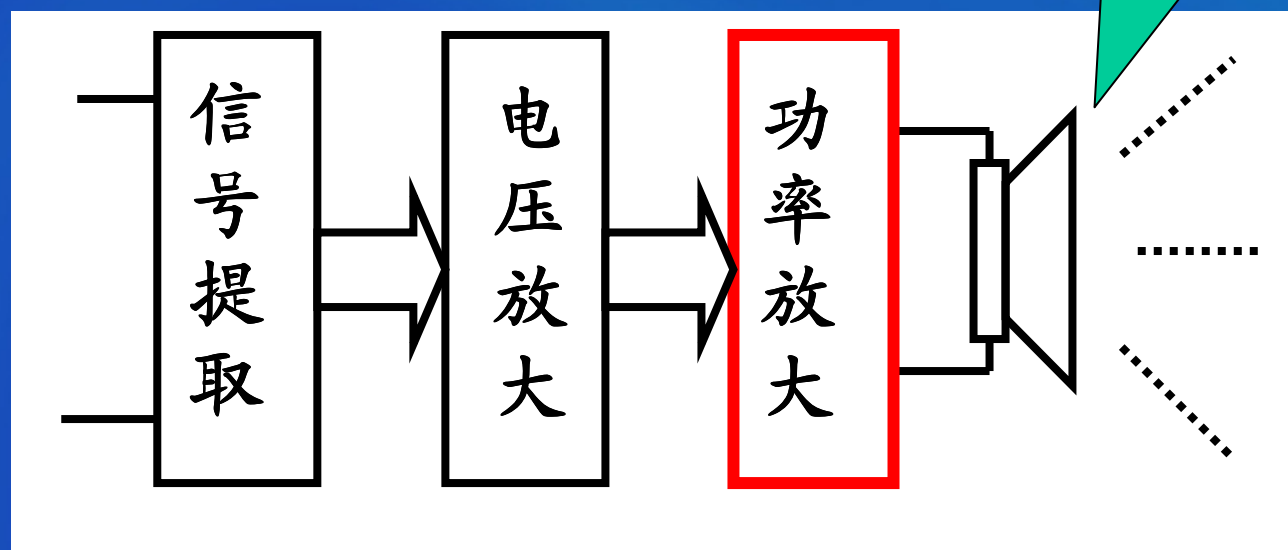


9 功率放大电路

功率放大器的作用： 用作放大电路的输出级，以驱动执行机构。如使扬声器发声、继电器动作、 仪表指针偏转等。

例1： 扩音系统

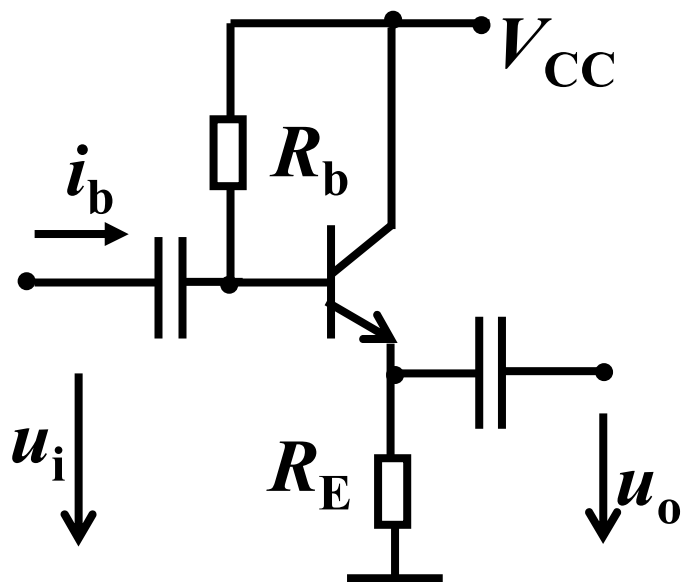


9.1 功率放大电路的特点及分类

1. 特点

- (1) 要有尽可能大的输出功率
- (2) 效率要高
- (3) 非线性失真要小
- (4) 要加装散热和保护装置
- (5) 要用图解法分析

问题讨论



射极输出器能否做功率放大？

射极输出器的输出电阻低，带负载能力强，可以做功放，但有缺陷。

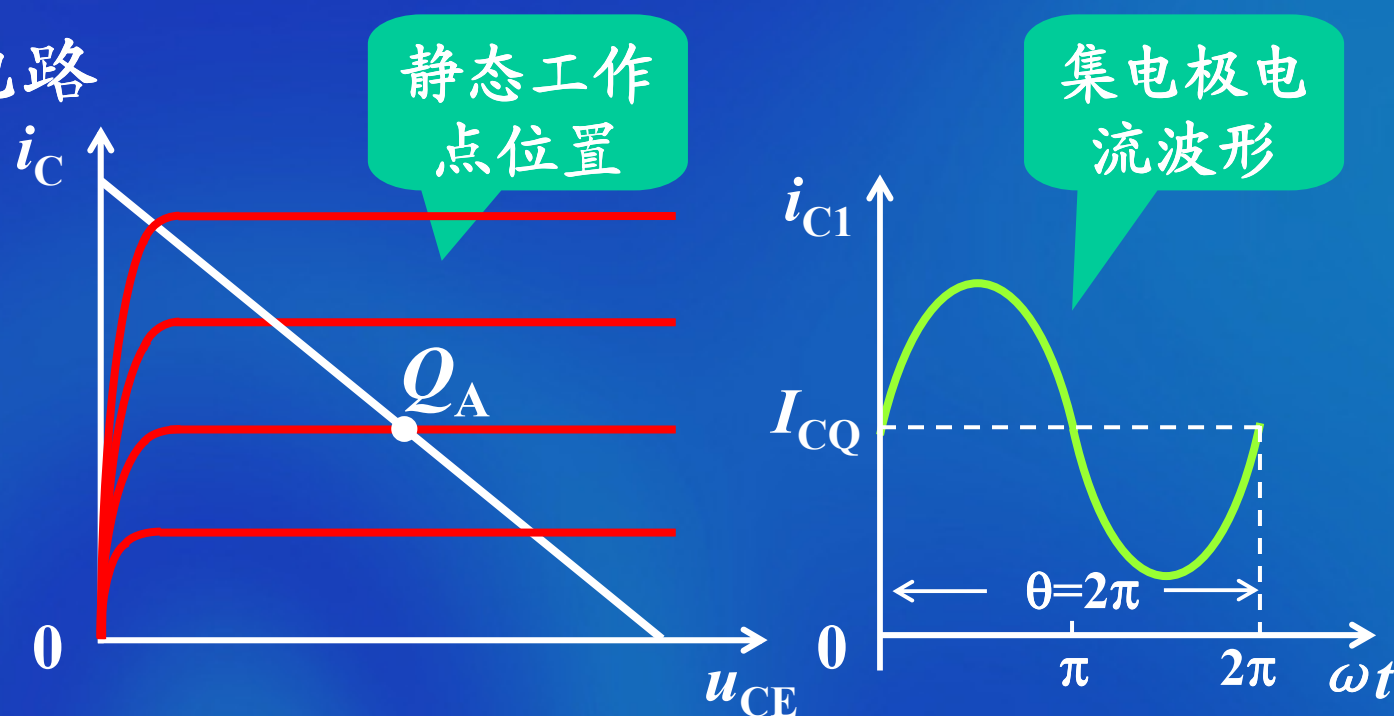
为什么？

2. 工作状态分类

根据晶体管的静态工作点的位置不同分:

(1) 甲类放大电路

特点:

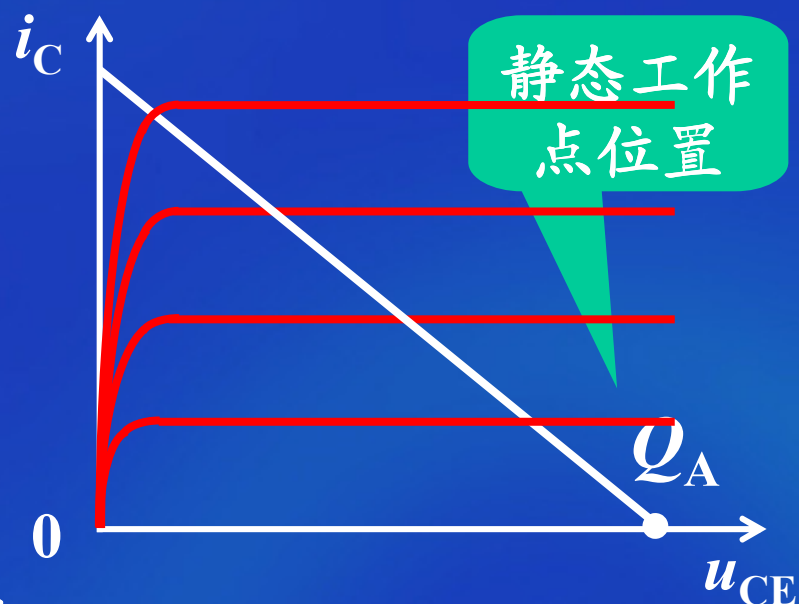


a. 静态功耗 $P_C = U_{CEQ} I_{CQ}$ 大

b. 能量转换效率低

c. 放大管的导通角 $\theta = 2\pi$

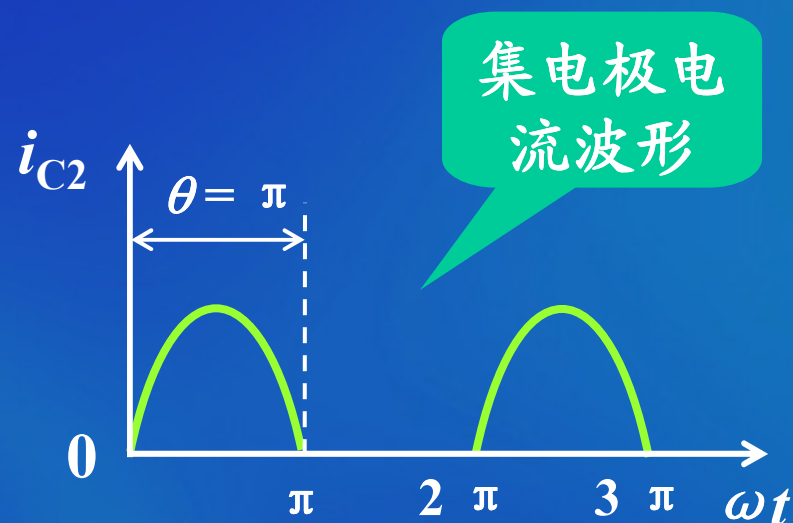
(2) 乙类放大电路



特点:

a. 静态功耗 $P_C = U_{CEQ} I_{CQ} \approx 0$

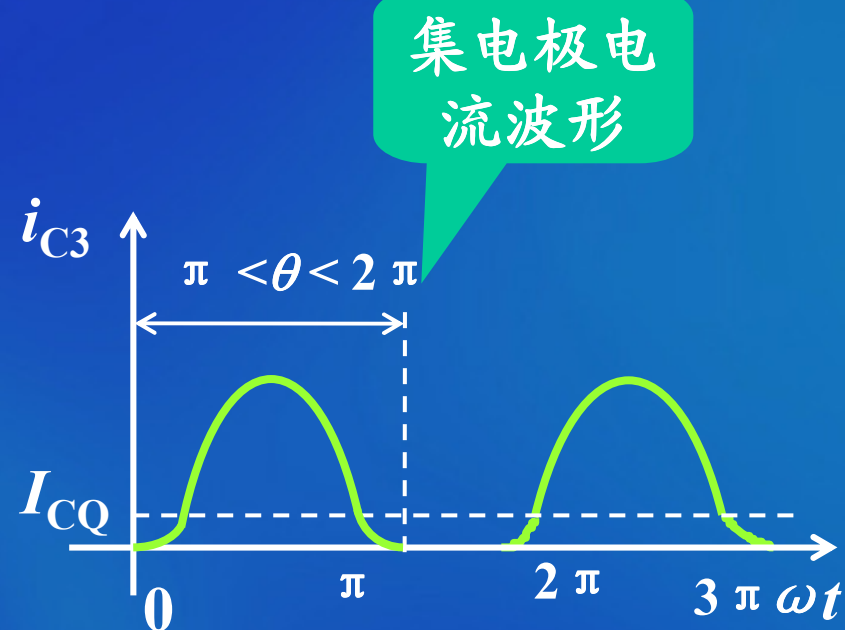
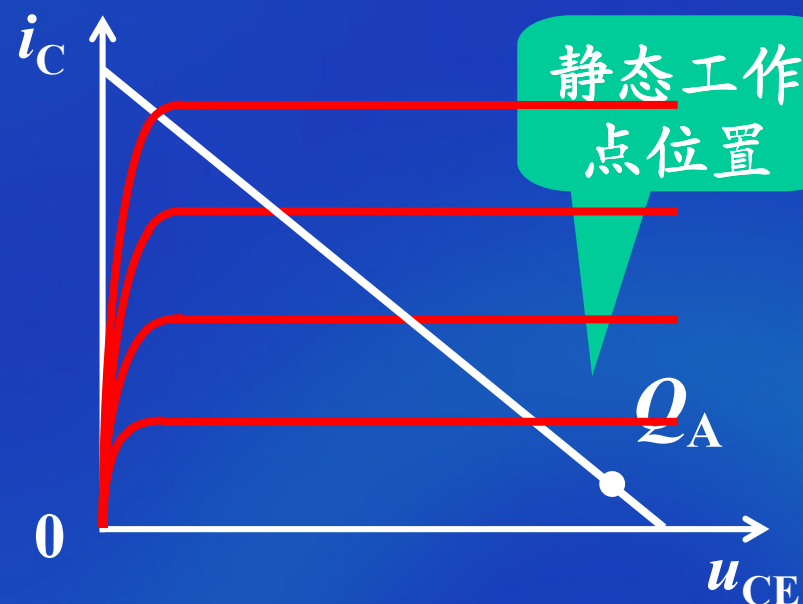
b. 能量转换效率高



c. 输出失真大

d. 放大管的导通角 $\theta = \pi$

(3) 甲乙类放大电路

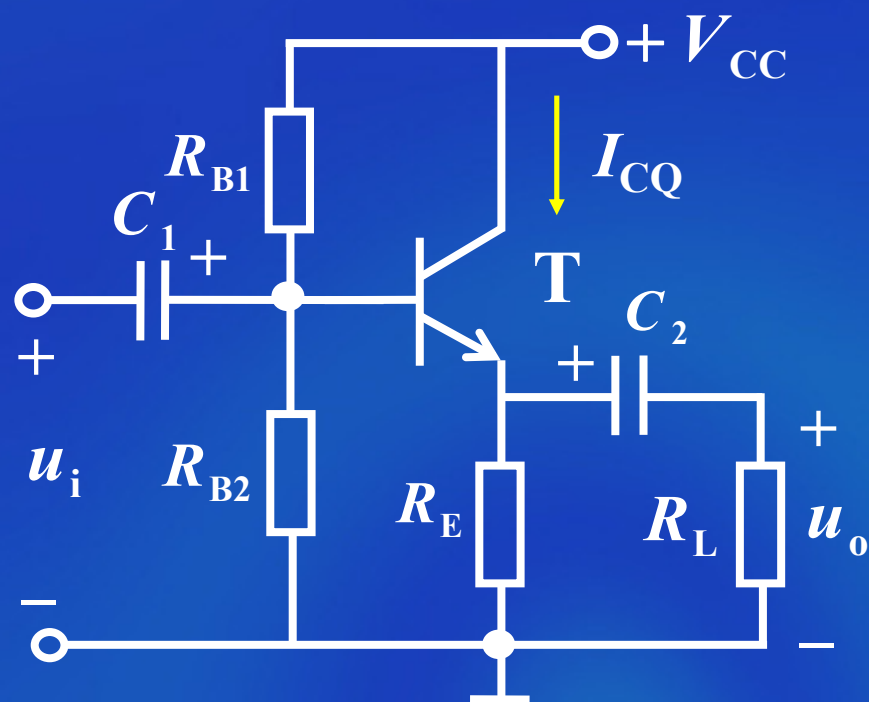


特点:

- a. 静态功耗较小
- b. 能量转换效率较高
- c. 输出失真较大
- d. 放大管的导通角 $\pi < \theta < 2\pi$

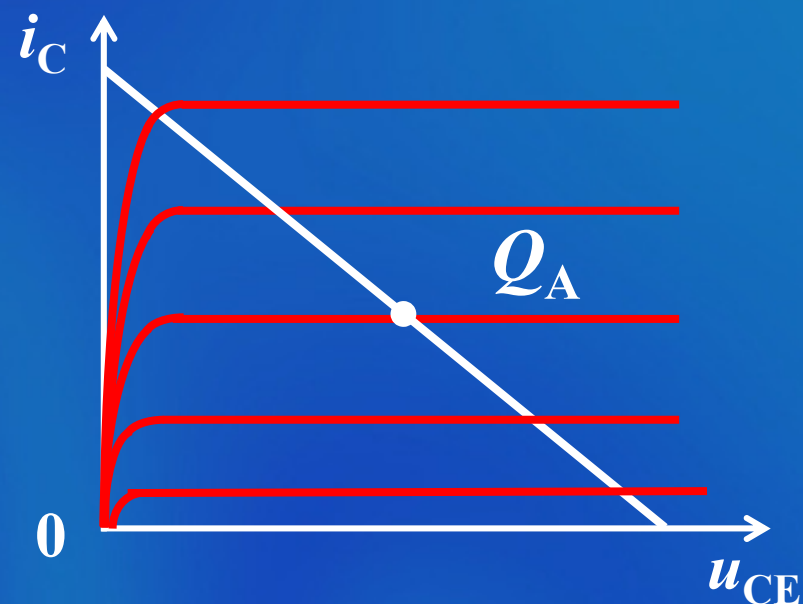
问题讨论

为什么射极输出器功放不适合？



答：其工作状态是甲类的，效率太低。

存在静态偏置



如何解决效率低的问题？

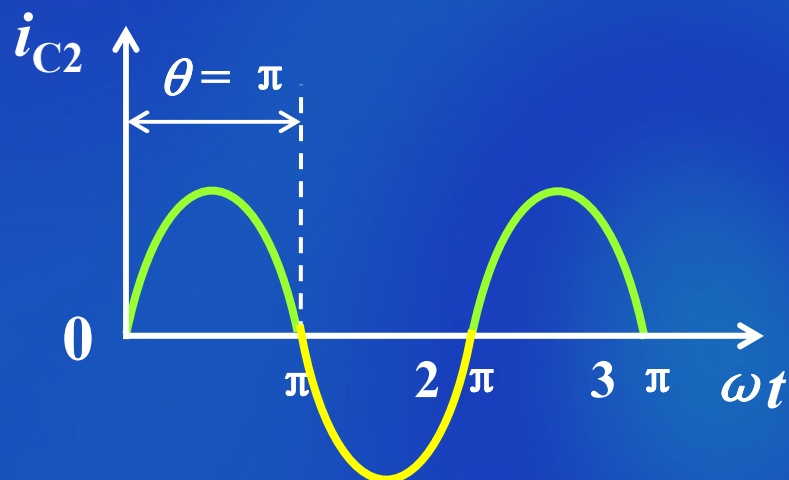
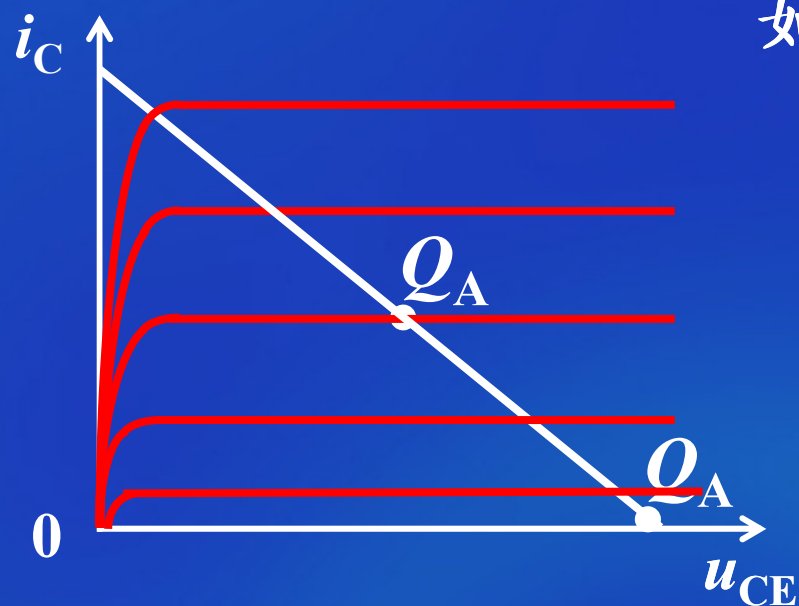
减小静态功耗是关键

办法：降低Q点。

缺点：但又会引起截止失真。

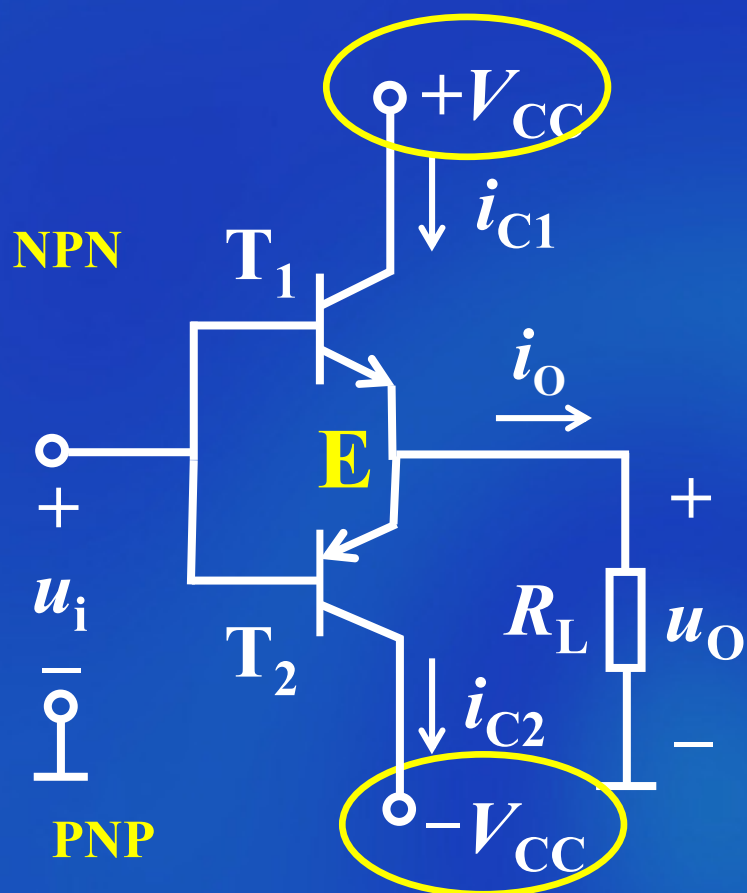
既降低Q点又不失真的办法？

采用互补对称射极输出器



9.2 互补推挽功率放大电路

9.2.1 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 $u_i = U_{im} \sin \omega t$

