

电路分析与电子技术基础

功率放大电路

(3.1)

n 功率放大电路

ü 功率放大电路：以输出信号功率为主要目的的放大级。

ü 输出幅度较大，功率放大电路必须工作在大信号条件；
如何尽量减小输出信号的失真是首先要考虑的问题。

ü 输出信号功率的能量来源于直流电源，应该考虑转换的效率。

ü 半导体器件在大信号条件下运用时，电路中应考虑器件的过热、过流、过压、散热等问题，并要有适当的保护措施。

Ø 功率放大电路

ü 从功率变换的角度讨论放大电路如何有效地将直流供电电源的能量转换为负载所需要的信号功率。

ü 低频功率放大电路。

✓ 功率放大电路的分类（3.1.1 ~ 3.1.3）

✓ 功率放大电路的基本计算（3.1.4）

✓ 集成功率放大器（3.1.5）

✓ 功率放大电路的分类

ü 按静态工作点的不同设置划分：

甲类功率放大电路、乙类功率放大电路、甲乙类功率放大电路。

ü 甲类放大：导通角为 $\theta = 2\pi$ 。

（三组态电路、差分电路）

ü 乙类放大：导通角为 $\theta = \pi$ 。

（互补对称共集电路、交越失真）

ü 甲乙类放大：导通角介于 π 和 2π 之间。

（给管子设置微小的静态工作电流，使其在小的输入信号下也能进入放大区）

Ø 甲类单管功率放大电路

ü 右图所示共射极甲类功率放大电路。
(图解分析如右下图所示)

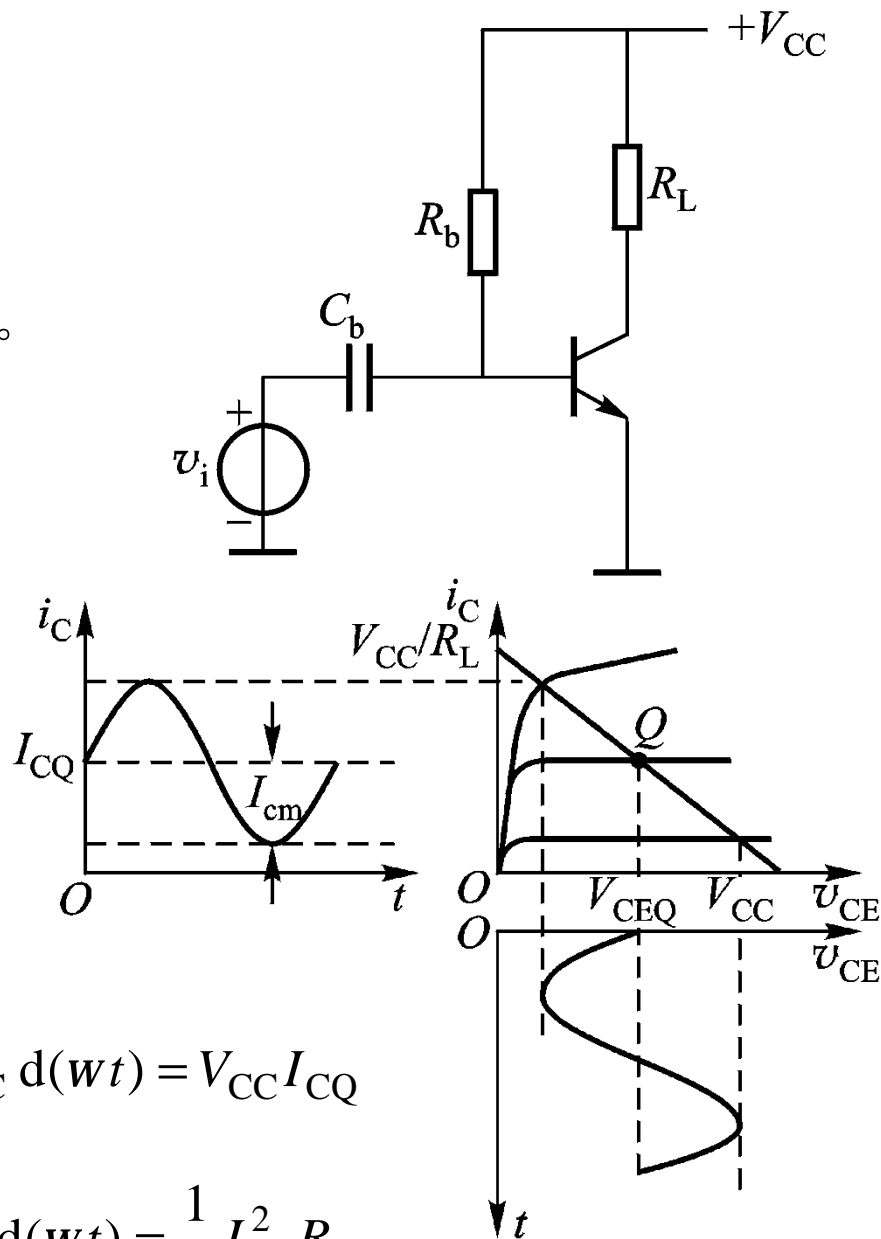
ü 静态工作点位于交流负载线中点。

$$V_{CEQ} \approx \frac{V_{CC}}{2}, \quad I_{CQ} \approx \frac{V_{CC}}{2R_L}$$

$$\begin{cases} v_{CE} = V_{CEQ} - V_{cem} \sin \omega t \\ i_C = I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t \end{cases}$$

电源提供的功率: $P_E = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} \cdot i_C d(\omega t) = V_{CC} I_{CQ}$

负载上获得的功率: $P_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o i_o d(\omega t) = \frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L$



