

# 第5章 功率放大电路

4学时

# 功率放大电路

## 作业

- 思考 5-1、5-2
- 习题 5-5
- 选做 5-10

# 重点和难点

## 重点

- 功率放大电路的类型及特点
- 功率放大电路最大输出功率和转换效率的分析方法
- OCL互补功率放大电路组成及工作原理

## 难点

工作在尽限状态下的分析计算

## 5.1 功率放大电路概述

### 功率放大电路的特点和要求

功放电路不仅要有足够大的输出电压，而且还应有足够大的输出电流，才能提供足够大的输出功率。

放大管工作在尽限应用状态。

功放电路从组成、元器件的选择到分析方法，都与小信号放大电路不同。

(1) 输出功率尽可能大;  $(P_o)_M = (U_o)_M \times (I_o)_M$

(2) 转换效率 $\eta$ 要高;  $\eta = \frac{P_o}{P_{VCC}} \times 100\%$

(3) 非线性失真要小;

(4) 考虑功放电路中晶体管的选择和散热问题;

(接近极限运用状态)

(5) 功放电路的分析方法为 大信号下的图解法

。

# 功放电路按晶体管工作状态的分类

功放电路通常是根椐功率管静态工作点Q的不同选择来进行分类的。

甲类      功率管导通角       $\theta = 360^\circ$

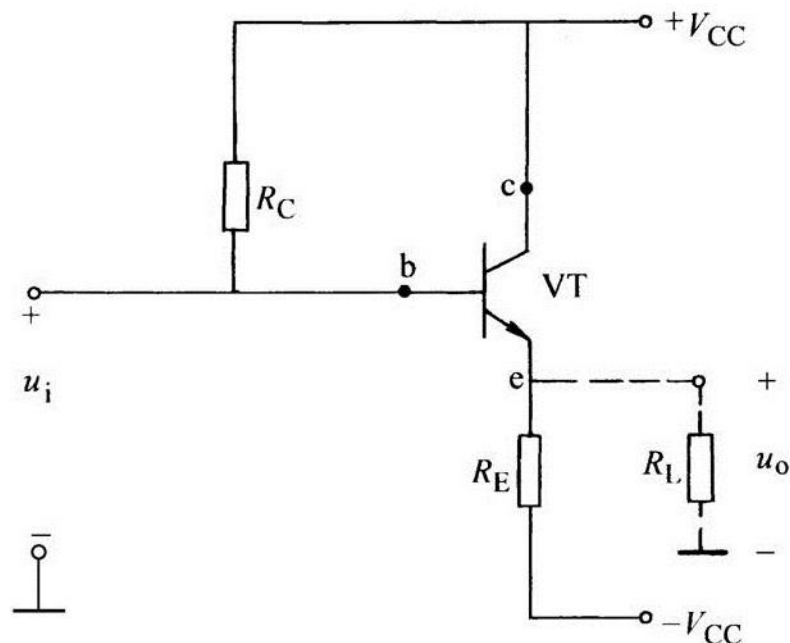
乙类      功率管导通角       $\theta = 180^\circ$

甲乙类      功管导通角       $180^\circ < \theta < 360^\circ$

在功放电路中主要应用“乙类”和“甲乙类”电路。

## 5.2 单管甲类功率放大电路

共集放大电路（射极输出电路）无电压放大作用，有电流和功率放大能力，输出电阻小，带负载能力强。



输出功率要求较小时，可采用单管射极输出电路作为功率输出级。

令  $R_L = \infty$

静态时：（使  $U_{EQ} = 0$ ）

根据

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = V_{CC} / R_E$$

$$U_{CEQ} = V_{CC}$$

$$u_{CE} = 2V_{CC} - i_C R_E$$

可做出直流负载线

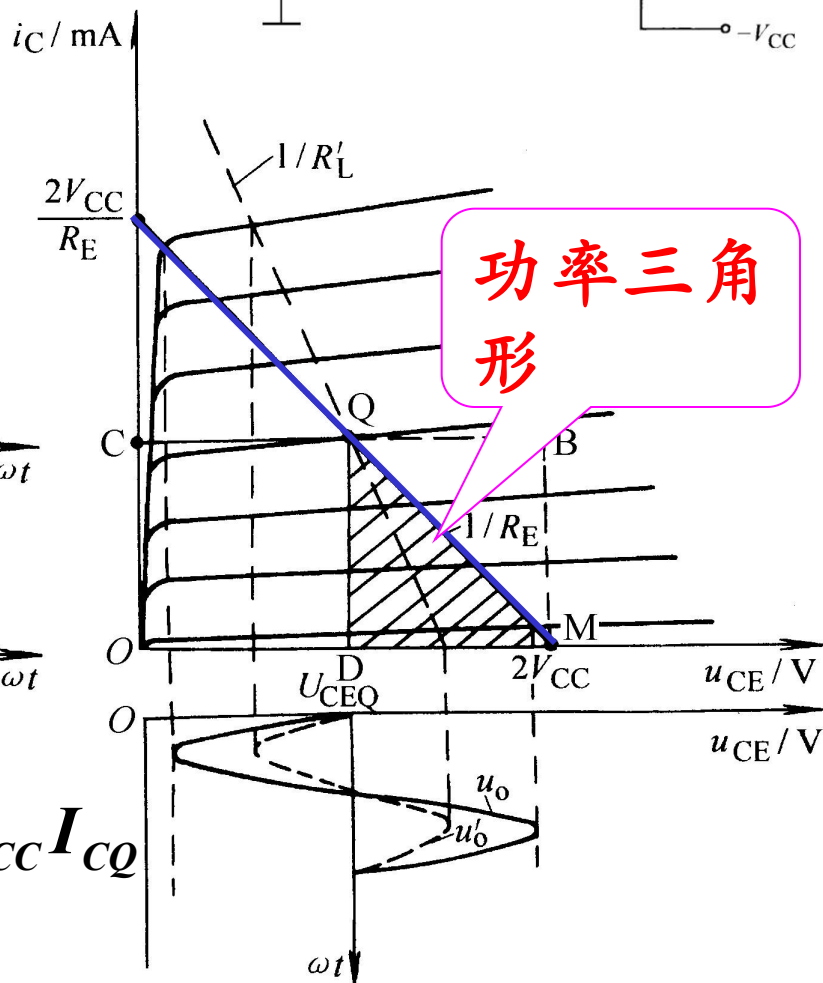
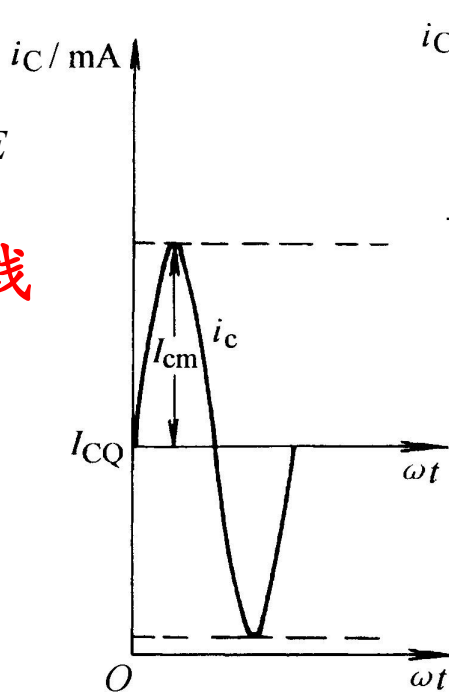
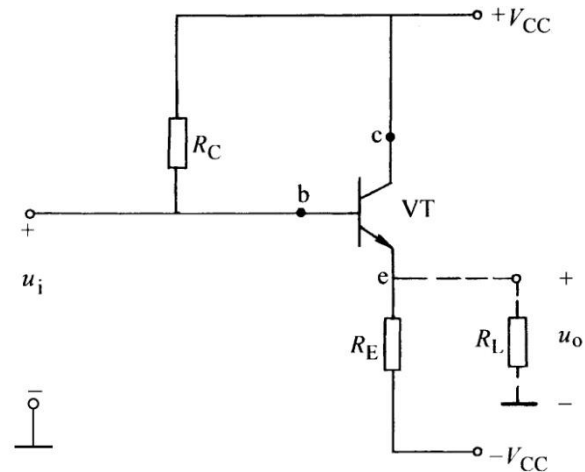
动态时：

$$(U_{om})_M \approx V_{CC}$$

$$(I_{om})_M \approx I_{CQ}$$

$$(P_o)_M = \frac{(U_{om})_M}{\sqrt{2}} \times \frac{(I_{om})_M}{\sqrt{2}} \approx \frac{1}{2} V_{CC} I_{CQ}$$

