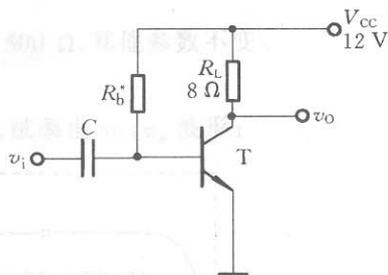


5 功率放大电路

5.1.1 在甲类、乙类和甲乙类放大电路中,放大管的导通角分别等于多少? 它们中哪一类放大电路效率最高?

解 在输入正弦信号情况下,通过三极管的电流 i_c 不出现截止状态(即导通角 $\theta = 2\pi$)的称为甲类;在正弦信号一个周期中,三极管只有半个周期导通($\theta = \pi$)的称为乙类;导通时间大于半周而小于全周($\pi < \theta < 2\pi$)的称为甲乙类。其中工作于乙类的放大电路效率最高,在双电源的互补对称电路中,理想情况下最高效率可达 78.5%。

5.2.1 在图题 5.2.1 所示电路中,设 BJT 的 $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $V_{CES} = 0.5 \text{ V}$, $I_{CEO} = 0$, 电容 C 对交流可视为短路。输入信号 v_i 为正弦波。(1) 计算电路可能达到的最大不失真输出功率 P_{om} ; (2) 此时 R_b 应调节到什么数值? (3) 此时电路的效率 $\eta = ?$ 试与工作于乙类的互补对称电路比较。



图题 5.2.1

解 (1) 求 P_{om}

$$P_{om} = \frac{[(V_{CC} - V_{CES}) / (2\sqrt{2})]^2}{R_L}$$

$$= \frac{[(12 - 0.5) / (2\sqrt{2})]^2}{8} \text{ W} \approx 2.07 \text{ W}$$

(2) 求 R_b

考虑到 $I_{CQ} = I_{cm} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{2R_L} = \frac{12 \text{ V} - 0.5 \text{ V}}{2 \times 8 \Omega} \approx 0.72 \text{ A}$

故

$$R_b = \frac{(V_{CC} - V_{BE})\beta}{I_{CQ}} = \frac{(12 - 0.7) \text{ V} \times 100}{0.72 \text{ A}} \approx 1570 \Omega$$

(3) 求 η

$$\eta = \frac{P_{om}}{V_{CC} I_{CQ}} = \frac{2.07 \text{ W}}{12 \text{ V} \times 0.72 \text{ A}} \approx 24 \%$$

显然,比工作于乙类的互补对称电路的理想效率低很多。

5.2.2 一双电源互补对称电路如图题 5.2.2 所示,设已知 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_L = 16 \Omega$, v_i 为正弦波。求:(1) 在 BJT 的饱和压降 V_{CES} 可以忽略不计的条件下,负载上可能得到的最大输出功率 P_{om} ; (2) 每个管子允许的管耗 P_{CM} 至少应为多少? (3) 每个管子的耐压 $|V_{(BR)CEO}|$ 应大于多少?

解 (1) 输出功率

$$P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{(12\text{ V})^2}{2 \times 16\ \Omega} = 4.5\text{ W}$$

(2) 每管允许的管耗

$$P_{CM} \geq 0.2 P_{om} = 0.2 \times 4.5\text{ W} = 0.9\text{ W}$$

(3) 每管的耐压

$$|V_{(BR)CEO}| \geq 2 V_{CC} = 2 \times 12\text{ V} = 24\text{ V}$$

5.2.3 在图题 5.2.2 所示电路中, 设 v_i 为正弦波, $R_L = 8\ \Omega$, 要求最大输出功率 $P_{om} = 9\text{ W}$ 。试求在 BJT 的饱和压降 V_{CES} 可以忽略不计的条件下, 求: (1) 正、负电源 V_{CC} 的最小值; (2) 根据所求 V_{CC} 最小值, 计算相应的 I_{CM} 、 $|V_{(BR)CEO}|$ 的最小值; (3) 输出功率最大 ($P_{om} = 9\text{ W}$) 时, 电源供给的功率 P_V ; (4) 每个管子允许的管耗 P_{CM} 的最小值; (5) 当输出功率最大 ($P_{om} = 9\text{ W}$) 时的输入电压有效值。

