

第3章 功率变换电路

3.1 功率放大电路

- 1 功率放大电路的特点与基本类型
- 2 功率放大电路的基本计算
- 3 集成功率放大器

3.2 基本AC/DC变换电路

- 1 整流和滤波电路
- 2 稳压电路

➤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。

低频功率放大电路

➤如何将交流电网的能量转换为电子电路所要求的直流电能。

直流稳压电路

3.1.1 功率放大电路的特点和基本类型

功率放大电路：以输出信号功率为主要目的的放大级。

■ 一、主要特点

- 由于输出幅度较大，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。
- 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**。
- 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**。

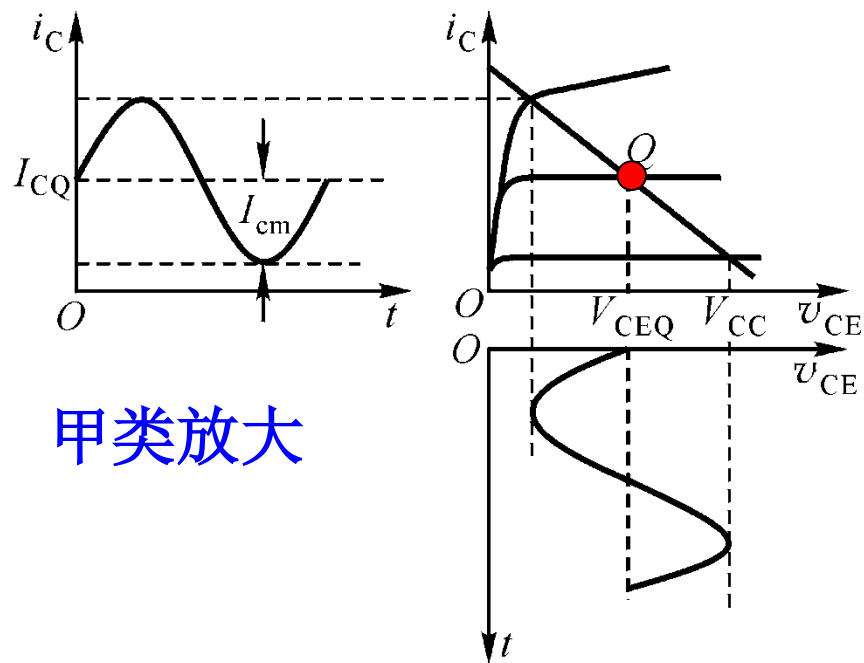
■ 二、基本类型

❖ 功率放大器的工作点设置

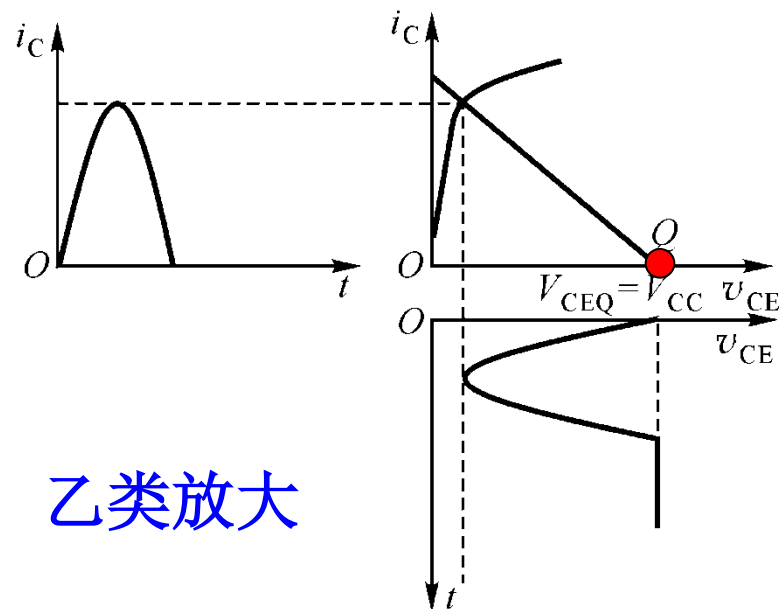
✓ 甲类 $\theta = 360^\circ$

✓ 乙类 $\theta = 180^\circ$

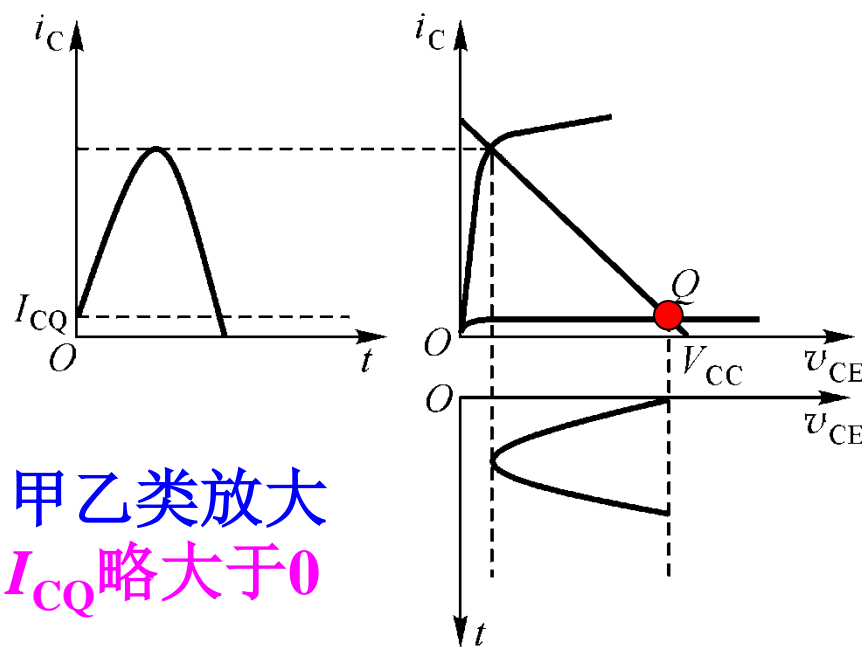
✓ 甲乙类 $\theta = 180^\circ \sim 360^\circ$



甲类放大

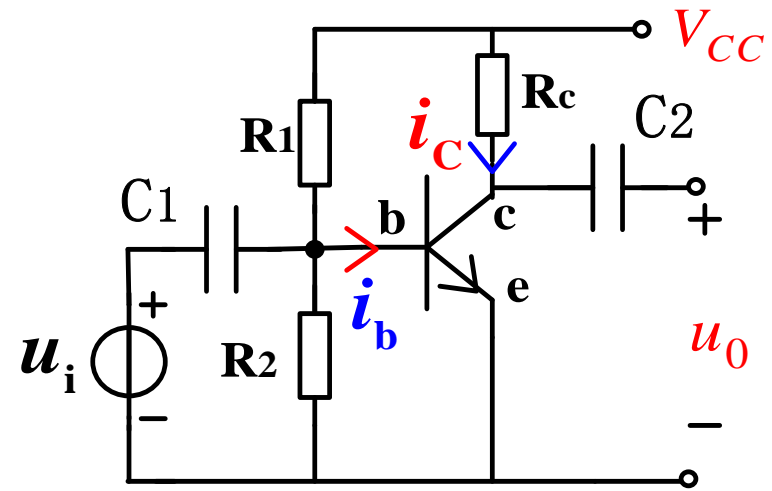
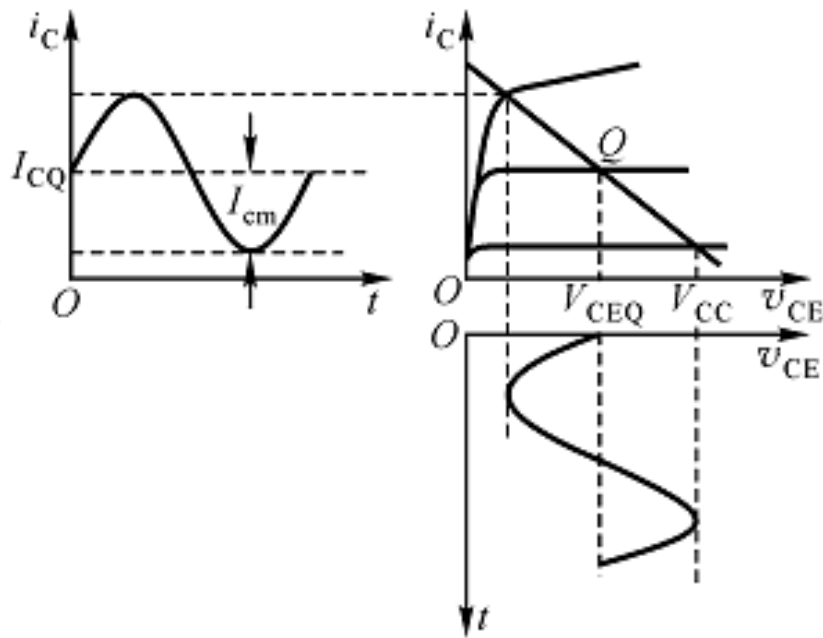


乙类放大



甲乙类放大
 I_{CQ} 略大于0

1) . 甲类工作方式：晶体管在信号的整个周期内均处于导通状态

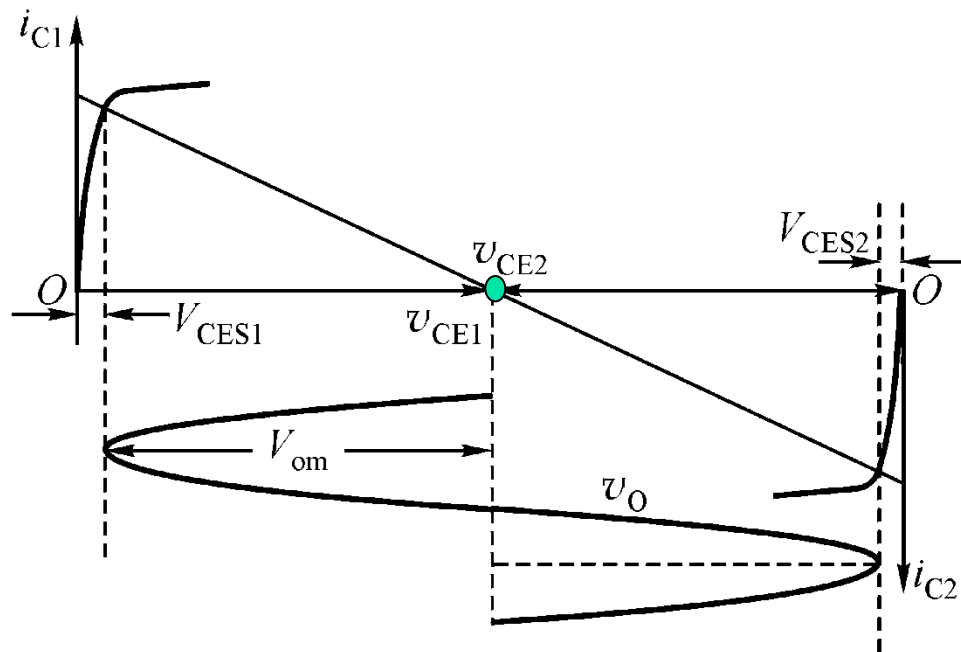
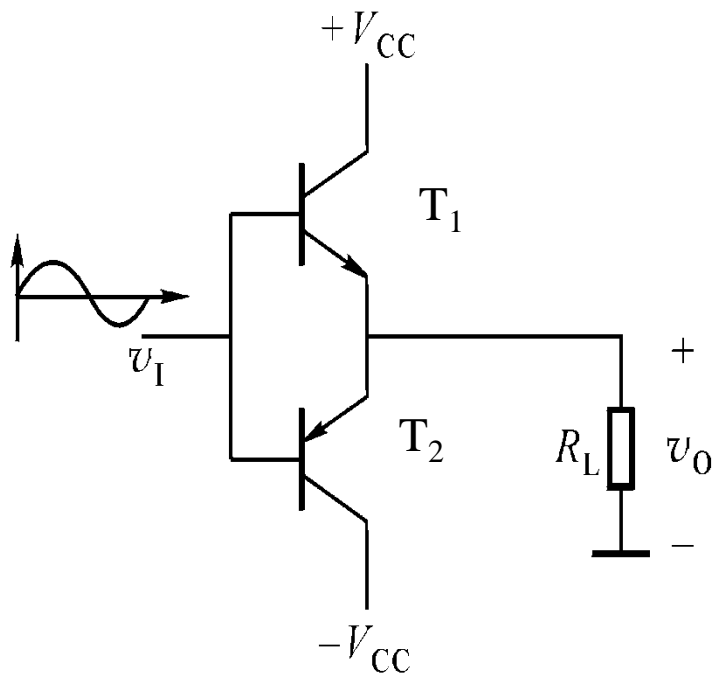


