

第6章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的特殊问题

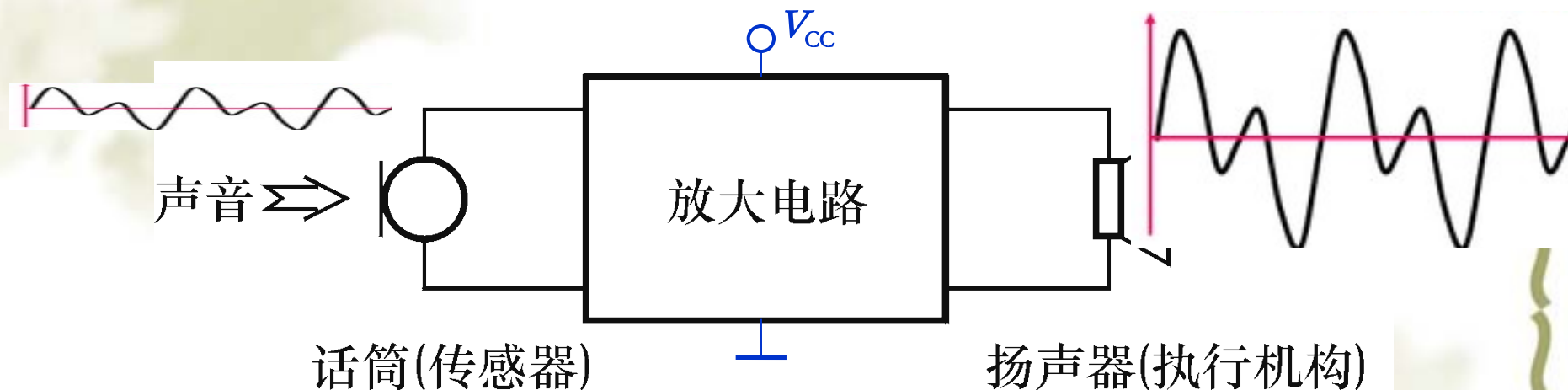
6.2 互补对称功率放大电路

1. 双电源互补对称电路 OCL

2. 单电源互补对称电路 OTL

1. 放大电路的功能及性能指标

(1) 放大电路功能简介



问题：输入小功率交流信号，输出大功率交流信号，增加的功率从哪里来？

放大电路起能量转换作用：

电源提供的**直流电能**转化为由信号控制的**输出交变电能**。

6.1 功率放大电路的特殊问题

- ◆ 输出功率为主要技术指标。

晶体管起能量转换作用：

电源提供的直流电能转化为由信号控制的输出交变电能。

- ◆ 功率放大简称**功放**，
- ◆ 与电压放大电路相比较，主要考虑以下问题。

- (1) **输出大功率**
- (2) **提高功率效率**
- (3) **减小失真**
- (4) **改善热稳定性**

6.1 功率放大电路的特殊问题

(2) 提高效率

- ◆ 功率放大电路的效率 (Efficiency) 是指负载得到的**信号功率**与电源供给的**直流功率**之比。

$$\eta = \frac{P_o}{P_V}$$

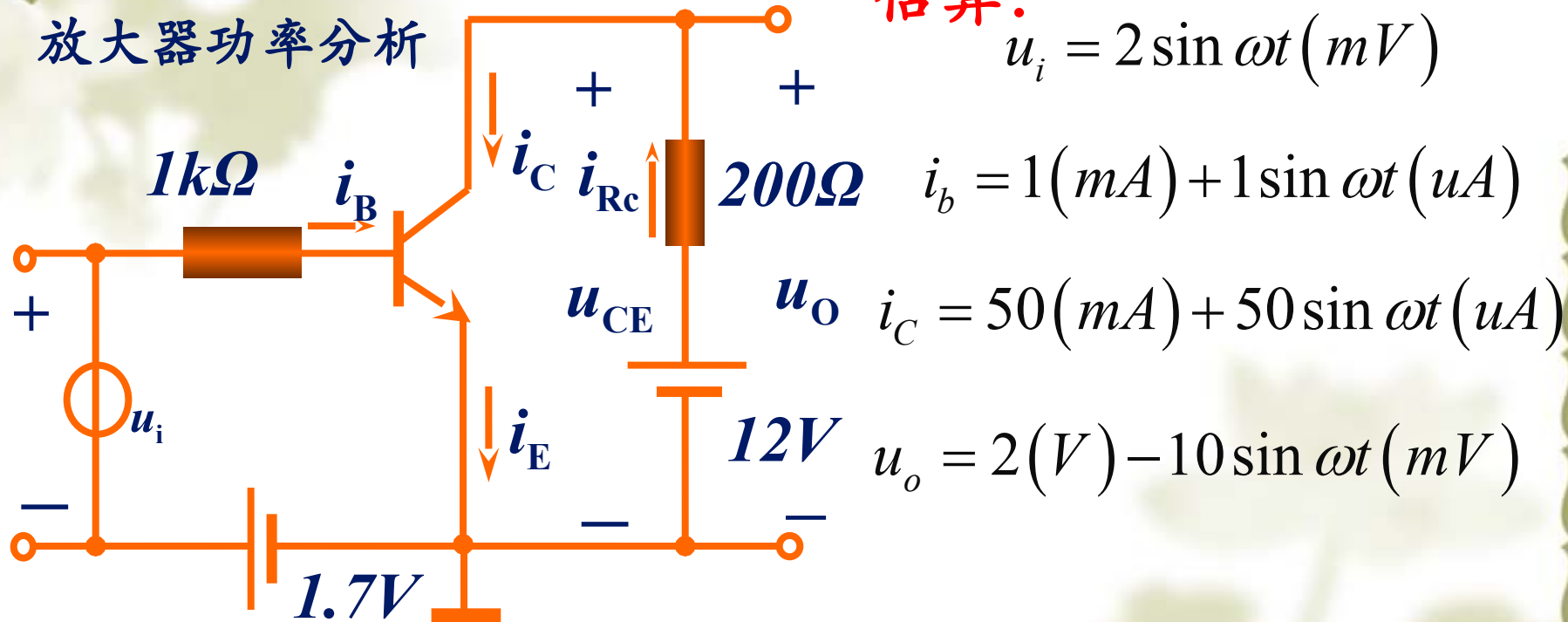
- ◆ 提高效率可以在相同输出功率的条件下，减小能量损耗，**延长电池待机时间**，降低成本。

怎么提高效率？

第一步：分析能量损耗在哪里？

第一步：分析能量损耗在哪里？

估算：



直流电源提供的平均功率 $P_V = V_{CC} i_c = 12 * 50 \times 10^{-3} = 0.6$ 瓦

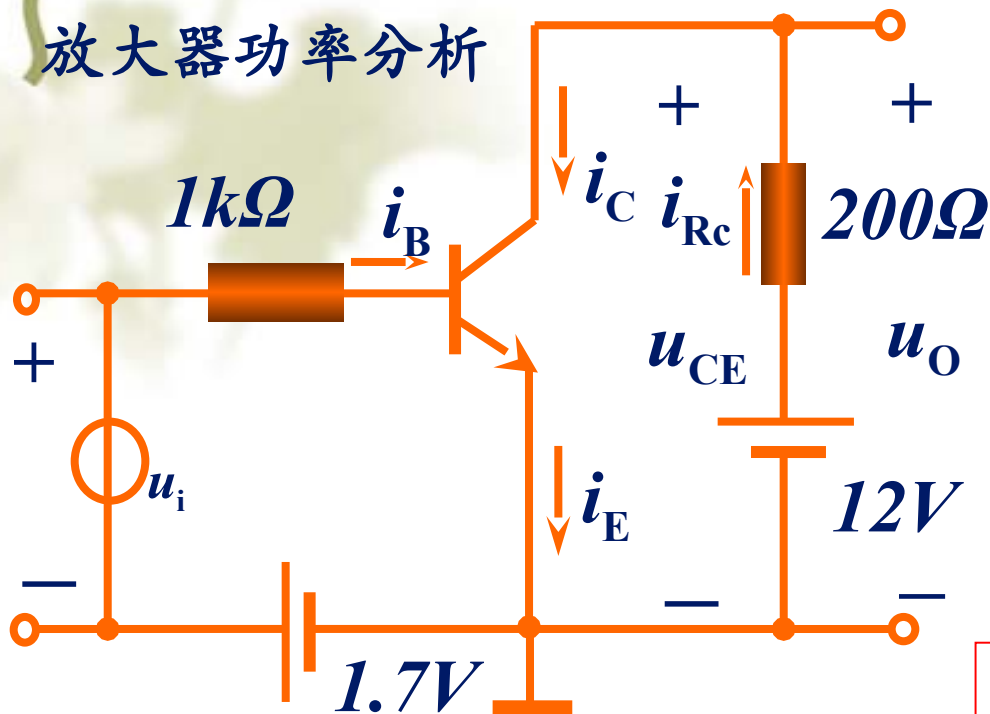
假设负载 1Ω 则输出信号功率为 $P_o = \frac{1}{2} * 10 \times 10^{-3} * 50 \times 10^{-6} = 0.25 \times 10^{-3}$ 毫瓦

