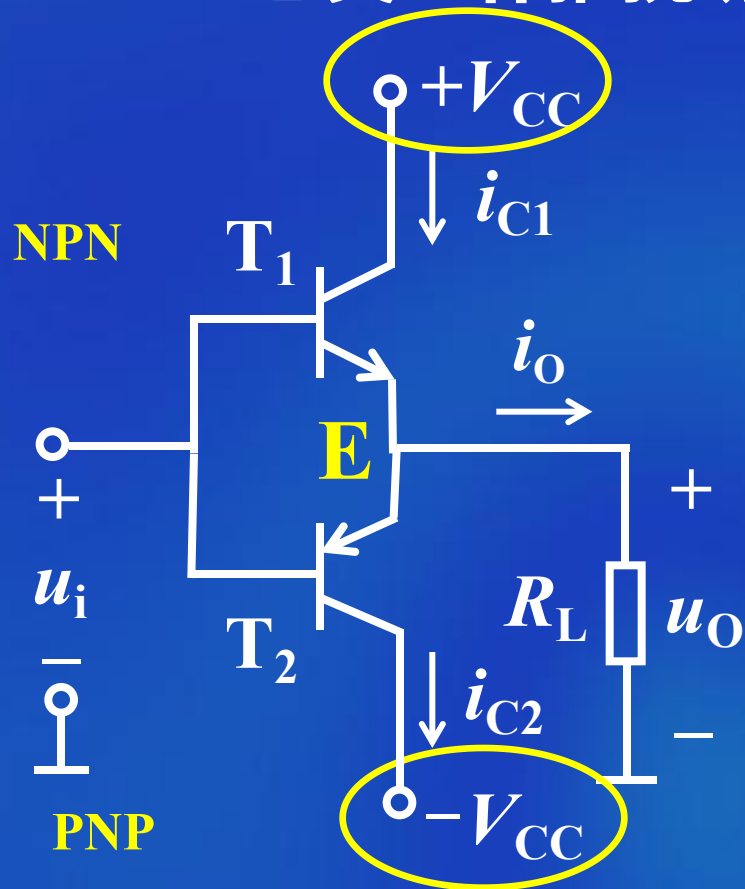


10.2 互补推挽功率放大电路

10.2.1 乙类互补推挽功率放大电路



电路特点：

- (1) 晶体管 T_1 、 T_2 特性对称
- (2) 电源对称
- (3) T_1 、 T_2 射极输出

1. 工作原理

设 $u_i = U_{im} \sin \omega t$

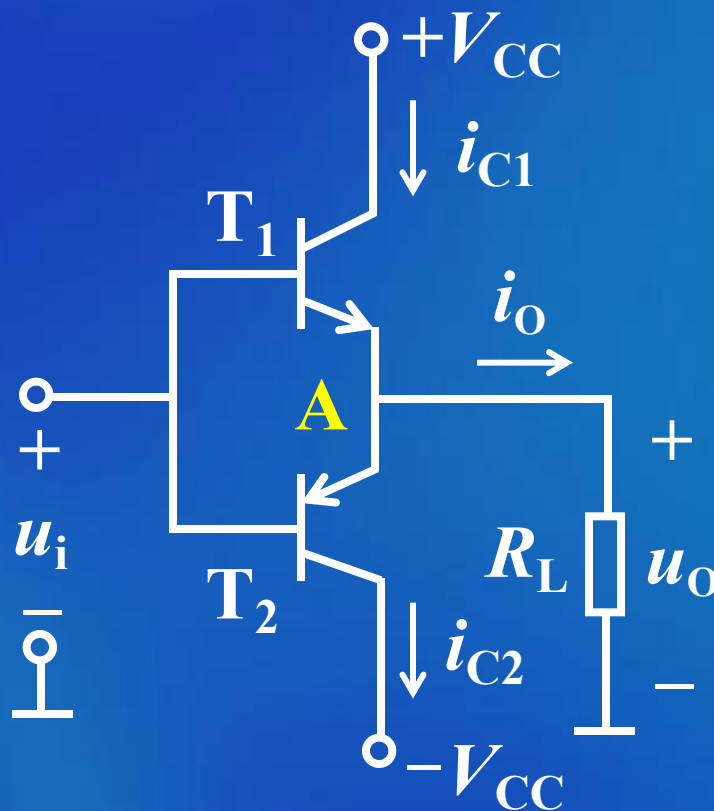
a. 当 $u_i = 0$ 时

$$U_A = 0$$

T_1 、 T_2 截止

$$u_o = 0$$

静态功耗为零



b. $u_i > 0$ 时

T_1 导通

T_2 截止

输入信号

电流方向

输出信号

$$u_o \approx u_i$$



c. $u_i < 0$ 时

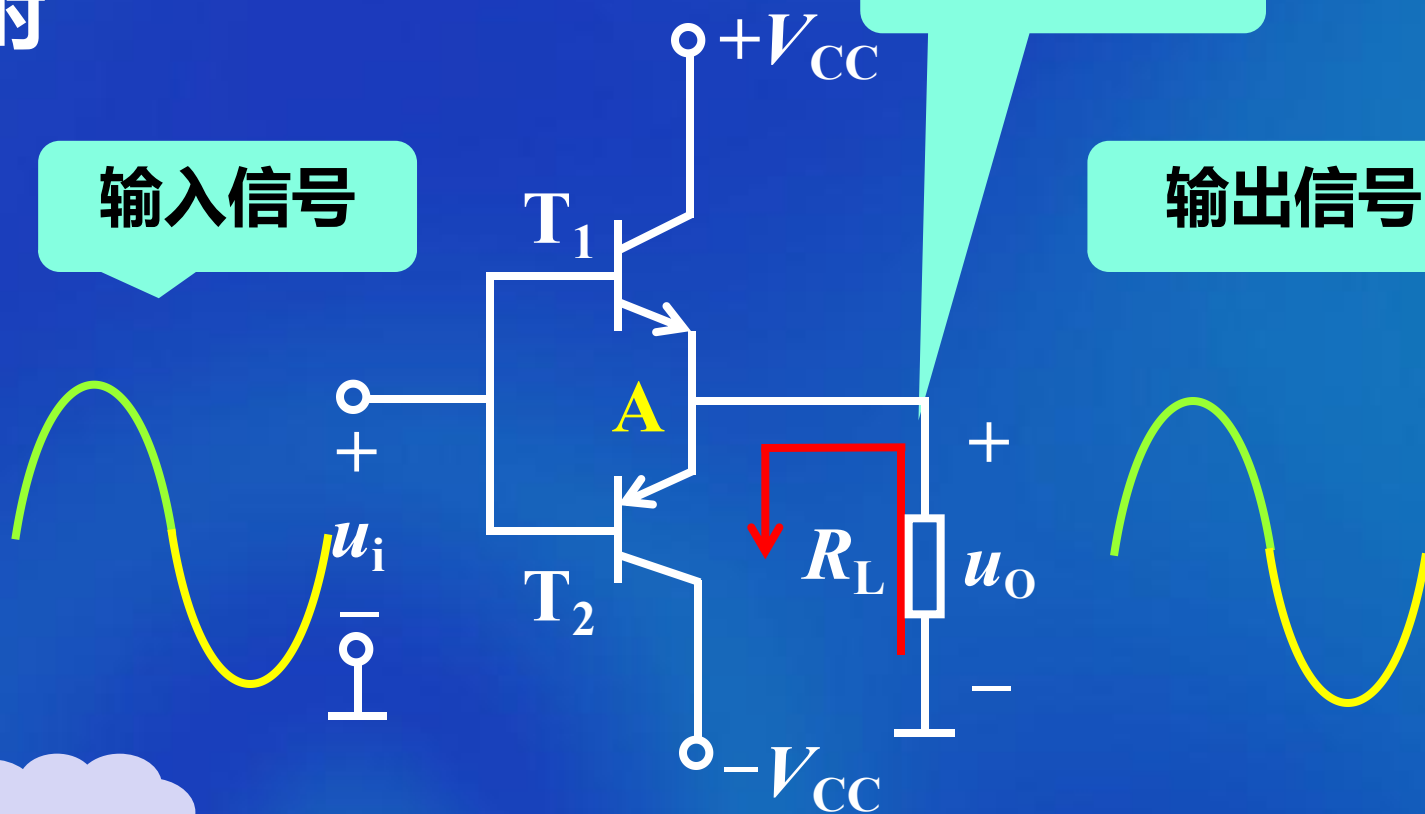
T_1 截止

T_2 导通

输入信号

电流方向

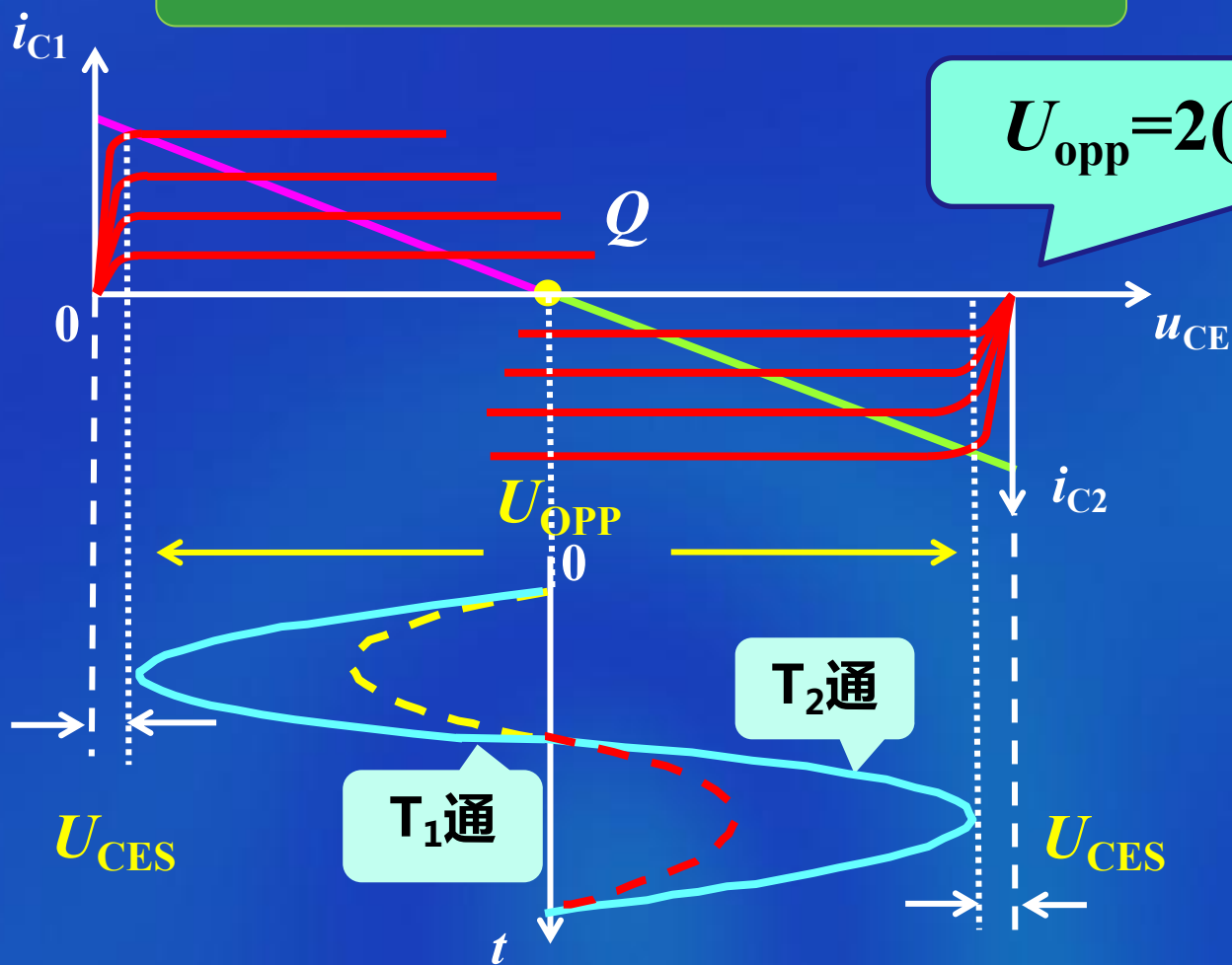
输出信号



$$u_o \approx u_i$$

乙类互补推挽电路工作情况

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



小结：乙类互补推挽功率放大电路

分类

特点

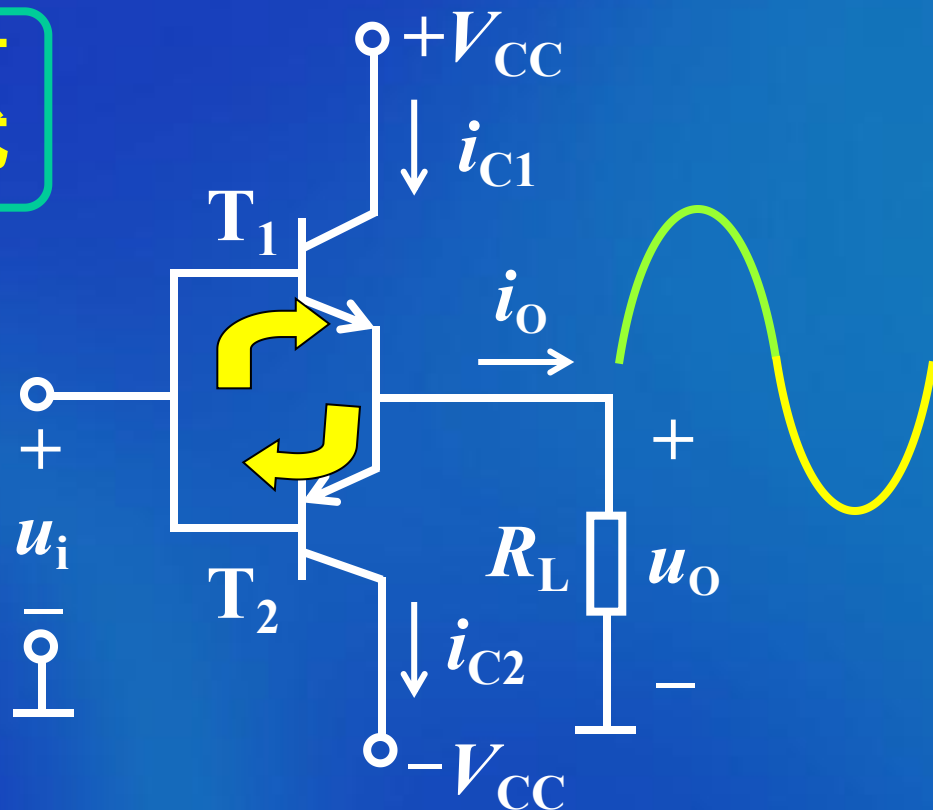
方式

电路特点：

(1) T_1 与 T_2 管交替导通；

(2) 晶体管工作在乙类状态，集电极无静态电流；

(3) 无静态功耗，效率高。



由于电路的负载并非通过电容而是直接接在晶体管的射极，因而这功率放大电路业常称为 **OCL** (**O**utput **C**apacitanceless) 电路。