甲类功率放大

甲类功放导电角 $\theta=360^\circ$

2) . 乙类方式：晶体管仅在信号的半个周期处于导通状态

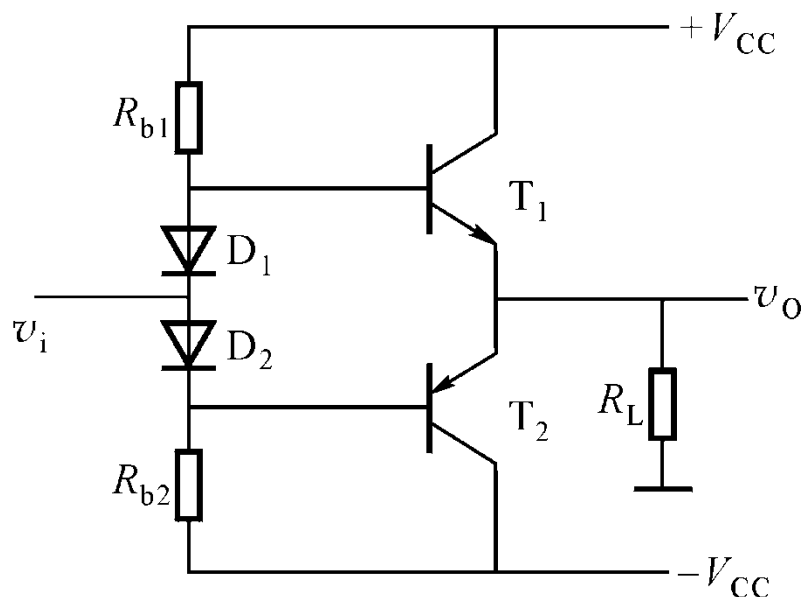
乙类功放导电角 $\theta=180^\circ$



每个晶体管仅在信号的半个周期处于工作状态

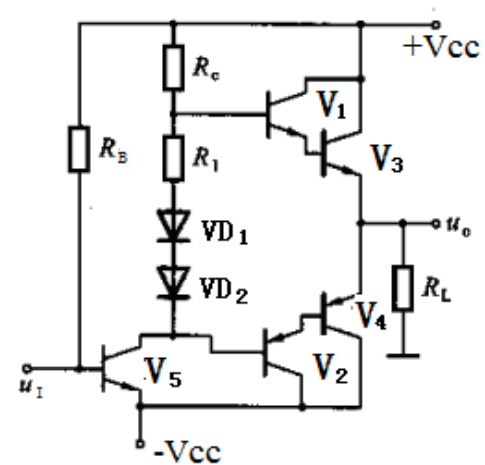
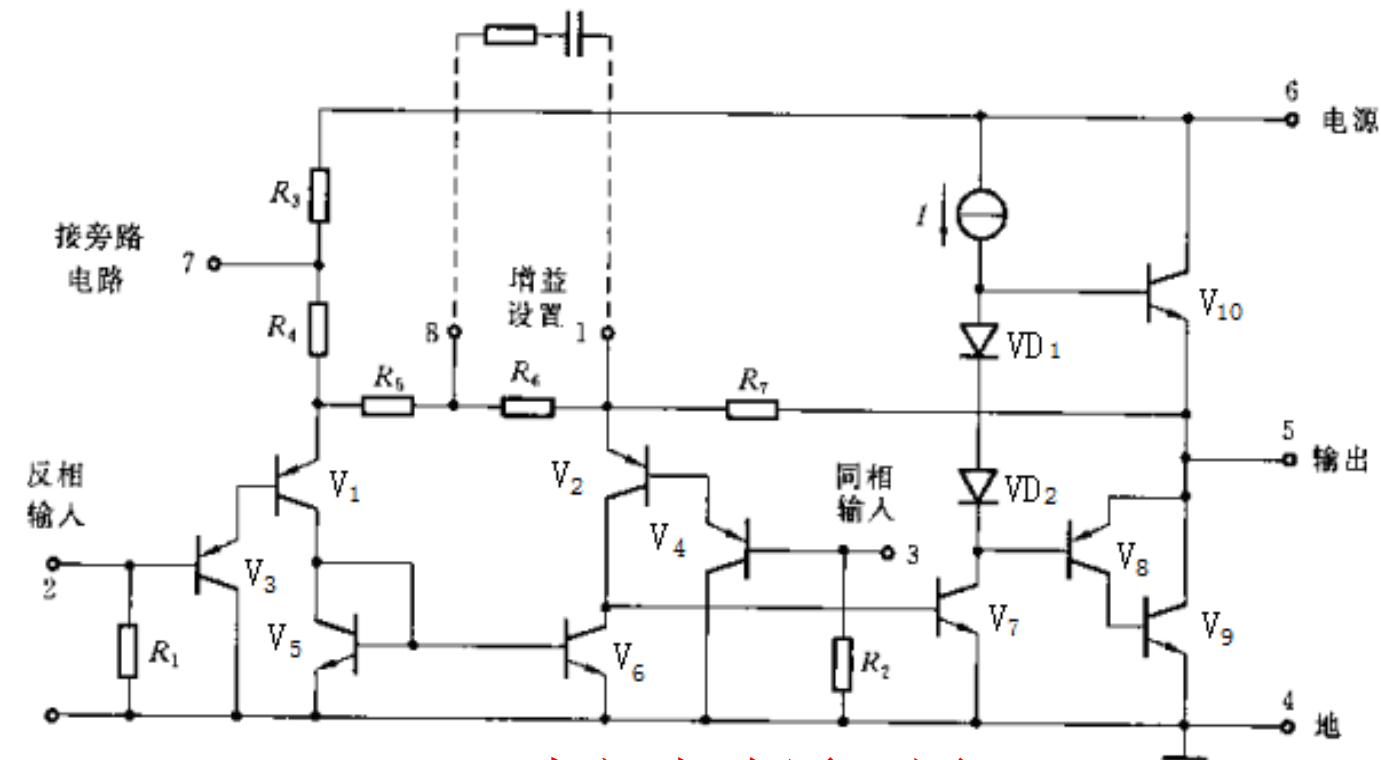
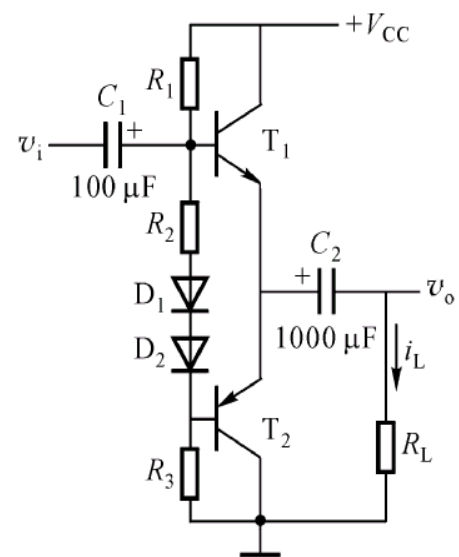
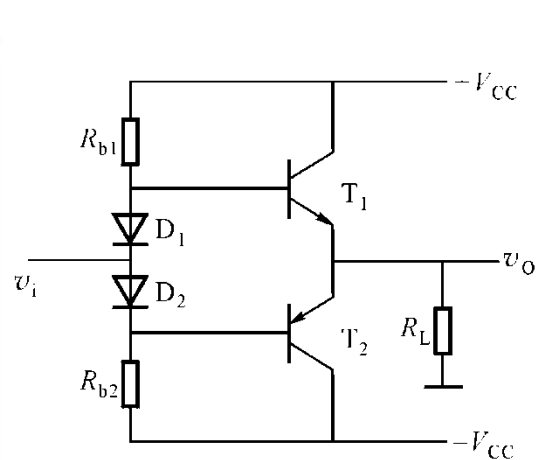
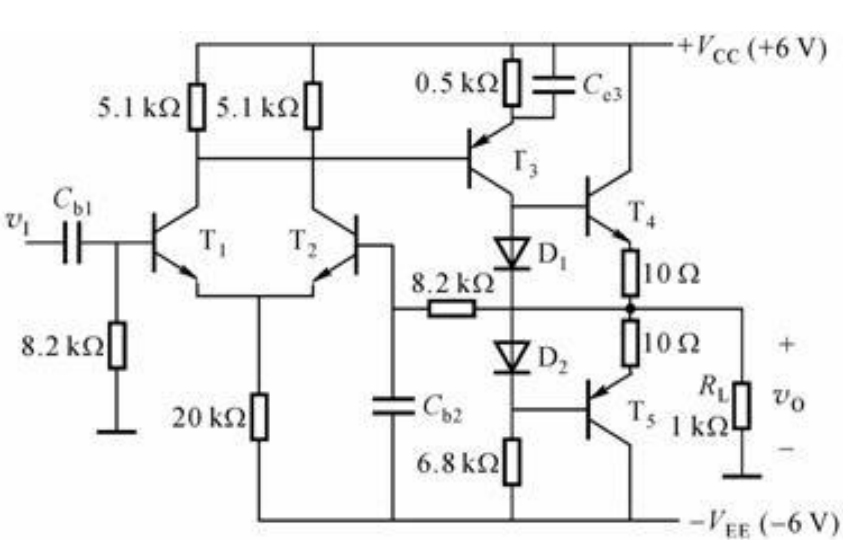
互补对称功率放大器由于在静态条件下 T_1 和 T_2 都处于截止状态，所以它的静态功耗为零，但在动态时存在严重的交越失真

3) . 甲乙类方式：晶体管在信号的多半个周期处于导通状态



为了克服交越失真，互补对称功率放大电路设置一定的静态工作点(使信号 $u_i=0$ 时， T_1 、 T_2 管都处于微导电状态)。甲乙类功放导电角 $\theta = 180^\circ \sim 360^\circ$ 。

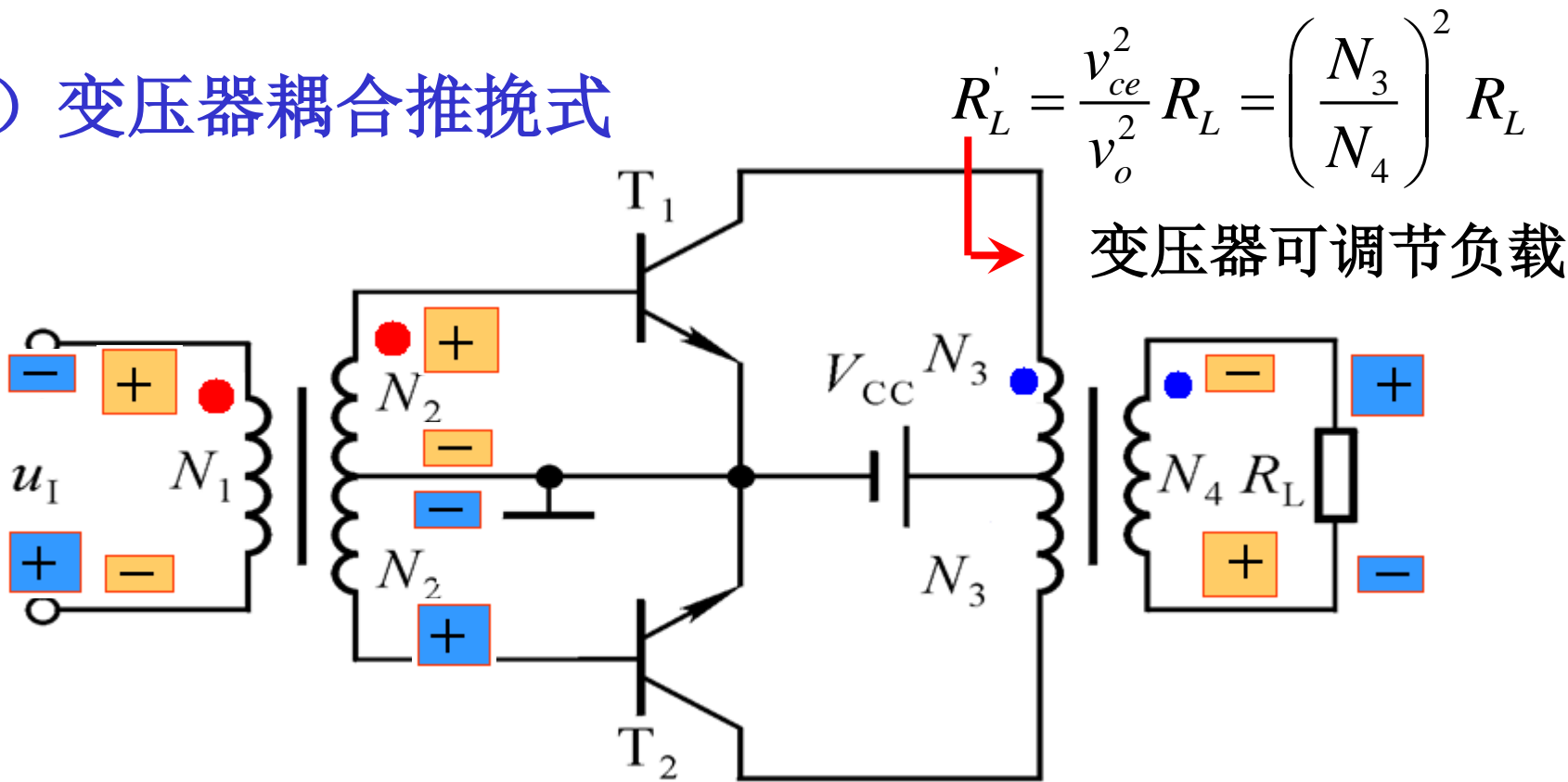
互补对称功率放大电路在 $v_i=0$ 附近两个管子一起导通。
 T_1 、 T_2 管有静态偏置电流。静态功耗不为零，但动态时无
交越失真



LM386内部电路原理图

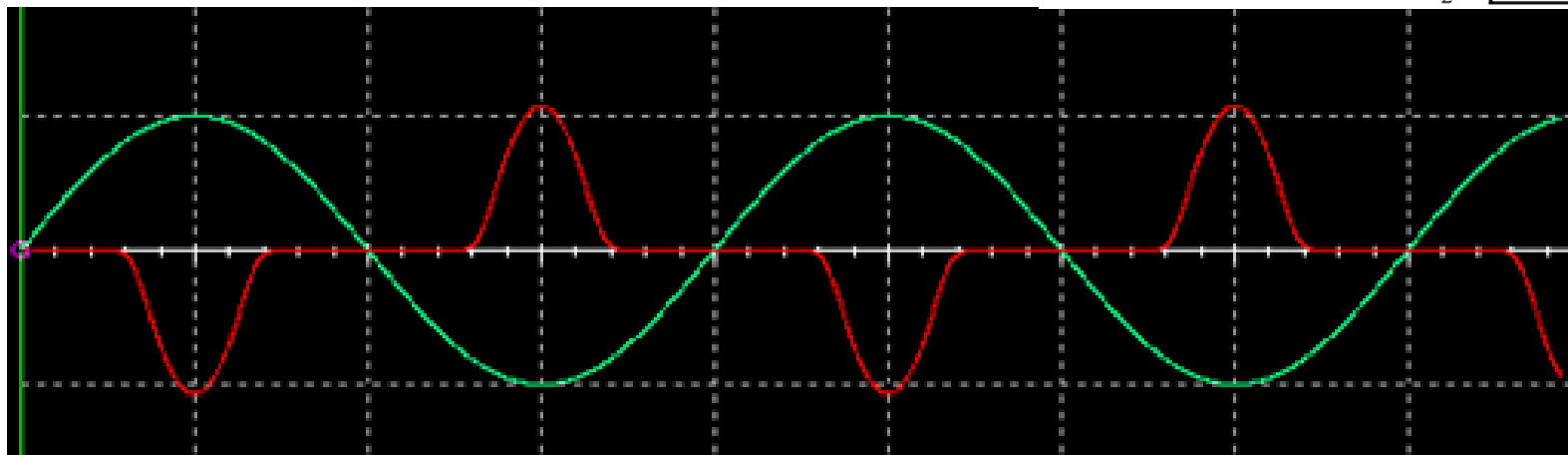
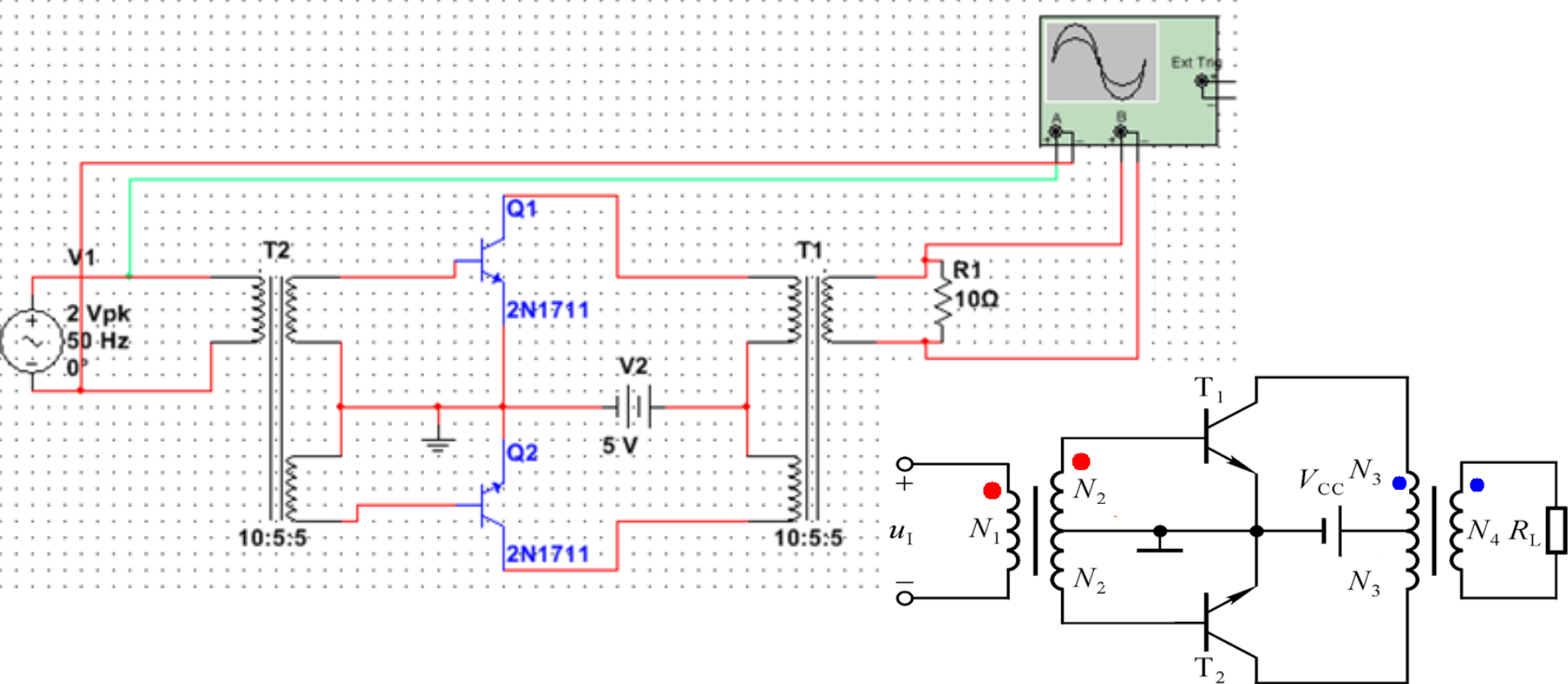
■三、乙类功率放大器形式与工作原理

a) 变压器耦合推挽式

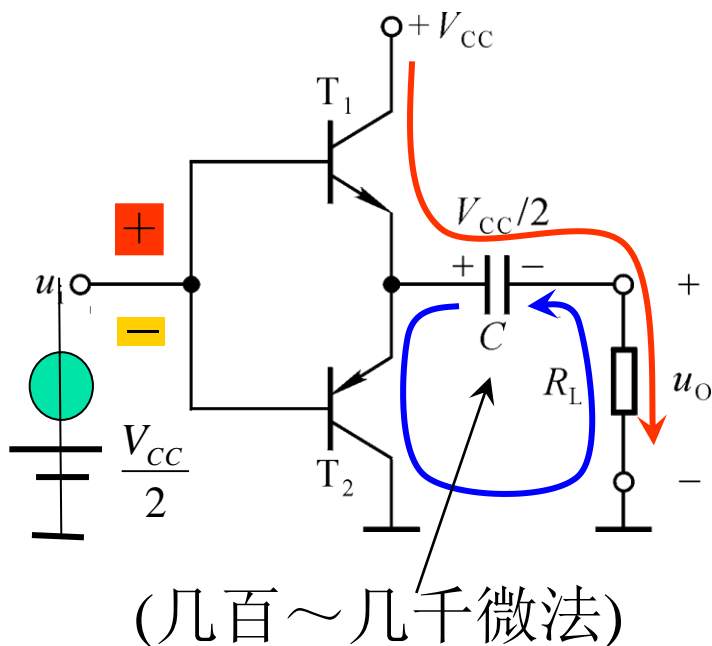


信号的正半周 T_1 导通、 T_2 截止；负半周 T_2 导通、 T_1 截止。

两只管子交替工作，称为“推挽”，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。



b). OTL 电路 (Output Transformerless) 单电源



输入电压的正半周:

$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow C \rightarrow R_L \rightarrow \text{地}$ C 充电。

输入电压的负半周:

C 的 “+” $\rightarrow T_2 \rightarrow \text{地} \rightarrow R_L \rightarrow C$
“ - ” C 放电。

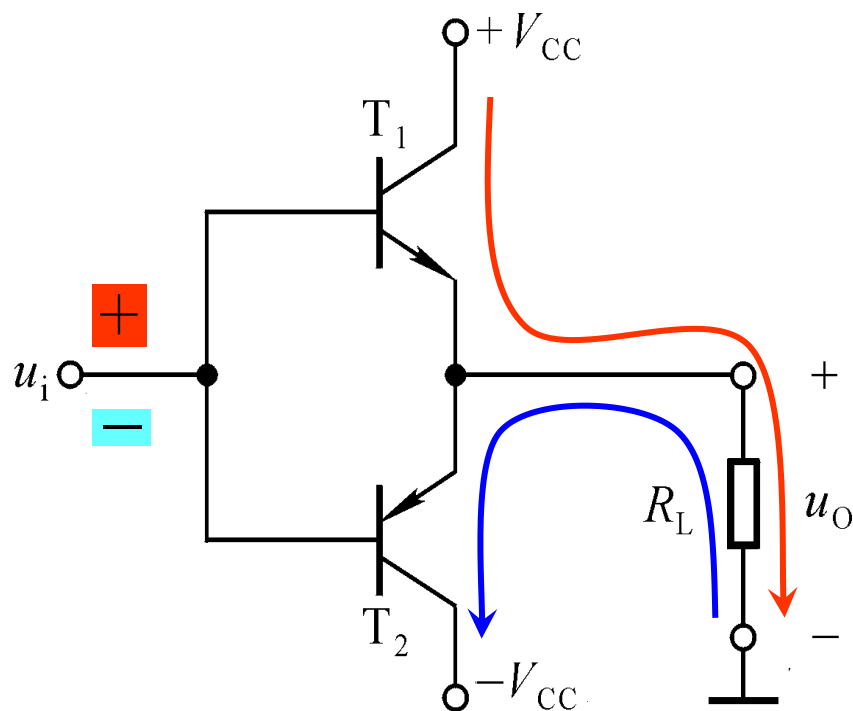
输出电压幅值

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

当静态时($u_i=0$), T_1 和 T_2 截止。它们的射极电压为 $V_{CC}/2$, 所以电容器 C 上充有 $V_{CC}/2$ 的电压, $V_{CQ} = V_{CC}/2$, $V_{OQ} = 0$ 。

C 足够大 (保持 $U_C = \frac{V_{CC}}{2}$ 不变), 才能认为其对交流信号相当于短路。OTL电路低频特性差。

c). OCL电路 (Output Capacitorless) 双电源



静态时, T_1 、 T_2 截止, $V_{OQ}=0$

输入电压的正半周:

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

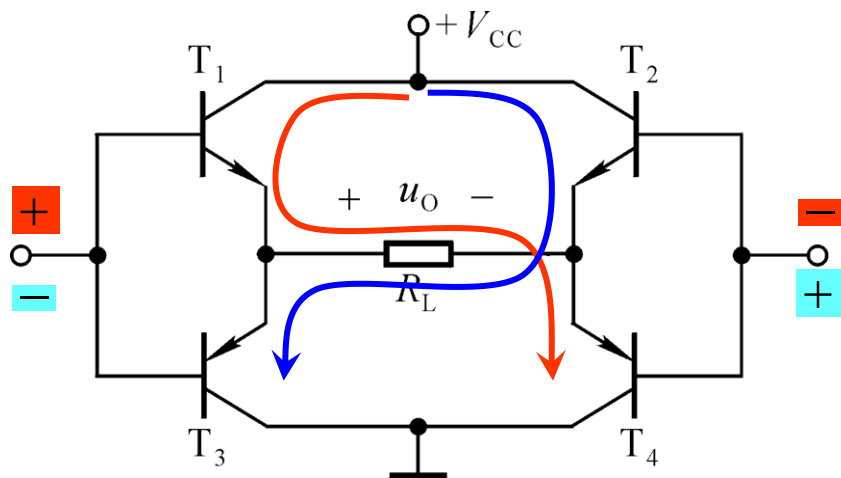
输入电压的负半周:

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

输出电压幅值 $U_{om} = V_{CC} - U_{CES}$

两只管子交替导通, 两路电源交替供电, 双向跟随。

d). BTL 电路 (H桥电路)



①是双端输入、双端输出形式，输入信号、负载电阻均无接地点。

②管子多，损耗大，使效率低。

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： $+V_{CC} \rightarrow T_2 \rightarrow R_L \rightarrow T_3 \rightarrow \text{地}$

输出电压幅值：

$$U_{om} = V_{CC} - 2U_{CES}$$

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。

3.1.4 功率放大电路的分析计算

■一、功率放大电路的主要技术指标

功率放大电路的主要技术指标：

电源输入功率

负载输出功率

放大电路效率



电路设计

功率管最大管压降

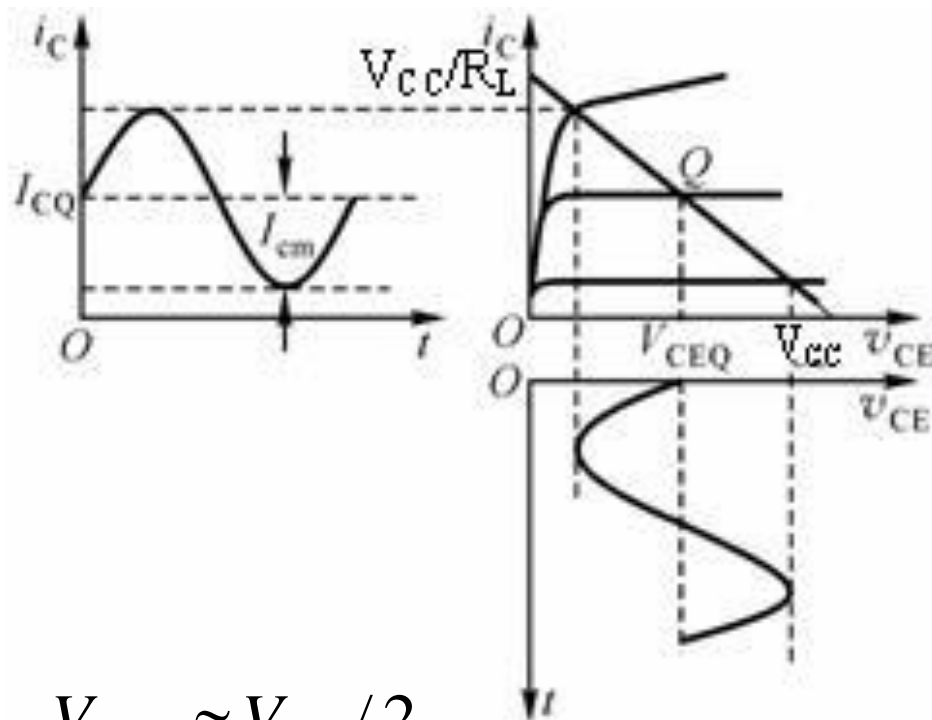
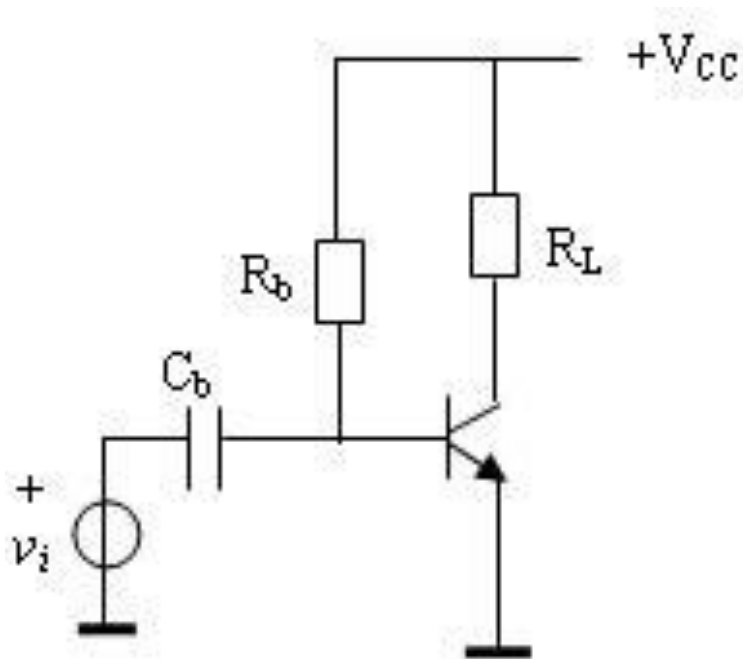
功率管最大电流

功率管最大功耗



器件选择

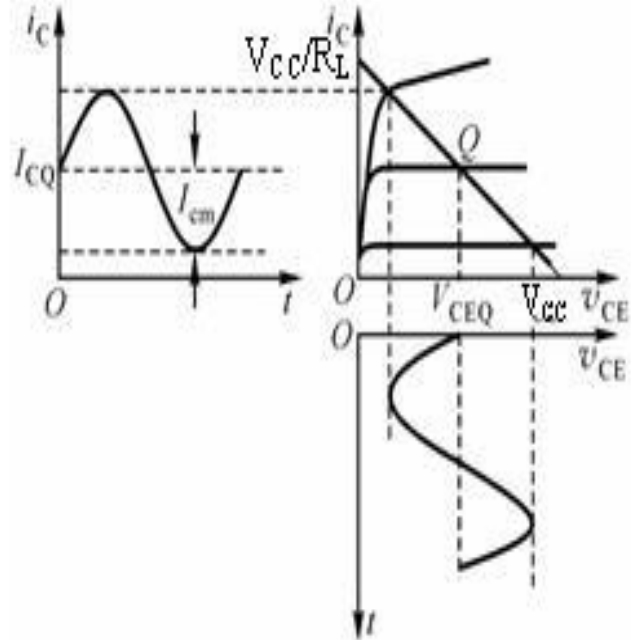
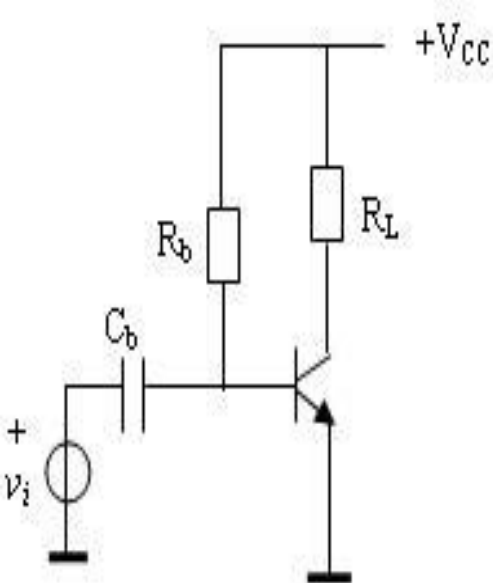
1. 甲类单管功放级效率分析



静态管压降 $V_{CEQ} \approx V_{CC} / 2$

静态电流 $I_{CQ} \approx V_{CC} / (2R_L)$

最大动态范围: $v_{om} = v_{cem} \approx V_{CC} / 2$



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

电源提供的直流功率: $P_E = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C dt = V_{CC} I_{CQ}$

负载上得到的输出信号功率为: $P_o = \frac{v_{om}^2}{2R_L} = \left(\frac{V_{CC}}{2} \right)^2 / (2R_L) = \frac{V_{CC}^2}{8R_L}$

功率输出级的效率为:

$$\eta = \frac{\text{输出信号功率 } P_o}{\text{电源提供的功率 } P_E} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{V_{CC} I_{CQ}} \quad \eta = \frac{V_{CC}^2 / (8R_L)}{V_{CC}^2 / (2R_L)} = 25\%$$

$I_{CQ} \approx V_{CC} / (2R_L)$

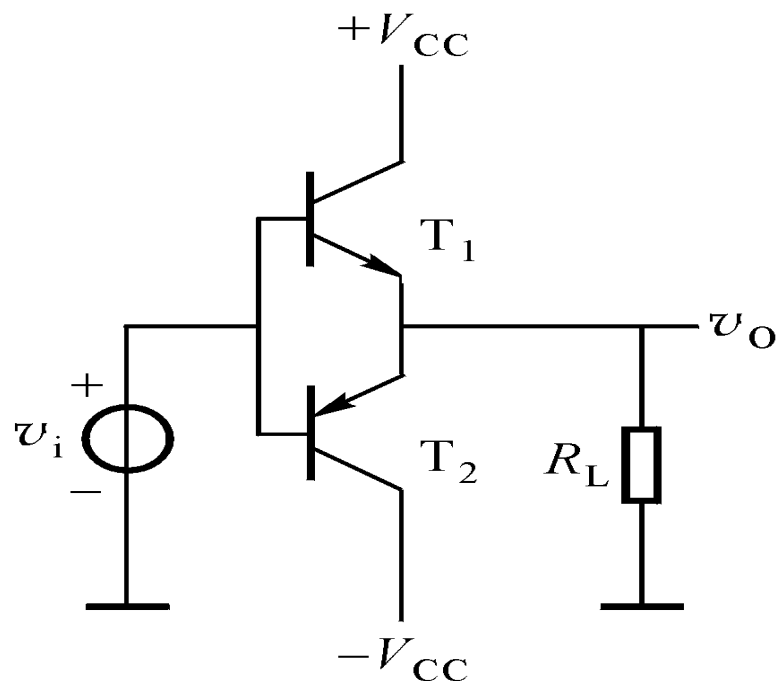
2. 双电源互补对称式功率放大电路分析

1) 输出功率 P_o

设输入: $v_i = V_{im} \sin \omega t$

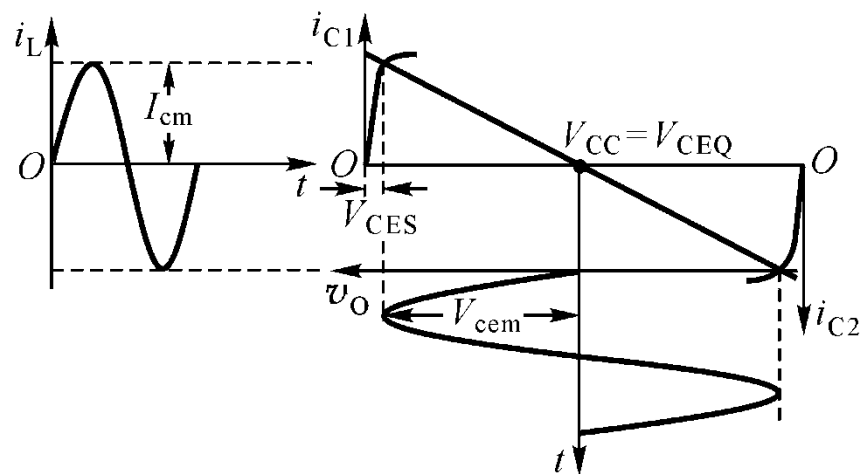
则输出: $v_o = V_{om} \sin \omega t$

$$i_o = (V_{om} / R_L) \sin \omega t$$



输出功率 (交流电):