Ø 甲类单管功率放大电路

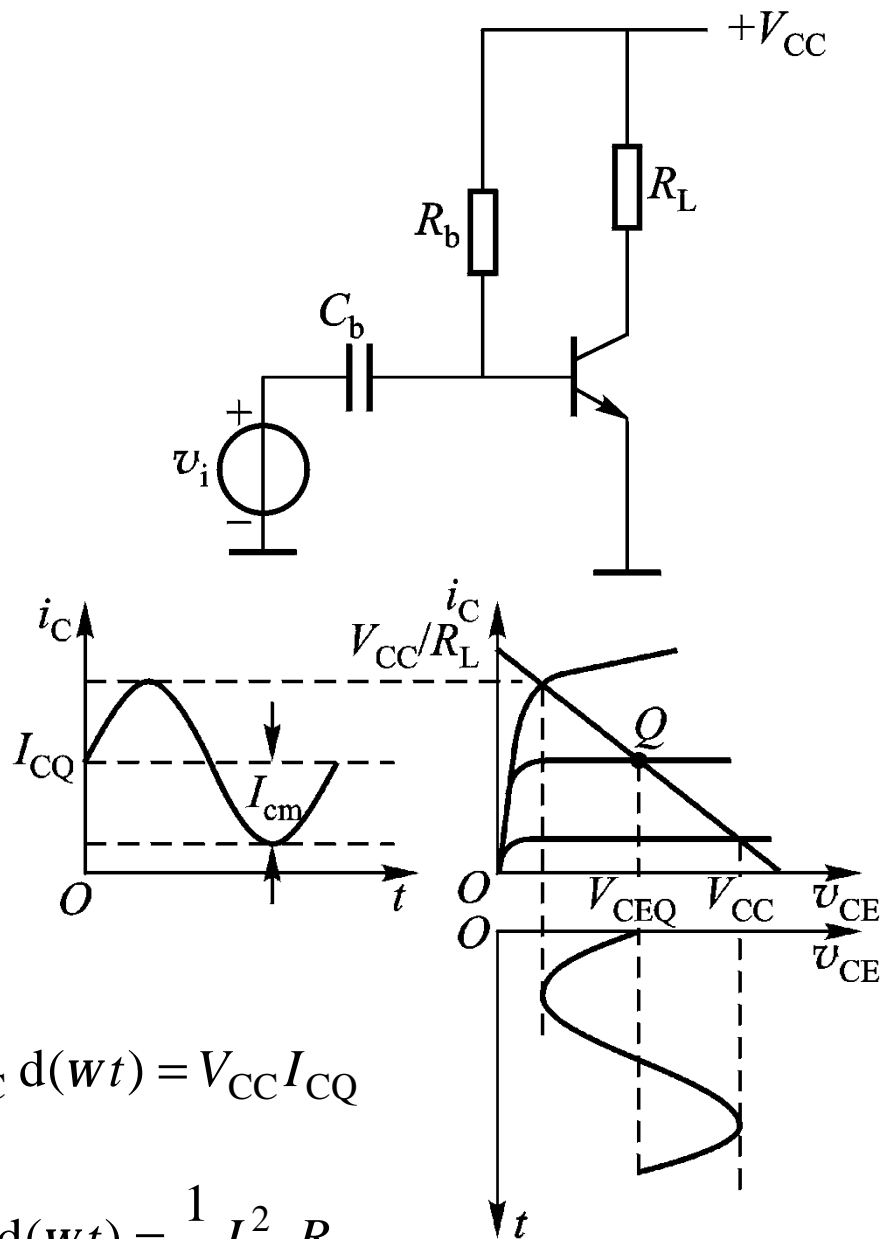
ü 由图: $V_{cem} \approx \frac{V_{CC}}{2}$, $I_{cm} \approx \frac{V_{CC}}{2R_L}$

ü 所以, 该类电路的理想效率为:

$$h = 25\%$$

(效率很低)

ü 原因? 改进?



电源提供的功率: $P_E = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} \cdot i_C d(\omega t) = V_{CC} I_{CQ}$

负载上获得的功率: $P_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o i_o d(\omega t) = \frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L$