功率 P_o 远小于 P_V

余下能量损耗在哪里？

第一步：分析能量损耗在哪里？

放大器功率分析



$$u_i = 2 \sin \omega t (mV)$$

$$i_b = 1(mA) + 1 \sin \omega t (\mu A)$$

$$i_C = 50(mA) + 50 \sin \omega t (\mu A)$$

$$u_o = 2(V) - 10 \sin \omega t (mV)$$

罪魁祸首：直流分量

电阻元件，被浪费掉的功率

$$I_C^2 R_c = 50 * 50 * 200 * 10^{-6} = 0.5 \text{ 瓦}$$

没用的功率，被浪费掉，大小和 I_C 有关，基本呈单调递增关系

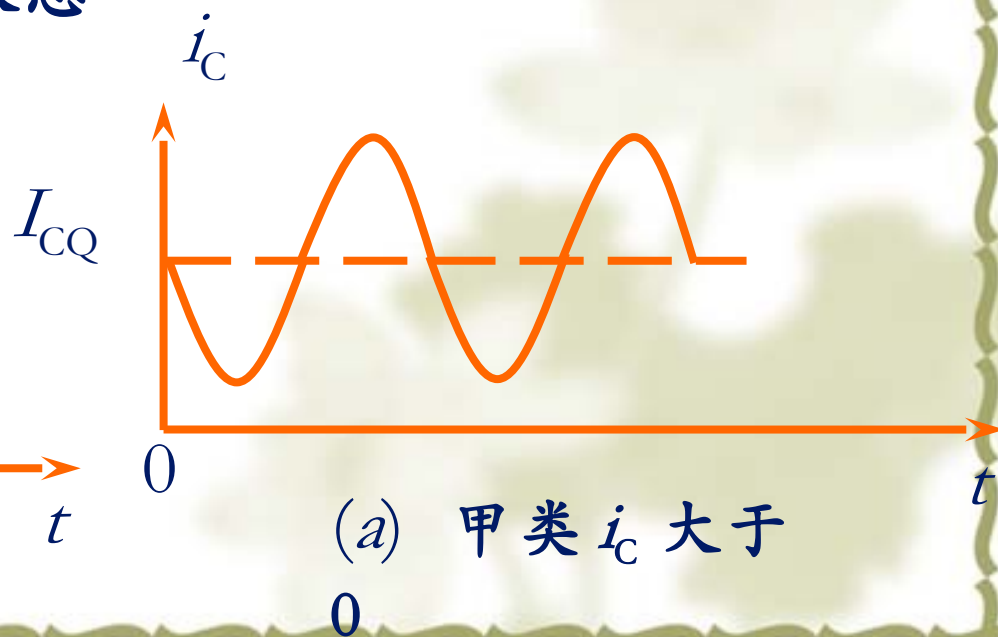
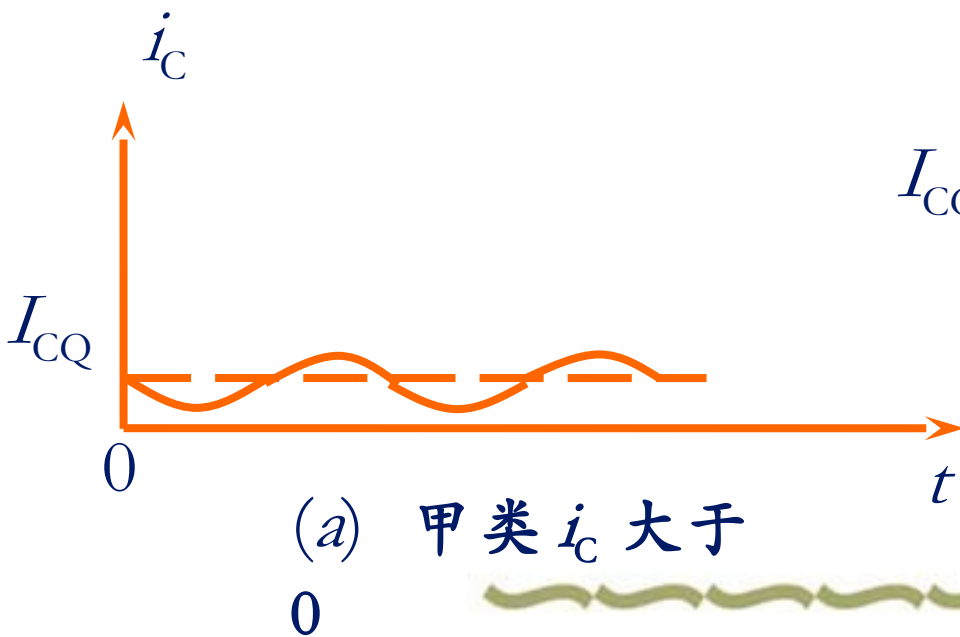
思考：如何提高功率效率？

因此，要提高效率就必须减小静态电流 I_C

怎么提高效率？

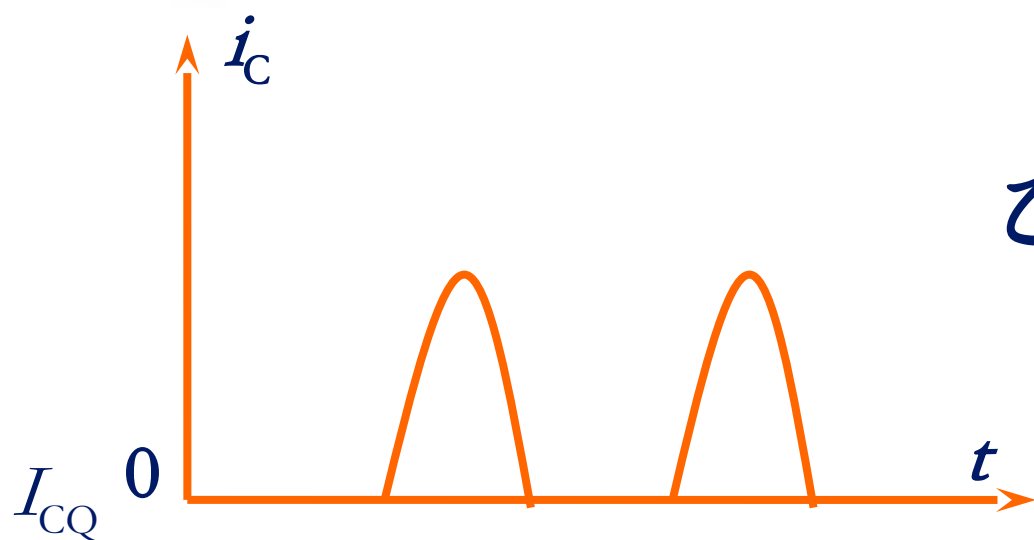
- 管子导通时间为一个周期。在单管放大电路中，为了得到不失真的输出波形，将静态工作点 I_{CQ} 设置在合适位置。
- 输出信号小时，静态工作点可以设置低点
- 但输出大信号时，静态工作点比较高，静态功耗大。

甲类工作状态



$I_{CQ}=0$ ，会怎样？

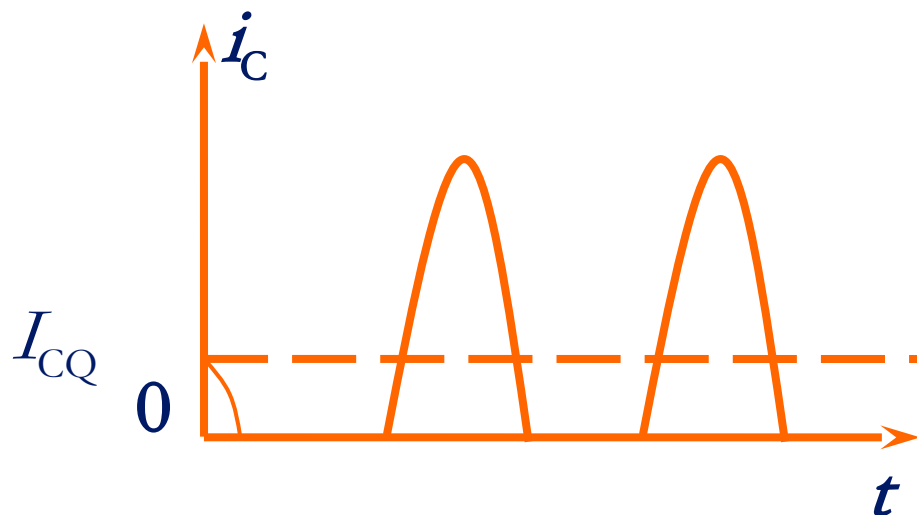
- 导通时间为半个周期。其工作点设置在截止区， $I_{CQ}=0$ 。
- 出现了严重的波形失真。