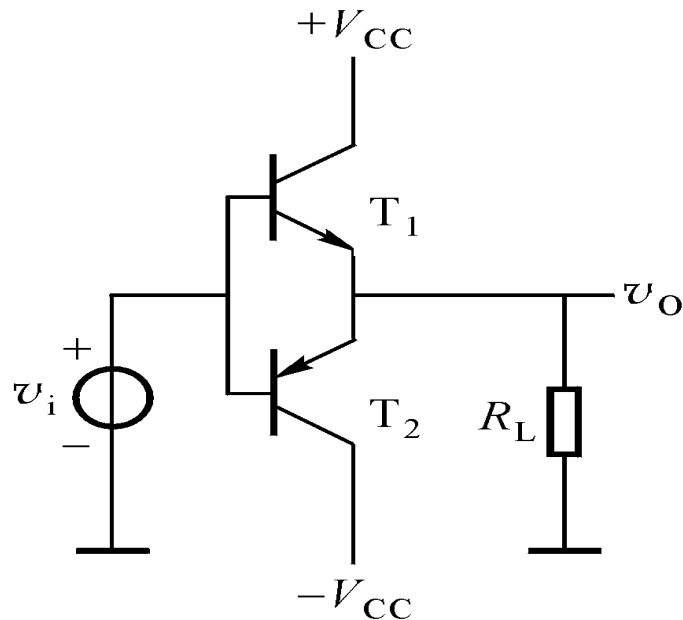
$$P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om}^2}{2R_L}$$



2) 放大器效率 η

输出到负载的功率:

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om}^2}{2R_L}$$



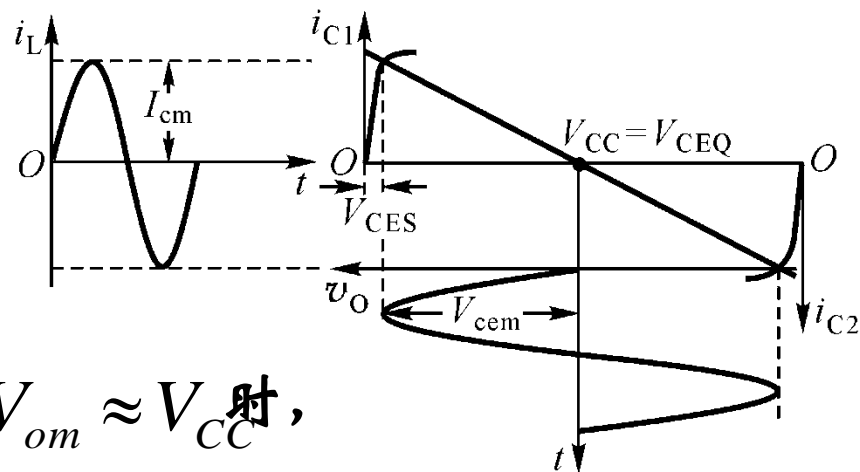
电源提供平均功率:

$$P_E = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{CC} i_o d(\omega t) \right] = \frac{V_{CC}}{\pi} \int_0^\pi \frac{V_{om} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) = \frac{2V_{CC} V_{om}}{\pi R_L}$$

转换效率: $\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\pi V_{om}}{4 V_{CC}}$

转换效率:

$$\eta = \frac{P_O}{P_E} = \frac{\pi V_{om}}{4 V_{CC}}$$



当输出信号幅度达到理想的最大值 $V_{om} \approx V_{CC}$ 时,
最大输出功率

$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

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

$$\eta_{\max} = \frac{P_O}{P_E} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

当考虑功放管的饱和压降 V_{CES} 时, $V_{om} = V_{CC} - V_{CES}$, 实际效率
将小于 78.5% (一般为 60~70%)。

3) 管耗 P_T

T_1 、 T_2 二管的总管耗为：

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

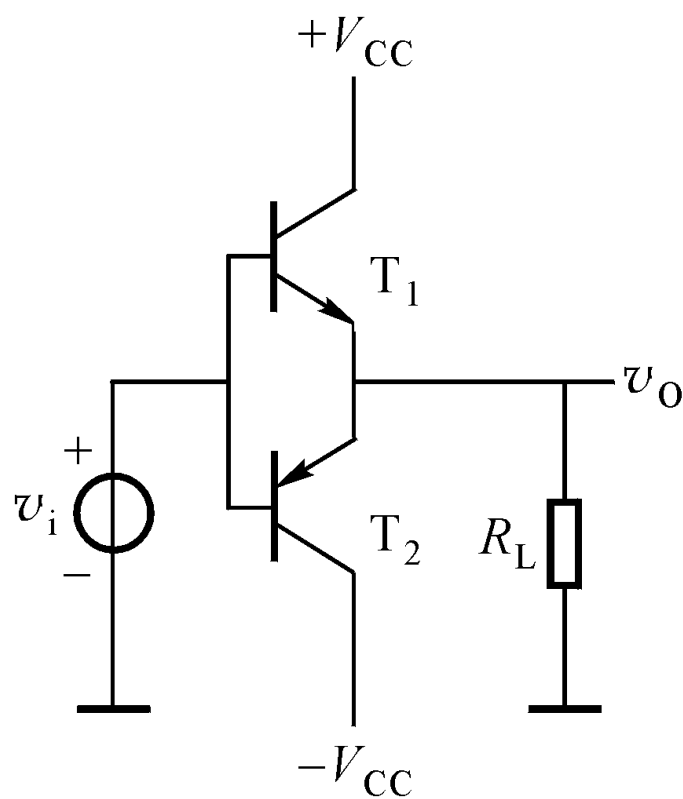
为求最大管耗 P_{TM} ，对上式求导，

$$\frac{dP_T}{dV_{om}} = \frac{2V_{CC}}{\pi R_L} - \frac{V_{om}}{R_L} = 0$$

$$\rightarrow V_{om} = \frac{2V_{CC}}{\pi} \approx 0.64V_{CC} \rightarrow P_{TM} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = \frac{4}{\pi^2} P_{om} \approx 0.4P_{om}$$

所以每个功放管的最大功耗为：

$$P_{T1M} = P_{T2M} = \frac{1}{2} P_{TM} \approx 0.2P_{om}$$



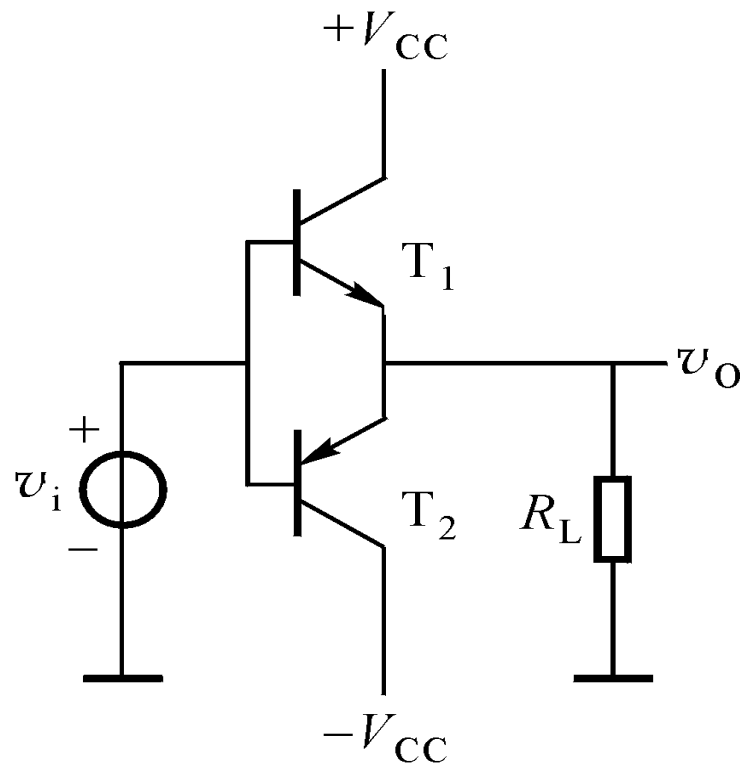
4) 功率管的选取

在互补对称功率放大电路中，功放管必须按以下几点原则选取：

(1) 管子的功耗 $P_{CM} > 0.2P_{omax}$

(2) 功放管的耐压 $V_{(BR)CEO} > 2V_{CC}$

(3) 功放管允许的最大集电极电流 $I_{CM} > V_{CC}/R_L$



思考：对于单电源工作的 OTL功放这些指标又如何？

1、输出功率 P_o 和输出效率 η

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \longrightarrow V_{om} = \frac{V_{CC}}{2}$$

2、电源功率 P_E

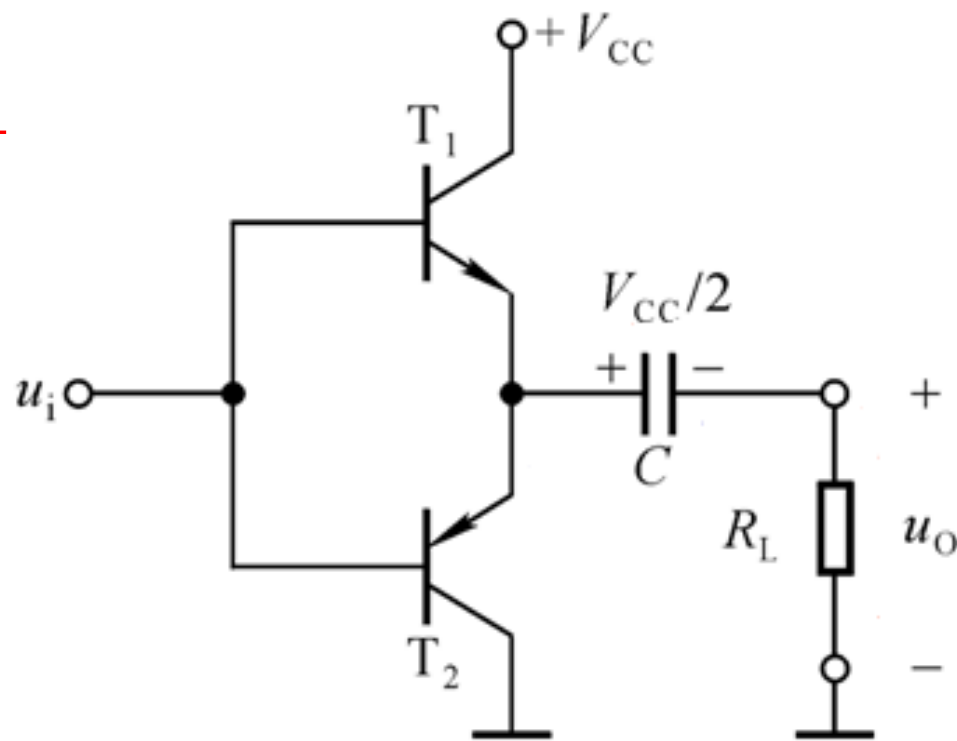
$$P_E = \frac{V_{CC} V_{om}}{\pi R_L}$$

3、输出效率 η

$$\eta_{\max} = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

4、总管耗 P_T

$$P_T = P_E - P_o$$



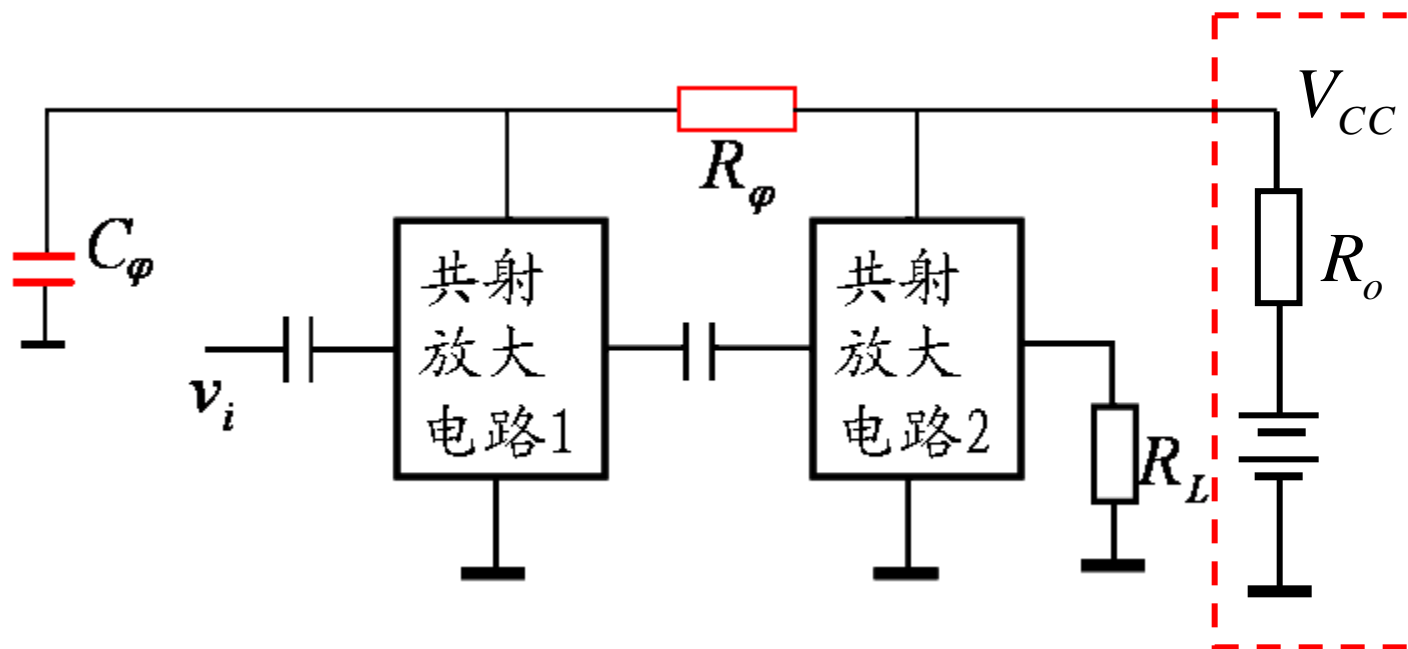
功率放大电路特性的比较

	电源功率	最大输出功率	效率	V_{om}
甲	$V_{cc} \frac{0.5V_{cc}}{R_L}$	$\frac{(0.5V_{cc})^2}{2R_L}$	25%	$0.5V_{cc}$
乙 (双电源)	$2V_{cc} \frac{V_{om}}{\pi R_L}$	$\frac{V_{om}^2}{2R_L}$	$\frac{\pi}{4} = 78.5\%$	V_{cc}
乙 (单电源)	$V_{cc} \frac{V_{om}}{\pi R_L}$	$\frac{V_{om}^2}{2R_L}$	$\frac{\pi}{4} = 78.5\%$	$0.5V_{cc}$

5、功放电路实际应用时需考虑的问题

- ✓ **功率管应该严格配对**，大小工作电流时的 β 一致。
在大电流下饱和压降小，且一致；
- ✓ **管子的散热问题。**
在大功率场合，必须给管子装上一定尺寸的散热板，或进行风冷和水冷；
- ✓ 功放管因在大电流、高电压下工作，
应对其采取过压和过流**保护措施**；
- ✓ 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。

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。消除低频自激的有效方法是在前置放大电路的供电回路加接去耦电路。



【例1】

设OTL电路的 $V_{CC}=30\text{ V}$ ，输出电压幅度 $V_{om}=10\text{ V}$ ， $R_L=8\ \Omega$ 。
试计算该电路的输出功率、效率和管耗。