Ø 乙类双管功率放大电路（变压器耦合推挽式）

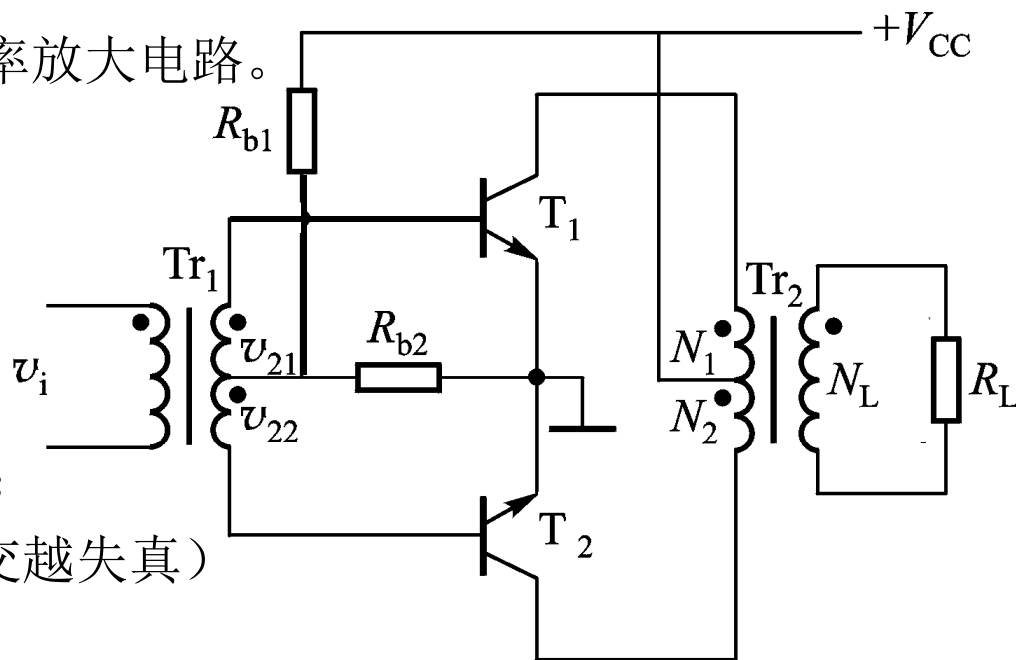
Ü 右图所示变压器耦合推挽功率放大电路。

Ü T_{r1} ：输入变压器；

T_{r2} ：输出变压器；

T_1 、 T_2 ：同极型对称推挽管；

R_{b1} 、 R_{b2} ：偏置电阻（克服交越失真）



Ü 突出优点：

通过改变变压器的变比，能找到一个最佳的等效负载；

（此时输出功率最大，且不失真）

在不提高电源电压的条件下，可使输出电压幅度超过电源电压。

Ø 乙类双管功率放大电路（变压器耦合推挽式）

Ü 右图所示变压器耦合推挽功率放大电路。

Ü v_i 正半周时：

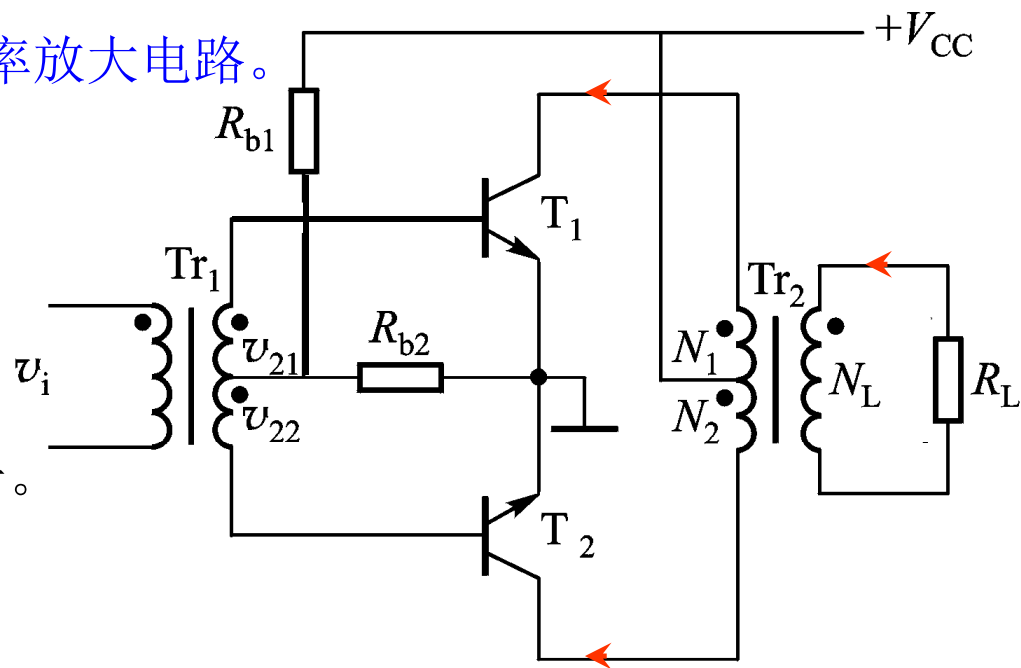
T_1 导通、 T_2 截止；

负载 R_L 获得正半周输出信号。

Ü v_i 负半周时：

T_1 截止、 T_2 导通；

负载 R_L 获得负半周输出信号。



乙类双管功率放大电路（互补对称式 OTL）

右图所示单电源供电的互补对称功率放大电路。

（OTL: Output Transformerless）

$v_i = 0$ （静态）时：

T_1 、 T_2 管截止；

$$v'_O = \frac{V_{CC}}{2}, \text{ (电容) } V_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2}, V_{OQ} = 0$$

v_i 正半周时：

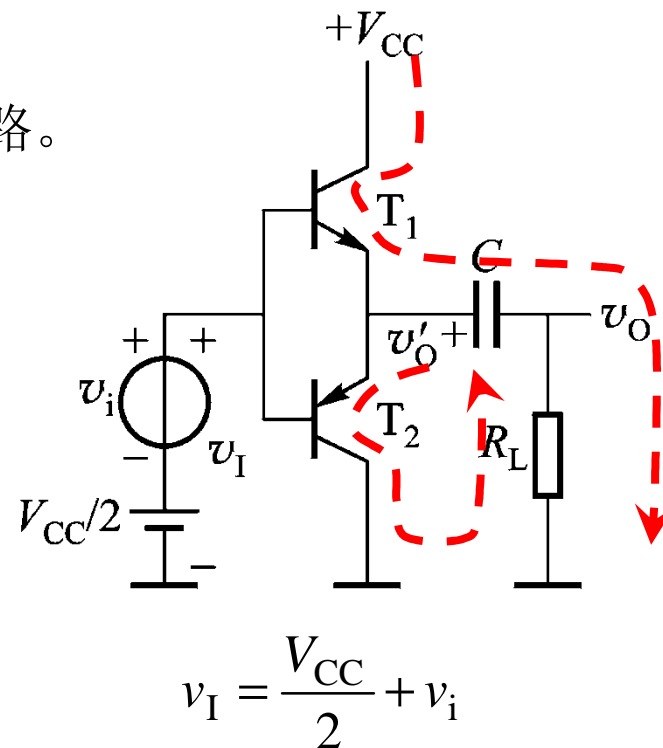
T_1 导通、 T_2 截止；

$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow C \rightarrow R_L \rightarrow \text{GND}$ （电容充电）。

v_i 负半周时：

T_1 截止、 T_2 导通；

$C \rightarrow T_2 \rightarrow \text{GND} \rightarrow R_L$ （电容作为电源，放电）



Ø 乙类双管功率放大电路（互补对称式 OCL）

ü 右图所示双电源供电的互补对称功率放大电路。

（OCL: Output Capacitorless）

ü $v_i = 0$ （静态）时：

T_1 、 T_2 管截止；

$$V_{OQ} = 0$$

ü v_i 正半周时：

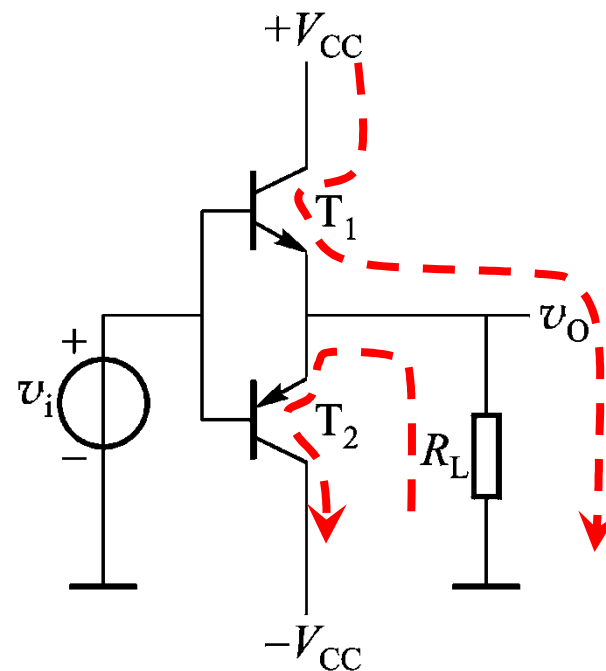
T_1 导通、 T_2 截止；

$$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{GND}$$

ü v_i 负半周时：

T_1 截止、 T_2 导通；

$$\text{GND} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$$



✓ 功率放大电路的基本计算

ü 功率放大电路的主要技术指标：

输出功率 P_o （最大输出功率 P_{om} ）；

输出效率 η （最大效率 η_m ）；

管耗 P_T 。

ü 功率的基本计算公式：
$$P_x = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_x i_x d(\omega t)$$

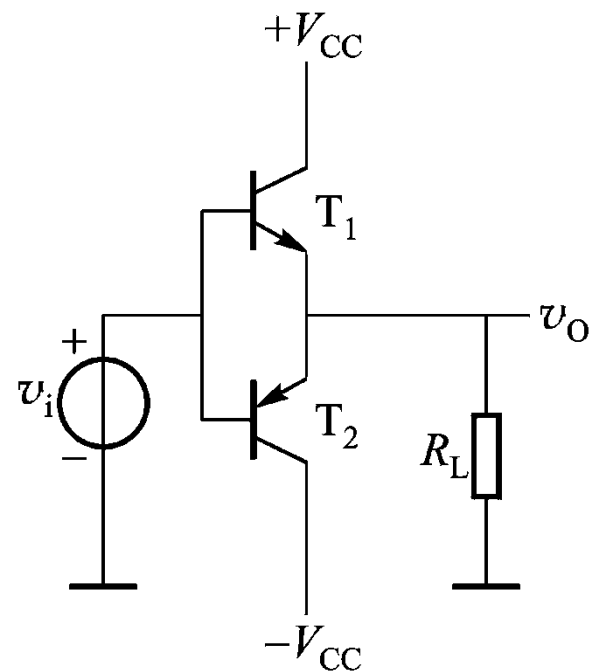
Ø 输出功率 P_o

ü 输出功率 P_o : 负载上所获得的功率。

ü 定义输入: $v_i = V_{im} \sin \omega t$

则输出为: $v_o = V_{om} \sin \omega t$, $i_o = \frac{V_{om}}{R_L} \sin \omega t$

输出功率: $P_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o i_o d(\omega t) = \frac{V_{om}^2}{2R_L}$