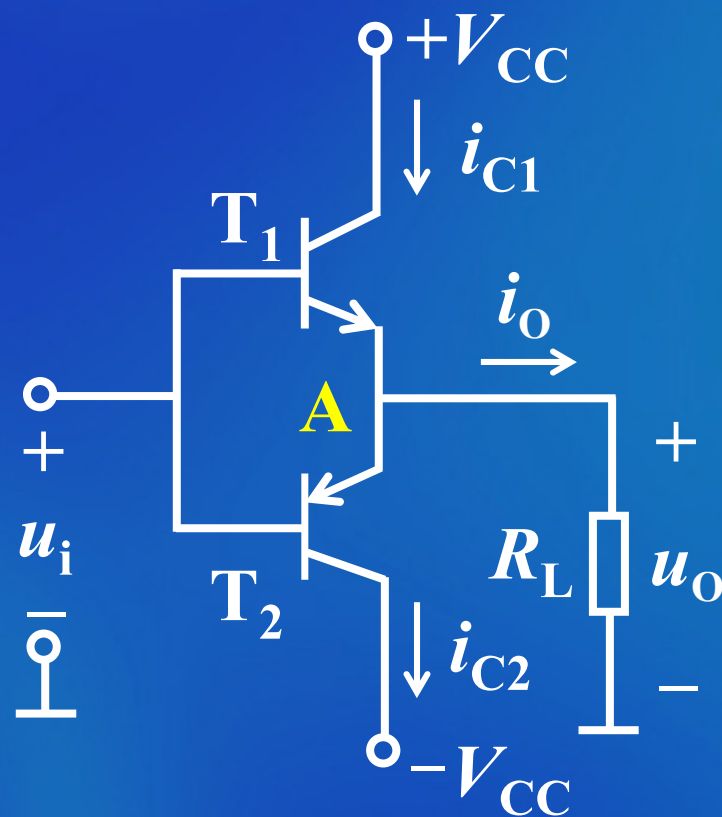
a. 当 $u_i = 0$ 时

$$U_A = 0$$

T_1 、 T_2 截止

$$u_o = 0$$

静态功耗为零



b. $u_i > 0$ 时

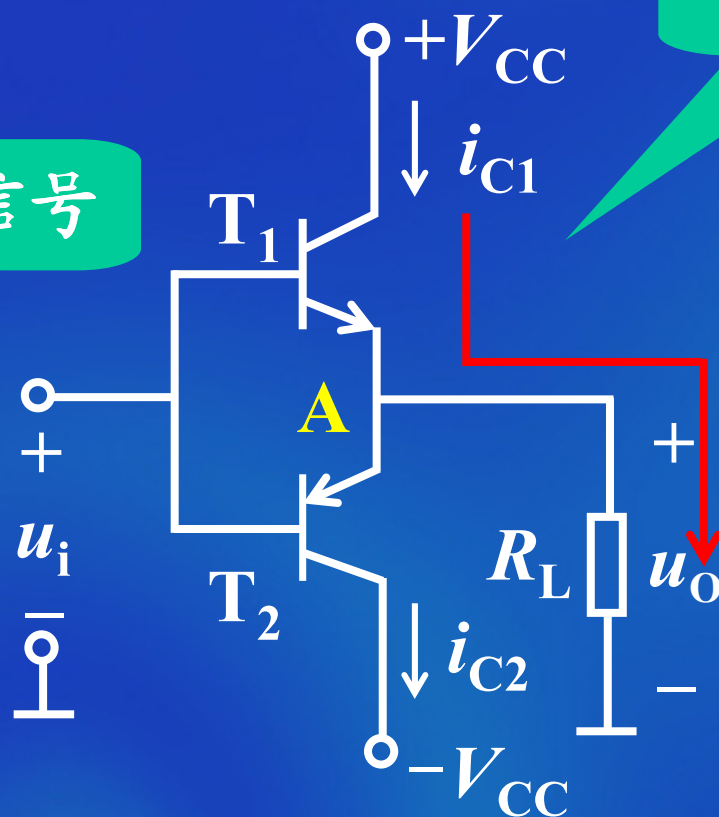
T_1 导通

T_2 截止

输入信号

电流方向

输出信号



$$u_o \approx u_i$$

上页

下页

退出

c. $u_i < 0$ 时

T_1 截止

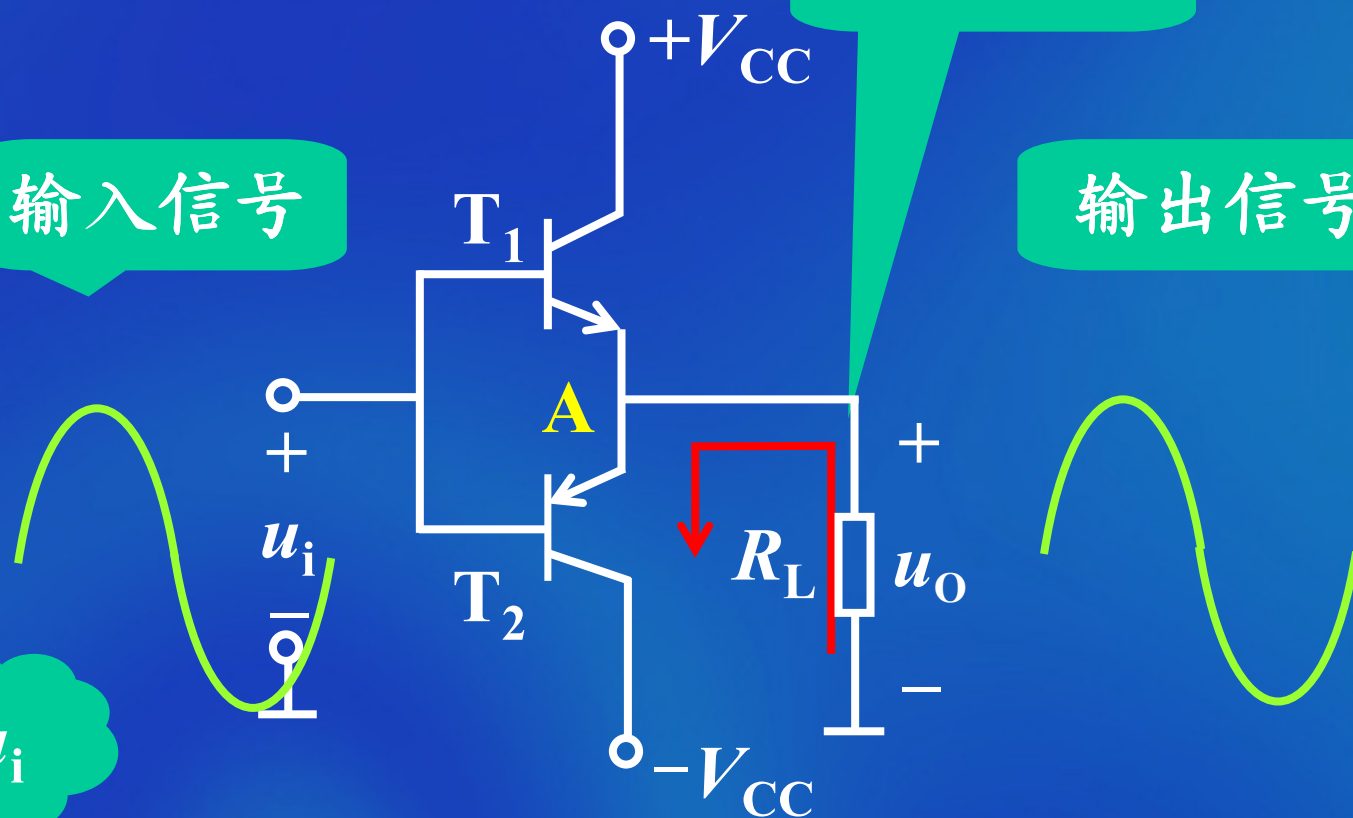
T_2 导通

输入信号

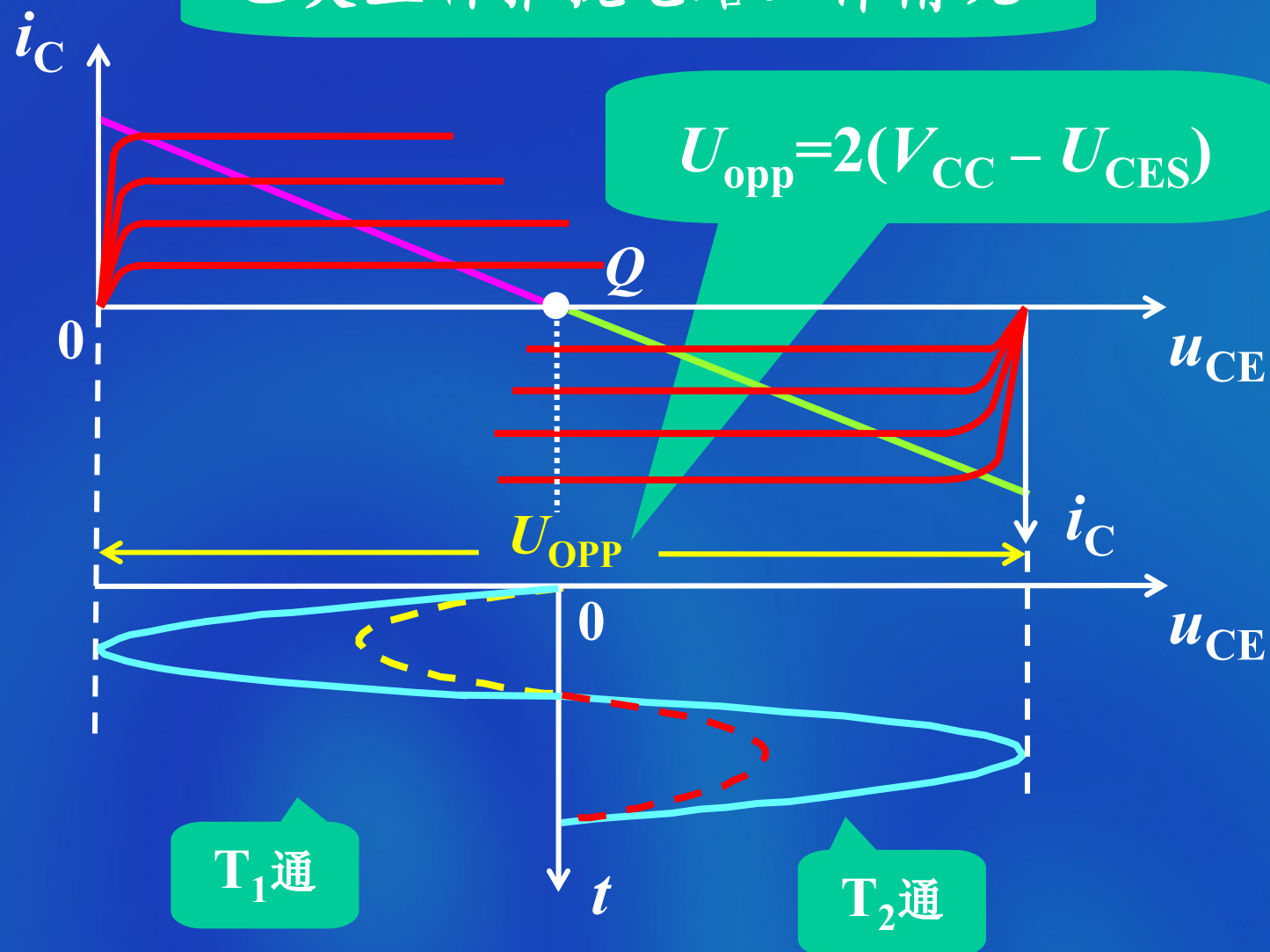
电流方向

输出信号

$u_o \approx u_i$



乙类互补推挽电路工作情况



小结：乙类互补推挽功率放大电路

电路特点：

分类

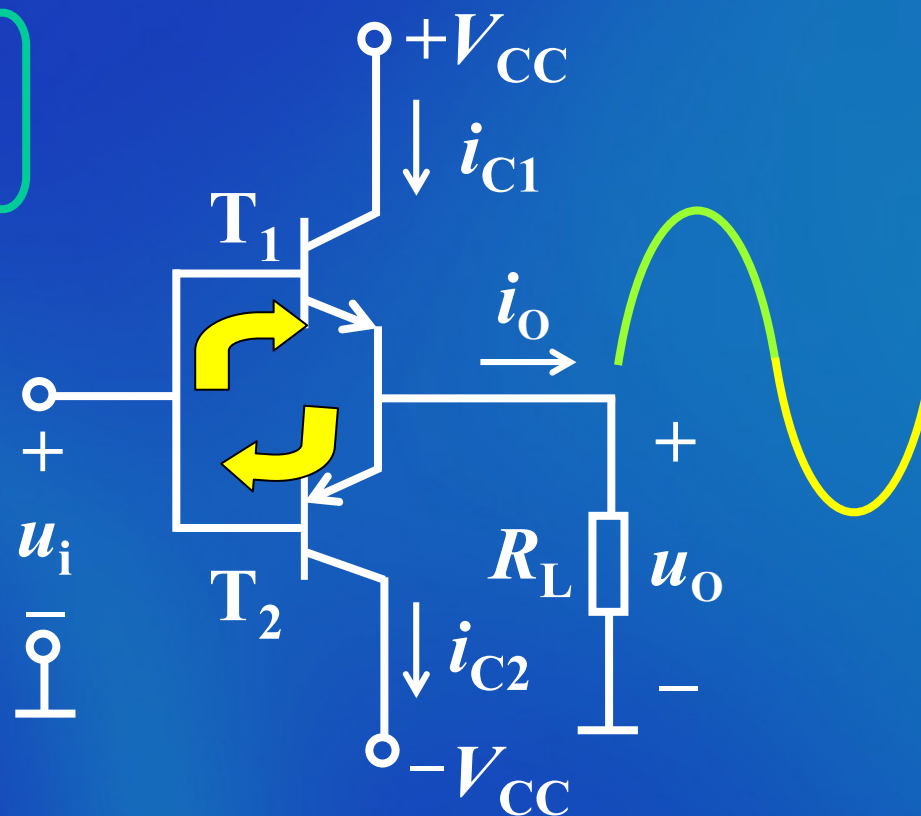
特点

方式

(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 (Output Capacitanceless) 电路。

2. 主要指标计算

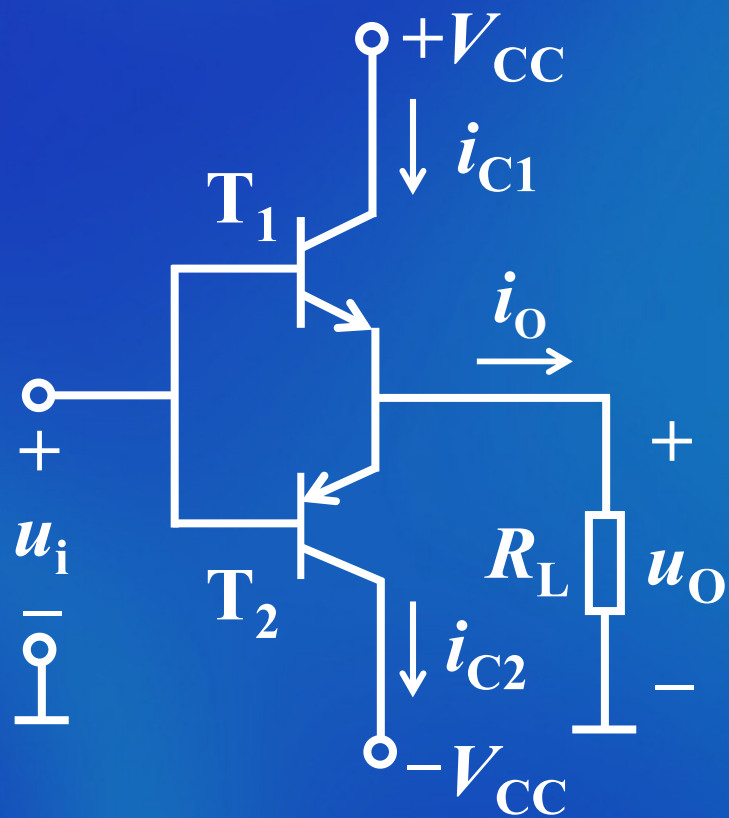
设 $u_o = U_{om} \sin \omega t$

(1) 输出功率

$$P_o = U_o I_o$$

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

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

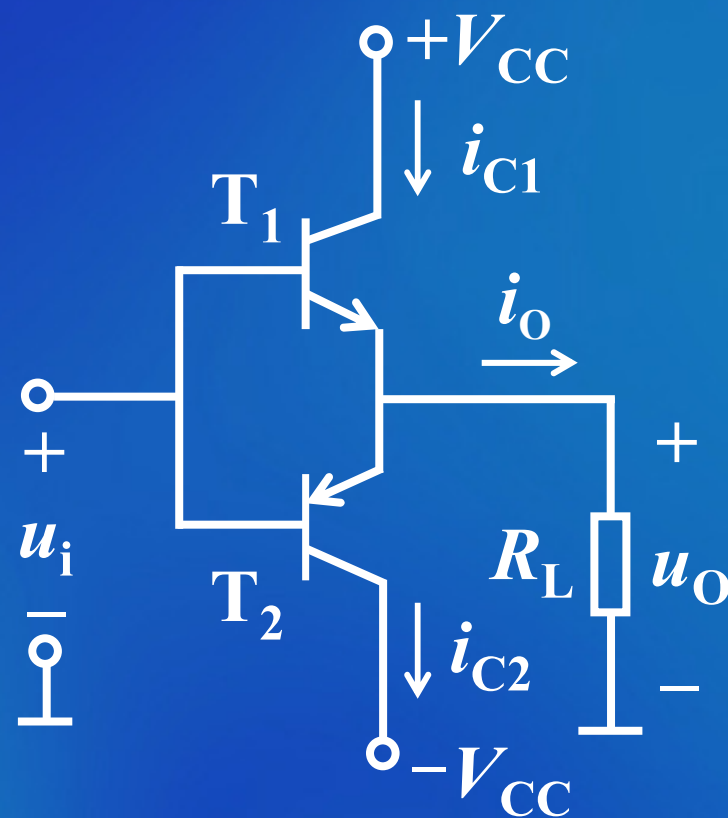


当 U_{om} 达到最大值 $(V_{CC} - U_{CES})$ 时

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

当忽略三极管的饱和压降 U_{CES} 时

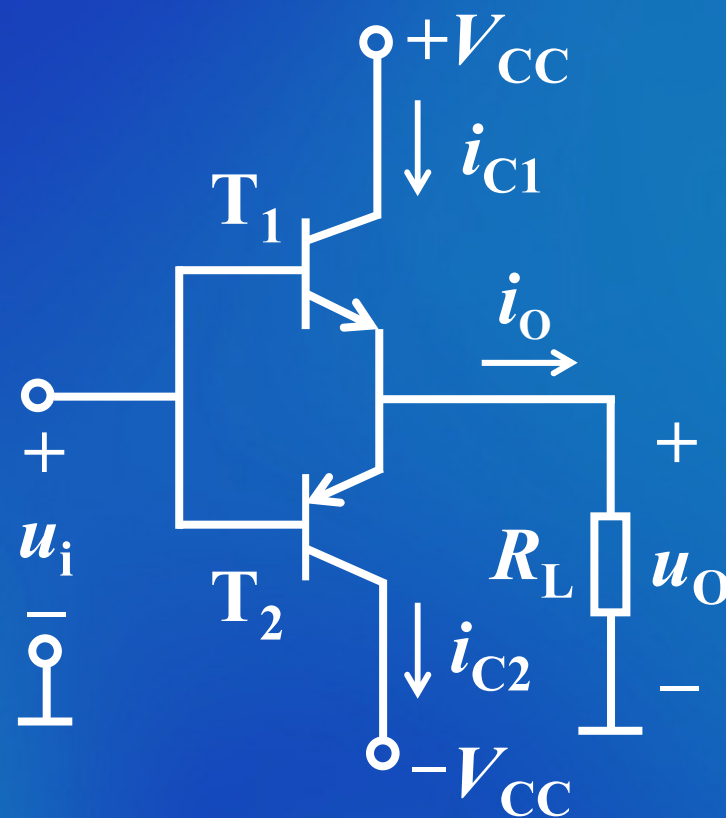
$$P_{om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$



(2) 电源供给的功率

平均集电极电流 $I_{C(AV)}$ 为

$$\begin{aligned}
 I_{C(AV)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{c1} d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{u_{om}}{R_L} d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi R_L} \int_0^{\pi} U_{om} \sin \omega t d\omega t \\
 &= \frac{1}{\pi} \frac{U_{om}}{R_L}
 \end{aligned}$$



两个电源供给的总电源功率

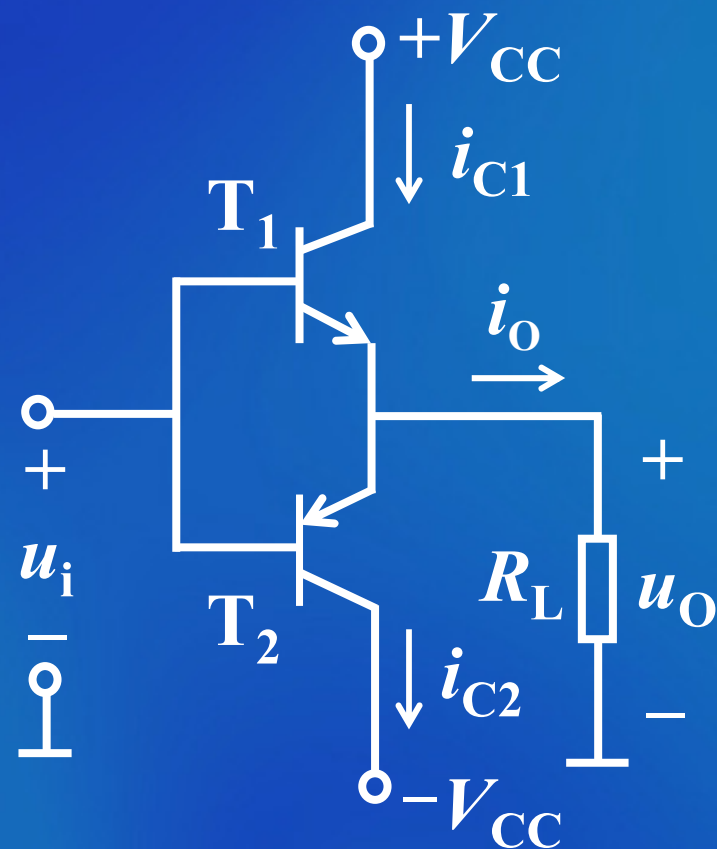
$$P_V = 2V_{CC}I_C$$

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

(3) 能量转换效率

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

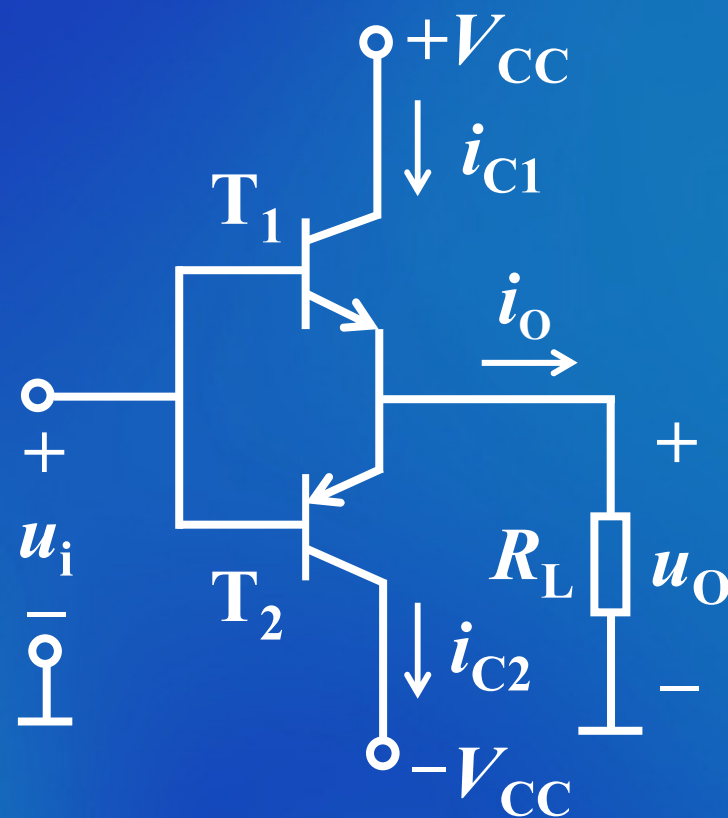
$$= \frac{\frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L}}{\frac{2}{\pi} \frac{U_{om}V_{CC}}{R_L}} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{om}}{V_{CC}}$$



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

当 $U_{om} \approx V_{CC}$ 时

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



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

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

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

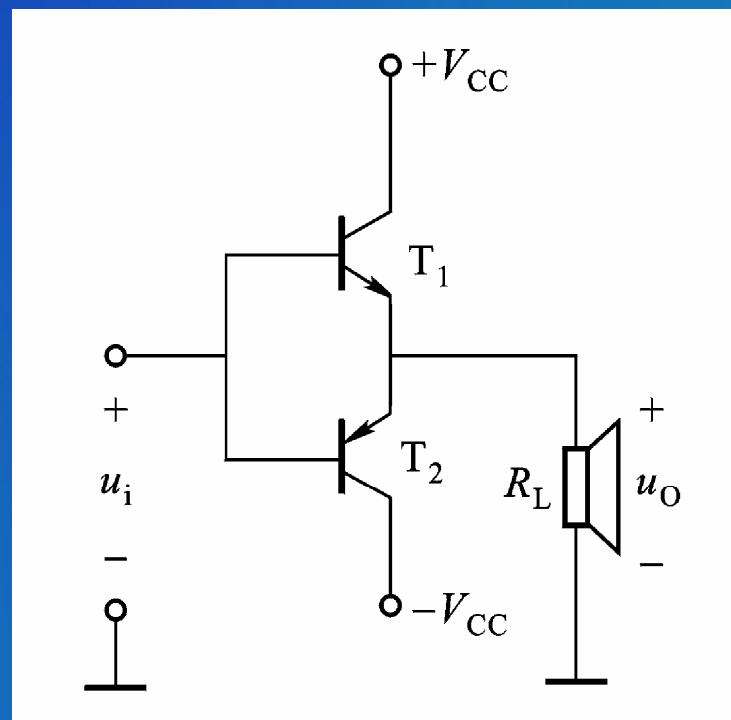
$$\eta_m = \frac{\pi (V_{CC} - U_{CES})}{4V_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

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, 输出功率的最大值可按式 (9.2.2b) 计算, 能量转换效率最大值可按式 (9.2.6) 计算

$$P_{om} \approx \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{15^2}{2 \times 8} = 14.06 \text{ W} \quad \eta_m = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

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

$$P_o = \frac{1}{2} \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{10^2}{2 \times 8} = 6.25 \text{ W}$$

