

# 第八章

## 功率放大电路

## 8.1 功放率放大器的特点与分类

## 8.3 互补推挽乙类功率放大电路

### 8.3.1 双电源互补推挽乙类功率放大电路

### 8.3.2 单电源互补推挽乙类功率放大电路 (OTL电路: Output Transformerless)

**要求：掌握理想乙类推挽功率放大器的分析方法和性能特点。**

## 8.1 功放率放大器的特点与分类

**功率放大电路 (简称功放):** 是一种以输出较大功率为目的的放大电路。

### 1. 特点

(1) 工作在大信号状态。

(2). 输出功率尽可能大

(3). 提高能量转换效率 $\eta$ ,  $\eta = \frac{P_o}{P_E} \times 100\%$

$P_o$ : 负载上得到的交流功率。

$P_E$ : 电源提供的直流功率。

(4). 非线性失真要小

(5). 功放器件的安全问题, 参数不能超过功放管的极限值。

(6). 分析方法以图解法为主。



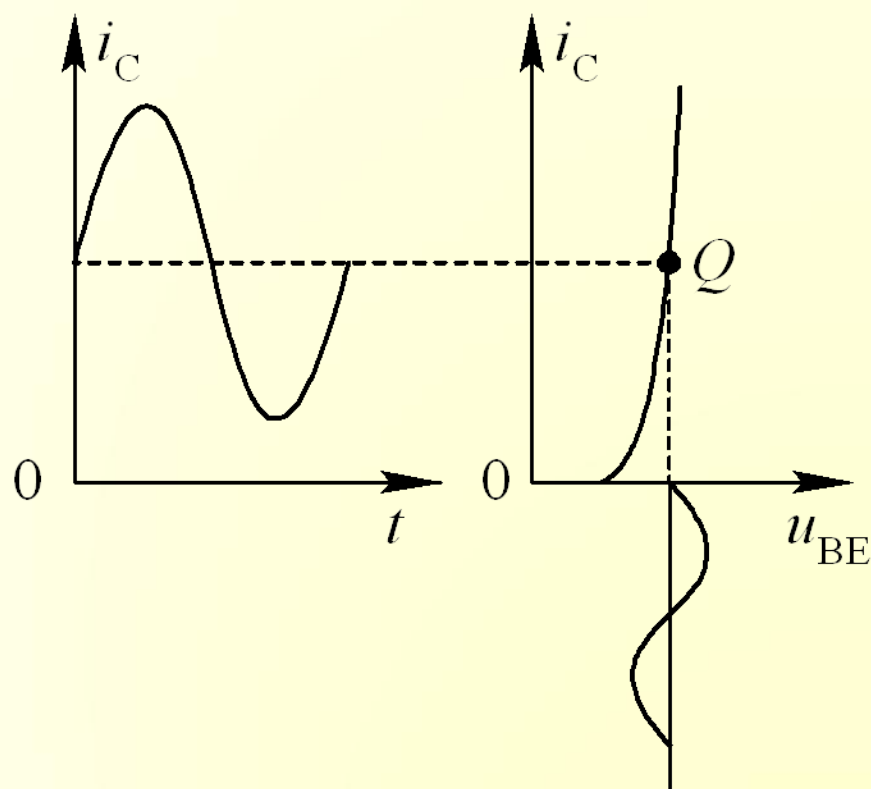
功率放大电路与电压放大电路的共同之处是都放大功率。

一般放大器与功率放大器的区别为：

	一般放大器	功率放大器
技术要求	$A_u$ 、 $R_i$ 、 $R_o$	$P_{Lm}$ 、 $\eta$ 、非线性失真
工作状态	小信号状态	大信号状态
分析方法	小信号 等效电路分析法	图解法