乙类工作状态

(c) 乙类 $i_c = 0$ 的时间为半个周期

- 导通时间大于半个周期，小于一个周期。其工作点设置靠近截止区， I_{CQ} 靠近 0。
- 甲乙类放大，减小了静态功耗，但也出现了严重的波形失真。



甲乙类工作状态

(b) 甲类 $i_C = 0$ 的时间小于半个周期

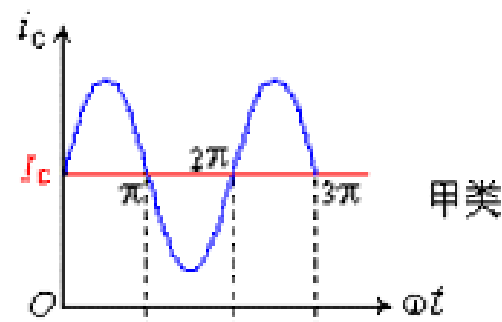
怎么提高效率？

甲类功放：

在一个信号周期内都有电流流过晶体管

管子的导通角为 360°

静态电流大于 0，管耗大，效率低

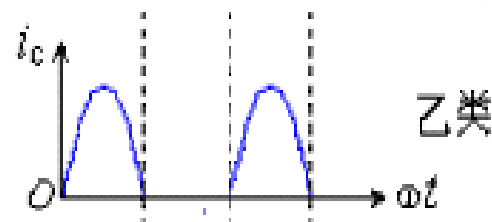


乙类功放：

管子只有半个周期内导通

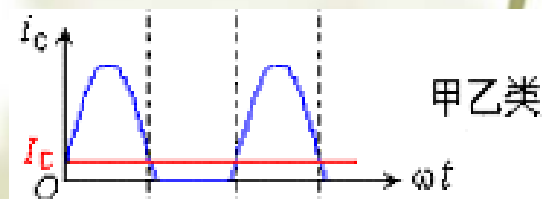
管子的导通角为 180°

静态电流等于 0，效率高



甲乙类功放：

管子的导通时间大于半个周期但是小于一个周期，比半个周期稍多些



问题：对于输出大信号时，波形失真和功率效率之间形成一个矛盾，如何处理？

第6章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的特殊问题

6.2 互补对称功率放大电路

1. 双电源互补对称电路 OCL

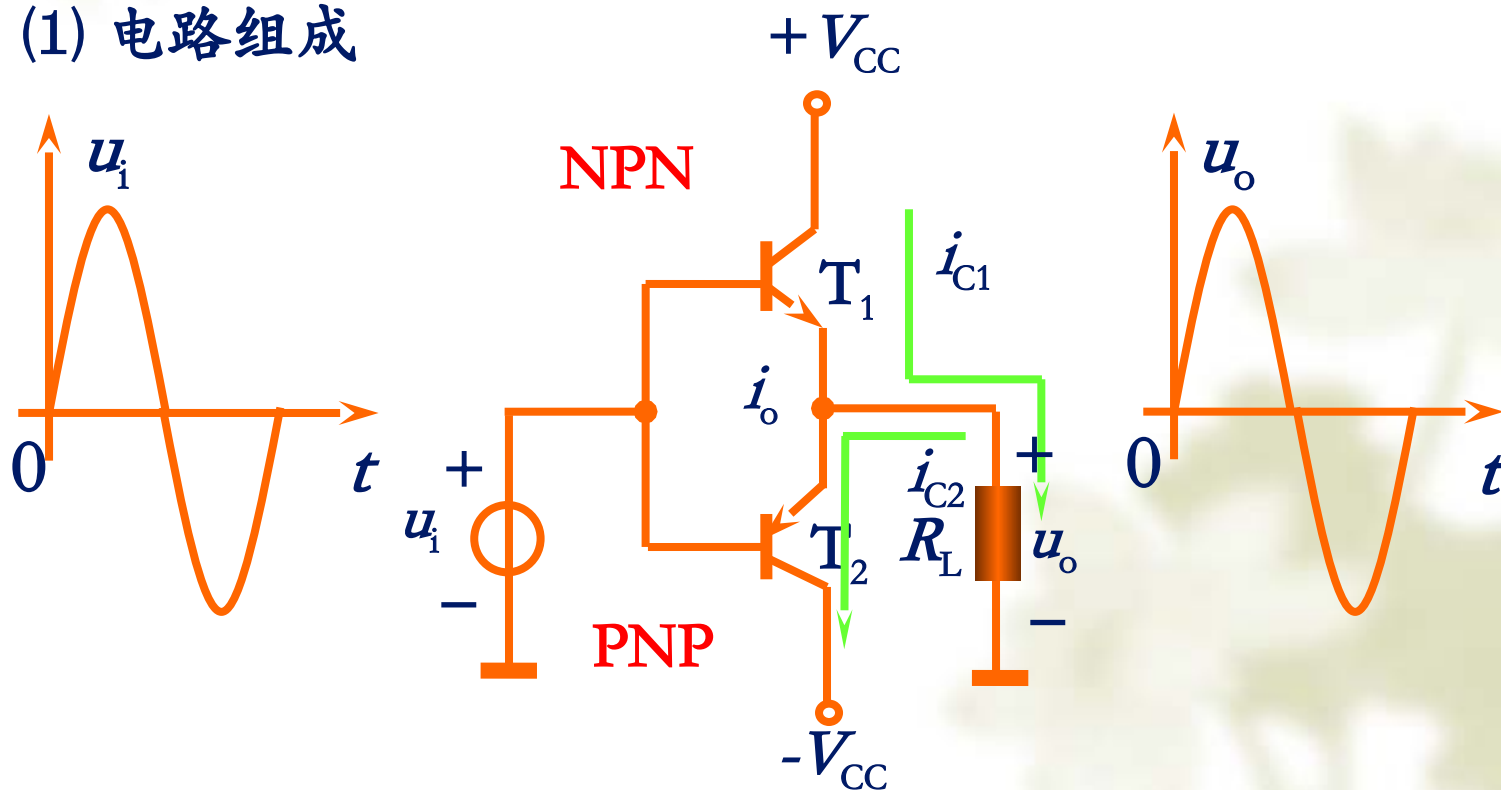
2. 单电源互补对称电路 OTL

6.2 互补对称功率放大电路

1. 双电源互补对称电路

◆ 双电源互补对称电路又称**无输出电容电路**，简称 OCL(Output Capacitor Less) 电路。

(1) 电路组成



1. 双电源互补对称电路

工作原理 (设 u_i 为正弦波)

静态时, 上下对称, B, E 点电位都为

$u_i = 0V \rightarrow i_{c1}、i_{c2} \text{ 均} = 0$ (截止状态) * $u_o = 0V$

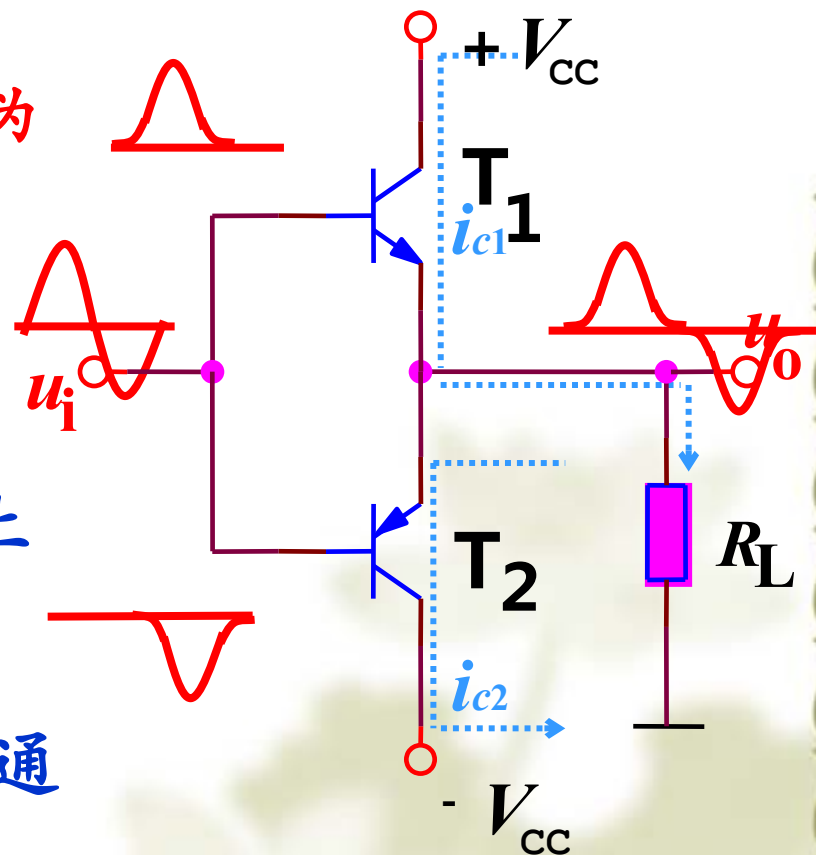
动态时:

$u_i > 0V \rightarrow T_1$ 导通, T_2 截止

$\rightarrow i_L = i_{c1}$;

$u_i < 0V \rightarrow T_1$ 截止, T_2 导通

$\rightarrow i_L = i_{c2}$

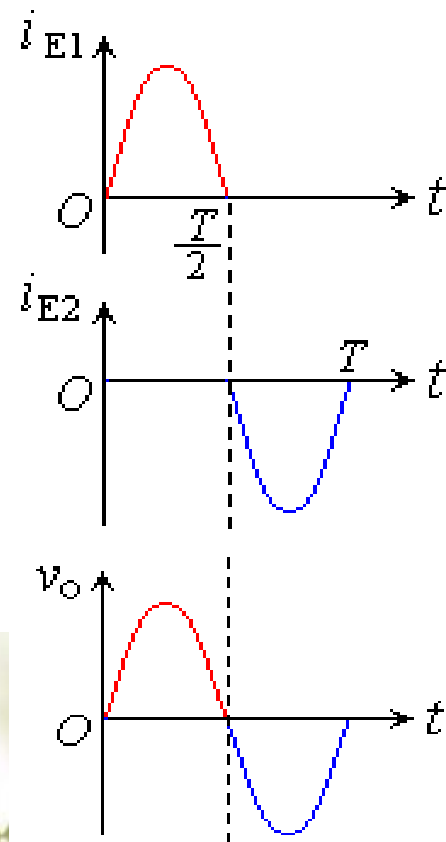
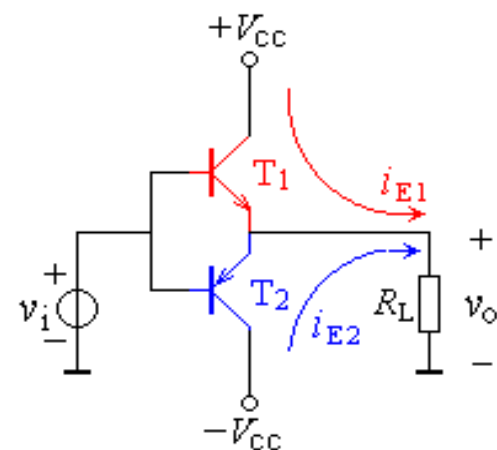


T_1 、 T_2 两个管子交替工作, 在负载上得到完整的正弦波。

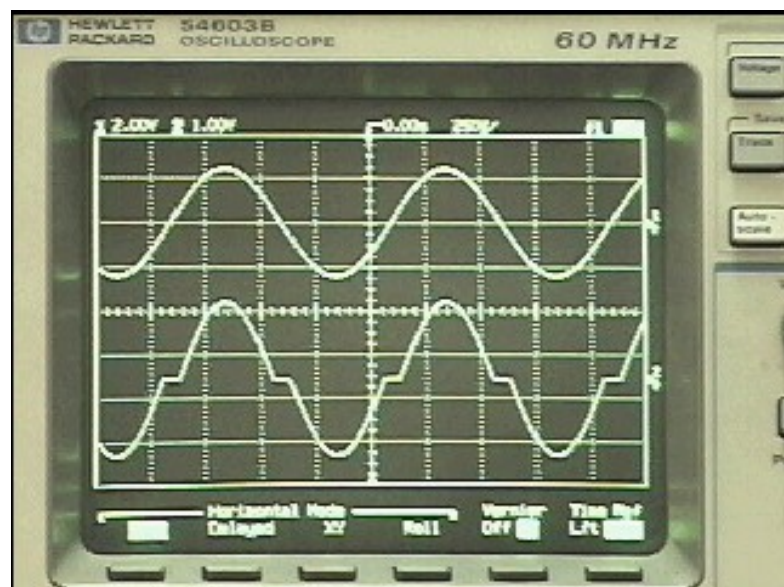
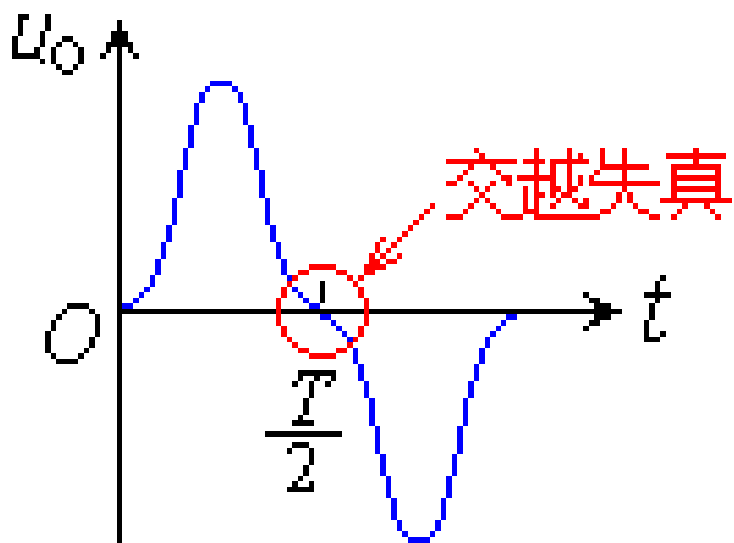
在负载上将正半周和负半周合成在一起，得到一个完整的不失真波形。

前提条件：

- 1 输入信号幅度远大于三极管的开启电压，
- 2 忽略不计三极管的开启电压。



严格说，**输入信号很小时**，达不到三极管的开启电压，三极管不导电。因此在正、负半周交替过零处会出现一些**非线性失真**，这个失真称为**交越失真**。



交越失真

- ◆ 由于 T_1 、 T_2 管输入特性存在死区，所以输出波形在信号过零附近产生失真——**交越失真**。
- ◆ 原因：假设 T_1 、 T_2 的**死区电压都是 $0.6V$** ，那么在输入信号电压 $|U_i| \leq 0.6V$ 期间， T_1 和 T_2 截止，输出电压为零，得到如图所示失真了的波形，