电子学教研室



功率三角形



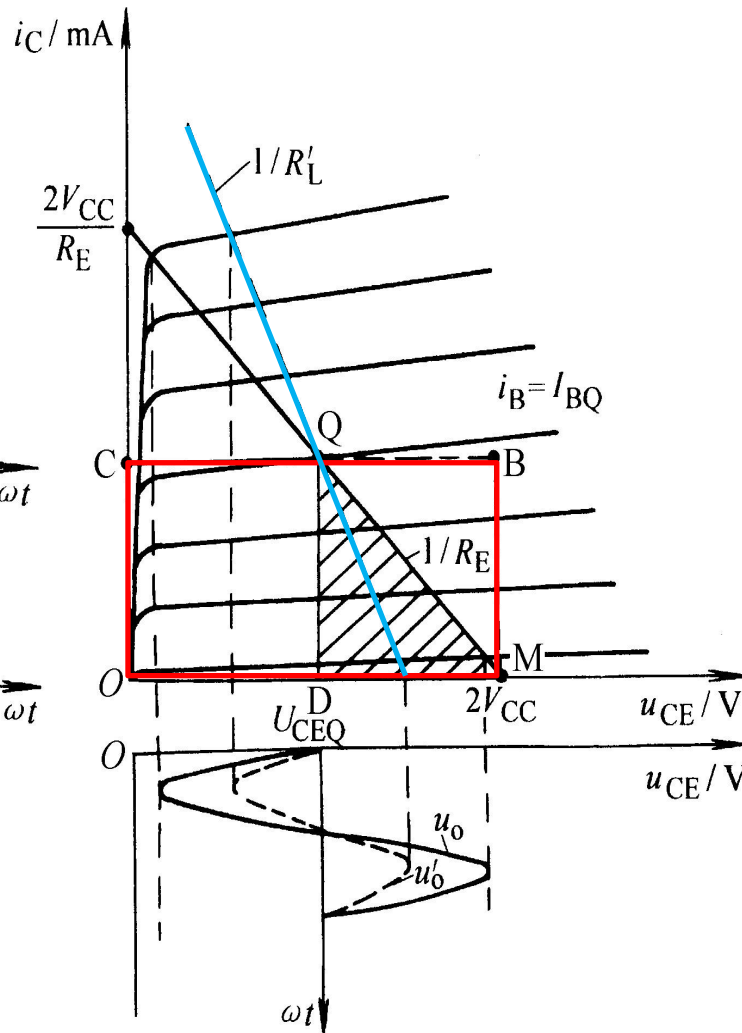
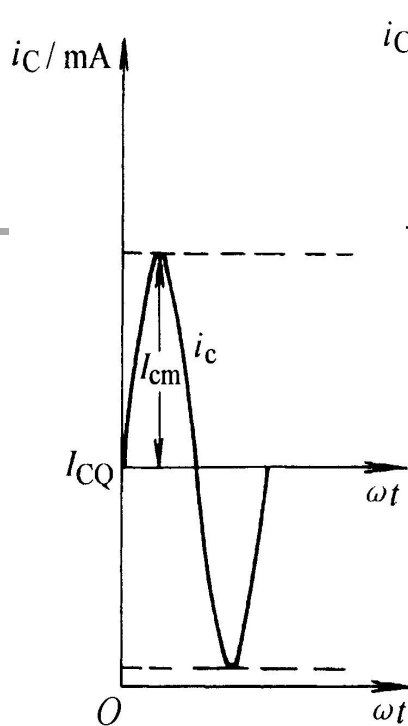
$$(P_o)_M \approx \frac{1}{2} V_{CC} I_{CQ}$$

两个直流电源提供功率

$$P_{VCC} = 2V_{CC} I_{CQ}$$

最大效率

$$\eta_M = \frac{(P_o)_M}{P_{VCC}} = \frac{1}{4} = 25\%$$



接上负载电阻，调节晶体管的静态工作点Q不变，直流电源输入功率不变，输出电压 $u_o'$ ，输出功率下降，效率变低。

甲类功放电路中，尽管静态条件下输出功率为零，电源仍然提供功率。这些功率全部消耗在器件（和电阻）上，并转换为热能的形式消耗。**静态工作电流是造成效率低的主要原因。**在理想状态下，甲类功放电路的最高效率只能达到50%。

降低静态电流，提高电路效率是需要解决的主要问题。**乙类和甲乙类**功放电路可以有效地提高功放电路的效率。

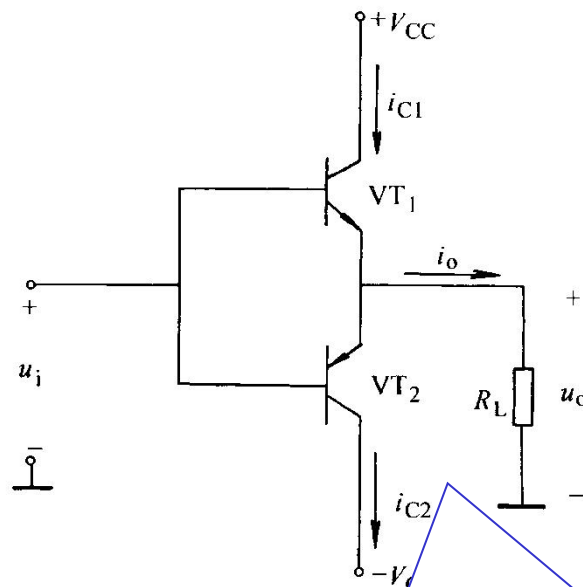
## 5.3 互补对称推挽功率放大电路

### 乙类互补对称功率放大电路

用两个工作在乙类状态的晶体管（NPN和PNP参数对称），NPN工作在信号的正半周，PNP工作在负半周，负载上得到一个完整的波形。

输出电压跟随输入电压。

这种工作方式称为“**互补推挽**”