## 2. 工作状态分类

甲类（A类）：工作点Q位于放大区，信号在 $360^\circ$  ( $2\pi$ ) 内变化，管子均导通。导通角=  $180^\circ$

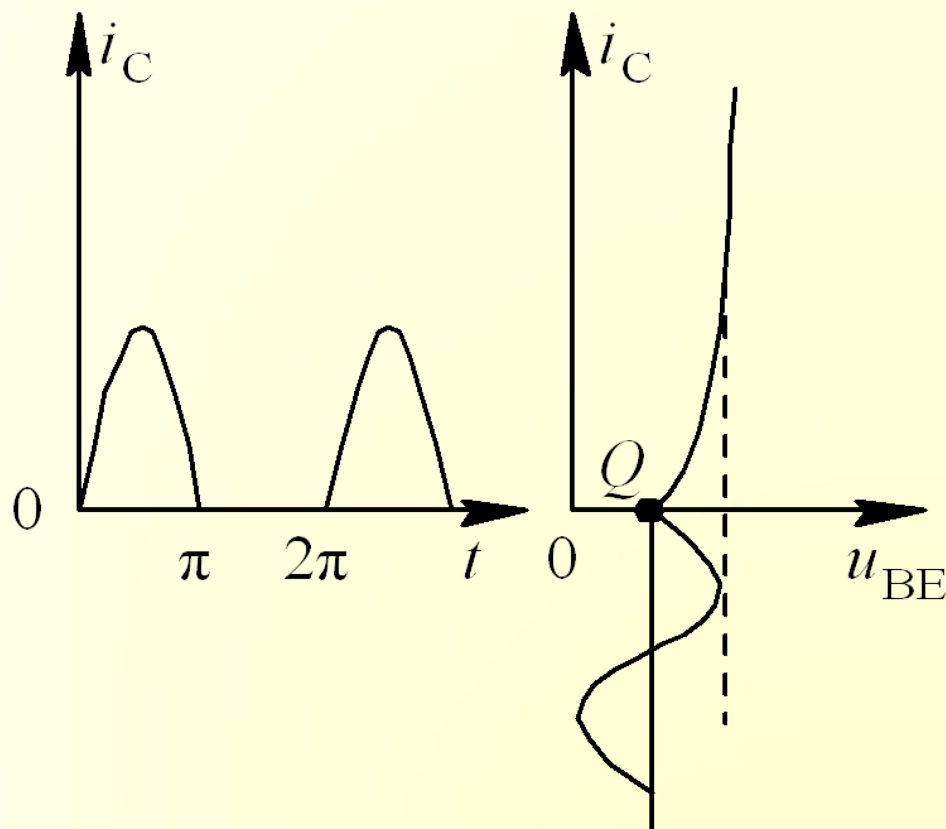


非线性失真小，但能量转换效率太低。理想情况下：

$$\eta = 50\%$$

乙类（B类）：工作点Q选在截止点( $U_{BEQ}=U_{BE(on)}$ ,  $I_{CQ}=0$ ),  
管子只有半周导通，另外半周截止。

导通角=  $90^\circ$

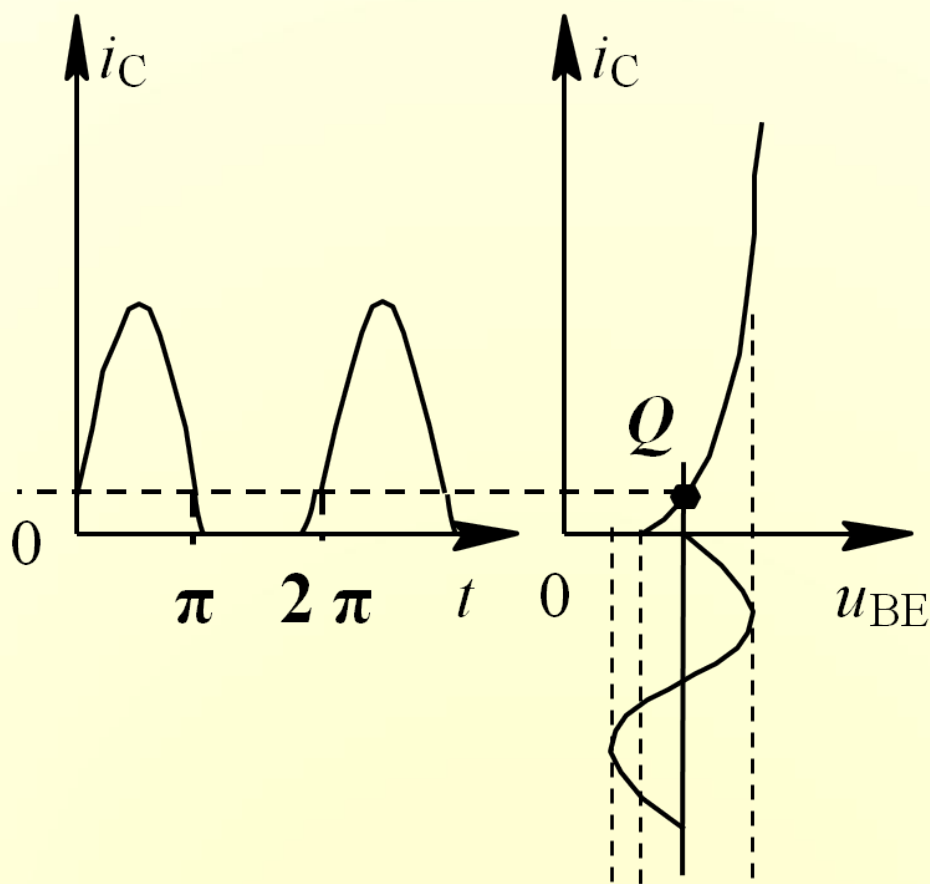


非线性失真大，但能量转换效率很高。可通过改进电路结构，减小非线性失真。理想情况下：

$$\eta = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

甲乙类（AB类）：工作点选在放大区中，但靠近截止区的地方，管子有半周以上是导通的。

$$90^\circ < \text{导通角} < 180^\circ$$

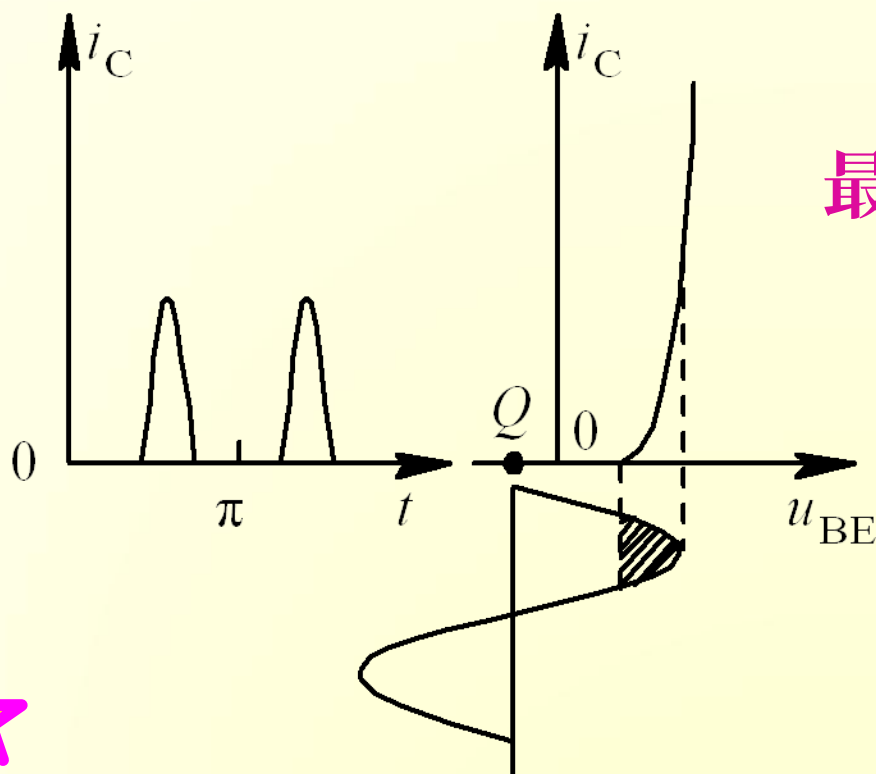


丙类（C类）：工作点Q点选在截止区以内，管子只有不到半周导通。

导通角 $<90^\circ$

最高效率可达85% ~ 90%

主要用于高频功放中。



有三种功率放大电路：A、甲类功率放大电路，B、甲乙类功率放大电路，C、乙类功率放大电路，功放管的**导通角**最小的电路是**C**。



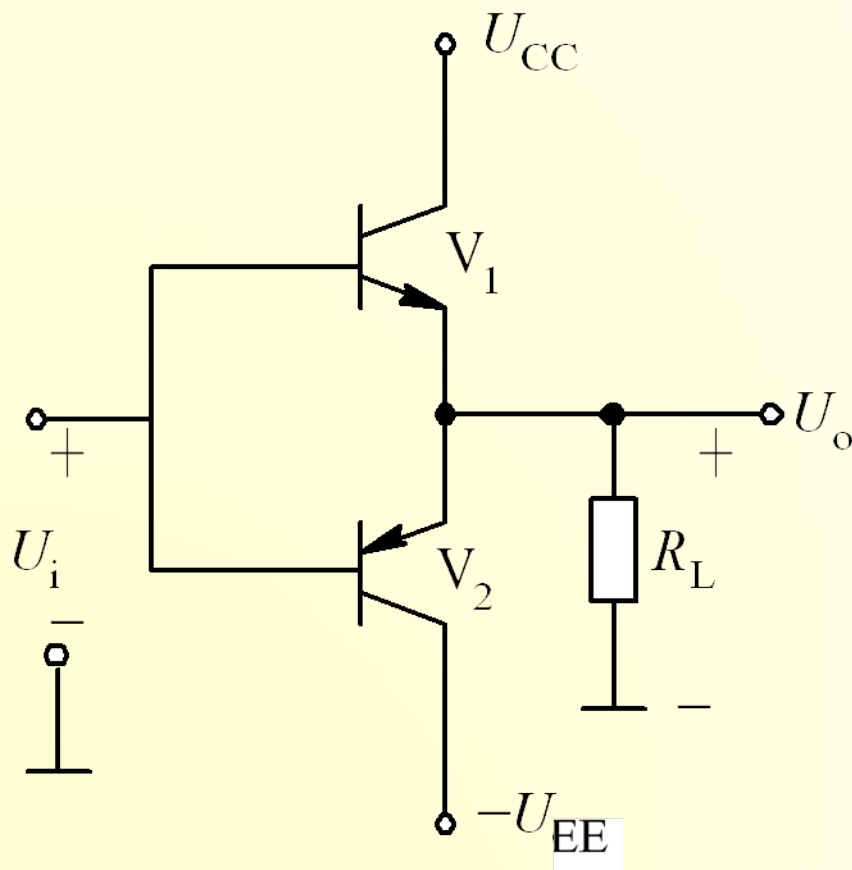
## 8.3 互补推挽乙类功率放大电路

### 8.3.1 双电源互补推挽乙类功率放大电路(OCL电路)

#### 1. 电路

电路的结构特点:

- (1). 由NPN型、PNP型三极管构成两个对称的射极输出器对接而成。
- (2). 双电源供电。



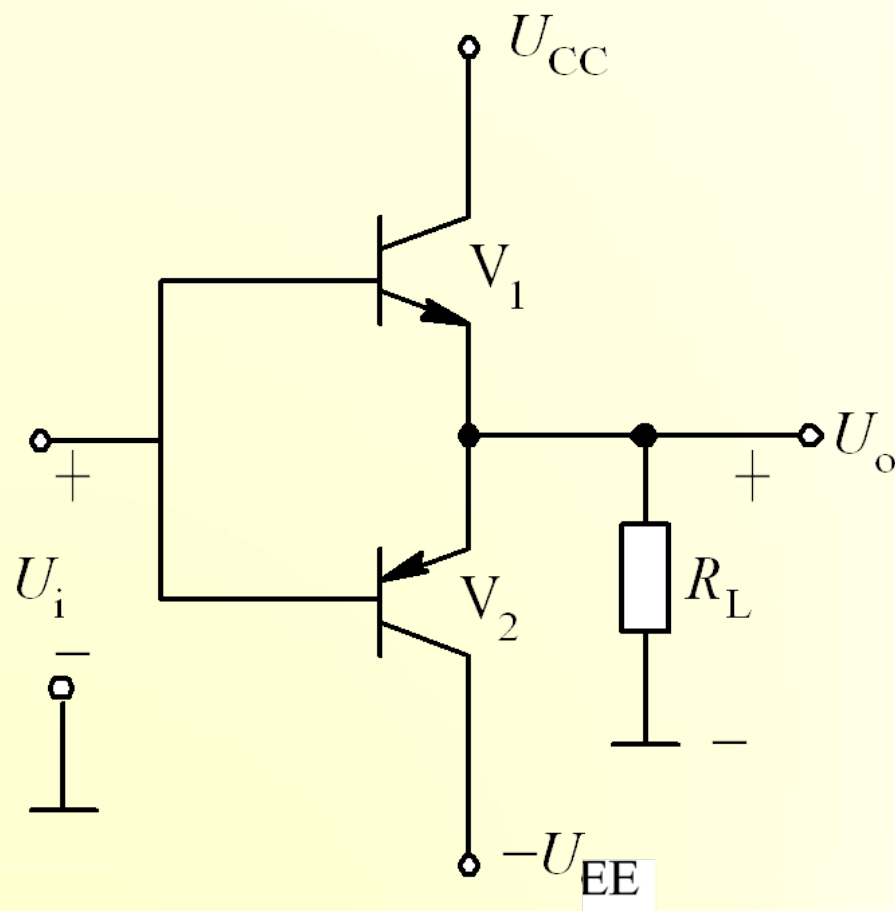
## 电路特点

(1) 电源静态功耗为零。

(2) 两只晶体管交替导通，  
合成一个不失真的输出信号。

(3) 带负载能力强。

晶体管都接成共集组态，  
输出阻抗低，  
带负载能力强。



## 静态分析:

$U_i = 0V \rightarrow V_1、V_2$ 均截止

$\rightarrow I_{CQ}=0, U_o = 0V$

## 动态分析: $r_{be}=0$

$U_i > 0V$

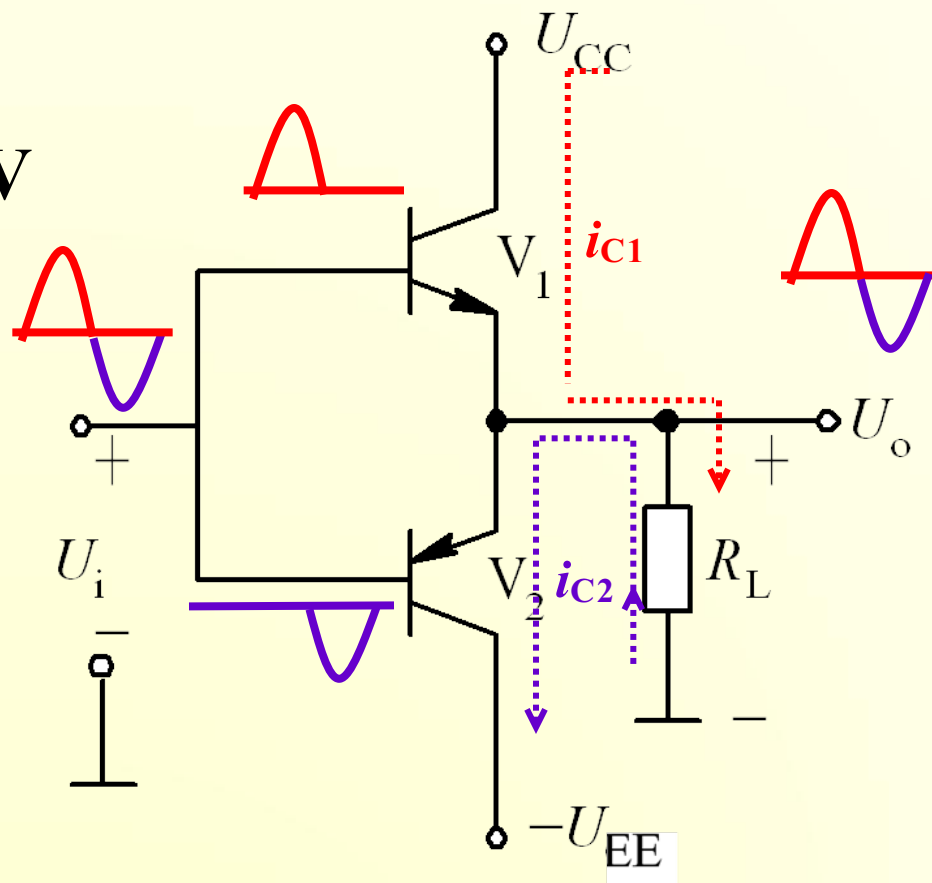
$\rightarrow V_1$ 导通,  
 $V_2$ 截止

$i_L = i_{C1};$   
 $u_o = u_i > 0$

$U_i < 0V$

$\rightarrow V_1$ 截止,  
 $V_2$ 导通

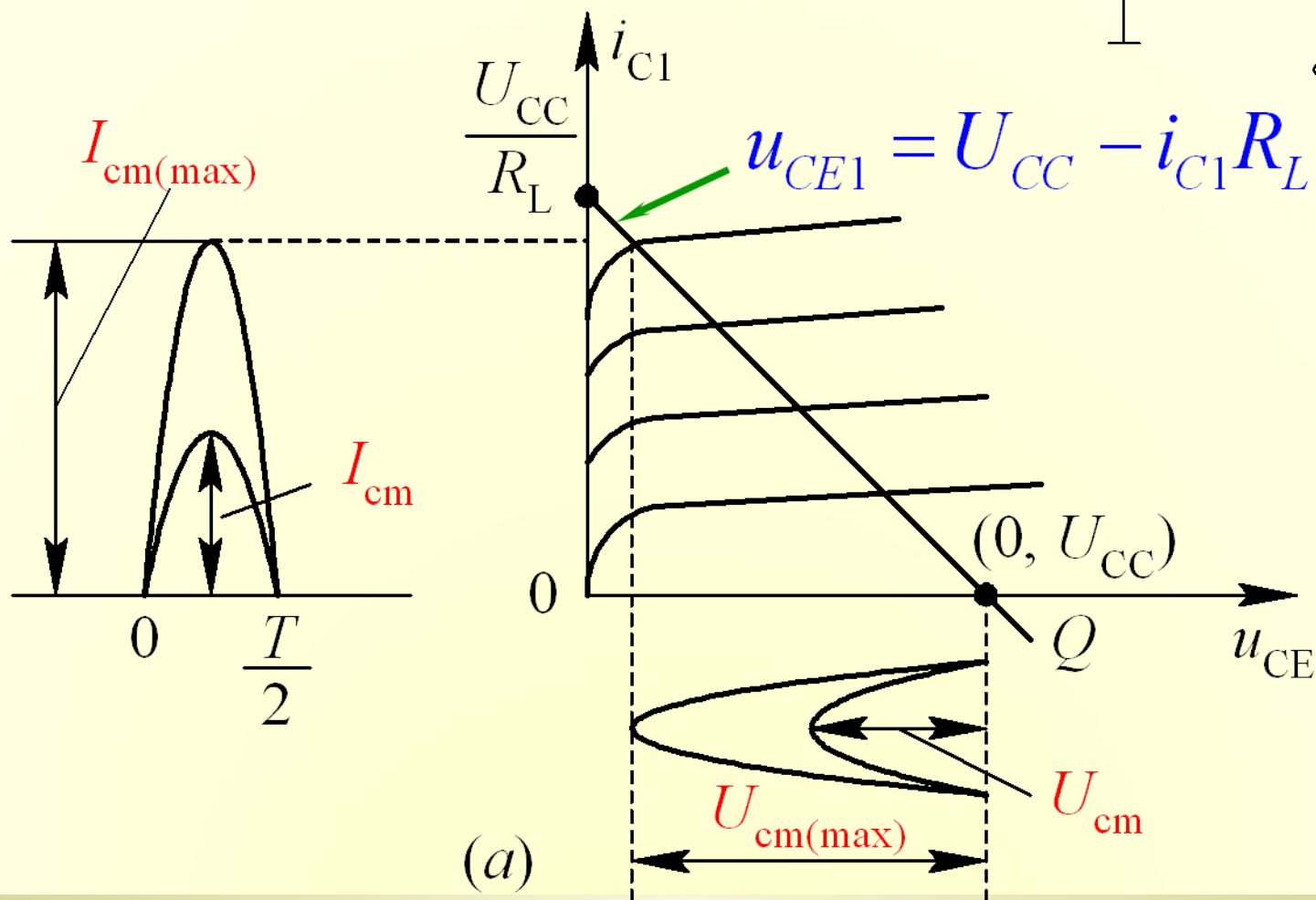
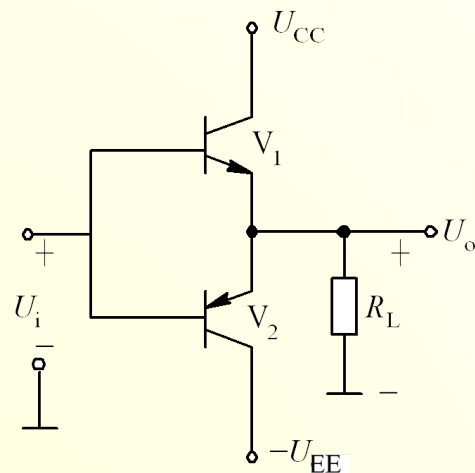
$i_L = i_{C2};$   
 $u_o = u_i < 0$