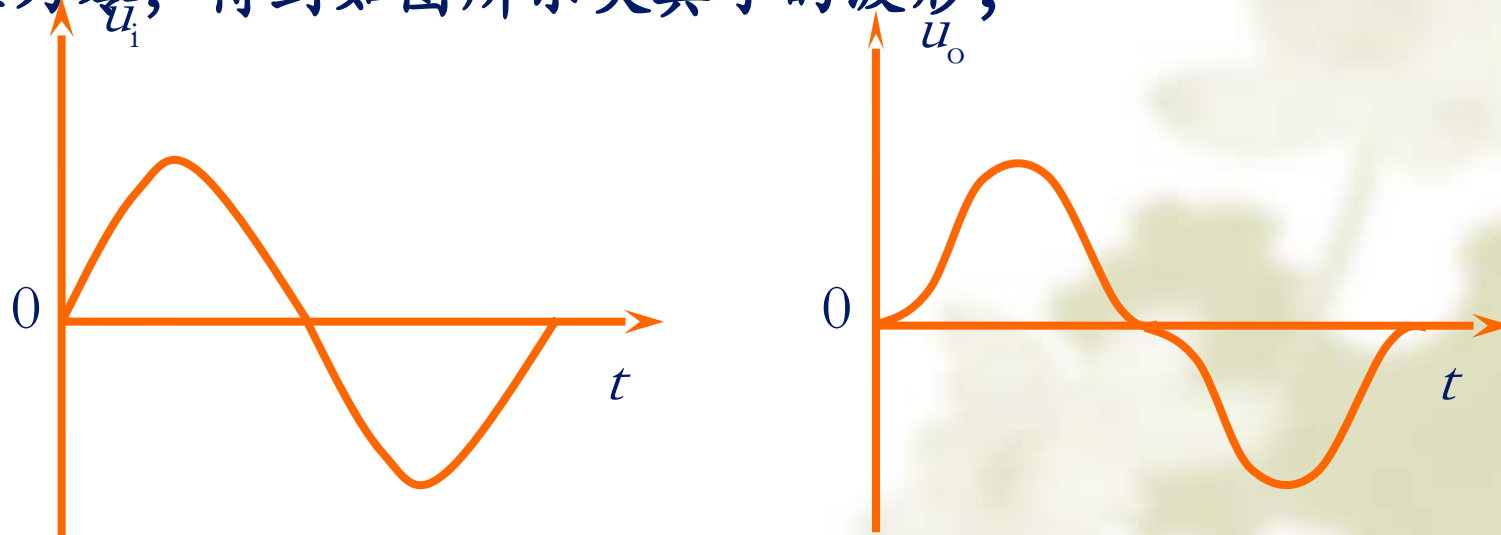
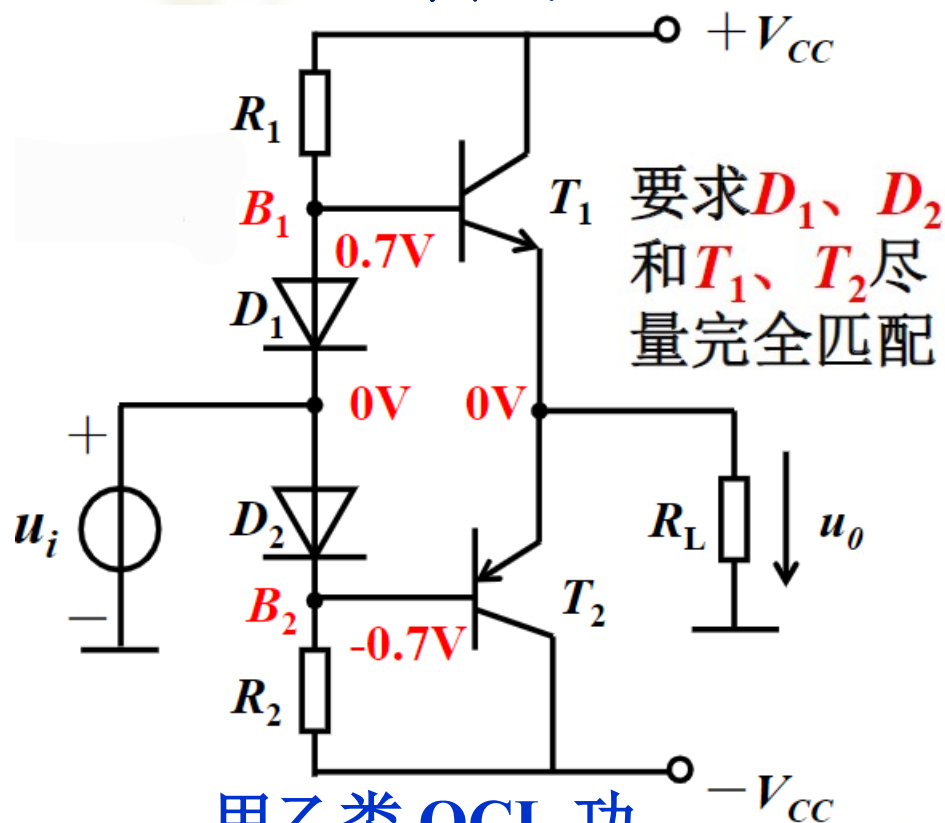


图 6-3 交越失真波形

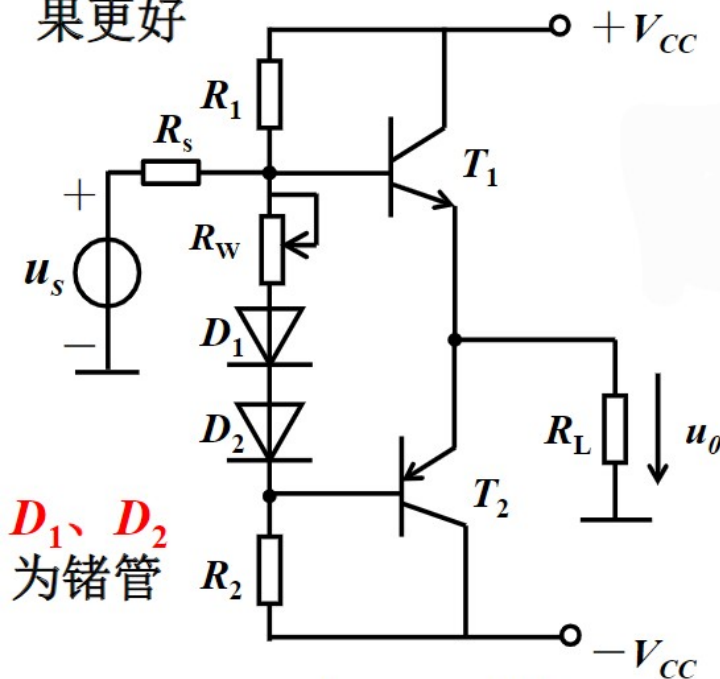
消除交越失真的办法

- ◆ 让 T_1 和 T_2 在静态时就微导通。
- ◆ 为此在 T_1 和 T_2 的基极之间接入一个直流电压。
- ◆ 无论信号为正或为负，都至少有一个管子导通，交越失真也就不存在了。



甲乙类 OCL 功放

T_1 和 T_2 之间的基极电位差设置成可调，克服交越失真效果更好



(2) 分析计算

① 输出功率

静态工作点为 ($U_{CE} = V_{CC}$,

$i_C = 0$) 输出功率 P_o 可以根据功率表达式 $P = U^2/R$ (U 是交流有效值) 求得, 即

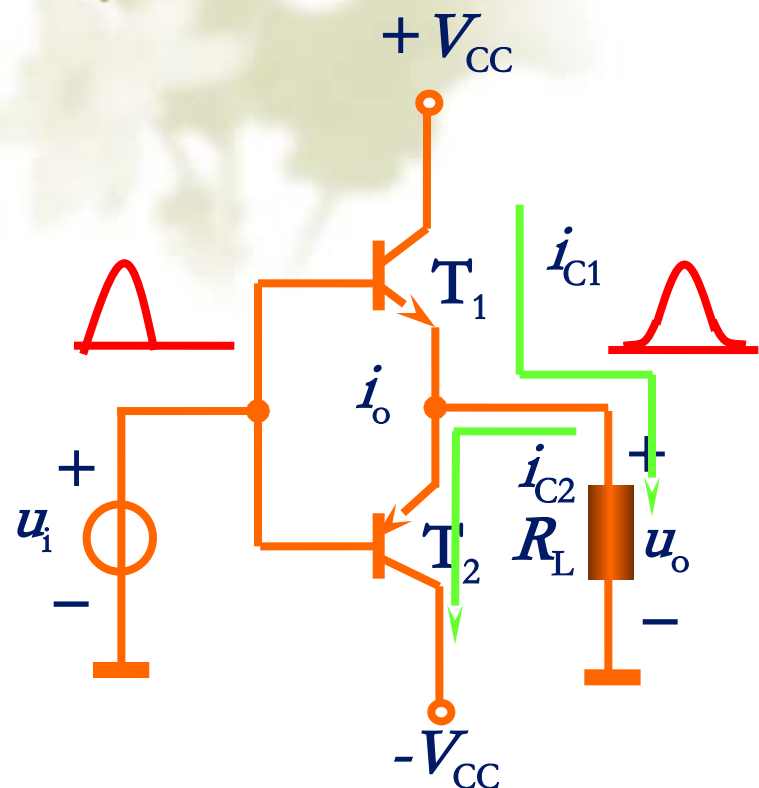
$$P_o = \frac{(U_{cem}/\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{U_{cem}^2}{2R_L}$$

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

理想条件下的最大输出功率

- ◆ 若输入的正弦信号的幅度足够大, 并忽略管子的饱和压降 U_{CES} 。
- ◆ R_L 上最大的输出电压幅度 $U_{cem} = V_{CC}$ 。在此理想条件下, 最大输出功率为

$$P_{OM} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$



② 效率

- ◆ 输出功率占电源供给功率的比率称为效率，用 η 表示， $\eta = P_O / P_V$ 。
- ◆ 由于每个电源只提供半个周期的电流，所以总电源功率 P_V 为

$$P_V = 2 \cdot V_{CC} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{cm} \cdot \sin \omega t d\omega t = \frac{2 \cdot V_{CC} \cdot I_{cm}}{\pi} = \frac{2V_{CC}U_{cem}}{\pi R_L}$$

$$\int_0^\pi \sin \omega t d\omega t = -\cos \omega t \Big|_0^\pi = -(-1 - 1) = 2$$

$$\eta = \frac{P_O}{P_V} = \left(\frac{U_{cem}^2}{2R_L} \right) / \left(\frac{2V_{CC}U_{cem}}{\pi R_L} \right) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{cem}}{V_{CC}}$$

- ◆ 在理想情况下， $U_{cem} = V_{CC}$ ，则最大效率为

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

③ 功率管的选择

- ◆ 消耗在晶体管的功率 $P_T = P_V - P_O$ ，由于 P_O 与 P_V 均与信号的幅值有关，故 P_T 也随之变化。
- ◆ 为了求出何时管耗最大，令

$$K = \frac{U_{cem}}{V_{CC}}$$

$$P_T = \frac{2V_{CC} \cdot U_{cem}}{\pi R_L} - \frac{U_{cem}^2}{2R_L} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} K - \frac{V_{CC}^2}{2R_L} K^2$$

- 上式对 K 的导数为 0 时， P_T 将为最大值

$$\frac{dP_T}{dK} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} - \frac{2V_{CC}^2}{2R_L} K = 0$$

➤ 将其代入 P_T 式中得

$$P_{T_{\max}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} \cdot \frac{2}{\pi} - \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \cdot \frac{4}{\pi^2} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = \frac{4}{\pi^2} P_{OM} \approx 0.4 P_{OM}$$

➤ 每个管子的管耗约为 $0.2P_{O_{\max}}$ ，当输出功率最大 ($K=1$) 时，总管耗约为 $0.27P_{O_{\max}}$ 。

$$P_T = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} K - \frac{V_{CC}^2}{2R_L} K^2 = \frac{(4 - \pi)V_{CC}^2}{2\pi R_L} = \frac{4 - \pi}{\pi} P_{OM} \approx 0.27 P_{OM}$$

