



第三章 功率放大器

3.1 概述

3.2 甲类、乙类功率放大器

3.3 丙类谐振功率放大器

3.4 丁类和戊类谐振功率放大器

3.5 功放馈电电路和匹配网络

3.1 概述



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

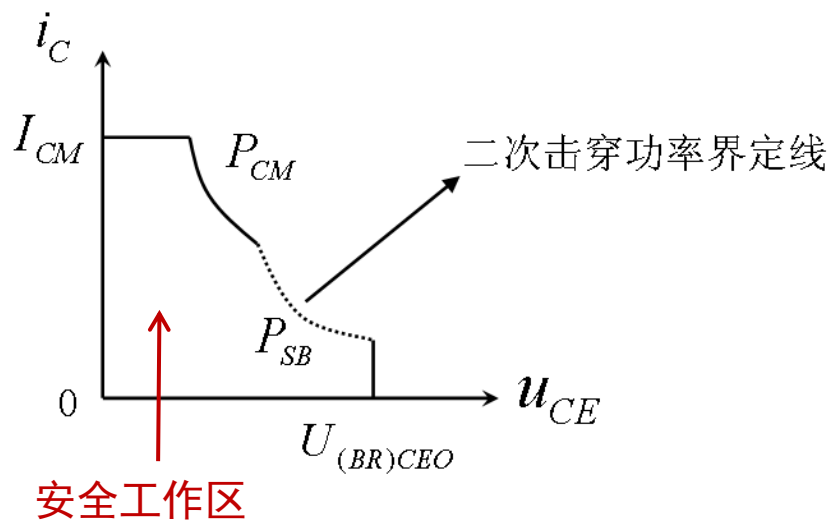
功率放大器：把直流电源提供的直流能量安全、高效、低失真地转换成信号功率的电子电路。

特点：放大管处于大信号运行状态，甚至经常接近极限状态。

用途：通信、音像等电子设备。

一、功率放大器的性能要求

① **安全。**输出功率大，管子在极限条件下运用。



除满足3个极限参数 I_{CM} , $U_{(BR)CEO}$, P_{CM} 外，还要防止发生二次击穿。

3.1 概述



② 高效率

η_c —— 集电极效率 (Collector Efficiency)

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{P_o}{P_o + P_c}$$

P_o —— 输出信号功率；

P_{DC} —— 电源提供的功率；

P_c —— 管耗 (Power Dissipation) / 集电极耗散功率；

η_c 越高, $P_o = \eta_c P_{DC}$ 越高, 意味着节约能源, 供电电路可以做得小些。提高 η_c 的历史就是功率放大器的发展史。

③ 低失真

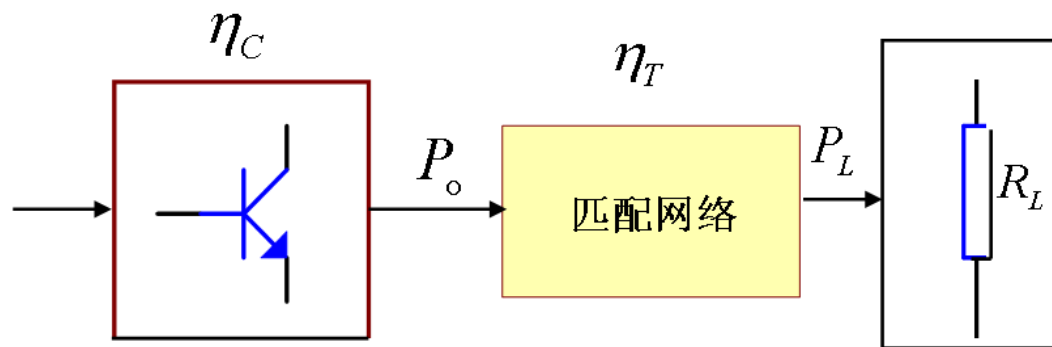
非线性失真系数: $\gamma = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{P_{on}}{P_{o1}} \left\{ \begin{array}{l} P_{on} \text{—} n \text{次谐波功率} \\ P_{o1} \text{—} \text{基波功率} \end{array} \right.$