解：

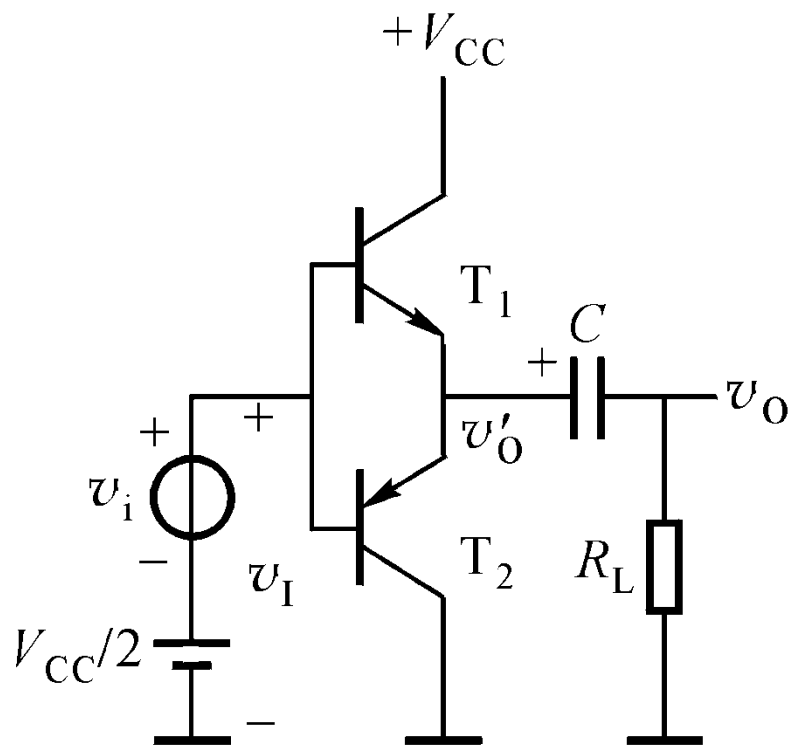
输出功率：

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = 6.25\text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_E &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{CC} \cdot I_{om} \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{V_{CC} \cdot V_{om}}{\pi \cdot R_L} = 11.94\text{ W} \end{aligned}$$

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

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



【例2】

设OCL电路的 $V_{CC}=15\text{ V}$ ，输出电压幅度 $V_{om}=10\text{ V}$ ， $R_L=8\ \Omega$ 。
试计算该电路的输出功率、效率和管耗。

解：

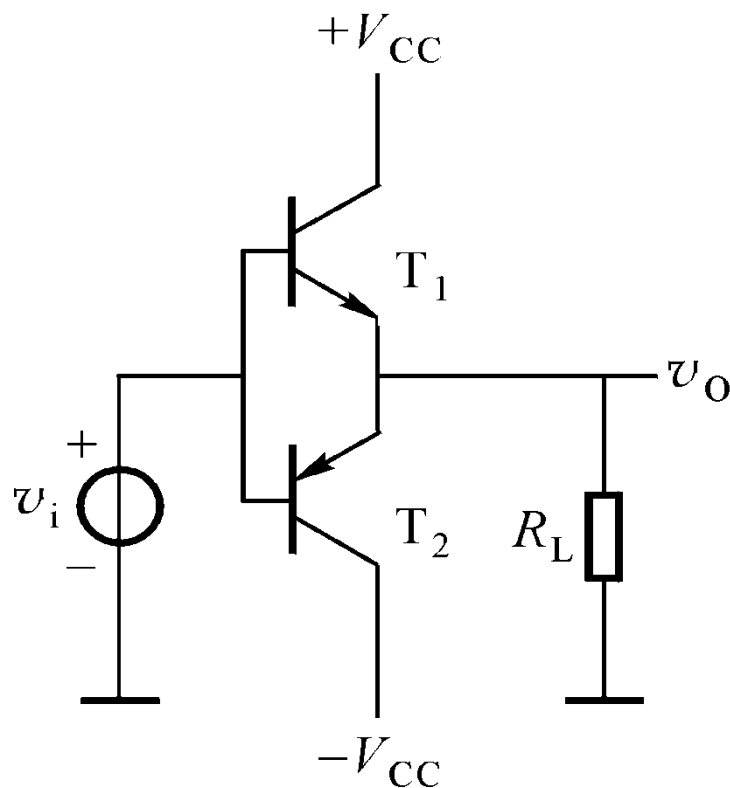
输出功率：

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = 6.25\text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_E &= 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{CC} \cdot I_{om} \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = 11.94\text{ W} \end{aligned}$$

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

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



【例3】 OTL放大电路如图所示：

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

(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？

解： 电容 C_2 两端的电压应为5V。

调整 R_1 、 R_3 。

(2)动态时，若输出电压波形

出现交越失真，应如何调整？

解： 应调大 R_2 ，使 b_1 b_2 间电压增大，
提供较大的静态电流。

(3)若 $R_1=R_3=1.2k\Omega$ ， T_1 、 T_2 管 $\beta=50$ ，

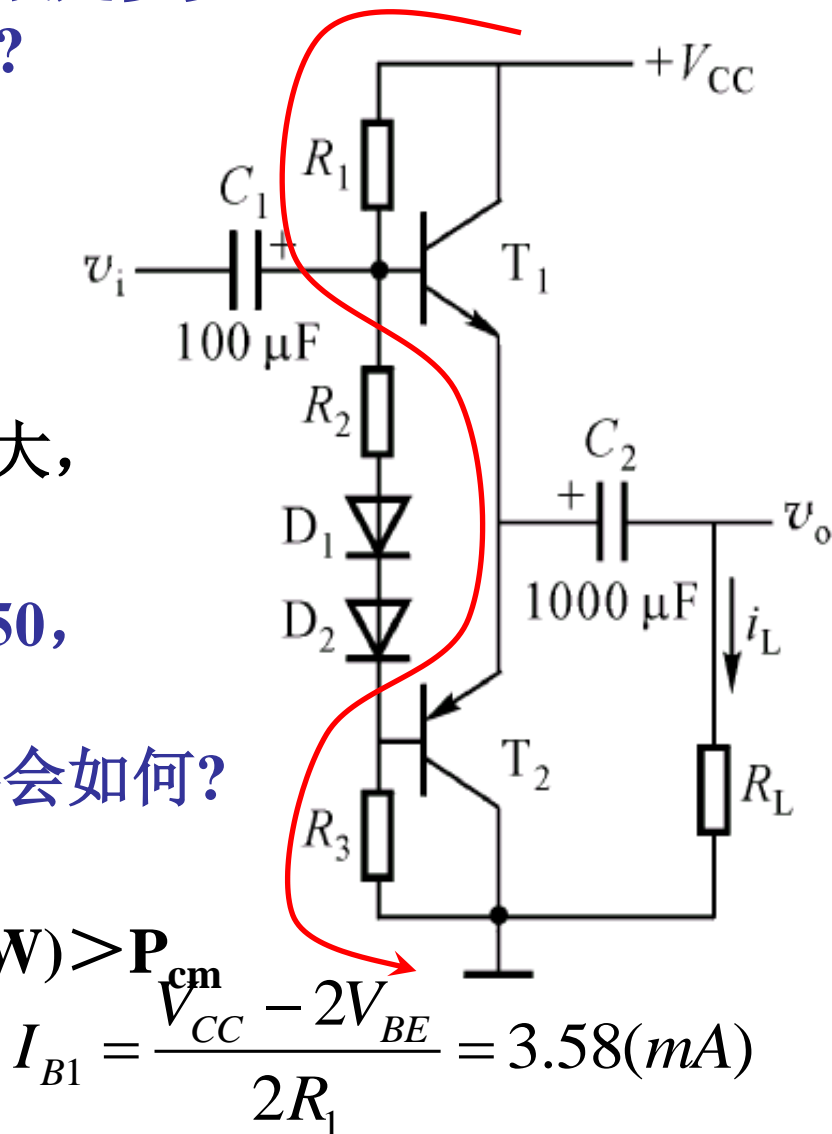
$|V_{BE}|=0.7V$ ， $P_{cm}=200mW$ ，

设 D_1 、 D_2 、 R_2 中任一开路，将会如何？

解： $I_{C1}=I_{C2}=\beta I_{B1}=179(mA)$

$P_T=I_{C1} \cdot V_{CE}=I_{C1} \cdot 5V = 895(mW) > P_{cm}$

\therefore 功率管将会烧坏。



实际的功率放大电路通常由电压放大级和功率放大级组成，并引入负反馈以改善各方面的性能。

输出电压？

电压串联型交、直流负反馈

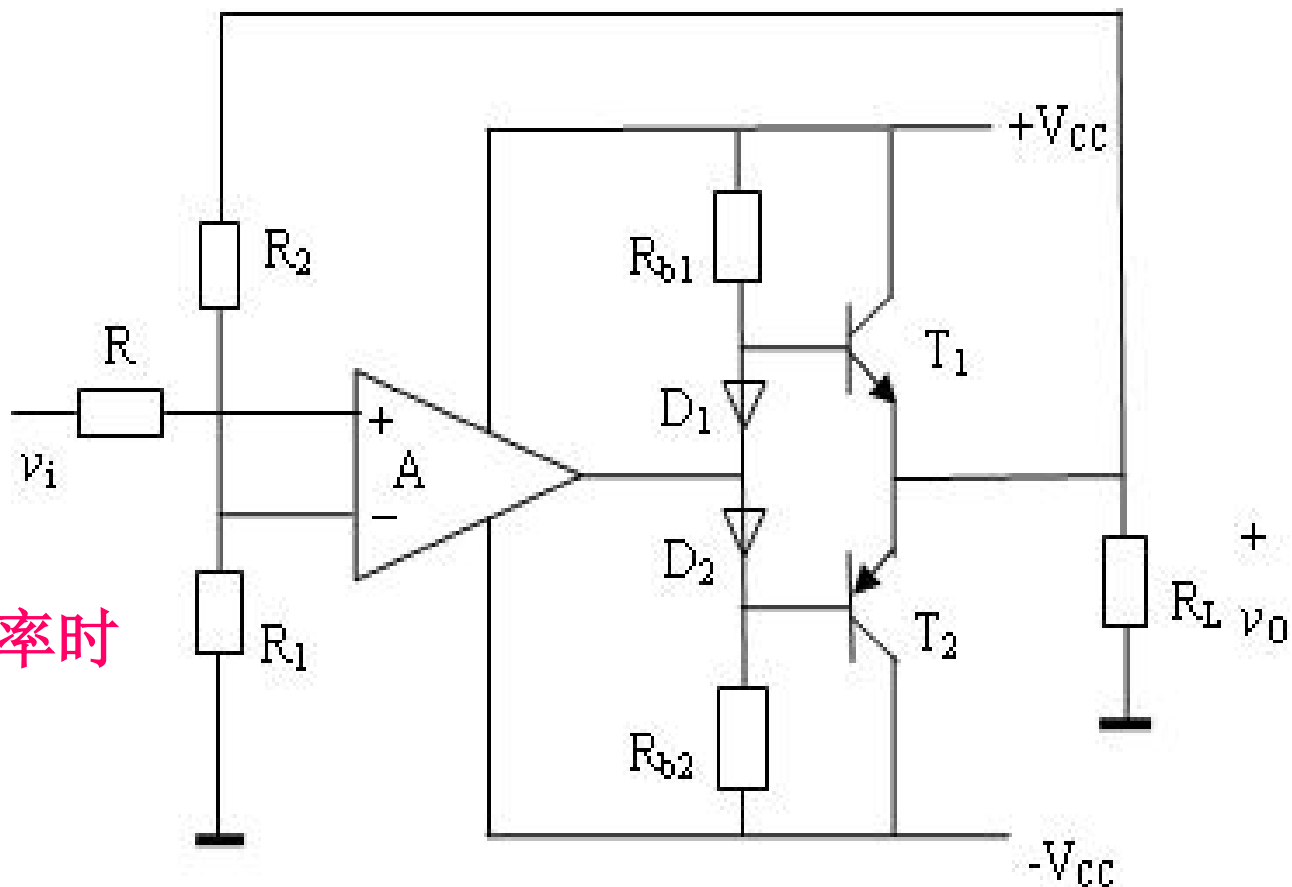
输出交流功率？

管子损耗？

运放输出限制影响？

R_{b1} 断开影响？

对应于最大输出功率时的最大输入电压？



题7.7 $V_{CC} = 12V$

$V_D = 0.7V$ $U_{CES} = 1V$

运放最大输出 $\pm 10V$

$R = 1k\Omega$

$R_L = 100\Omega$

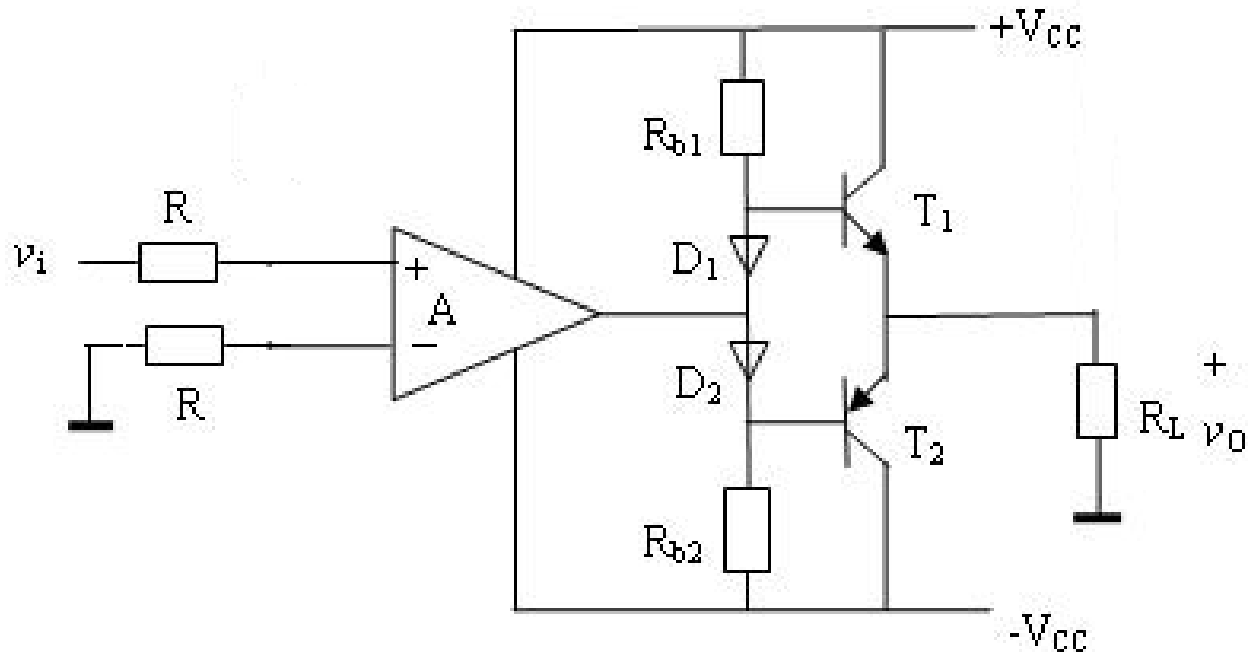
1.设计反馈连接

要求 $v_i = 0.5V$

$v_o = 5V$

2. 输出功率，电源功率，管耗，效率 (R_L 已知)