解 (1) V_{CC} 的最小值

由 $P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$, 可求得

$$V_{CC} \geq \sqrt{2R_L P_{om}} = \sqrt{2 \times 8\ \Omega \times 9\text{ W}} = 12\text{ V}$$

(2) I_{CM} 和 $|V_{(BR)CEO}|$ 的最小值

$$I_{CM} \geq \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{12\text{ V}}{8\ \Omega} = 1.5\text{ A}$$

$$|V_{(BR)CEO}| \geq 2 V_{CC} = 2 \times 12\text{ V} = 24\text{ V}$$

(3) 求 P_V

设 $I_{C(AV)}$ 为电流平均值, 则

$$P_V = 2 V_{CC} I_{C(AV)} = \frac{2 V_{CC}^2}{\pi R_L} = \frac{2 \times (12\text{ V})^2}{\pi \times 8\ \Omega} \approx 11.46\text{ W}$$

(4) P_{CM} 的最小值

$$P_{CM} \geq 0.2 P_{om} = 0.2 \times 9\text{ W} = 1.8\text{ W}$$

(5) 输入电压有效值

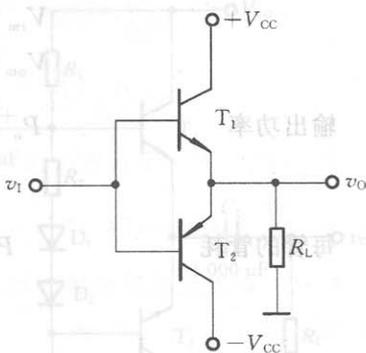
$$V_i \approx V_o \approx V_{CC} / \sqrt{2} \approx 8.49\text{ V}$$

5.2.4 设电路如图题 5.2.2 所示, 管子输入信号 v_i 作用下, 在一周期内 T_1 和 T_2 轮流导通约 180° , 电源电压 $V_{CC} = 20\text{ V}$, 负载 $R_L = 8\ \Omega$, 试计算:

(1) 在输入信号 $V_i = 10\text{ V}$ (有效值) 时, 电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率;

(2) 当输入信号 v_i 的幅值为 $V_{im} = V_{CC} = 20\text{ V}$ 时, 电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率。

解 (1) $V_i = 10\text{ V}$ 时



图题 5.2.2



$$V_{im} = \sqrt{2} V_i = \sqrt{2} \times 10 \text{ V} = 14 \text{ V}, A_v = 1$$

$$V_{om} = A_v V_{im} = 14 \text{ V}$$

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{cm}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{om}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{14^2}{8} \text{ W}$$

$$= 12.25 \text{ W}$$

$$P_{T1} = P_{T2} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{V_{CC} V_{om}}{\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} \right)$$

$$= \frac{1}{8} \left(\frac{20 \times 14}{3.14} - \frac{14^2}{4} \right) \text{ W} \approx 5.02 \text{ W}$$

$$P_T = 2P_{T1} = 10.04 \text{ W}$$

电源供给的功率 $P_V = P_o + P_T = 12.25 + 10.04 = 22.29 \text{ W}$

效率 $\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{12.25}{22.29} \times 100\% \approx 54.96\%$

(2) $V_{im} = V_{CC} = 20 \text{ V}$ 时, $V_{om} = A_v V_{im} = V_{CC} = 20 \text{ V}$

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{20^2}{8} \text{ W} = 25 \text{ W}$$

$$P_T = 2P_{T1} = \frac{2}{R_L} \left(\frac{V_{CC}^2}{\pi} - \frac{V_{CC}^2}{4} \right) \approx 6.85 \text{ W}$$

$$P_V = P_o + P_T = 25 + 6.85 = 31.85 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{25}{31.85} \times 100\% \approx 78.5\%$$

5.3.1 一单电源互补对称功放电路如图题 5.3.1 所示, 设 v_i 为正弦波, $R_L = 8 \Omega$, 管子的饱和压降 V_{CES} 可忽略不计。试求最大不失真输出功率 P_{om} (不考虑交越失真) 为 9 W 时, 电源电压 V_{CC} 至少应为多大?