3.1 概述



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

二、功率放大器的分类



功率放大器的组成

主要指标：输出功率和效率

功放管：功率放大

匹配网络：把功放管输出的交流功率有效地传输给负载，实现阻抗匹配，将 R_L 转换成功率放大器所需的最佳负载。

对于小信号线性网络，最大匹配条件是： $R_L = R_s$

3.1 概述



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

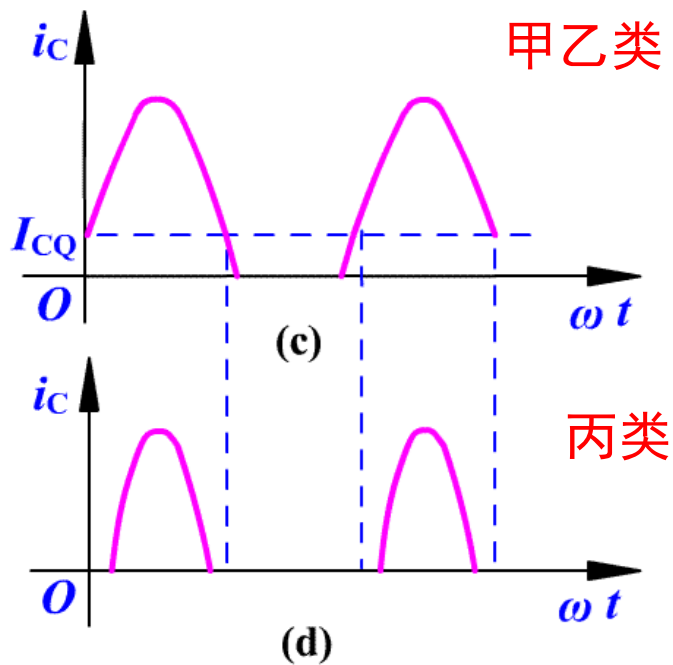
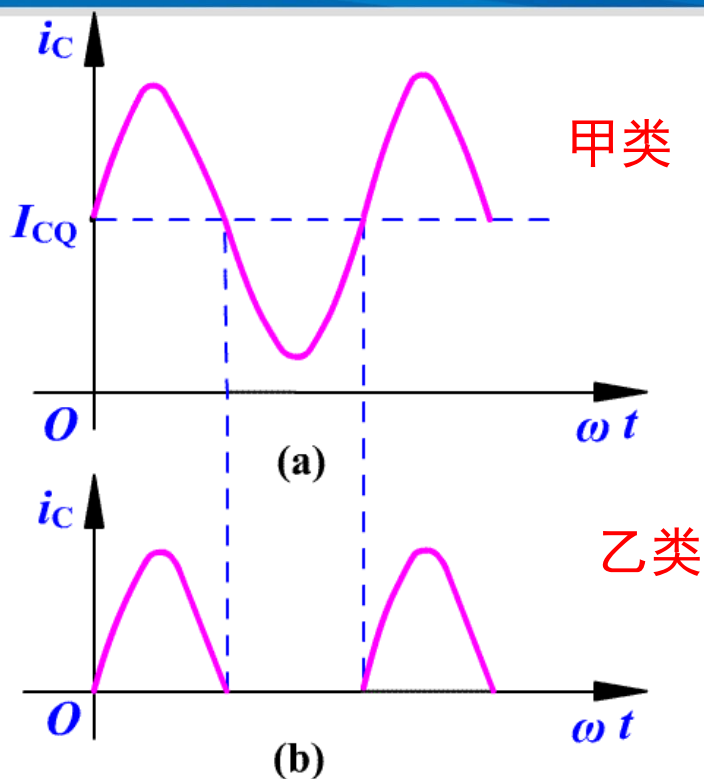
1) 按功放管导通时间分类

根据**功放管**在一个信号周期内导通时间不同，可分为**甲类、乙类、甲乙类、丙类**等多种。

θ —导通角

甲类： $\theta = 180^0$	}	音频（低频）
乙类： $\theta = 90^0$		
甲乙类： $90^0 < \theta < 180^0$		
丙类： $\theta < 90^0$		射频（高频）
丁类，戊类： 电子器件工作于开关状态		

3.1 概述



$$P_C = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\theta} i_C(\omega t) u_{CE}(\omega t) d\omega t \quad \eta_c \text{ 随导通角 } \theta \text{ 的减小而单调增加。}$$

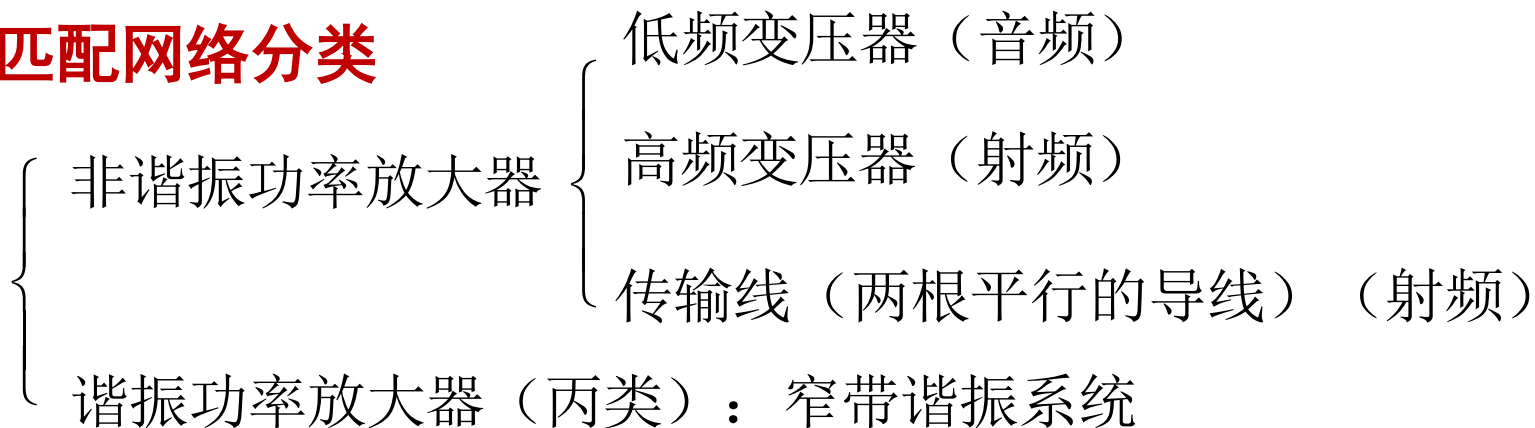
为提高 η_c ，功放电路可工作于乙类、丙类或丁类。但集电极电流波形失真严重，电路需采取特定措施。