功率管的要求

若想得到预期的最大输出功率，则功率管的有关参数应满足下列条件：

- ◆ (1) 每只功率管的最大管耗 $P_{CM} \geq 0.2P_{Omax}$ ；
- ◆ (2) 功率管 c-e 极间的最大压降为 $2V_{CC}$ ， 所以应选 $|U_{(BR)CEO}| > 2V_{CC}$ ；
- ◆ (3) 功率管的最大集电极电流为 V_{CC}/R_L ， 因此晶体管的 I_{CM} 不宜低于此值。

例题：已知 T_1 的 $U_{CES}=2V$, $R_L=8\Omega$ 单管 U_{CES} 一般 $\leq 1V$
复合管的 $U_{CES}>1V$

(1) 求最大不失真的 U_{om} 、 P_O 、 P_V 、 η 、 P_{T1}

(2) 求理想情况下的 U_{om} 、 P_{om} 、 P_{Vm} 、 η_m

(3) 如何选管?

$$P_{T1} = \frac{P_V - P_O}{2} = 3.47W$$

解答过程：

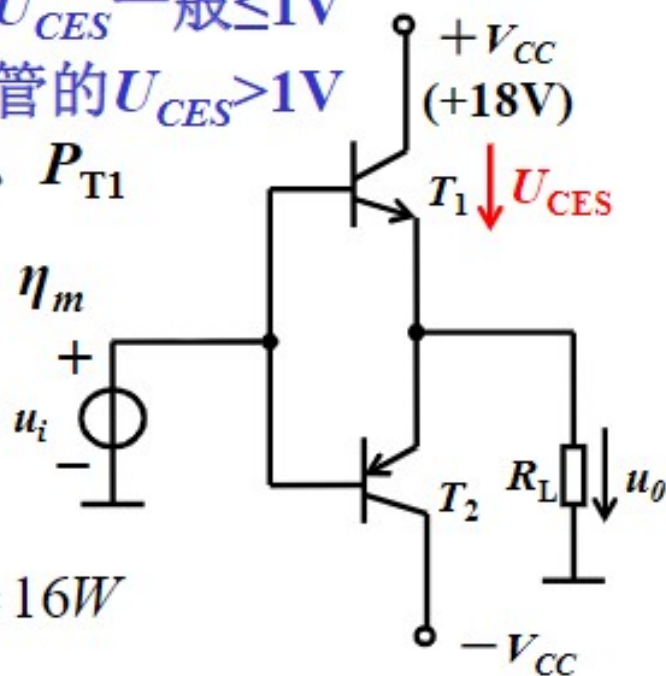
$$(1) U_{om} = V_{CC} - U_{CES} = 16V \quad P_O = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = 16W$$

$$\pi = 3.14 \quad P_V = \frac{2V_{CC}U_{om}}{\pi R_L} = 22.93W \quad \eta = \frac{P_O}{P_V} = 69.8\% = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}} \quad (-18V)$$

$$(2) U_{om} = V_{CC} = 18V \quad P_{om} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = 20.25W \quad P_{Vm} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L} = 25.80W$$

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

$$(3) P_{CM} \geq 0.2P_{om} = 4.05W \quad I_{CM} \geq \frac{V_{CC}}{R_L} = 2.25A \quad U_{(BR)CEO} \geq 2V_{CC} = 36V$$



第6章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的特殊问题

6.2 互补对称功率放大电路

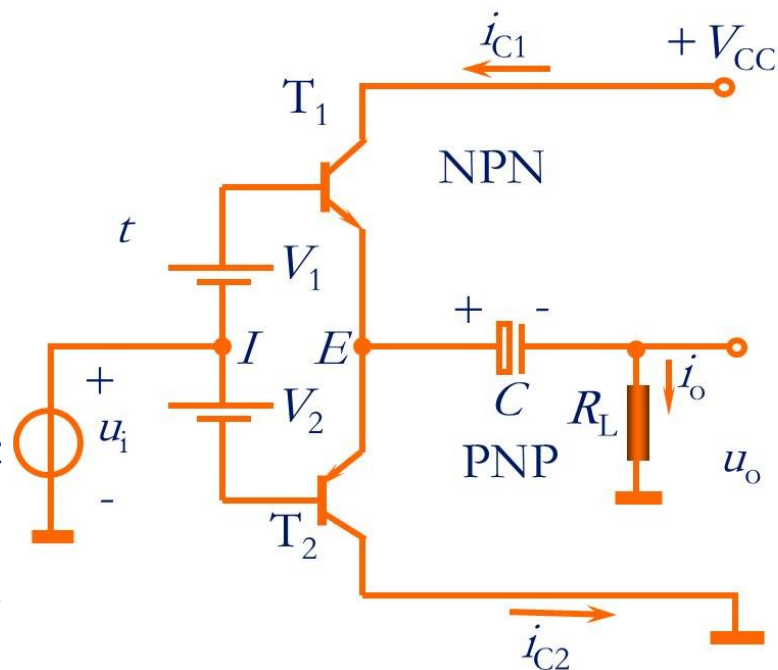
1. 双电源互补对称电路 OCL

2. 单电源互补对称电路 OTL

2. 单电源互补对称电路

(1) 电路组成

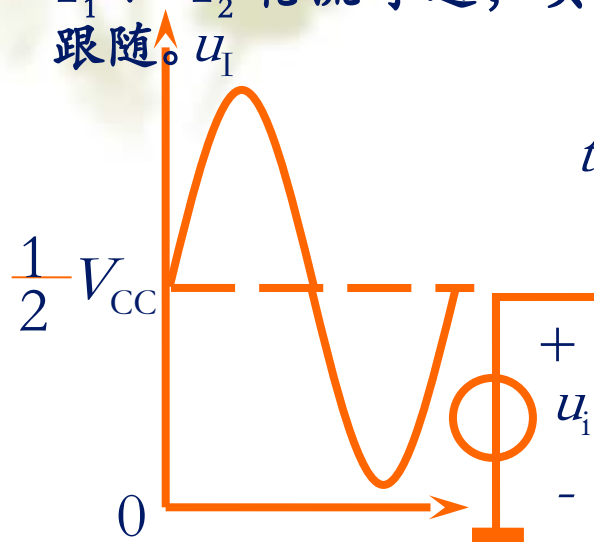
- ◆ 双电源互补对称电路，需要两个独立电源，这给使用上带来不方便。
- ◆ 所以实用上常采用单电源互补对称电路，如图 6-9 所示。它去掉了负电源，接入一个电容 C ，称为无输出变压器电路，简称 OTL(Output Transformer Less) 电路。
- ◆ V_1 、 V_2 是为了克服交越失真而接入的正向偏置电源，在实际电路中可用两个二极管来代替。



2. 单电源互补对称电路

◆ 静态时

- 静态时使 $U_E = V_{CC}/2$ ， I 点电位 U_I 以 $V_{CC}/2$ 为基准上下变化， T_1 、 T_2 轮流导通，实现双向跟随。



- 电容充放电回路时间常数远大于信号周期，电容两端电压基本不变。
- 电容上具有的恒定电压 $V_{CC}/2$ ，则可看作信号负半周时 T_2 管的直流电源。

◆ 动态时

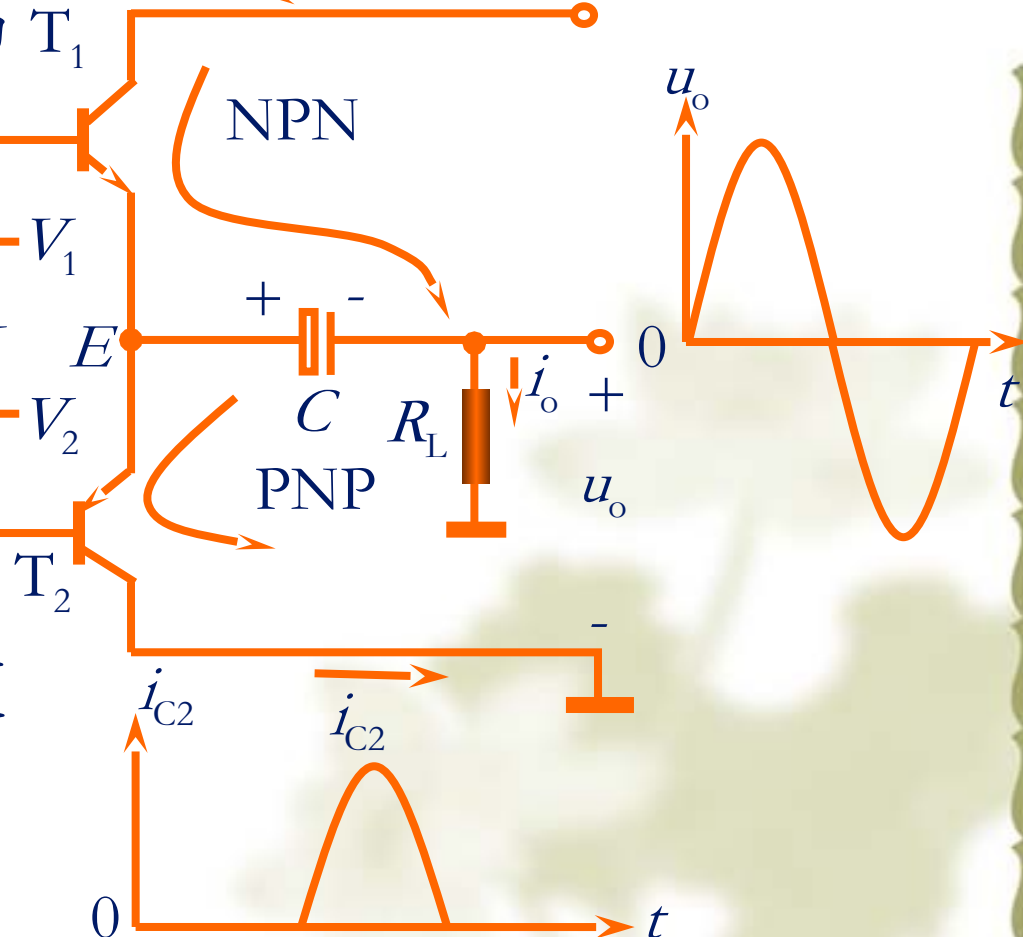
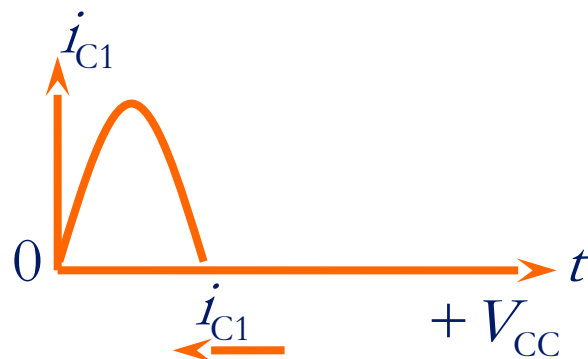
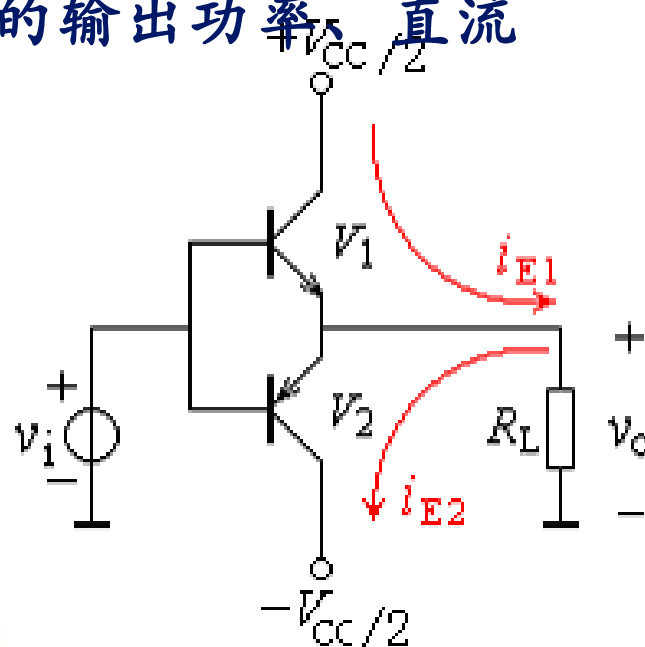
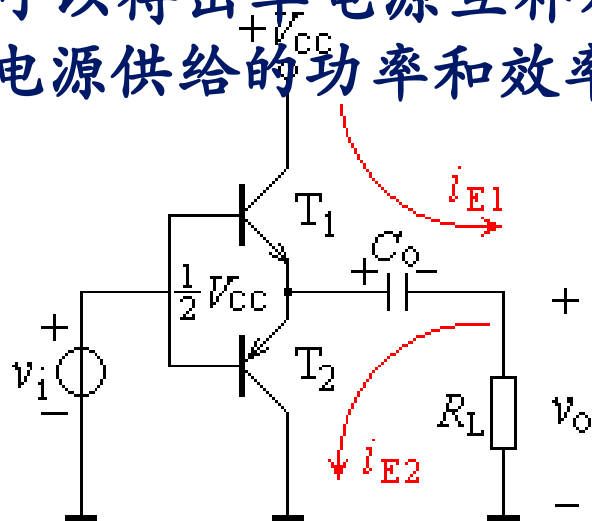