Ø 输出效率 η

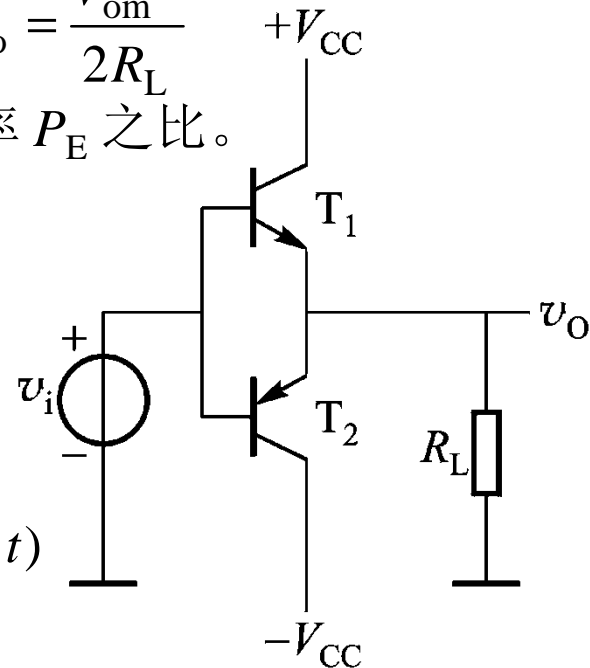
$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L}$$

ü 输出效率 η : 输出功率 P_o 与电源提供的平均功率 P_E 之比。

ü 电源提供的平均功率:

$$\begin{aligned} P_E &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{CC} i_o d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} -V_{CC} i_o d(\omega t) \\ &= 2 \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{CC} i_o d(\omega t) \right] = \frac{V_{CC}}{\pi} \int_0^\pi \frac{V_{om} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) \\ &= \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} \end{aligned}$$

$$\text{输出效率: } \eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\pi}{4} \frac{V_{om}}{V_{CC}}$$



Ø 最大输出功率 P_{om} 、最大效率 η_m

ü 右下图所示互补对称功率放大电路的工作波形。

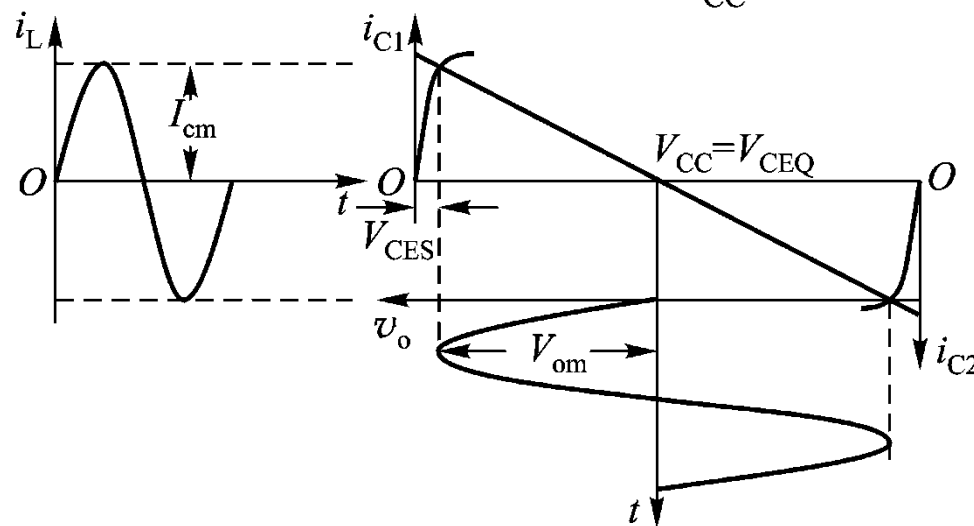
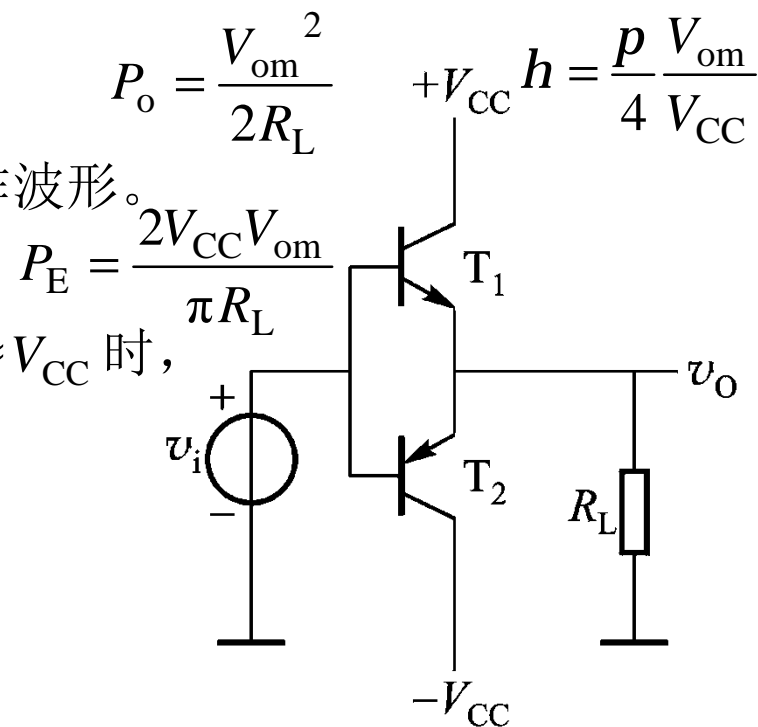
ü 当输出信号幅度达到理想的最大值 $V_{om} \approx V_{CC}$ 时，输出功率达到最大，此时输出效率也最大。

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}, \quad h_m = \frac{P_{om}}{P_E} = \frac{p}{4} \approx 78.5\%$$

ü 若考虑功放管的饱和压降，
则 $V_{om} = V_{CC} - V_{CES}$ ；

实际效率将小于78.5%。

（一般为60~70%）



Ø 管耗 P_T

ü 管耗 P_T ： T_1 、 T_2 两管的消耗功率。
(广义：除输出功率外的所有功率)

