

生长一层二氧化硅和覆盖一层金属铝，形成栅极。当栅极加正电压，且 $v_{GS} > V_T$ 时，靠近栅极 V 形槽下面的 P 型半导体将形成一个反型层 N 型导电沟道（图中未画出）。可见，自由电子沿导电沟道由源极到漏极的运动是纵向的，它与第 5 章介绍的载流子是横向从源极到漏极的小功率 MOSFET 不同。因此，这种器件被命名为 VMOS。

由图 8.5.4 可见，VMOS 管的漏区面积大，有利于利用散热片散去器件内部耗散的功率。沟道长度（当栅极加正电压时在 V 形槽下 P 型层部分形成）可以做得很短（例如 $1.5 \mu\text{m}$ ），且沟道间又呈并联关系（根据需要可并联多个），故允许流过的电流 I_D 很大。此外，利用现代工艺，使它靠近栅极形成一个低浓度的 N^- 外延层，当漏极与栅极间的反向电压形成耗尽区时，这一耗尽区主要出现在 N^- 外延区， N^- 区的正离子密度低，电场强度低，因而有较高的击穿电压。这些都有利于 VMOS 制成大功率器件。目前制成的 VMOS 产品，耐压能力达 1 000 V 以上，最大连续电流值高达 200 A。

VMOS2N6657 的输出特性如图 8.5.5 所示。由图可判断出，其转移特性在 $i_D \geq 0.2 \text{ A}$ 时， $g_m = \text{常数}$ ，因而其非线性失真也较小。

2. DMOS

DMOS 是 20 世纪 80 年代末出现的一种新型短沟道功率 MOSFET，是双扩散 MOS 管，结构剖面图如图 8.5.6 所示。它以轻掺杂的 N^- 作为衬底，其底部做成一层重掺杂的 N^+ 层，以便与漏极接触。衬底的上部进行两次扩散，一次扩散生成重掺杂的 P^+ 沟道体，另一次扩散生成重掺杂的 N^+ 源区。表面形成 SiO_2 氧化层，并覆盖一层金属作栅极，源区与 P^+ 区也通过金属短接。

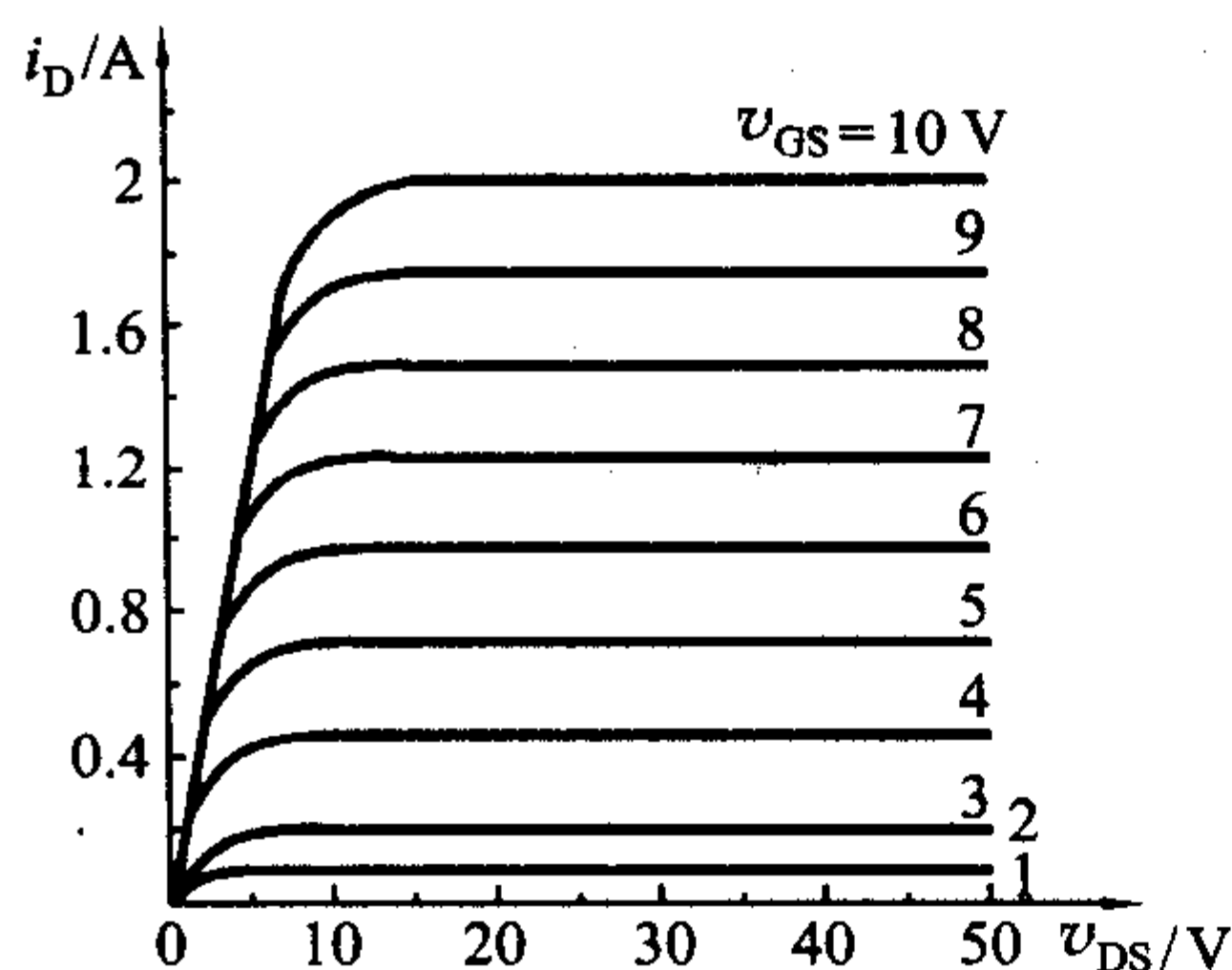


图 8.5.5 2N6657 输出特性

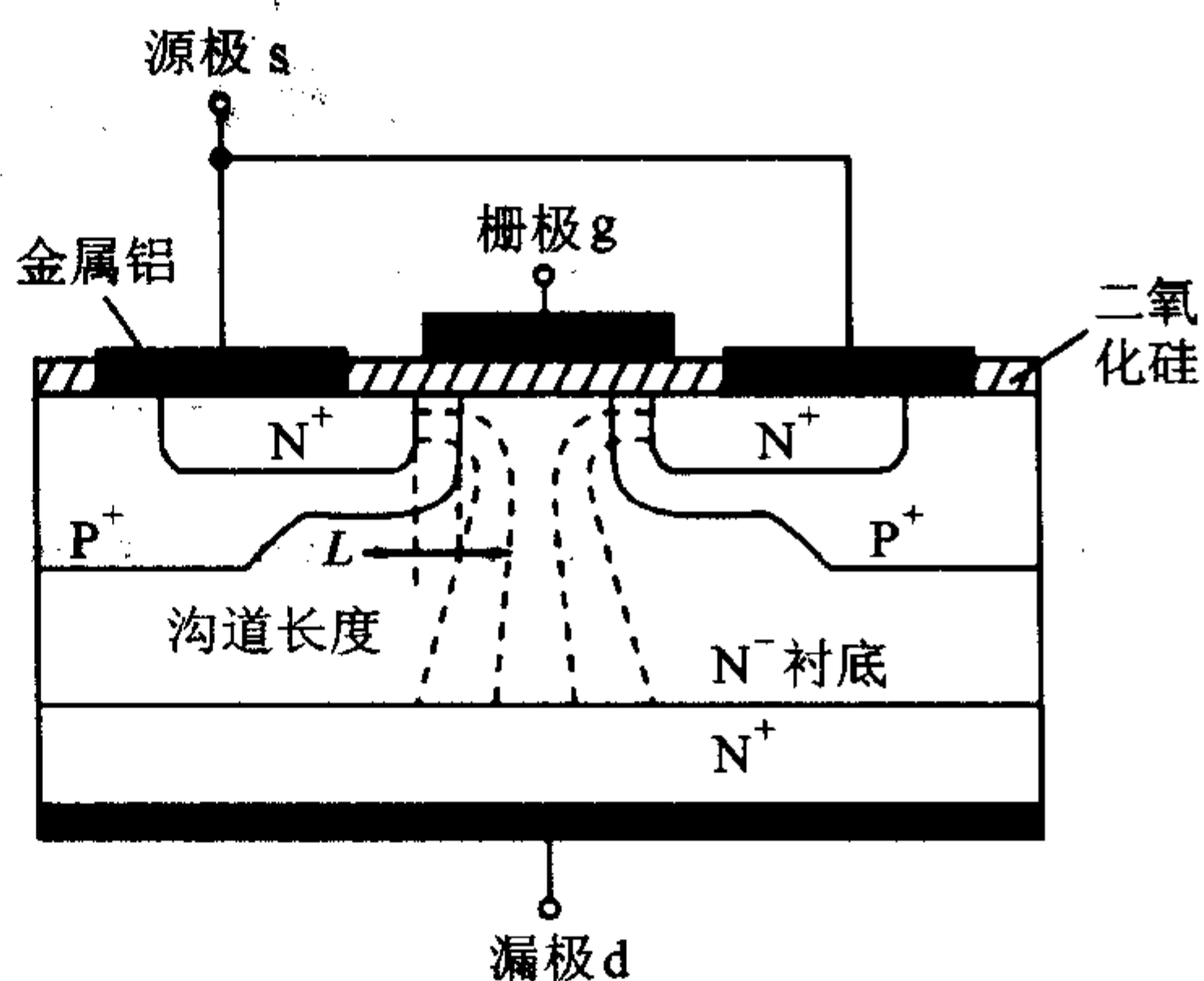


图 8.5.6 DMOS 结构剖面图

其工作原理如下：当 $v_{GS} > V_T$ 时，在 P^+ 型沟道体靠近栅极的氧化层下面形成反型层 N 沟道，沟道长度 L 很短（约 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ），如图 8.5.6 中所示。这样，当外加电压 v_{DS} 时，电子将从源极出发，经过沟道进入 N^- 区，然后垂直向下到达漏极。可见，DMOS 的沟道虽是横向的，但电流却是纵向的。

DMOS 的沟道虽然很短，但其击穿电压却很高（可达 600 V 以上），这是因为衬底和沟道体之间的耗尽层主要出现在低掺杂的衬底上。此外，其电流容量也很大，可达 50 A 以上。

与 BJT 相比，VMOS 和 DMOS 器件有许多优点：

(1) 与 MOS 器件一样是电压控制电流器件，输入电阻极高，因此所需驱动电流极小，功率增益高。

(2) 因为漏源电阻温度系数为正，当器件温度上升时，电流受到限制，所以 VMOS 不可能有热击穿，因而也不会出现二次击穿，温度稳定性高。

(3) 因无少子存储问题，加上极间电容小，所以大功率 MOS 管可用于高频电路或开关式稳压电源等。这一点 VMOS 更显优越（其 $f_T \approx 600 \text{ MHz}$ ）。