3.1 概述



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2) 按匹配网络分类



3) 按工作频率分类：高频功放和低频功放

共同点：要求输出功率大、效率高；

不同点：工作频率、相对频宽不同，因而负载网路与工作状态也不同。

低频功放：工作频率低，相对频带宽。采用无调谐负载，如电阻，变压器等，可工作于甲类、甲乙类或乙类（限于推挽电路）

高频功放：工作频率高，相对频带窄，一般采用选频网络作为负载网络，工作于丙类。

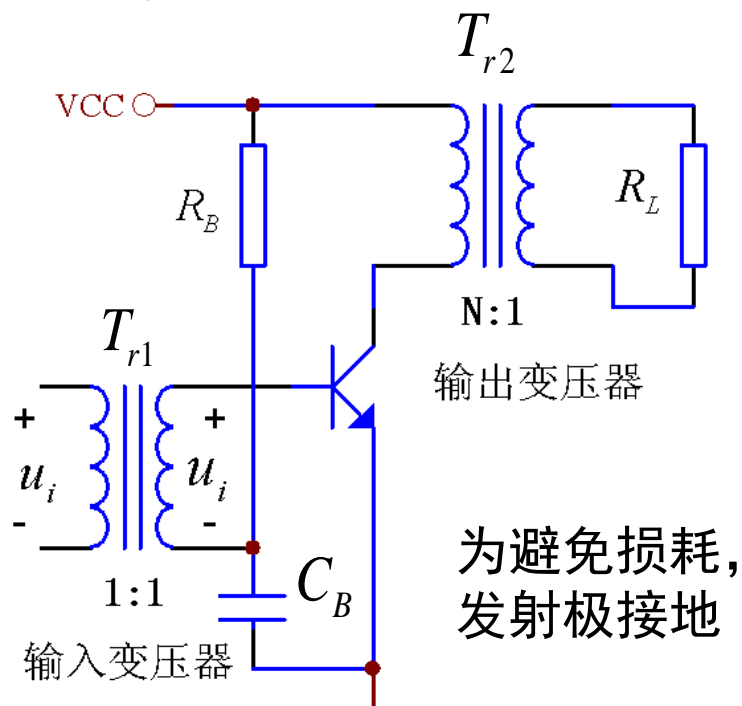
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.1 甲类变压器耦合功率放大器

1. 原理电路



(1) 输入端

R_B —— 偏置电阻;

C_B —— 旁路电容;

T_{r1} —— 输入耦合变压器, 对交流起阻抗变换作用。

(2) 输出端

T_{r2} —— 输出耦合变压器, 对交流起阻抗变换作用;