2. 主要指标计算

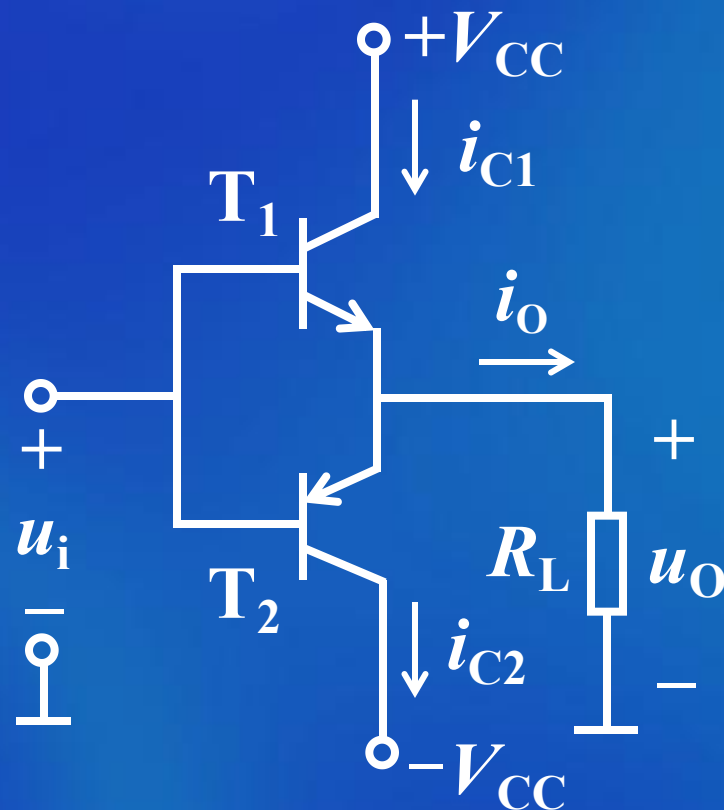
设 $u_o = U_{om} \sin \omega t$

(1) 输出功率

$$P_o = U_o I_o$$

$$= \frac{1}{2} U_{om} I_{om}$$

$$= \frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

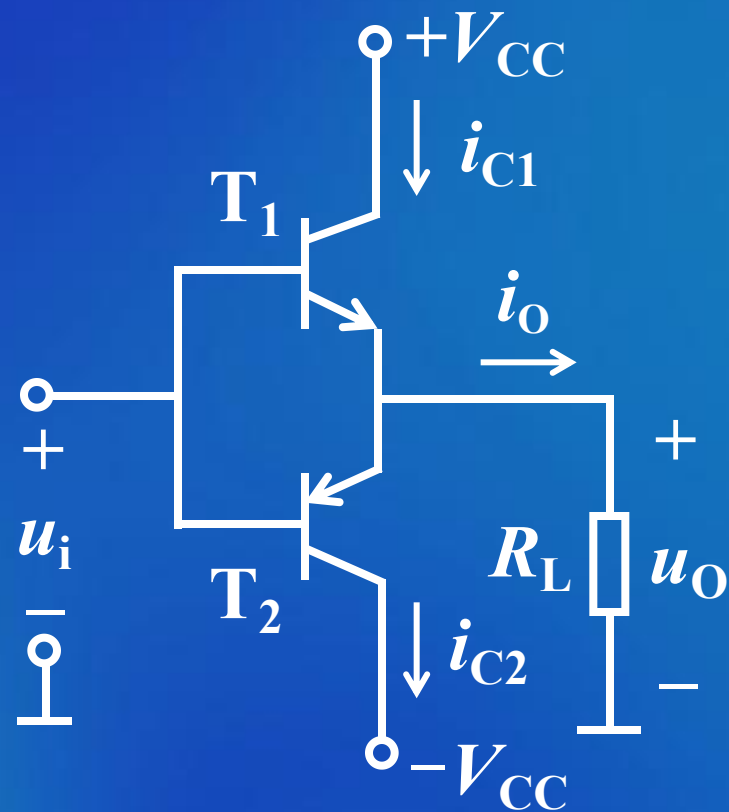


当 U_{om} 达到最大值 $(V_{CC} - U_{CES})$ 时

$$P_{\text{om}} = \frac{(V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}})^2}{2R_{\text{L}}}$$

当忽略三极管的饱和压降 U_{CES} 时

$$P_{\text{om}} \approx \frac{V_{\text{CC}}^2}{2R_{\text{L}}}$$



(2) 电源供给的功率

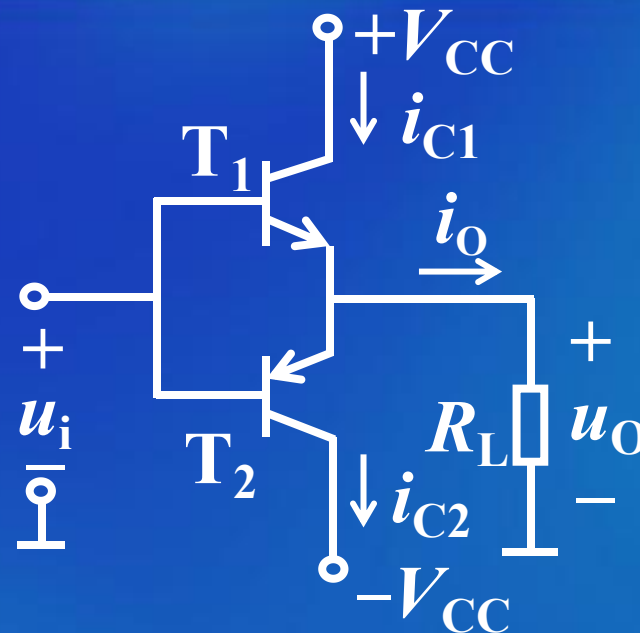
平均集电极电流 $I_{C(AV)}$ 为

$$I_{C(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{c1} d\omega t$$

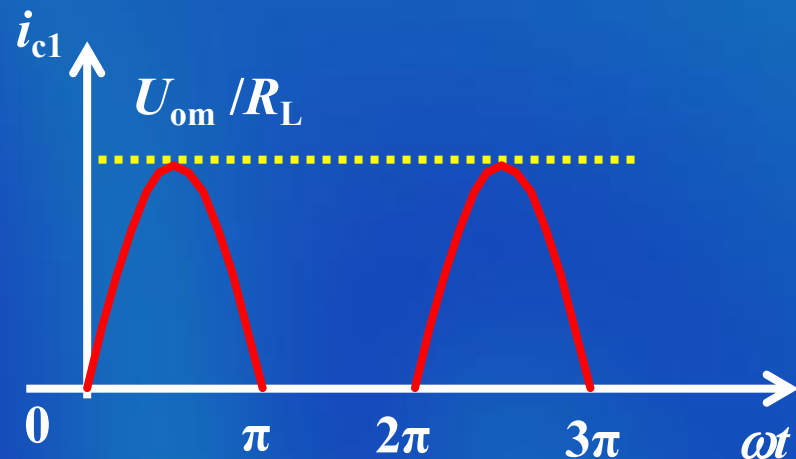
$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{u_{om}}{R_L} d\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi R_L} \int_0^{\pi} U_{om} \sin \omega t d\omega t$$

$$= \frac{1}{\pi} \frac{U_{om}}{R_L}$$



每个电源中的电流为半个正弦波



两个电源供给的总电源功率

$$P_V = 2V_{CC}I_C$$

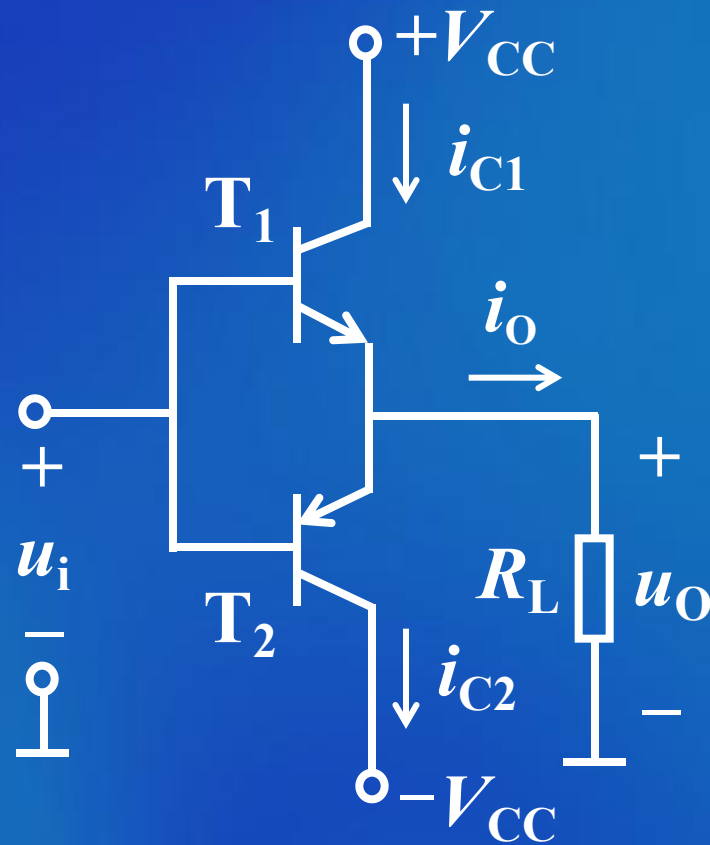
$$= \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}U_{om}}{R_L}$$

当 U_{om} 达到最大值($V_{CC} - U_{CES}$)时

$$P_{Vm} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{R_L}$$

当忽略三极管的饱和压降 U_{CES} 时

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



(3) 能量转换效率

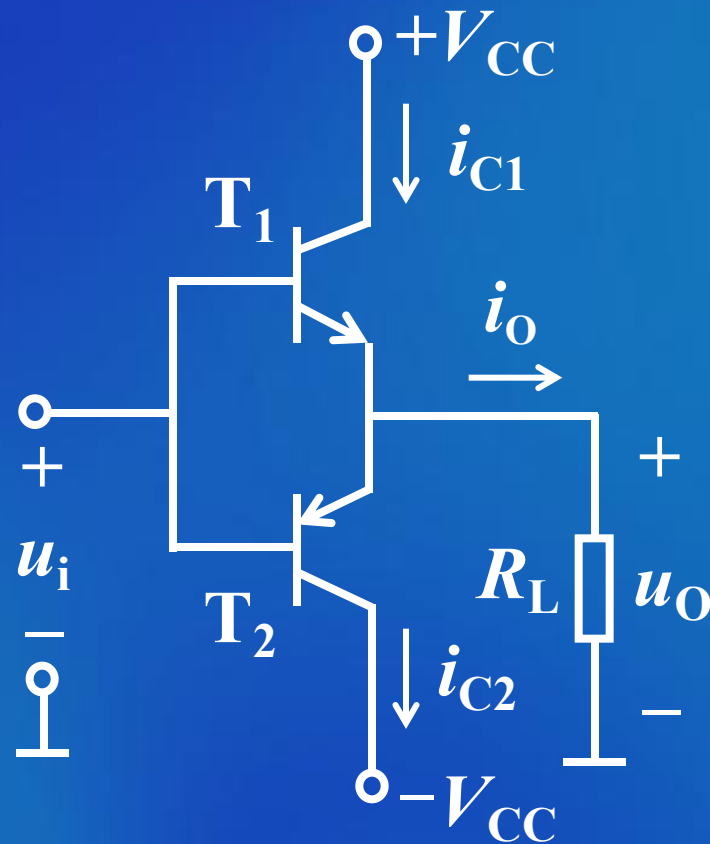
$$\eta = \frac{P_o}{P_V} = \frac{\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}}{\frac{2}{\pi} \frac{U_{om} V_{CC}}{R_L}} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}}$$

当 U_{om} 达到最大值($V_{CC} - U_{CES}$)时

$$\eta_m = \frac{\pi (V_{CC} - U_{CES})}{4 V_{CC}}$$

当忽略三极管的饱和压降 U_{CES} 时

$$U_{om} \approx V_{CC} \quad \eta_m \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$



总 结

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

一般

(1) 输出功率

$$* P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

(2) 电源供给的功率

$$* P_V = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L}$$

(3) 能量转换效率

$$* \eta = \frac{\pi}{4} \frac{U_{om}}{V_{CC}}$$

极限

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

$$P_{Vm} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} (V_{CC} - U_{CES})}{R_L} \approx \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

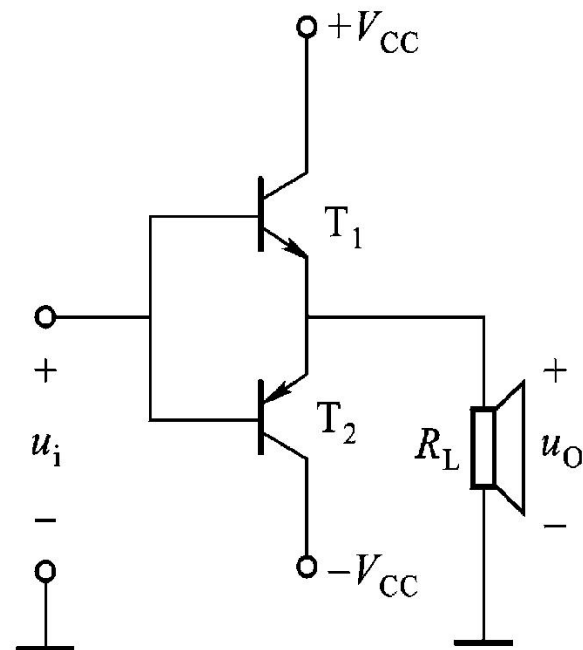
$$\eta_m = \frac{\pi (V_{CC} - U_{CES})}{4V_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