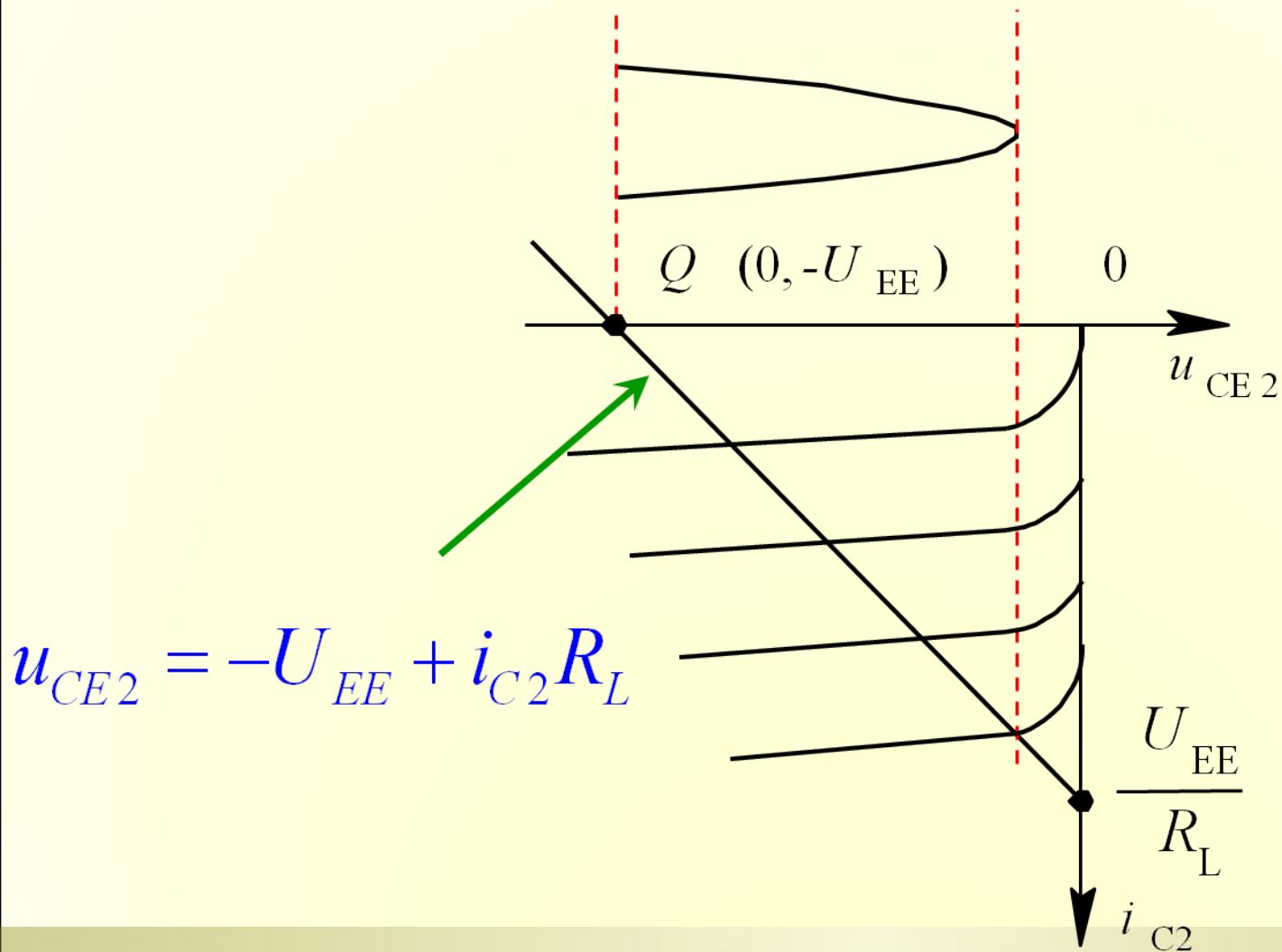
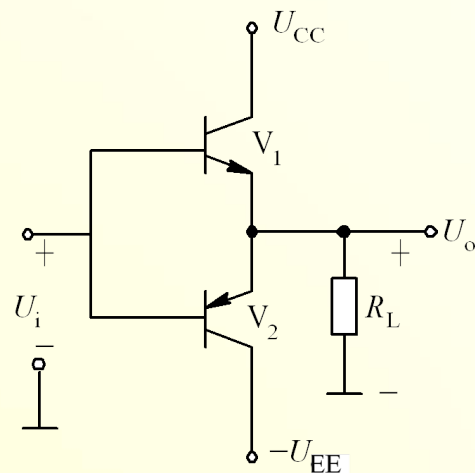
$V_1, V_2$ 两个管都只在半个周期内交替工作—推挽放大电路

## 2. 功率与效率的计算

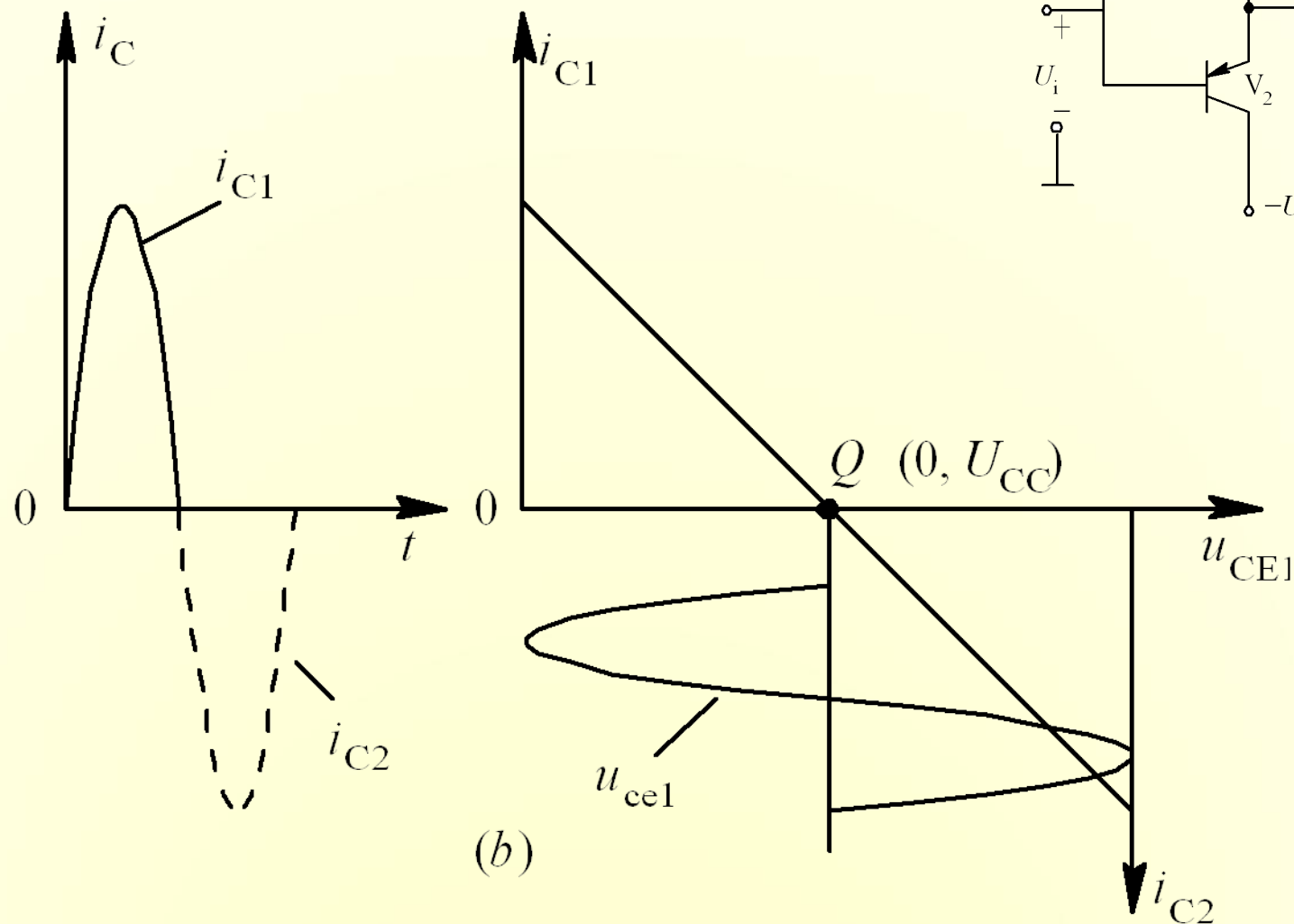
V1管的输出特性曲线及交流负载线:



# V2管的输出特性曲线及其交流负载线:



# 双管交流负载线的合成:



## 1) 输出交流功率 $P_o$

$V_1$ ,  $V_2$ 为半周工作, 但负载电流、电压却是完整的正弦波。

$$P_o = \frac{1}{2} I_{om} \cdot U_{om} = \frac{1}{2} I_{cm} \cdot U_{cem} = \boxed{\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}}$$

令 $\xi = \frac{U_{om}}{U_{CC}}$ —电压利用系数, 则  $P_o = \frac{1}{2} \frac{\xi^2 U_{CC}^2}{R_L}$

若忽略集电极饱和电压 $U_{CE(sat)}$ , 则最大 $\xi=1$ , 故最大

输出功率 $P_{om}$ 为  $P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$

## 2) 电源提供的功率

$$P_E = U_{CC} \cdot (i_{C1} \text{的直流分量}) + |U_{EE}| \cdot (i_{C2} \text{的直流分量})$$

$$= U_{CC} \cdot \frac{I_{c1m}}{\pi} + |U_{EE}| \cdot \frac{I_{c2m}}{\pi} = 2U_{CC} \frac{I_{cm}}{\pi} = \frac{2U_{CC}U_{om}}{\pi R_L}$$

当信号为零时，工作点接近于截止点， $I_{CQ}=0$ ，电源不提供功率；而随着信号的增大， $i_{C1}$ 增大，电源提供的功率也将随之增大。这点与A类功放有本质的差别。

若忽略集电极饱和电压， $U_{om(max)} \approx U_{CC}$ ，电源输出的最大功率为

$$P_{Em} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$



### 3)每管转换能量的效率 $\eta$

$$\eta = \frac{\frac{P_o}{2}}{\frac{P_E}{2}} = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}}{\frac{2}{\pi} \frac{U_{CC} \cdot U_{om}}{R_L}} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{om}}{U_{CC}} = \boxed{\frac{\pi}{4} \xi}$$

当输出信号最大， $\xi=1$ 时，效率达到最高：

$$\eta_m = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

可见，*B*类工作的效率远比*A*类的高。

#### 4) 每个管子损耗 $P_T$

$$P_T = \frac{P_E}{2} - \frac{P_o}{2} = \frac{U_{CC}}{\pi} \frac{U_{om}}{R_L} - \frac{1}{4} \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

可见，每个管子的损耗 $P_T$ 是输出信号振幅 $U_{om}$ 的函数。将 $P_T$ 对 $U_{om}$ 求导，可知

当 $U_{om} = \frac{2}{\pi} U_{CC}$ 时，每管的损耗最大：

$$\begin{aligned} P_{Tm} &= \frac{1}{R_L} \left[ \frac{U_{CC}}{\pi} \cdot \frac{2}{\pi} U_{CC} - \frac{1}{4} \left( \frac{2}{\pi} U_{CC} \right)^2 \right] = \frac{1}{\pi^2} \frac{U_{CC}^2}{R_L} \\ &= \frac{2}{\pi^2} P_{om} \approx 0.2 P_{om} \end{aligned}$$

### 3.选择功率管

(1)已知 $P_{om}$ 及 $R_L$ ，选 $U_{CC}$ ：

$$\text{根据 } P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}, \text{ 得}$$

$$U_{CC} \geq \sqrt{2P_{om}R_L}$$

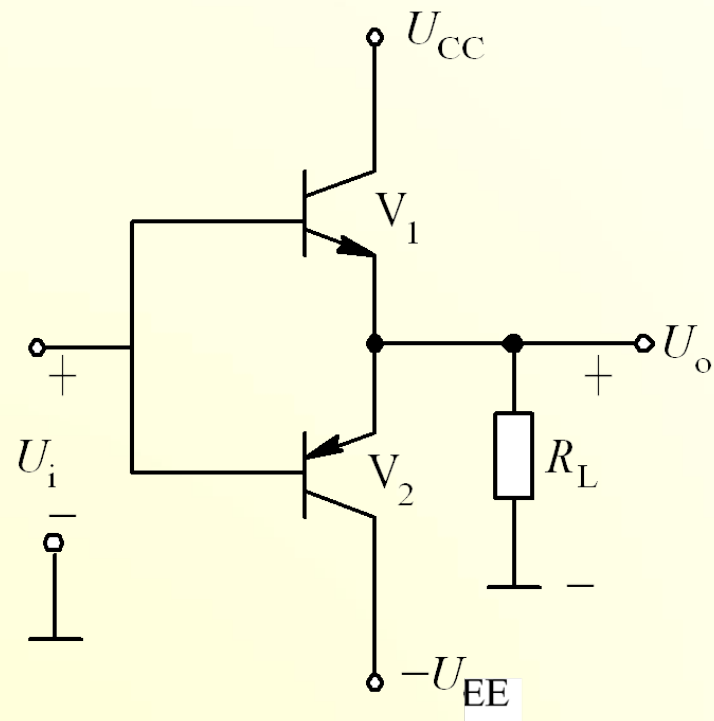
(2)已知 $P_{om}$ ，选择管子允许的最大功耗 $P_{TM}$ 。

$$\text{管子允许的最大功耗 } P_{TM} > 0.2P_{om}$$

例如：要求最大输出功率为10W时则只要选用两个额定管耗大于2W的管子就可以了。

### (3) 管子的击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

$$U_{(BR)CEO} > 2U_{CC}$$



### (4) 管子允许的最大集电极电流 $I_{CM}$

$$I_{CM} \geq I_{cm} = \frac{U_{CC}}{R_L}$$

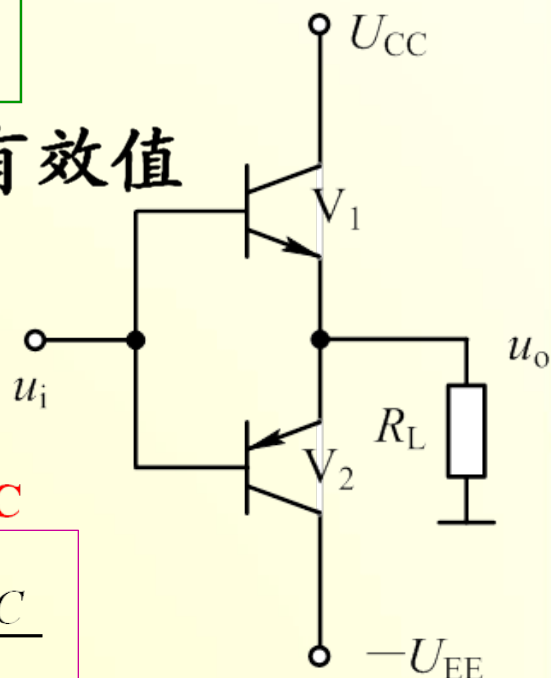
# ★ 双电源互补推挽乙类功率放大电路(OCL电路)