3.最大不失真输出功率



题7.7 $V_{CC} = 12V$ $V_D = 0.7V$ $U_{CES} = 1V$ 运放最大输出 $\pm 10V$ $R = 1k\Omega$

$$R_L = 100\Omega$$

1. $R_f = 9k\Omega$

2. 输出功率

$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{5^2}{200} = 0.125W$$

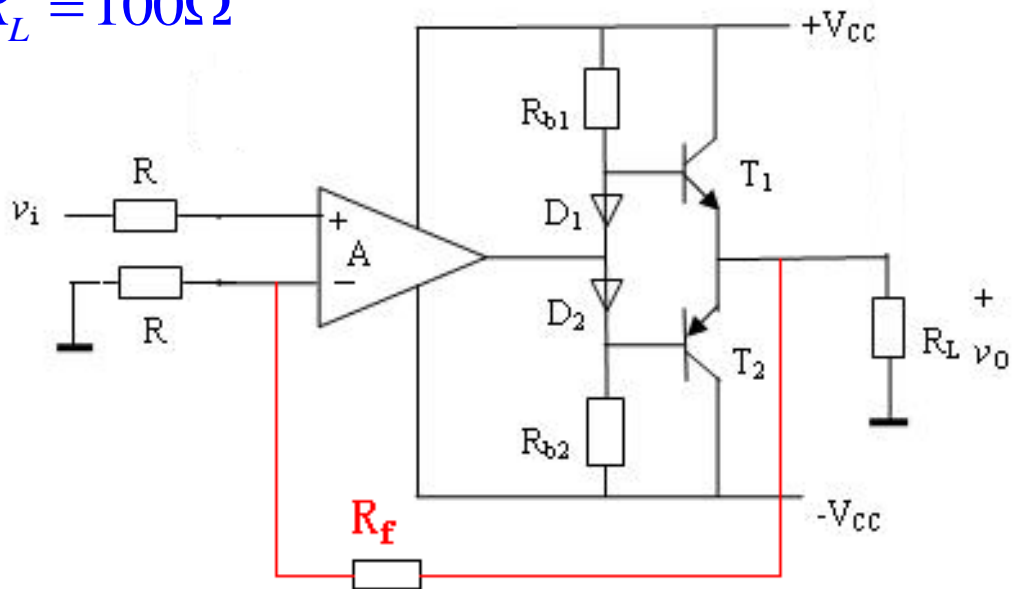
电源功率

$$P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = \frac{120}{314} = 0.382W$$

效率 $\eta = \frac{P_o}{P_E} = 32.7\%$

3. 最大不失真输出功率

$$P_{omax} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{10^2}{200} = 0.5W$$



管耗 $P_T = \frac{P_E - P_o}{2} = 0.1285W$

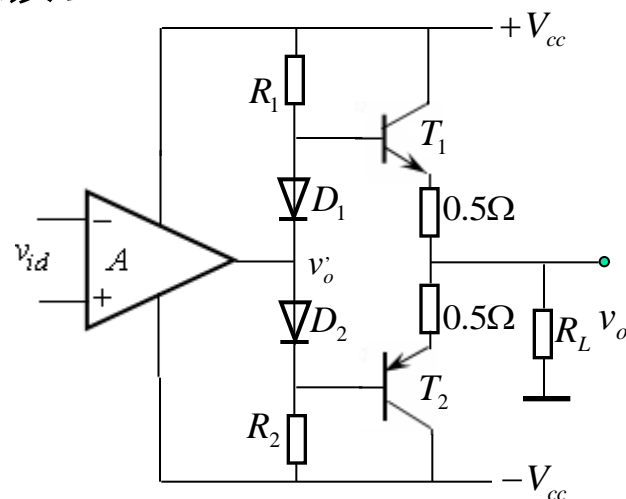
$$P_{T1} \approx 0.2P_{om} = 0.2 \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = 0.144W$$

3.1.5 集成功率放大器

集成运算放大器通常要加 $\pm 15\text{V}$ 电源供电，输出最大电压幅度大约在电源电压的 80%至85%左右，即选用 $\pm 15\text{V}$ 电源电压时，其输出电压幅度为 $\pm 12\text{V}$ 到 $\pm 13\text{V}$ 左右，而输出电流仅为 100mA 以内，所以提供不出更大的功率。

设想在集成运放的输出端再加一级互补对称功放电路，

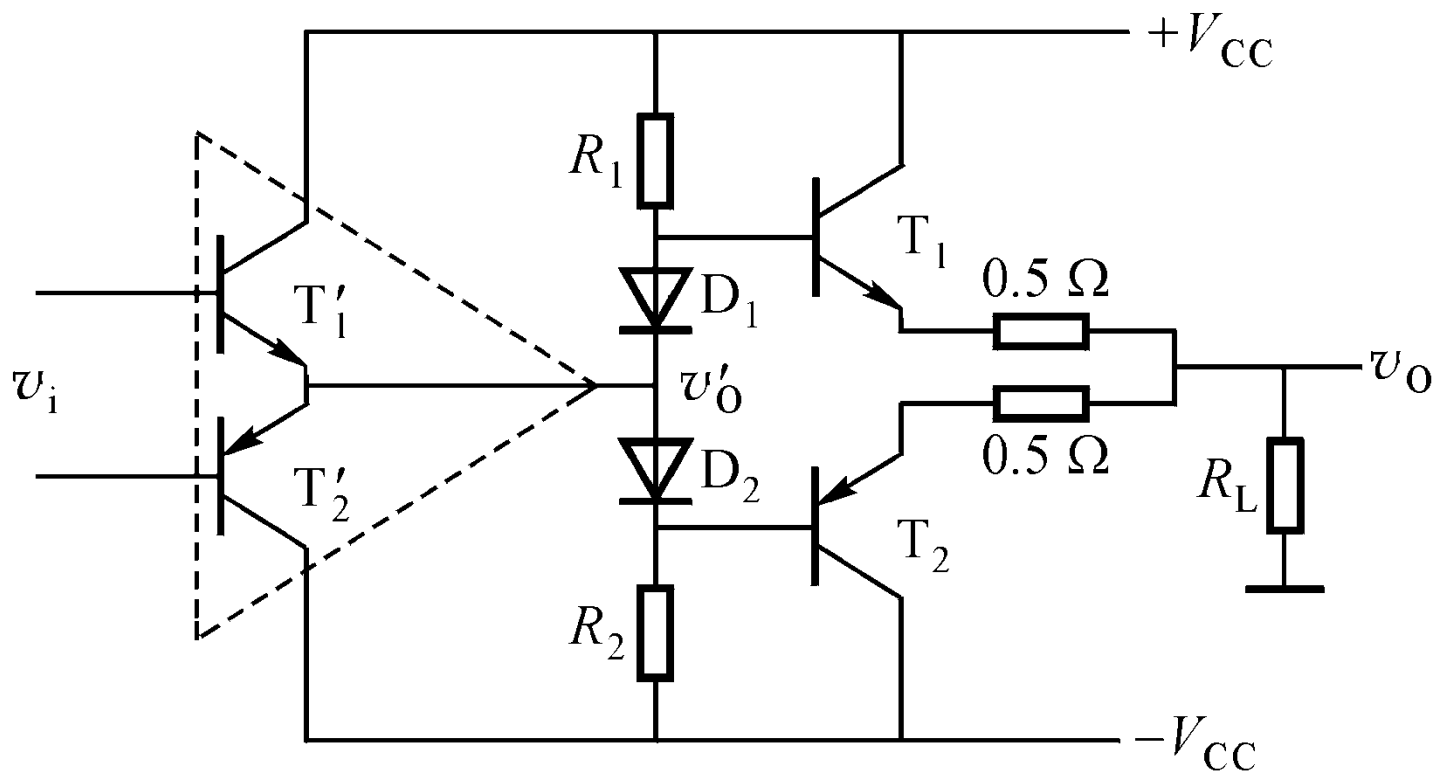
利用 T_1 、 T_2 互补管的电流放大作用，达到扩大输出电流，最终达到扩大输出功率的目的



3.1.5 集成功率放大器

■ 一、集成运放的扩流

在集成运放的输出端再加一级互补对称功放



利用 T_1 、 T_2 管子的电流放大作用，达到扩大输出电流的目的。

■ 二、集成运放的扩压

当 $v_i = 0$ 时, $v_o = 0$

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

$$V_+ = +14.3V, V_- = -14.3V$$

当加入信号 v_i 后

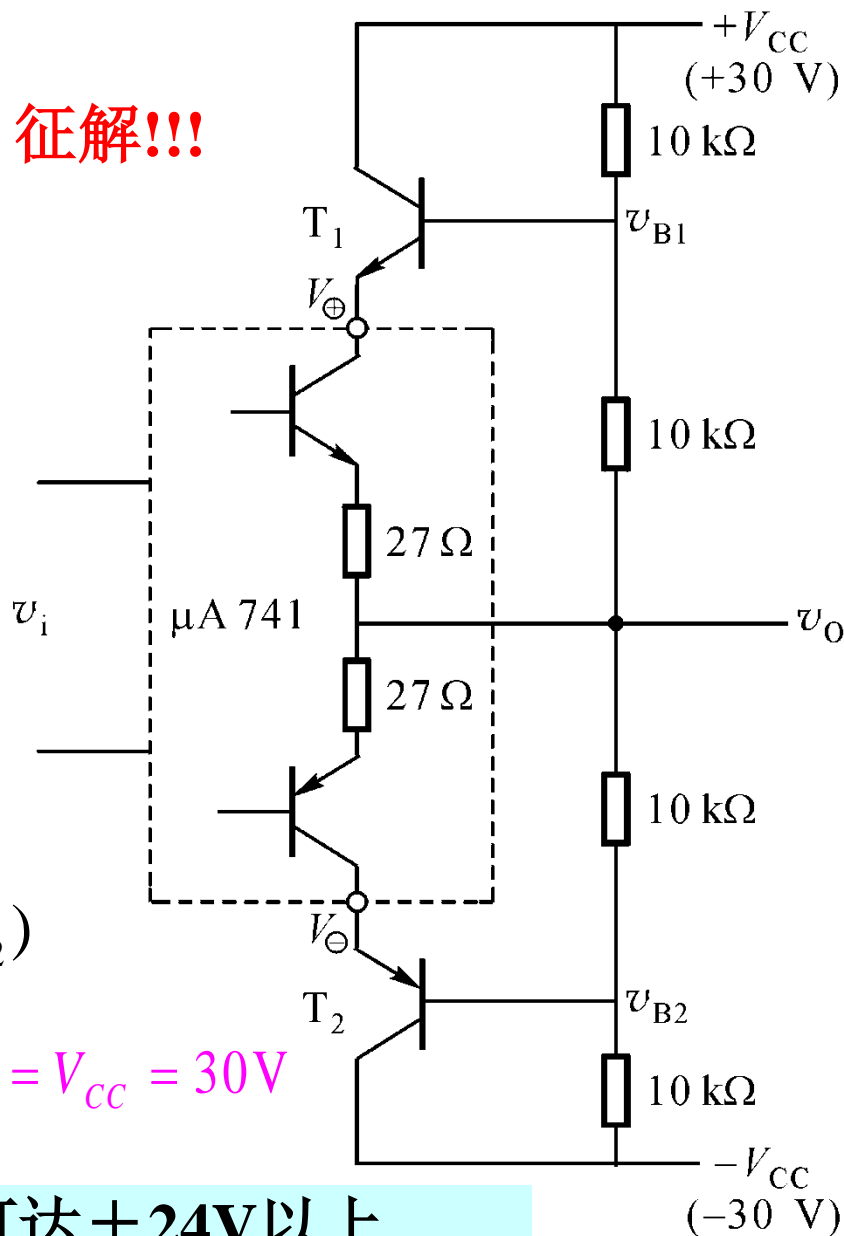
$$v_{B1} = \frac{1}{2}(V_{CC} - v_o) + v_o = \frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}$$

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

$$\begin{aligned} V_+ - V_- &= (v_{B1} - v_{BE1}) - (v_{B2} - v_{BE2}) \\ &\approx \left(\frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}\right) - \left(-\frac{V_{CC}}{2} + \frac{v_o}{2}\right) = V_{CC} = 30V \end{aligned}$$

经扩压后的输出电压可达 $\pm 24V$ 以上

征解!!!