教材三版P337例10.2.1（教材二版P314，例9.2.1）：

- 电路如图9.2.3所示。已知电源电压 $V_{CC}=15V$ ， $R_L=8\Omega$ ，输入
- 信号是正弦波。试问：

（a）假设 $U_{CES}\approx 0$ 时，负载能够得到的最大输出功率和能量转换效率最大值分别是多少？

（b）当输入信号 $u_i = 10\sin\omega t V$ 时，负载得到的功率和能量转换效率分别是多少？



[解] (a) 根据题中假设 $U_{CES} \approx 0$ 的条件, 输出功率的最大值及能量转换效率最大值为

$$P_{om} = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{15^2}{2 \times 8} = 14.06 \text{ W}$$

$$\eta_m = \frac{\pi (V_{CC} - U_{CES})}{4V_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

(b) 对每半个周期来说, 电路可等效为共集电极电路, 所以 $A_u \approx 1$ 、 $u_o = u_i = 10\sin\omega t \text{ V}$ 、 $U_{om} = 10\text{V}$ 。

$$P_o = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = \frac{10^2}{2 \times 8} = 6.25 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} = \frac{\pi U_{om}}{4 V_{CC}} = \frac{3.14 \times 10}{4 \times 15} = 52.33\%$$

(4) 晶体管的耗散功率

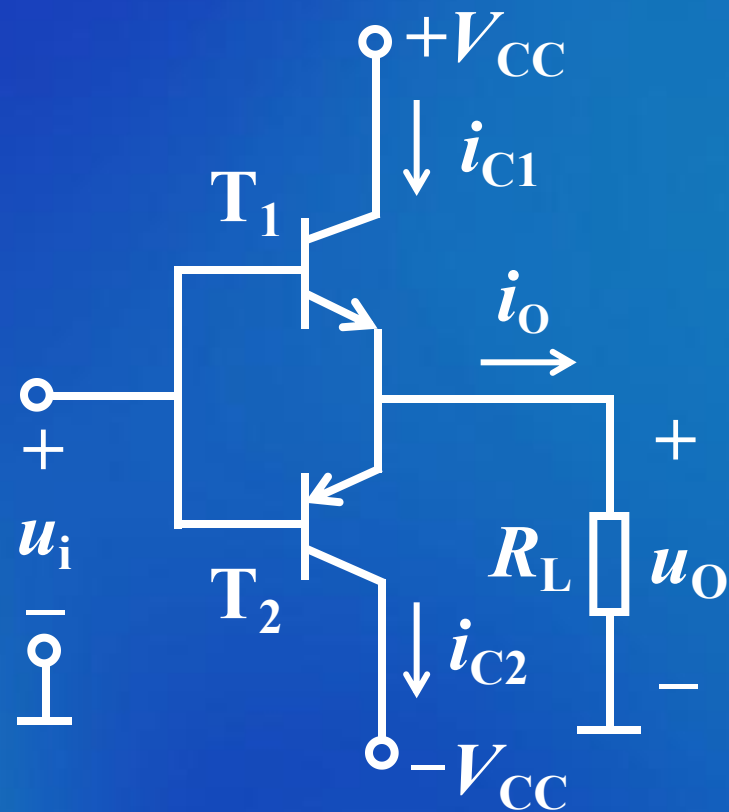
$$P_T = P_V - P_o$$

$$= \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} U_{om}}{R_L} - \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

令

$$\frac{dP_T}{dU_{om}} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{2V_{CC}}{\pi} - U_{om} \right) = 0$$

$$U_{om} = \frac{2}{\pi} V_{CC}$$



即当输出电压幅值为

$$U_{om} = \frac{2}{\pi} V_{CC}$$

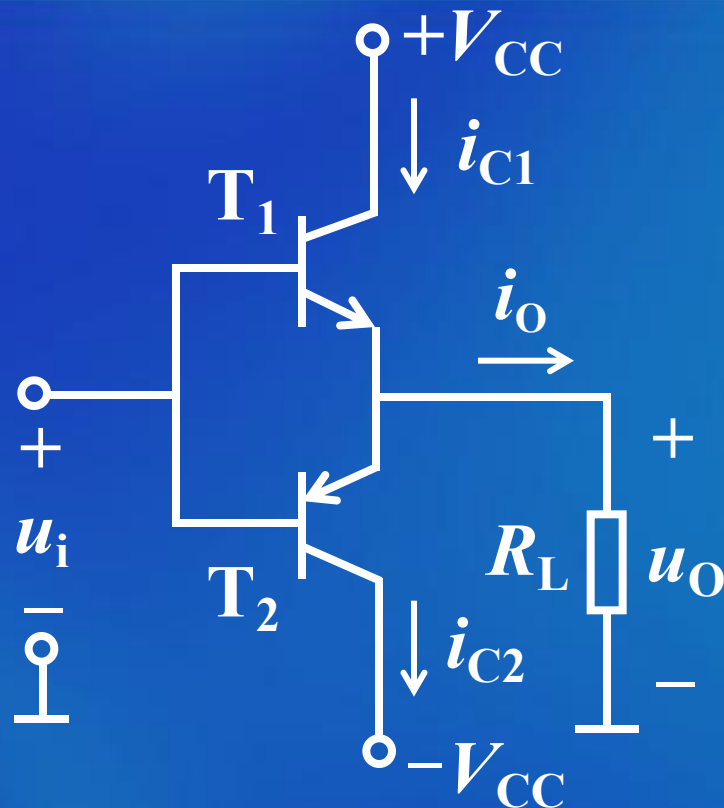
晶体管的管耗最大

最大管耗为

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

每只管子的最大管耗为

$$P_{Tm1} = P_{Tm2} \approx 0.2 P_{om}$$



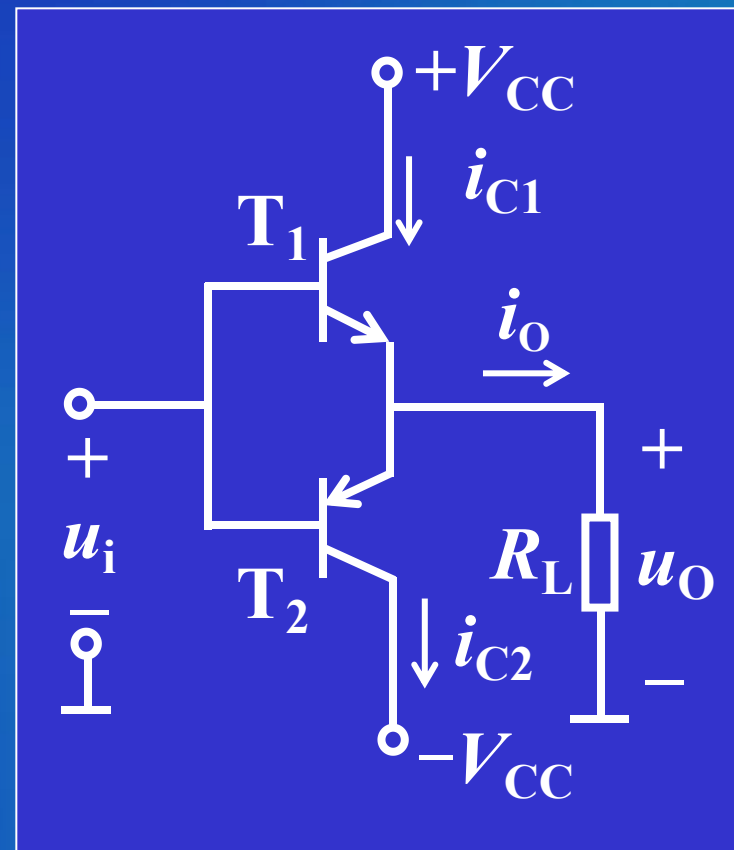
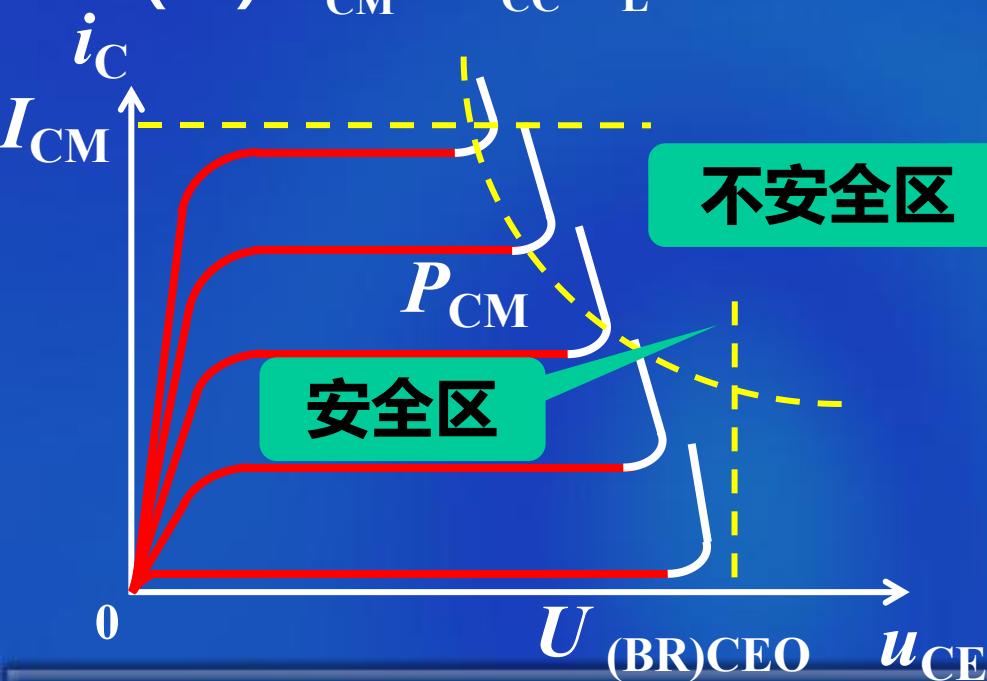
3. 功率管的选择

极限参数应满足(在互补推挽功率放大电路中)

$$(1) P_{CM} \geq 0.2P_{om}$$

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

$$(3) I_{CM} > V_{CC}/R_L$$

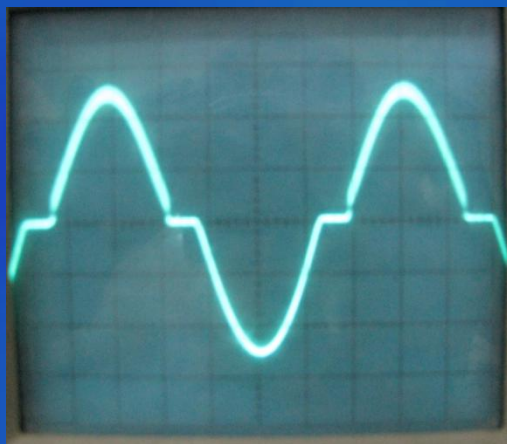
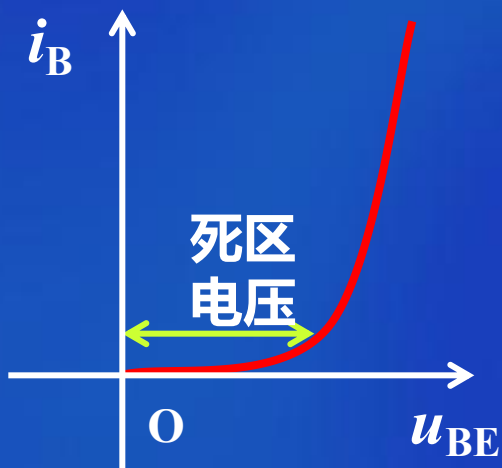