1. 电源供出功率  $P_E = 2U_{CC} \frac{I_{cm}}{\pi} = \frac{2U_{CC}U_{om}}{\pi R_L}$

$\because u_o = u_i, \therefore U_{om} = U_{im} = \sqrt{2}$  倍的输入信号的有效值

2. 输出交流功率  $P_o = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}$

当忽略饱和压降时,  $U_{om} \text{ max}$ , 对于此图  $U_{om} = U_{CC}$

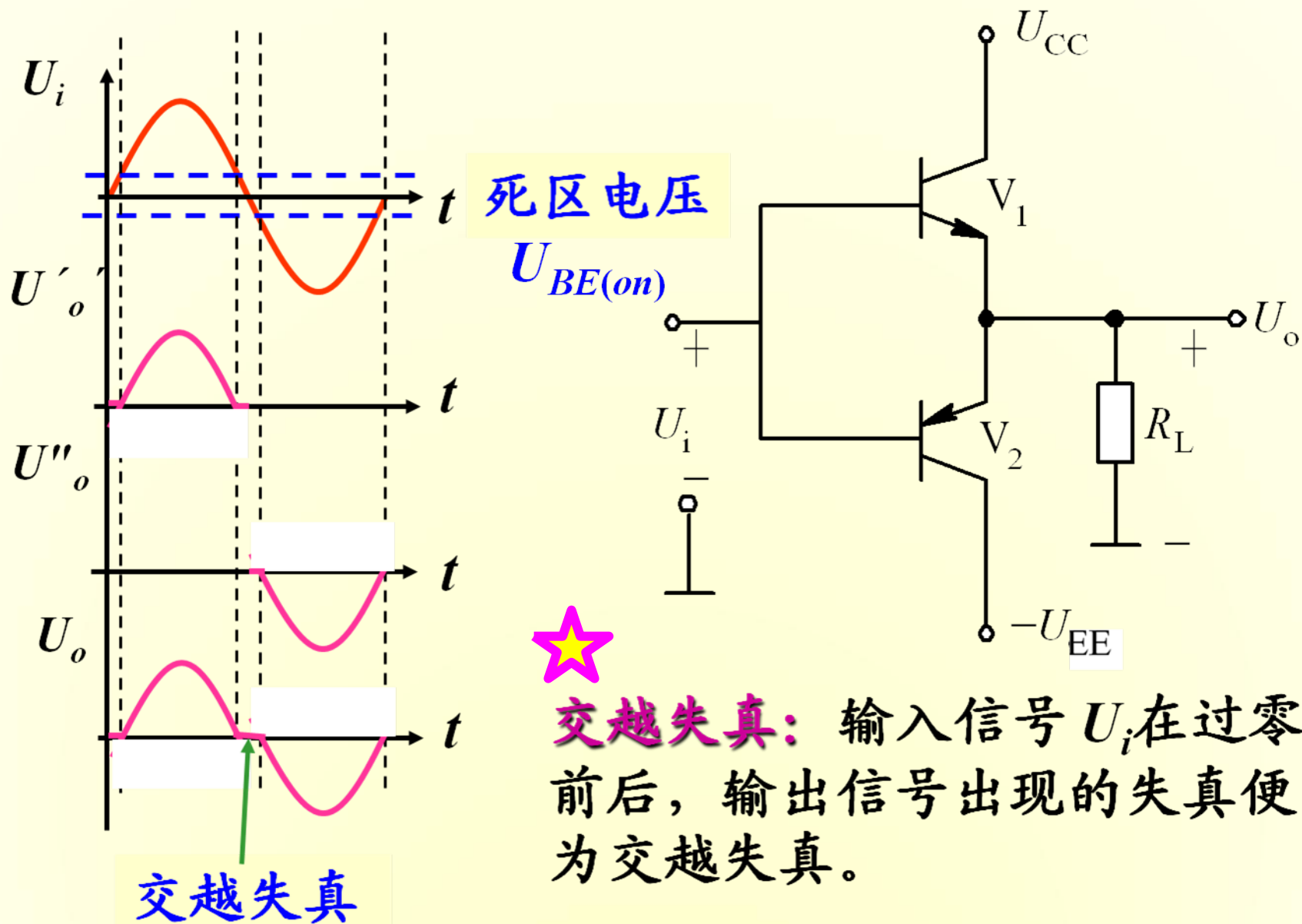


3. 效率  $\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{P_o}{P_E} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{om}}{U_{CC}} = \frac{\pi}{4} \xi$

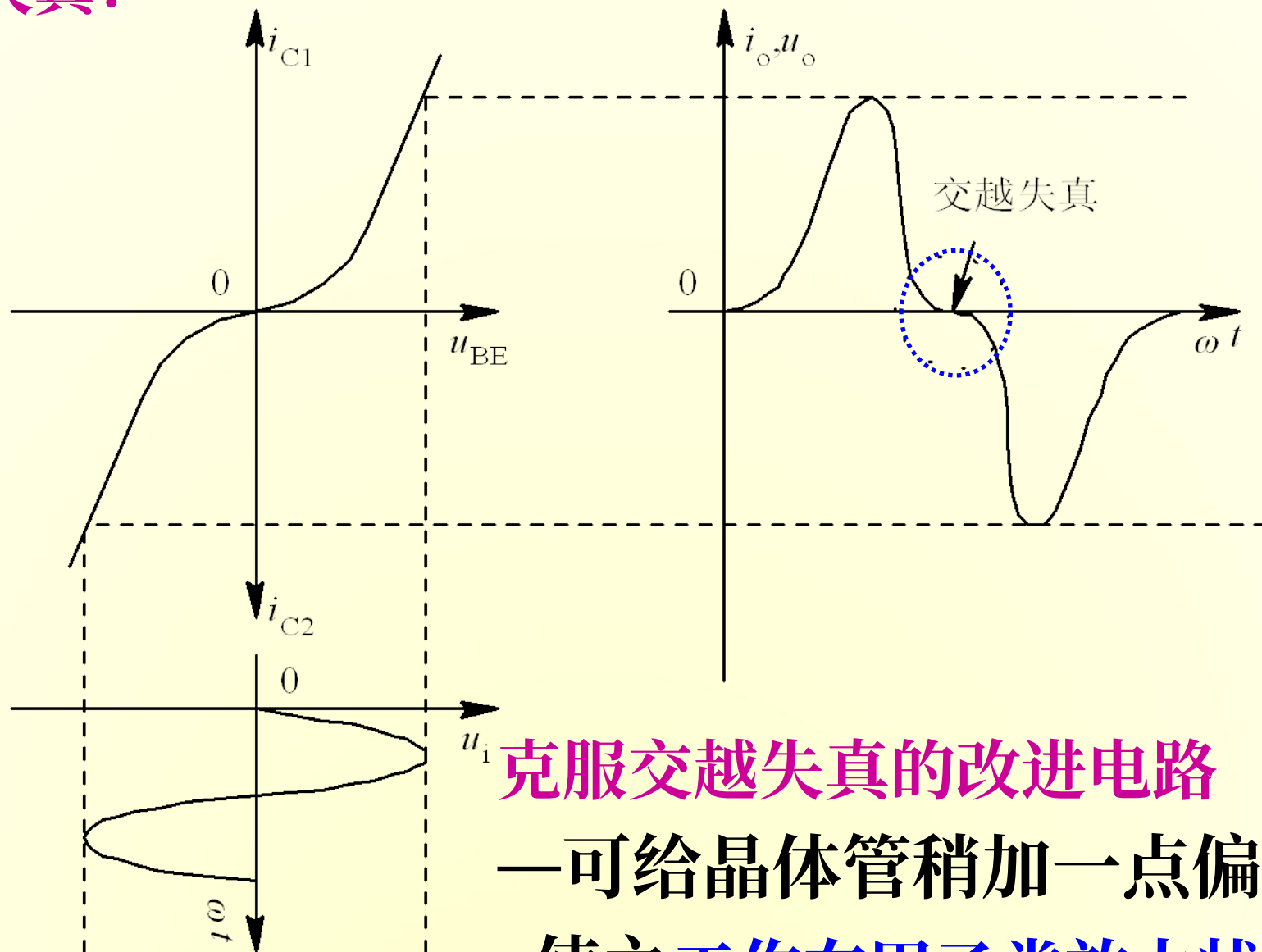
$P_{Em} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$ 
 $P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$

4. 单管功耗  $P_T = \frac{P_E}{2} - \frac{P_o}{2}$   $P_{Tm} = 0.2 P_{om}$  此时  $\xi = \frac{U_{om}}{U_{CC}} = \frac{2}{\pi}$