R_L —— 负载。

电路分析: 静态分析、动态分析、功率性能、管安全等。

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.1 甲类变压器耦合功率放大器

2. 静态分析

① 画直流通路

② 画直流负载线

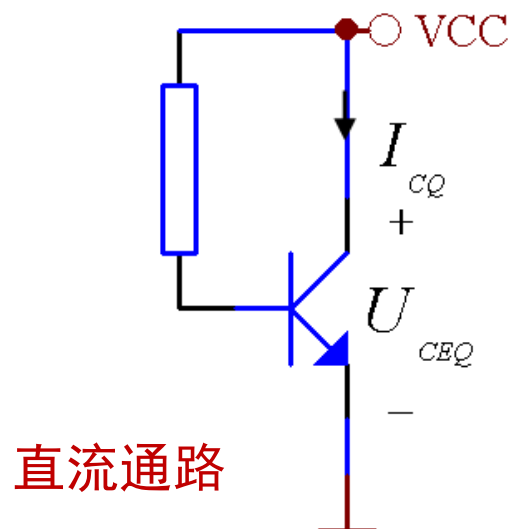
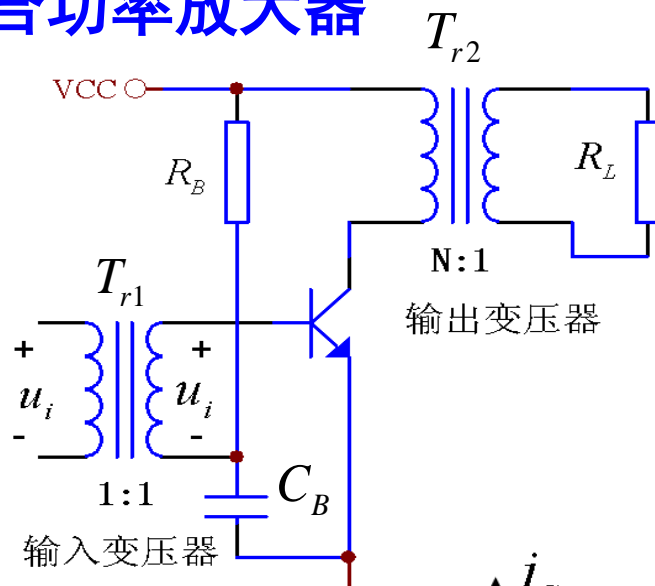
直流负载线方程：

$$u_{CE} = V_{CC}$$

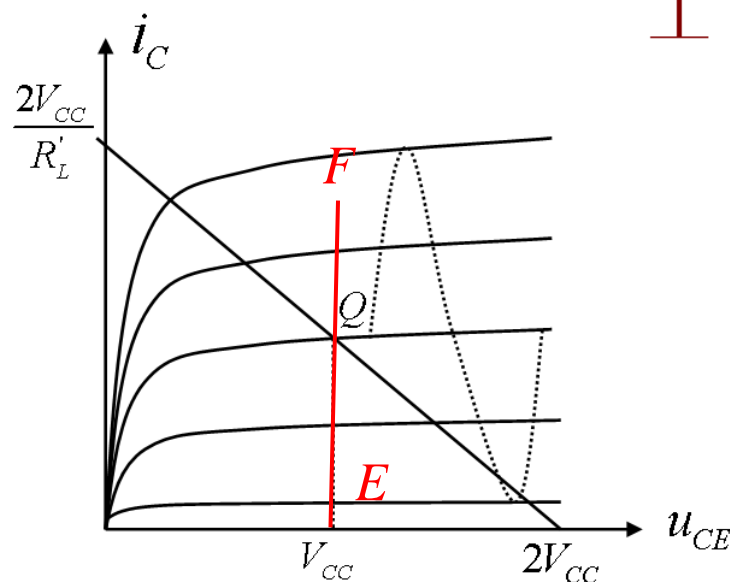
直流负载线： EF

③ 求 Q 点

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



直流通路



3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3. 交流分析

① 画交流通路

② 画交流负载线

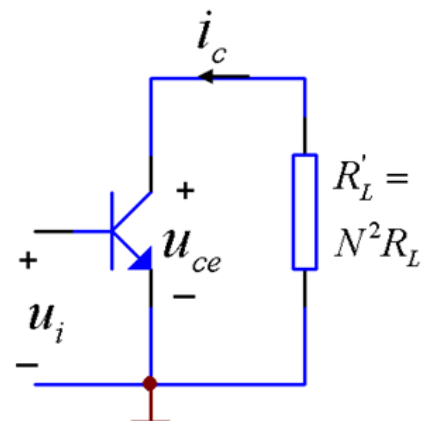
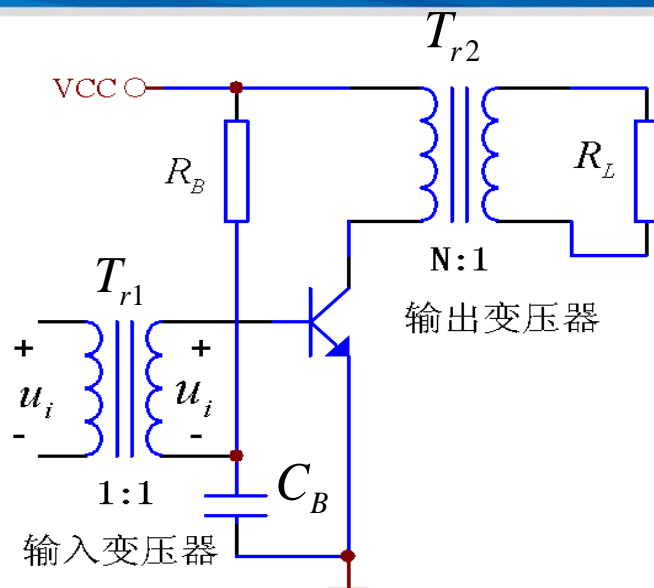
交流负载线方程