(4) 导通电阻 $r_{DS(on)}$ 小。

值得指出的是，功率 MOS 管存在一个突出矛盾：高耐压和低导通电阻之间的矛盾，这不利于它作为耐压大于 500 V 的器件。这一矛盾虽可用增加芯片面积来解决，但又导致开关速度变慢及成本提高。为解决此矛盾，人们设计了一种新型器件：绝缘栅双极型功率管 (IGBJT)。这种器件一方面保留了功率 MOS 管具有高输入阻抗、高速的特点，同时又引入了低饱和压降的 BJT，因此 IGBJT 就具有它们共同的优点。限于篇幅，有关 IGBJT 的详细工作原理，这里不再赘述。^①

上述 VMOS、DMOS 和 IGBJT 功率器件市场上已有很多产品问世，读者可根据不同需要选用。

8.5.3 以 MOS 功率管作输出级的甲乙类功率放大器

以 MOS 功率管作输出级的功率放大器如图 8.5.7a 所示，这是一个 SHM1150 II 型集成功率放大器^[12]，现对它作一简要介绍。

由图 8.5.7a 可见，SHM1150 II 型集成功率放大器由 T_1 、 T_2 组成差分输入级，其中 T_1 集电极输出的 v_{O1} 与 v_i 成反相关系， T_4 、 R_8 组成电压跟随器，使 $v_{E4} \approx v_{O2}$ ，这样加在 T_5 发射结的输入信号 $v_{BE5} = v_{O1} - v_{E4} \approx v_{O1} - v_{O2}$ ，由于 v_{O2} 与

^① 张风言编著. 电子电路基础——高性能模拟电路和电流模技术. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1995.

v_{O1} 反相, 则有 $|v_{BE5}| = |v_{O1}| + |v_{O2}|$, T_5 完成了将输入级 T_1 、 T_2 上的双端输出信号转换为单端输出信号。 T_5 以电流源 I_2 作有源负载构成高增益的中间放大级。 T_7 、 T_8 为互补对称电路, 用于驱动 VMOS 管 T_9 和 T_{10} 。 T_6 、 R_9 、 R_{10} 组成 V_{BE} 扩大电路, 其作用是为 T_7 、 T_8 提供适当的直流偏置, 使电路工作在甲乙类, 以防止 T_9 、 T_{10} 产生交越失真。

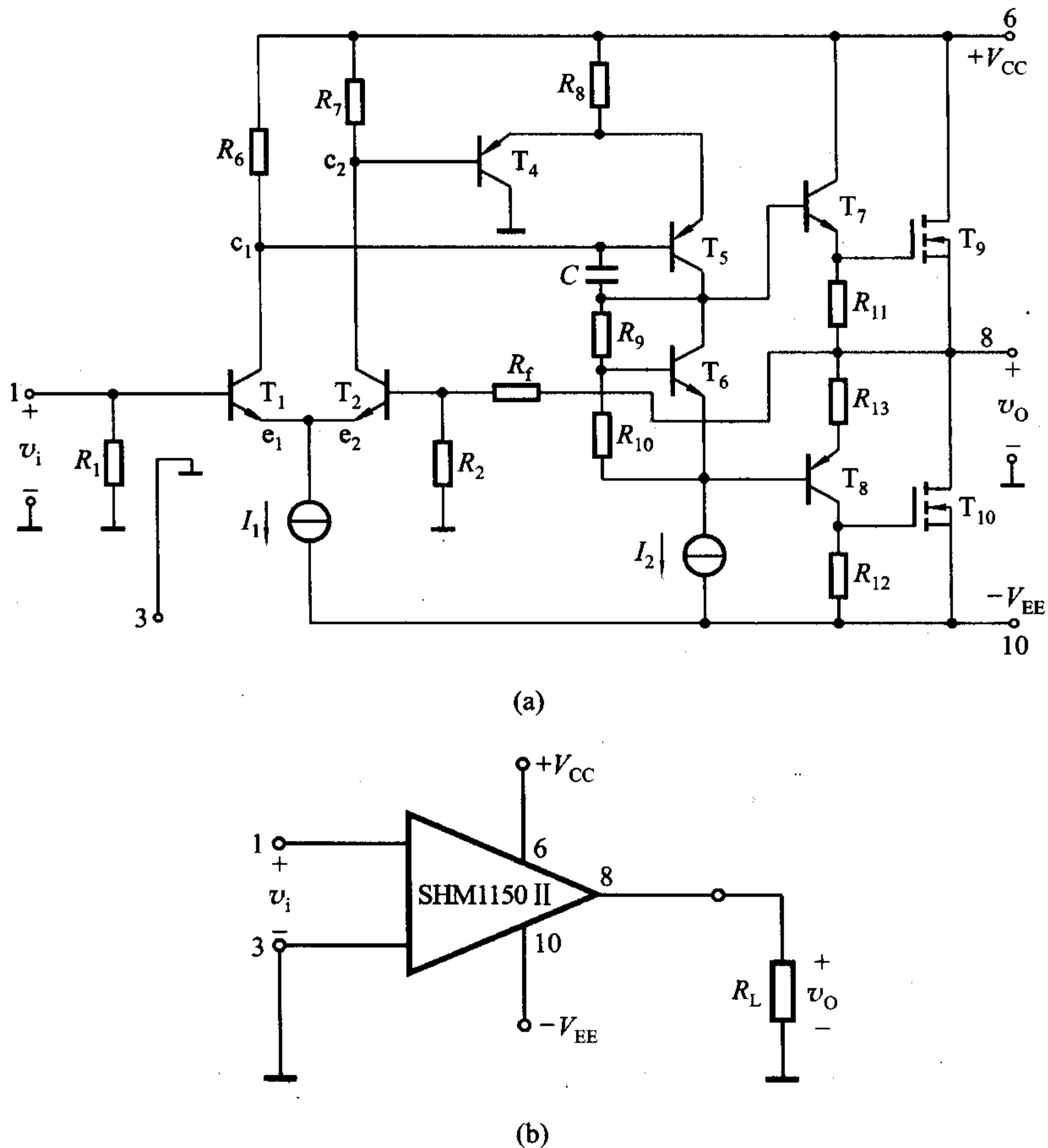


图 8.5.7 SHM1150 II BiMOS 集成功率放大器
(a) 内部电路 (b) 外部接线图

整个电路依靠 R_f 和 R_2 引入的电压串联负反馈来稳定增益和静态工作点。

SHM1150 II 型电路由于输出级采用了 VMOS 管, 使输出功率得到很大提高。其特点是, 应用十分方便, 接上电源即可作为双电源互补对称电路直接使用, 如图 8.5.7b 所示。该电路可在 $\pm 12\text{ V} \sim \pm 50\text{ V}$ 电压下正常工作, 电路的最大输出功率可达 150 W 。

8.5.4 BJT 集成功率放大器举例

BJT 集成音频功率放大器 LM380 的原理电路如图 8.5.8a 所示, 它由输入级、中间级和输出级所组成。三极管 $T_1 \sim T_4$ 构成复合管差分输入级, 由 T_5 、 T_6 构成的镜像电流源作为有源负载。

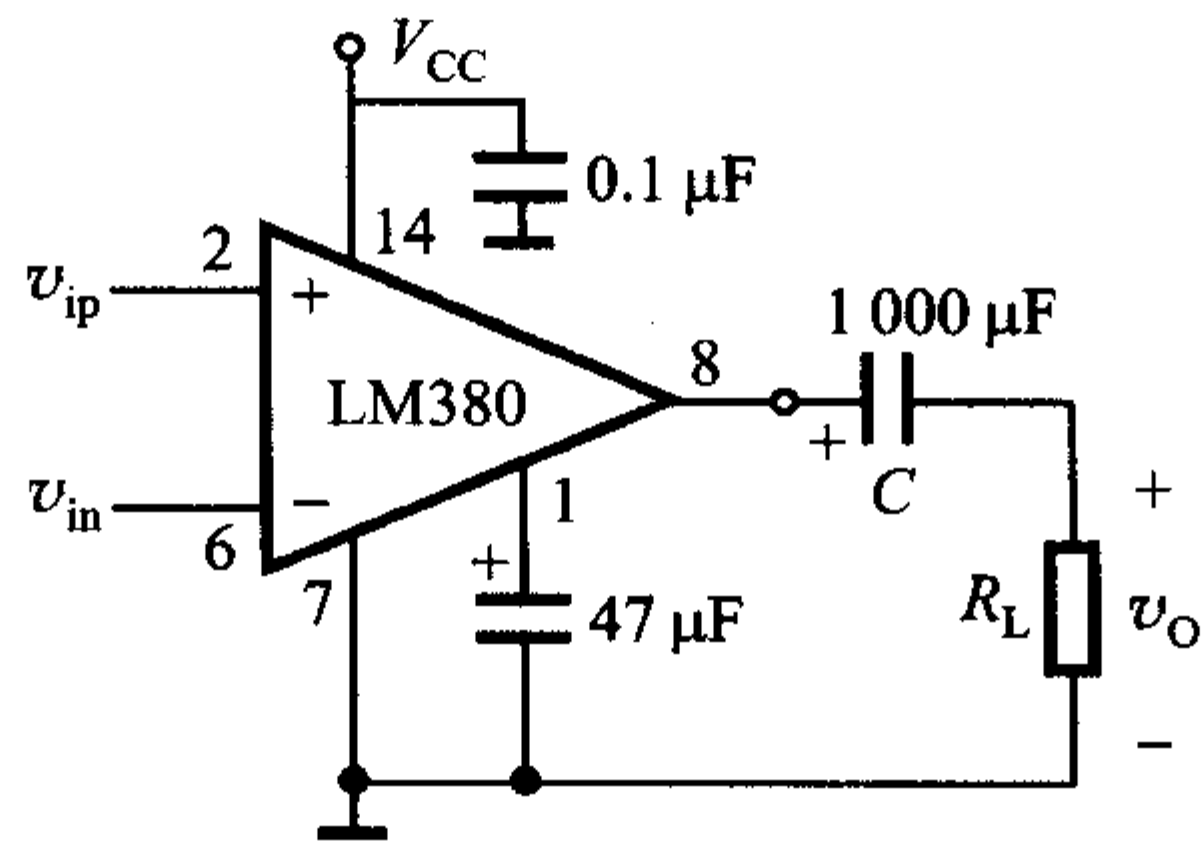
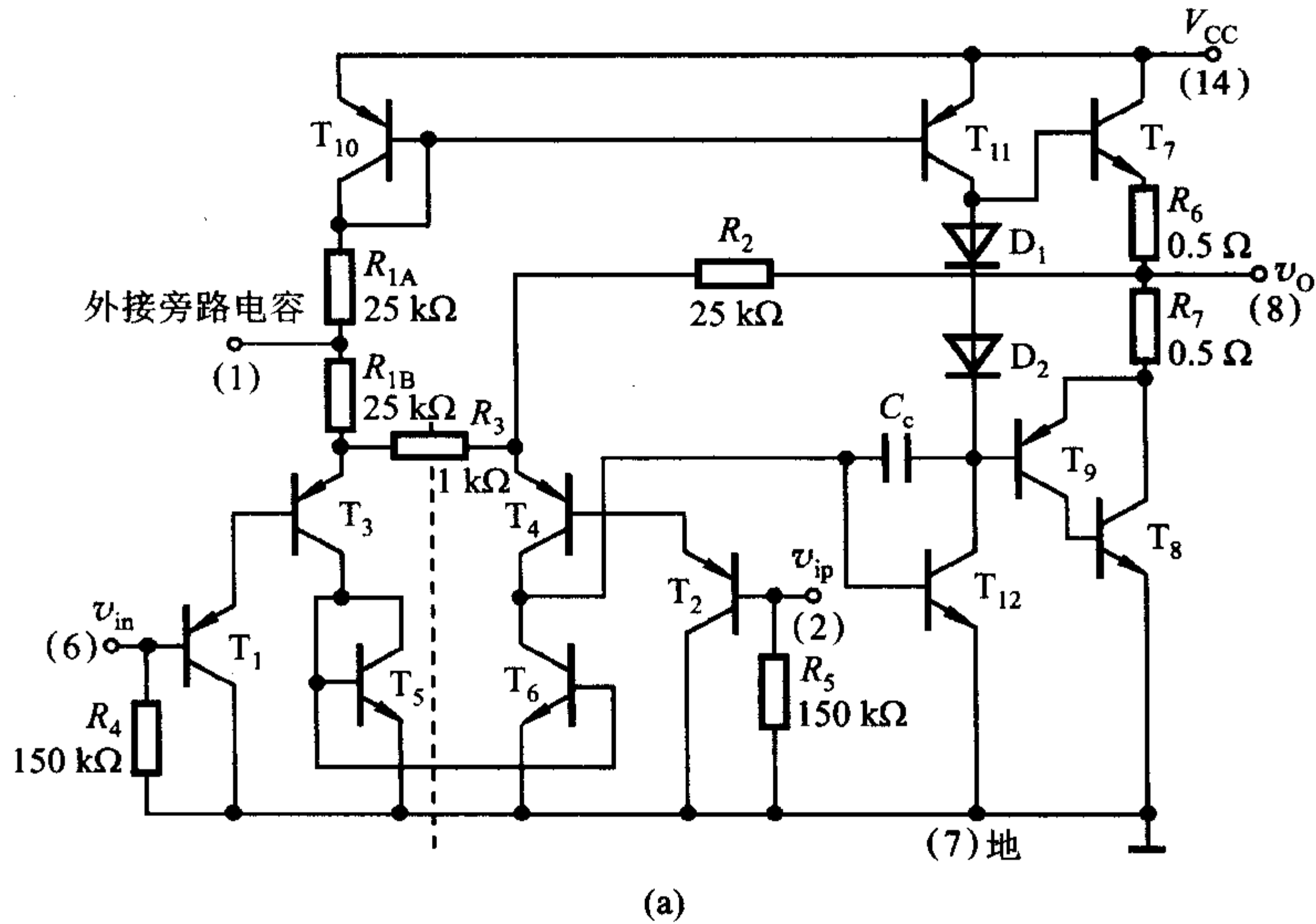