解 由

$$P_{om} = \frac{(V_{CC}/2)^2}{2R_L} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L}$$

则有

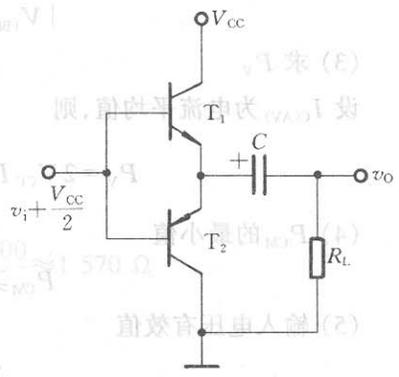
$$V_{CC} \geq \sqrt{8R_L P_{om}} = \sqrt{8 \times 8 \Omega \times 9 \text{ W}} = 24 \text{ V}$$

5.3.2 在图题 5.3.1 所示单电源互补对称电路中, 设 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_L = 8 \Omega$, C 的电容量很大, v_i 为正弦波, 在忽略管子饱和压降 V_{CES} 情况下, 试求该电路的最大输出功率 P_{om} 。

解

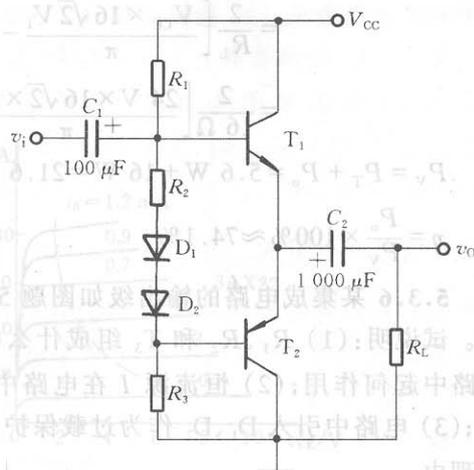
$$P_{om} = \frac{\left(\frac{1}{2} V_{CC}\right)^2}{2R_L} = \frac{\left(\frac{1}{2} \times 12 \text{ V}\right)^2}{2 \times 8 \Omega} = 2.25 \text{ W}$$

5.3.3 一单电源互补对称电路如图题 5.3.3 所示, 设 T_1 、 T_2 的特性完全对称, v_i 为正弦波, $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_L = 8 \Omega$ 。试回答下列问题: (1) 静态时, 电容 C_2 两端电压应是多少? (调整哪个电



图题 5.3.1

阻能满足这一要求? (2) 动态时,若输出电压 v_o 出现交越失真,应调整哪个电阻? 如何调整? (3) 若 $R_1 = R_3 = 1.1 \text{ k}\Omega$, T_1 和 T_2 的 $\beta = 40$, $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$, $P_{CM} = 400 \text{ mW}$, 假设 D_1 、 D_2 、 R_2 中任意一个开路,将会产生什么后果?



图题 5.3.3

解 (1) 静态时, C_2 两端电压应为 $V_{C_2} = \frac{1}{2} V_{CC} = 6 \text{ V}$, 调整 R_1 或 R_3 可满足这一要求。

(2) 若 v_o 出现交越失真,可增大 R_2 。

(3) 若 D_1 、 D_2 或 R_2 中有一个开路,则由于 T_1 、 T_2 的静态功耗为

$$P_{T1} = P_{T2} = \beta I_B V_{CE} = \beta \cdot \frac{V_{CC} - 2|V_{BE}|}{R_1 + R_3} \cdot \frac{V_{CC}}{2}$$

$$= 40 \times \frac{12 \text{ V} - 2 \times 0.7 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} \times \frac{12 \text{ V}}{2} = 1156 \text{ mW}$$

即 $P_{T1} = P_{T2} \gg P_{CM}$, 所以会烧坏功放管。

5.3.4 在图题 5.3.3 所示单电源互补对称电路中,已知 $V_{CC} = 35 \text{ V}$, $R_L = 35 \Omega$, 流过负载电阻的电流为 $i_o = 0.45 \cos \omega t \text{ (A)}$ 。求:(1) 负载上所能得到的功率 P_o ; (2) 电源供给的功率 P_V 。