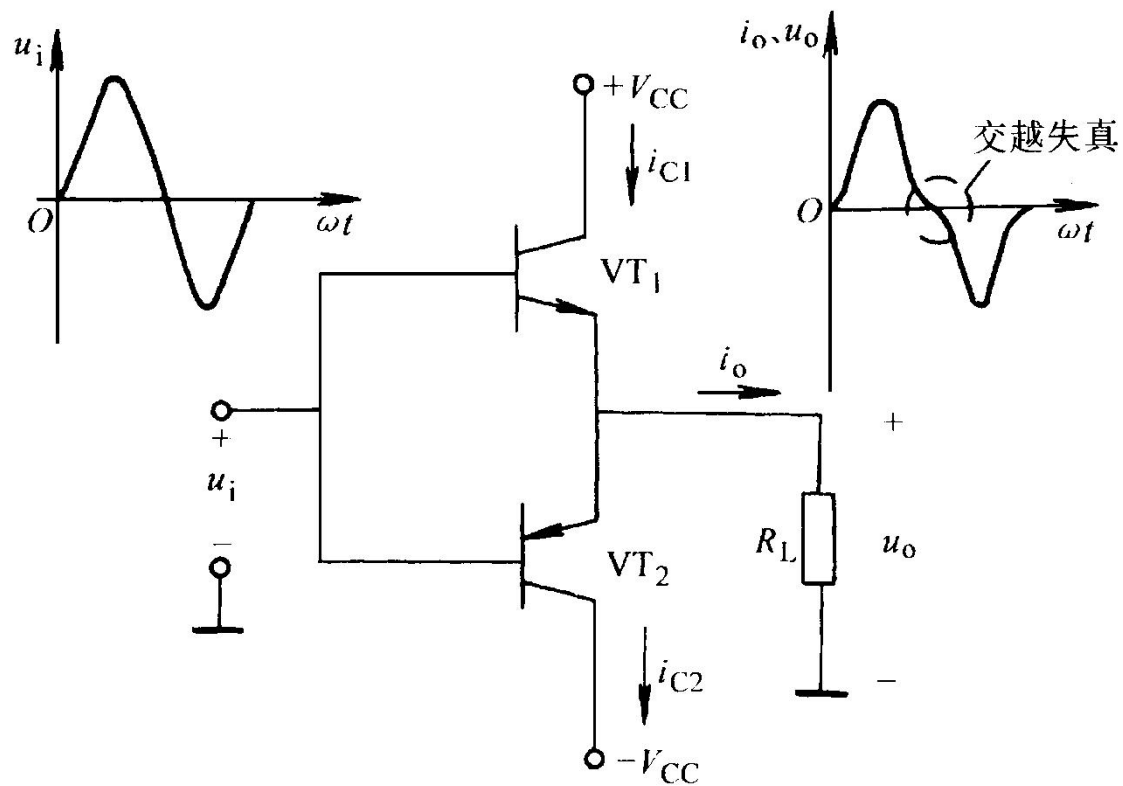
又称OCL电路  
(OCL: Output  
Capacitorless)

# 甲乙类互补对称功放电路

## 1. 交越失真及其消除

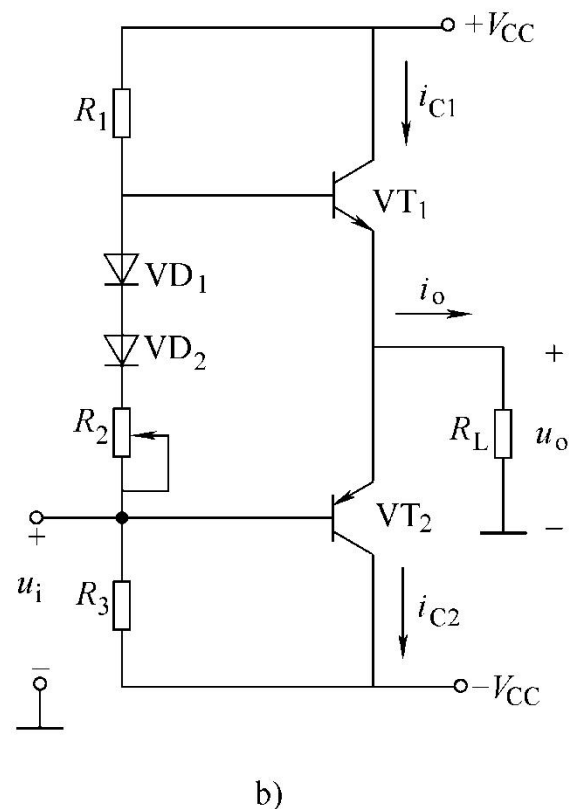
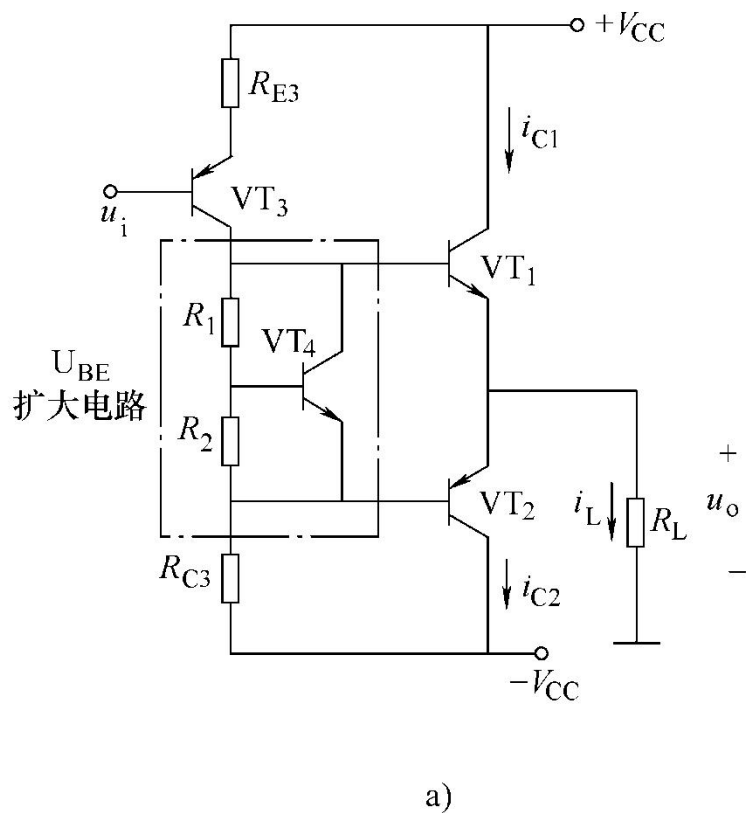
晶体管性能不对称和晶体管输出特性的非线性会引起失真。

特别是晶体管输入特性的非线性会引起交越失真。



加一定的静态偏置，消除交越失真

## 2. 甲乙类互补对称功放电路



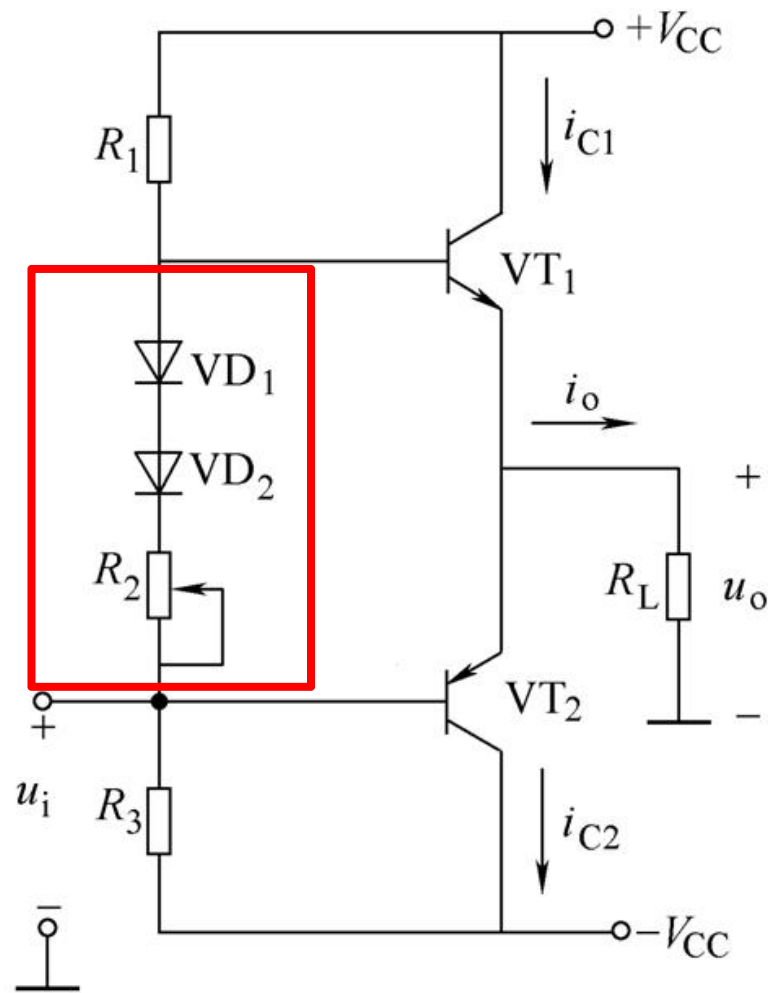
**甲乙类**工作时无论输入电压为何值，晶体管  $VT_1$  和  $VT_2$  总有一个导通，从而消除了交越失真