3. 电路存在的缺陷

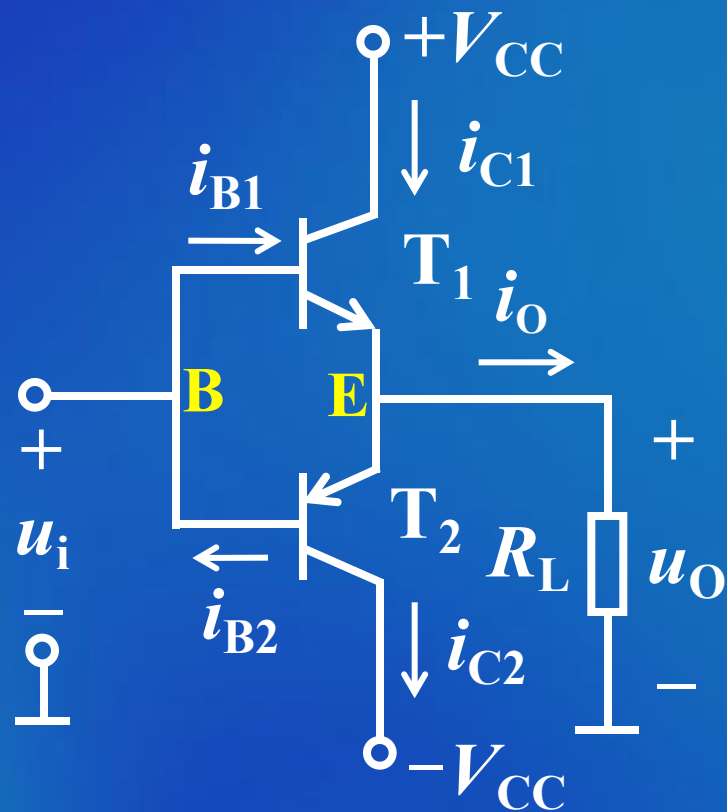
输出信号存在失真现象

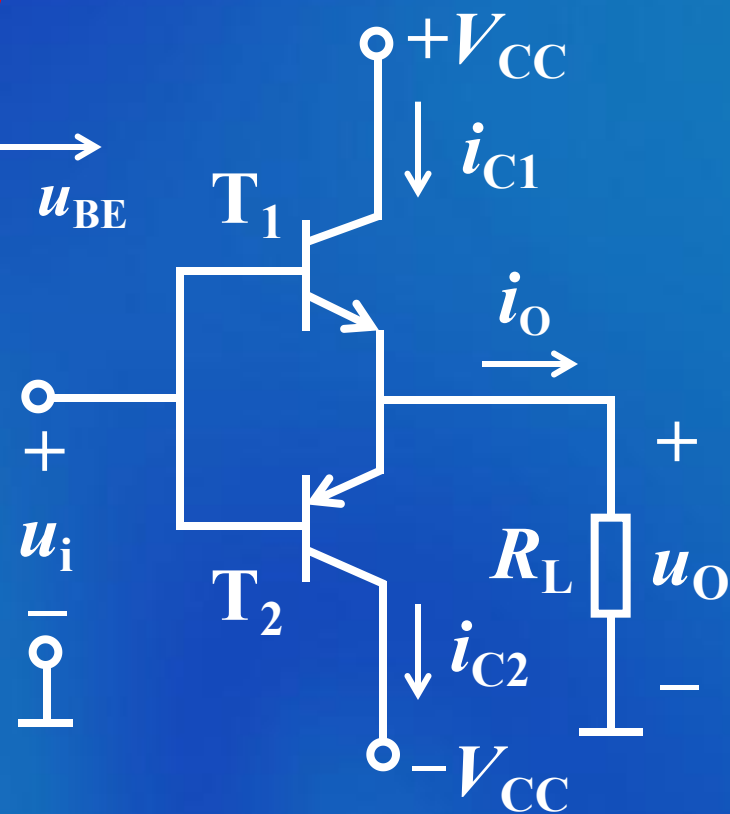
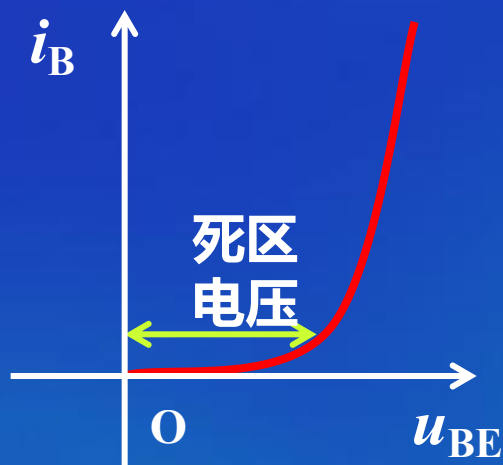
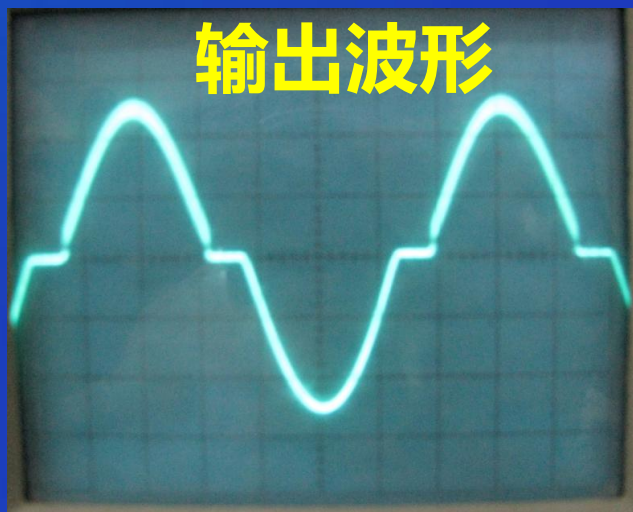
a. 失真的原因

晶体管存在死区电压。



输出波形





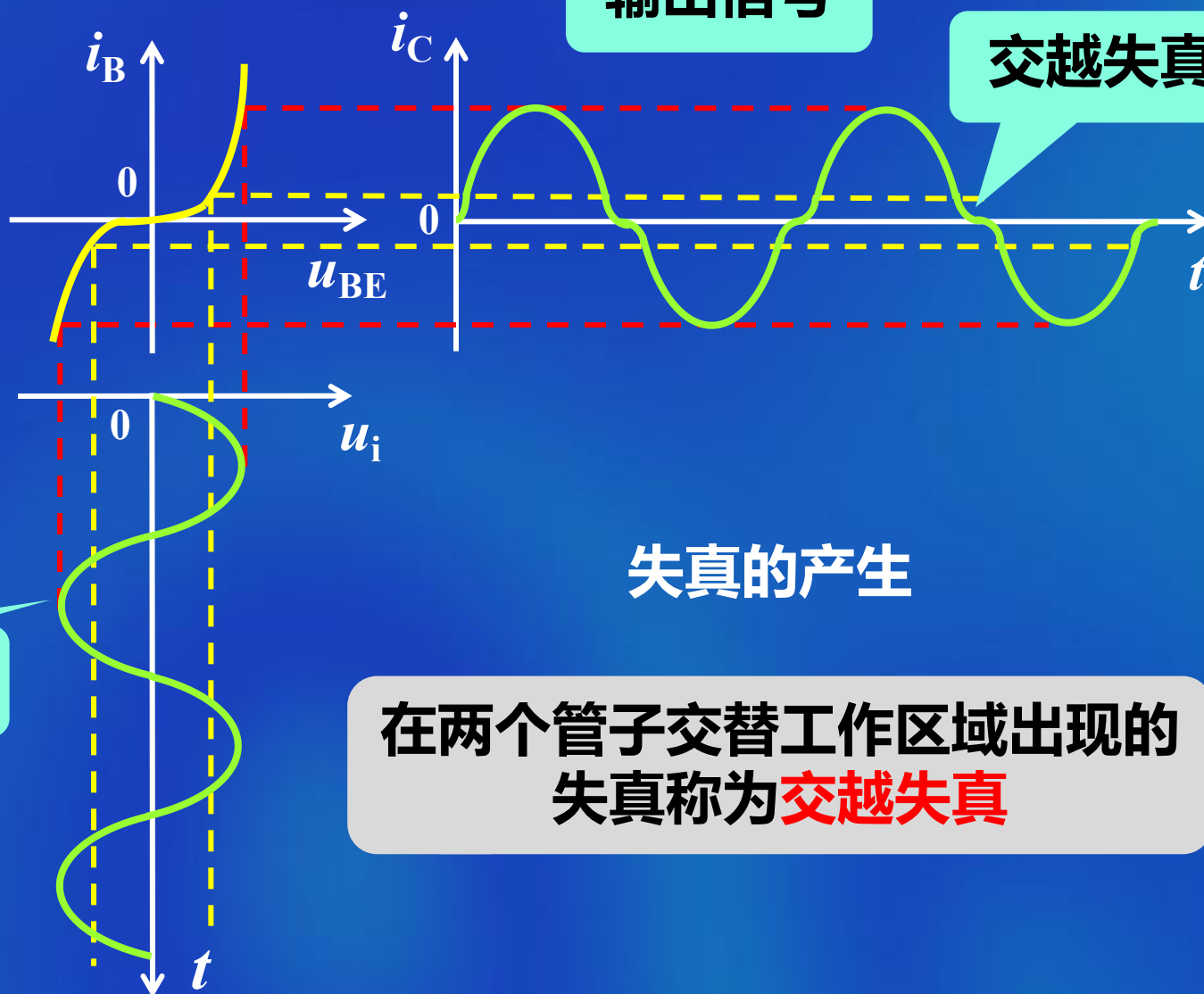
b. 失真的现象

当 u_i 较小时，管子 T_1 、 T_2 都截止

输出电流出现一段“死区”

输出信号

交越失真



输入信号

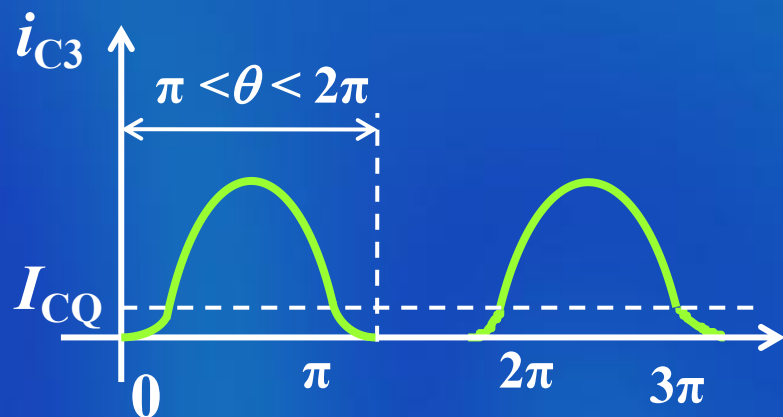
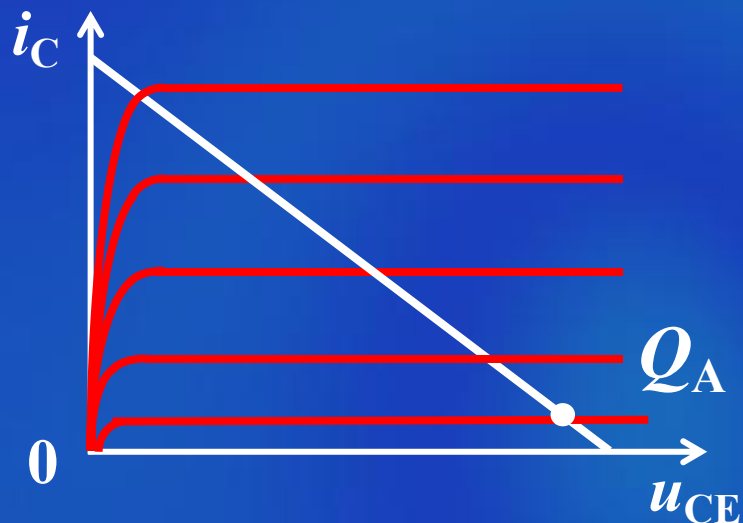
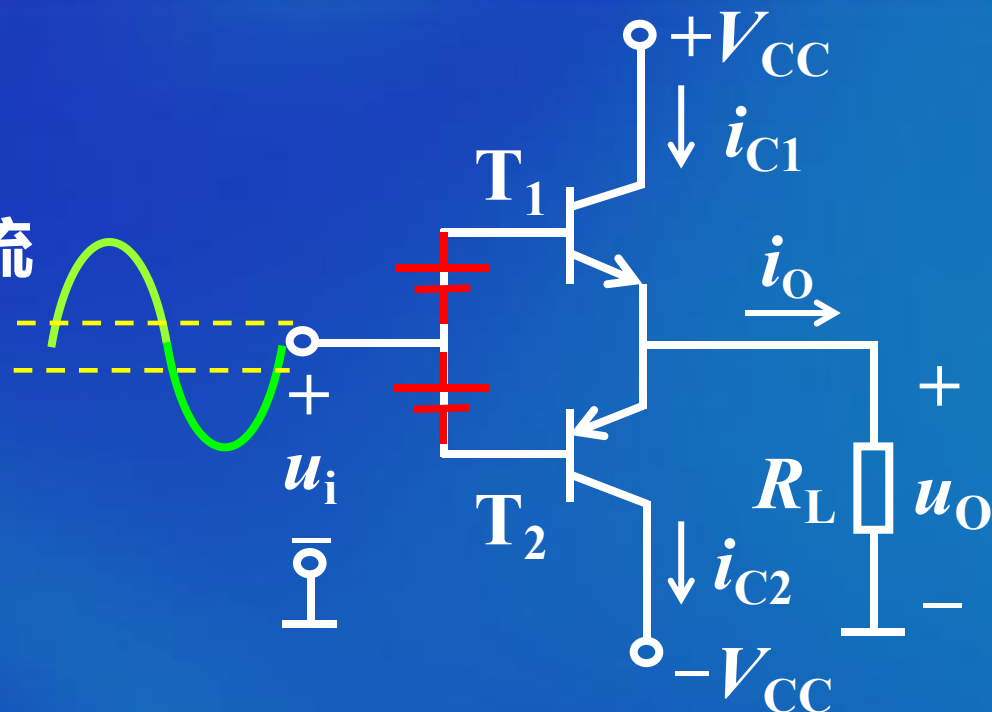
失真的产生

在两个管子交替工作区域出现的失真称为**交越失真**

4. 克服交越失真的常用方法

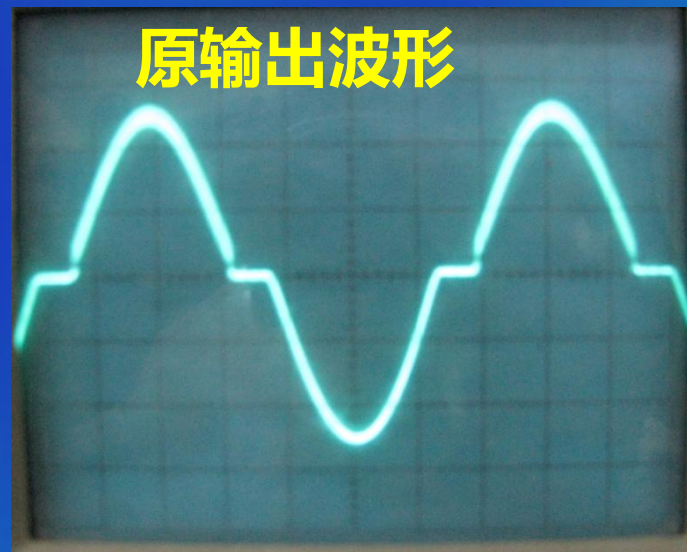
给功率管 (T_1 和 T_2) 一定的直流偏置, 使其工作于微导通状态.