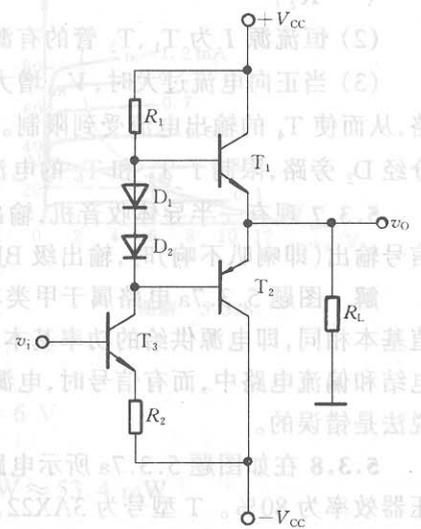
解 (1) 负载得到的功率

$$P_o = I_o^2 R_L = \left(\frac{0.45 \text{ A}}{\sqrt{2}} \right)^2 \times 35 \Omega = 3.54 \text{ W}$$

(2) 电源供给的功率

$$P_V = V_{CC} I_{C(AV)} = V_{CC} \cdot \frac{0.45 \text{ A}}{\pi} = 35 \text{ V} \times \frac{0.45 \text{ A}}{\pi} \approx 5 \text{ W}$$

5.3.5 一双电源互补对称电路如图题 5.3.5 所示(图中未画出 T_3 的偏置电路), 设输入电压 v_i 为正弦波, 电源电压 $V_{CC} = 24 \text{ V}$, $R_L = 16 \Omega$, 由 T_3 管组成的放大电路的电压增益 $\Delta v_{CS} / \Delta v_{BS} = -16$, 射极输出器的电压增益为 1, 试计算当输入电压有效值 $V_i = 1 \text{ V}$ 时, 电路的输出功率 P_o 、电源供给的功率 P_V 、两管的管耗 P_T 以及效率 η 。

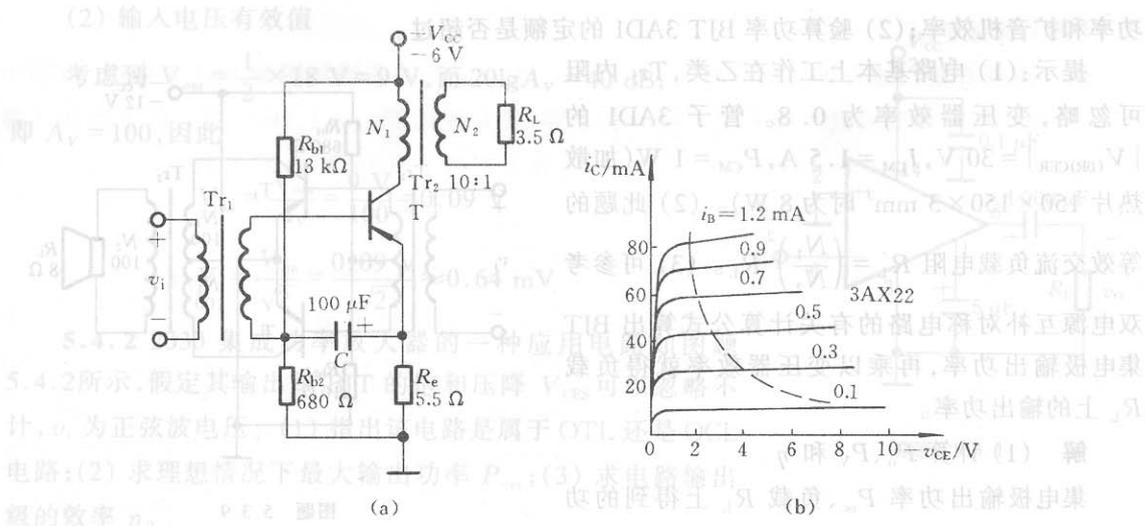


图题 5.3.5

解 电路的输出功率 P_o 、电源供给的功率 P_V 、两管的管耗 P_T 及效率 η 分别为

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{(16 V_i)^2}{R_L} = \frac{(16 \times 1 \text{ V})^2}{16 \Omega} = 16 \text{ W}$$

$$P_T = \frac{2}{R_L} \left(\frac{V_{CC} V_{om}}{\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} \right)$$