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

(4) 晶体管的耗散功率

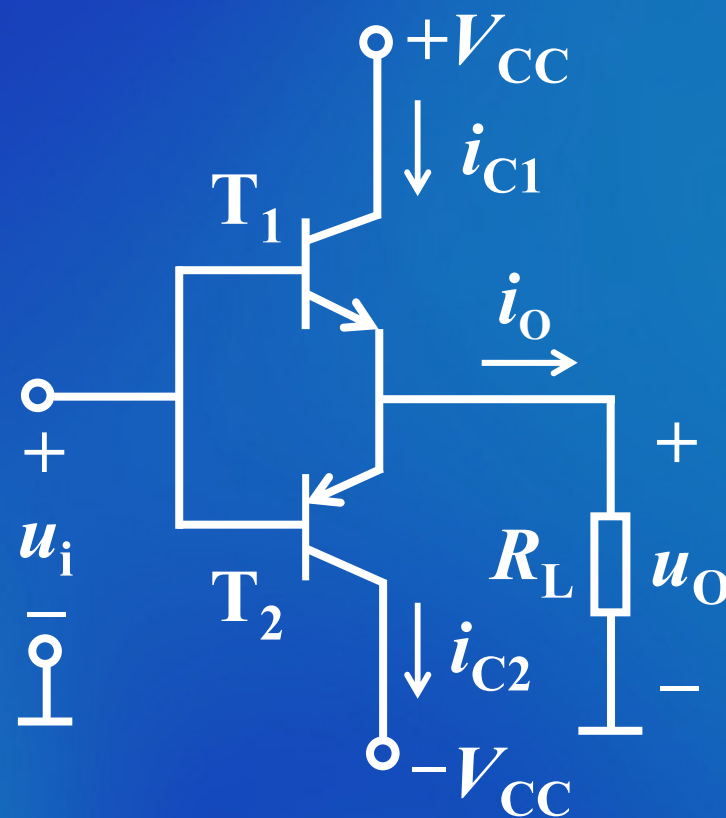
$$P_T = P_V - P_o$$

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

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

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

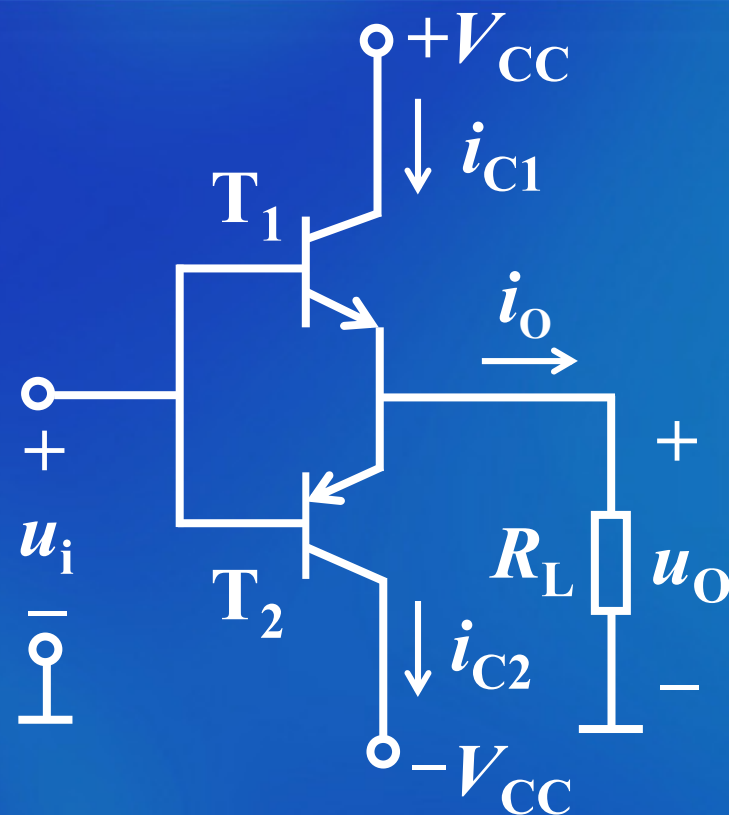
晶体管的管耗最大

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

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



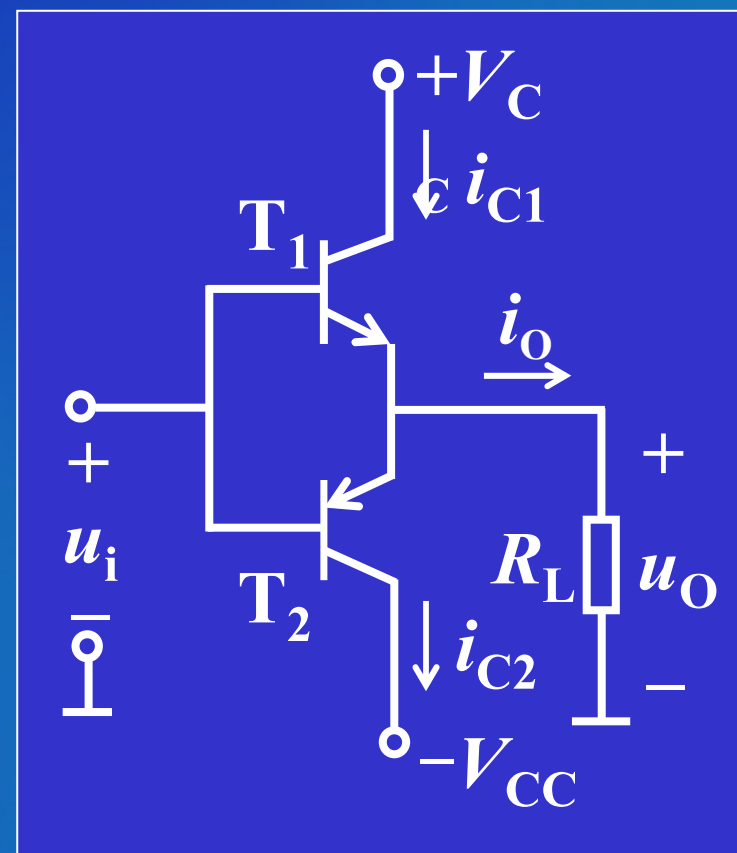
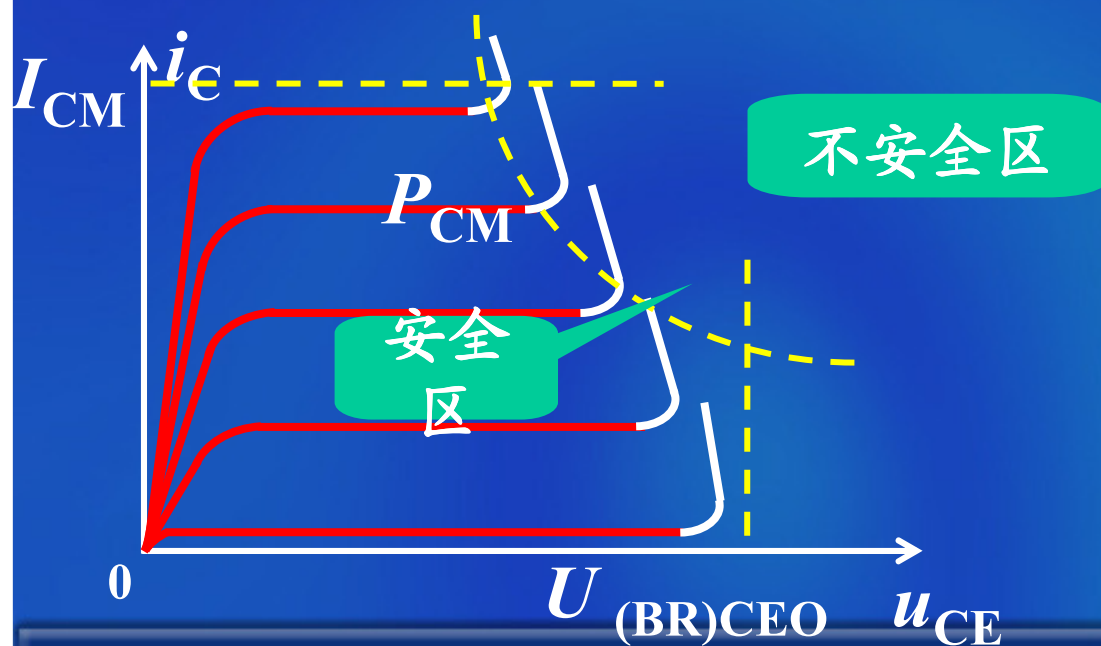
3. 功率管的选择

极限参数应满足(在互补推挽功率放大电路中)

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

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

$$(3) \quad I_{CM} > V_{CC}/R_C$$

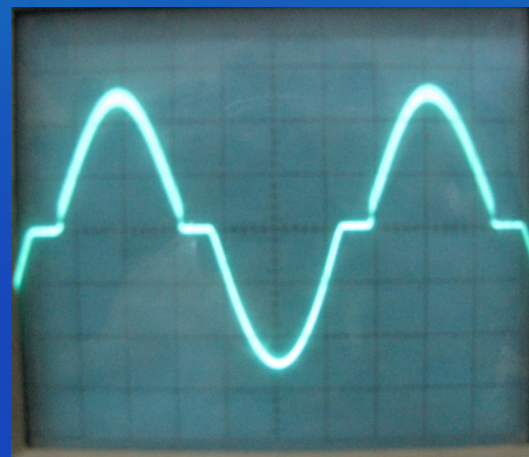
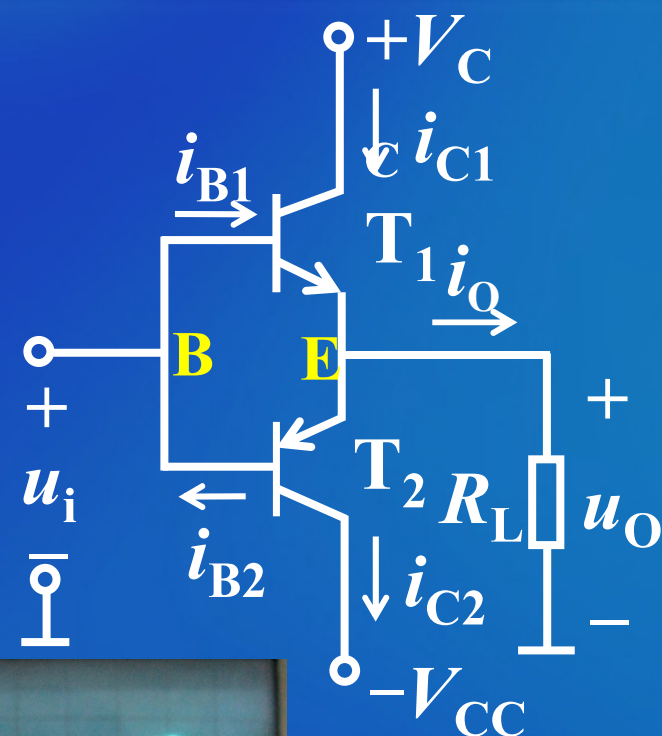
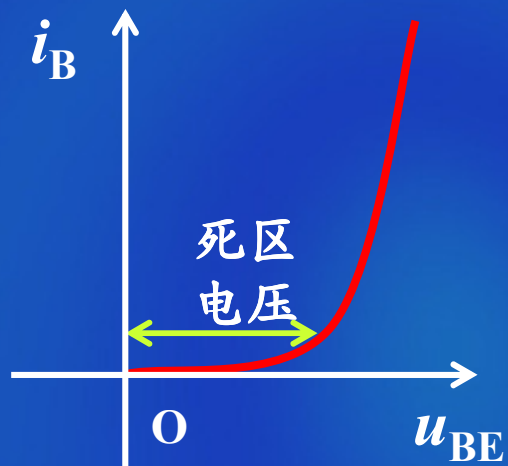


3. 电路存在的缺陷

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。

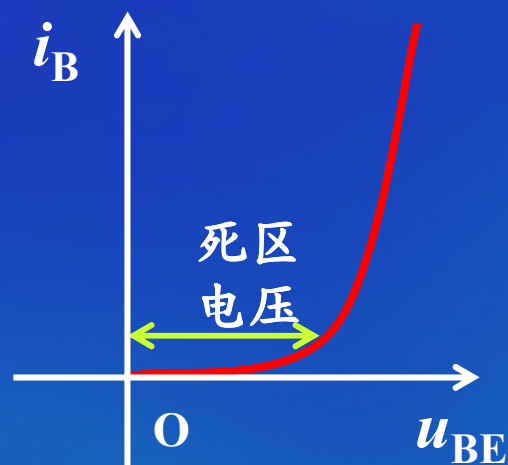
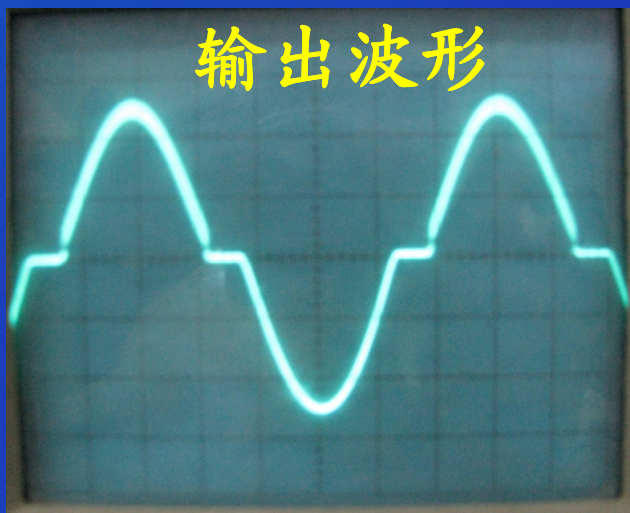


输出波形

上页

下页

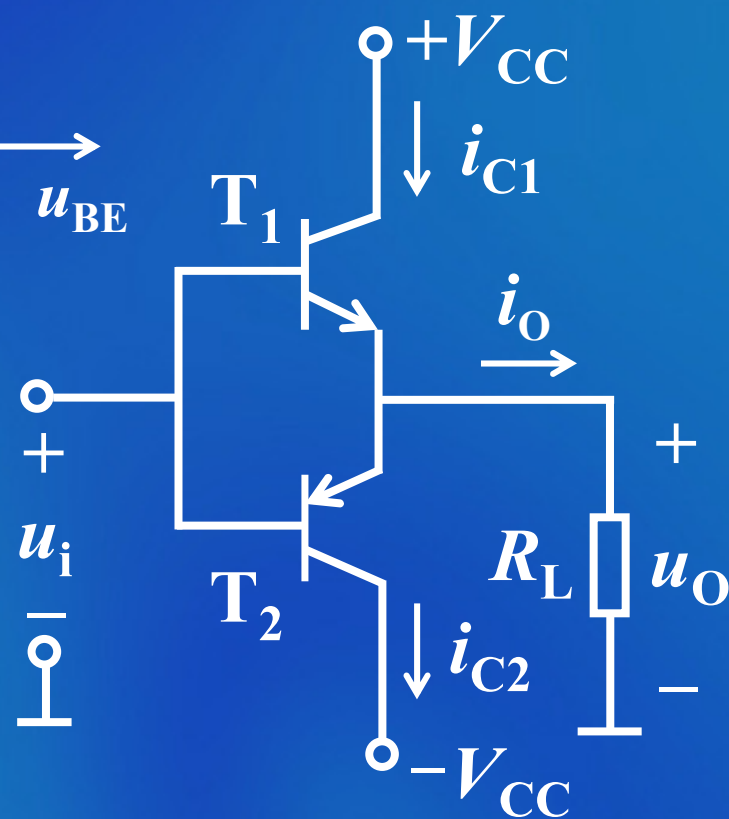
退出

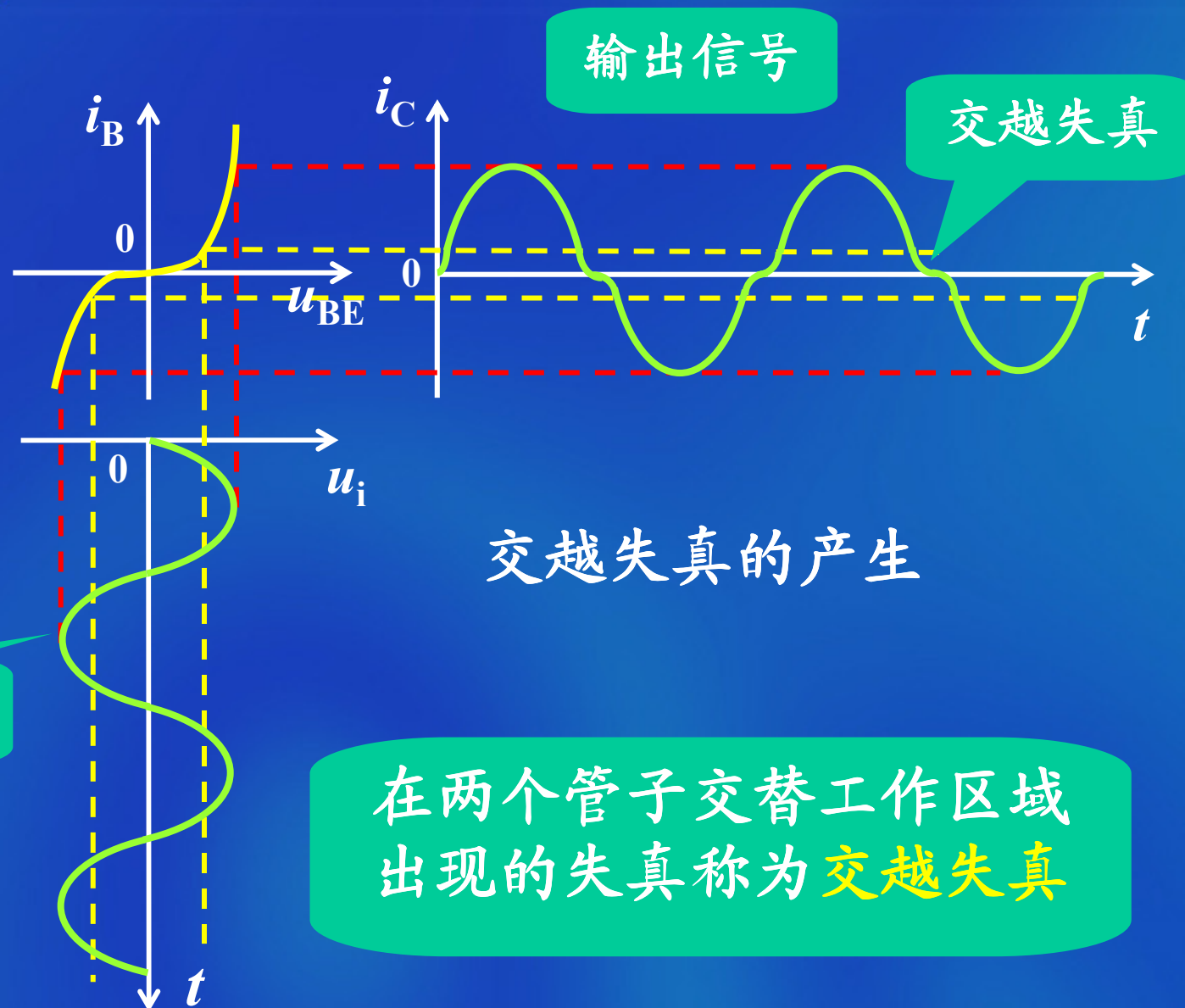


b. 失真的现象

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”

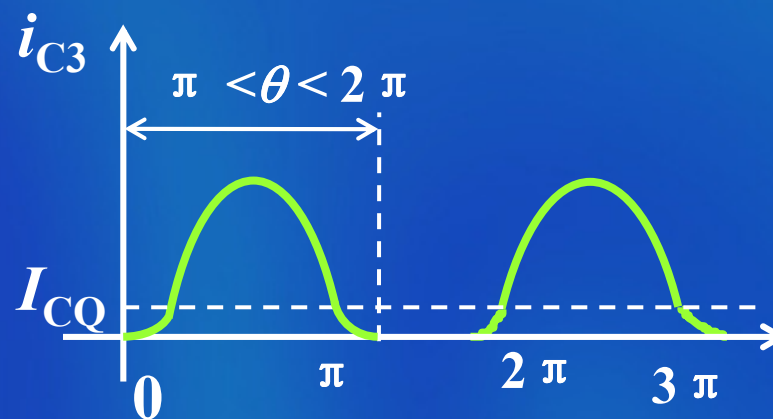
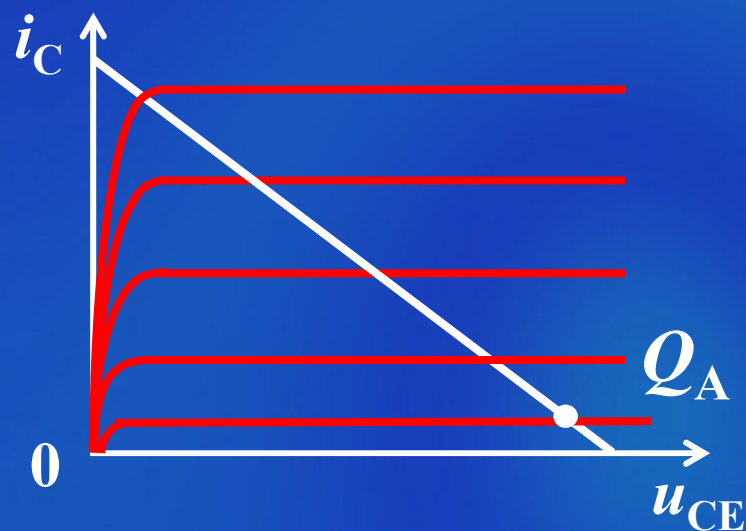
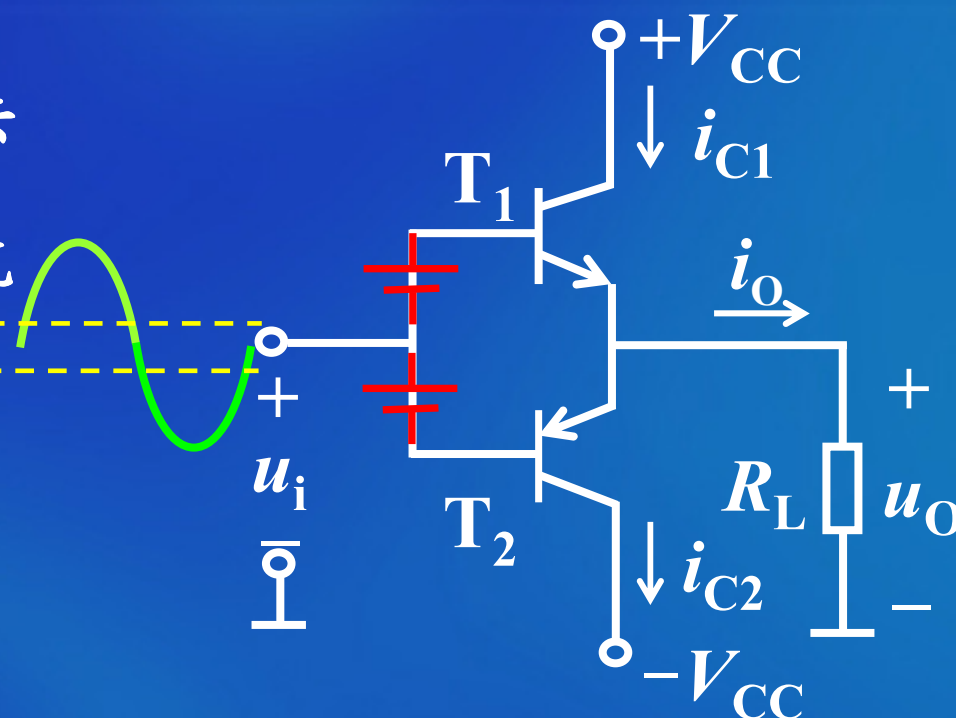




4. 克服交越失真的常用方法

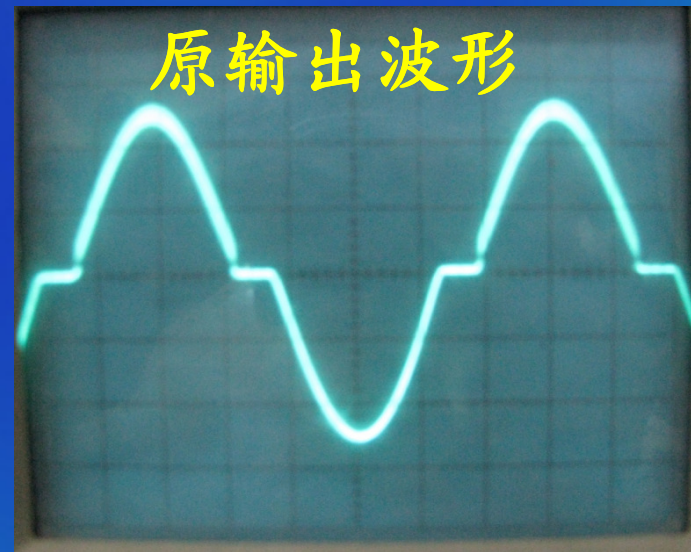
给功率管 (T_1 和 T_2) 一定的直流偏置, 使其工作于微导通状态.