甲乙类工作状态

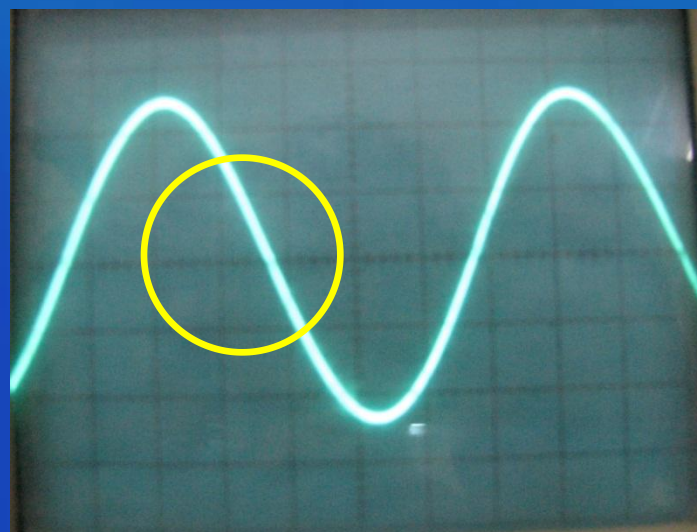
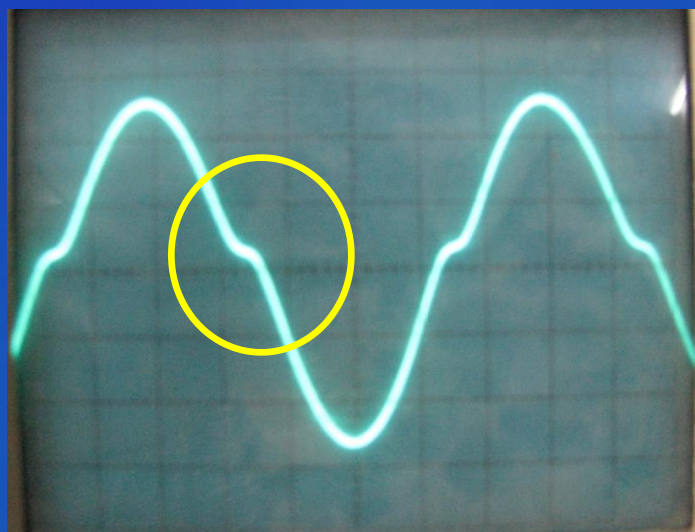


甲乙类功放输出波形

原输出波形

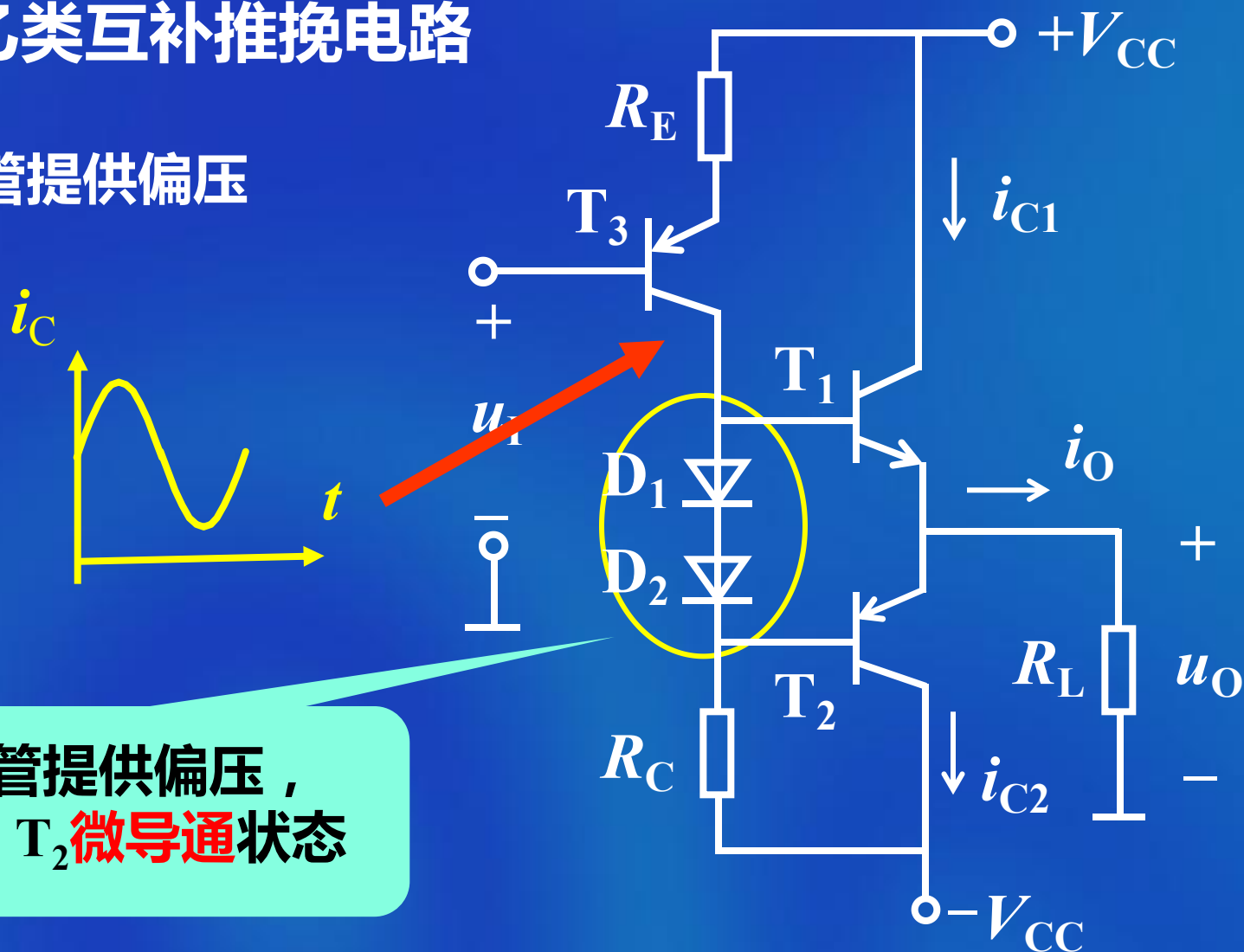


现输出波形



10.2.2 甲乙类互补推挽电路

1. 利用二极管提供偏压

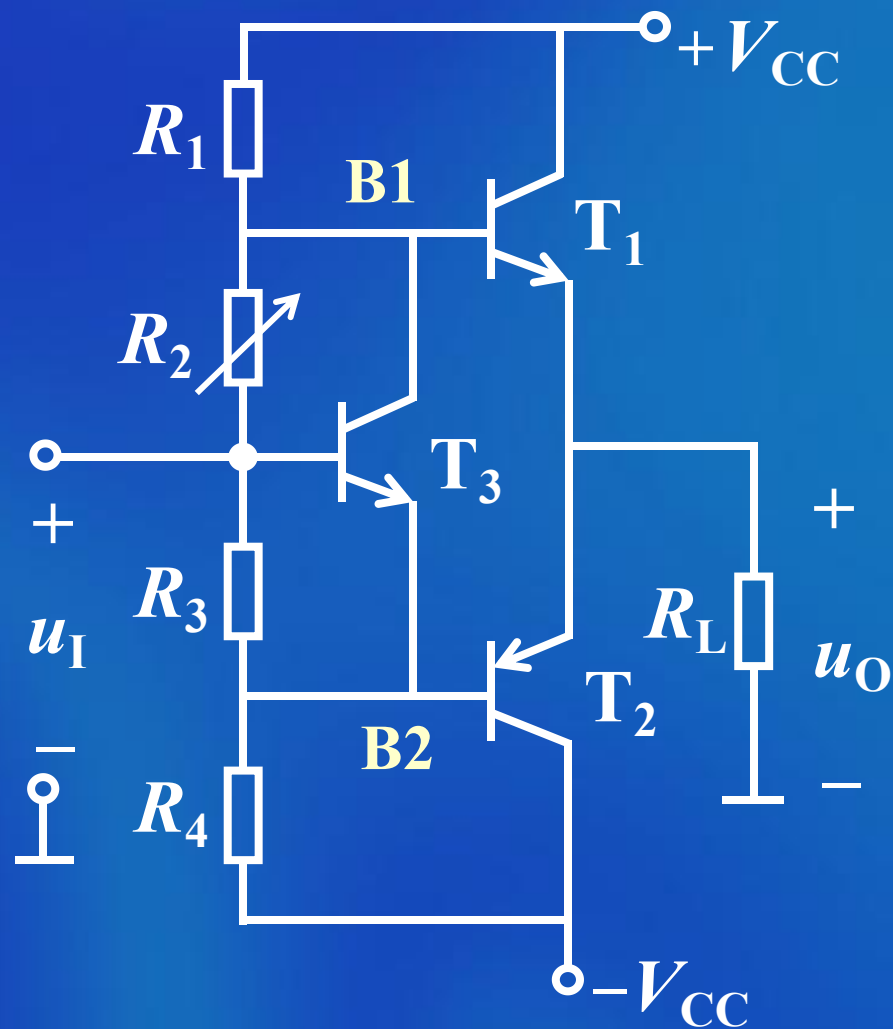


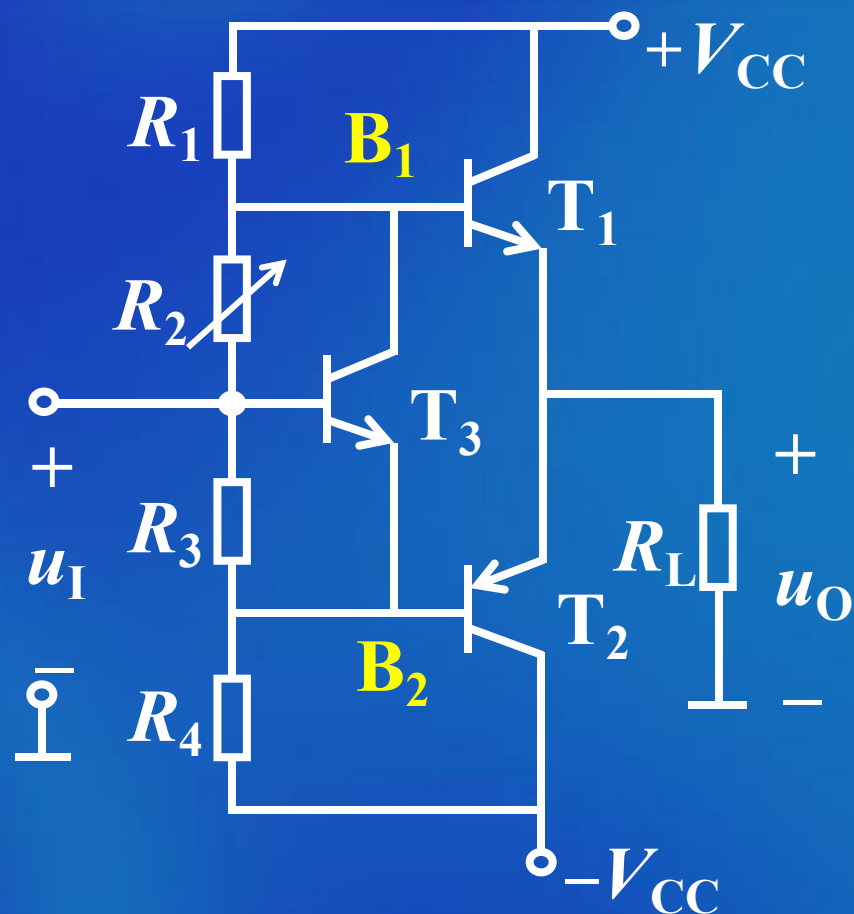
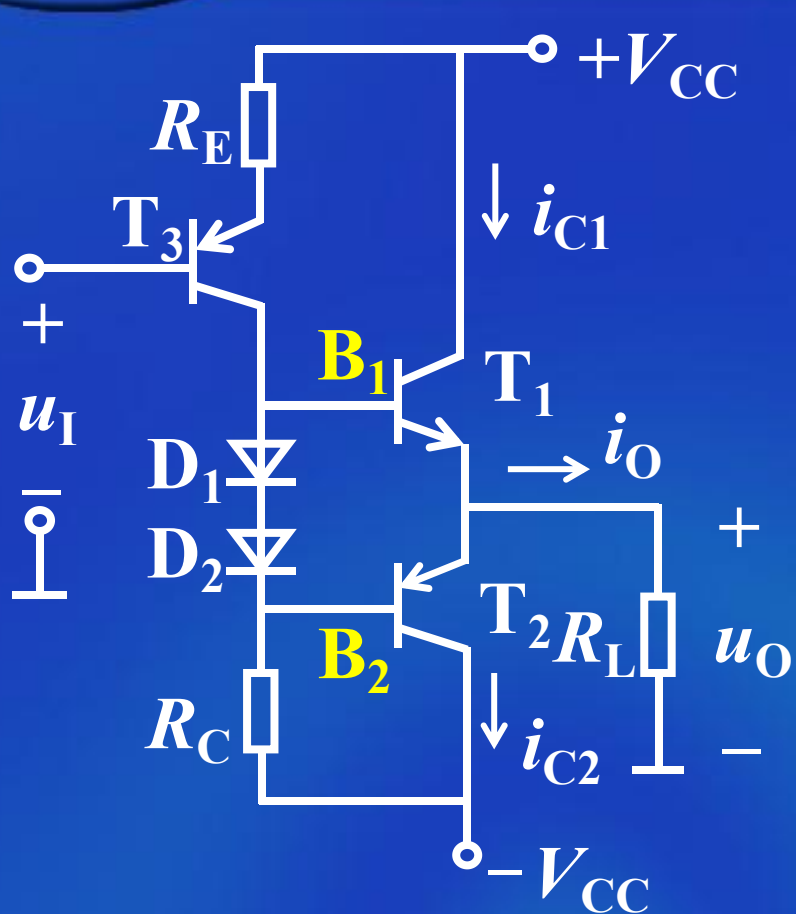
二极管提供偏压，
使 T_1 、 T_2 微导通状态

2. 利用扩大电路实现偏置

图中

$$U_{B1B2} = U_{BE3} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right)$$