图 6-9 单电源互补对称原理电路

2. 单电源互补对称电路

- ◆ 由上面的分析可以看出，单电源互补对称电路实质上等效于具有 $\pm V_{CC}/2$ 双电源的互补对称电路。
- ◆ 分析计算时只要把 $V_{CC}/2$ 替换前面式中的 V_{CC} 就可以得出单电源互补对称电路的输出功率、直流电源供给的功率和效率等。



OTL 功放 计算

- (1) 计算给定条件下的 U_{om} 、 P_O 、 P_V 、 η
- (2) 计算理想情况下的 U_{om} 、 P_{Om} 、 P_{Vm} 、 η_m
- (3) 单管的 P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 如何选择?

把OCL所有公式的 $V_{CC} \rightarrow \frac{V_{CC}}{2}$

技巧: 令 $V_{CC}' = \frac{V_{CC}}{2} \rightarrow$ 把OCL所有公式中的 V_{CC} 改成 V_{CC}'

- (1) 计算给定条件下的 U_{om} 、 P_O 、 P_V 、 η

题型① 已知 $u_i = ?$ 共集电极接法 $\rightarrow u_o \approx u_i$ $U_{om} = U_{im} = \sqrt{2}U_i$

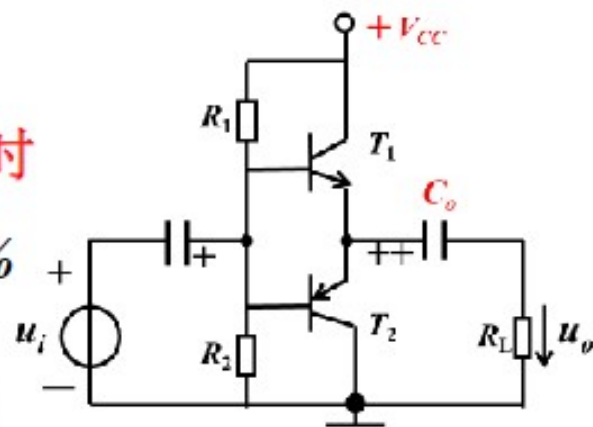
题型② 已知 U_{CES} , 求最大不失真时的 $U_{om} = V_{CC}' - U_{CES}$

$$P_O = \frac{U_{om}^2}{2R_L} \quad P_V = \frac{2V_{CC}'U_{om}}{\pi R_L} \quad \eta = \frac{P_O}{P_V} = \frac{\pi U_{om}}{4V_{CC}'}$$

- (2) 理想情况: 忽略 U_{CES} , 当 $U_{om} = V_{CC}'$ 时

$$P_{Om} = \frac{V_{CC}'^2}{2R_L} \quad P_{Vm} = \frac{2V_{CC}'^2}{\pi R_L} \quad \eta_m = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

- (3) $P_{CM} \geq 0.2P_{om}$ $U_{(BR)CEO} \geq 2V_{CC}'$ $I_{CM} \geq V_{CC}'/R_L$



例题：已知 $U_i=1V$, $R_L=3.5\Omega$

- (1) 求 U_{om} 、 P_O 、 P_V 、 η
- (2) 求理想的 P_{om} 、 P_{Vm} 、 η_m
- (3) 如何选管？

$$\text{令 } V_{CC}' = \frac{V_{CC}}{2} = 3V$$

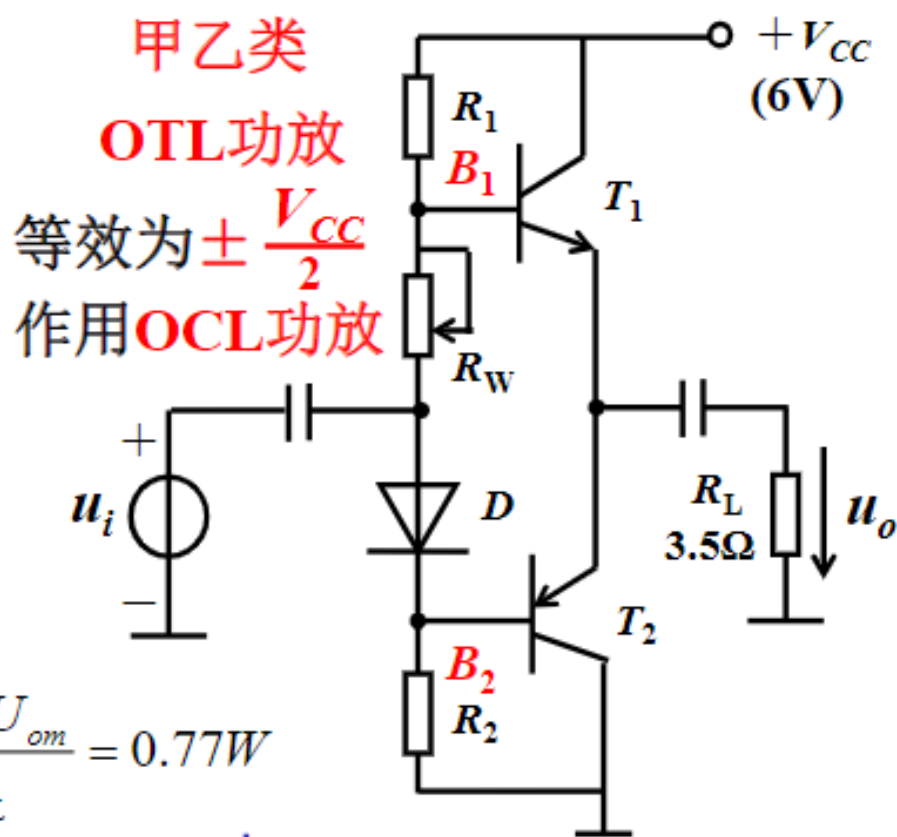
$$(1) U_{om} = U_{im} = \sqrt{2}V$$

$$P_O = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = 0.286W \quad P_V = \frac{2V_{CC}'U_{om}}{\pi R_L} = 0.77W$$

$$\eta = \frac{P_O}{P_V} = 37\% = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}'}$$

$$(2) U_{om} = V_{CC}' = 3V \quad P_{om} = \frac{V_{CC}'^2}{2R_L} = 1.29W$$

$$P_{Vm} = \frac{2V_{CC}'^2}{\pi R_L} = 1.64W \quad \eta_m = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$



$$(3) I_{CM} \geq \frac{V_{CC}'}{R_L} = 0.86A$$

$$U_{(BR)CEO} \geq 2V_{CC}' = 6V$$

$$P_{CM} \geq 0.2P_{om} = 0.258W$$

作业 P198 6-3、6-2

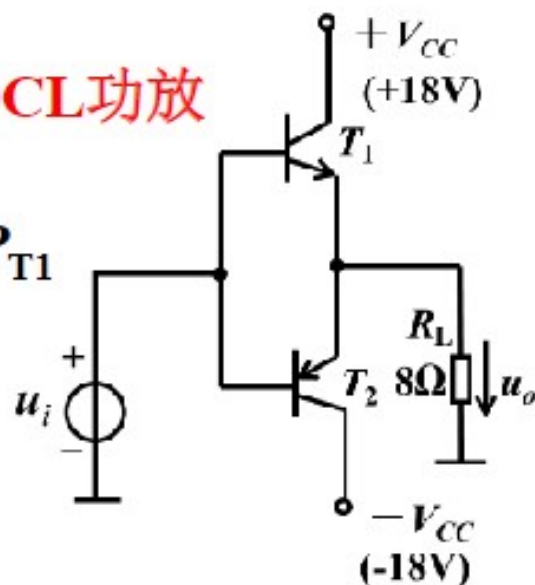
6-3 电路如右图所示

(1) 已知 $u_i = 10 \sin \omega t$, 求此时的 P_O 、 P_V 、 η 、 P_{T1}

(2) 求理想情况下的 P_{om} 、 P_{Vm} 、 η_m

(3) T_1 、 T_2 的 P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 如何选择?

