begin{cases} I_{CM} > i_{Cmax} \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \\ U_{CEO(BR)} > u_{CEmax} \approx 2V_{CC} \\ P_{CM} > P_{Tmax} \approx 0.2 \times \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \end{cases}$$

8.1.2 功率放大器分类

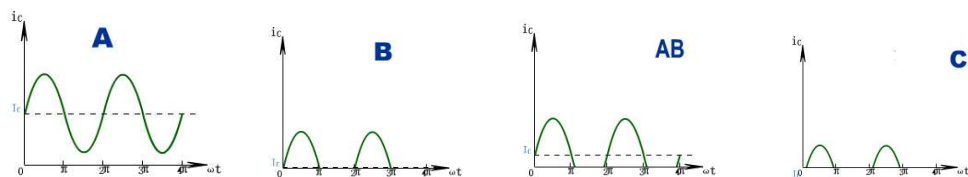
根据电路中晶体管工作点的不同, 输出级电路有A类、B类、AB类和C类之分。

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。



8.1 功率放大器概述

8.1.1 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。

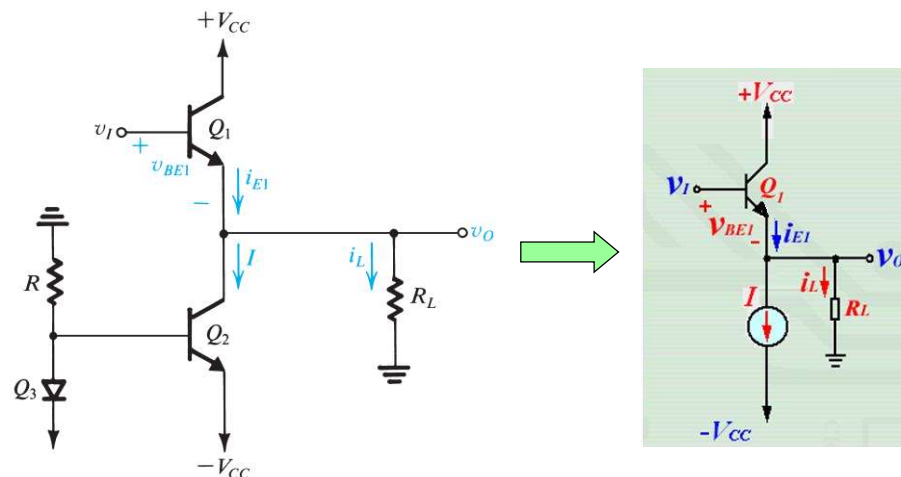
性能指标: 输出功率 P_L 和最大功率转换效率 η_{max} 。
(power-conversion efficiency)