图 8.5.8 LM380 集成音频功率放大器

(a) 内部原理电路 (b) LM380 一种外部接线图

输入级的单端输出信号传送至由 T_{12} 组成的共射中间级, T_{10} 和 T_{11} 构成有源负载, 这一级的主要作用是提高电压放大倍数, 其中 C_c 是补偿电容, 以保证电路稳定地工作。

T_7 、 T_8 、 T_9 和 D_1 、 D_2 组成通常的互补对称输出级。 T_8 、 T_9 等效于一个 PNP 型管, 这种复合方案是考虑到集成电路中的横向 PNP 管的电流放大系数

较低的缘故。

差分输入级的静态工作电流，分别由输出端和电源正端通过电阻 R_1 ($R_1 = R_{1A} + R_{1B}$) 和 R_2 来供给。从电路结构和参数可以看出，通过这一级两边的电流是接近相等的。例如，当两输入端对地短路时，有 $(V_{CC} - 3V_{BE}) / (R_{1A} + R_{1B}) \approx (V_0 - 2V_{BE}) / R_2$ ，其中 V_{CC} 为电源电压； V_{BE} 为三极管的基-射结的电压降； V_0 为直流输出电压，其值近似为 $V_{CC}/2$ 。因此，静态时， R_3 中几乎没有直流电流通过。

为了改善电路的性能，引入了交、直流两种反馈。直流反馈是由输出端通过 R_2 引到输入级 T_4 的射极，以保持静态输出电压 V_0 基本恒定。交流反馈是由 R_2 和 R_3 引入的。若将差分输入级用一对称轴(虚线)划分为两半，则 R_3 的中点为交流地电位点。用瞬时极性法可以判断，所引入的是电压串联负反馈，其反馈系数为 $F_v = (R_3/2) / (R_2 + R_3/2)$ ，这样就能维持电压放大倍数恒定。

按图中给定参数，可求出电路的闭环电压增益为

$$A_{vf} \approx \frac{1}{F_v} = 1 + \frac{2R_2}{R_3} = 51$$

LM380 的输入信号可以从两端输入，也可从单端输入。由于 T_1 、 T_2 管的输入回路各有电阻 R_4 、 R_5 ($150 \text{ k}\Omega$) 构成偏流通路，故允许一端开路。图 8.5.8b 是 LM380 一种双端输入外部接线图。

图中电容 C_c 为相位补偿电容，跨接于中间放大级 T_{12} 的基极与集电极之间，构成密勒效应补偿，以消除可能产生的自激振荡。

LM380 功率放大器是一种很流行的固定增益的功率放大器，它能够提供大到 5 W 的交流信号功率输出。

另一种集成音频功率放大器的型号为 LM384，其原理电路与 LM380 相同，但其额定电源电压由 LM380 的 22 V 升到 28 V。

复习思考题

- 8.5.1 什么叫热阻？说明功率放大器件为什么要用散热片？
- 8.5.2 从功率器件的安全运行考虑，可以从哪几方面采取措施？
- 8.5.3 与功率 BJT 相比，VMOS 和 DMOS 管突出的优点是什么？

8.6 SPICE 仿真例题

例 SPE8.6.1 (1) 乙类互补对称功放电路如图 8.6.1a 所示，设输入信

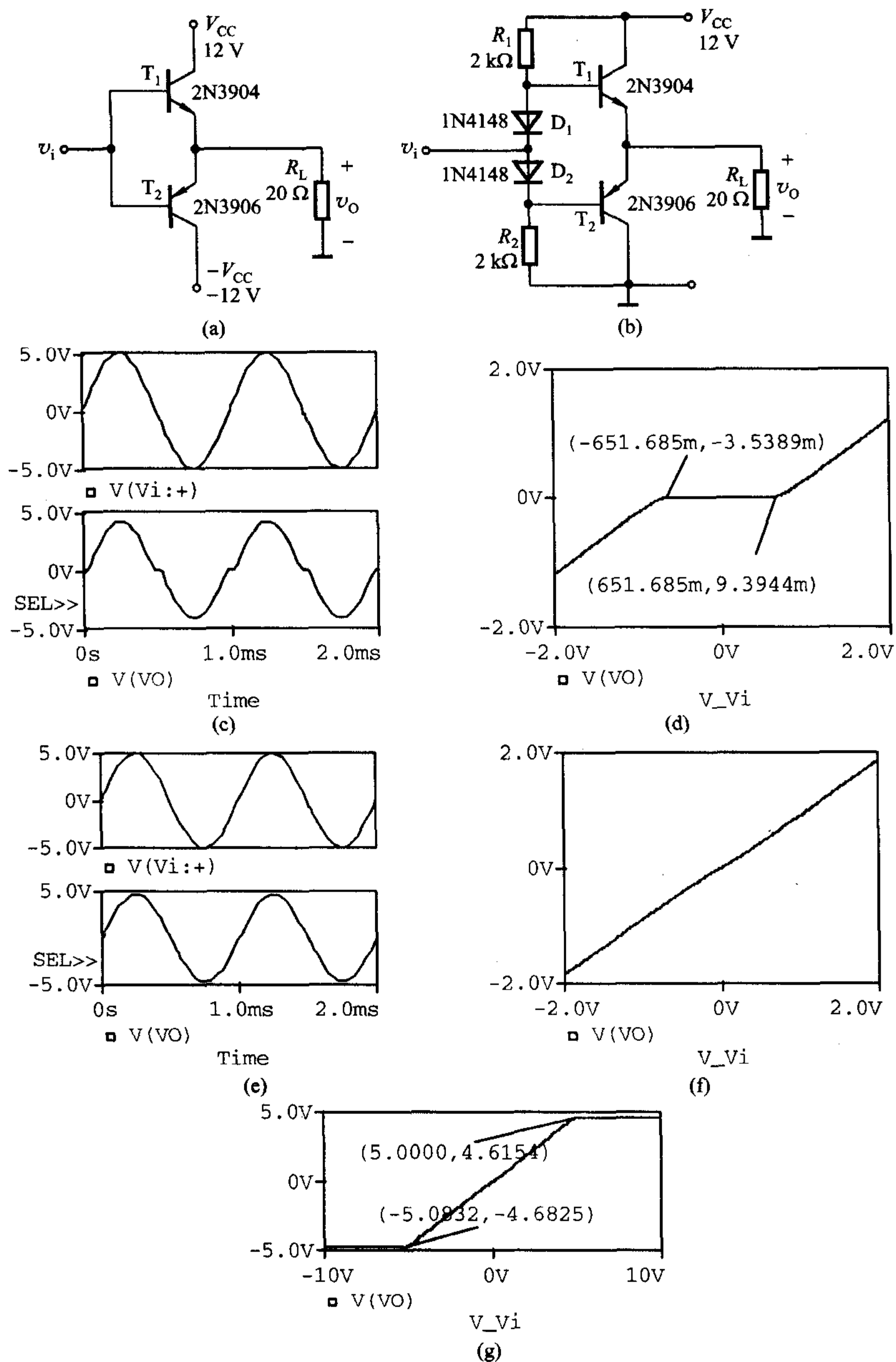


图 8.6.1 例 SPE8.6.1 的电路及仿真结果

- (a) 乙类互补对称功放电路 (b) 甲乙类互补对称功放电路
 (c) 乙类互补对称功放的输入、输出波形 (d) 乙类互补对称功放的电压传输特性
 (e) 甲乙类互补对称功放的输入、输出波形 (f) 甲乙类互补对称功放的电压传输特性
 (g) 甲乙类互补对称功放的电压传输特性