甲乙类工作状态

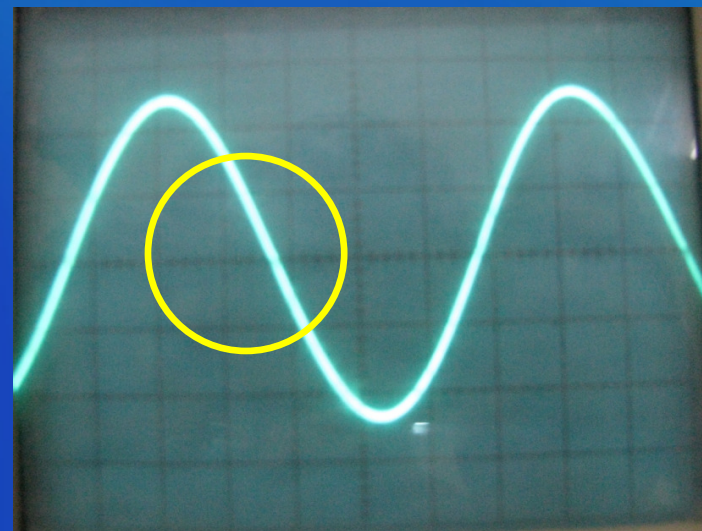
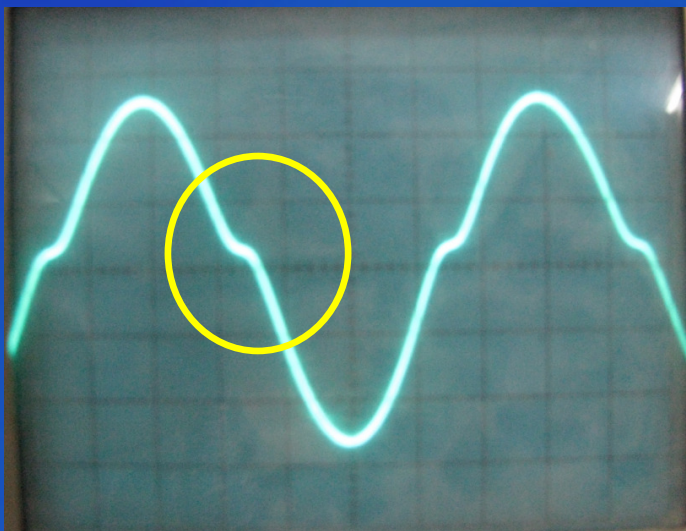


甲乙类功放输出波形

原输出波形

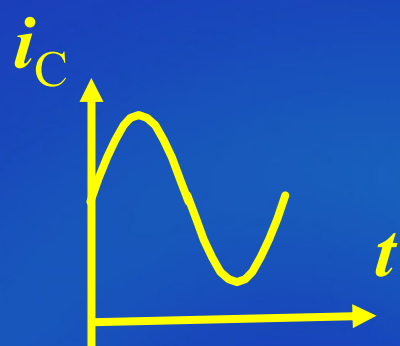


现输出波形

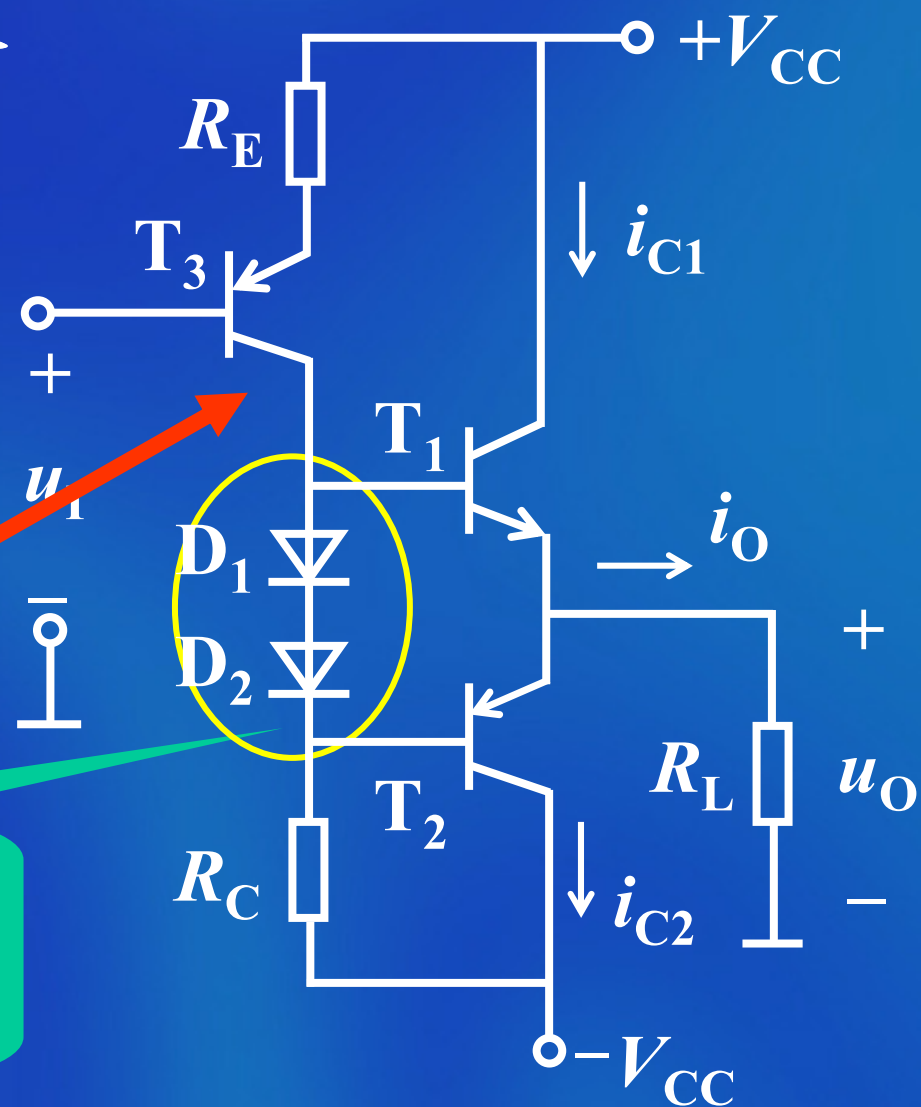


9.2.2 甲乙类互补推挽电路

1. 利用二极管提供偏压



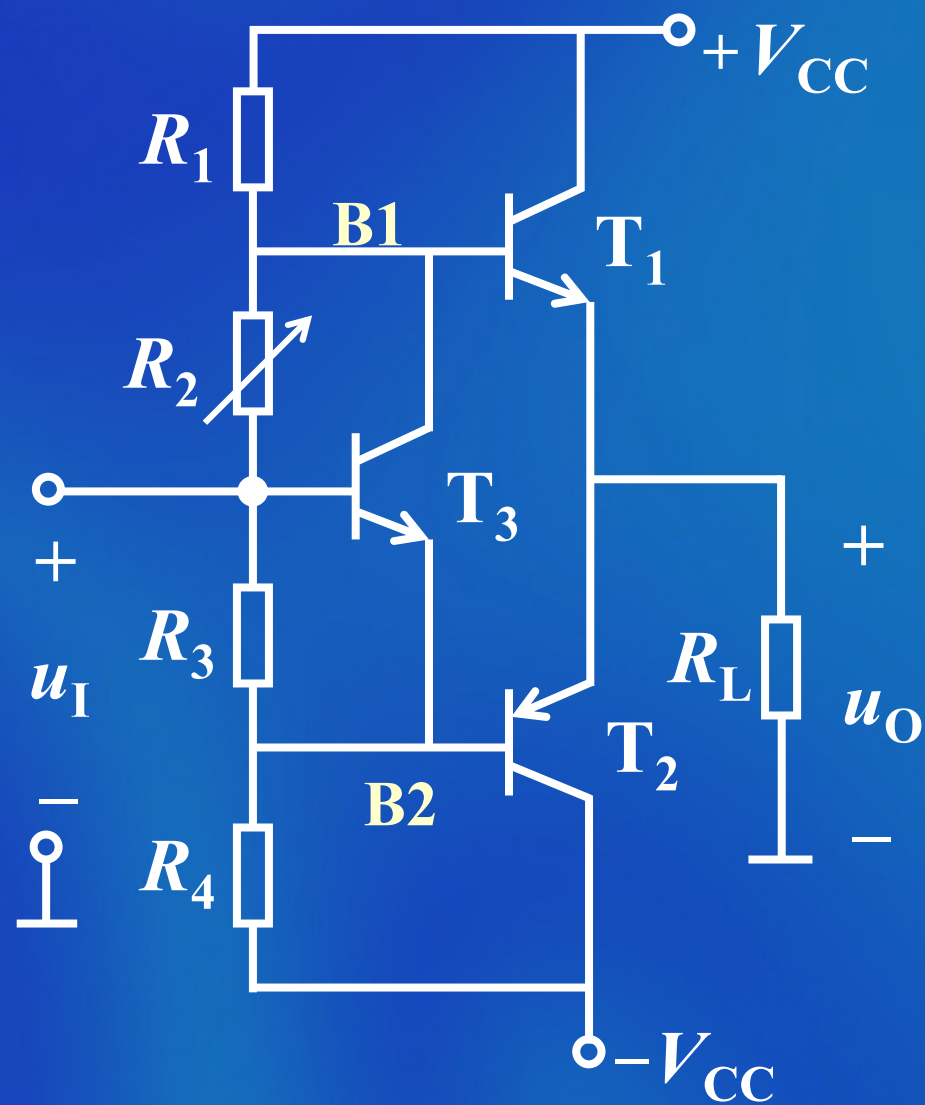
二极管提供偏压，使
 T_1 、 T_2 微导通状态



2. 利用扩大电路实现偏置

图中

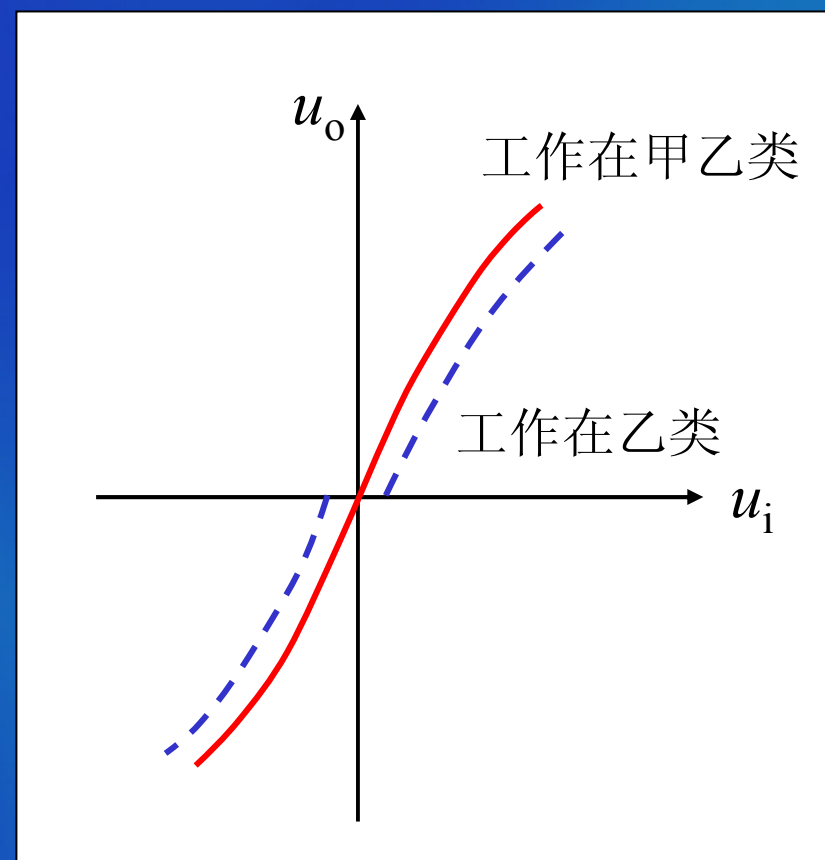
$$U_{B1B2} = U_{BE3} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right)$$