增加 $R_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 使两只晶体管静态时均处于微导通状态，用以消除交越失真。

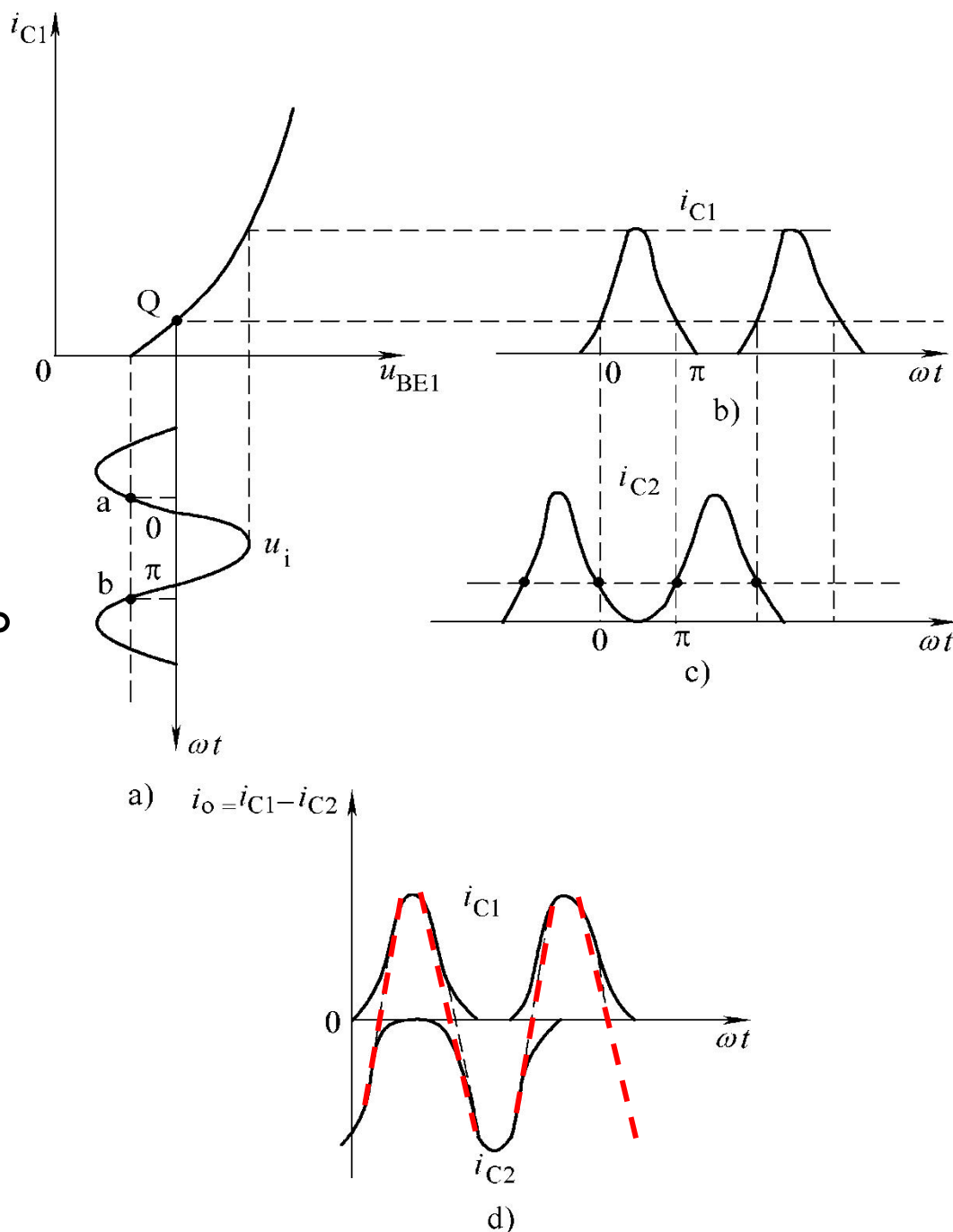
静态时通过调节电阻使E点电位 $U_E=0V$ 。

动态时 $u_{B1} \approx u_{B2} \approx u_i$  ( $R_2$ 及 $D_1$ 、 $D_2$ 动态电阻很小)

$u_o$ 跟随 $u_i$ 。



每一个晶体管在信号的一周期内导通时间大于半周，  
导通角  $180^\circ < \theta < 360^\circ$   
晶体管工作在“**甲乙类**”工作状态。