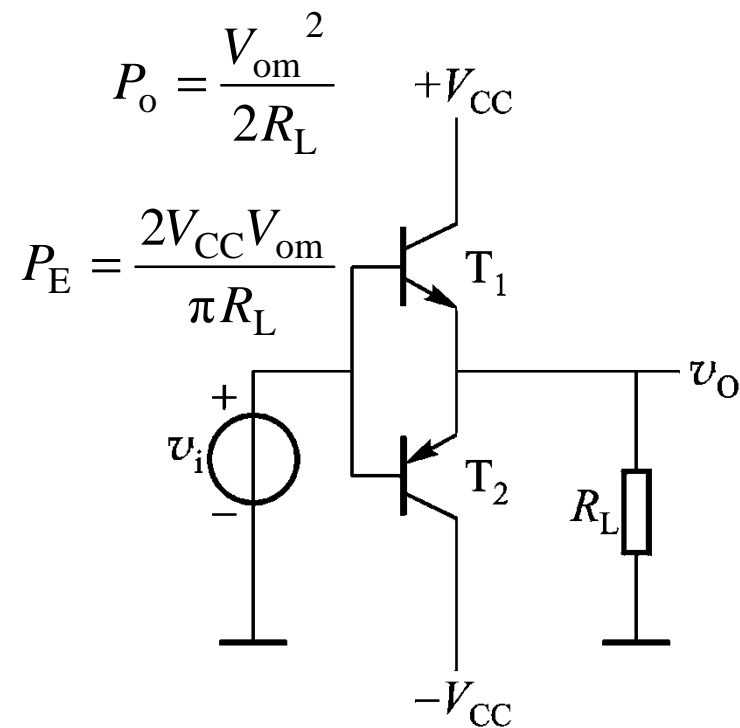
$$P_T = P_E - P_o = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} - \frac{V_{om}^2}{2R_L}$$

ü 最大管耗 P_{TM} (对上式求导)：

$$\text{当 } V_{om} = \frac{2V_{CC}}{\pi} \approx 0.64 V_{CC} \text{ 时}$$

$$P_{TM} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = \frac{4}{\pi^2} P_{om} \approx 0.4 P_{om}$$

$$\text{每个功放管的最大功耗为: } P_{T1M} = P_{T2M} = \frac{1}{2} P_{TM} \approx 0.2 P_{om}$$



【例1.1-1】

右图所示 OCL 电路。

已知： $V_{CC} = 15V$ ，输出电压幅度 $V_{om} = 10V$ ， $R_L = 8\Omega$ 。

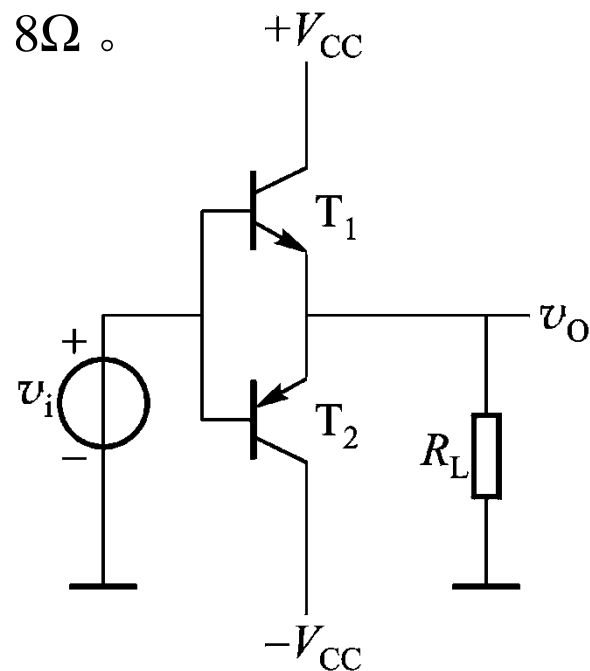
求：输出功率、效率和管耗。

解：输出功率： $P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = 6.25 \text{ W}$

$$P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = 11.94 \text{ W}$$

$$\text{效率： } h = \frac{P_o}{P_E} = \frac{6.25}{11.94} = 52.3 \%$$

$$\text{管耗： } P_{T_1} = P_{T_2} = \frac{1}{2}(P_E - P_o) = 2.85 \text{ W}$$



【例1.1-2】

右图所示 **OTL** 电路。

已知： $V_{CC} = 30\text{V}$ ，输出电压幅度 $V_{om} = 10\text{V}$ ， $R_L = 8\Omega$ 。

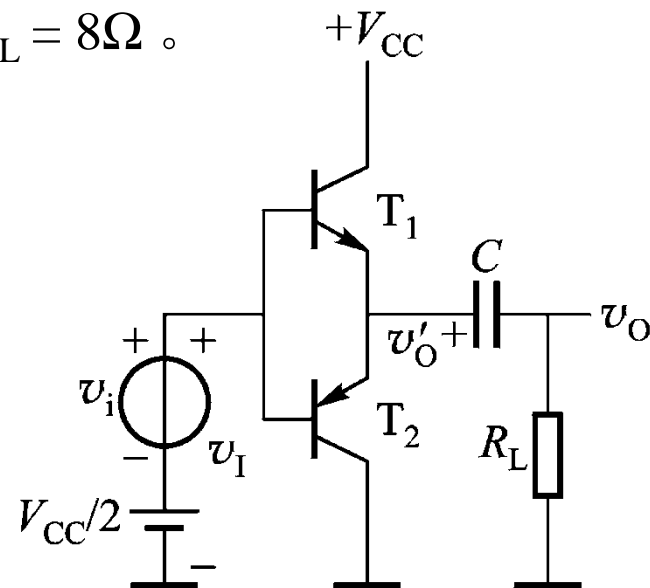
求：输出功率、效率和管耗。

解：输出功率：
$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = 6.25 \text{ W}$$

$$P_E = \frac{V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = 11.94 \text{ W}$$