乙类OCL功放



6-2 电路如右图所示, 已知 $V_{CC} = 18V$, $R_L = 3.5\Omega$

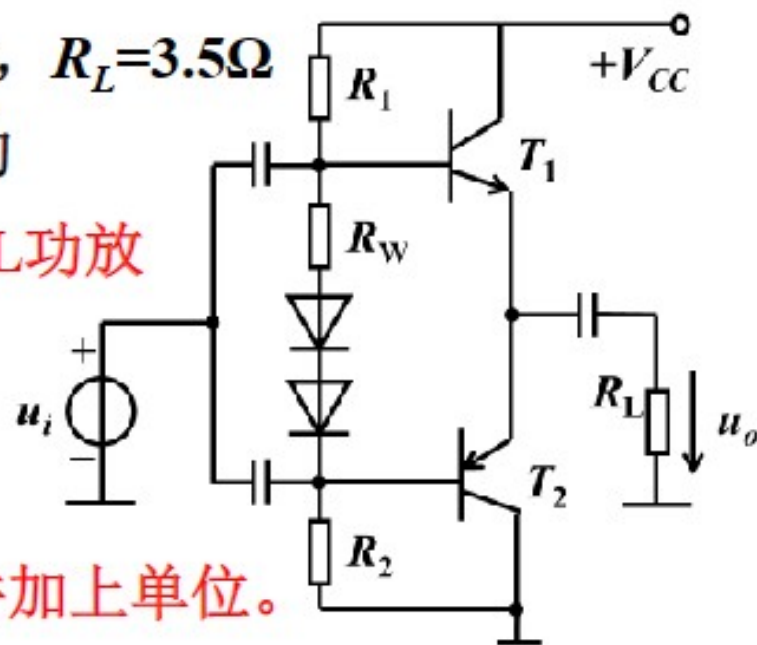
(1) 已知 $U_{CES} = 2V$, 求最大不失真时的

P_O 、 P_V 、 $\eta = ?$

甲乙类OTL功放

(2) 理想情况下的 P_{om} 、 P_{Vm} 、 η_m ?

(3) P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 如何选择?



要求: 先写公式, 再带入数据计算并加上单位。

第6章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的特殊问题

6.2 互补对称功率放大电路

1. 双电源互补对称电路 OCL

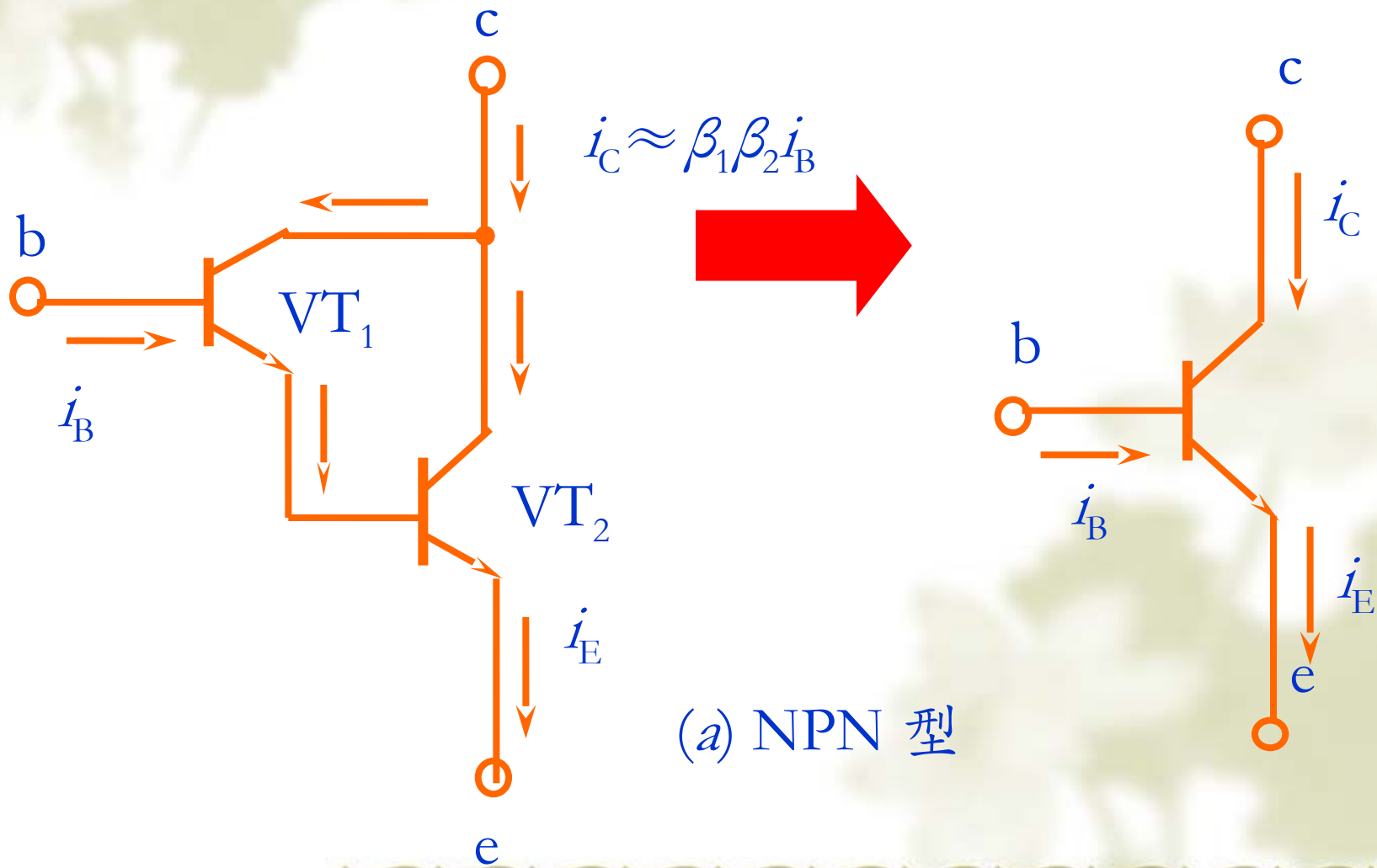
2. 单电源互补对称电路 OTL

2. 复合互补对称电路

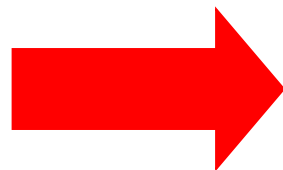
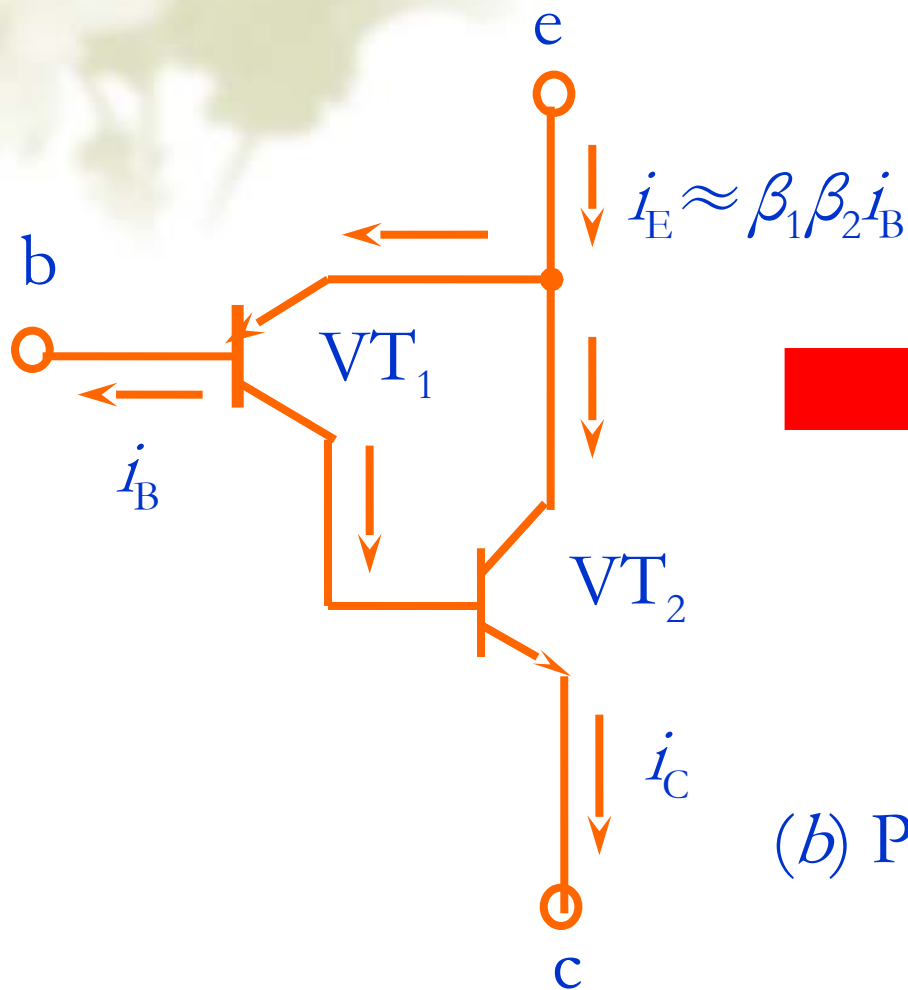
(1) 复合管 (Darlington Connection)

- **存在的问题**：大功率输出极的工作电流大，而一般大功率管的电流放大系数都较小。
- 通常采用所谓“复合管”的办法来解决。
- 设有两只晶体管，把前一只管的集电极或发射极接到下一只管的基极，这种连接所形成的晶体管组合称为复合管