号 v_i 为 1 kHz、振幅为 5 V 的正弦电压。试运用 SPICE 程序观测输出电压波形的交越失真，求交越失真对应的输入电压范围。(2) 为减小和克服交越失真，在 T_1 、 T_2 两基极间加上两只二极管 D_1 、 D_2 及相应电路如图 b 所示，构成甲乙类互补对称功放电路。试观察输出 v_o 的交越失真是否消除。(3) 求最大输出电压范围。

解：(1) 设置时域分析，得到图 c 所示的输入、输出波形，可看出 v_o 有交越失真。

再设置直流扫描分析，得电压传输特性如图 d 所示，由图中看出，输入电压在 $-0.65\text{ V} \sim +0.65\text{ V}$ 范围内出现失真。

(2) 将电路改成图 b 的形式，重复(1)的步骤，可得电路的输出波形和电压传输特性分别如图 e、f 所示，此时可以看出 v_o 已无交越失真。

(3) 设置直流扫描分析，且 v_i 的扫描范围为 $-10\text{ V} \sim +10\text{ V}$ ，得电压传输特性如图 g 所示，由图可以看出，最大输出电压范围约为 $-4.6\text{ V} \sim +4.6\text{ V}$ 。



小 结

□ 功率放大电路是在大信号下工作，通常采用图解法进行分析。研究的重点是如何在允许失真的情况下，尽可能提高输出功率和效率。

□ 与甲类功率放大电路相比，乙类互补对称功率放大电路的主要优点是效率高，在理想情况下，其最大效率约为 78.5%。为保证 BJT 安全工作，双电源互补对称电路工作在乙类时，器件的极限参数必须满足： $P_{CM} > P_{TI} \approx 0.2P_{om}$ ， $|V_{(BR)CEO}| > 2V_{CC}$ ， $I_{CM} > V_{CC}/R_L$ 。

□ 由于功率 BJT 输入特性存在死区电压，工作在乙类的互补对称电路将出现交越失真，克服交越失真的方法是采用甲乙类(接近乙类)互补对称电路。通常可利用二极管或 V_{BE} 扩大电路进行偏置。

□ 在单电源互补对称电路中，计算输出功率、效率、管耗和电源供给的功率，可借用双电源互补对称电路的计算公式，但要用 $V_{CC}/2$ 代替原公式中的 V_{CC} 。

□ 在集成功放日益发展并获得广泛应用的同时，大功率器件也发展迅速，主要有达林顿管、功率 VMOSFET 和 DMOSFET。为了保证器件的安全运行，可从功率管的散热、防止功率 BJT 二次击穿、降低使用定额和保护措施等方面来考虑。



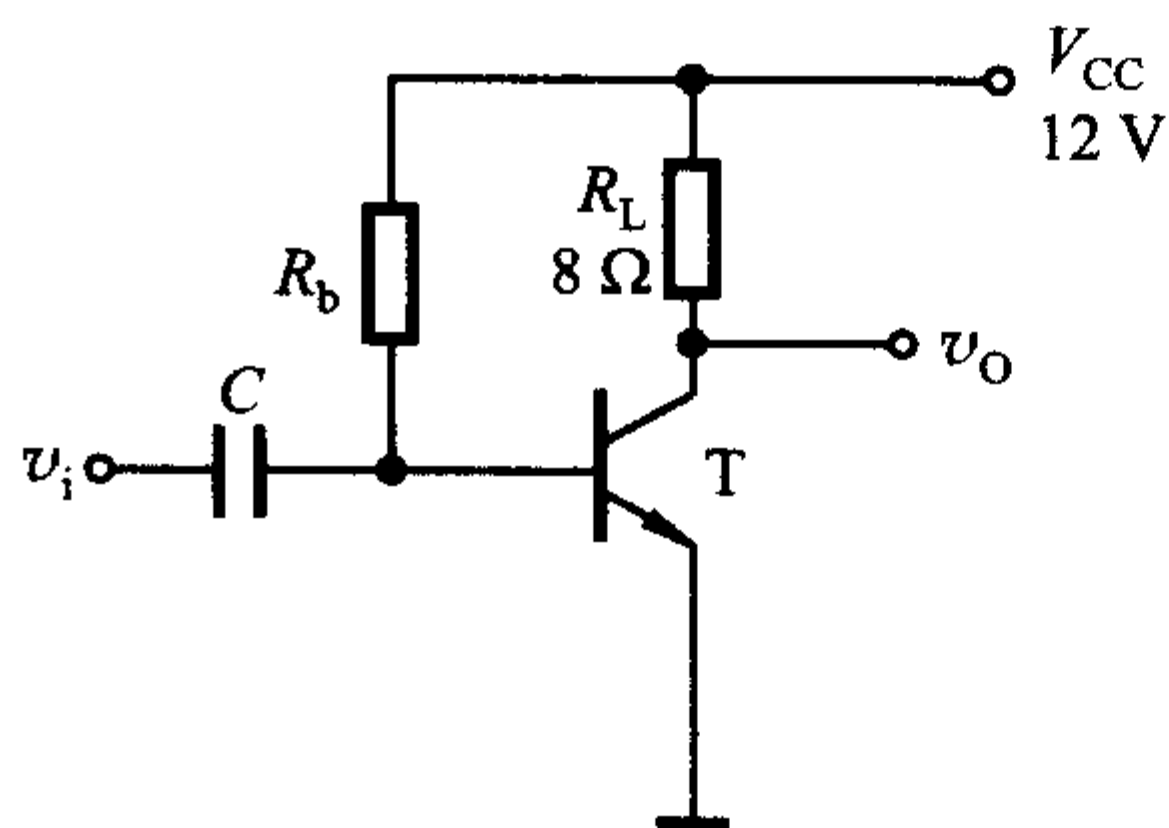
8.1 功率放大电路的一般问题

8.1.1 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？

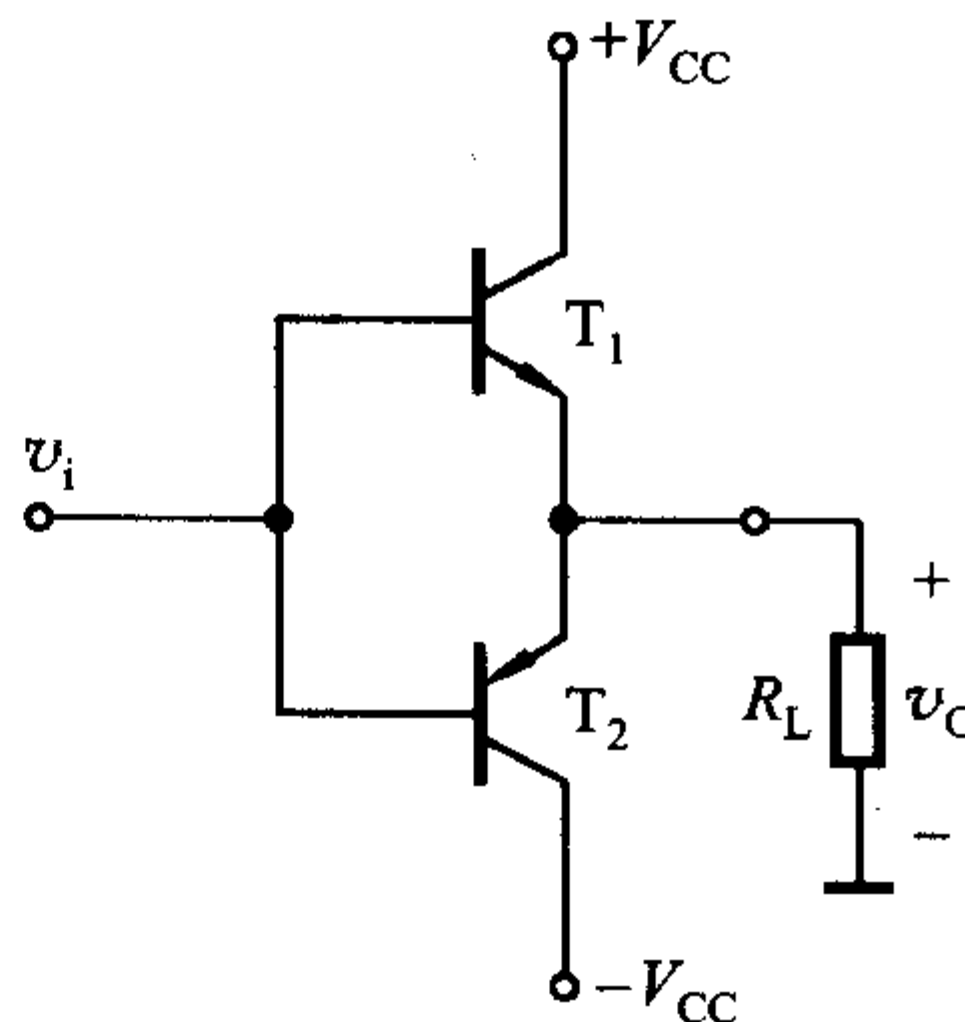
8.3 乙类双电源互补对称功率放大电路

8.3.1 在图题 8.3.1 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 $\eta = ?$ 试与工作在乙类的互补对称电路比较。

8.3.2 一双电源互补对称电路如图题 8.3.2 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?