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。



9.2.3 单电源功率放大电路

1. 电路组成

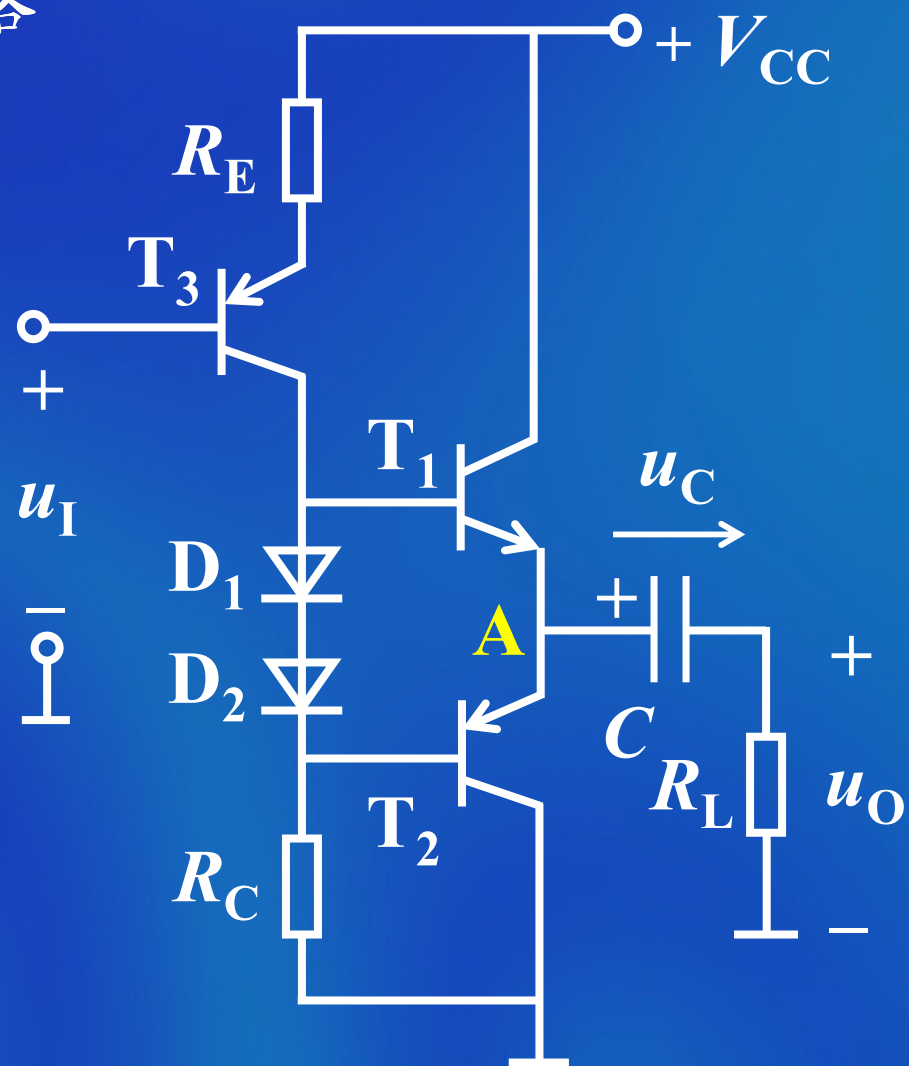
2. 工作原理

(1) 当 $u_I = 0$ 时

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

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

输出电压 $u_O = 0$



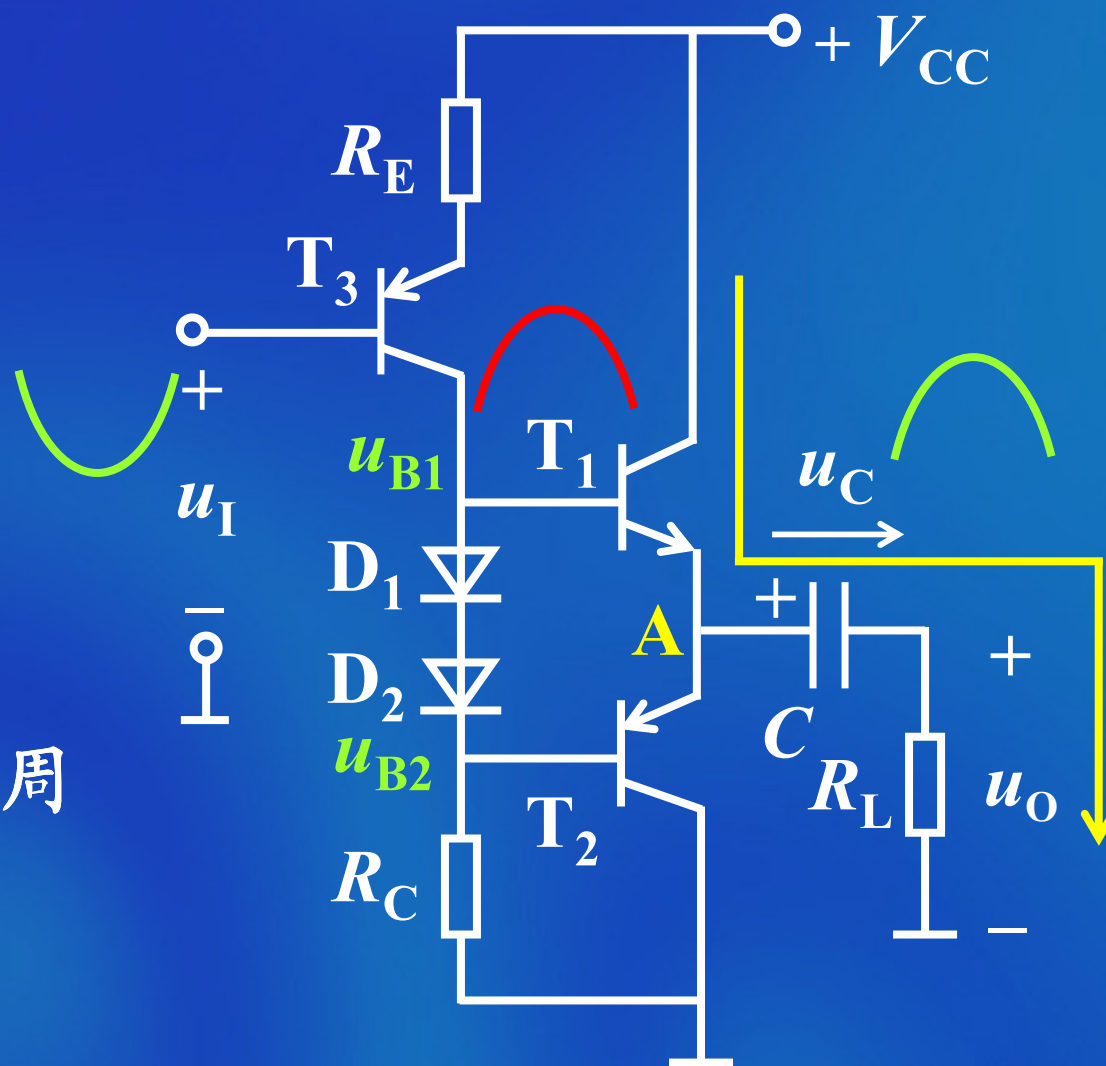
(2) 当 u_I 为负半周时

u_{B1} 信号为正半周

T_1 导通, T_2 截止

输出信号为正半周

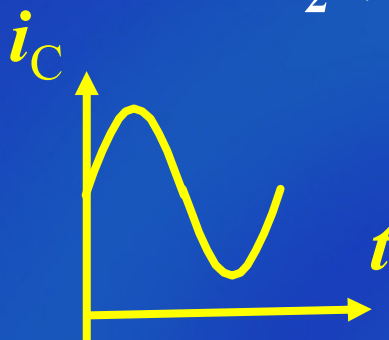
电容 C 同时充电



(3) 当 u_I 为正半周时

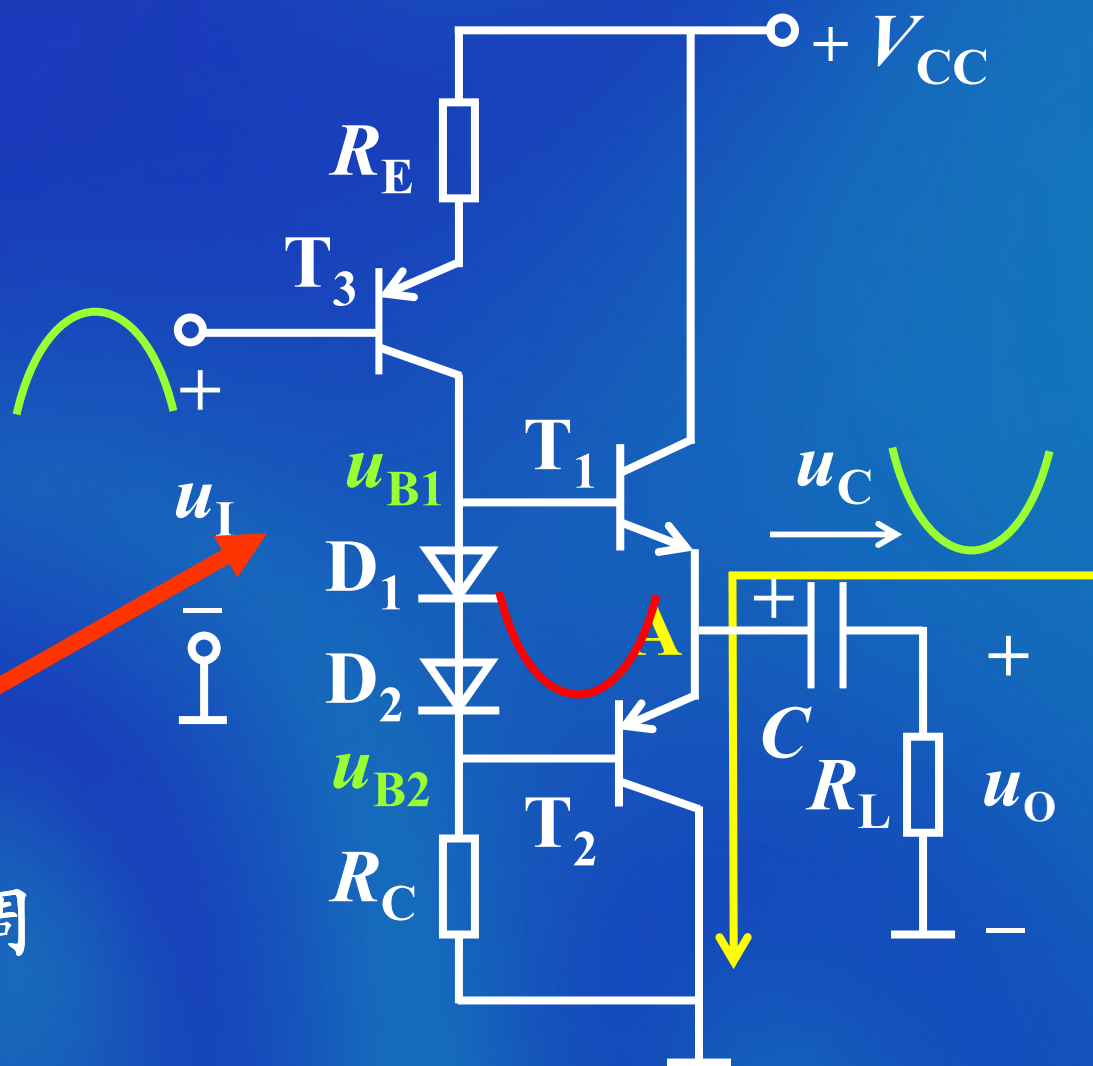
u_{B2} 信号为负半周

T_1 截止, T_2 导通



输出信号为负半周

电容 C 放电

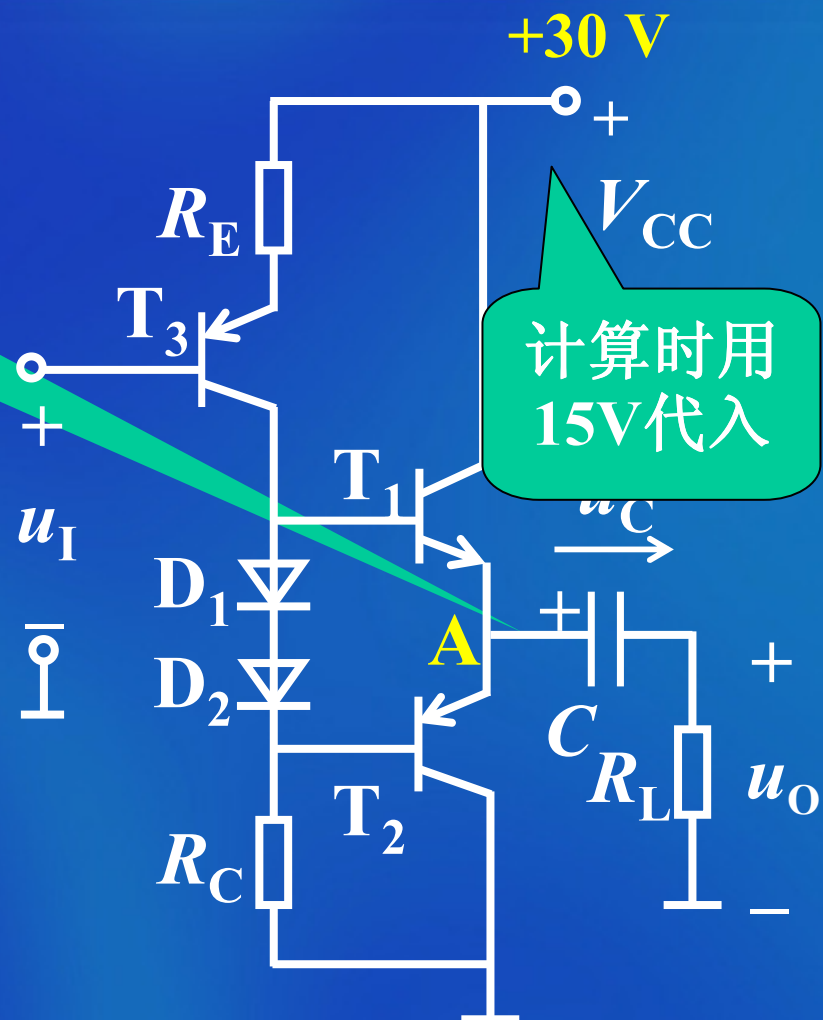


电容 C 起负电源 $-V_{CC}$ 的作用

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 $V_{CC}/2$ 。

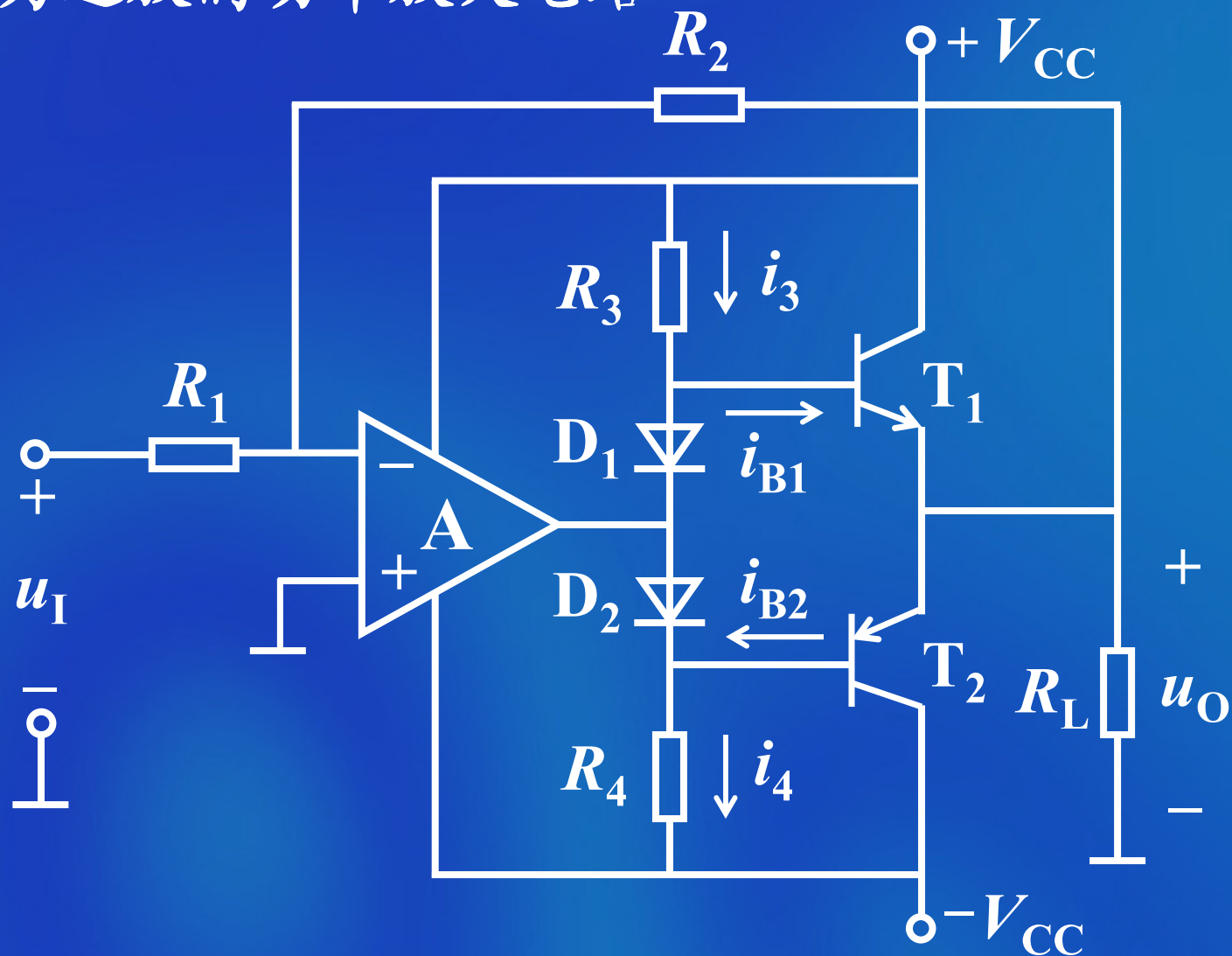
2. 电容 C 足够大, 使输出正负半周对称。



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 (Output Transformerless) 电路。

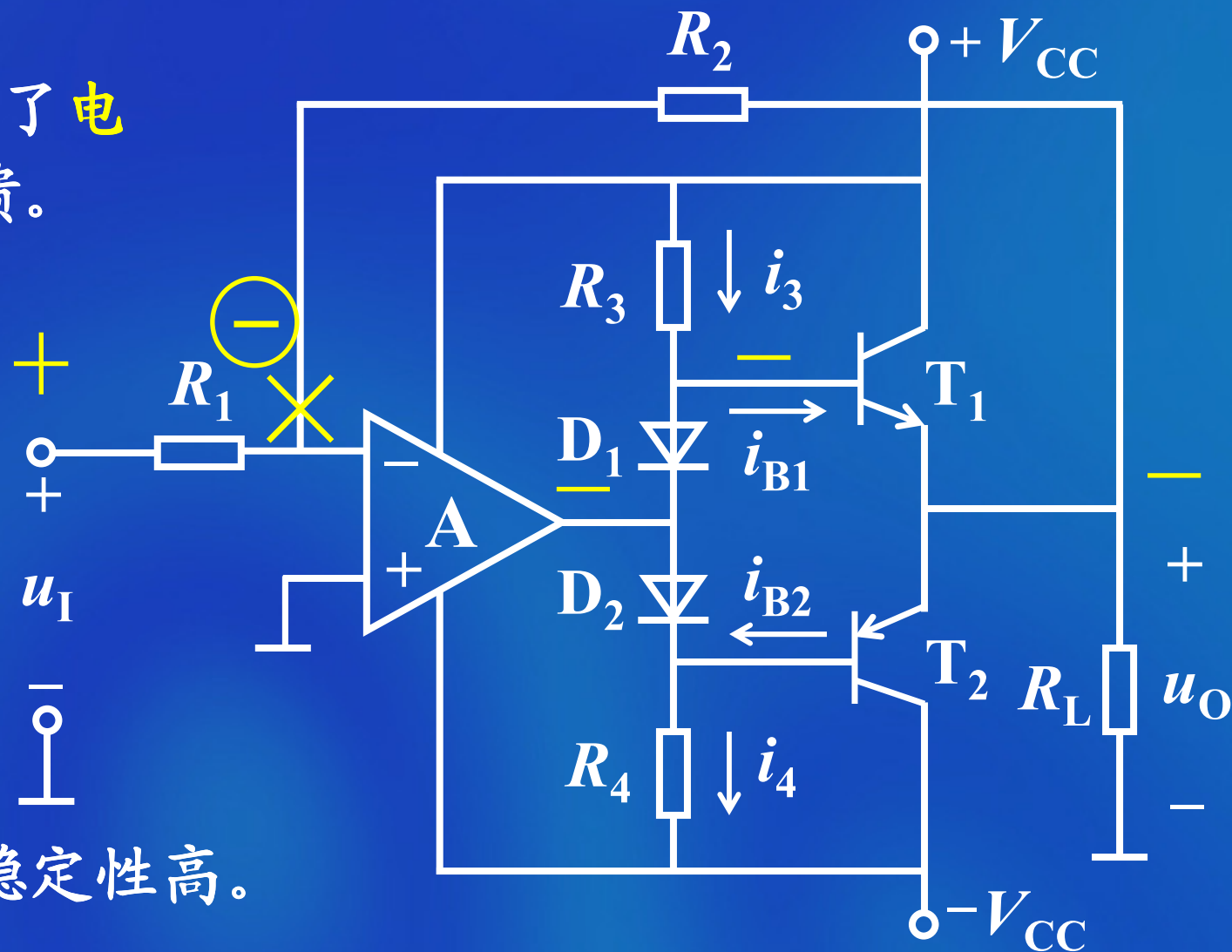
9.2.4 前置级为运放的功率放大电路

1. 电路组成



2. 电路特点

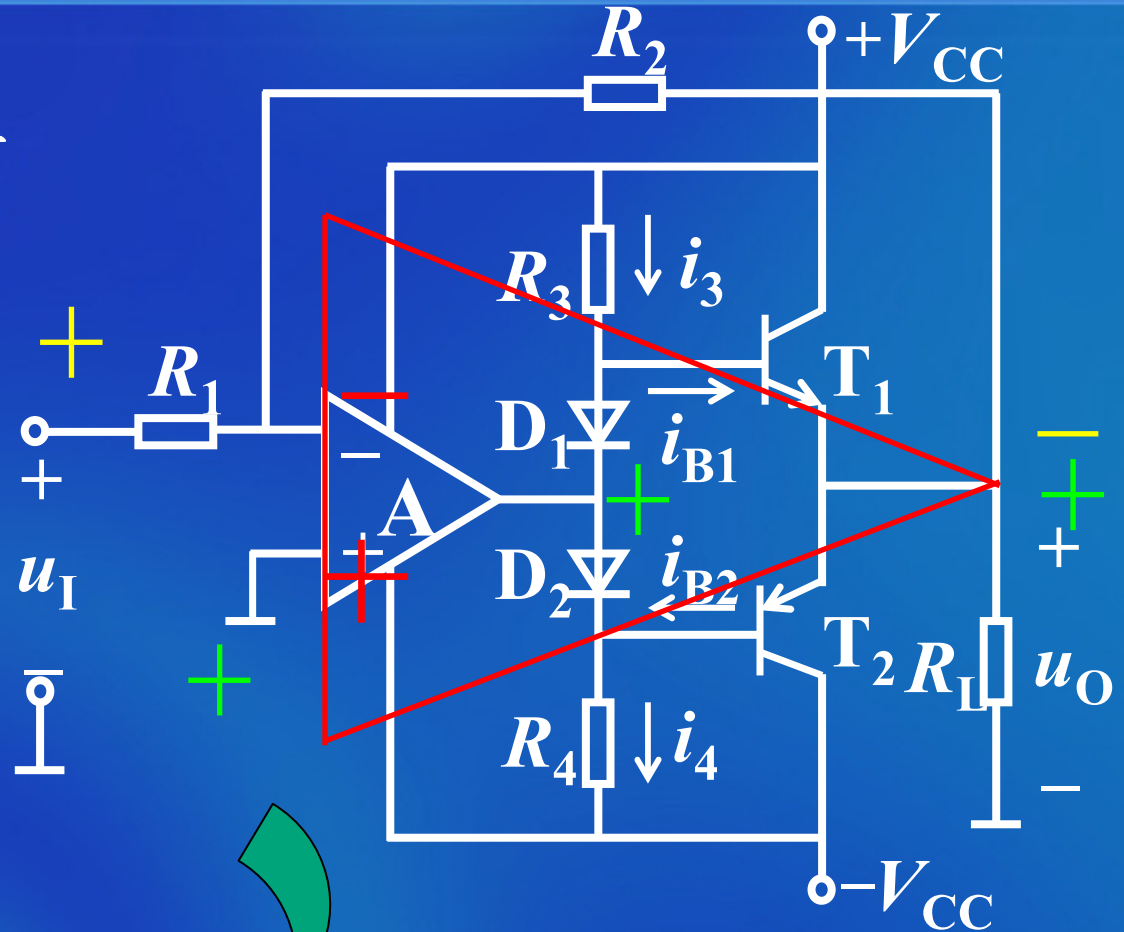
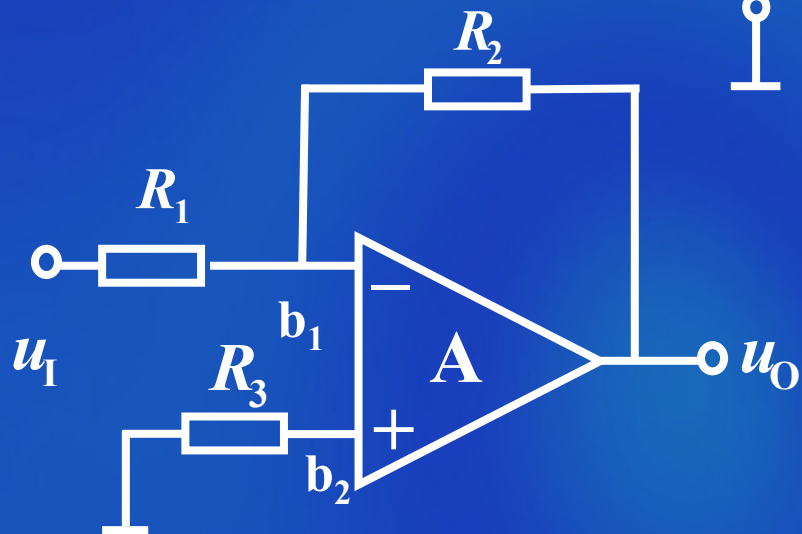
(1) 电路引入了**电压并联负反馈**。



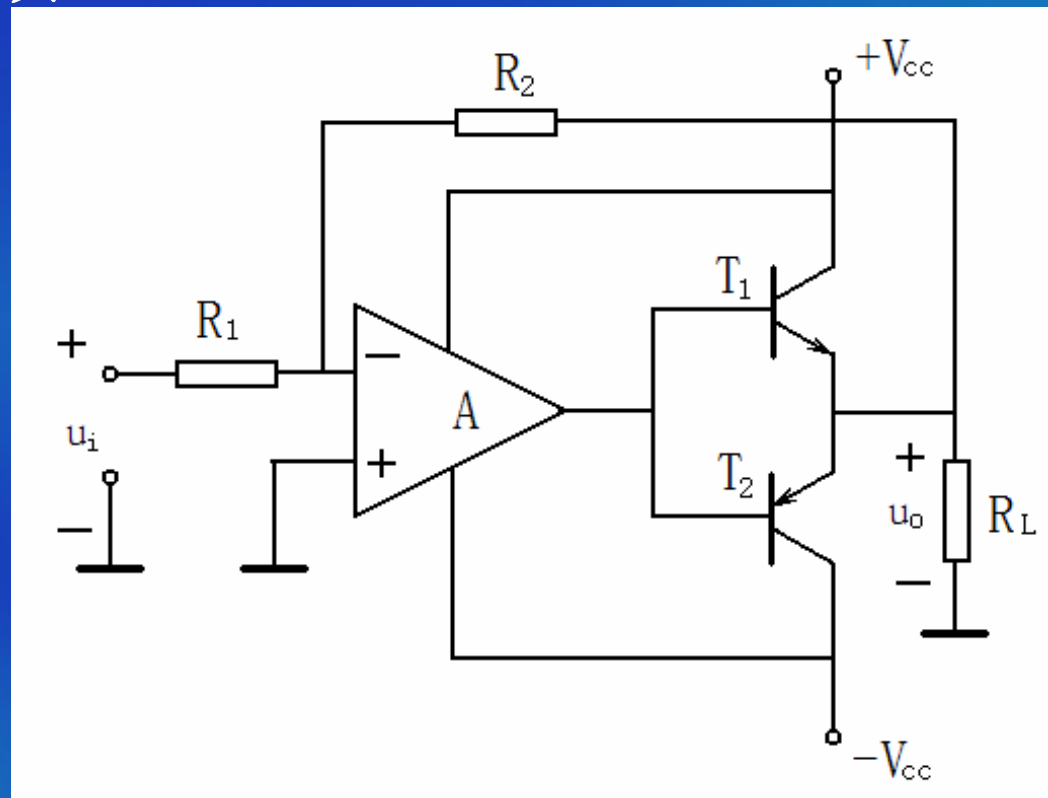
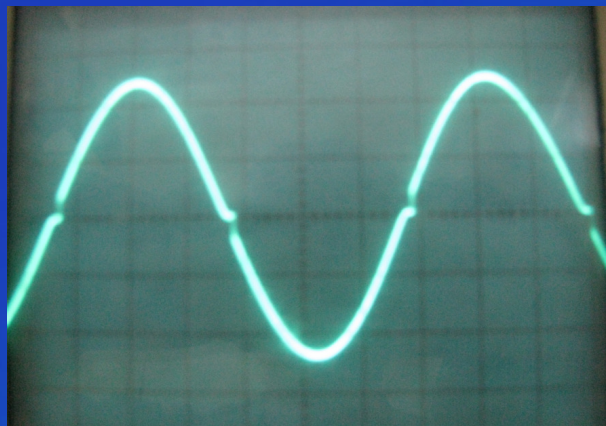
(2) 电路的稳定性高。

3. 电路的闭环电压增益

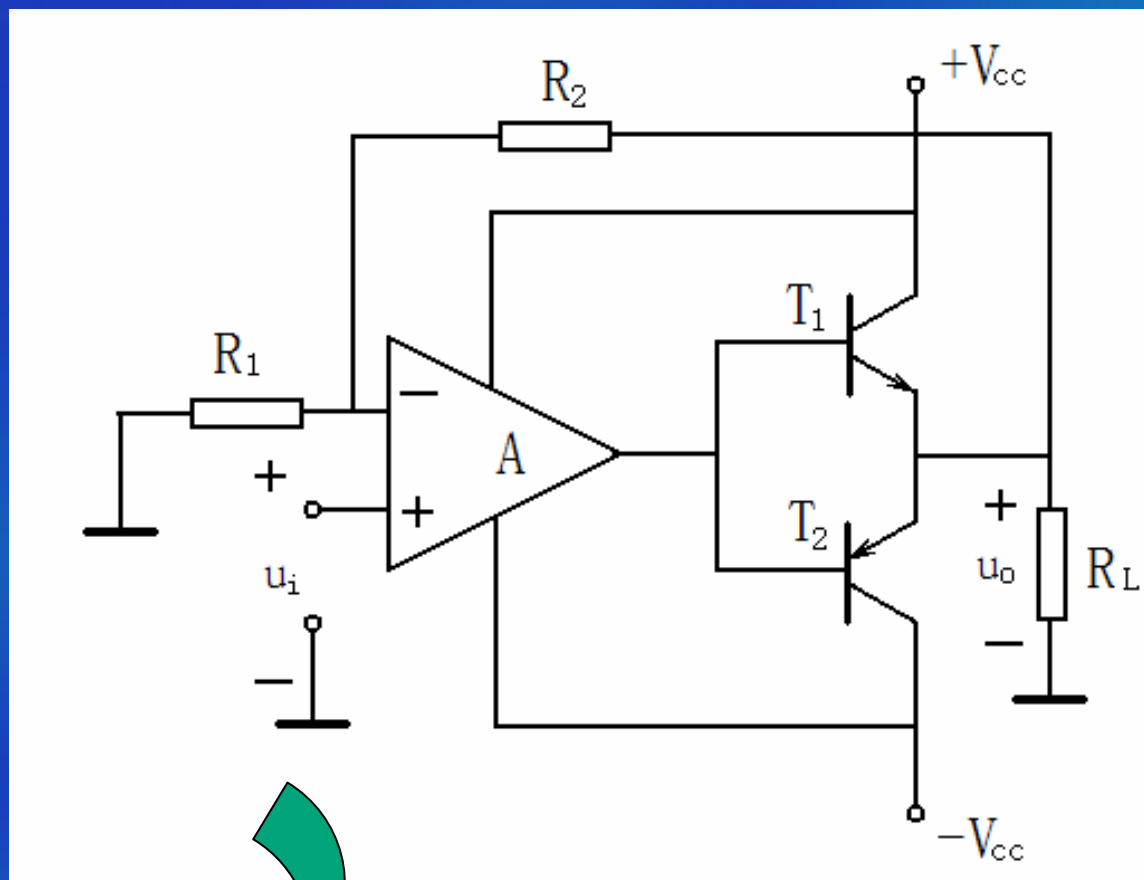
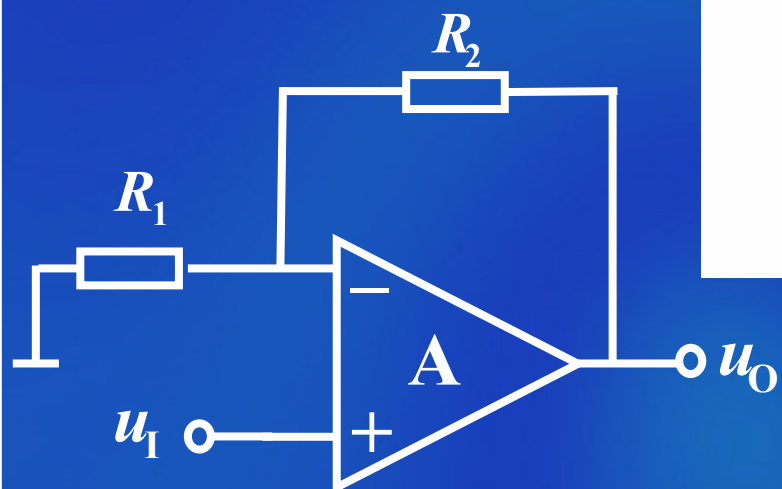
$$\dot{A}_{uf} \approx -R_2/R_1$$



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



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

类型:

互补对称功放的类型

```
graph TD; A[互补对称功放的类型] --> B[无输出变压器形式 (OTL电路)]; A --> C[无输出电容形式 (OCL电路)];
```

无输出变压器形式
(OTL电路)

无输出电容形式
(OCL电路)

OTL: Output TransformerLess

OCL: Output CapacitorLess

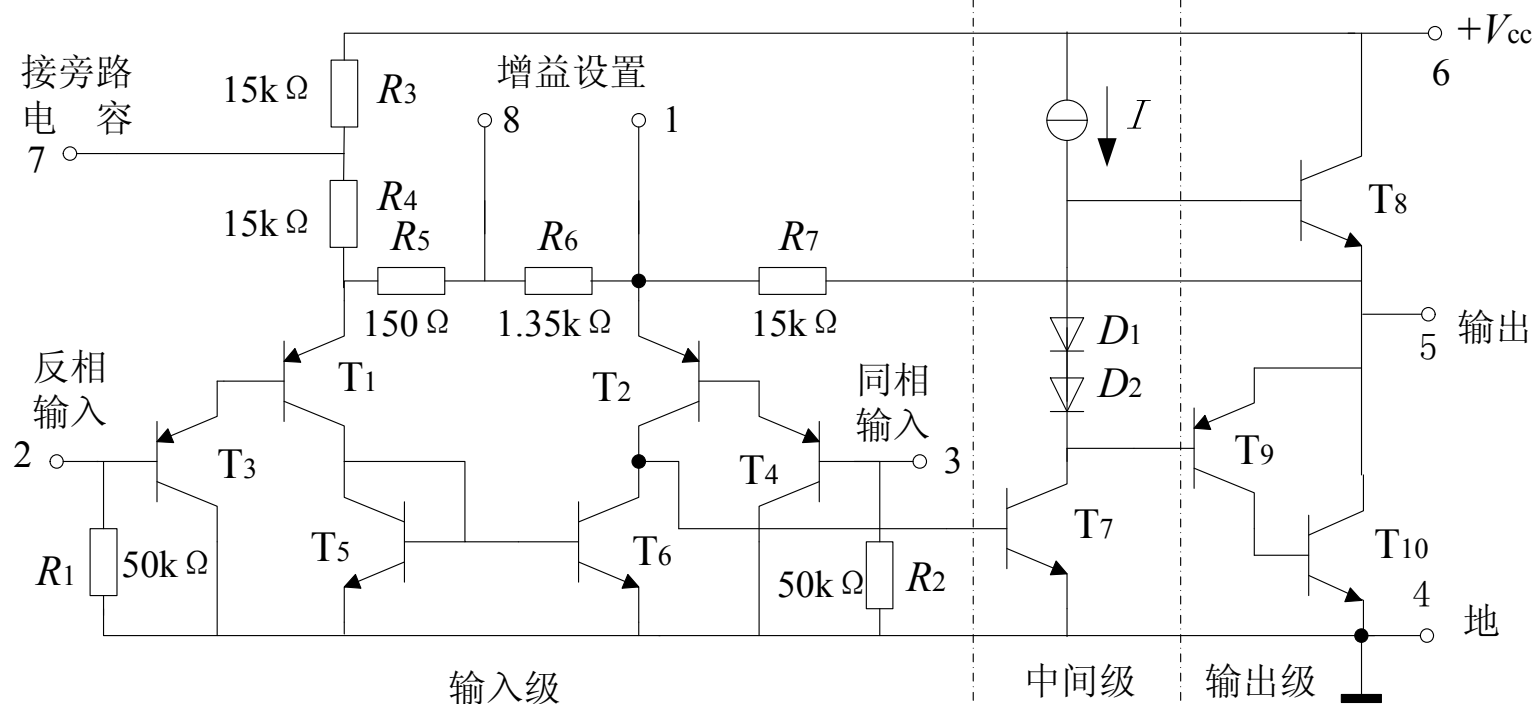
上页

下页

退出

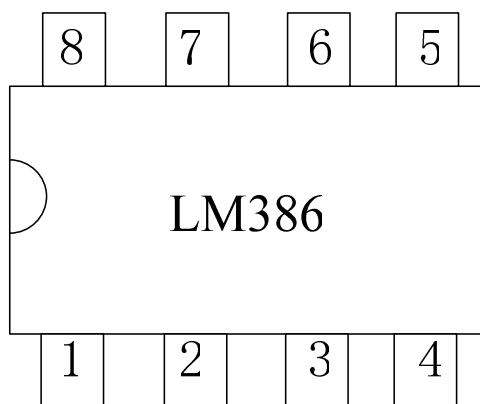
9.3 集成功率放大器

内部电路与通用集成放大器类似，一般包括三级电路。输入级为差分电路；中间级为共射电路；输出级为互补推挽电路。集成功率放大器的种类很多，常用的低频集成功放有LM386、LM380、TDA2003和TDA2006等。