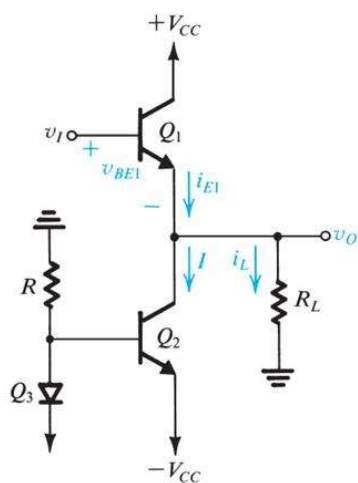
$$\eta_{max} = \frac{P_{Lmax}}{P_S}$$

最大输出功率 P_{Lmax} 与电源消耗的平均功率 P_S 之比。

8.2 功率放大器分析计算

8.2.1 A类功率放大器





正方向 $v_O = v_I - v_{BE1}$

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

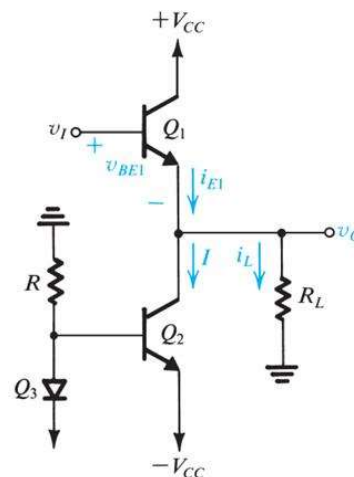
负方向 $v_{O\min} = -IR_L$ 或

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

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）

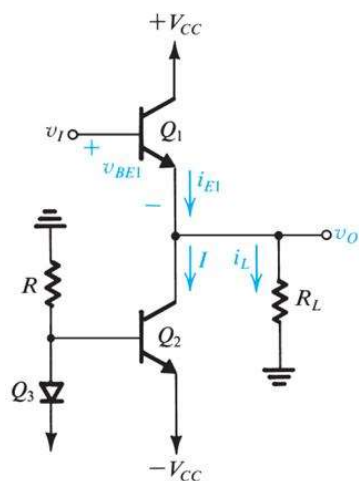
$$P_{L\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{O\max} * \frac{1}{\sqrt{2}} i_{O\max} = \frac{1}{2R_L} V_{CC}^2$$

电源提供的平均功率为

$$P_S = [V_{CC} - (-V_{CC})] I = 2V_{CC} I = 2 \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

最高效率为 $\eta = \frac{P_{L\max}}{P_S} = 25\%$

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Q1的瞬时功耗

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

1、当 $v_o = 0$ 时，Q1 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Q1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 $v_o = -V_{CC}$

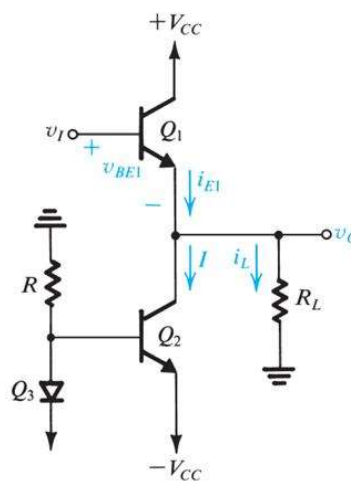
此时Q1承受最大功耗为 $2V_{CC} I$

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 $V_{CC} I$

取 $I = \frac{V_{CC}}{R_L}$

3、考虑负载短路的极端情况

可能会导致晶体管Q1烧毁。



考虑晶体管Q2的功耗

Q2导通的电流为 I

最大功耗出现在 $v_{CE2} = 2V_{CC}$

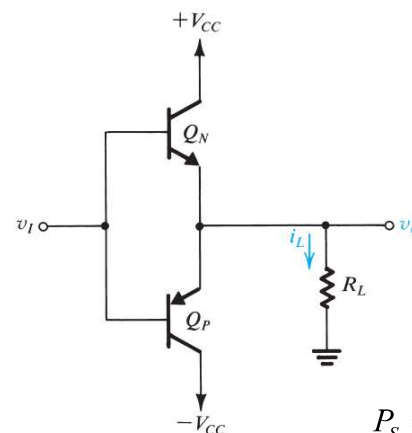
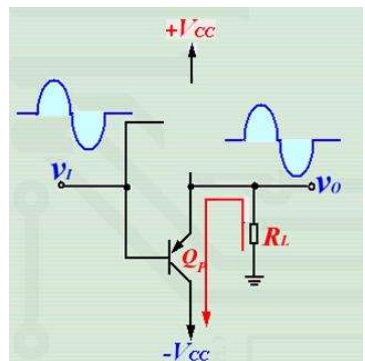
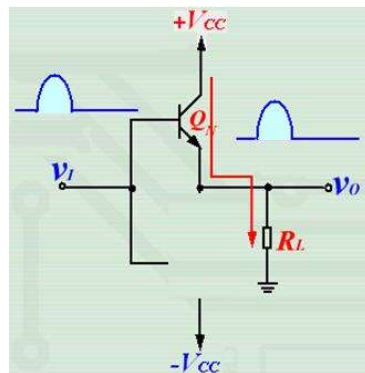
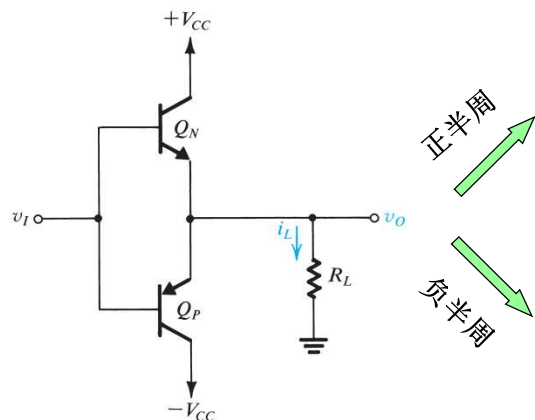
$$P_{D2\max} = 2V_{CC} I$$