图题 8.3.1



图题 8.3.2

8.3.3 在图题 8.3.2 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。

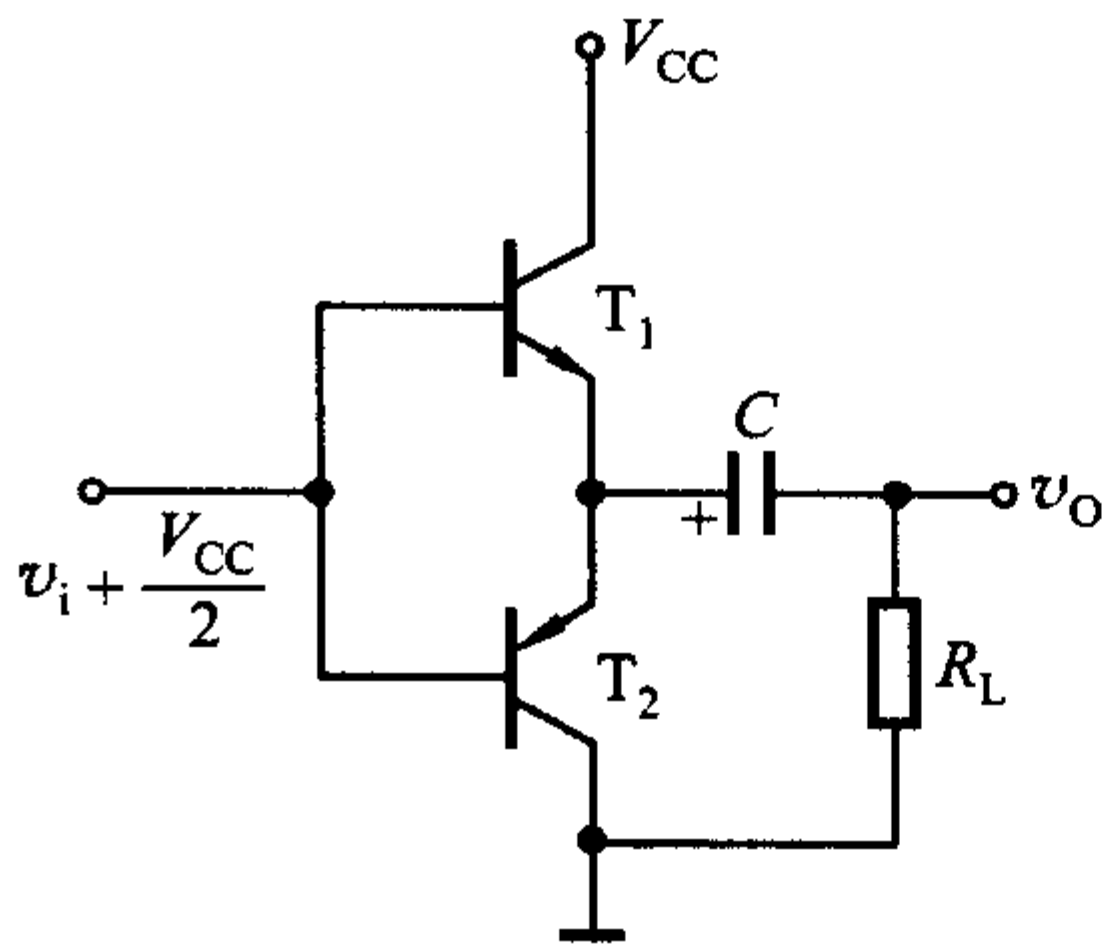
8.3.4 设电路如图题 8.3.2 所示，管子在输入信号 v_i 作用下，在一周期内 T_1 和 T_2 轮流导电约 180° ，电源电压 $V_{CC} = 20 \text{ V}$ ，负载 $R_L = 8 \Omega$ ，试计算：(1) 在输入信号 $V_i = 10 \text{ V}$ (有效值) 时，电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率；(2) 当输入信号 v_i 的幅值为 $V_{im} = V_{CC} = 20 \text{ V}$ 时，电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率。

8.4 甲乙类互补对称功率放大电路

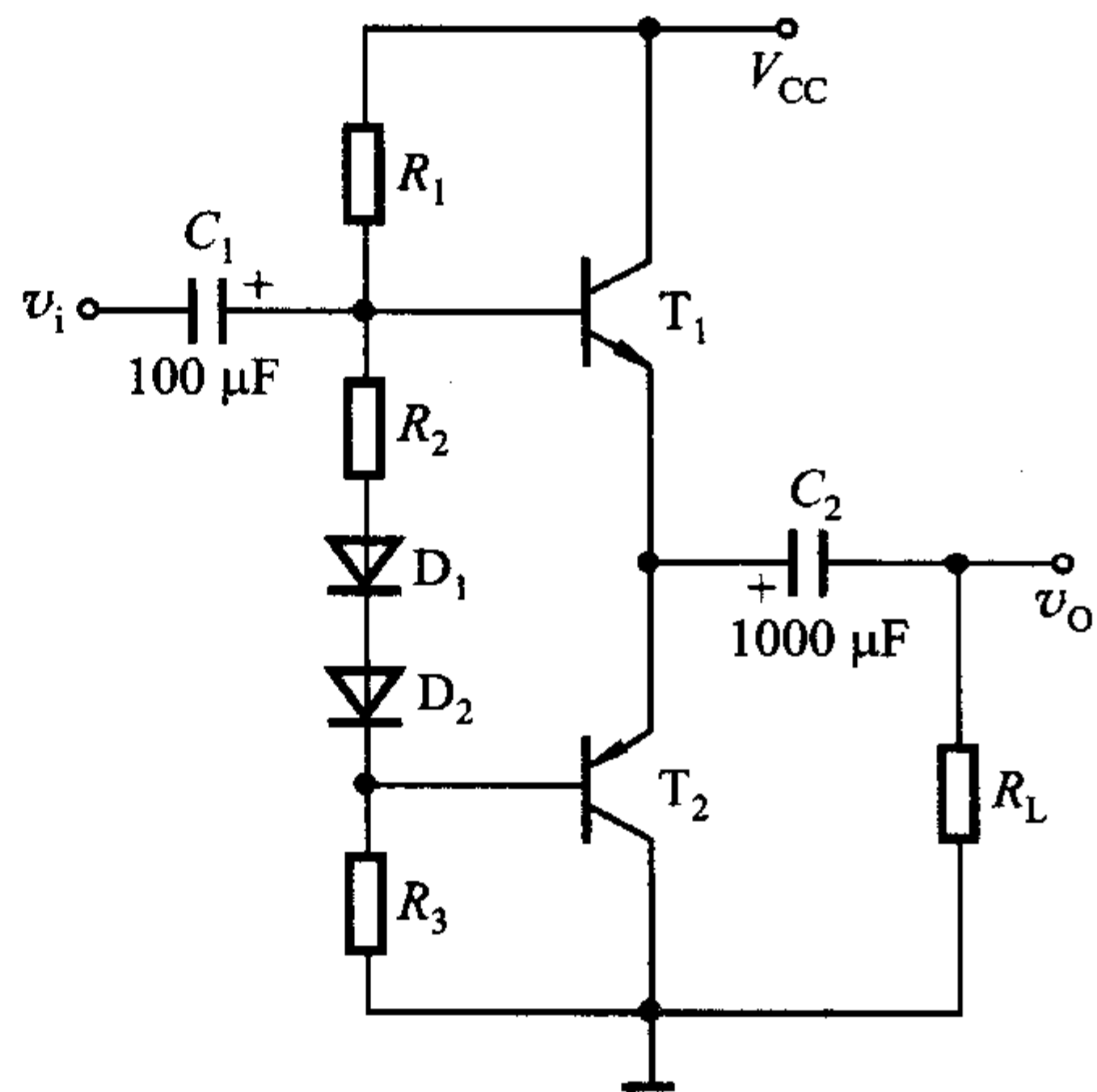
8.4.1 一单电源互补对称功放电路如图题 8.4.1 所示, 设 v_i 为正弦波, $R_L = 8 \Omega$, 管子的饱和压降 V_{CES} 可忽略不计。试求最大不失真输出功率 P_{om} (不考虑交越失真) 为 9 W 时, 电源电压 V_{CC} 至少应为多大?

8.4.2 在图题 8.4.1 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} 。

8.4.3 一单电源互补对称电路如图题 8.4.3 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 8.4.1