■ 三、集成功率放大器

一般通用型集成运放的输出功率是很小的，
如 $\mu A741$ 的输出功率仅为100mW左右。
在需要较大功率场合，可选用集成功率放大器

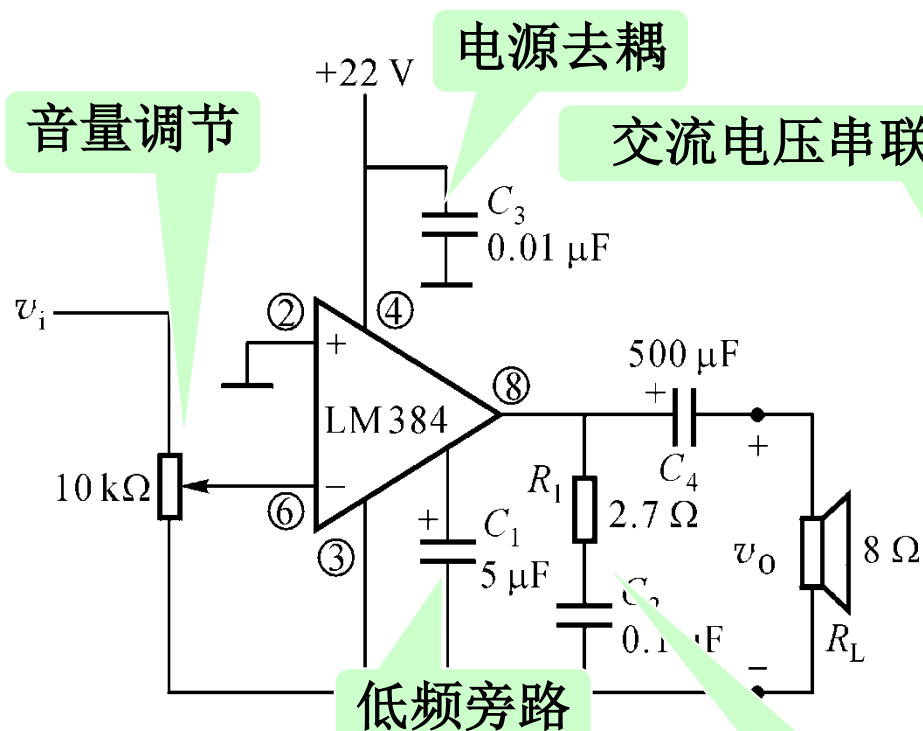
C_7 、 C_5 、 R_3 改善音质用

D_1 、 D_2 正负向限幅

电源去耦

音量调节

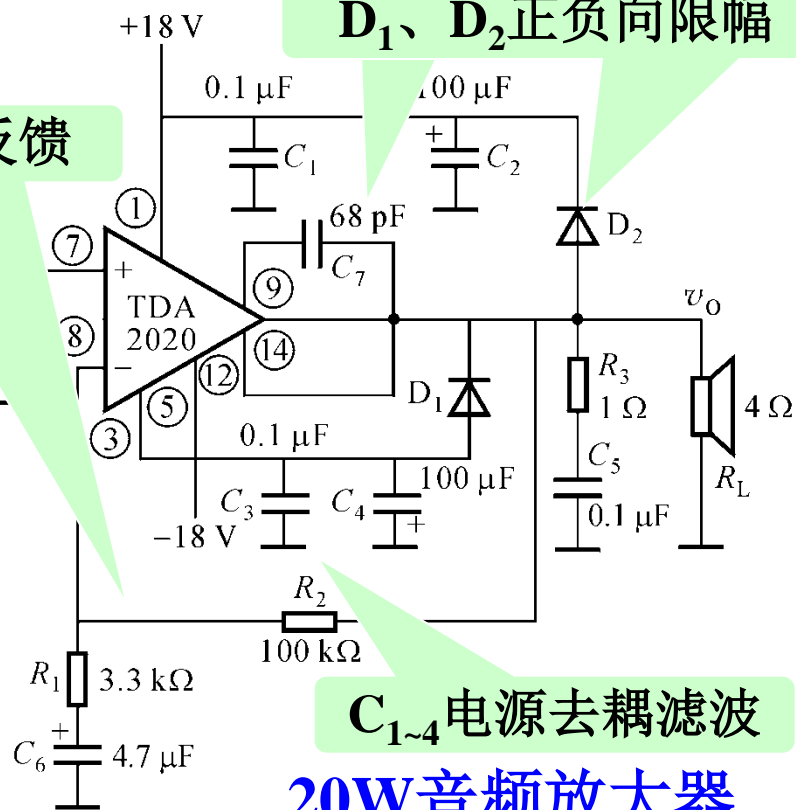
交流电压串联负反馈



5W音频放大器

改善音质

低频旁路

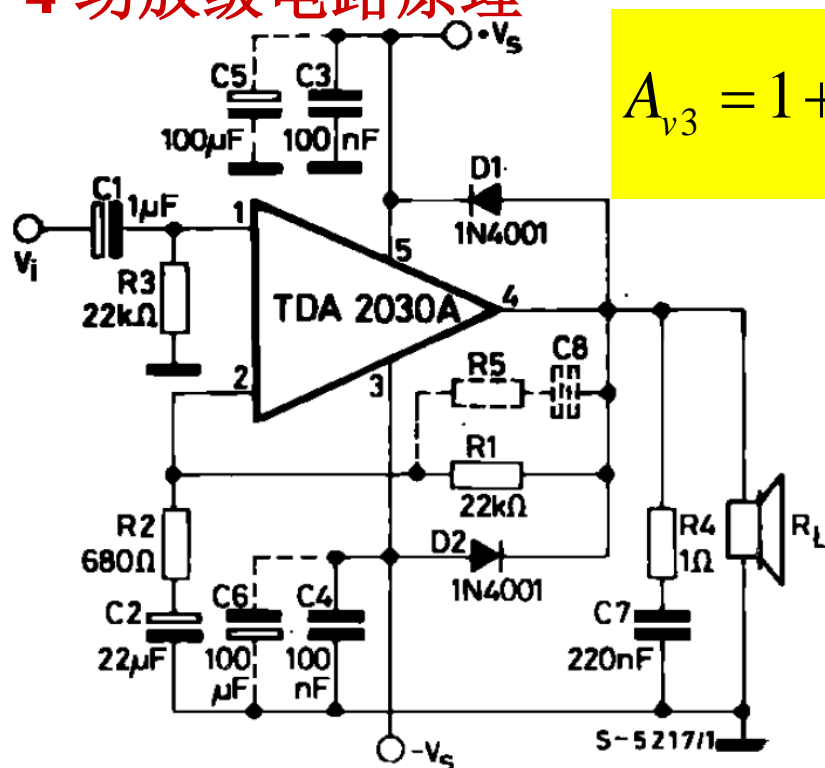


$C_1 \sim C_4$ 电源去耦滤波

20W音频放大器

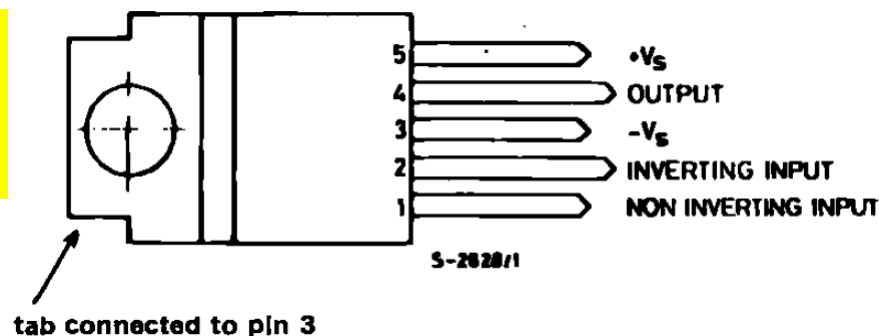
OTL电路, 34dB增益, BW=300kHz, 8欧姆负载时输出功率5W

4 功放级电路原理



TDA2030A典型应用电路

$$A_{v3} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$



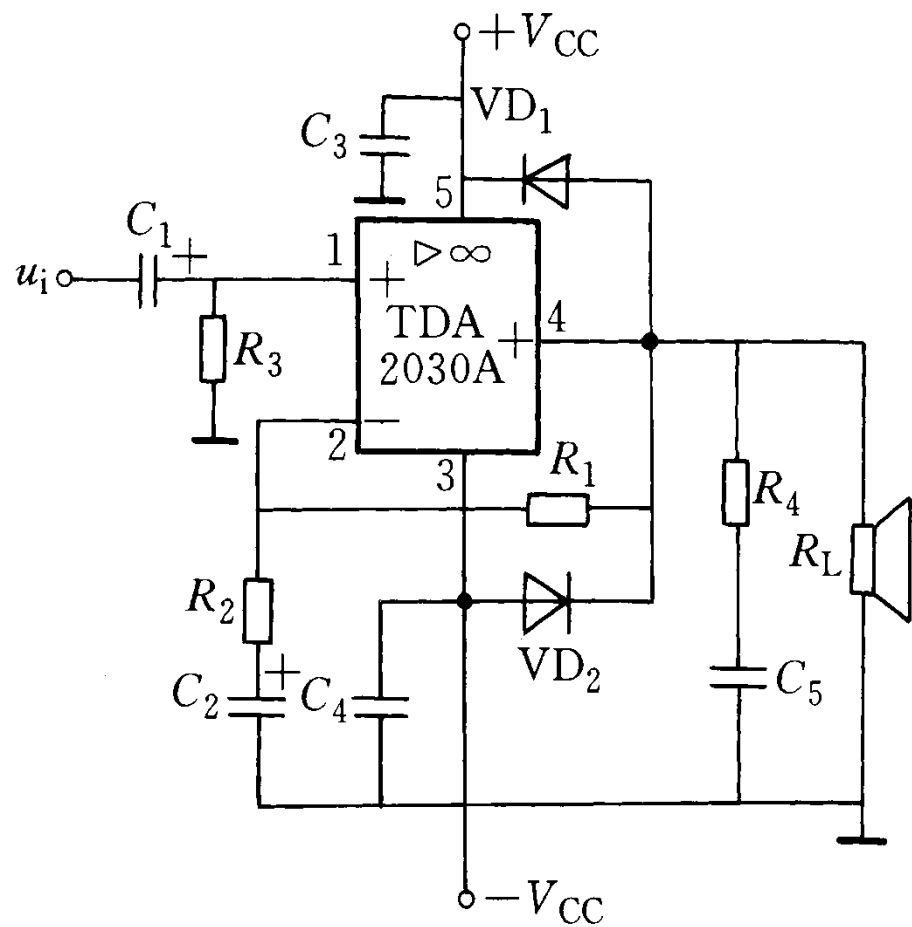
TDA2030A外形与引脚

- | | |
|----------|----------|
| 1脚：同相输入端 | 2脚：反相输入端 |
| 3脚：负电源 | 4脚：输出端 |
| 5脚：正电源 | |

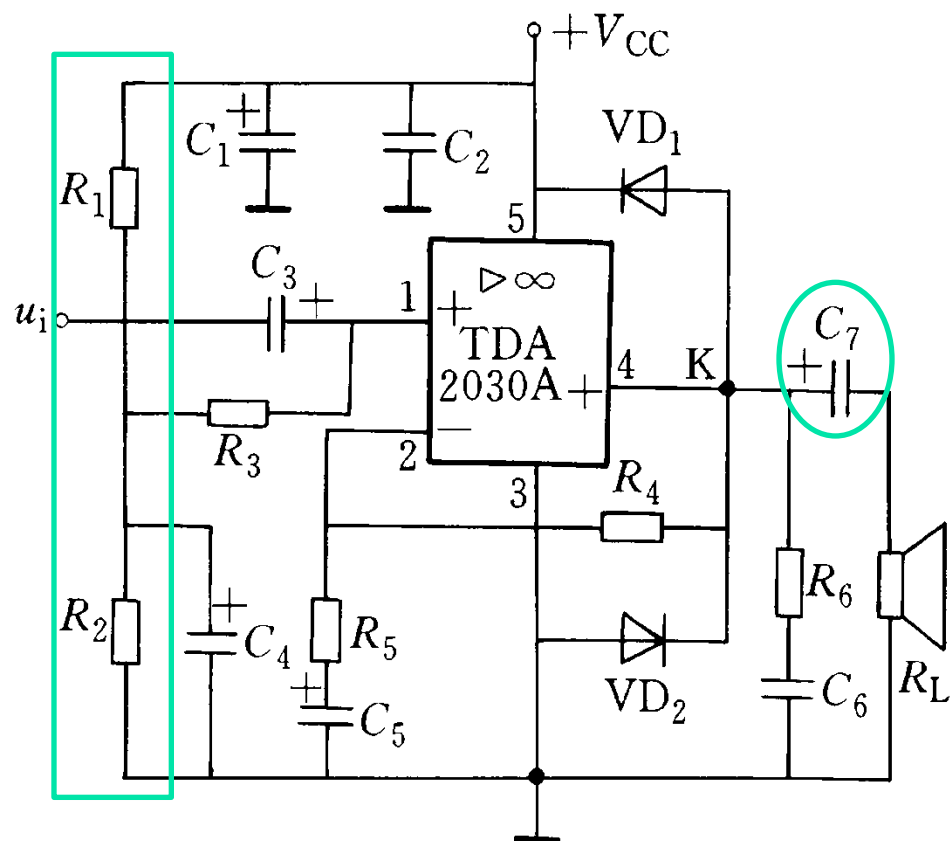
特别提示：引脚3与散热接触面是连通的，散热器不要碰到地线或电源线，否则有可能导致芯片损坏。

- D1 D2：输出电压限幅二极管，防止输出电压过大；
- R4 C7：输出端校正网络，可避免自激和感性负载产生的过电压；
- C5 C6：电源低频滤波电容；
- C3 C4：电源高频滤波电容。

补偿网络（滞后校正），对低频信号不产生衰减，而对高频噪声信号有削弱作用



TDA2030A构成OCL电路



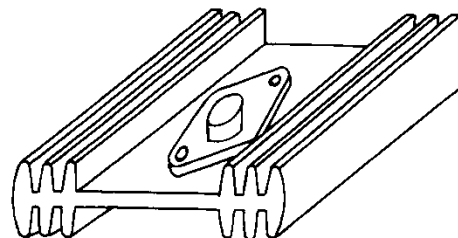
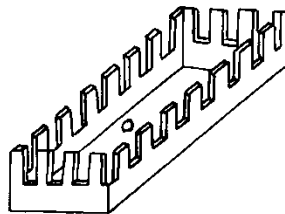
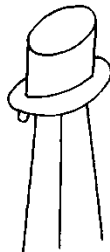
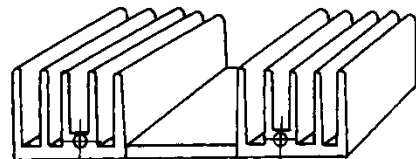
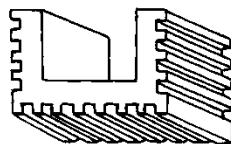
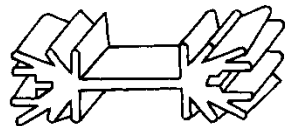
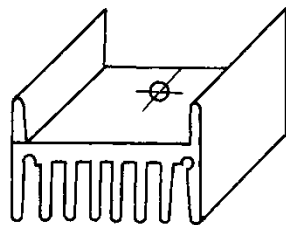
构成的OTL电路

功率管的散热问题

在功率放大电路中，功率管中流过的信号电流较大，管子又存在一定的压降，因此功率管的管耗较大。

对于硅材料器件，一般规定最大结温 T_{jM} 约 120°C 左右，锗材料的 T_{jM} 约为 90°C 左右。

几种常用的散热器形状



案例解析：LM386 集成功率放大器原理及应用

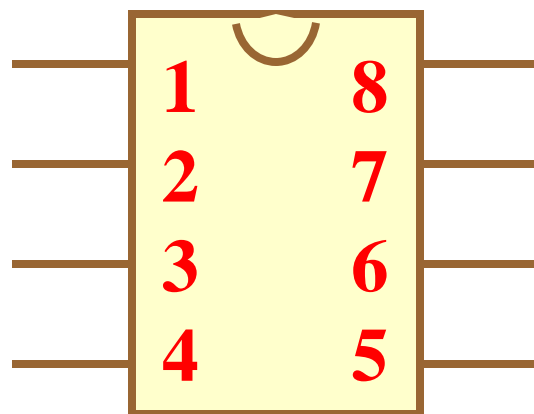
1) 典型应用参数:

直流电源: 4 ~ 12 V

额定功率: 660 mW

带 宽: 300 kHz

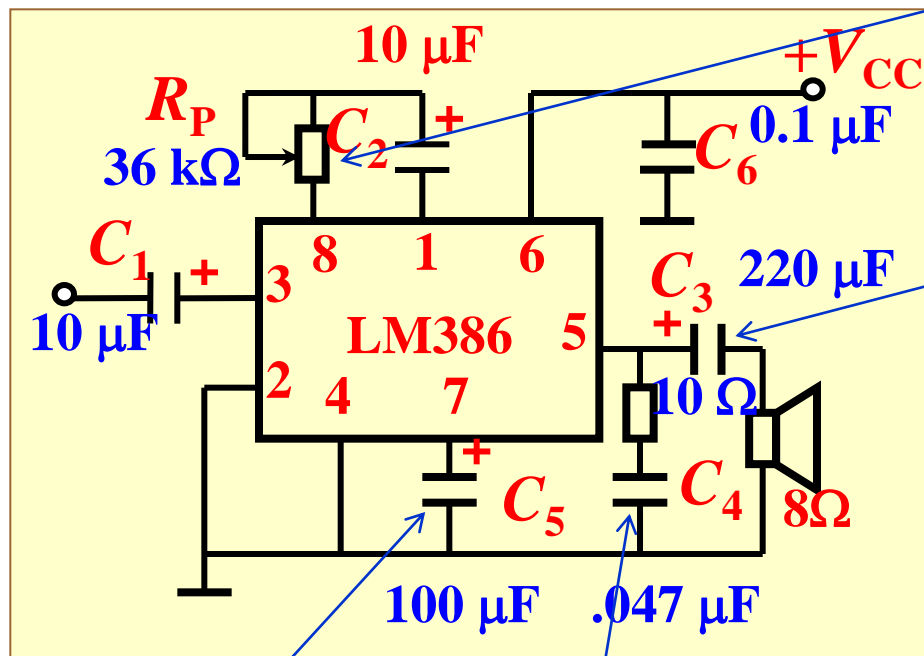
输入阻抗: 50 k Ω



引脚图



2) 典型应用电路

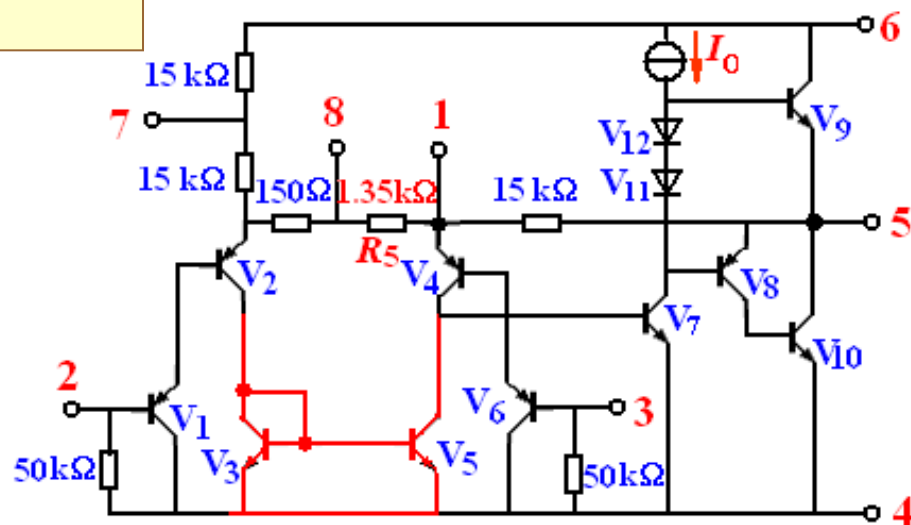


?