图题 5.3.7

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot (-V_{CC}) = \frac{0.68}{0.68 + 13} \times (-6 \text{ V}) = -0.298 \text{ V}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_{R_e}}{R_e} = \frac{-V_E}{R_e} = \frac{-(V_B - V_{BE})}{R_e} = \frac{-(-0.298 + 0.2) \text{ V}}{5.5 \Omega} \approx 17.8 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = -V_{CC} + I_C R_e \approx -V_{CC} = -6 \text{ V}$$

电路的交流负载电阻

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L = 10^2 \times 3.5 \Omega = 350 \Omega$$

在输出特性曲线上,过 Q 点 (-6 V, 17.8 mA) 作交流负载线 MN, 如图解 5.3.8 所示。可求得三极管最大输出电压和电流的幅值近似为

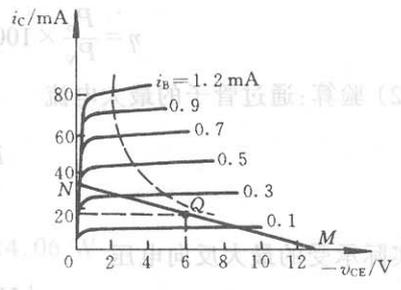
$$I_{cmax} = \frac{I_{cmax} - I_{cmin}}{2} \approx I_c = 17.8 \text{ mA}$$

$$V_{cem} = \frac{V_{cm} - V_{CES}}{2} \approx V_{CC} = 6 \text{ V}$$

故管子集电极输出功率 $P_{oc} = \frac{1}{2} I_{cmax} V_{cem} = \frac{1}{2} \times 17.8 \times 6 \text{ mW} \approx 53.4 \text{ mW}$

负载上的输出功率 $P_o = P_{oc} \times 80\% = 53.4 \text{ mW} \times 80\% \approx 42.7 \text{ mW}$

效率 $\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{P_o}{I_C V_{CC}} \times 100\% = \frac{42.7}{17.8 \times 6} \times 100\% \approx 40\%$



图解 5.3.8

5.3.9 一个简易手提式小型扩音机的输出级如图题 5.3.9 所示。(1) 试计算负载上的输出

功率和扩音机效率;(2) 验算功率 BJT 3AD1 的定额是否超过。

提示:(1) 电路基本上工作在乙类, Tr_2 内阻可忽略, 变压器效率为 0.8。管子 3AD1 的 $|V_{(BR)CER}| = 30 \text{ V}$, $I_{CM} = 1.5 \text{ A}$, $P_{CM} = 1 \text{ W}$ (加散热片 $150 \times 150 \times 3 \text{ mm}^3$ 时为 8 W)。 (2) 此题的等效交流负载电阻 $R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$ 。 (3) 可参考双电源互补对称电路的有关计算公式算出 BJT 集电极输出功率, 再乘以变压器效率就得负载 R_L 上的输出功率。

解 (1) 计算 P_o 、 P_V 和 η

集电极输出功率 P_o 、负载 R_L 上得到的功率 P_o 、电源供给的功率 P_V 和效率 η 分别为

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R'_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{12^2 \text{ W}}{\left(\frac{100}{100}\right)^2 \times 8}$$

$$= 9 \text{ W}$$

$$P_o = P_o \cdot \eta_T = 9 \times 0.8 = 7.2 \text{ W}$$

$$P_V = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R'_L} = \frac{2}{\pi} \times \frac{12^2 \text{ W}}{\left(\frac{100}{100}\right)^2 \times 8} \approx 11.5 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{7.2}{11.5} \times 100\% \approx 62.6\%$$

(2) 验算: 通过管子的最大电流

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R'_L} = \frac{12}{8} \text{ A} = 1.5 \text{ A}$$

管子实际承受的最大反向电压

$$|V_{CEmax}| = 2V_{CC} = 24 \text{ V}$$

每只管子的最大管耗

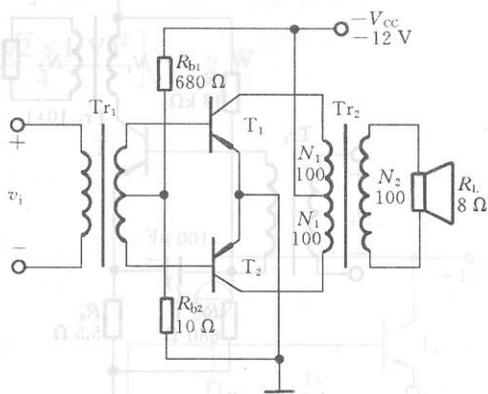
$$P_{T1} = P_{T2} = (P_V - P_o)/2 = (11.5 - 9) \text{ W}/2 = 1.25 \text{ W}$$