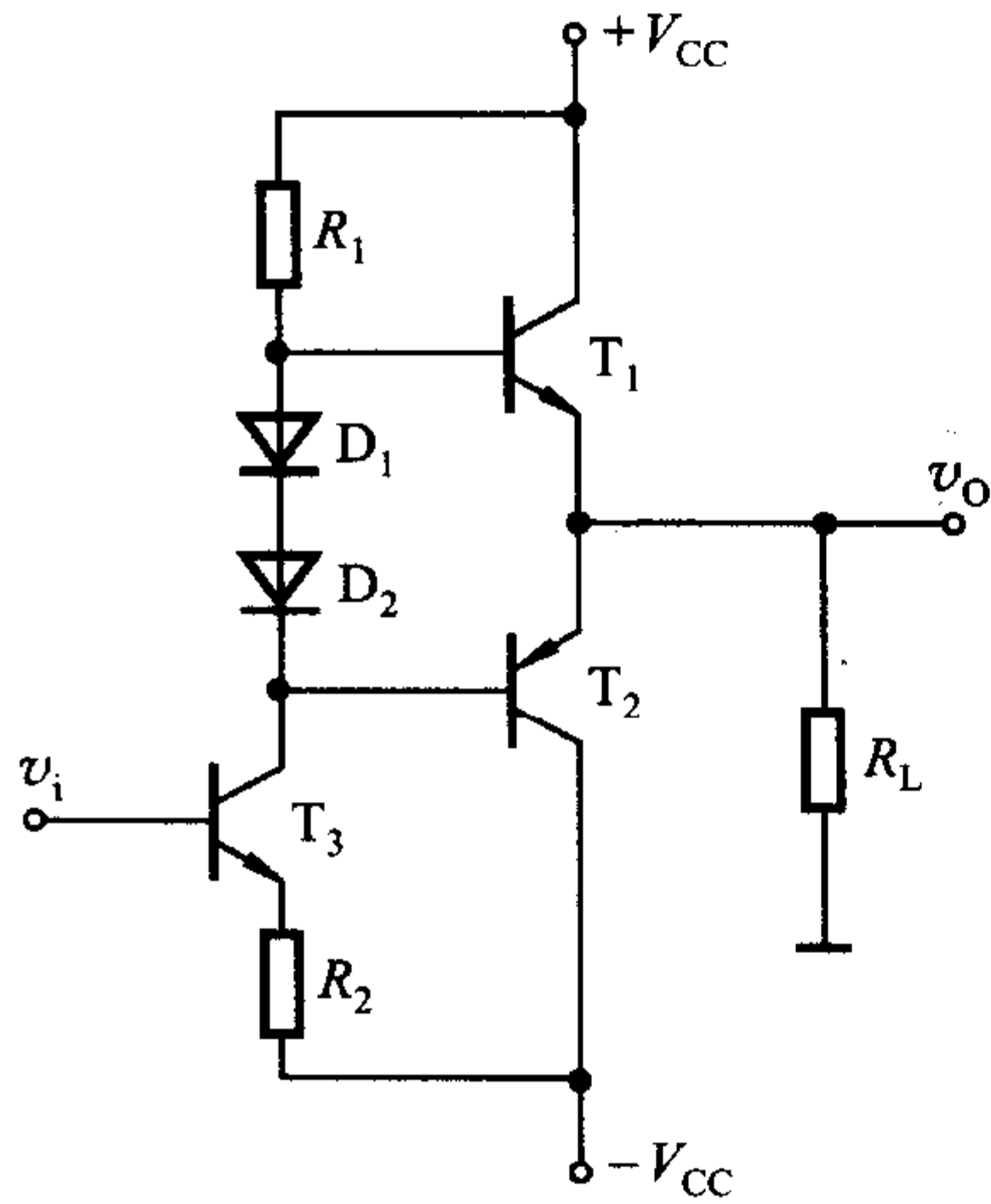
图题 8.4.3

8.4.4 在图题 8.4.3 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 。

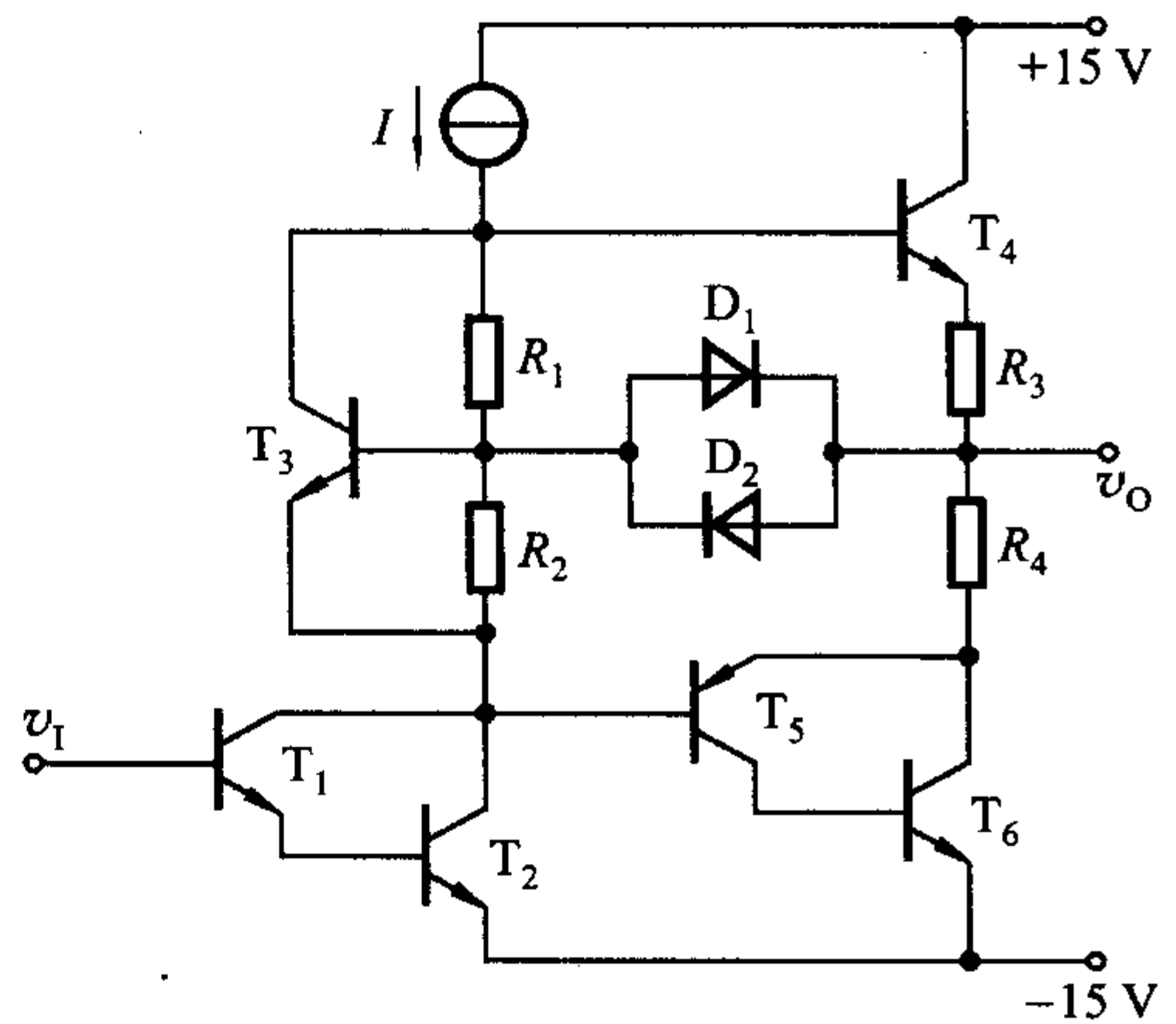
8.4.5 一双电源互补对称电路如图题 8.4.5 所示 (图中未画出 T_3 的偏置电路), 设输入电压 v_i 为正弦波, 电源电压 $V_{CC} = 24 \text{ V}$, $R_L = 16 \Omega$, 由 T_3 管组成的放大电路的电压增益 $\Delta v_{c3} / \Delta v_{b3} = -16$, 射极输出器的电压增益为 1, 试计算当输入电压有效值 $V_i = 1 \text{ V}$ 时, 电路的输出功率 P_o 、电源供给的功率 P_V 、两管的管耗 P_T 以及效率 η 。

8.4.6 某集成电路的输出级如图题 8.4.6 所示。试说明: (1) R_1 、 R_2 和 T_3 组成什么电路, 在电路中起何作用; (2) 恒流源 I 在电路中起何作用; (3) 电路中引入了 D_1 、 D_2 作为过载保护, 试说明其理由。

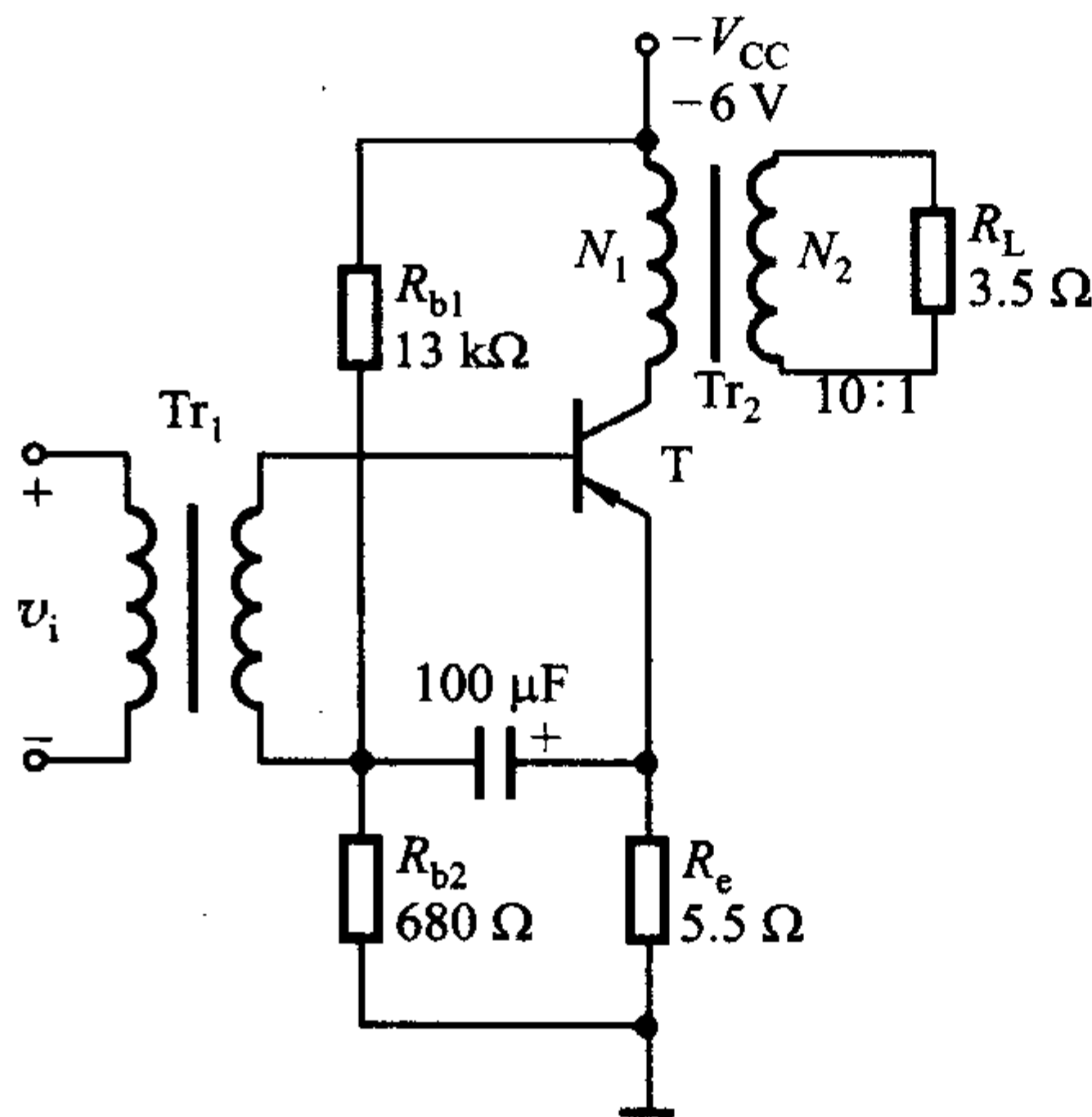
8.4.7 现有一半导体收音机, 输出级采用图题 8.4.7a 所示电路, 有人说, 当电源接通后, 无信号输出 (即喇叭不响) 时, 输出级 BJT 的损耗最小, 你认为这种说法对不对? 为什么?



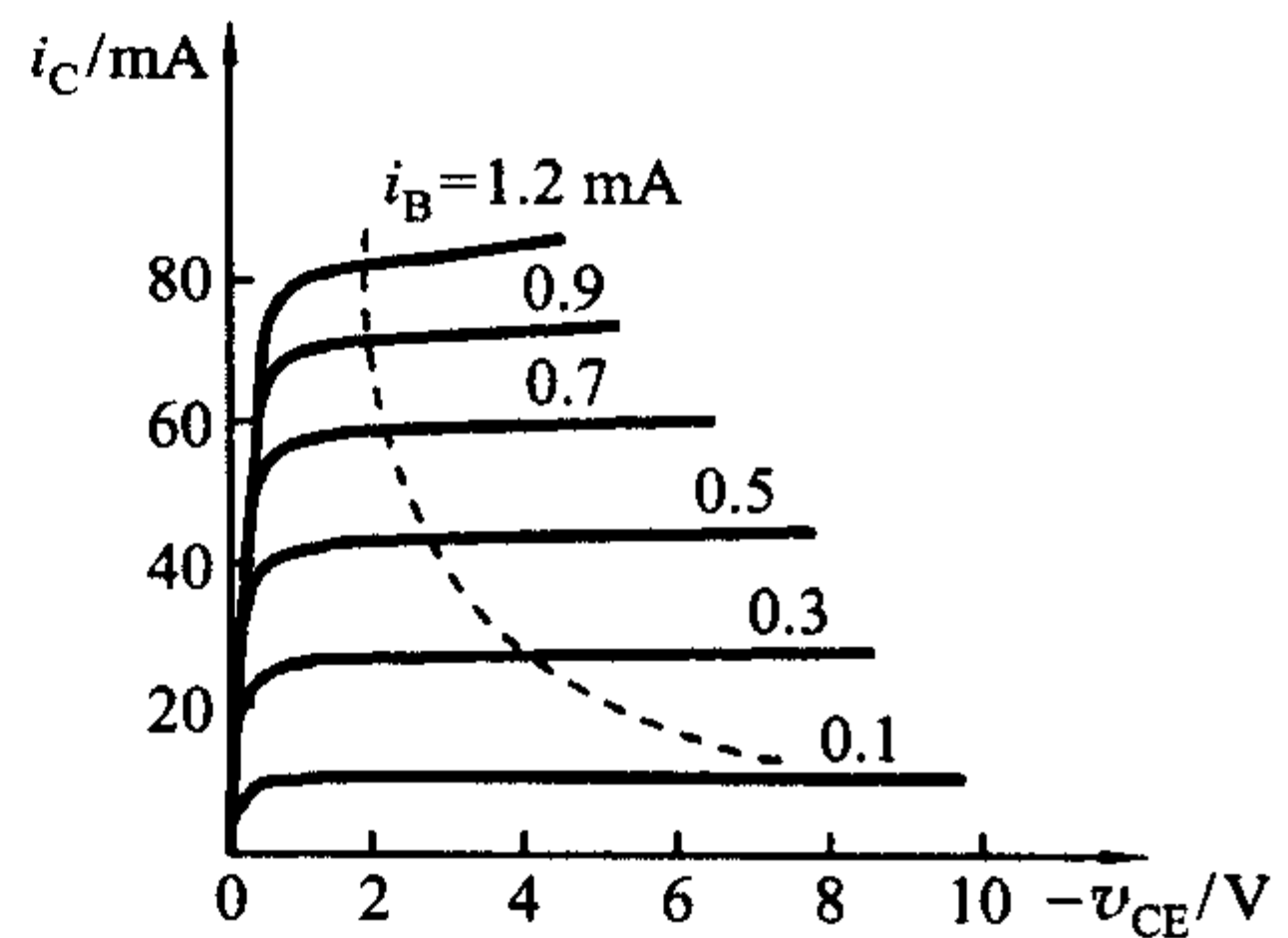
图题 8.4.5



图题 8.4.6



(a)