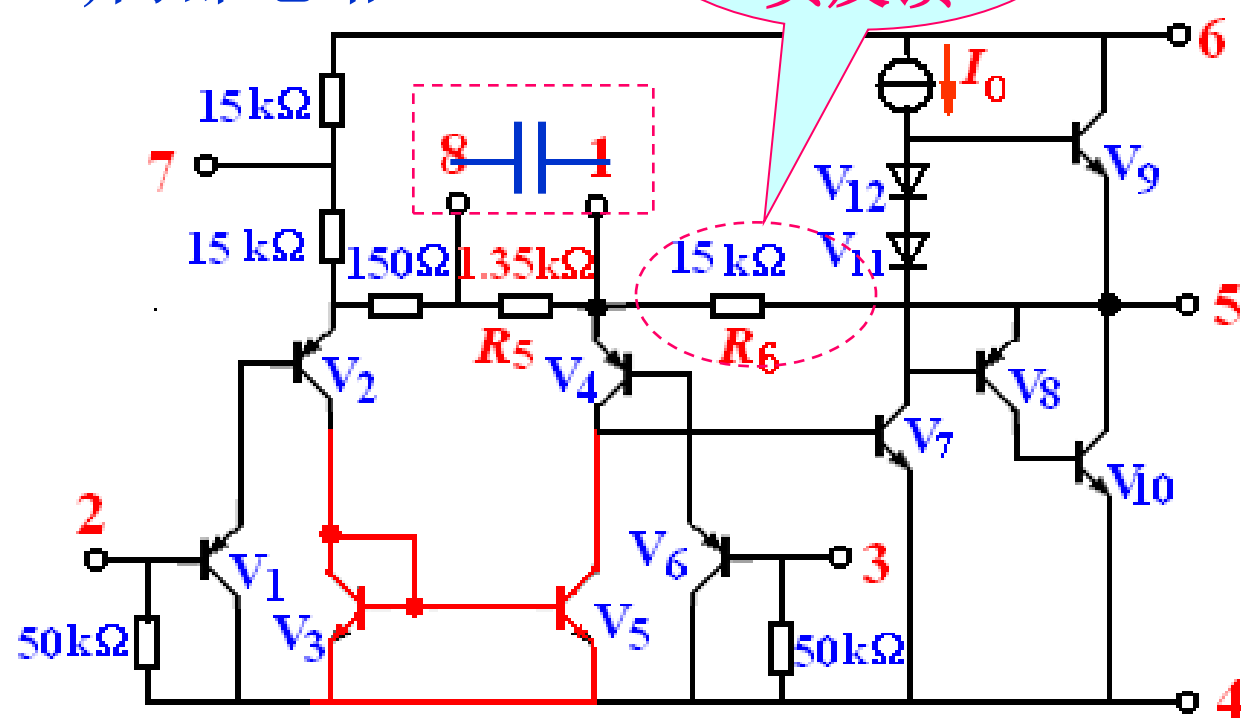
?

?

?



2)内部电路

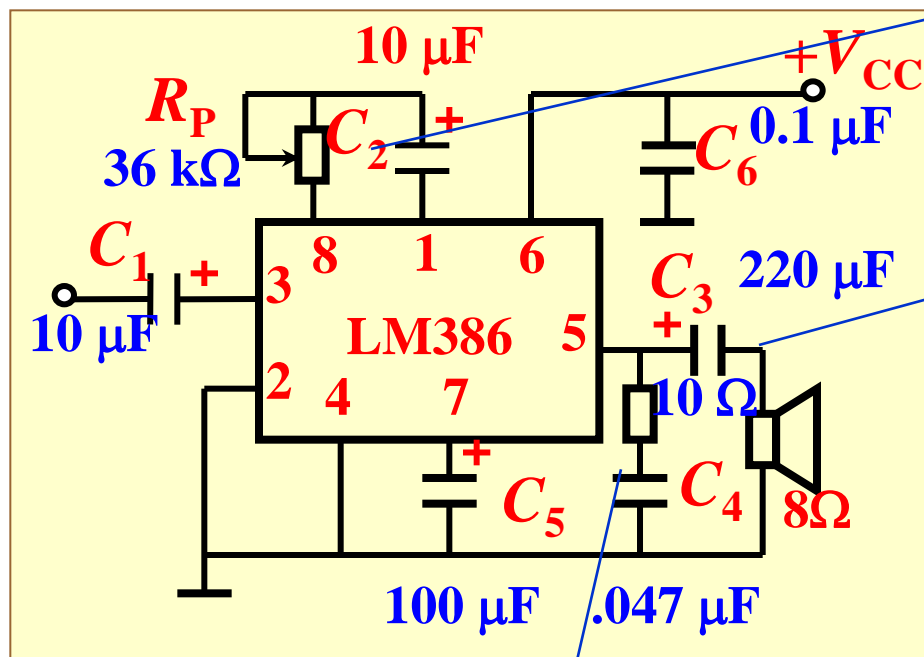


1. 8 开路时,
 $A_u = 20$
 (负反馈最强)

1. 8 交流短路
 $A_u = 200$
 (负反馈最弱)

- $V_1、V_6$: 射级跟随器, 高 R_i
- $V_2、V_4$: 双端输入单端输出差分电路
- $V_3、V_5$: 恒流源负载
- $V_7 \sim V_{12}$: 功率放大电路
 - V_7 为驱动级 (I_0 为恒流源负载)
 - $V_{11}、V_{12}$ 用于消除交越失真
 - $V_8、V_{10}$ 构成 PNP → 准互补对称

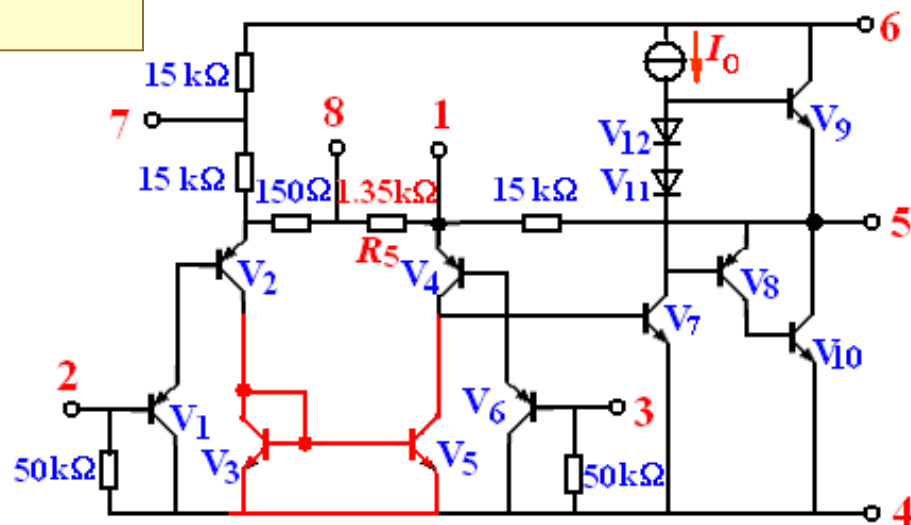
3)典型应用电路



调节电压 放大倍数

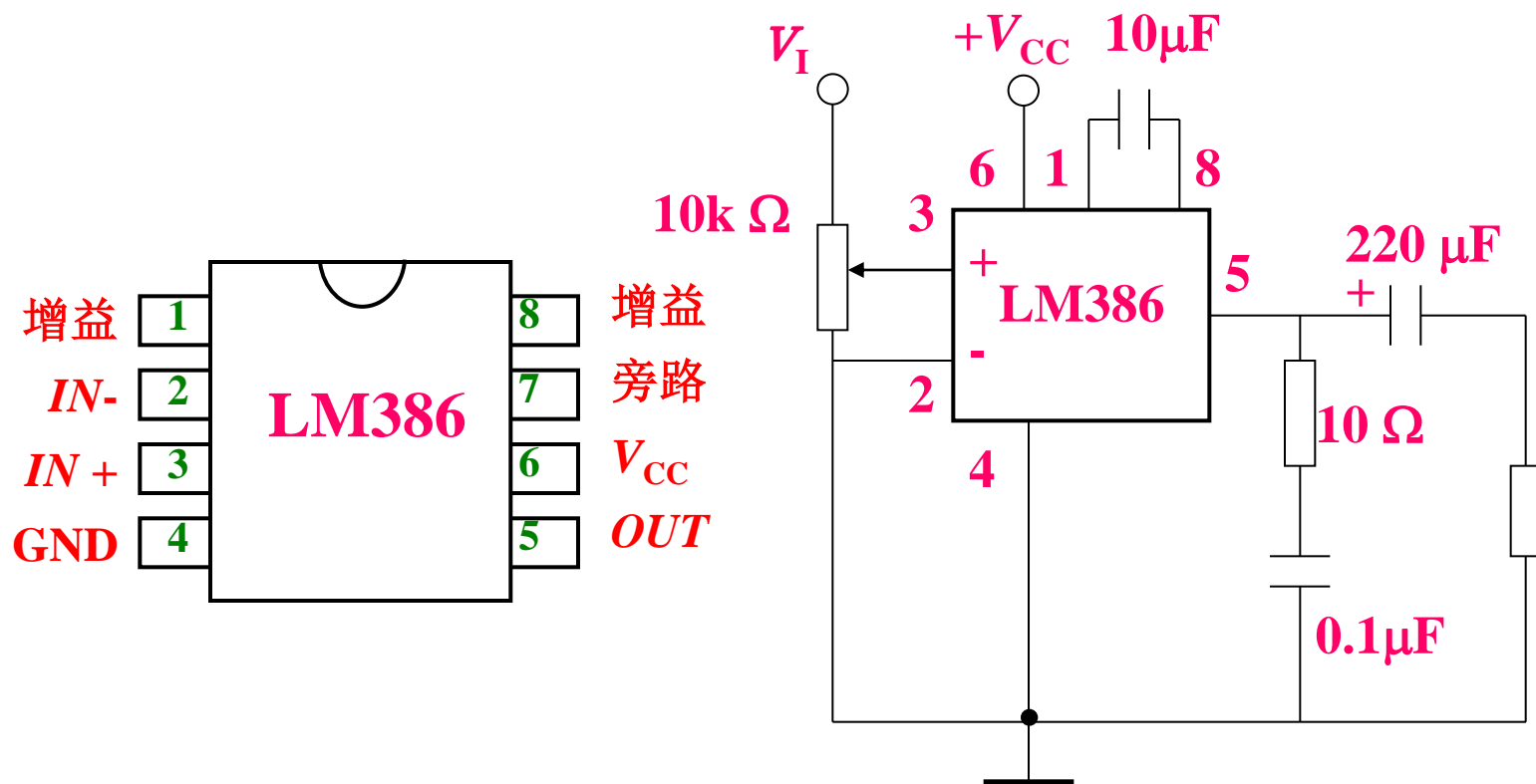
输出电容 (OTL)

频率补偿，抵消电感高频的不良影响
防止自激等



典型应用电路

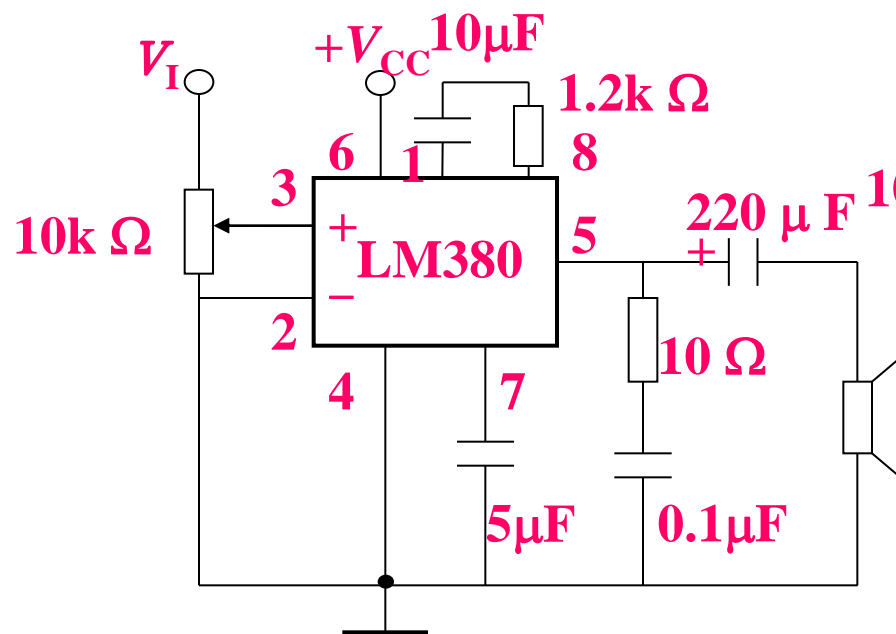
音频功率放大器



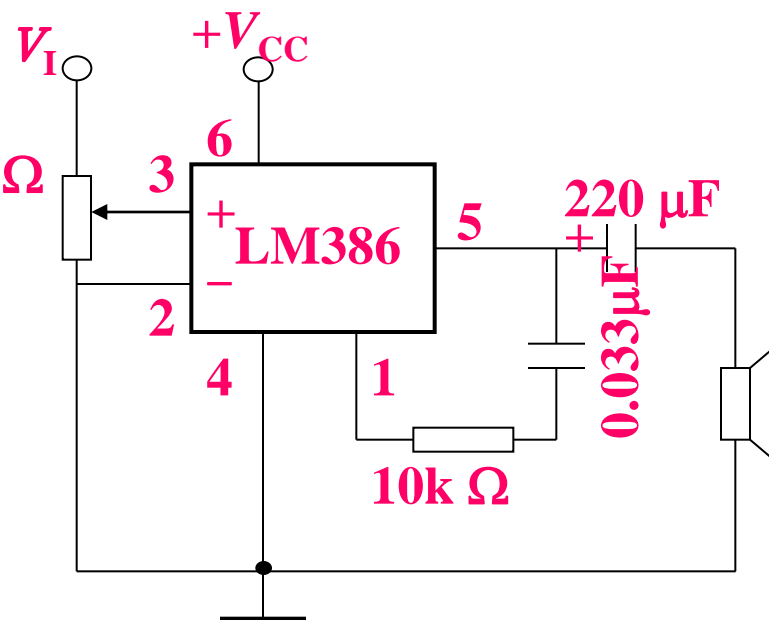
电压放大倍数为200功率放大电路



典型应用电路



电压放大倍数为50功率放大电路



具有低音提升的功率放大电路



作业

■ **3.1, 2, 4, 5, 6**

功率放大

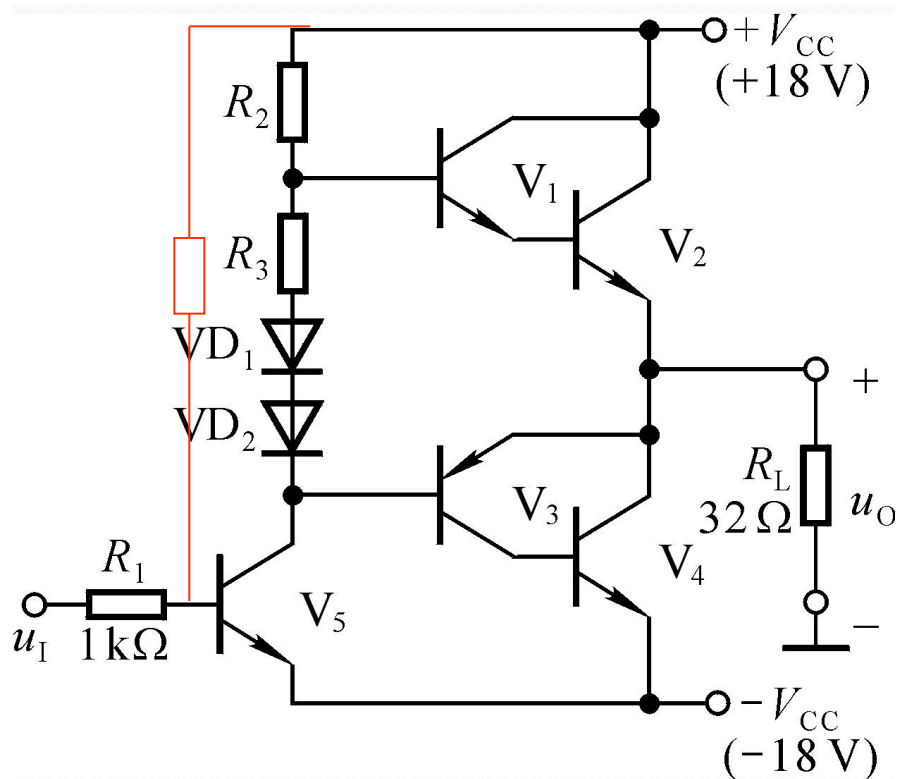
■ **3.10, 11, 12 (2), 14 (3)**

整流稳压

■ **Pspice**仿真

■ **3.16, 14.18**

征解题 电路如图所示，试说明电路分别产生如下故障时将产生什么现象。



V_2 、 V_4 的极限参数:

$$P_{CM} = 1.5\text{ W}, I_{CM} = 600\text{ mA},$$

$$U_{BR(CEO)} = 40\text{ V}.$$

1. R_2 断路;
2. R_2 短路;
3. VD_1 短路;
4. VD_1 断路;
5. V_1 集电极开路。