未超过 3AD1 的定额, 故可用。

5.4.1 一个用集成功放 LM384 组成的功率放大电路如图题 5.4.1 所示。已知电路在通带内的电压增益为 40 dB, 在 $R_L = 8 \Omega$ 时不失真的最大输出电压 (峰-峰值) 可达 18 V。当 v_i 为正弦信号时, 求: (1) 最大不失真输出功率 P_{om} ; (2) 输出功率最大时的输入电压有效值。

解 (1) 最大输出功率

$$P_{om} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{\left(\frac{1}{2} \times 18 \text{ V}\right)^2}{2 \times 8 \Omega} \approx 5.1 \text{ W}$$



图题 5.3.9

(2) 输入电压有效值

考虑到 $V_{om} = \frac{1}{2} \times 18 \text{ V} = 9 \text{ V}$, 而 $20 \lg A_v = 40 \text{ dB}$,

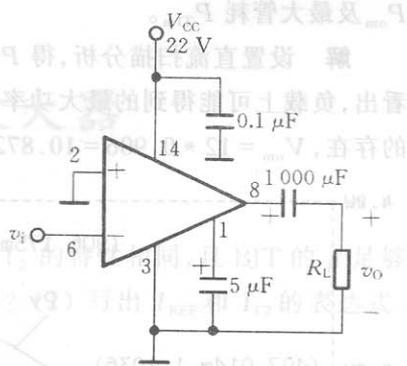
即 $A_v = 100$, 因此

$$V_{im} = \frac{V_{om}}{A_v} = \frac{9 \text{ V}}{100} = 0.09 \text{ V}$$

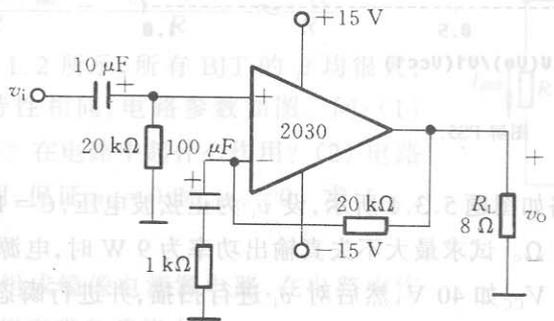
$$V_i = \frac{V_{im}}{\sqrt{2}} = \frac{0.09 \text{ V}}{\sqrt{2}} \approx 0.064 \text{ mV}$$

5.4.2 2030 集成功率放大器的一种应用电路如图题

5.4.2所示, 假定其输出级 BJT 的饱和压降 V_{CES} 可以忽略不计, v_i 为正弦波电压。(1) 指出该电路是属于 OTL 还是 OCL 电路;(2) 求理想情况下最大输出功率 P_{om} ;(3) 求电路输出级的效率 η 。



图题 5.4.1



图题 5.4.2

解 (1) 属于 OCL 电路

(2) 最大输出功率

$$P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{(15 \text{ V})^2}{2 \times 8 \Omega} \approx 14.06 \text{ W}$$

(3) 效率

电源供给的功率 P_V 和效率 η 分别为

$$P_V = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{2}{\pi} \times \frac{(15 \text{ V})^2}{8 \Omega} \approx 17.9 \text{ W}$$

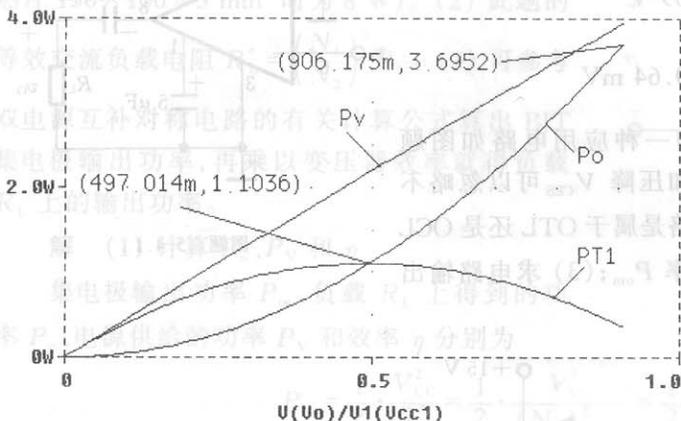
$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{14.06}{17.9} \approx 78.5\%$$