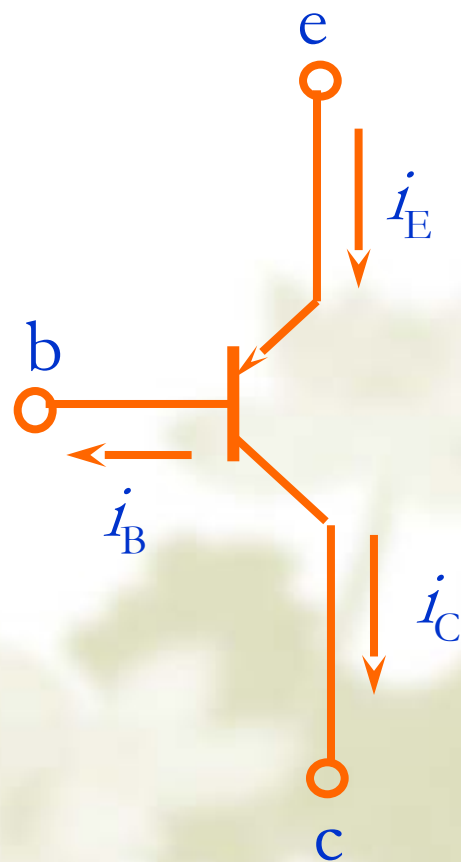
2. 复合互补对称电路



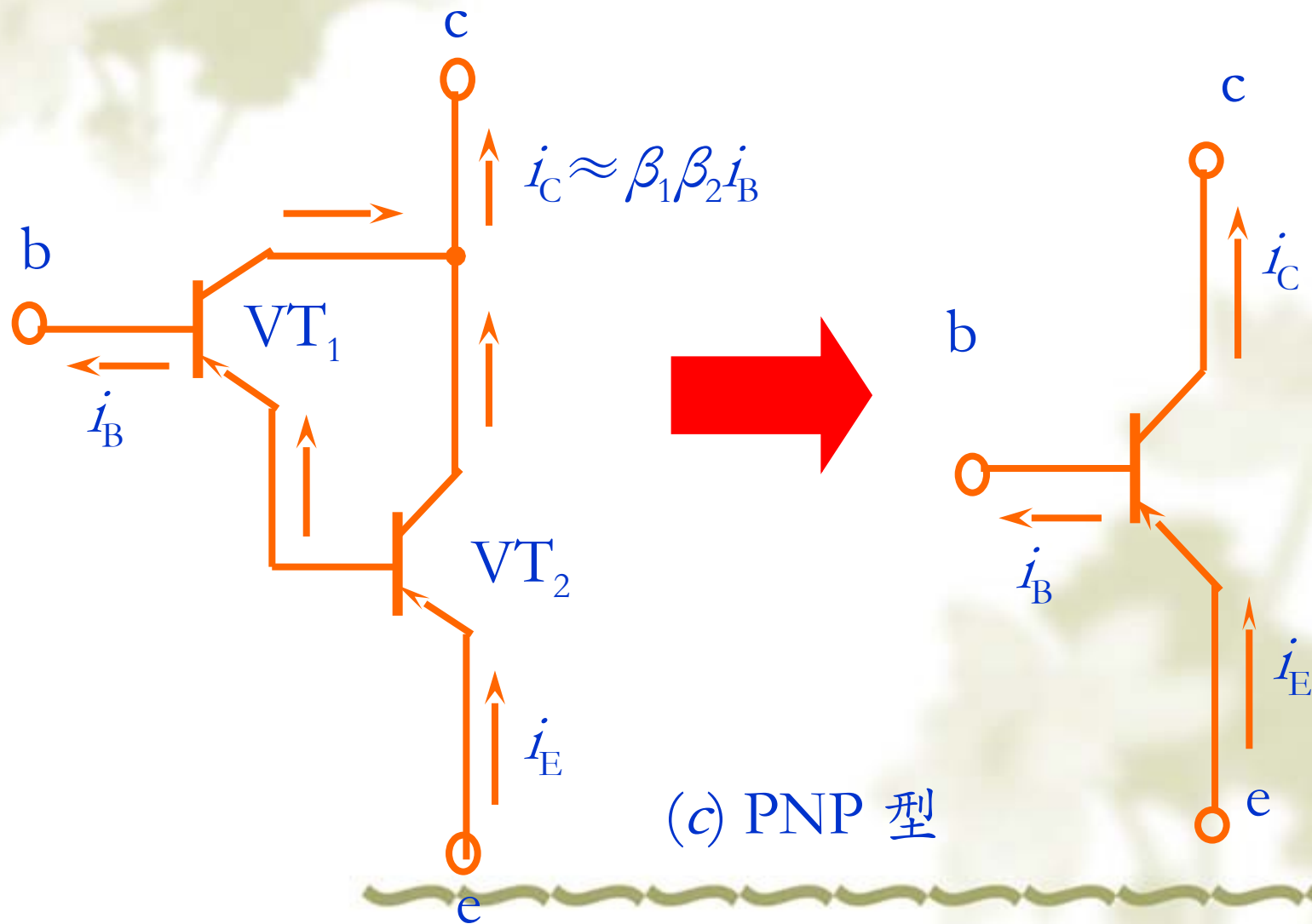
2. 复合互补对称电路



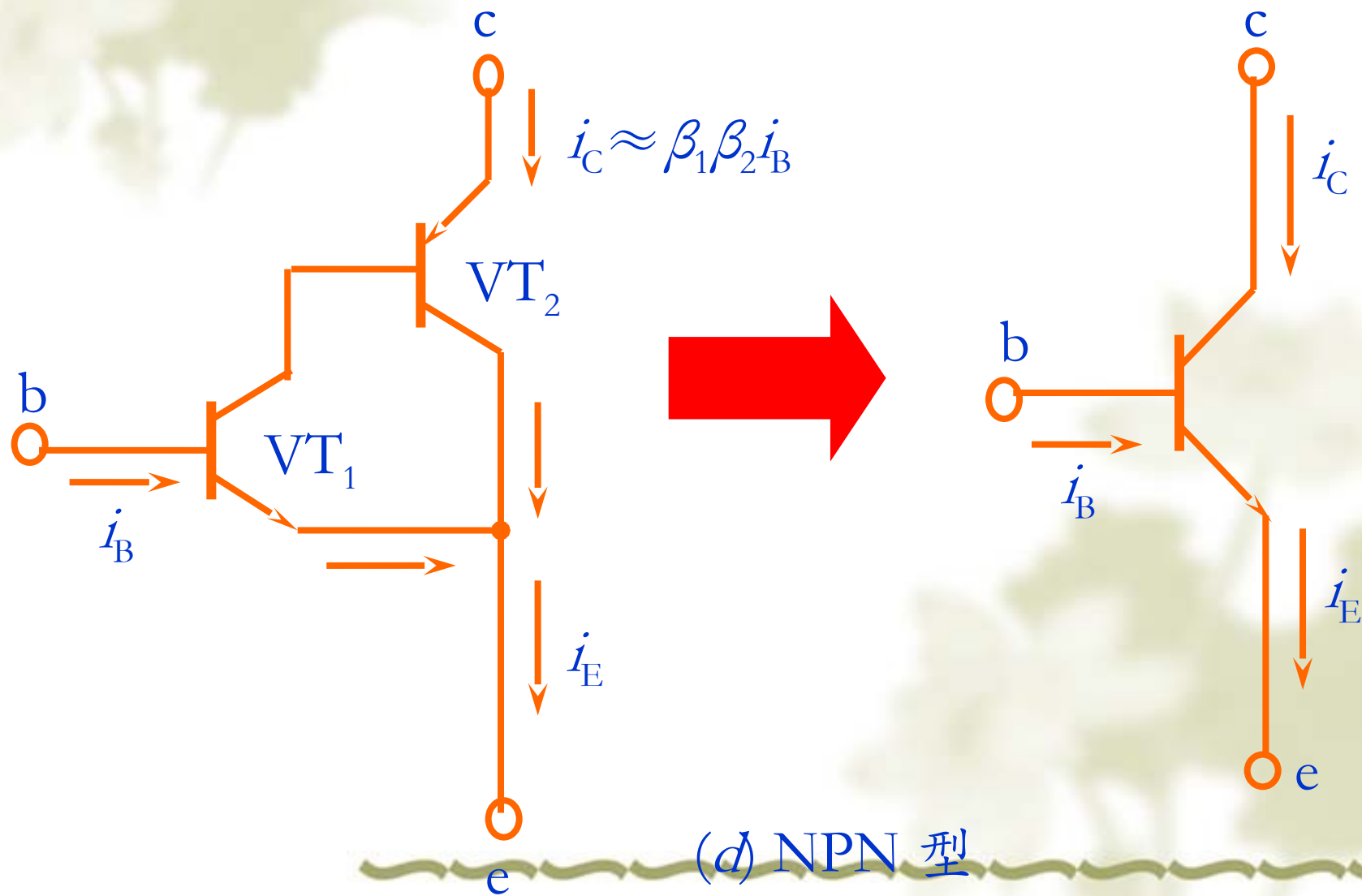
(b) PNP 型



2. 复合互补对称电路



2. 复合互补对称电路



2. 复合互补对称电路

复合管构成规则

- i_B 向管内流的复合管等效为 NPN 管；
 i_B 向管外流的复合管等效为 PNP 管；
 i_B 的流向由 T_1 管的基极电流决定，即由 VT_1 管的类型决定。
- 必须保证每只管各电极的电流都能顺着各个管的正常工作方向流动；否则将是错误的。

(2) 准互补对称电路 (Quasi Complementary Emitter Follower)

- 互补对称电路中，两个输出管是互补工作的，因而**要求两管为不同类型**，一个为 NPN 型，而另一个则为 PNP 型。
- 为了满足电路对称就要求两管特性一致。
- 这对 NPN 和 PNP 两种大功率管来说，一般是难以实现的，尤其是当一个是硅管另一个是锗管时，若要两管特性一致，最好使 VT_3 和 VT_4 是同一种型号的管子。

P198 6-5 某学生设计的**OTL功放**电路：

(1) 为实现输出最大幅值正负对称，
静态时A点的电位应为多大？

$$V_A = \frac{V_{CC}}{2}$$

(2) 若 U_{CE3} 和 U_{CE5} 的最小值约为3V，
求最大不失真时的 P_O 、 P_V 、 η ？

$$U_{om} = V_{CC}' - U_{CES} = 10 - 3 = 7V$$

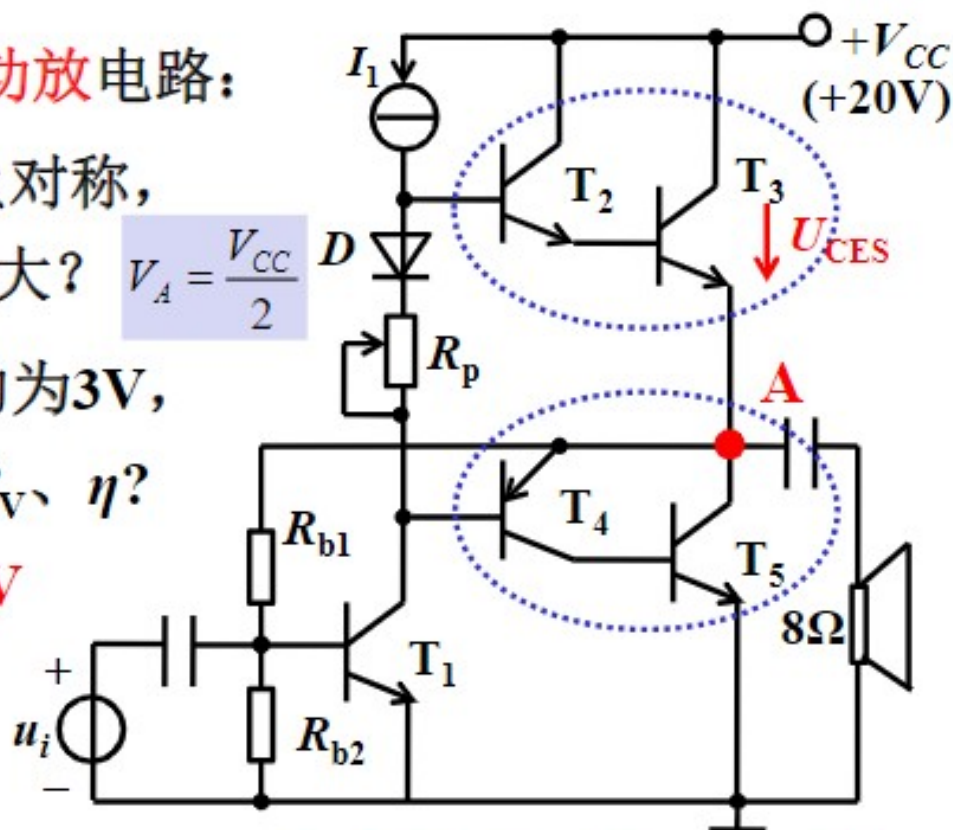
(3) T_3 和 T_5 的 P_{CM} 、 I_{CM} 、
 $U_{(BR)CEO}$ 如何选择？

(4) D 和 R_p 的作用？ \rightarrow 克服交越失真 **复合管准互补OTL功放**

提示： T_2 、 T_3 构成了复合管，可等效成一个NPN管；

T_4 、 T_5 构成了复合管，可等效成一个PNP管。

T_1 采用共发射极接法，目的在于放大 u_i



第6章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的特殊问题

6.2 互补对称功率放大电路

1. 双电源互补对称电路 OCL

2. 单电源互补对称电路 OTL