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 $V_{CC} I$

取 $I = \frac{V_{CC}}{R_L}$

8.2.2 B类功率放大器



理想情况下，不考虑饱和压降

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

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

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

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

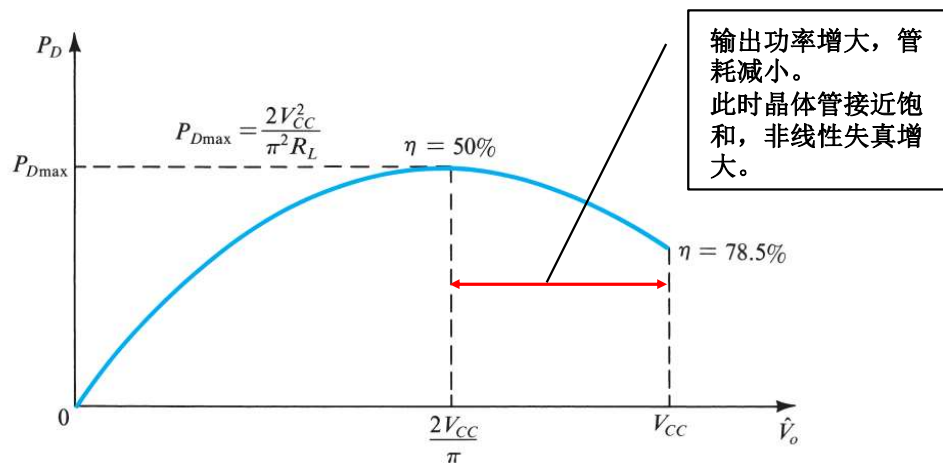
$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_O}{V_{CC}} \xrightarrow{\hat{V}_O = V_{CC}} \eta_{\max}|_{\hat{V}_O = V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

管耗问题

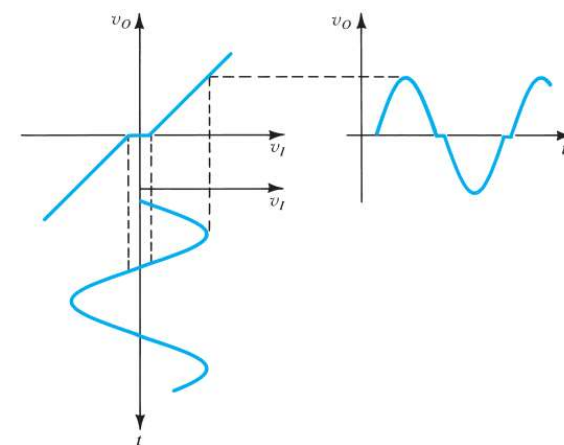
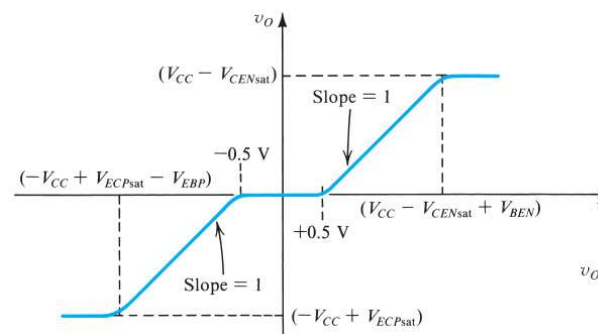
$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$