## 乙类放大的输入输出波形关系：



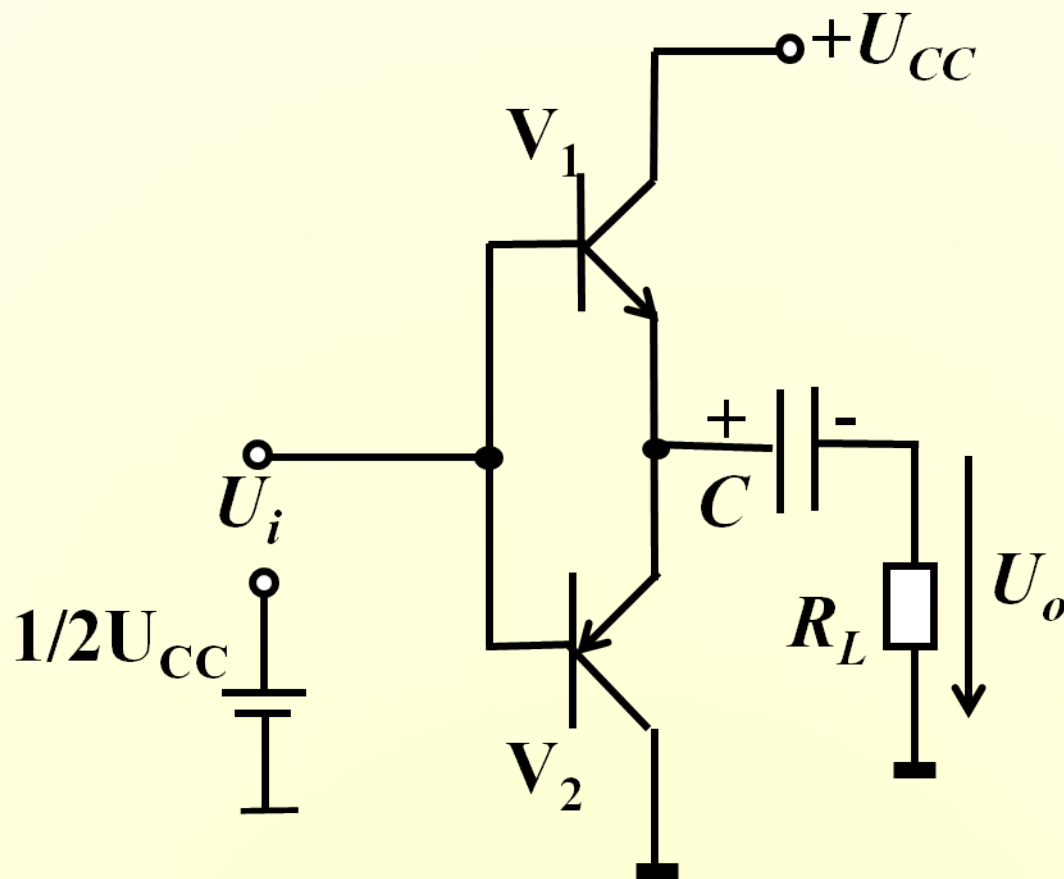
## 交越失真：



克服交越失真的改进电路

—可给晶体管稍加一点偏置  
，使之工作在甲乙类放大状态

### 8.3.2 单电源互补推挽乙类功率放大电路(OTL电路)



性能指标计算公式与OCL电路一致，只需将 $U_{CC}$ 换成 $U_{CC}/2$



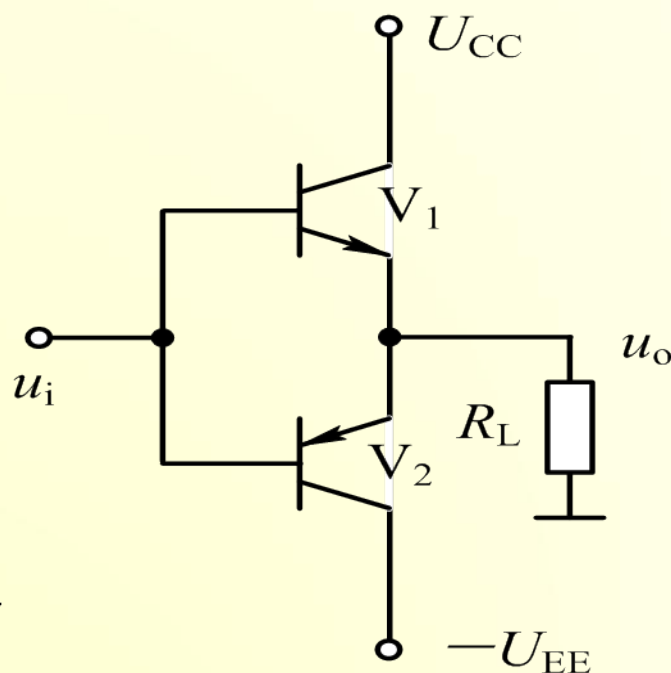


有三种功率放大电路：A、甲类功率放大电路，B、甲乙类功率放大电路，C、乙类功率放大电路，静态时功率损耗最大的电路是A；功放管的导通角最小的电路是C，静态功耗约为零的电路是C，功放管的导通角最大的电路是A，存在交越失真的电路是C，此种失真属于非线性失真。

## 习题8.2

图为理想乙类互补推挽功放电路，设 $U_{CC}=15V$ ， $U_{EE}=-15V$ ， $R_L=4\Omega$ ， $U_{CE(sat)}=0$ ，输入为正弦信号。试求

- (1) 输出信号的最大功率；
- (2) 输出最大信号功率时电源的功率、集电极功耗（单管）和效率；
- (3) 每个晶体管的最大耗散功率 $P_{Tm}$ 是多少？在此条件下的效率是多少？



解: (1) 输出信号的最大功率 ( $U_{CE(sat)}=0$ )

$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{15^2}{4} = 28.13 \text{ W}$$

(2) 输出最大信号功率时电源的功率

$$P_{Em} = 2U_{CC} \cdot \frac{U_{CC}}{\pi R_L} = \frac{2}{\pi} \times \frac{15^2}{4} = 35.83 \text{ W}$$

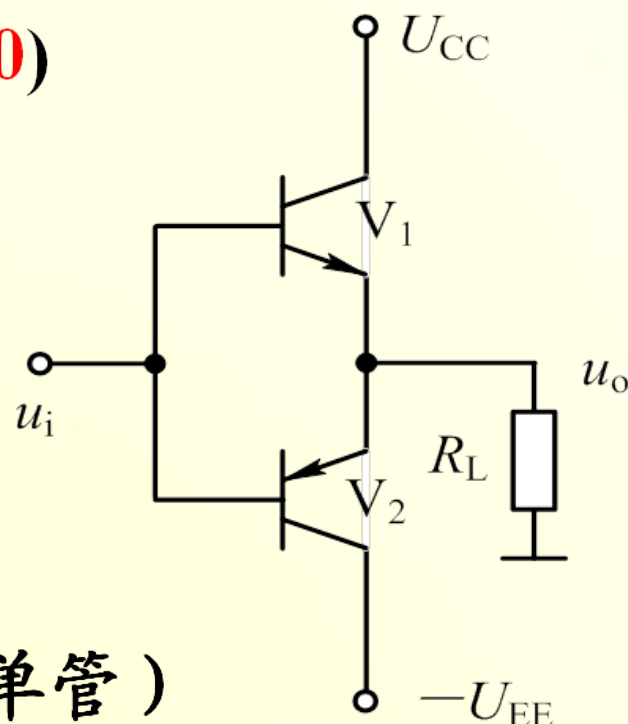
输出最大信号功率时集电极功耗 (单管)

$$P_T = \frac{1}{2} (P_{Em} - P_{om}) = \frac{1}{2} \times (35.83 - 28.13) = 3.85 \text{ W}$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_{om}}{P_{Em}} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

(3) 每个晶体管的最大耗散功率  $P_{Tm} = 0.2 P_{om} = 5.63 \text{ W}$

$$\text{在此条件下的效率 } \eta = \frac{\pi}{4} \xi = \frac{\pi}{4} \times \frac{2}{\pi} = 50\%$$