# 互补对称功率放大电路的分析计算

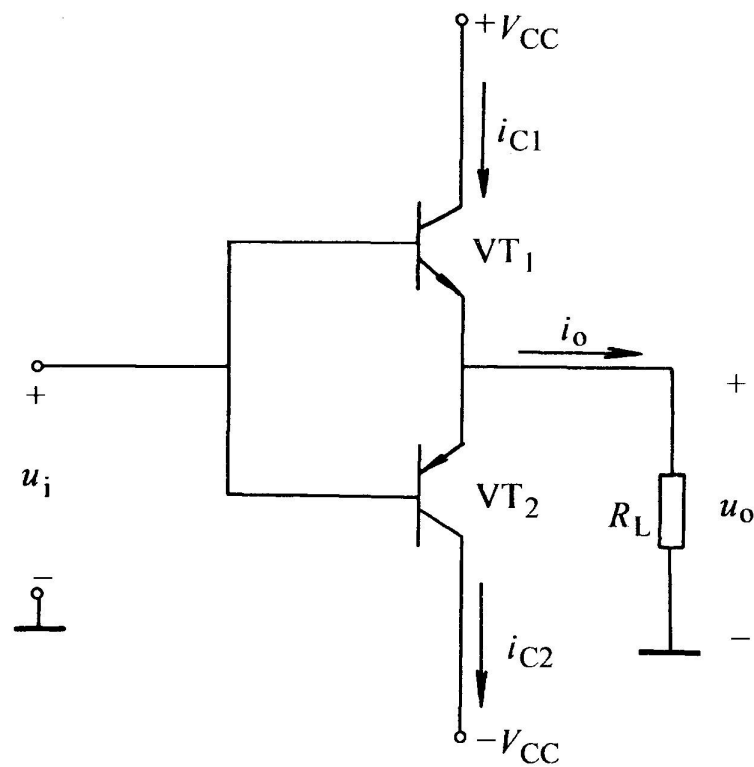
$u_i > 0$   $VT_1$  工作

$u_i < 0$   $VT_2$  工作

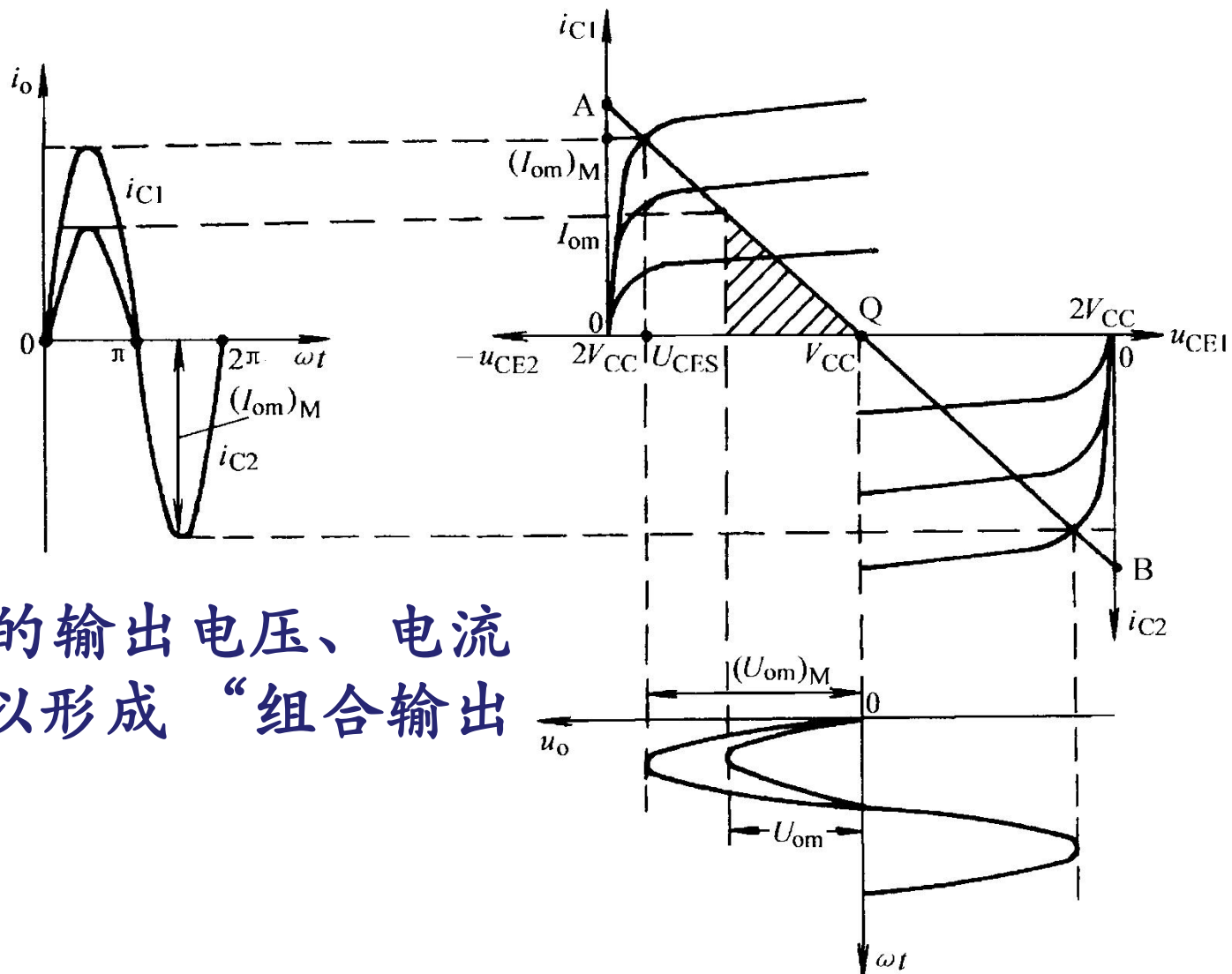
静态工作点:

$$I_{BQ} = 0 \quad I_{CQ} = 0$$

$$U_{CEQ1} = +V_{CC} = -U_{CEQ2}$$







$VT_1$ 和 $VT_2$ 的输出电压、电流的波形可以形成“组合输出特性”

若忽略饱和压降 $U_{CES}$ ，输出电压的最大幅值为 $V_{CC}$ 。

## 1. 输出功率 $P_o$ 及最大不失真输出功率 $(P_o)_M$

电路的输出功率：
$$P_o = U_o I_o = \frac{1}{2} U_{om} I_{om} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

最大不失真输出功率：

不考虑管子饱和压降：

$$(P_o)_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{(U_{om})_M^2}{R_L} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

考虑管子饱和压降：

$$(P_o)_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{(U_{om})_M^2}{R_L} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{R_L}$$

## 2. 直流电源提供的平均功率 $P_{VCC}$

直流电源提供的平均功率：
$$P_{VCC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} i_C d(\omega t)$$

正、负电源的电流：
$$i_C = I_{om} \sin \omega t = \frac{U_{om}}{R_L} \sin \omega t$$

电源 $+V_{CC}$ 提供的平均功率：

$$P_{VCC+} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{CC} i_C d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{CC} \frac{U_{om}}{R_L} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_{CC} U_{om}}{\pi R_L}$$

电源提供的总平均功率：
$$P_{VCC} = \frac{2V_{CC} U_{om}}{\pi R_L}$$

### 3. 效率 $\eta$

交流输出功率和直流电源提供的平均功率之比  
效率

$$\eta = \frac{P_o}{P_{VCC}} \times 100\% = \frac{U_{om} I_{om} / 2}{2V_{CC} I_{om} / \pi} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}}$$

(功放电路的效率和正弦输入信号的幅值有关)

在理想情况下，最大的输出电压幅值为  $V_{CC}$ 。

互补功放电路的最大效率可达： $\eta_M = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$

## 4. 晶体管的选择

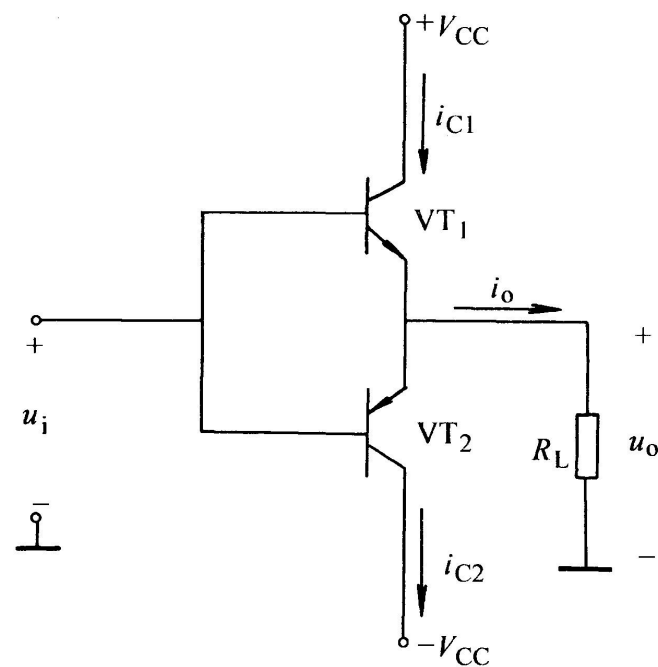
实用中根据晶体管所承受的**最大反向管压降**、**集电极最大电流**和**最大管耗**来选择晶体管。

(1) 最大反向管压降 $(U_{CE})_M$

$$(U_{EC})_M = 2V_{CC}$$

(2) 集电极最大电流 $I_{CM}$

$$I_{cM} \approx I_{eM} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$



### (3) 晶体管最大功耗 $(P_T)_M$

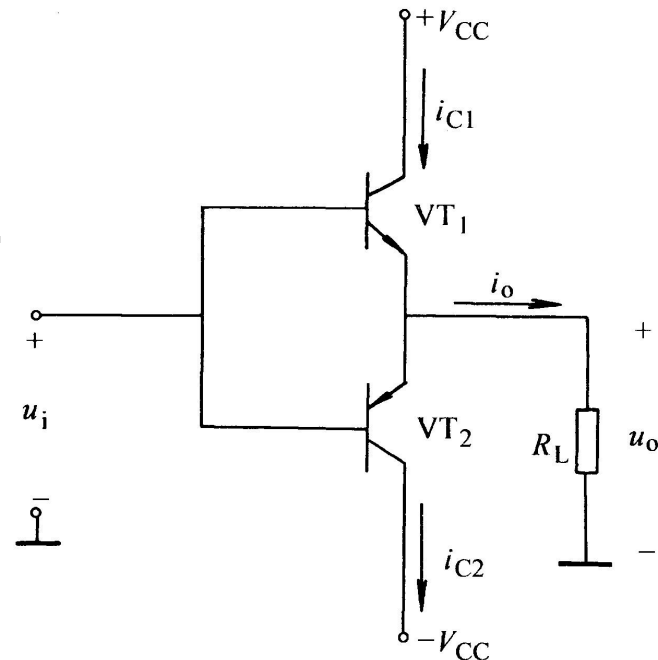
每个晶体管功耗  $P_T$ :