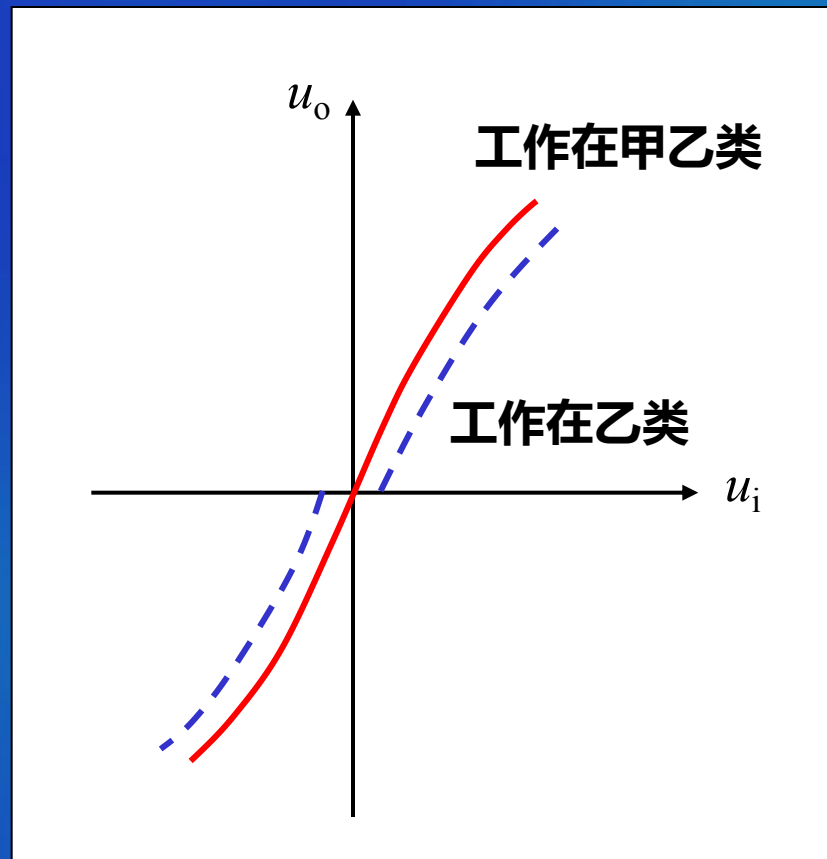
甲乙类互补推挽功率放大电路参数
计算近似为乙类互补推挽电路

小结：

甲乙类互补推挽电路特点：

1. T_1 与 T_2 管基极之间有偏压，存在小的集电极静态电流；

2. 可使放大器输出在零点附近仍能得到线性放大， u_o 与 u_i 在**任何时刻都成线性**。



10.2.3 单电源功率放大电路

1. 电路组成

2. 工作原理

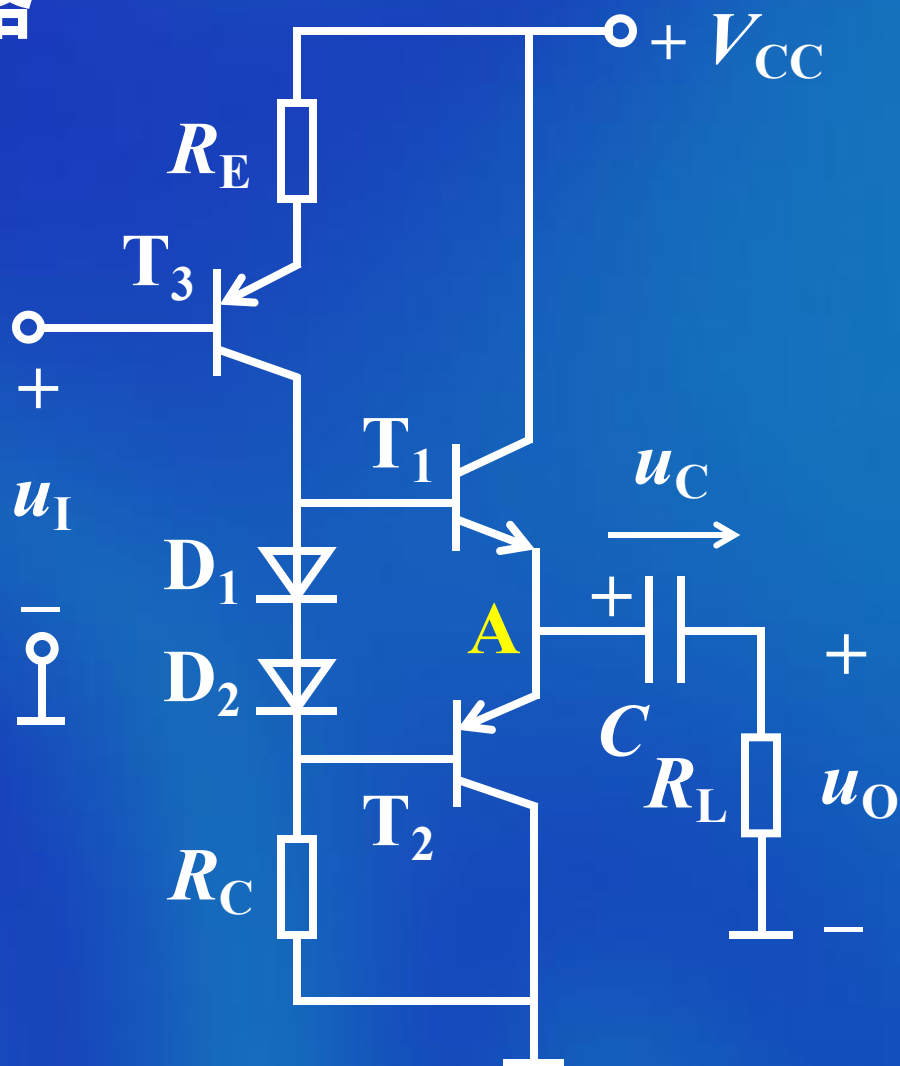
(1) 当 $u_I = 0$ 时

$$u_A = V_{CC}/2$$

$$u_C = V_{CC}/2$$

输出电压 $u_O = 0$

零入零出



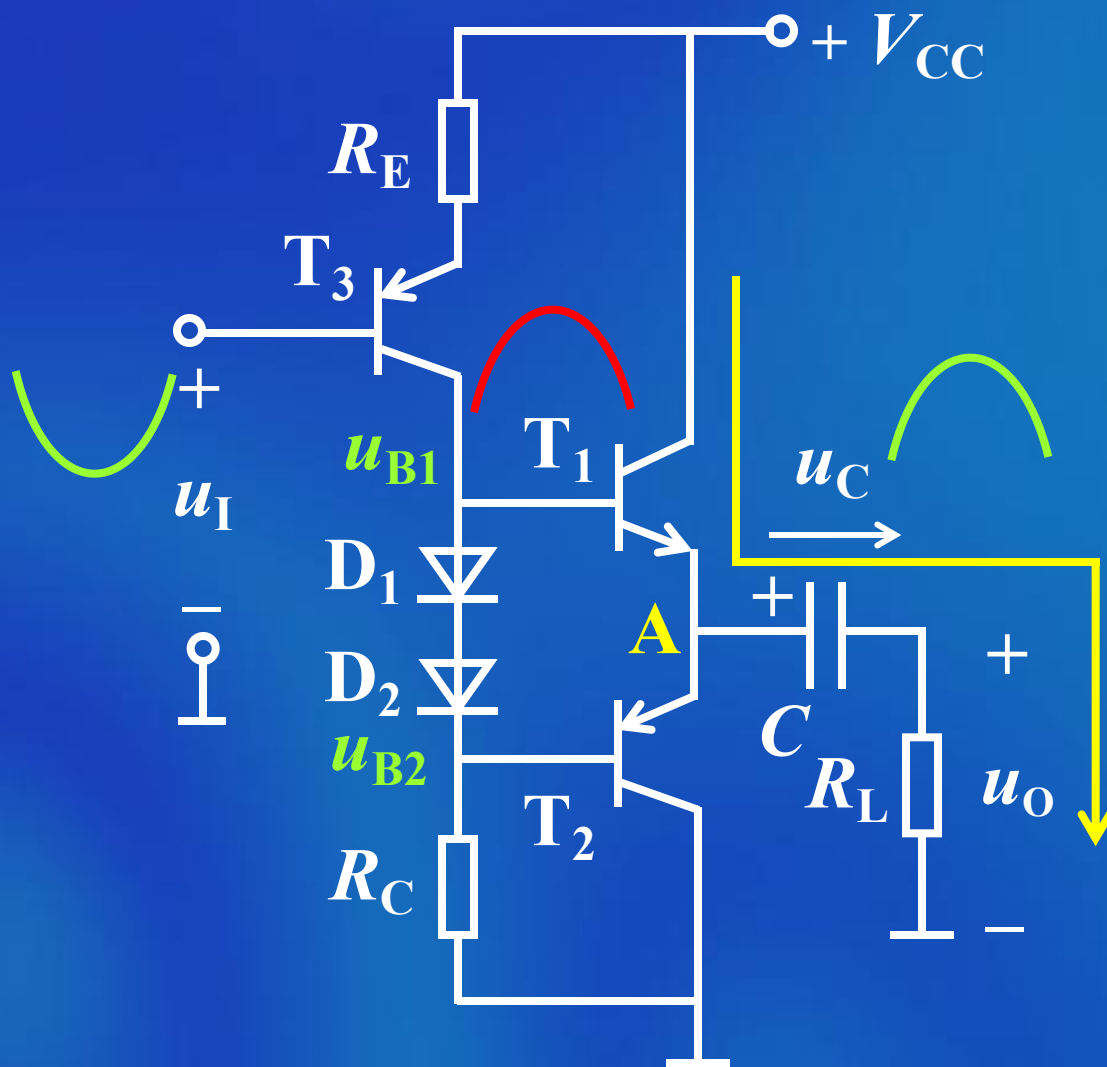
(2) 当 u_I 为负半周时

u_{B1} 信号为正半周

T_1 导通, T_2 截止

输出信号为正半周

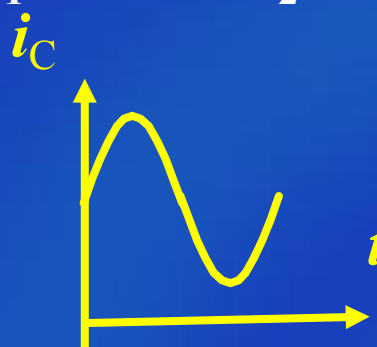
电容 C 同时**充电**



(3) 当 u_I 为正半周时

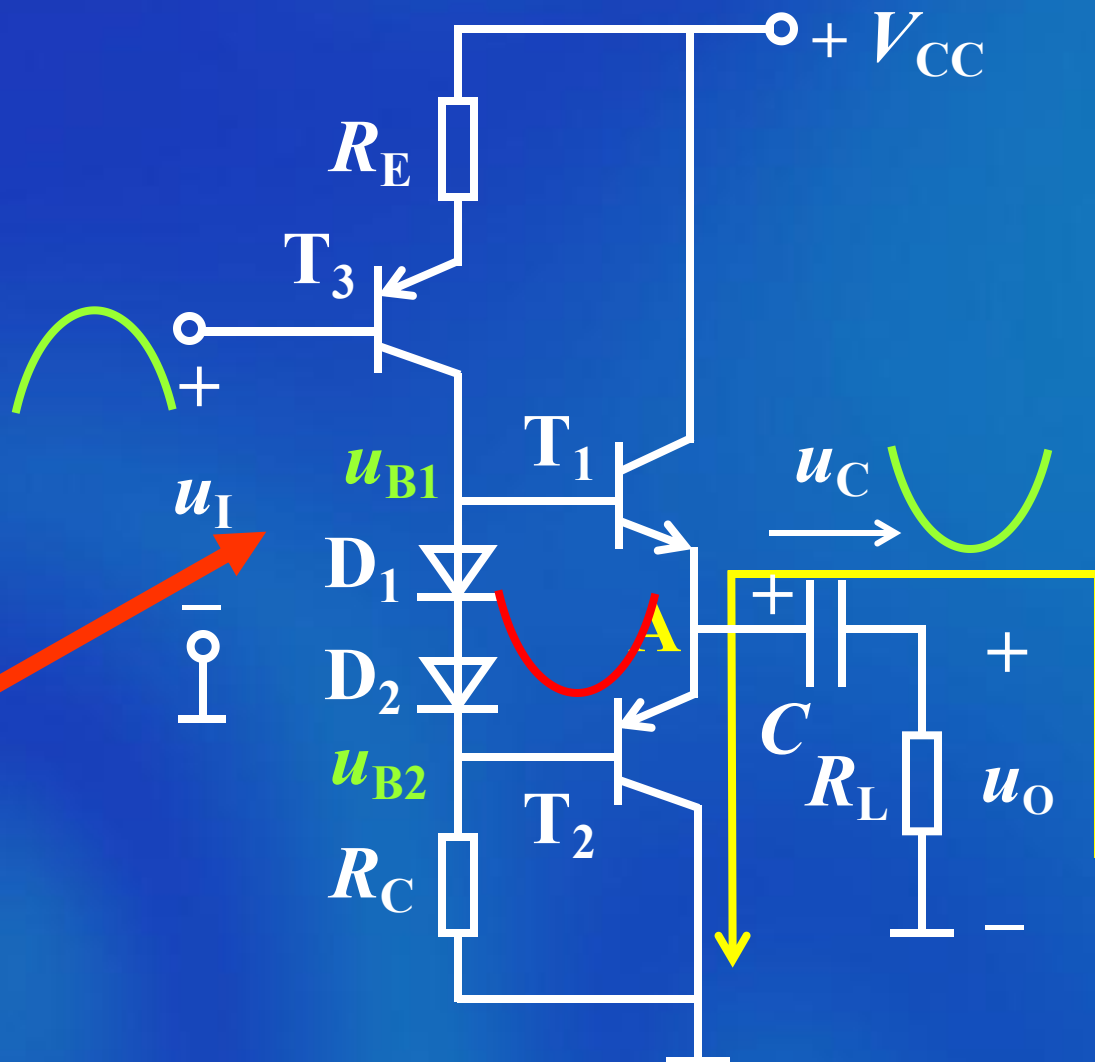