$$u_{ce} = -i_c R'_L$$

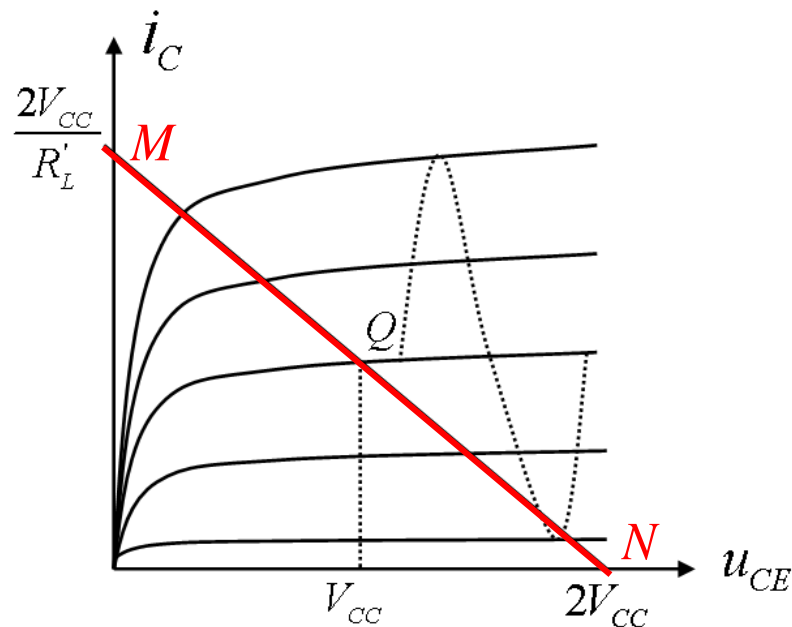
$$u_{CE} = V_{CC} + u_{ce} = V_{CC} - i_c R'_L$$

$$= V_{CC} - (i_c - I_{CQ}) R'_L$$

$$\text{斜率} = -\frac{1}{R'_L}$$



交流等效电路



3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4. 功率性能计算

理想假设：

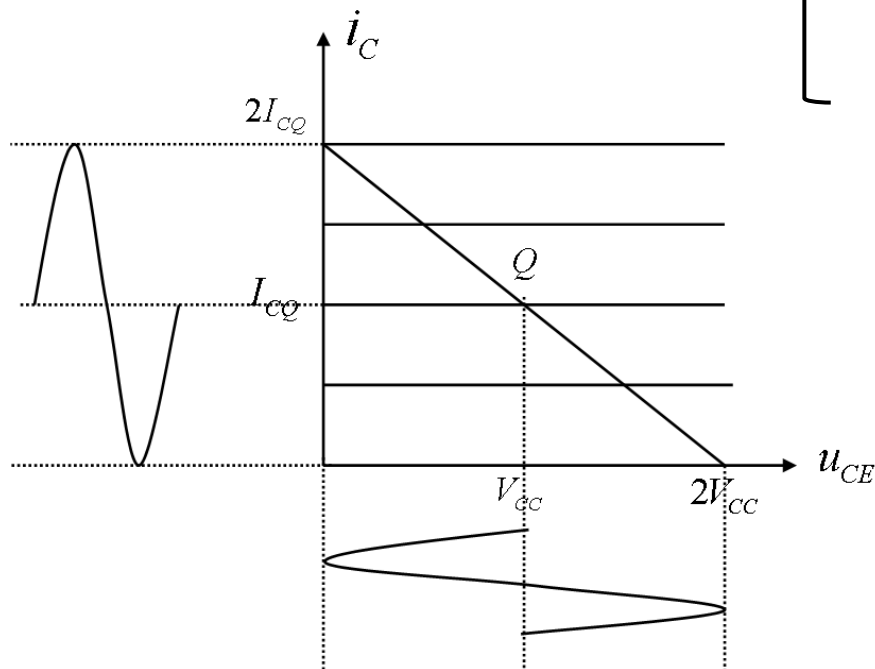
忽略 I_{CEO} 和 U_{CES}

充分激励

R'_L 合适，使Q点正好在负载中心点

$$\text{即 } V_{CC} + I_{CQ} R'_L = 2V_{CC} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R'_L}$$

$$i_{C\max} = I_{CQ} + \frac{V_{CC}}{R'_L} = 2I_{CQ}, \quad i_{C\min} = 0$$



可得到最大不失真
输出电流和输出电压

$$I_{C\max} = I_{CQ}, \quad U_{C\max} = V_{CC}$$

$$i_C = I_{CQ} + I_{CQ} \cos \omega t$$

$$\begin{aligned} u_{CE} &= U_{CEQ} - U_{CEQ} \cos \omega t \\ &= V_{CC} - V_{CC} \cos \omega t \end{aligned}$$

$$P_{DC} = V_{CC} I_{CQ}$$

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4. 功率性能计算

$$\begin{aligned} P_C &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{CE} i_C d\omega t \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_{CC} - V_{CC} \cos \omega t)(I_{CQ} + I_{CQ} \cos \omega t) d\omega t \\ &= I_{CQ} V_{CC} - \frac{1}{2} I_{CQ} V_{CC} = \frac{1}{2} I_{CQ} V_{CC} \\ \therefore \eta &= \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{P_{DC} - P_C}{P_{DC}} = \frac{1}{2} = 50\% \end{aligned}$$