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

当  $U_{om} = \frac{2}{\pi} V_{CC} \approx 0.6 V_{CC}$  时

$$(P_T)_M = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$$

$$(P_T)_M = \frac{2}{\pi^2} (P_o)_M \Big|_{U_{CES}=0} \approx 0.2 (P_o)_M \Big|_{U_{CES}=0}$$

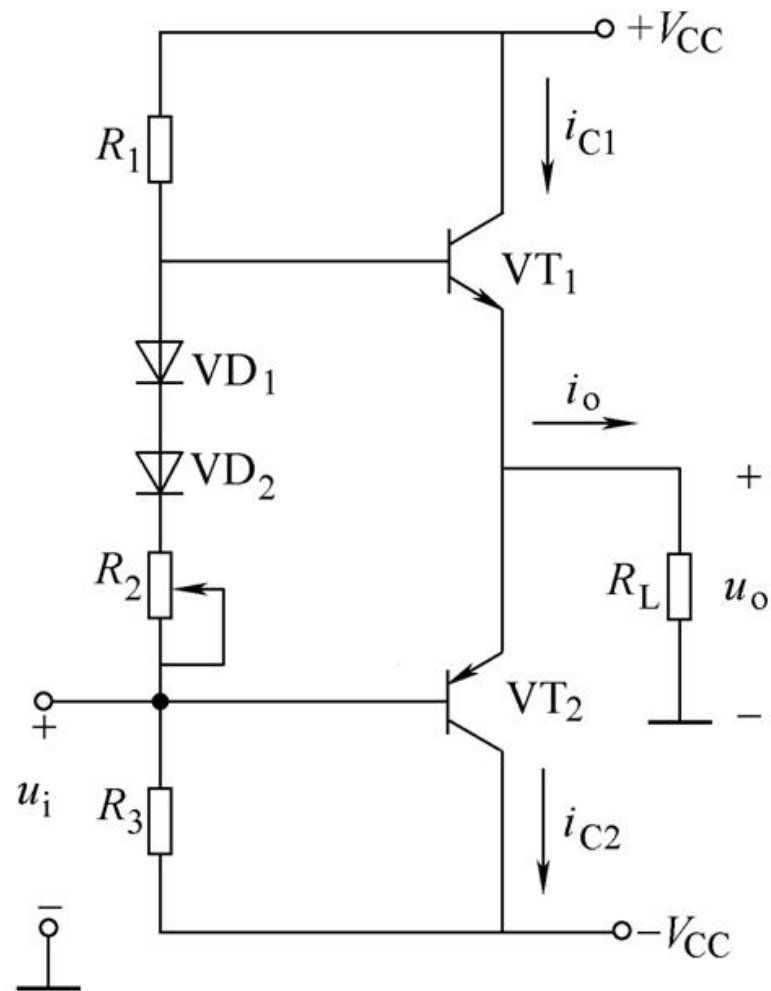
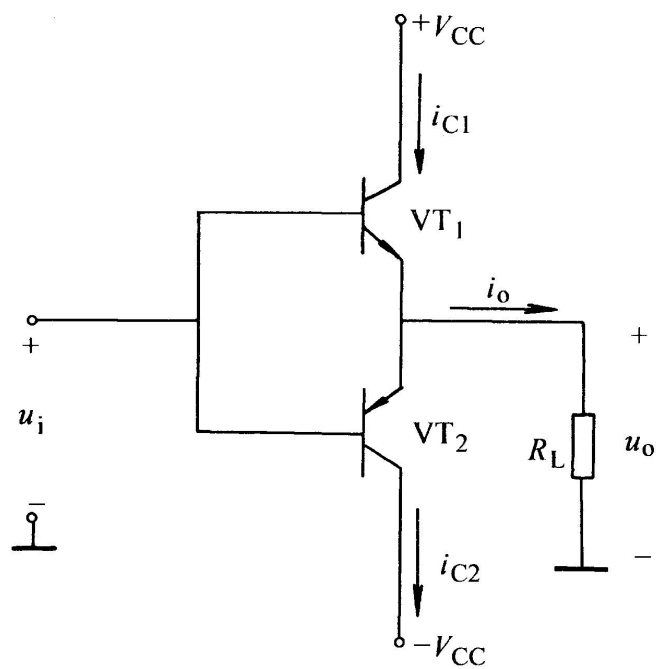


管耗最大时  
不是输出功率  
最大时。

## 晶体管的选择必须满足下列条件：

- (1) 晶体管的集电极最大耗散功率  $P_{CM} > (P_T)_M$
- (2) 晶体管的反向击穿电压  $U_{(BR)CEO} > 2V_{CC}$
- (3) 晶体管集电极最大工作电流  $I_{CM} > \frac{V_{CC}}{R_L}$

在选择晶体管时，针对其极限参数应留有一定的余量，并严格按照手册的要求安装散热片。

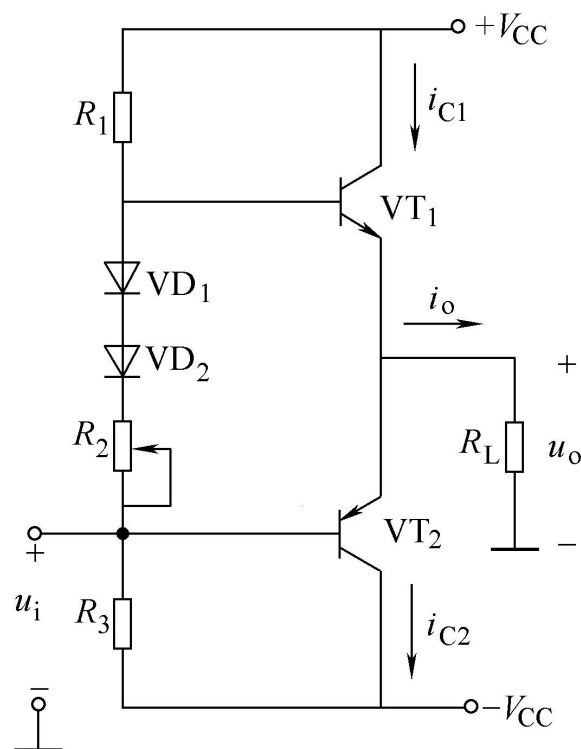




例甲乙类功放电路如图所示，

已知  $\pm V_{CC} = \pm 15V$   $R_L = 4\Omega$   $U_{CES} = 3V$

1. 求电路的最大不失真输出功率  $(P_O)_M$  以及此时的效率  $\eta$  和单管管耗  $P_T$ ；



$$\text{解: } (P_o)_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{R_L} = \frac{(15V - 3V)^2}{2 \times 4\Omega} = 18W$$

$$P_T = \frac{1}{R_L} \left( \frac{V_{CC} U_{om}}{\pi} - \frac{U_{om}^2}{4} \right) \approx 5.33W$$

$$\eta = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{12}{15} = 62.8\%$$

2. 若功率管的极限参数为  
 $P_{CM}=10W$ ,  $I_{CM}=5A$ ,  
 $U_{(BR)CEO}=40V$ 。判断功率管是  
 否能安全工作?