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

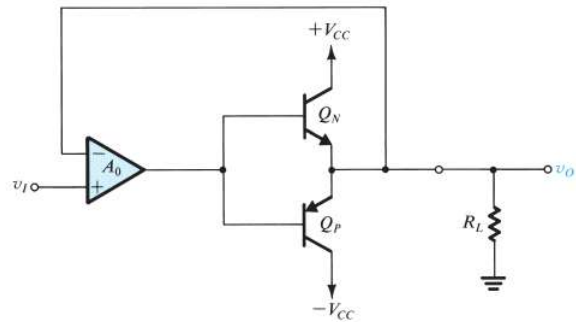
$$P_D = P_S - P_L = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{V}_O}{R_L} V_{CC} - \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_O^2}{R_L}$$



交越失真 (Crossover Distortion)



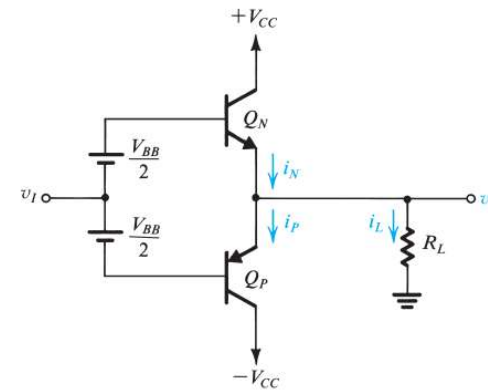
减小交越失真的方法之一



$\pm 0.7 \text{ V}$ 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。

8.2.3 AB类功率放大器

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

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

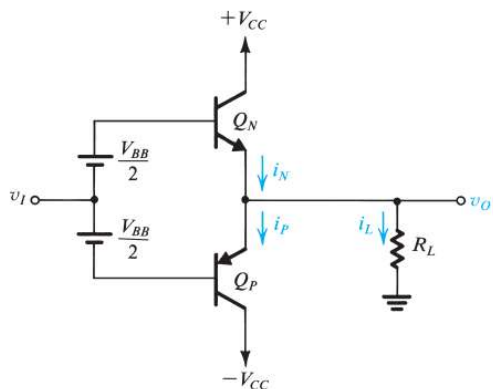
$$i_N = i_P + i_L$$

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

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

$$i_N i_P = I_Q^2$$

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。



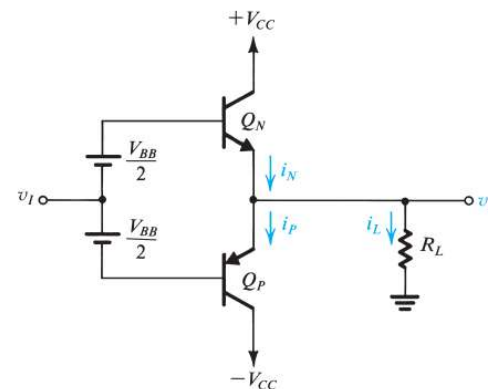
输出电阻

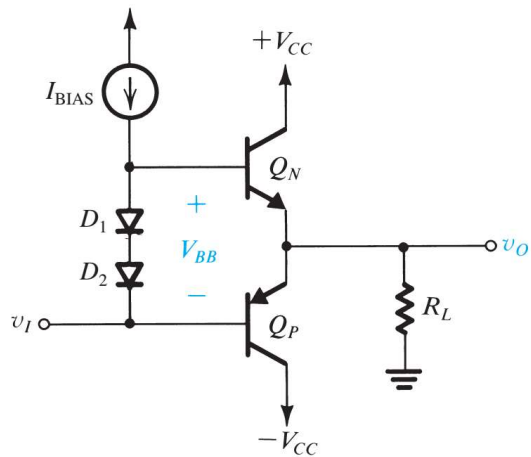
$$R_O = r_{eN} // r_{eP} = \frac{V_T}{i_N} // \frac{V_T}{i_P} = \frac{V_T}{i_N + i_P}$$