甲类功放最大效率理论值可达50%，但实际能达到35%已属不易。

3.2 甲类、乙类功率放大器

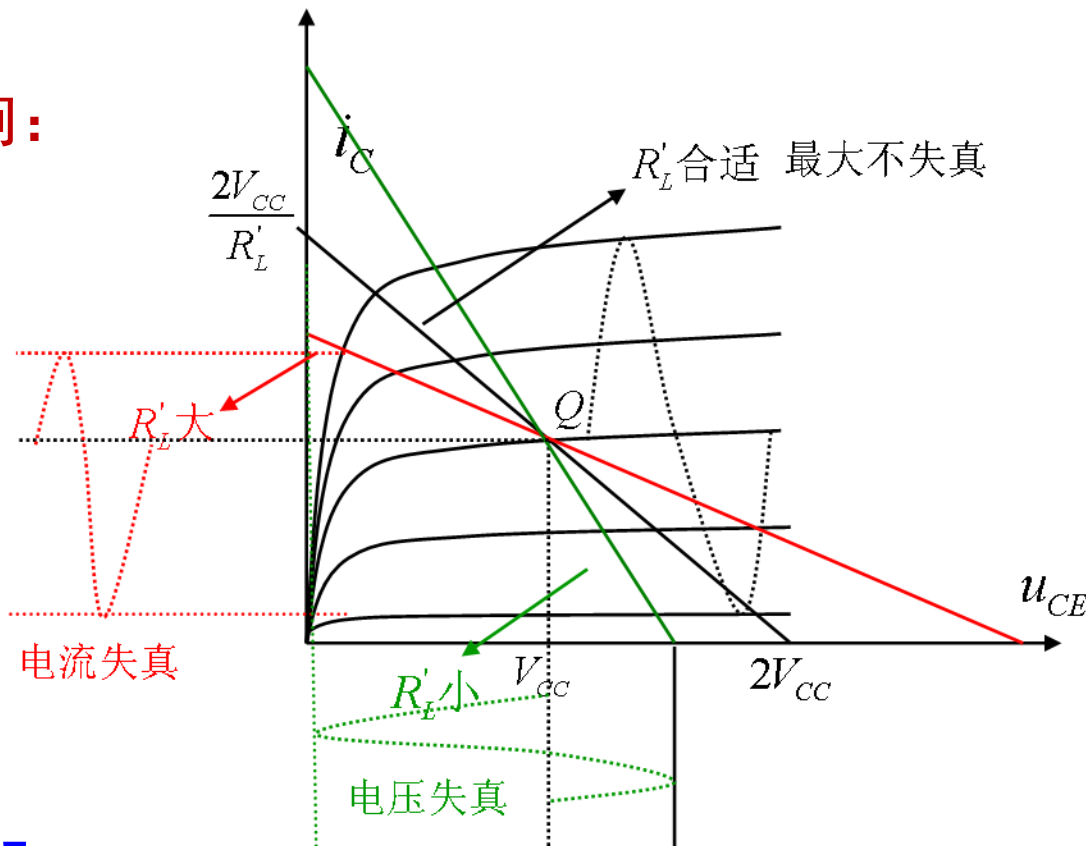


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

负载变化对功放性能的影响：

1) N 太大，使负载太大，得到的不失真电流幅度变小。

2) N 太小，使负载太小，得到的不失真电压幅度变小。



甲类变压器耦合功率放大器

优点：失真小

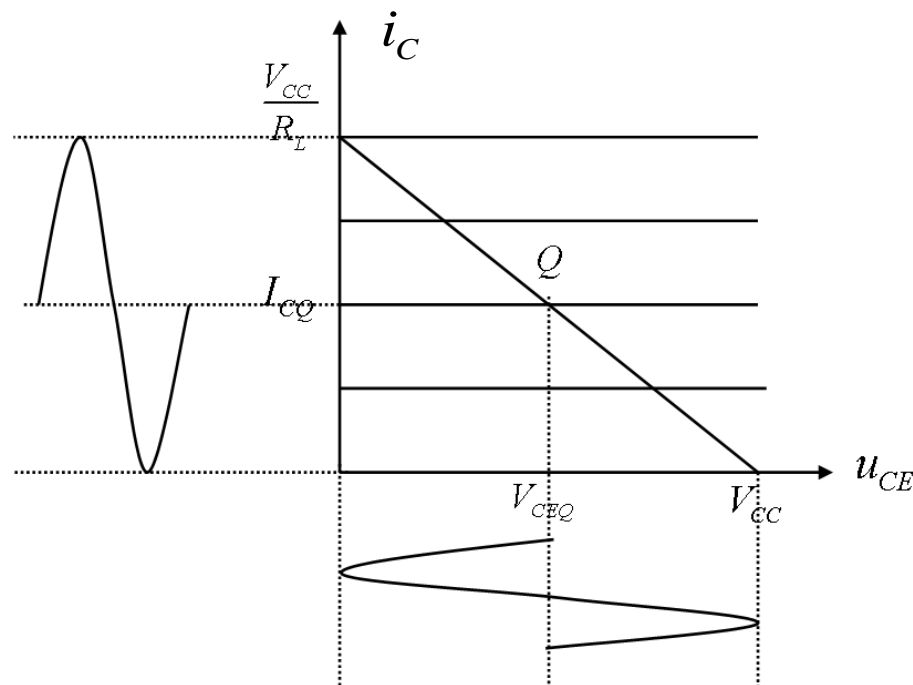
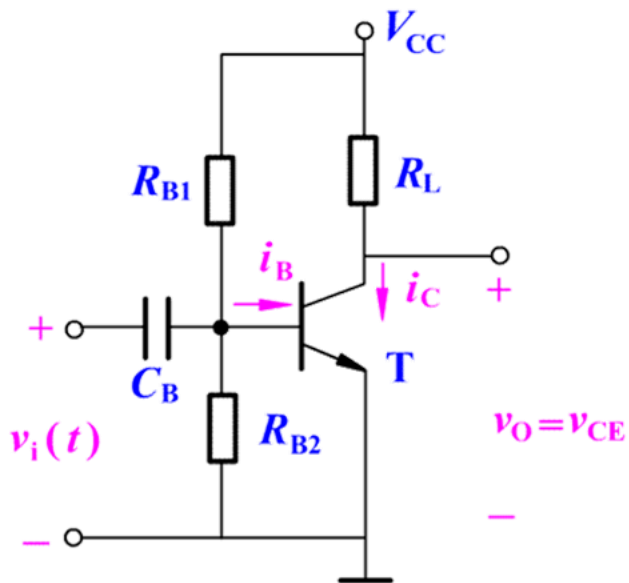
缺点：效率低，要用到输出变压器，低频响应好，高频响应差（受分布电容影响）。

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

集电极直接接负载电路



理想情况下

$$\begin{cases} U_{o\max} = \frac{1}{2}V_{CC} \\ I_{o\max} = I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_L} \end{cases}$$