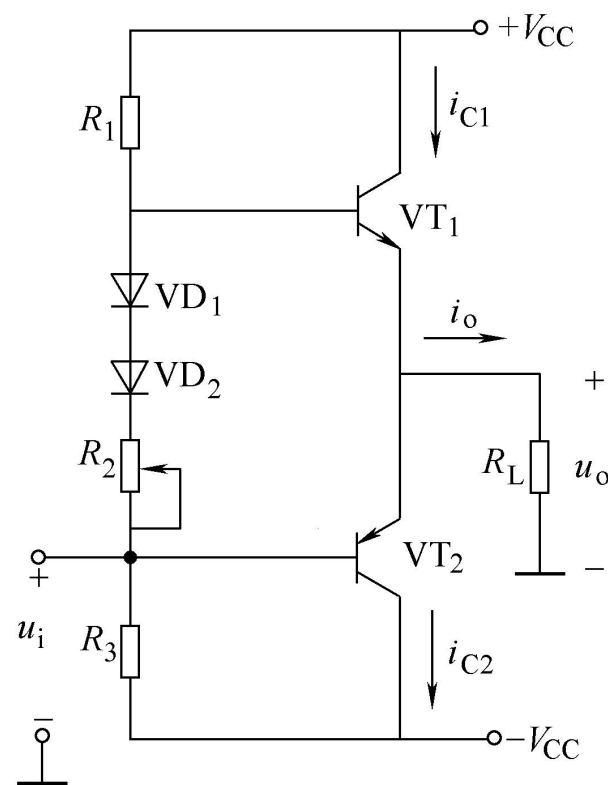
$$(U_{EC})_M = 2V_{CC} = 30V$$

$$(I_{om})_M = \frac{V_{CC}}{R_L} = 3.75A$$

$$(P_T)_M \approx 0.2(P_o)_M \Big|_{U_{CES}=0} = 0.2 \times \frac{15^2}{2 \times 4} = 5.625W$$

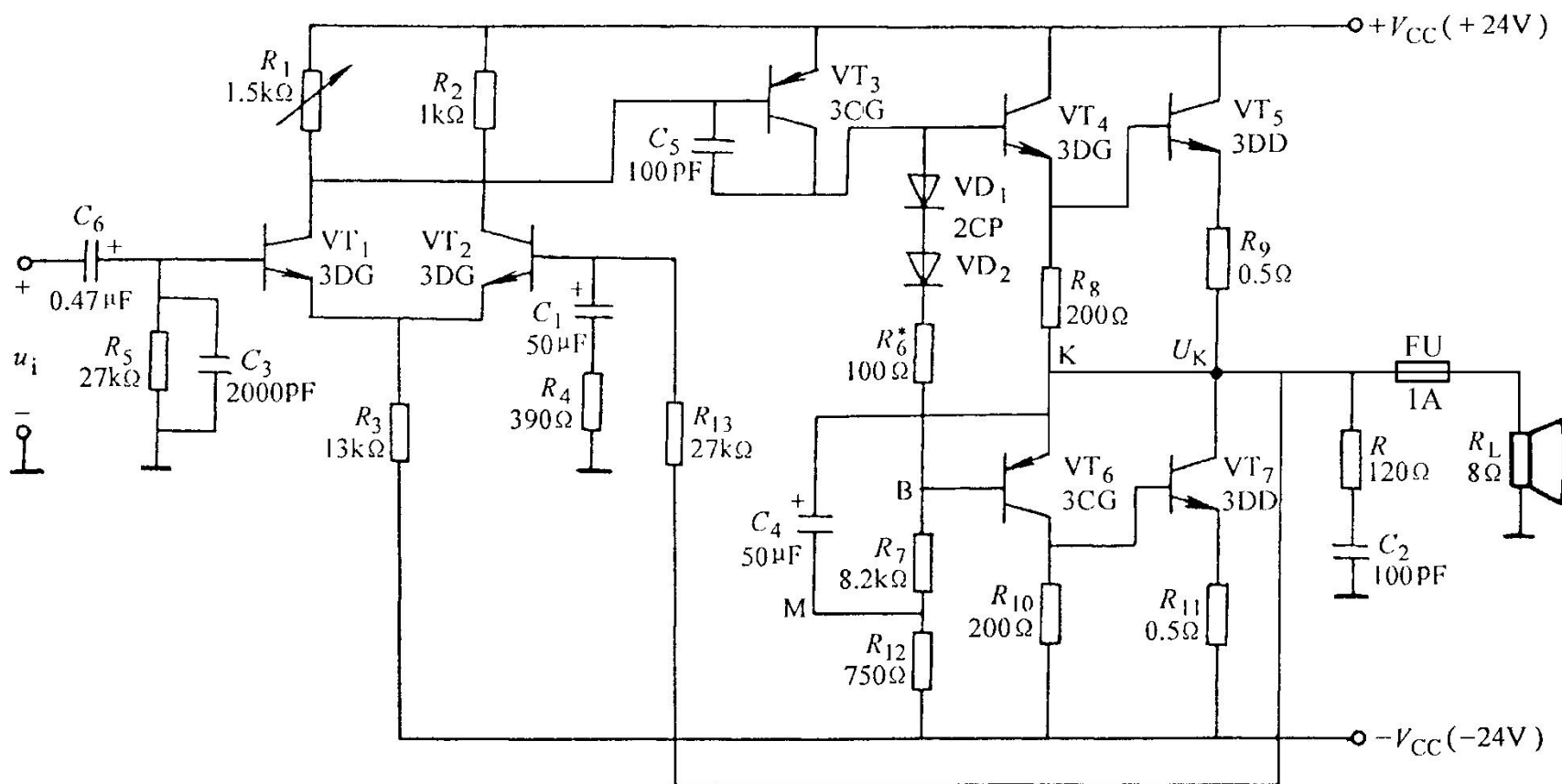
$$(U_{EC})_M < U_{(BR)CEO} \quad (I_{om})_M < I_{CM} \quad (P_T)_M < P_{CM}$$