u_{B2} 信号为负半周

T_1 截止, T_2 导通



输出信号为负半周

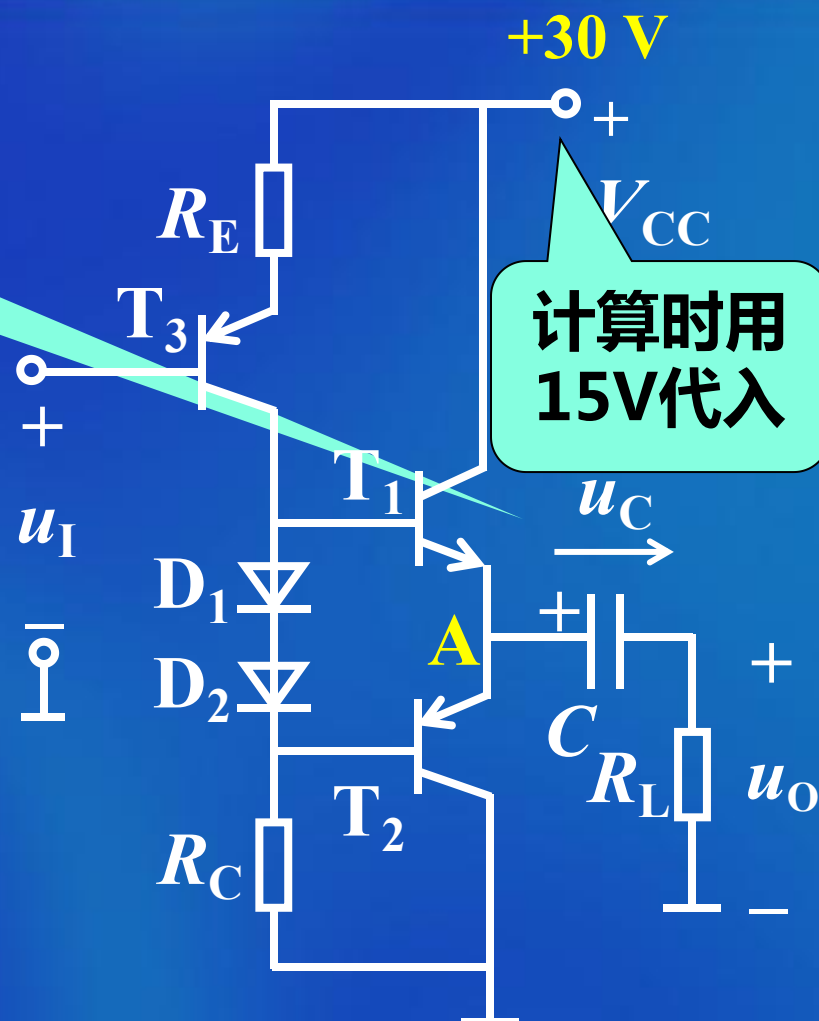
电容 C 放电



电容 C 起负电源 $-V_{CC}$ 的作用

注意：

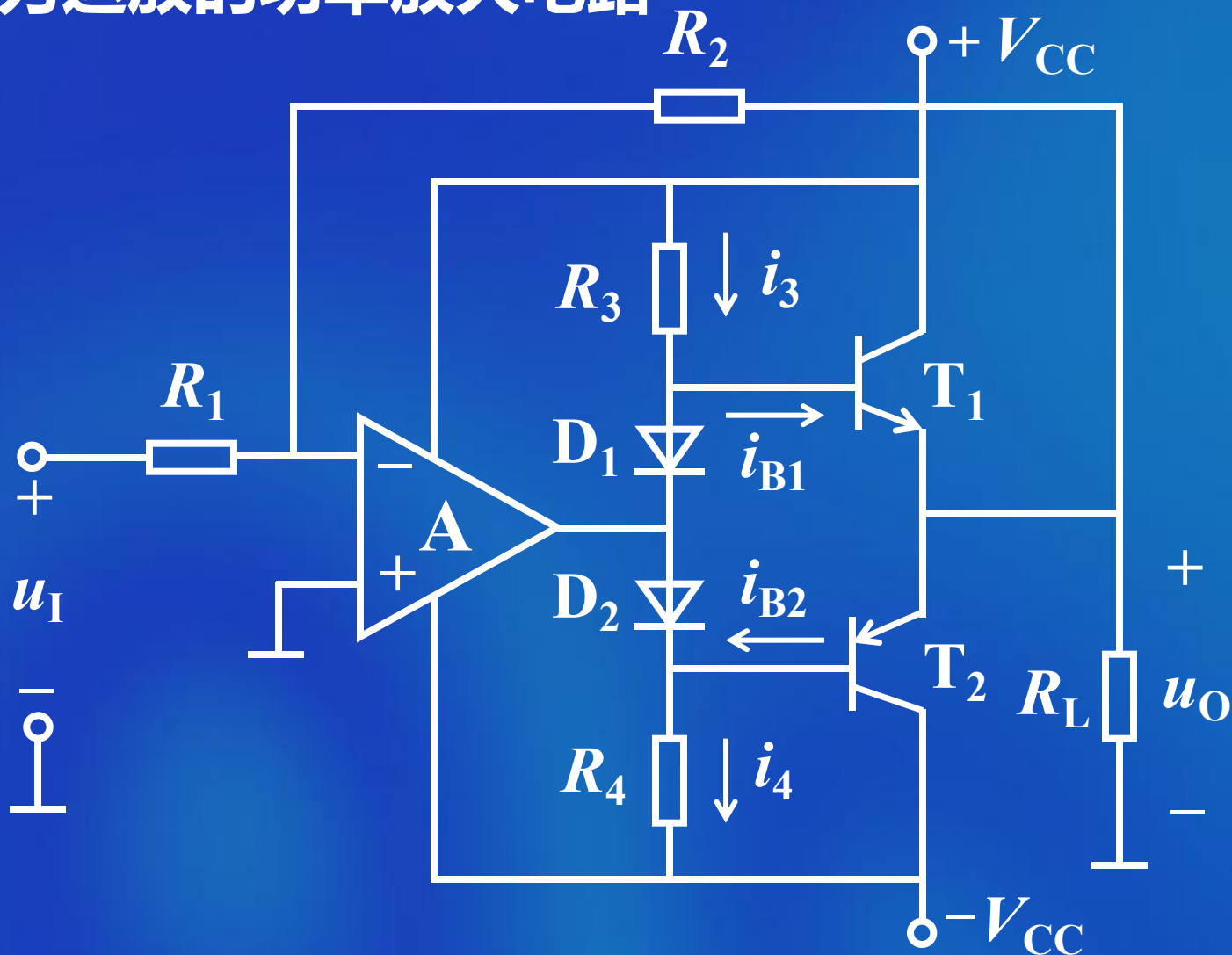
1. 每只管子的工作电压变成了 $V_{CC}/2$ ，在计算各项指标时电源电压要用 $V_{CC}/2$ 。
2. 电容 C 足够大，使输出正负半周对称。



由于电路的负载并非通过变压器而是经过电容接在晶体管的射极，这功率放大电路业常称为 **OTL** (**O**utput **T**ransfomer**l**ess) 电路。

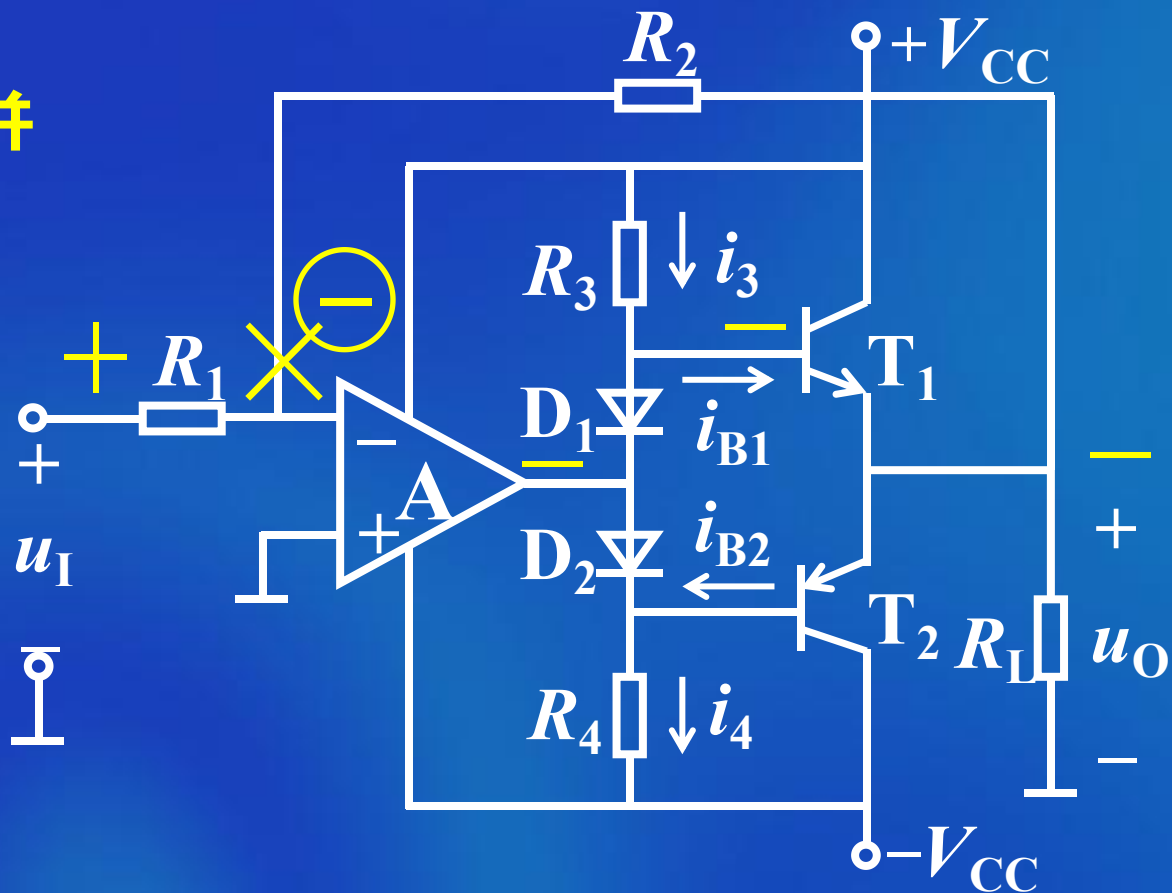
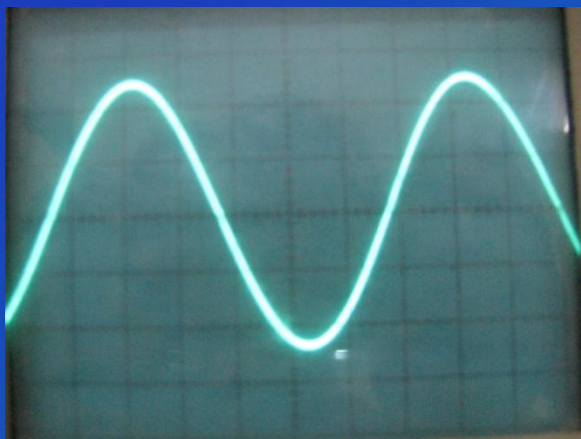
10.2.4 前置级为运放的功率放大电路

1. 电路组成



2. 电路特点

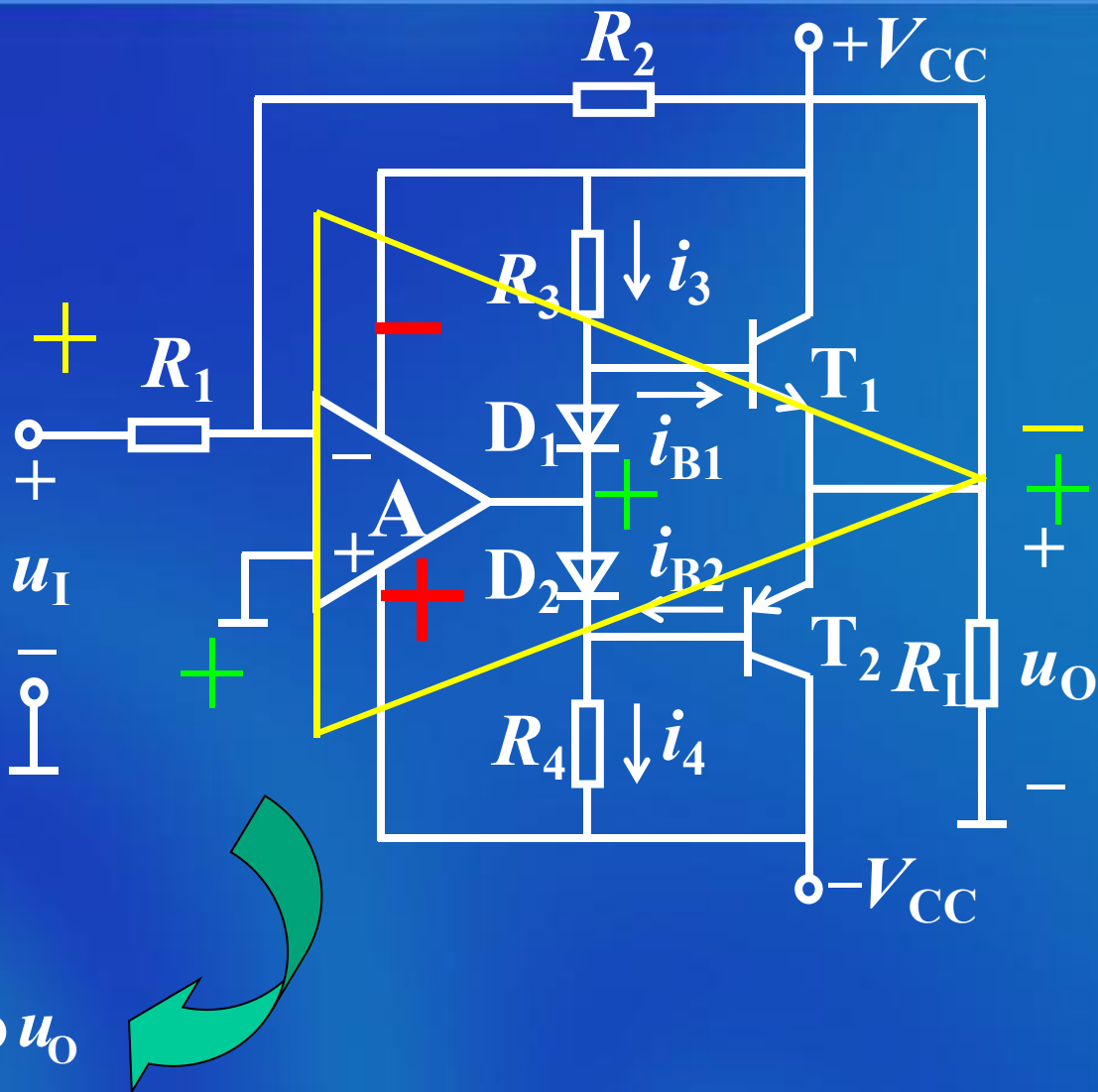
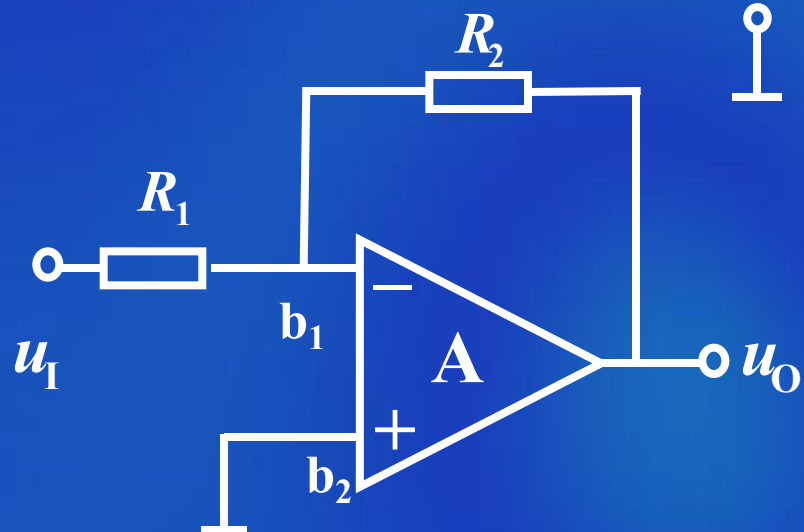
(1) 电路引入了**电压并联负反馈**。