$$u_{CE} = V_{CC} - (i_c + I_{CQ})R_L = V_{CEQ} - i_c R_L$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{o\max}}{P_{DC}} = \frac{\frac{1}{2}U_{o\max}I_{o\max}}{V_{CC}I_{CQ}} = \frac{1}{4} = 25\%$$

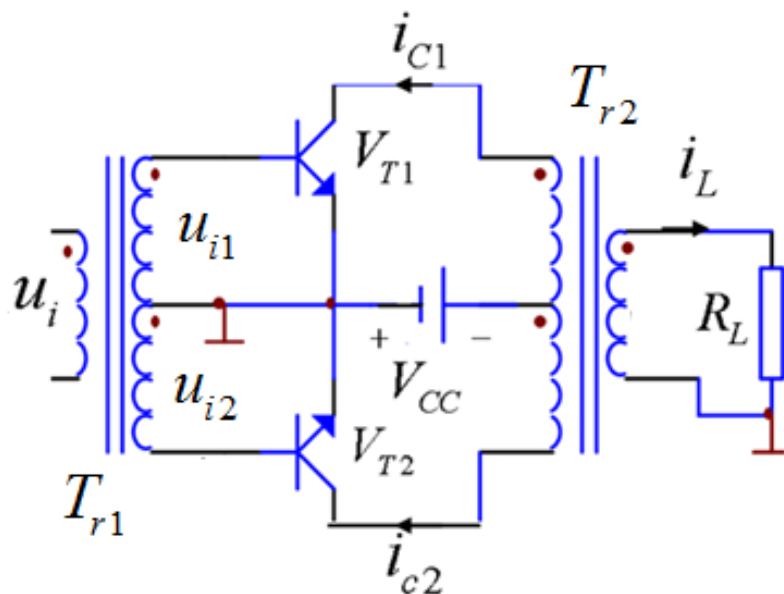
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

一、变压器耦合推挽功放



VT_1 和 VT_2 : 特性配对、相同类型的 NPN 功率管。

Tr_1 : 输入变压器, 将 $u_i(t)$ 分成两个幅值相等, 极性相反的激励电压 $u_{i1} = -u_{i2}$

Tr_2 : 输出变压器, 隔断 i_{C1} 和 i_{C2} 到负载的均值分量, 将 i_{C1} 和 i_{C2} 中的基波分量在 R_L 中叠加, 输出正弦波。