为了减小失真，要求

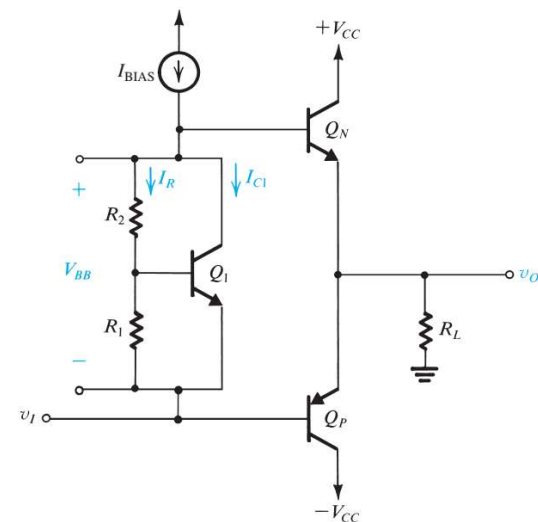
$$R_O < R_L$$

输出电阻在 $v_I = 0$ 附近近似为常数，这是交越失真能被消除的原因。





二极管偏置可提高输出级晶体管偏置电流的热稳定性。



晶体管偏置

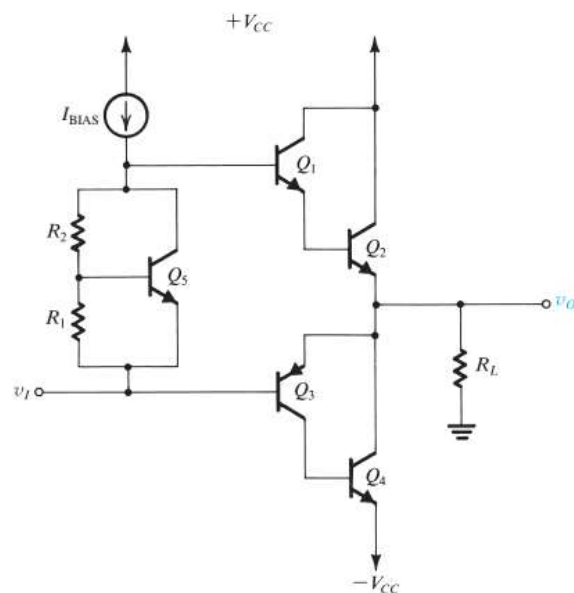
又称为 V_{BE} 电压倍增器偏置。

忽略晶体管 Q 的基极电流

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

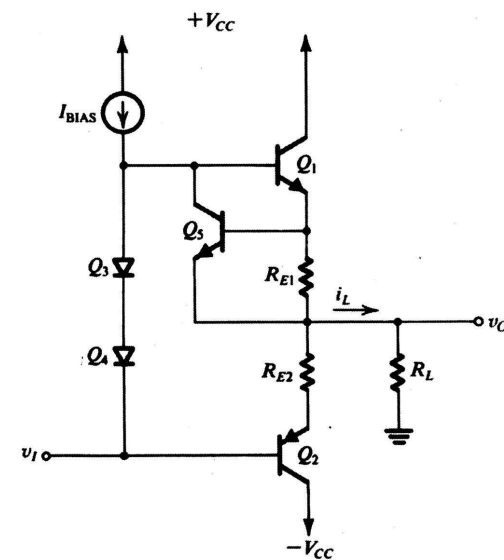
$$V_{BB} = I_R (R_1 + R_2) = V_{BE} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