LM386 简介

增益 旁路
设定 电容 $+V_{cc}$ 输出



增益 反相 同相 地
设定 输入 输入

图 (a) LM386的管脚说明

电源滤波电容

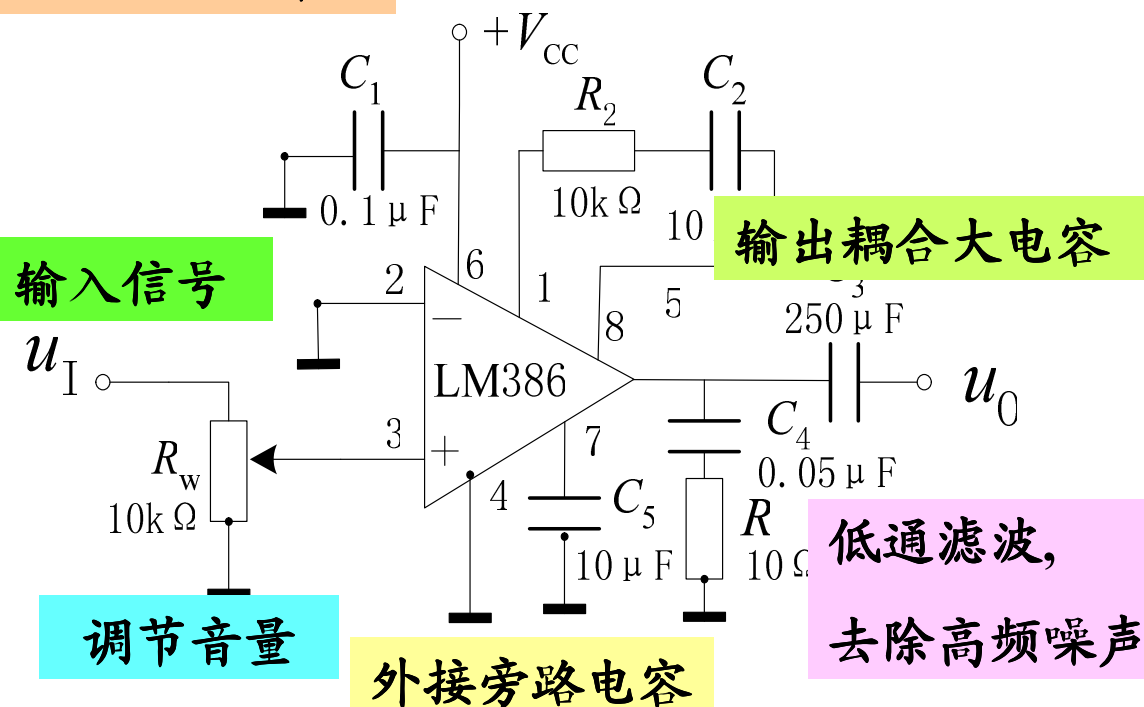


图 (b) LM386典型应用电路

思考题

1. 乙类互补推挽功率放大器产生交越失真的原因是什么？怎么克服交越失真？
2. 为什么说前置级为运放的功率放大电路交越失真很小？

9.4 功率器件与散热

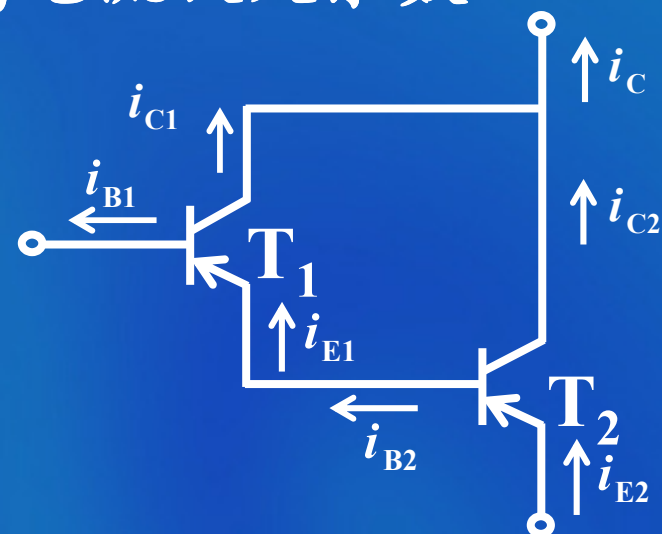
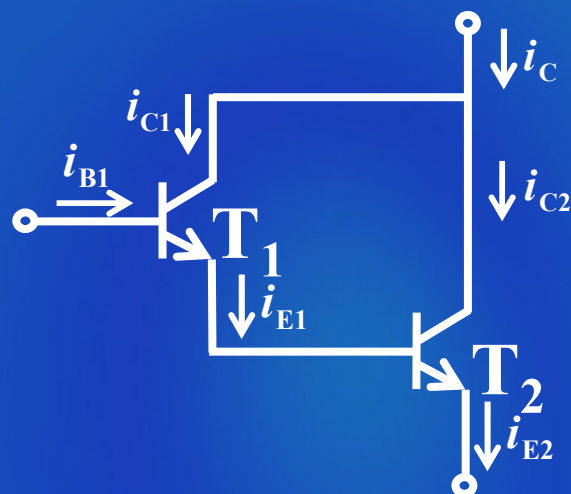
9.4.1 双极型功率晶体管 (BJT)

1. 大电流特性

由于大功率晶体管的电流放大系数小，基极驱动电流较大，给驱动电路增加负担。

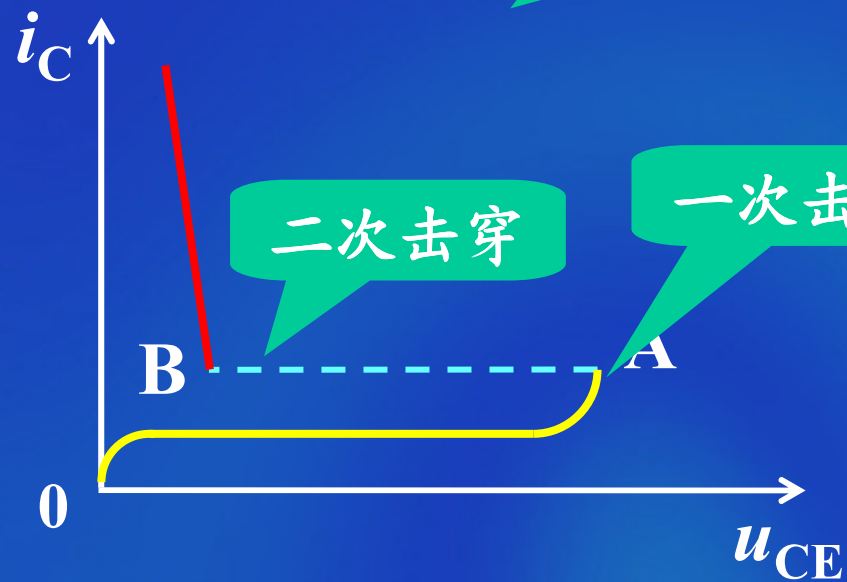
可以采用复合管提高电流放大系数

如何
解决
?



2. 二次击穿的影响

二次击穿现象



二次击穿临界曲线

S/B曲线



上页

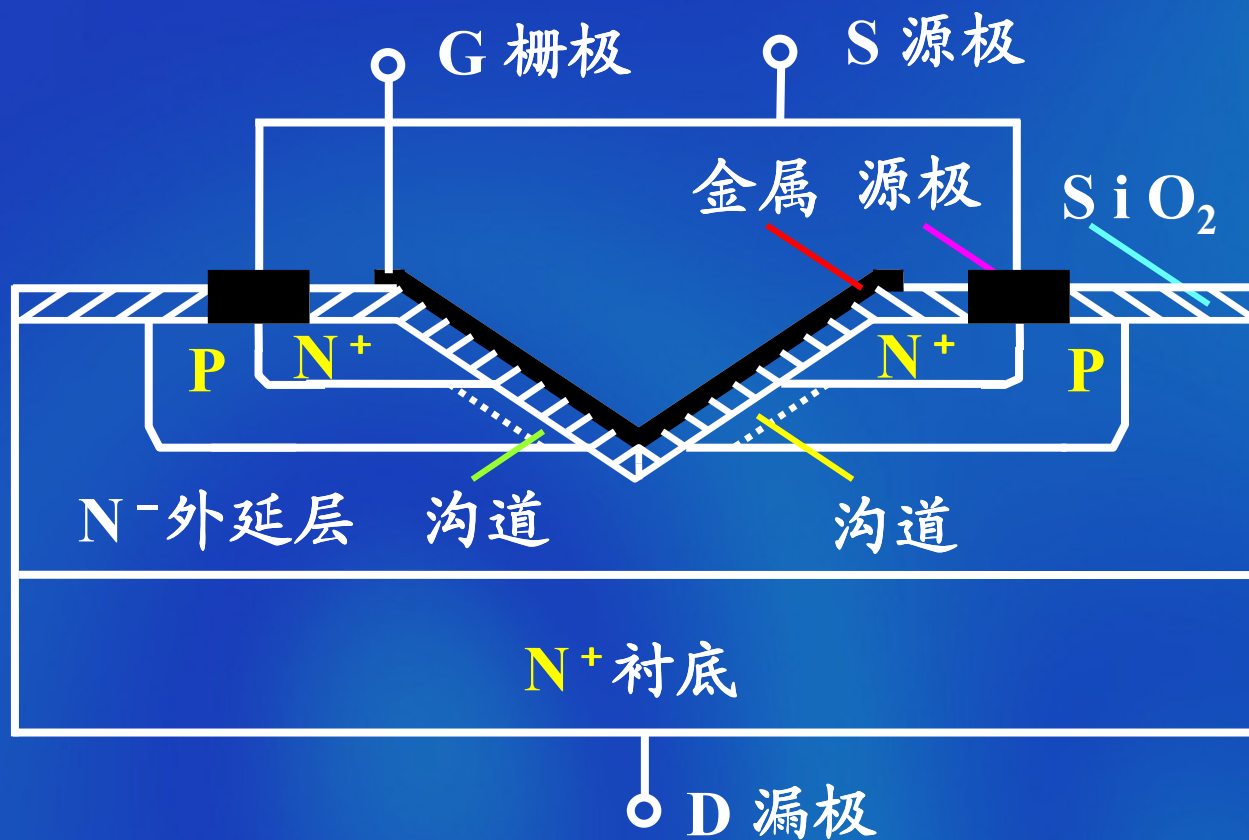
下页

退出

9.4.2 功率MOSFET

1. V型NMOS管的结构

结构剖面图



2. V型NMOS管的主要特点

(1) 开关速度高

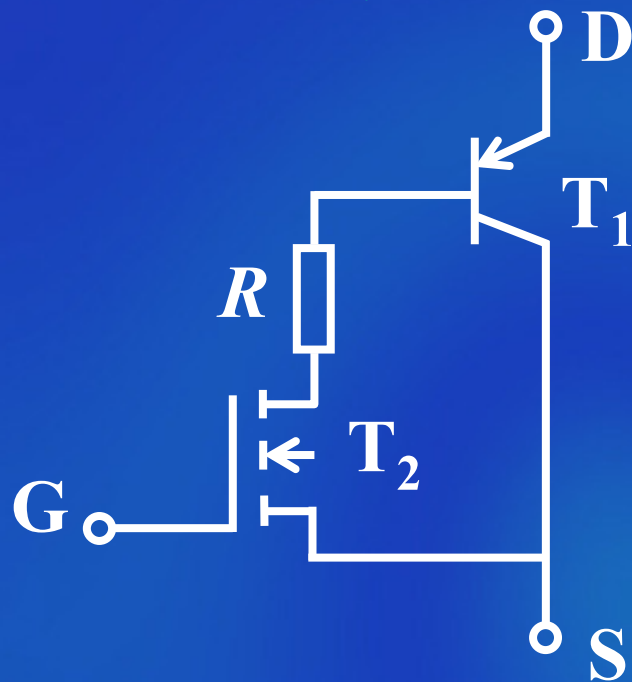
(2) 驱动电流小

(3) 过载能力强

(4) 易于并联

9.3.3 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)

IGBT等
效电路



IGBT电
路符号



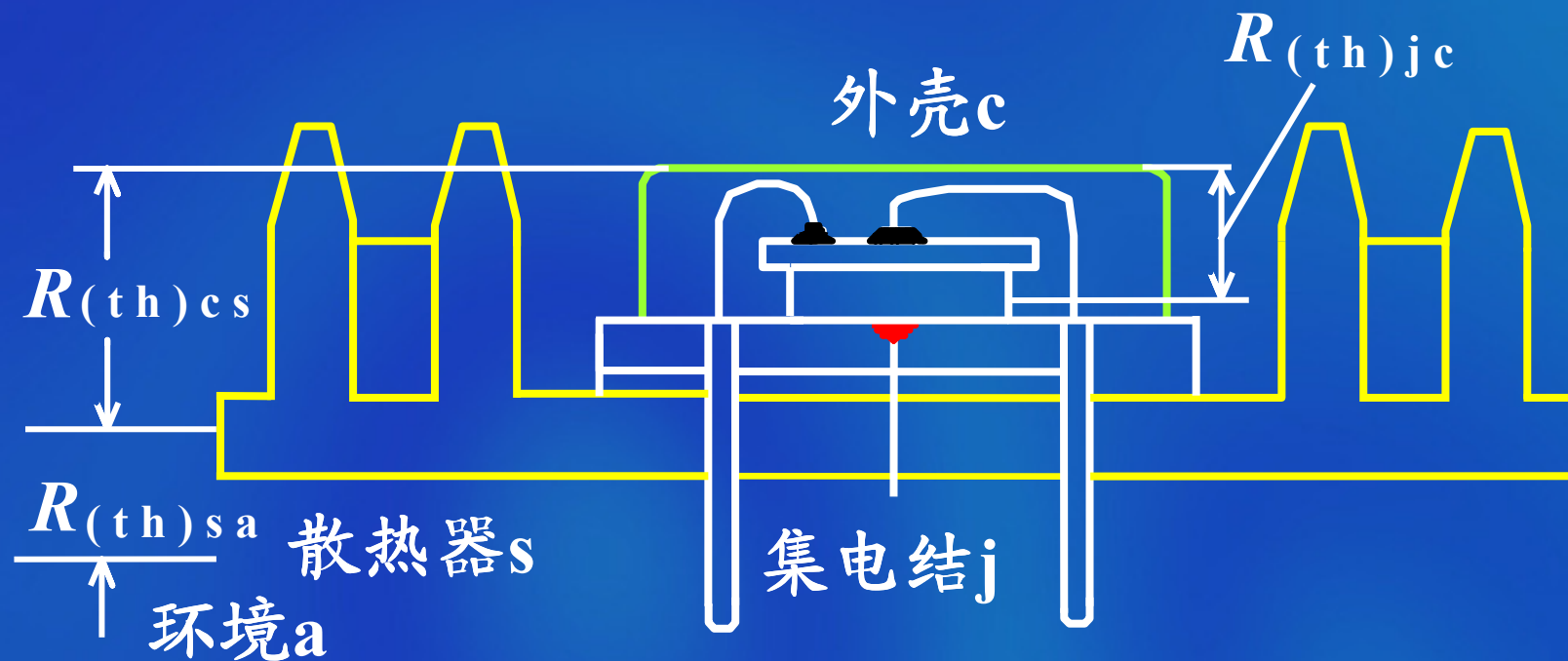
绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的主要特点:

- (1) 输入阻抗高
- (2) 工作速度快
- (3) 通态电阻低
- (4) 阻断电阻高
- (5) 承受电流大

兼顾了MOSFET和BJT的优点，成为当前功率半导体器件发展的重要方向。

9.3.4 功率器件的散热

晶体管的散热示意图



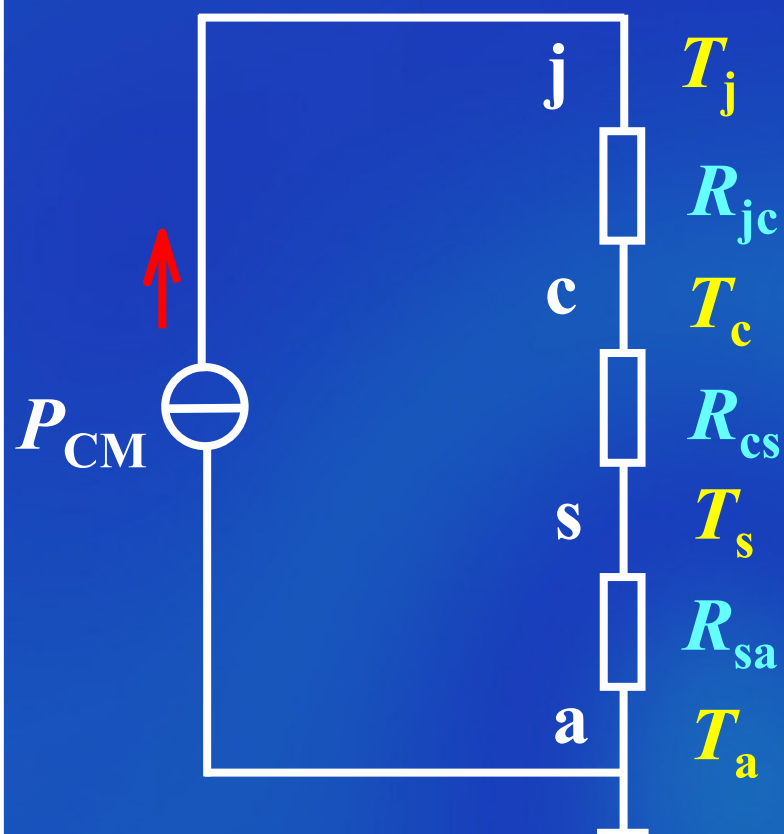
功率器件的散热分析方法：电 - 热模拟法

即用电路来模拟功率器件的散热回路

导电回路和散热回路参数对照表

导电回路（电路）			散热回路（热路）		
参 量	符 号	单 位	参 量	符 号	单 位
电 压	U	V	温 差	ΔT	°C
电 流	I	A	最大允 许功耗	P_{CM}	W
电 阻	R	Ω	热 阻	R_T	°C/W

散热等效热路



T_j ——集电结的结温

T_c ——功率管的壳温

T_s ——散热器温度

T_a ——环境温度

R_{jc} ——集电结到管壳的热阻

R_{cs} ——管壳至散热片的热阻

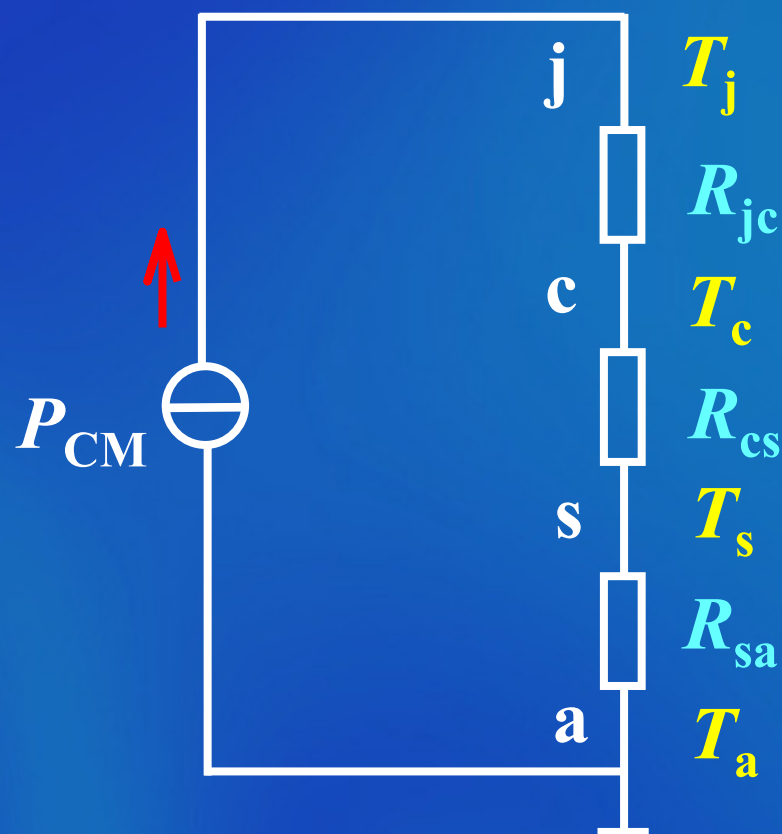
R_{sa} ——散热片至环境的热阻

散热回路的总热阻为

$$R_T = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}$$

最大允许功耗

$$P_{CM} = \frac{T_j - T_a}{R_T}$$



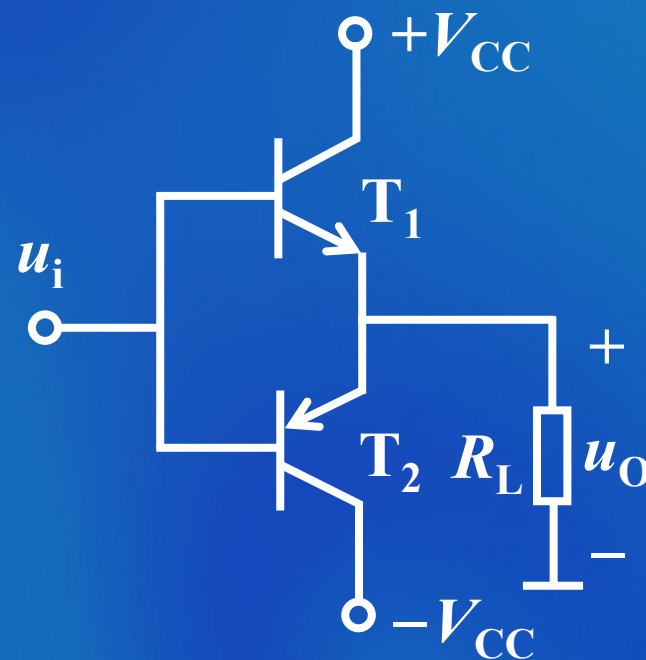
练习题

例1 乙类互补推挽功放电路如图所示。已知 u_i 为正弦电压， $R_L=8\Omega$ ，要求最大输出功率为16W。假设功率管 T_1 和 T_2 特性对称，管子的饱和压降 $U_{CES}=0$ 。试求：

(1) 正、负电源 V_{CC} 的最小值；

(2) 当输出功率最大时，电源供给的功率；

(3) 当输出功率最大时的输入电压的有效值。

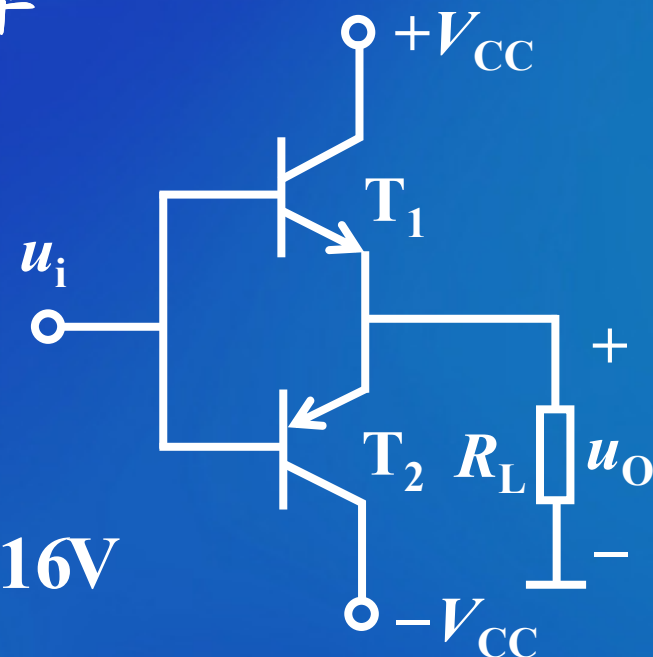


[解] (1) 由于电路的最大输出功率

$$P_{Om} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = 16W$$

所以电源电压

$$V_{CC} \geq \sqrt{2R_L P_{om}} = \sqrt{2 \times 8 \times 16} = 16V$$



(2) 当输出功率最大时，电源供给的功率

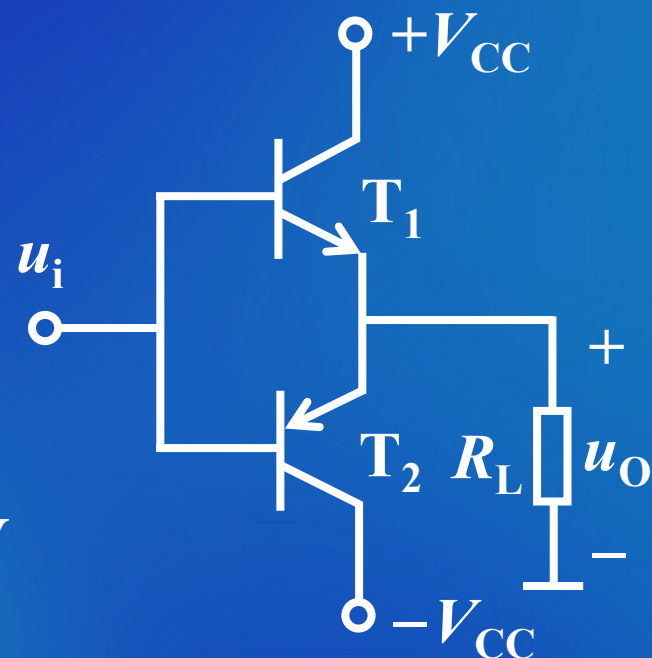
$$P_V = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{2}{\pi} \frac{16 \times 16}{8} \approx 20.38W$$