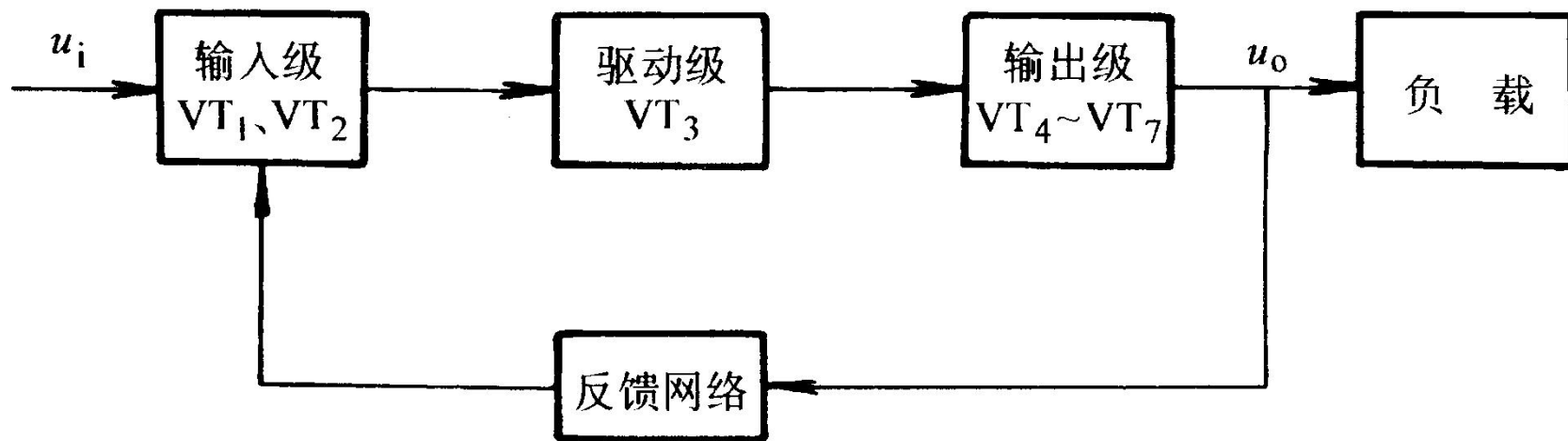
所以功率管能够安全工作。



## 5.4 实际的功率放大电路

### OCL准互补功率放大电路



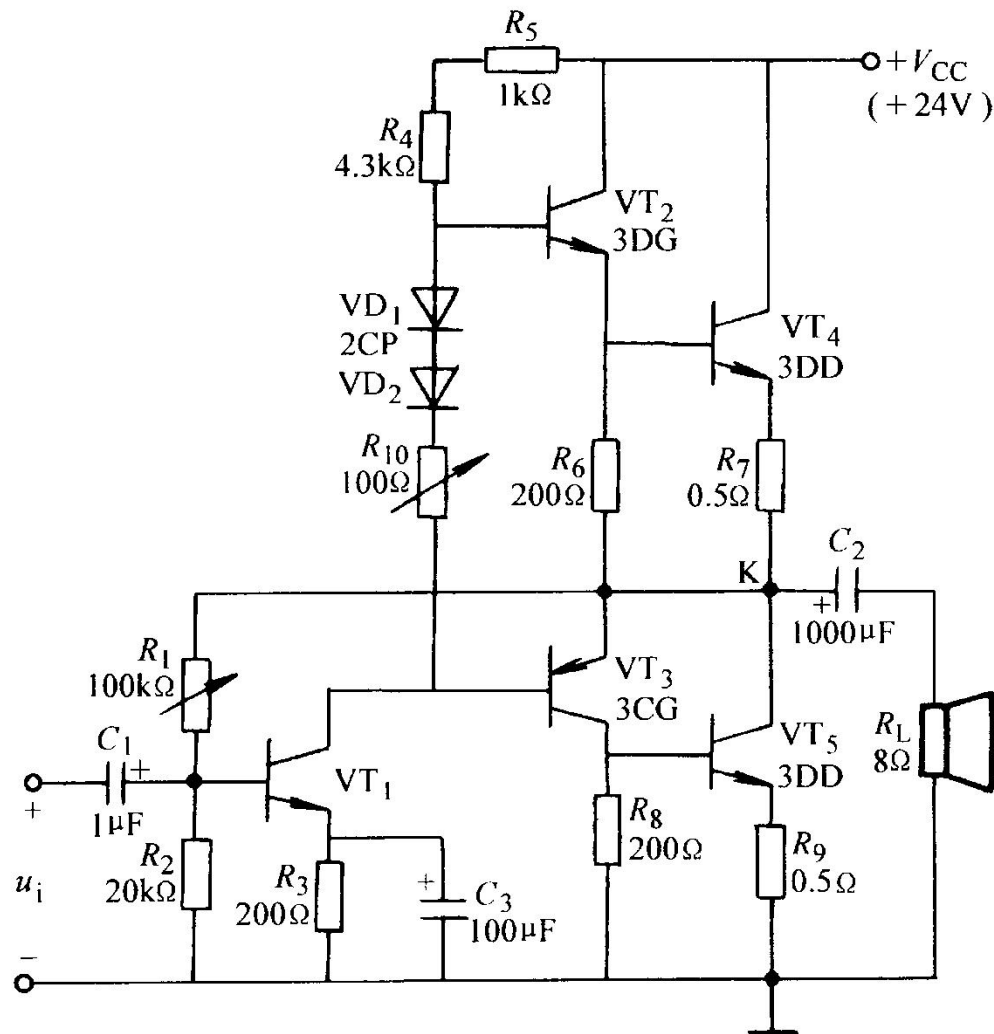


引交流负反馈以减小非线性失真。

# 单电源供电的OTL功率放大电路

OTL: Output Transformerless.

工作原理与OCL  
电路相似。



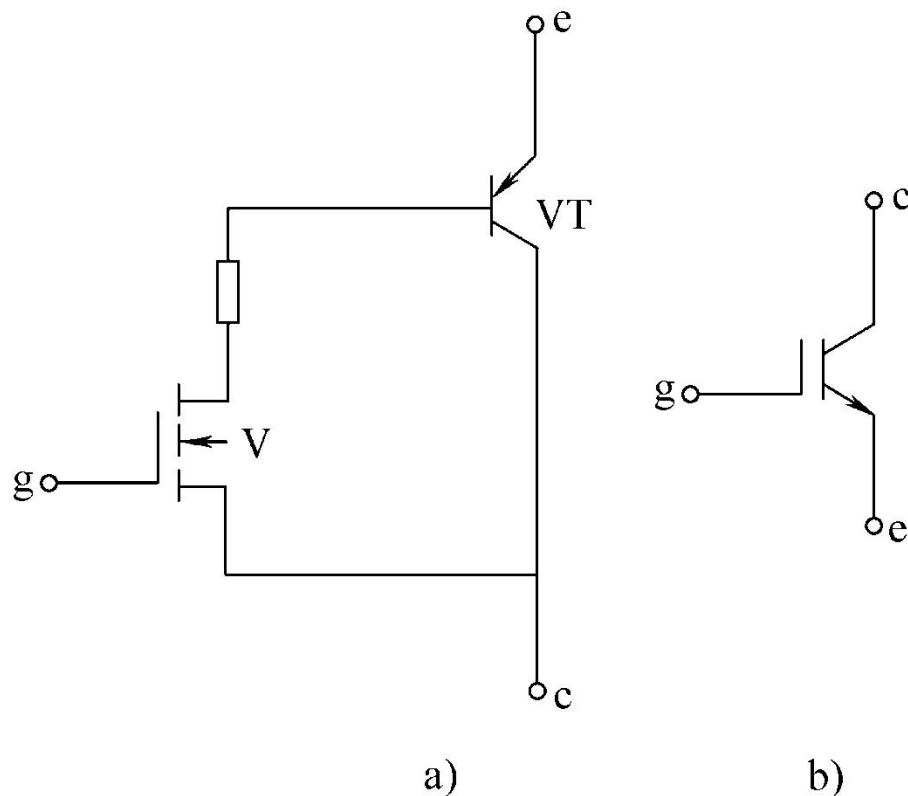
## 5.5 功放电路晶体管的散热和二次击穿

## 5.6 其他功率电子器件

(自学了解)

# 绝缘栅双极型晶体管IGBT

输入控制部分为MOSFET，输出级为双极型晶体管，它兼有MOSFET和双极型管的优点：



输入阻抗高、电压控制、驱动功率小、开关速度快、工作频率高、饱和压降低、输出电流电压大。

## 5.7 集成功放电路及其应用

集成功放电路发展迅速应用广泛。具有各种保护功能（如过压保护、过热保护、负载短路保护、电源浪涌过冲电压保护等等）和静噪声抑制、滤波功能等。

常用型号有：LM386、TDA2006、LH0101



LM386是一种音频集成功放，具有自身功耗低、更新内链增益可调整、电源电压范围大、外接元件少和总谐波失真小等优点的功率放大器，广泛应用于录音机和收音机之中。

NS产品。

TDA2006 为12W的音频放大器

ST（意法半导体）公司产品

LH0101 大功率运算放大器

NS产品

## 基本要求

掌握：

OCL互补功率放大电路组成及工作原理。

(重点图5-4 b)

最大输出功率、效率的分析计算。

功率管的选择。

## 补充内容

### 关于甲类功率放大电路的效率

25%

#### 甲类功率放大电路

50%

#### 滑动甲类放大器

输出晶体管的工作点随输入信号的大小而自动的成正比例的在 $I_c$ 与 $I_C'$ 之间变化的电路，就叫做滑动甲类功率放大器

## 其他功率放大电路

### 数字音频 (D类) 功率放大器

将输入模拟音频信号或PCM数字信息变换成PWM(脉冲宽度调制)或PDM(脉冲密度调制)的脉冲信号,然后用PWM或PDM的脉冲信号去控制大功率开关器件通/断音频功率放大器,也称为开关放大器。

效率高

体积小

低失真

外围器件少

T类功率放大器

采用Digital Power Processing (DPP) 技术

用于音频功率放大

动态范围宽、高保真