同样可提高输出级晶体管偏置电流的热稳定性。



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。

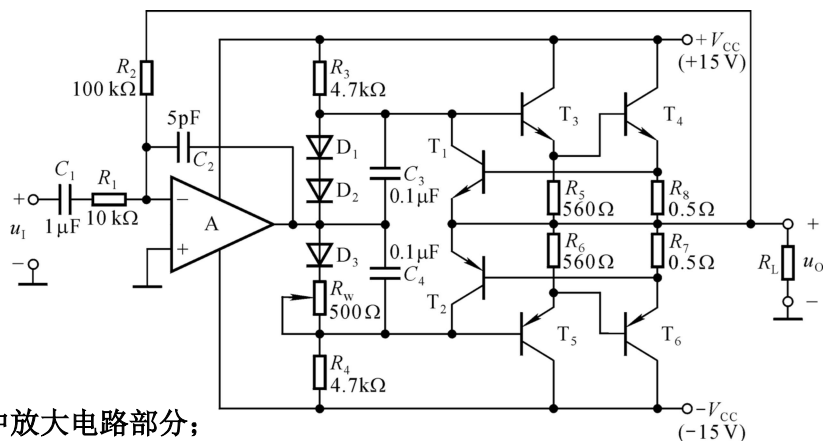
短路保护



好处：保护输出晶体管不出现热失控。

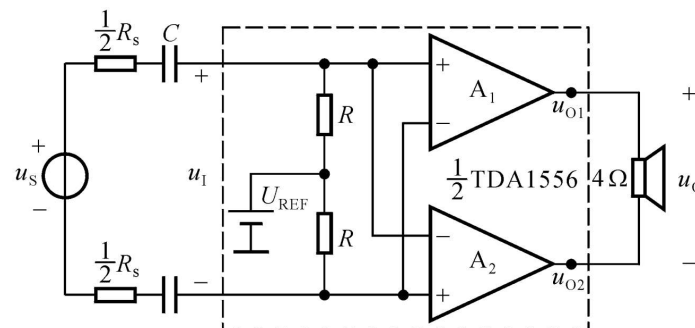
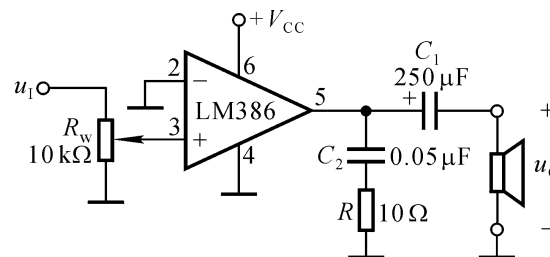
不足：输出电压的摆幅将下降。

讨论一



1. 指出图中放大电路部分；
2. 说明电路中是否引入了级间反馈，是直流反馈还是交流反馈，若为交流负反馈则说明其反馈组态；
3. 最大输出功率和效率的表达式；
4. 说明如何估算在输出最大功率时输入电压的有效值；
5. 说明 $D_1 \sim D_4$ 和 R_W 的作用， $C_1 \sim C_4$ 的作用；
6. 说明哪些元件构成过流保护电路及其原理。

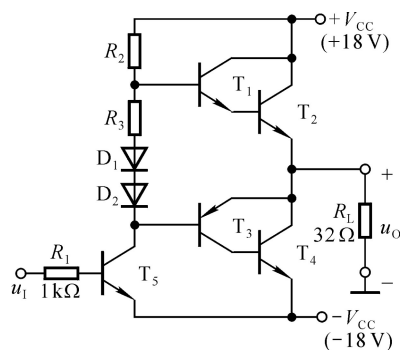
讨论二：图示各电路属于哪种功放？



讨论三：出现下列故障时，将产生什么现象？

T_2 、 T_5 的极限参数：

$$P_{CM} = 1.5W, I_{CM} = 600mA, U_{BR(CEO)} = 40V。$$



1. R_2 短路；
2. R_2 断路；
3. D_1 短路；
4. D_1 断路；
5. T_1 集电极开路。