(3) 因为输出功率最大时, 输出电压的幅值为

$$U_{Om} \approx V_{CC} = 16V$$

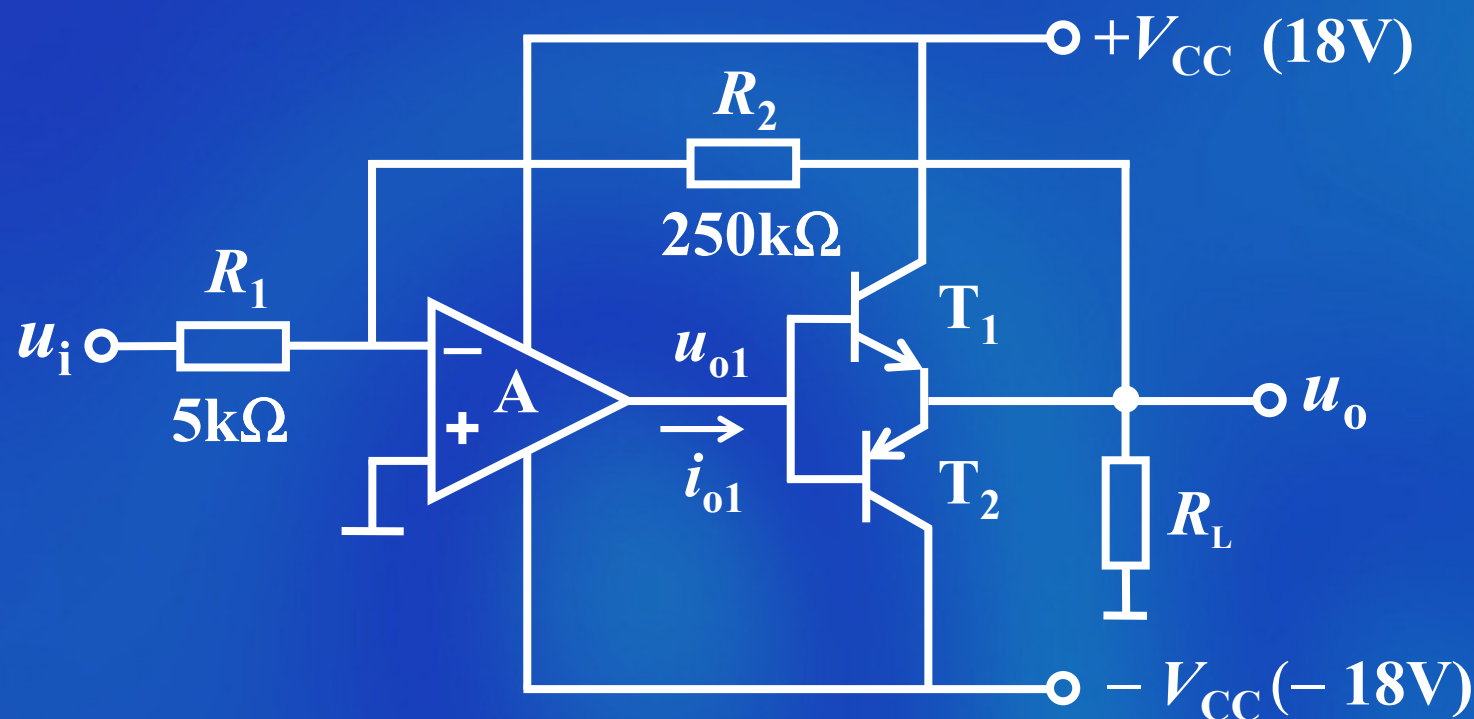
所以输入电压的有效值为

$$U_i \approx U_o = \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} = \frac{16}{\sqrt{2}} \approx 11.32V$$



例2 在图示的电路中，已知运放性能理想，其最大的输出电流、电压分别为15mA和15V。设晶体管 T_1 和 T_2 的性能完全相同， $\beta=60$ ， $|U_{BE}|=0.7V$ 。试问

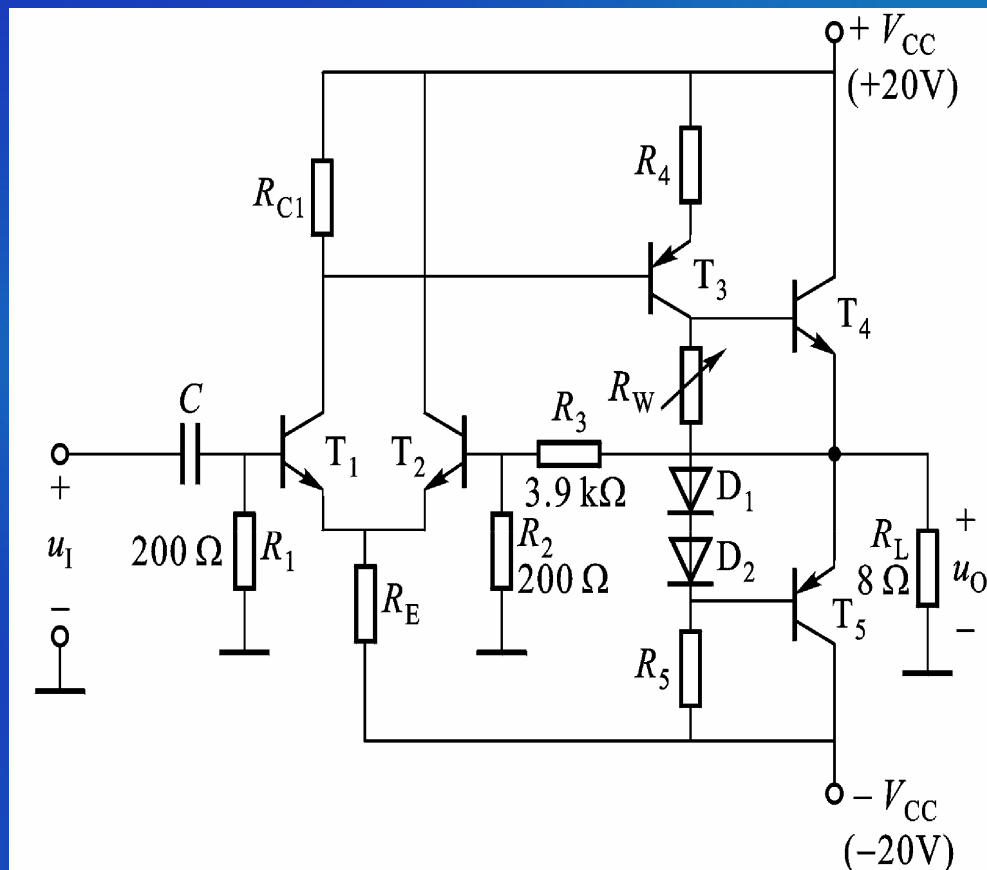
(1) 该电路采用什么方法来减小交越失真？。



P329 9.16题

9.16 功率放大电路如下图所示。假设晶体管T4和T5的饱和压降可以忽略，试问：

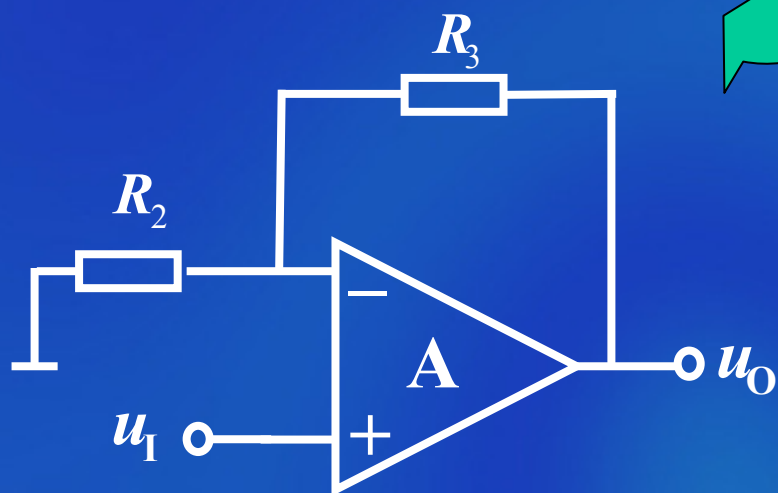
- (a) 该电路是否存在反馈？若存在反馈，请判断反馈类型；
- (b) 假设电路满足深度负反馈的条件，当 $U_i = 0.5V$ 时， U_o 等于多少？此时电路的 P_o 、 P_V 及 η 各等于多少？
- (c) 电路最大输出功率 P_{om} 、最大效率 η_{max} 各等于多少？



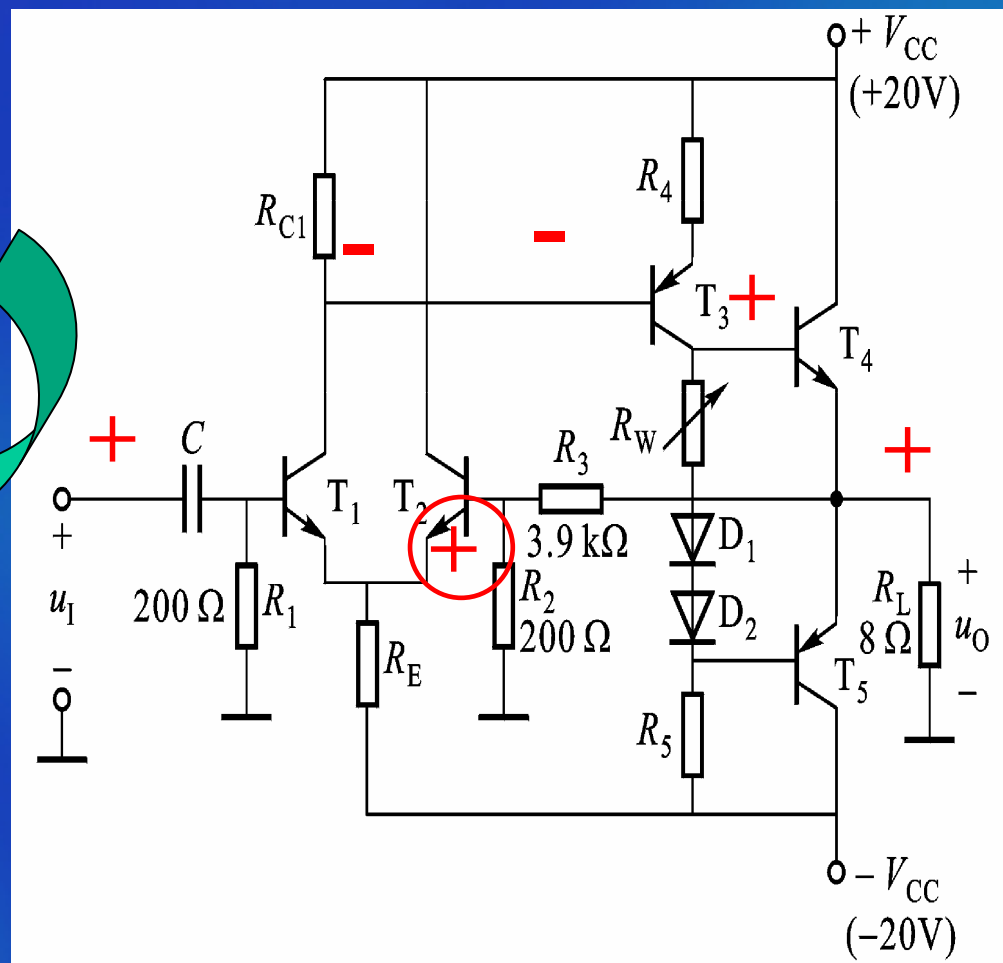
电压or电流？ 串联or并联？

正反馈or负反馈？

(a) 电压串联负反馈



$$\dot{A}_{uf} \approx 1 + R_3/R_2$$



(b)

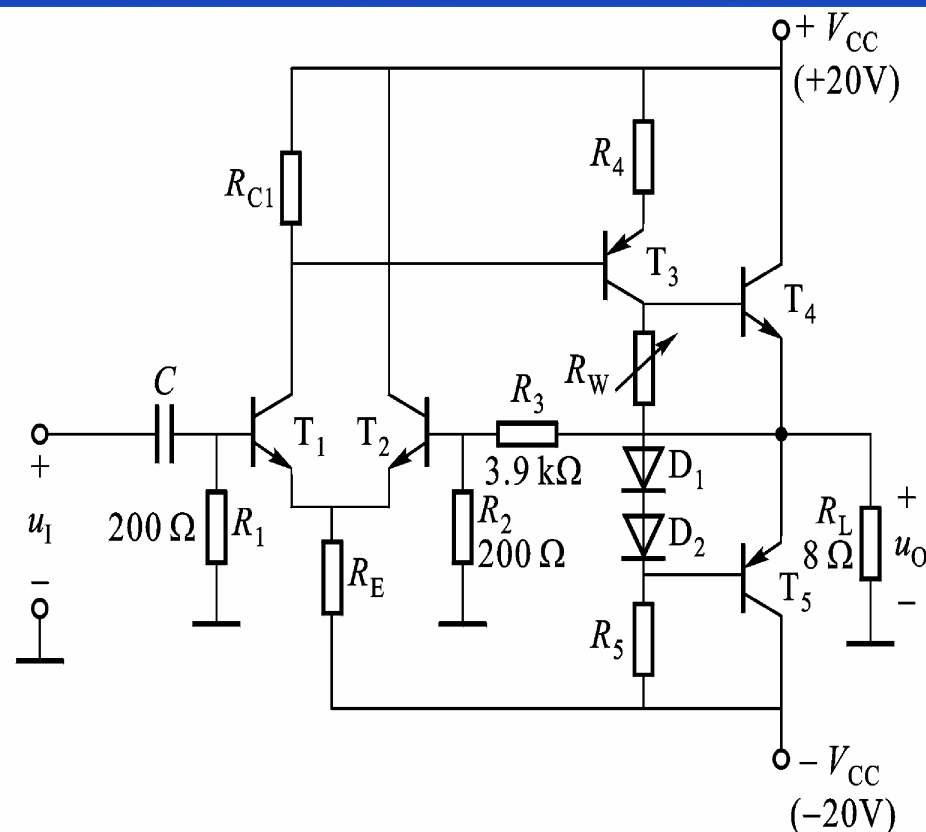
$$A_{uf} \approx 1 + \frac{R_3}{R_2} = 1 + \frac{3.9}{0.2} = 20.5$$

$$U_o = |A_{uf}| U_i = 20.5 \times 0.5 = 10.25 \text{ V}$$

$$P_o = \frac{U_o^2}{R_L} = \frac{(10.25)^2}{8} = 13$$

$$P_V = 2V_{CC} \frac{U_{om}}{\pi R_L} = \frac{2 \times 20 \times \sqrt{2} \times 10.25}{3.14 \times 8} \approx 23$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{13}{23} \times 100\% = 56.5\%$$

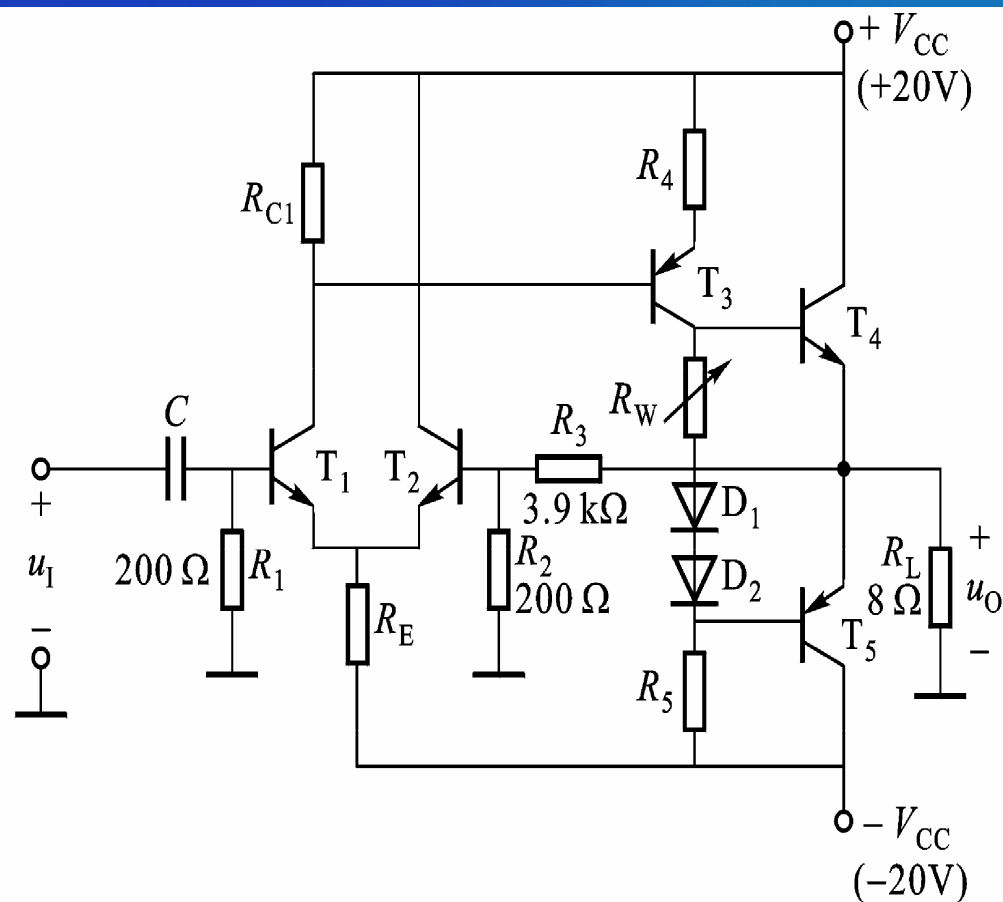


(c) 当输出电压幅值达到电源电压时，输出功率和效率达到最大。

$$P_{\text{om}} = \frac{V_{\text{CC}}^2}{2R_{\text{L}}} = 25 \text{ W}$$

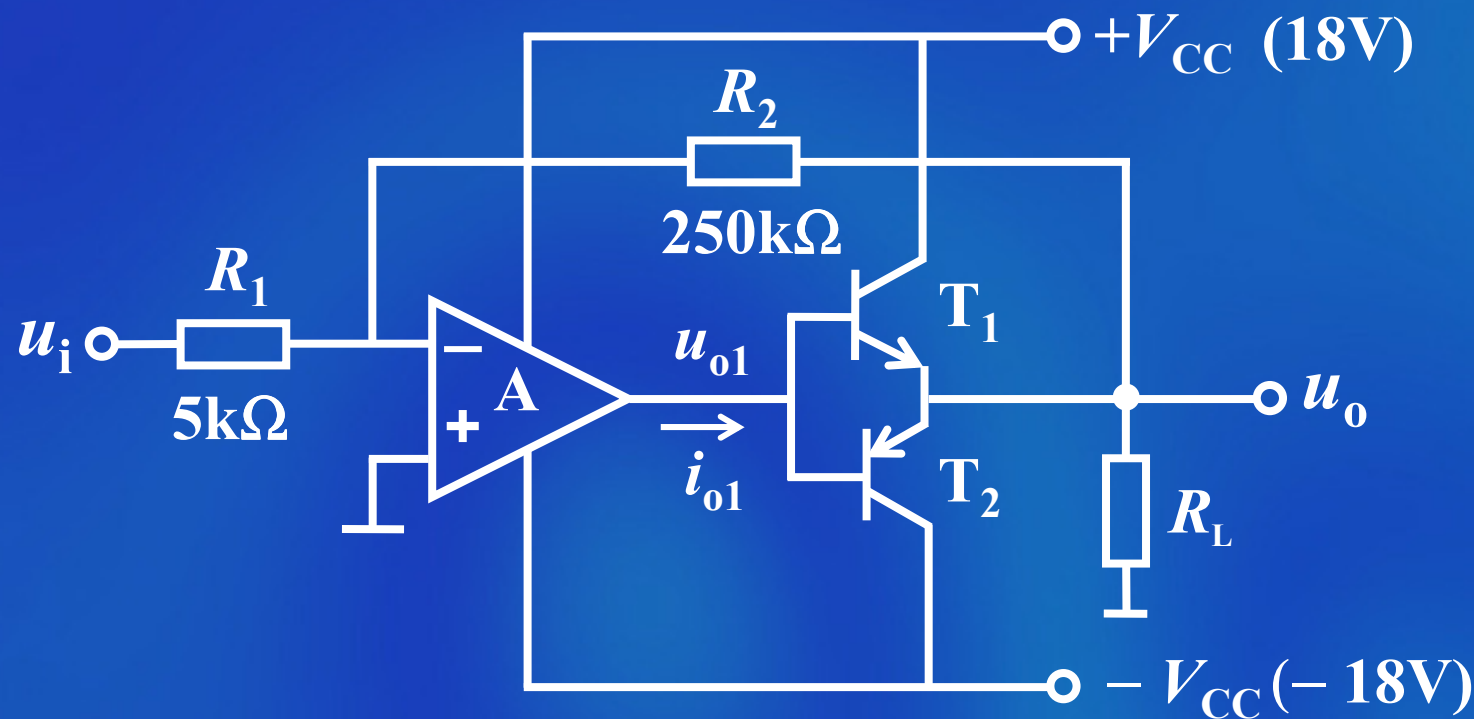
$$P_{\text{V}} = \frac{2V_{\text{CC}}^2}{\pi R_{\text{L}}} = \frac{2 \times 20^2}{3.14 \times 8} = 31.85$$

$$\eta_m = \frac{P_{\text{om}}}{P_{\text{V}}} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78.5\%$$

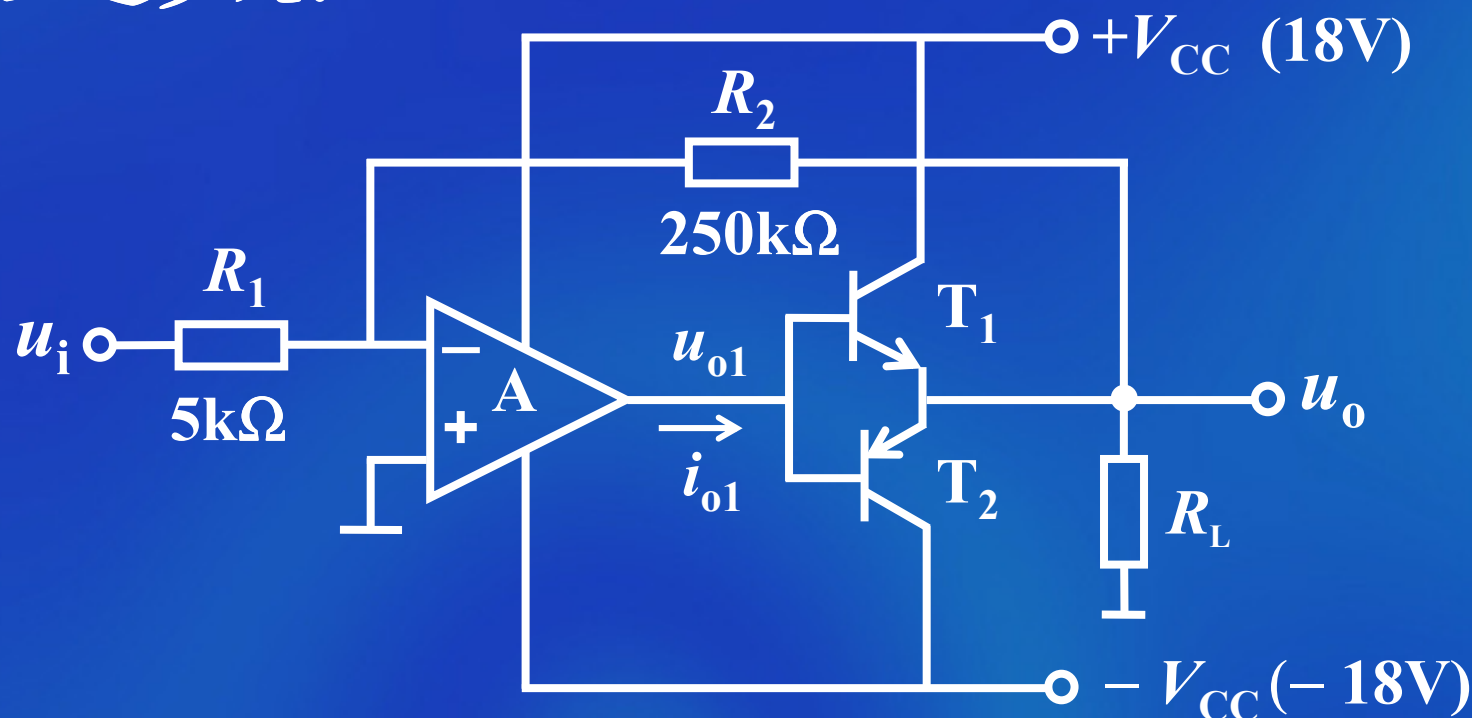


(2) 如负载 R_L 分别为 $20\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 时, 其最大不失真输出功率分别为多大?