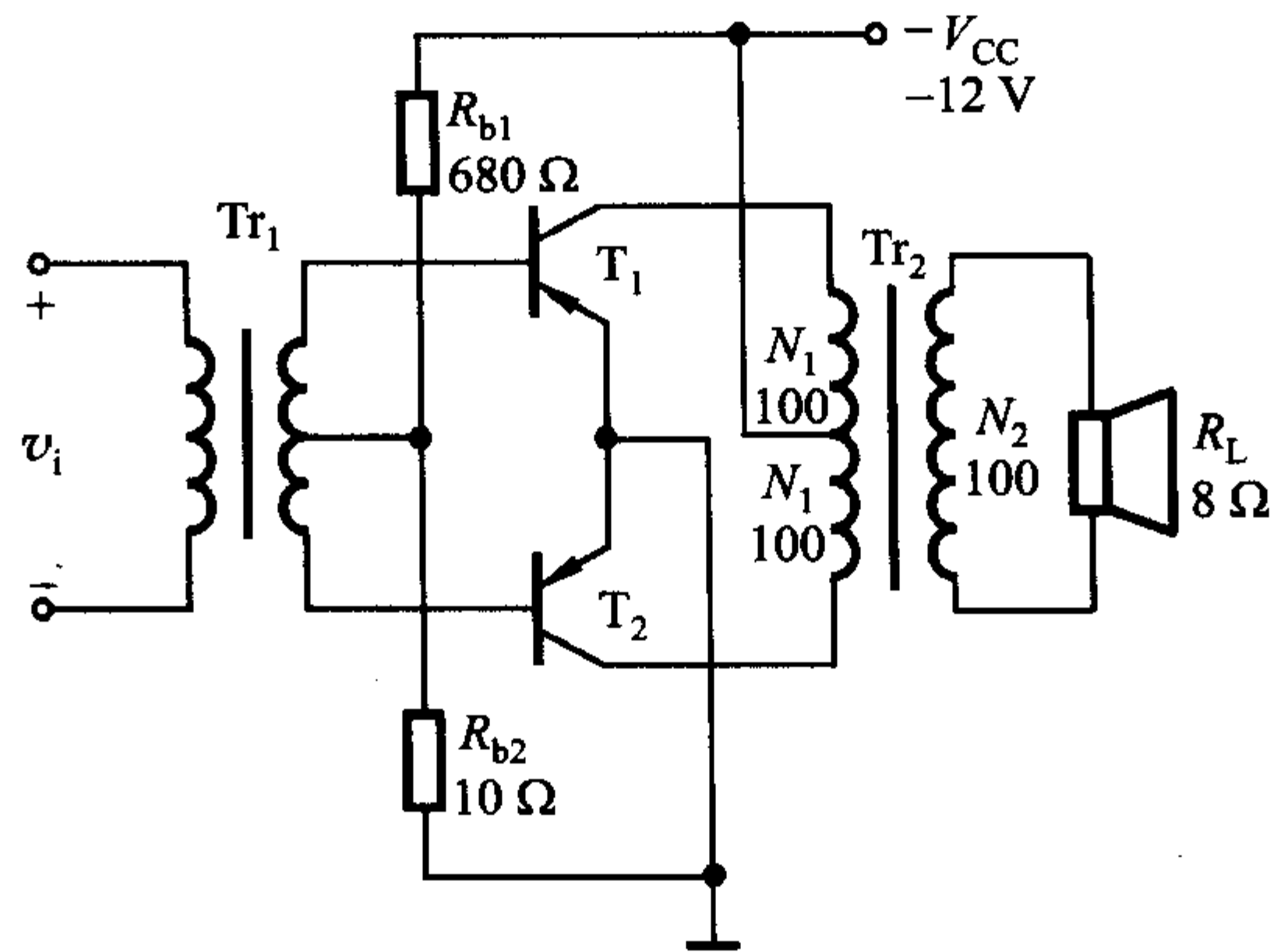
(b)

图题 8.4.7

8.4.8 在如图题 8.4.7a 所示电路中，试用图解法求出负载上的输出功率和效率。设输出变压器效率为 80%。三极管 T 的输出特性如图题 8.4.7b 所示。

提示：此题的等效交流负载电阻 $R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$ ， N_1 、 N_2 分别为变压器一次、二次绕组的匝数。

8.4.9 一个简易手提式小型扩音机的输出级如图题 8.4.9 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 BJT3AD1 的定额是否超过。

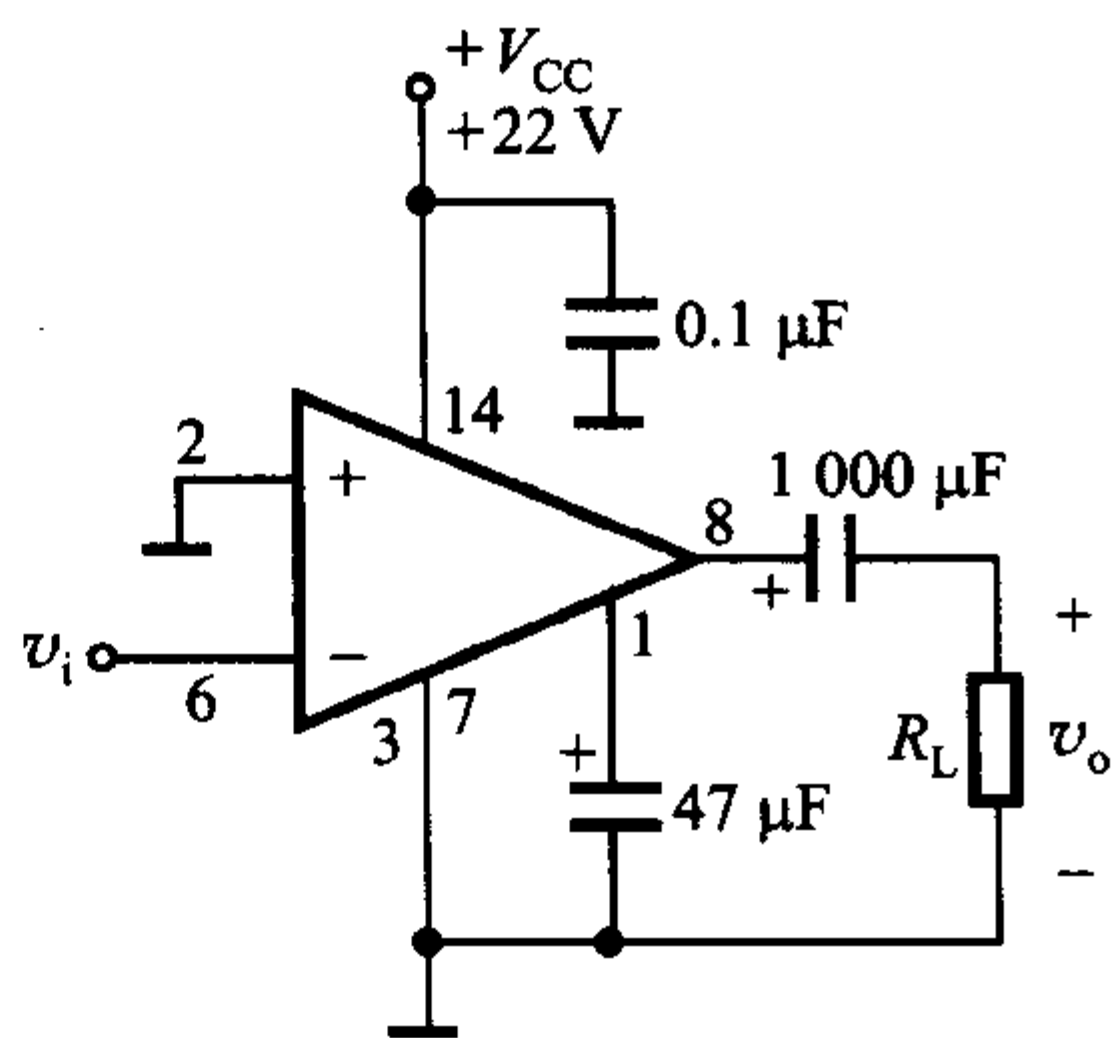


图题 8.4.9

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 $R'_L = (N_1/N_2)^2 R_L$ ；(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。

8.5 集成功率放大器

8.5.1 一个用集成功放 LM384 组成的功率放大电路如图题 8.5.1 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。求当 v_i 为正弦信号时：(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。