$$\text{效率： } h = \frac{P_o}{P_E} = \frac{6.25}{11.94} = 52.3 \%$$

$$\text{管耗： } P_{T_1} = P_{T_2} = \frac{1}{2}(P_E - P_o) = 2.85 \text{ W}$$



【例1.2】

右下图所示 OTL 电路。

已知： T_1 、 T_2 特性完全对称， v_i 为正弦， $V_{CC} = 10V$ ， $R_L = 16\Omega$ 。

求：（1）静态时，电容 C_2 两端的电压应该是多少？

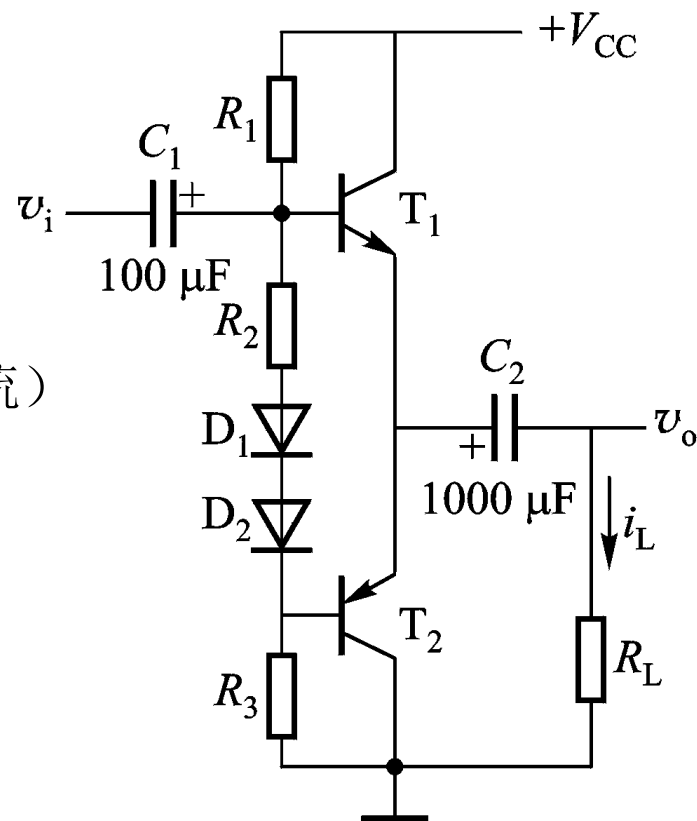
调整哪个电阻能满足这一要求？

（2）动态时，若输出电压波形出现交越失真，应如何调整？

解：（1）电压为 5V，调整 R_1 、 R_3 。

（2）应增加 R_2 。

（三极管基极间电压增大，有较大的静态电流）



右下图所示 OTL 电路。

已知： T_1 、 T_2 特性完全对称， v_i 为正弦， $V_{CC} = 10V$ ， $R_L = 16\Omega$ 。

(3) 若 $R_1 = R_3 = 1.2k\Omega$ ， $\beta = 50$ ， $|V_{BE}| = 0.7V$ ， $P_{cm} = 200mW$ ；

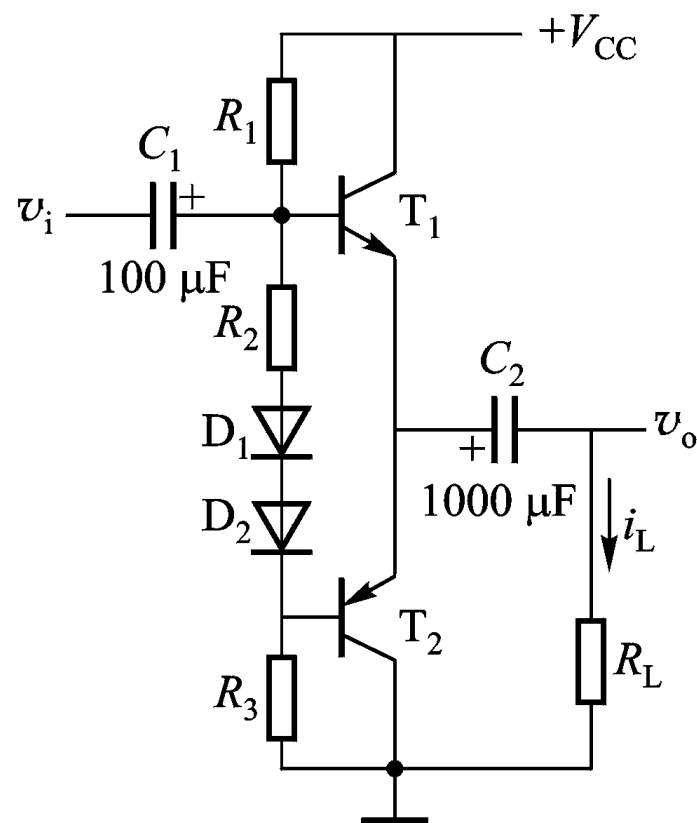
求： 当 D_1 、 D_2 、 R_2 中任一开路时， 将会出现什么情况？

解： (3) 当 D_1 、 D_2 、 R_2 中任一开路时：

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{C2Q}}{R_1} = 179 \text{ mA}$$