PSPICE 习题解答

PS5.1 一双电源互补对称电路形式如图 PSE5.1a 所示, 已知 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_L = 16 \Omega$, v_i 为正弦波电压, 试分别画出 P_V 、 P_o 、 P_{Ti} 随 V_{om}/V_{CC} 变化的曲线, 求出负载上可能得到的最大功率

P_{om} 及最大管耗 P_{T1m} 。(2) 验算功率管 T3AD1 的定额是否超过。

解 设置直流扫描分析, 得 P_V 、 P_O 、 P_{T1} 随 V_{om}/V_{CC} 变化的曲线如图解 PS5.1 所示, 由图中看出, 负载上可能得到的最大功率 $P_{om} = 3.6952 \text{ W}$, 最大管耗 $P_{T1m} = 1.1036 \text{ W}$ 。由于饱和压降的存在, $V_{om} = 12 \times 0.906 = 10.872 \text{ V} < V_{CC}$, 因此最大管耗 1.1036 W 大于 $0.2P_{om}$ 。



图解 PS5.1

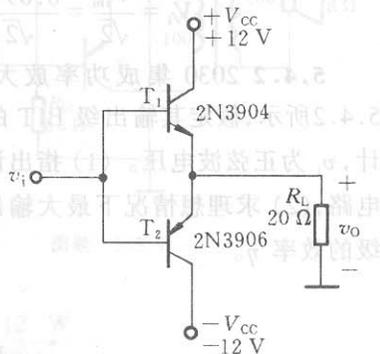


图 PSE5.1(a)

PS5.2 一 OTL 电路如图题 5.3.1 所示, 设 v_i 为正弦波电压, $C = 1000 \mu\text{F}$, T_1 采用 2N3904, T_2 采用 2N3906, $R_L = 8 \Omega$ 。试求最大不失真输出功率为 9 W 时, 电源电压 V_{CC} 至少应为多大?

解 先取一较大值 V_{CC} 如 40 V , 然后对 v_i 进行扫描, 并进行瞬态分析, 观察不失真条件下输出功率 ($V_{RL} \times I_{RL}/2$) 为 9 W 时对应的 v_i 值。确定 v_i 值后, 再对 V_{CC} 扫描, 并进行瞬态分析, 得到电源电压 V_{CC} 至少应为 32 V 。

PS5.3 在图题 5.3.3 所示单电源互补对称电路中, 已知 $V_{CC} = 35 \text{ V}$, $R_L = 35 \Omega$, $R_2 = 0$, $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $C_2 = 1000 \mu\text{F}$, D_1 、 D_2 采用 1N4148, T_1 、 T_2 分别采用 2N2222 和 2N2907A, 流过负载电阻的电流 $i_L = 0.4 \cos \omega t \text{ (A)}$ 。求: (1) 负载上所能得到的功率 P_o ; (2) 电源供给的功率 P_V 。

解 设置瞬态分析, 在 $i_L = 0.40 \text{ A}$ 时, $V_i = 14.1 \text{ V}$, 扫描时间定为一个周期, P_o 曲线为 $1000 \times 35 \times S(I(RL)) \times I(RL)$, P_V 曲线为 $1000 \times V(V_{CC} : +) \times S(I(V_{CC}))$, 可得

(1) 负载上的功率 $P_o = 2.72 \text{ W}$;

(2) 电源供给的功率 $P_V = 4.8 \text{ W}$ 。

[注: V_i 的频率为 1 kHz , $\omega = 2 \times \pi \times 1000$, $P_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_L^2 R_L d(\omega t)$, $P_V = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} i_{CC} d(\omega t)$]

解 (1) 最大输出功率

PS5.1 一 双电源互补对称电路如图题 PS5.1 所示, 已知 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_L = 20 \Omega$, v_i 为正弦波电压, 试分别画出 P_V 、 P_O 随 V_{om}/V_{CC} 变化的曲线, 并求出负载上可能得到的最大功率