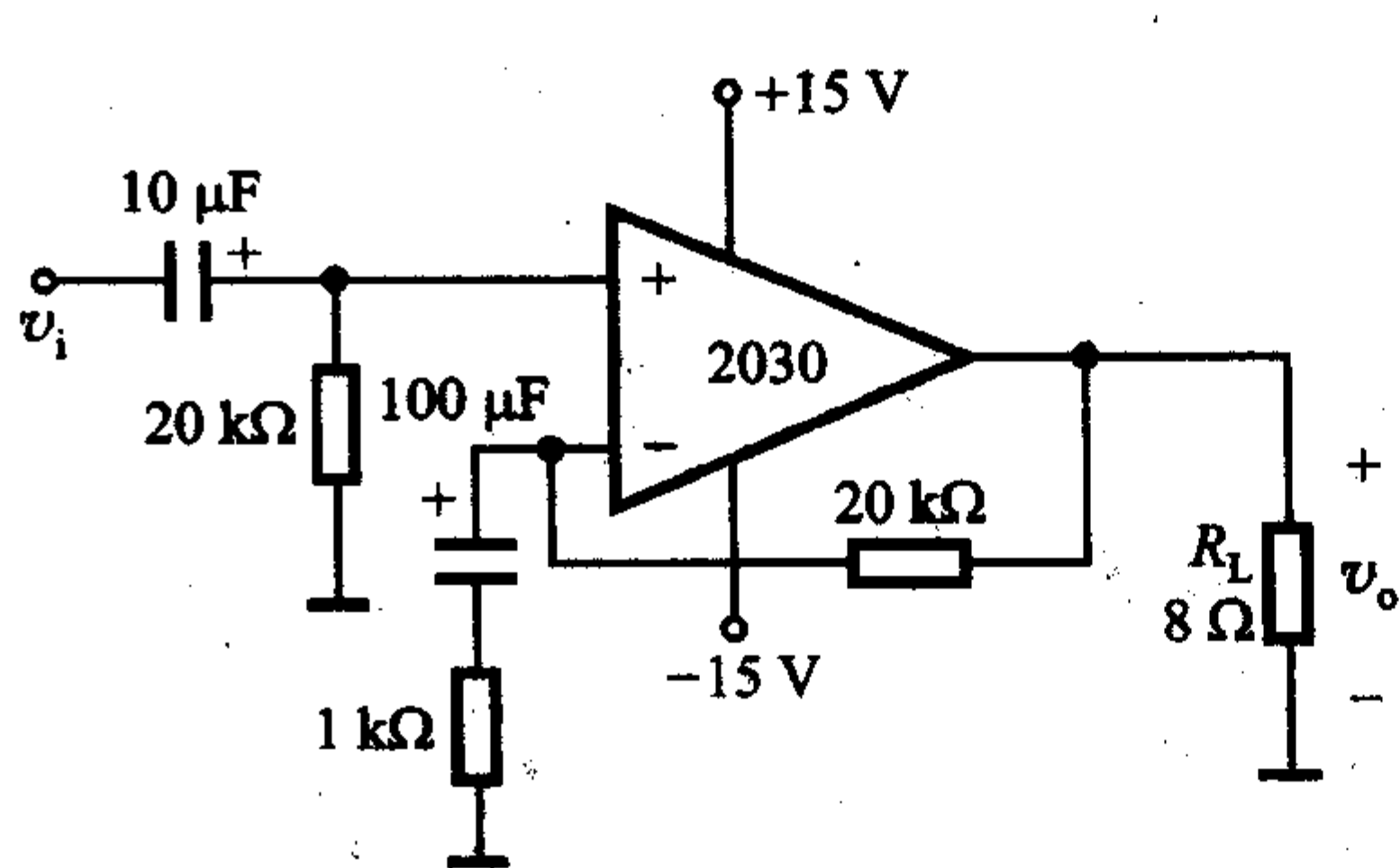
图题 8.5.1

8.5.2 2030 集成功率放大器的一种应用电路如图题 8.5.2 所示，假定其输出级 BJT 的饱和压降 V_{CES} 可以忽略不计， v_i 为正弦电压。(1)求理想情况下最大输出功率 P_{om} ；(2)求电路输出级的效率 η 。

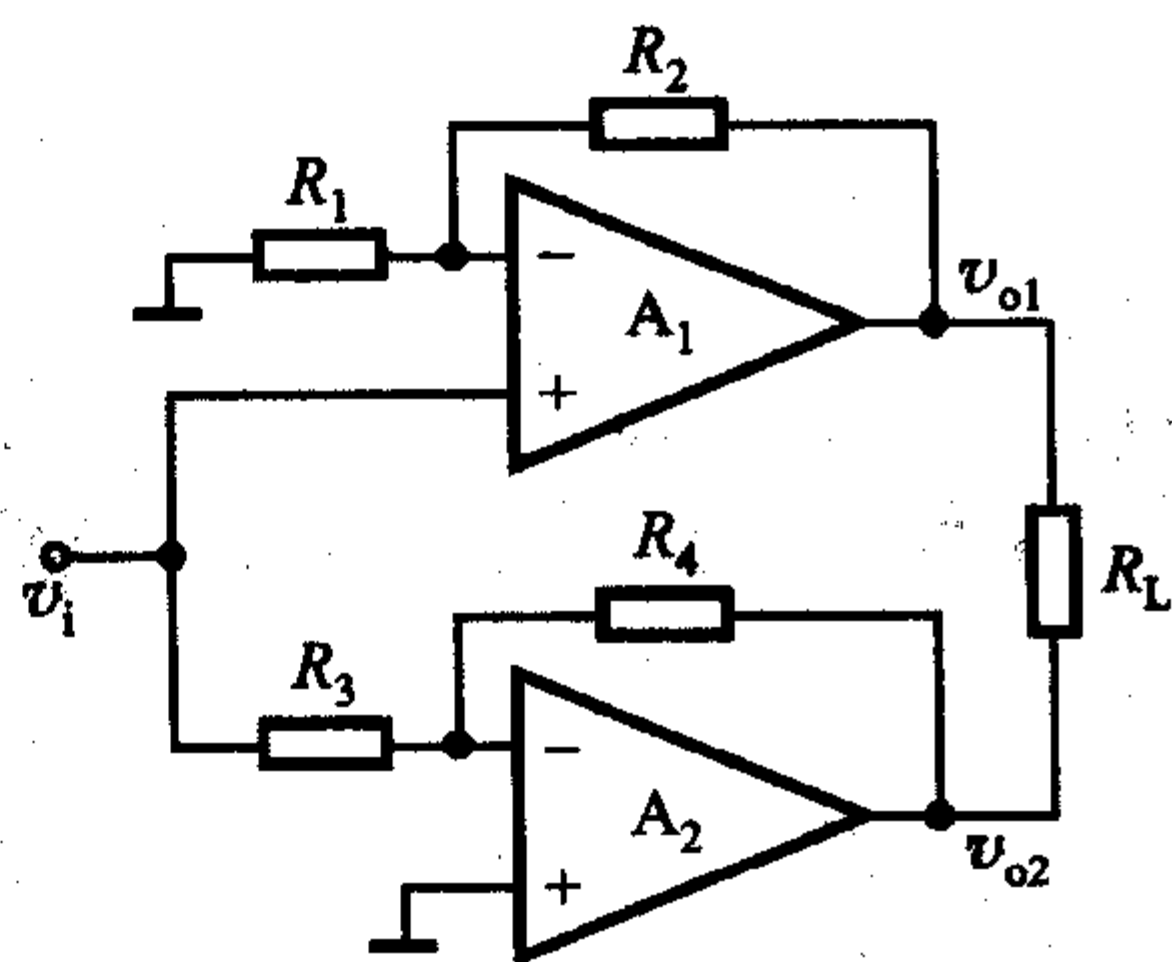
8.5.3 桥式功率放大电路如图题 8.5.3 所示。设图中参数 $R_1 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 15\text{ k}\Omega$ ， $R_4 = 25\text{ k}\Omega$ 和 $R_L = 1.2\text{ k}\Omega$ ， v_i 为正弦波，放大器 A_1 、 A_2 的工作电源为 $\pm 15\text{ V}$ ，每个放大器的输出电压峰值限制在 $\pm 13\text{ V}$ 。试求：(1) A_1 、 A_2 的电压增益 $A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = ?$ $A_{v2} = \frac{v_{o2}}{v_i} = ?$ (2)负载 R_L 能得到的最大功率；(3)输入电压的峰值。

8.6 SPICE 仿真习题

SP8.6.1 一双电源互补对称电路如图 8.6.1a 所示，已知 $V_{CC} = 12\text{ V}$ ， $R_L = 16\ \Omega$ ， v_i 为正弦电压，试分别绘出 P_V 、 P_o 、 P_{T1} 随 V_{om}/V_{CC} 变化的曲线，并求负载上可能得到的最大功率 P_{om} 及最大管耗 P_{T1m} 。



图题 8.5.2



图题 8.5.3

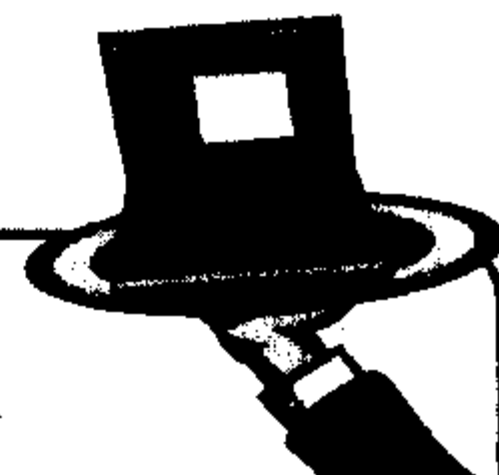
SP8.6.2 — OTL 电路如图题 8.4.1 所示，设 v_i 为正弦电压， $C = 1\,000\ \mu\text{F}$ ， T_1 采用 2N3904， T_2 采用 2N3906， $R_L = 8\ \Omega$ ，试求最大不失真输出功率为 9 W 时，电源电压 V_{CC} 至少应为多大？

SP8.6.3 在图题 8.4.3 所示单电源互补对称电路中，已知 $V_{CC} = 35\ \text{V}$ ， $R_L = 35\ \Omega$ ， $R_2 = 0$ ， $R_1 = R_3 = 1\ \text{k}\Omega$ ， $C_1 = 10\ \mu\text{F}$ ， $C_2 = 1\,000\ \mu\text{F}$ ， D_1 、 D_2 采用 1N4148， T_1 、 T_2 分别为 2N2222 和 2N2907A，流过负载电阻的电流 $i_L = 0.4\cos\omega t(\text{A})$ 。求：(1) 负载上所能得到的最大功率 P_o ；(2) 电源供给的功率 P_v 。

9

信号处理与信号产生电路

引 言



本章主要讨论信号的处理(滤波)和信号的产生(振荡),它主要涉及四种电路。这些电路和它们的用途如下:

1. 有源滤波器。滤波器的主要功能是传送输入信号中有用的频率成分,衰减或抑制无用的频率成分。本章主要讨论由 R 、 C 和运放组成的有源滤波电路。

2. 正弦波振荡电路。例如,在通信、广播、电视系统中,都需要射频(高频)发射,这里的射频波就是载波,把音频(低频)、视频信号或脉冲信号运载出去,这就需要能产生高频信号的振荡器。

又如在工业、农业、生物医学等领域内,如高频感应加热、熔炼、淬火,超声波焊接,超声诊断,核磁共振成像等,都需要功率或大或小、频率或高或低的振荡器。可见,正弦波振荡电路在各个科学技术领域的应用是十分广泛的。

3. 非正弦波产生电路。一些电子系统,例如数字系统需要的特殊信号,如方波、三角波等,就可通过非正弦波产生电路来产生,并且获得了日益广泛的应用。

4. 本章在讨论正弦波振荡电路之后、非正弦波信号产生电路之前,还要研究一种重要单元电路——电压比较器,它不仅是波形产生电路中常用的基本单元,也广泛用于测控系统和电子仪器中。希望读者予以足够的重视。

以上这些电路都可以用集成运放构成。