$$P_C = V_{CE} \cdot I_{C1} = 895 \text{ mW} > P_{cm}$$

所以， 功率管将会损坏。



Ø 功率管的选取

ü 功放管的功耗: $P_{\text{CM}} > 0.2P_{\text{omax}}$

ü 功放管的耐压: $V_{(\text{BR})\text{CEO}} > 2V_{\text{CC}}$

ü 功放管允许的最大集电极电流: $I_{\text{CM}} > V_{\text{CC}}/R_{\text{L}}$

Ø 功率管的应用

Û 功率管应该严格配对：

大工作电流时的 β 一致；在大电流下饱和压降小，且一致。

Û 功率管的散热问题：

大功率场合下，必须给功率管装散热板，或进行风冷和水冷。

Û 功率管在大电流、高电压下工作，应对其采取过压和过流保护措施。

Û 当电源质量不高或内阻较大时，电源内阻上的压降可能会引起功放电路的低频自激；

消除低频自激方法是在前置放大电路的供电回路中加去耦滤波电容。

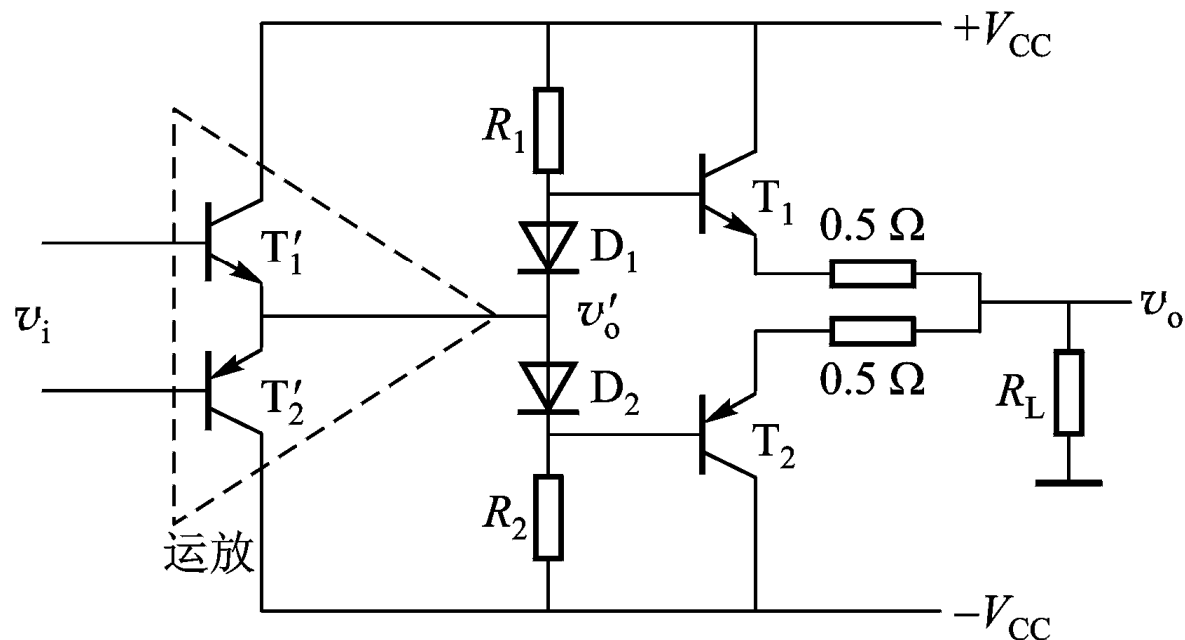
✓ 集成功率放大器

ü 集成运放的输出级采用互补对称式输出。

ü 受散热、电流容量、耐压等因素制约，输出电流一般为几十毫安，电压极值一般为电源电压的 85% 左右。

ü 需要考虑集成运放的扩流、扩压。

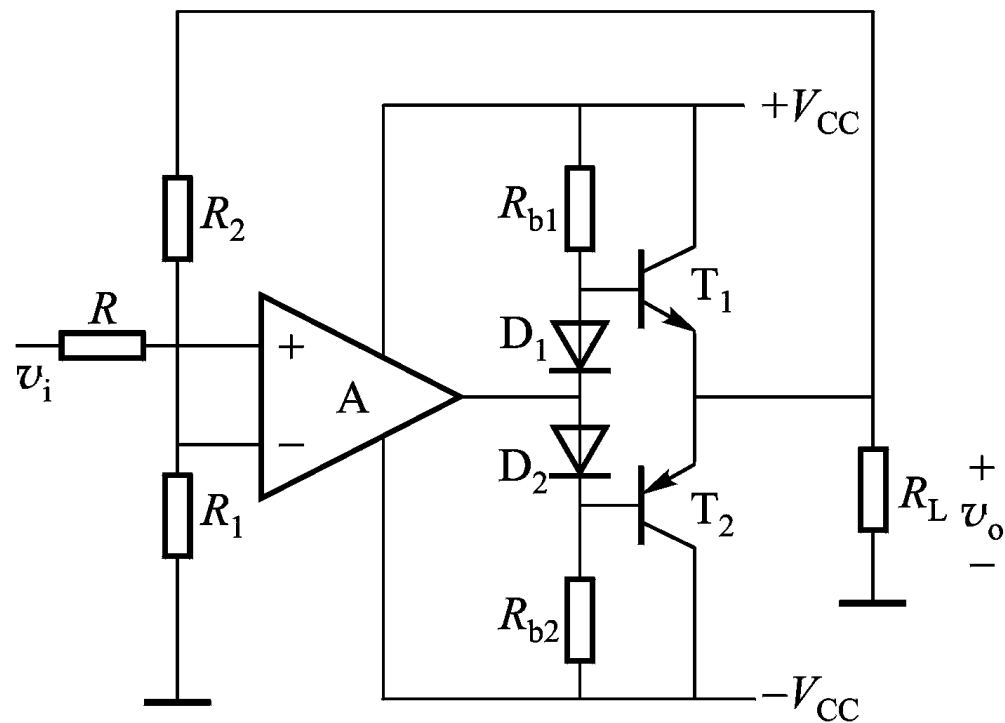
Ø 集成运放的扩流



Ü 在集成运放的输出端再加一级互补对称功放。

Ü 利用 T_1 、 T_2 管的电流放大作用，达到扩大输出电流的目的。

Ø 集成运放的扩流（实用电路）



ü 功率放大电路（电压放大级 + 功率放大级）。

ü 电压串联负反馈，闭环增益： $A_{vf} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Ø 集成运放的扩压

ü 静态 ($v_i = 0$) :

$$v_o = 0$$

$$v_{B1} = +15\text{V} \quad , \quad v_{B2} = -15\text{V}$$

$$V_+ = +14.3\text{V} \quad , \quad V_- = -14.3\text{V}$$

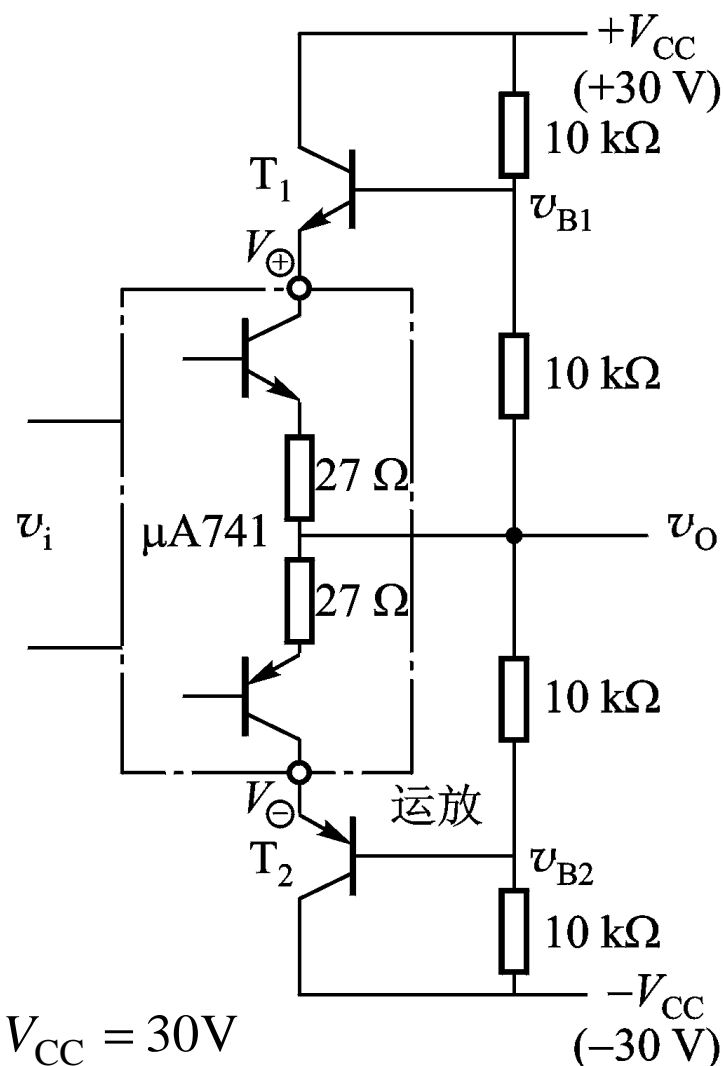
ü 动态 ($v_i \neq 0$) :

$$v_{B1} = \frac{1}{2}(V_{CC} - v_o) + v_o = \frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}$$

$$v_{B2} = \frac{1}{2}(-V_{CC} - v_o) + v_o = -\frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}$$

$$V_+ - V_- = (v_{B1} - v_{BE1}) - (v_{B2} - v_{BE2})$$

$$\approx \left(\frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}\right) - \left(-\frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}\right) = V_{CC} = 30\text{V}$$