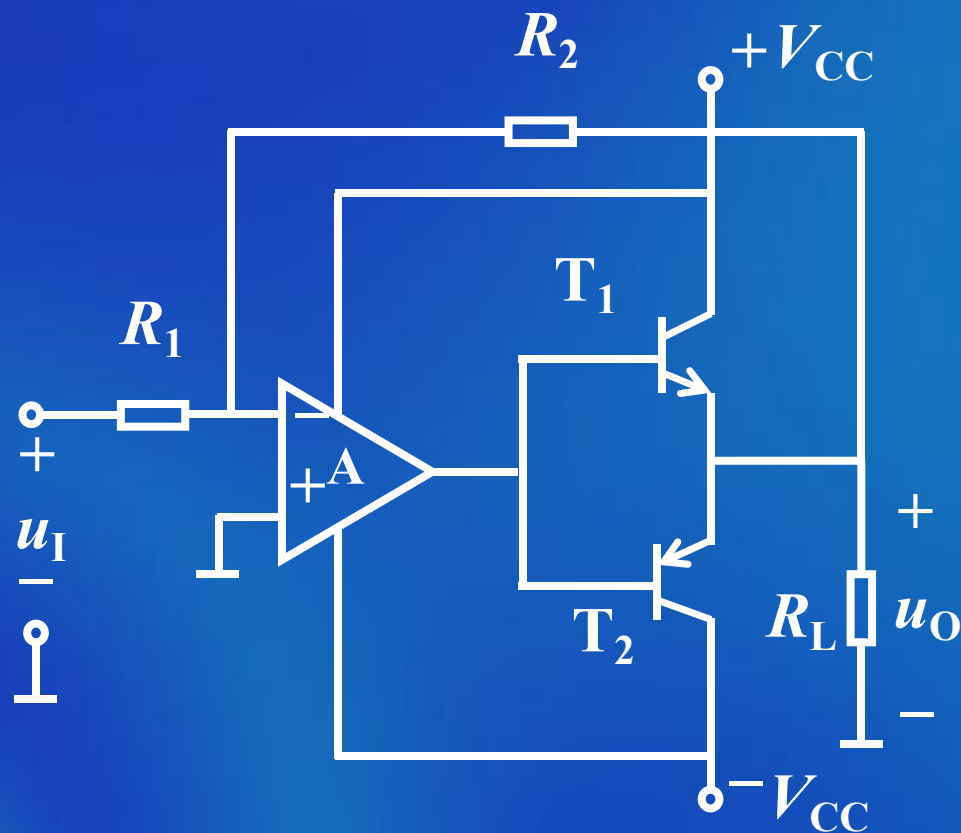
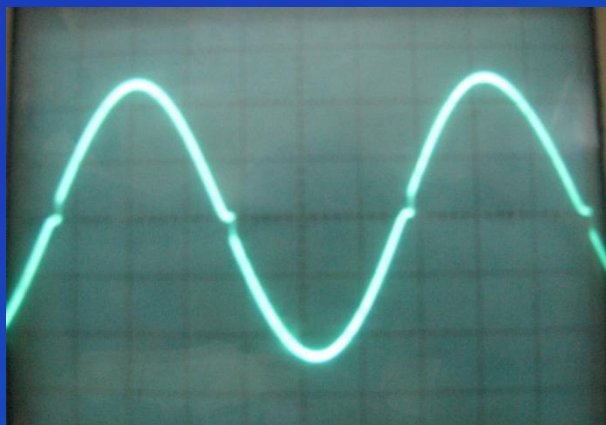
(2) 电路的稳定性高。

3. 电路的闭环电压增益

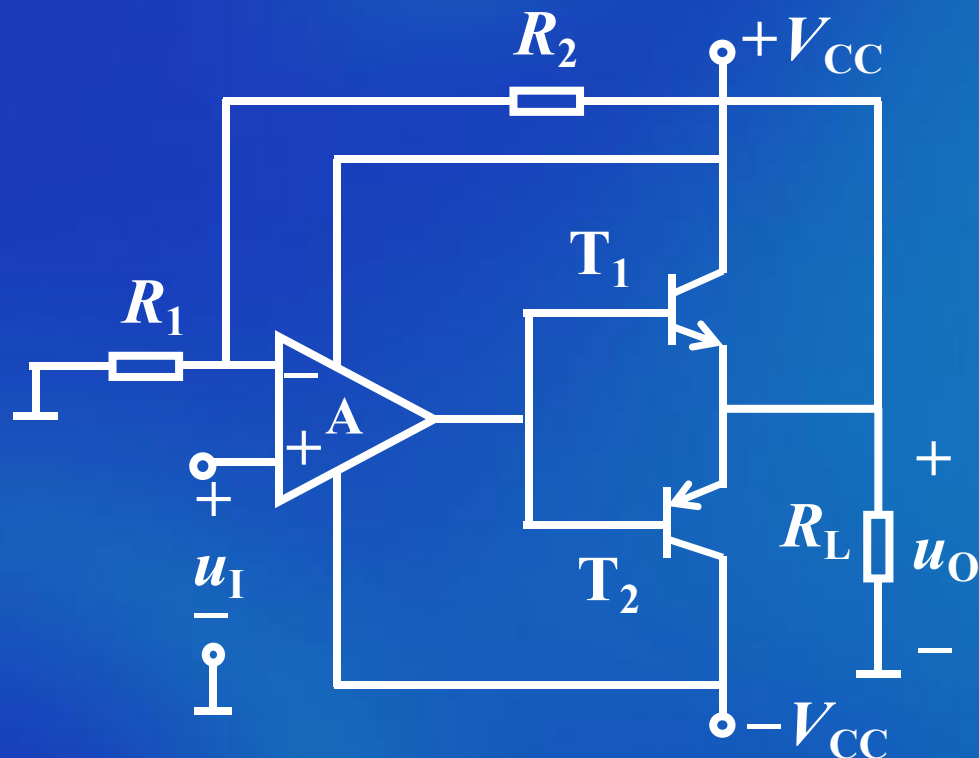
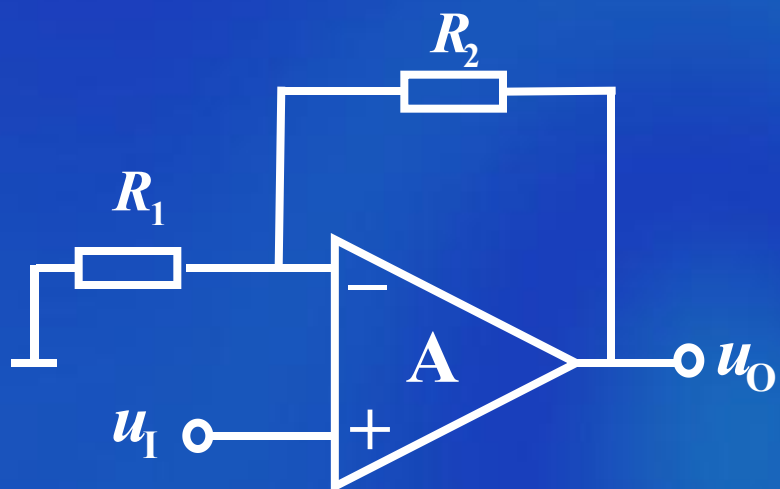
$$\dot{A}_{uf} \approx -R_2/R_1$$



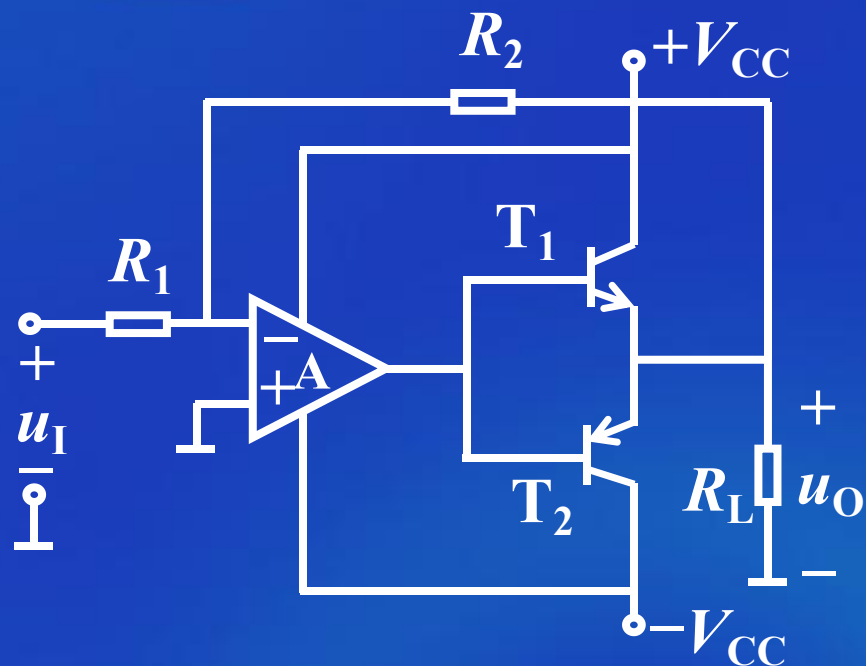
以运放为前置级的功率放大 电路减小交越失真



电压串联负反馈

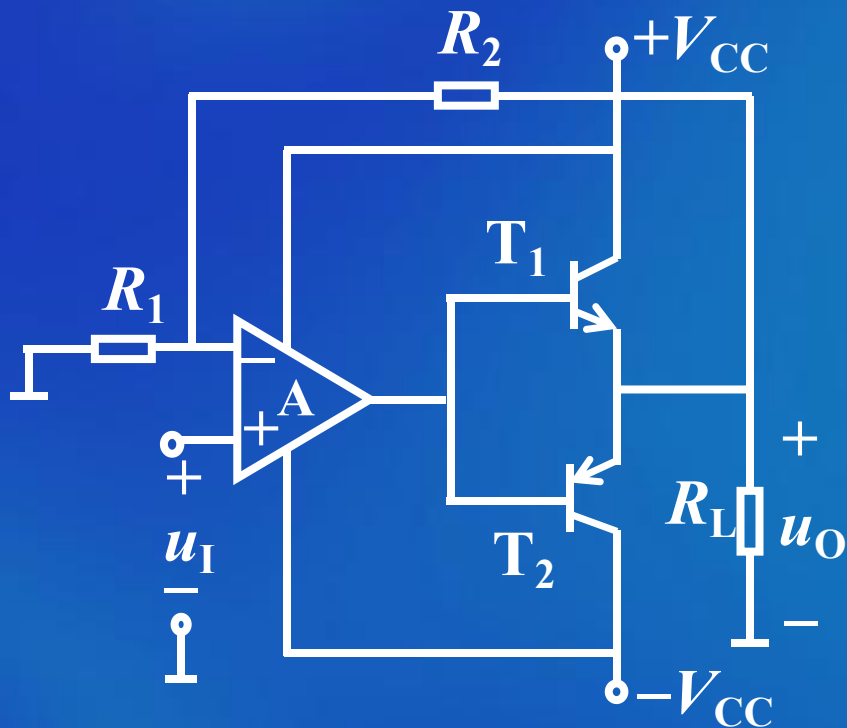


$$\dot{A}_{uf} \approx 1 + R_2/R_1$$



电压并联负反馈

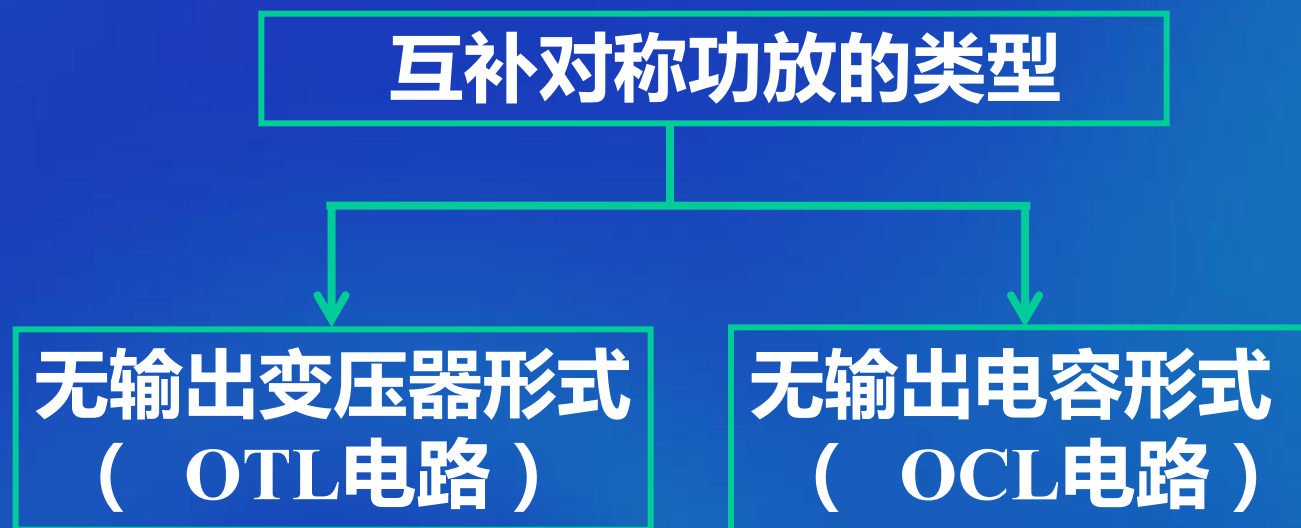
$$\dot{A}_{uf} \approx -R_2/R_1$$



电压串联负反馈

$$\dot{A}_{uf} \approx 1+R_2/R_1$$

类型：



OTL: Output TransformerLess

OCL: Output CapacitorLess