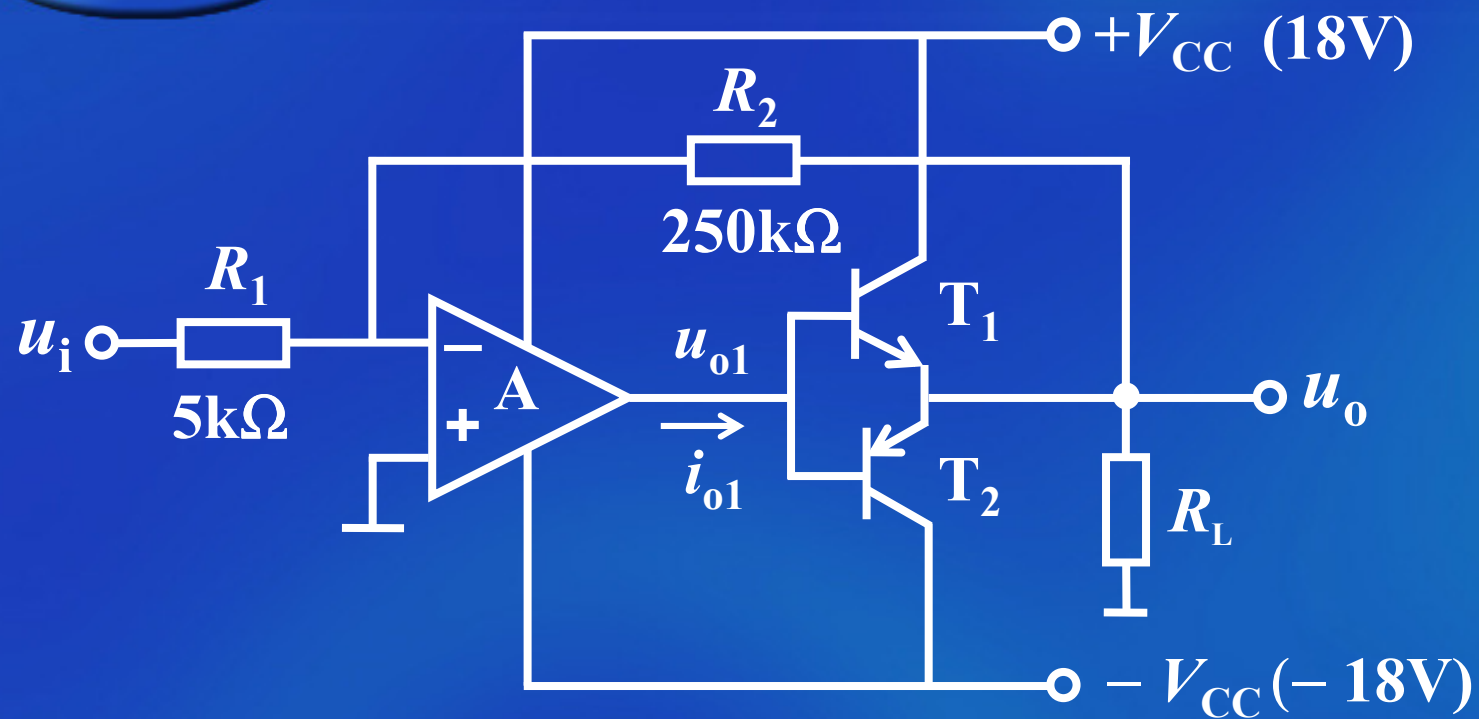
(3) 为了使不失真输出功率达到最大, 其电路的最佳负载 R_{Lopt} 及此时的最大输出功率 P_{om} 。



(4) 功放管 T_1 和 T_2 的极限参数 P_{CM} 、 I_{CM} 和 $|U_{(BR)CEO}|$ 应选多大?

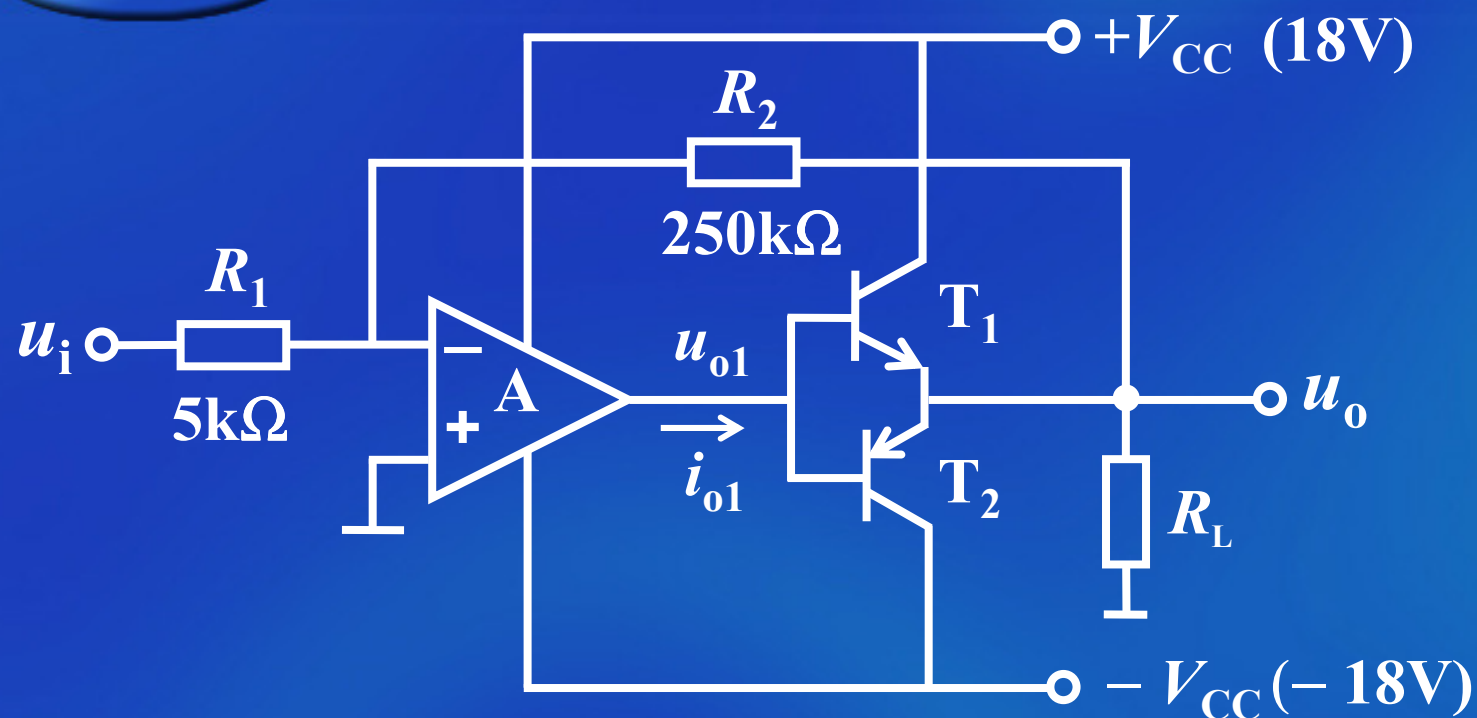


解 (1) 在电路即将导通之时, 电路中各支路中的电流为零。这时



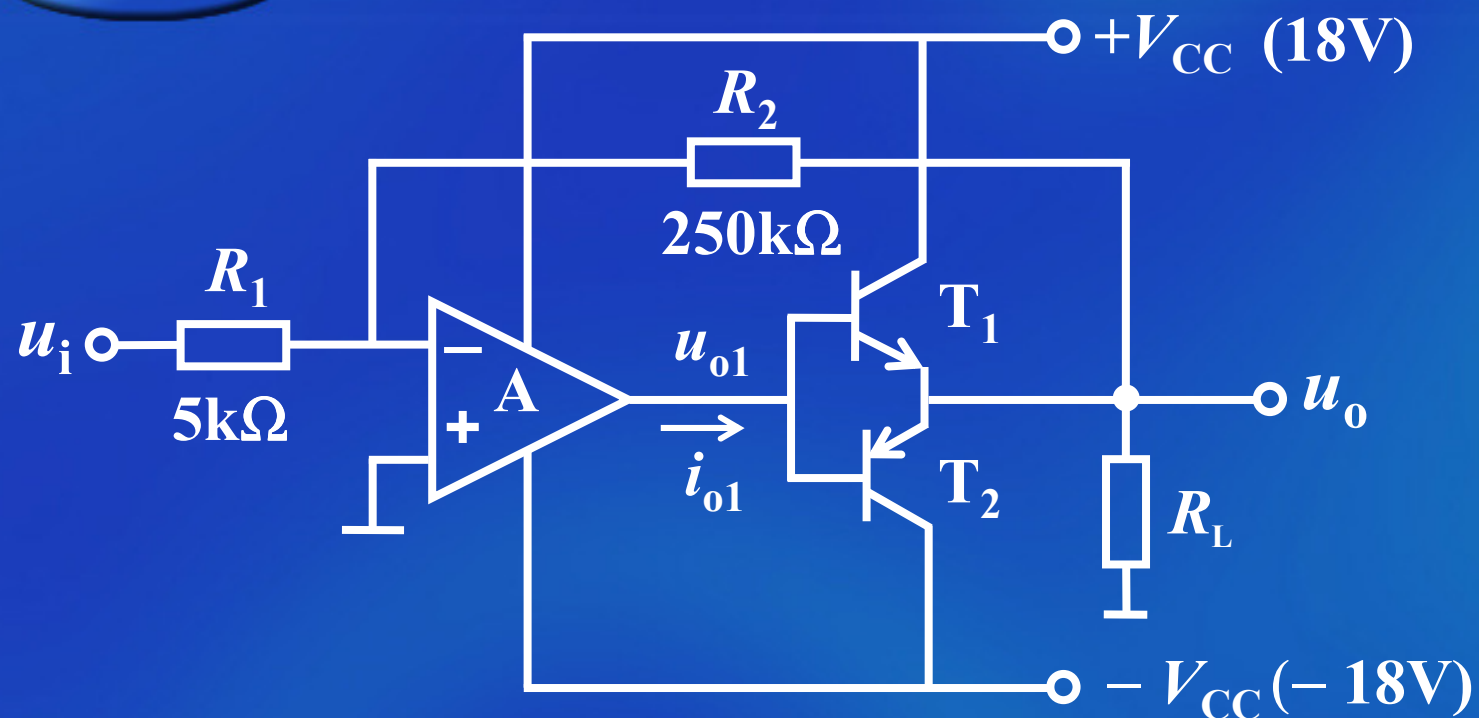
$$u_- = \frac{R_2 + R_L}{R_1 + R_2 + R_L} u_i$$

$$u_{o1} = -A_{uo} u_- = -\frac{R_2 + R_L}{R_1 + R_2 + R_L} u_i A_{uo}$$



$$u_i = -\frac{R_1 + R_2 + R_L}{R_2 + R_L} \frac{u_{o1}}{A_{uo}}$$

在管子即将导通时， u_{o1} 等于其死区电压 $U_{BE(th)}$ 。



故 电路的死区电压 $U_{i(\text{th})}$ 为

$$|U_{i(\text{th})}| = \frac{R_1 + R_2 + R_L}{R_2 + R_L} \frac{|U_{\text{BE}(\text{th})}|}{A_{u0}}$$

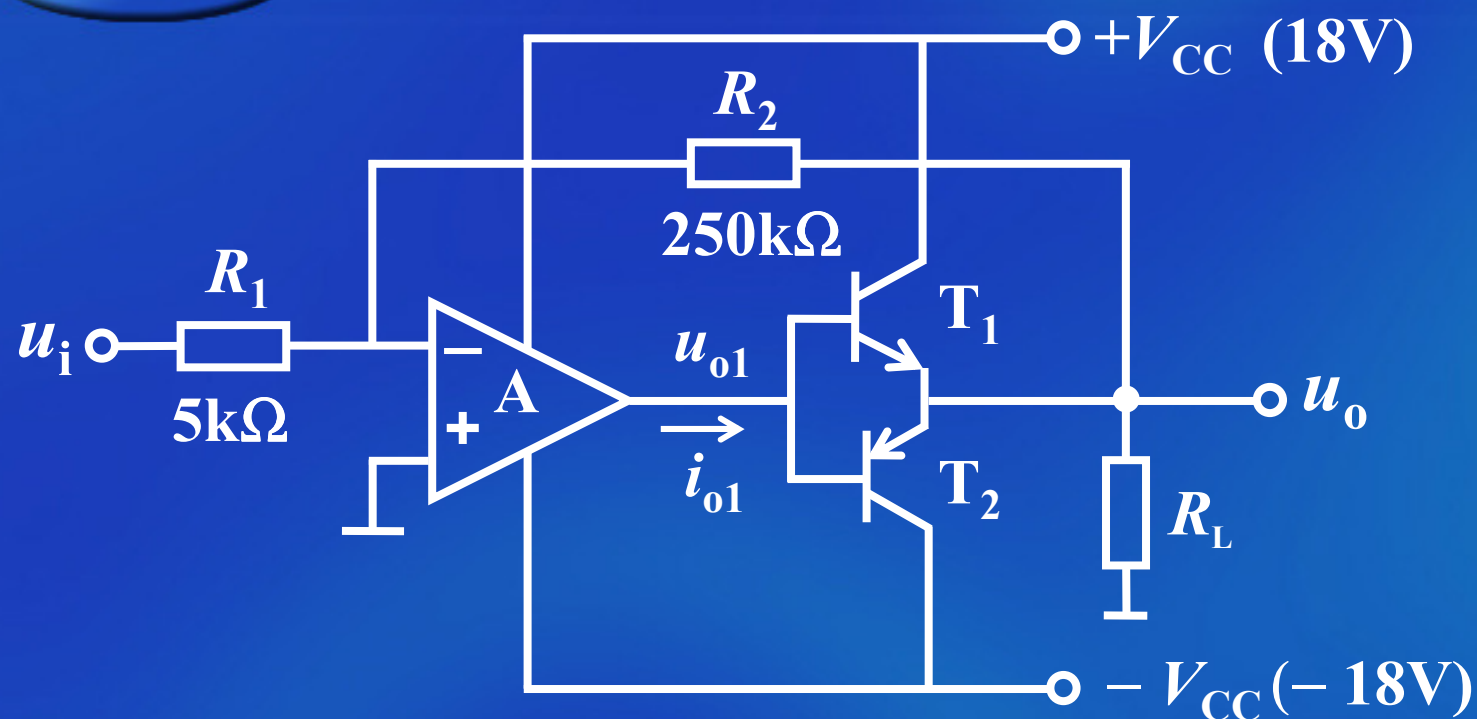
即当 $|u_i| \leq [1 + R_1/(R_2 + R_L)]|U_{BE}|/A_{u0}$ 时,

T_1 和 T_2 均未导通;

当 $|u_i| > [1 + R_1/(R_2 + R_L)]|U_{BE}|/A_{u0}$ 时,

T_1 或 T_2 导通;

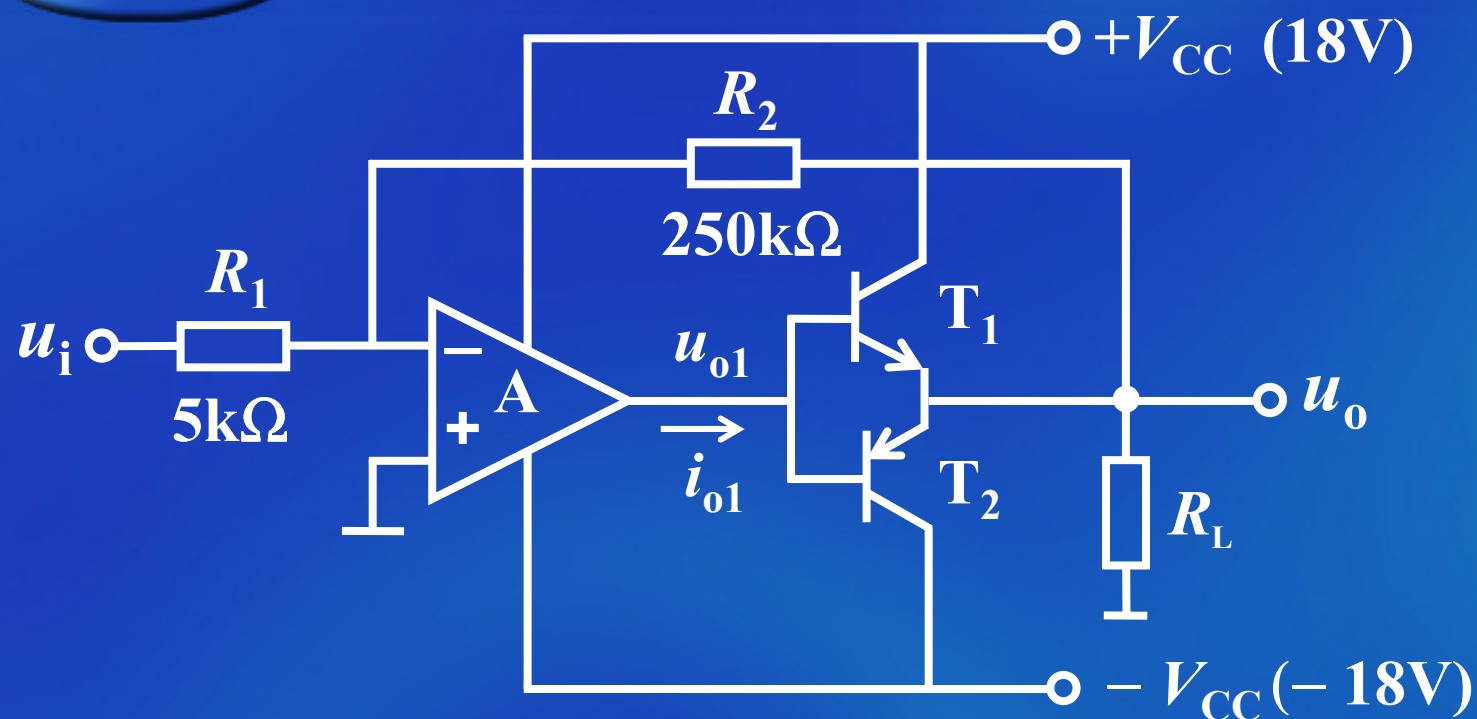
可见, 由于运放的 A_{u0} 很大, 与未加运放的乙类推挽功放电路相比, 输入电压的不灵敏区减小了, 从而减小了电路的交越失真。



(2) 由图可知，功放电路的最大输出电流为

$$\begin{aligned} I_{om} &\approx I_{em} = (1 + \beta) I_{o1m} \\ &= (60 + 1) \times 15 \times 10^{-3} = 0.915 \text{A} \end{aligned}$$

最大输出电压为 $U_{om} \approx U_{o1m} = 15 \text{V}$



当 $R_L = 20\Omega$ 时, 因为 $I_{om} R_L = 18.3\text{V} > U_{om} = 15\text{V}$

那么, 受输出电压的限制, 电路的最大输出功率为

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{2R_L} = \frac{15^2}{2 \times 20} = 5.63\text{W}$$

当 $R_L = 10\Omega$ 时, $\frac{U_{om}}{R_L} = \frac{15}{10} = 1.5A > I_{om} = 0.915A$

故受输出电流的限制, 电路的最大输出功率为

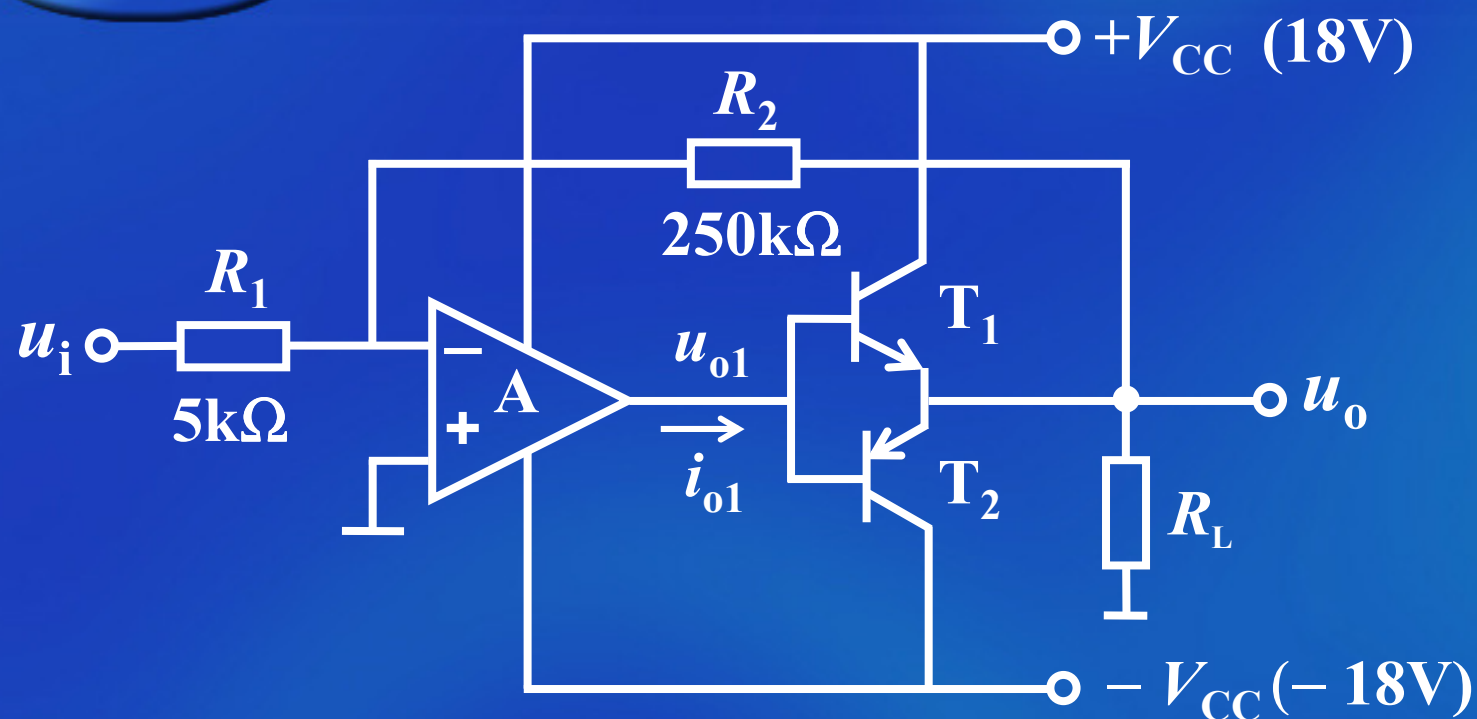
$$P_{om} = \frac{1}{2} I_{om}^2 R_L = 0.5 \times 0.915^2 \times 10 \approx 4.19W$$

(3) 为了充分利用运放输出的最大电流和电压, 功放电路的最佳负载应为

$$R_{LOPT} = \frac{U_{om}}{I_{om}} = \frac{15}{0.915} = 16.4\Omega$$

此时电路的最大输出功率为

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{2R_{Lopt}} = \frac{15^2}{2 \times 16.4} = 6.86W$$



(4) 在上述3种负载情况下，两管的最大功耗分别为：

$$\begin{aligned} \text{当 } R_L = 10\Omega \text{ 时, } P_T = P_V - P_{om} &= \frac{2}{\pi} I_{om} V_{CC} - 4.19 \\ &= \frac{2}{\pi} \times 0.915 \times 18 - 4.19 \approx 6.3\text{W} \end{aligned}$$

当 $R_L = 20\Omega$ 时

$$\begin{aligned} P_T = P_V - P_{om} &= \frac{2}{\pi} \frac{U_{om} V_{CC}}{R_L} - 5.63 \\ &= \frac{2}{\pi} \times \frac{15 \times 18}{20} - 5.63 \\ &\approx 2.97 \text{ W} \end{aligned}$$

当 $R_L = R_{Lopt} = 16.4\Omega$ 时

$$\begin{aligned} P_T = P_V - P_{om} &= \frac{2}{\pi} \frac{U_{om} V_{CC}}{R_L} - 5.63 \\ &= \frac{2}{\pi} \times \frac{15 \times 18}{16.4} - 6.86 \approx 3.63 \text{ W} \end{aligned}$$

因此，选择每只管子的功耗

$$P_{T1} = P_{T2} > \frac{6.3}{2} = 3.15\text{W}$$

又由于在3种负载中出现的最大输出电压、电流为

$$U_{om} = 15\text{V}$$

$$I_{om} = 0.915\text{A}$$

因此选择每管的 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 应满足

$$I_{CM} > I_{om} = 0.915\text{A}$$

$$|U_{(BR)CEO}| > 2U_{CC} = 2 \times 18 = 36\text{V}$$