经扩压后的输出电压可达 $\pm 24\text{V}$ 以上

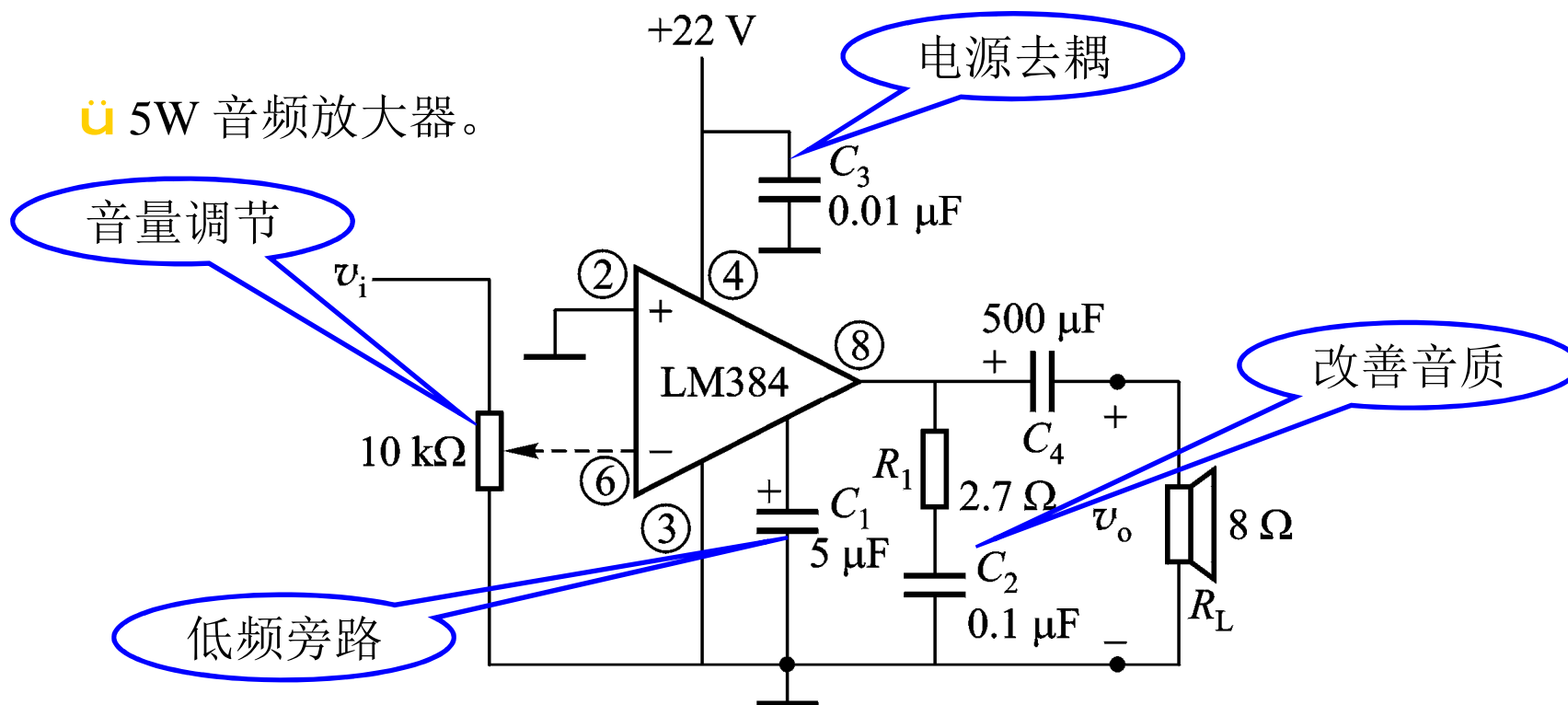
Ø 集成功率放大器

ü 通用型集成运放的输出功率一般很小。

($\mu\text{A}741$, 100 mW 左右)

ü 在需要较大功率场合，可选用集成功率放大器。

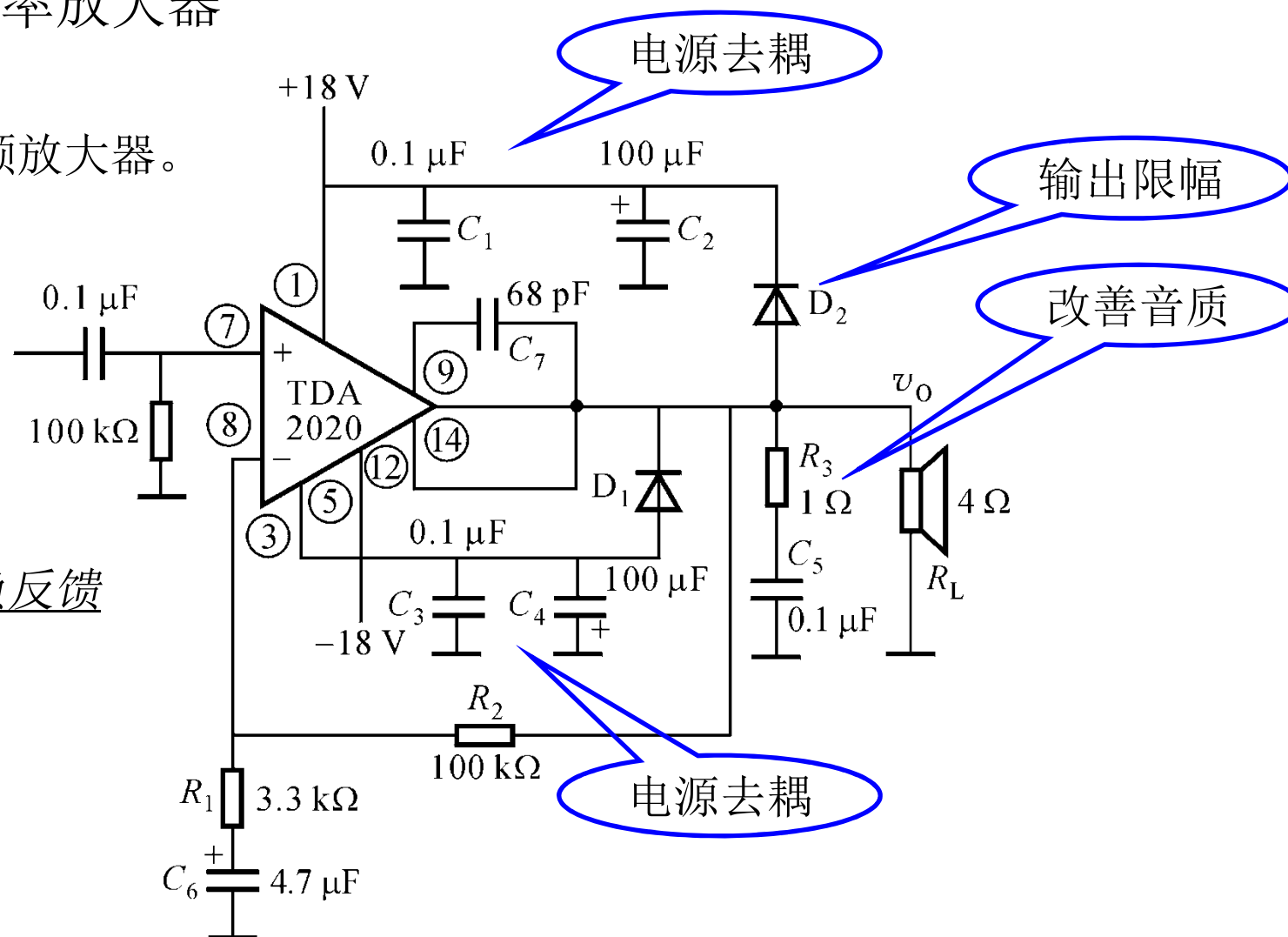
ü 5W 音频放大器。



Ø 集成功率放大器

ü 20W 音频放大器。

电压串联负反馈



✓ 本节作业

ü 习题 3 (P183)

5、6 (功率电路)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。