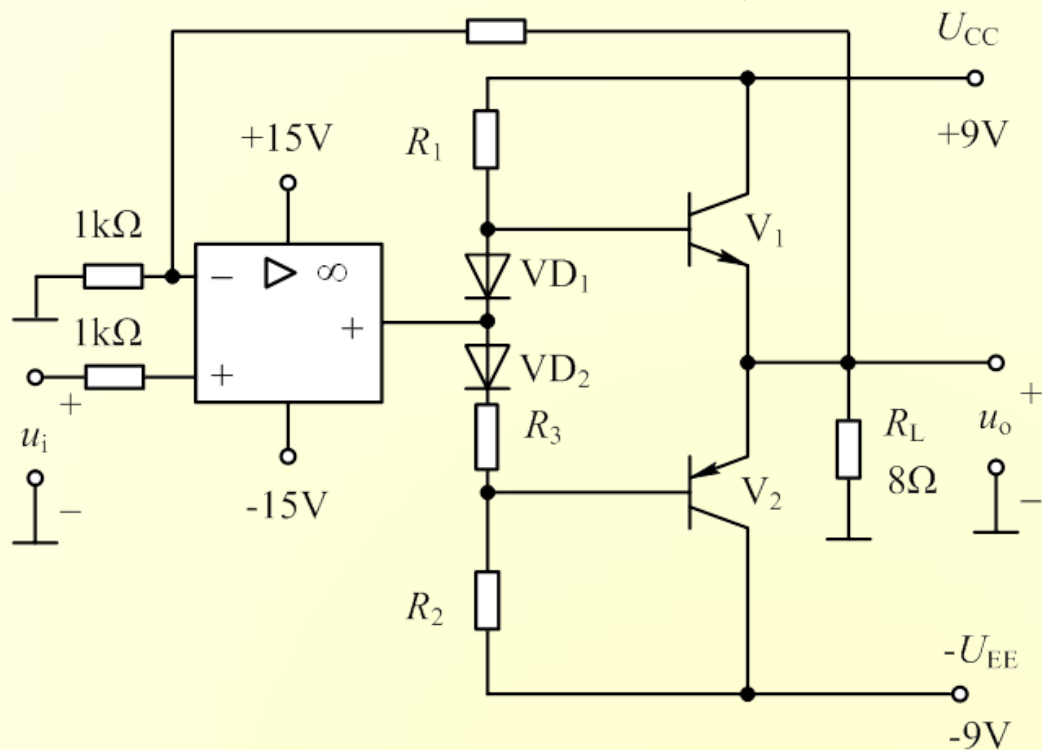
## 习题8.8 功放电路如图所示，试问

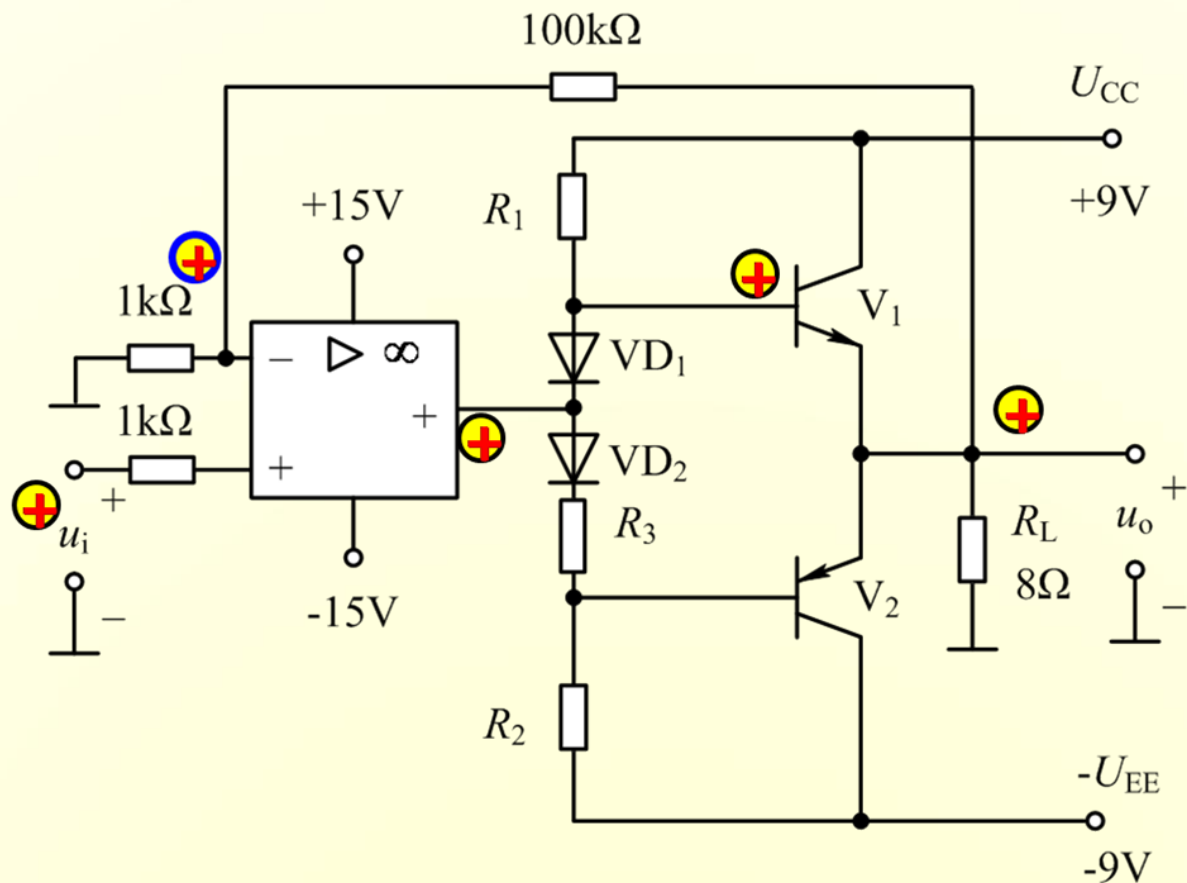
(1)指出电路中的反馈通路，并判断反馈组态；

(2)估算电路在深度负反馈时的闭环电压增益；

(1)设晶体管的饱和压降为0.5V，电路的最大输出功率为多少？

(2)如要求输出电压 $U_{om}=8V$ ，输入信号 $U_{im}=?$

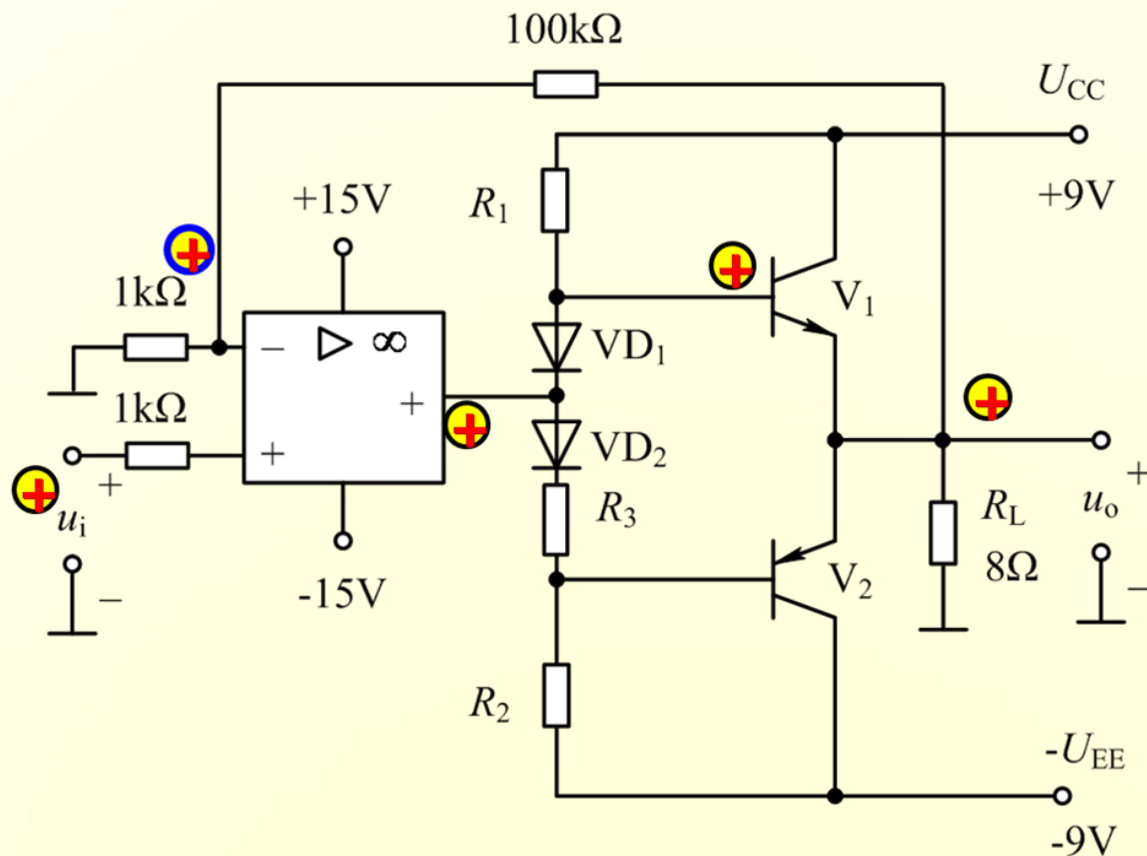




**解：**(1)  $100\text{k}\Omega$ 、 $1\text{k}\Omega$ 电阻构成了互补乙类功放电路和运放构成的同相比例放大器之间的反馈通路。引入了级间电压串联负反馈。

(2) 深度串联负反馈下， $U_i = U_f = U_{1\text{k}\Omega} = \frac{U_o}{100\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega} 1\text{k}\Omega$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_o}{U_f} = \frac{100+1}{1} = 101$$



$$(3) P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{(U_{CC} - U_{CE(sat)})^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{(9 - 0.5)^2}{8} = 4.52 \text{ W}$$

$$(4) \because A_{uf} = 101, U_{om} = 8 \text{ V},$$

$$\therefore U_{im} = \frac{U_{om}}{A_{uf}} = \frac{8}{101} \text{ V} = 79.2 \text{ mV}$$