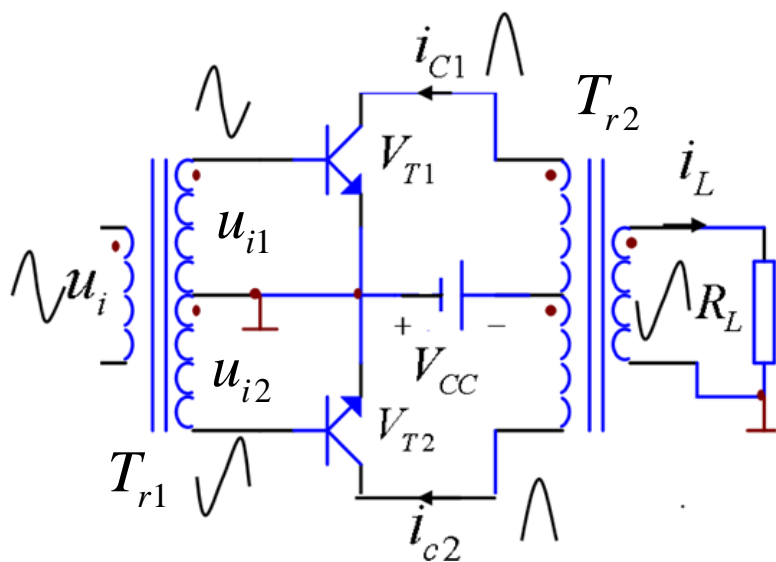
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

工作原理



$u_i(t) > 0$ 时, VT_1 导通(忽略射结压降), VT_2 截止, i_{c1} 从同名端流出, i_L 从同名端流入。

$u_i(t) < 0$ 时, VT_2 导通, VT_1 截止, i_{c2} 从异名端流出, i_L 从异名端流入。

R_L 上得到与输入信号反向的输出信号, 为完整正弦波。

变压器耦合乙类推挽功放缺点: 变压器体积大, 不易集成, 频率响应差, 保真度差, 效率低, 被OTL (Output Transformer less) 电路代替。

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

二、乙类互补推挽功放

电路特点

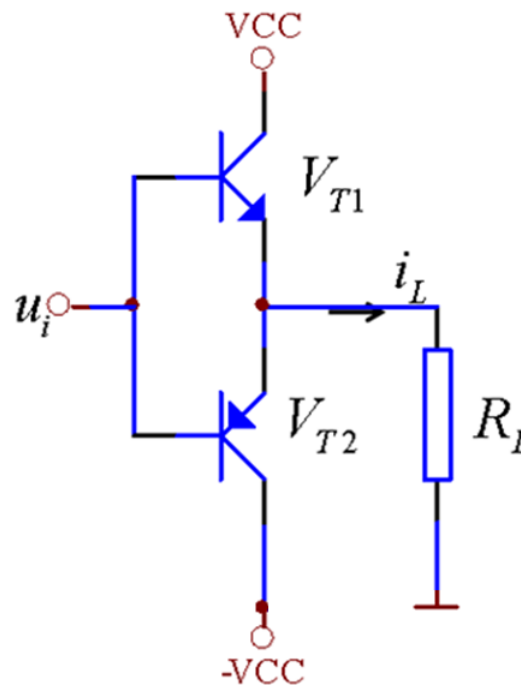
V_{T1} 与 V_{T2} : 功率管互补配对

工作原理

$u_i > 0$ 时, V_{T1} 管(NPN 型) 导通(忽略射结压降), V_{T2} 管 (PNP型) 截止, $i_{C1} (\approx i_{E1})$ 为正弦波的正半周;

$u_i < 0$ 时, V_{T2} 管导通, V_{T1} 管截止, $i_{C2} (\approx i_{E2})$ 为处于正弦波的负半周。

通过 R_L 的电流 $i_L = i_{E1} - i_{E2}$, 合成完整的正弦波。



OTL (Output Transformer less)

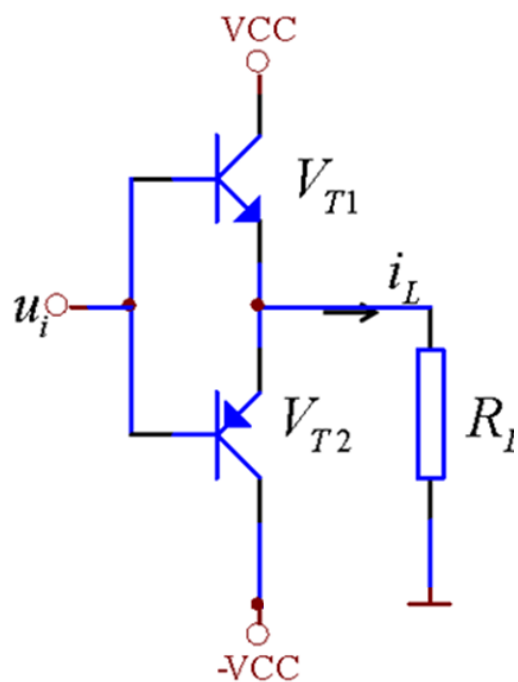
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

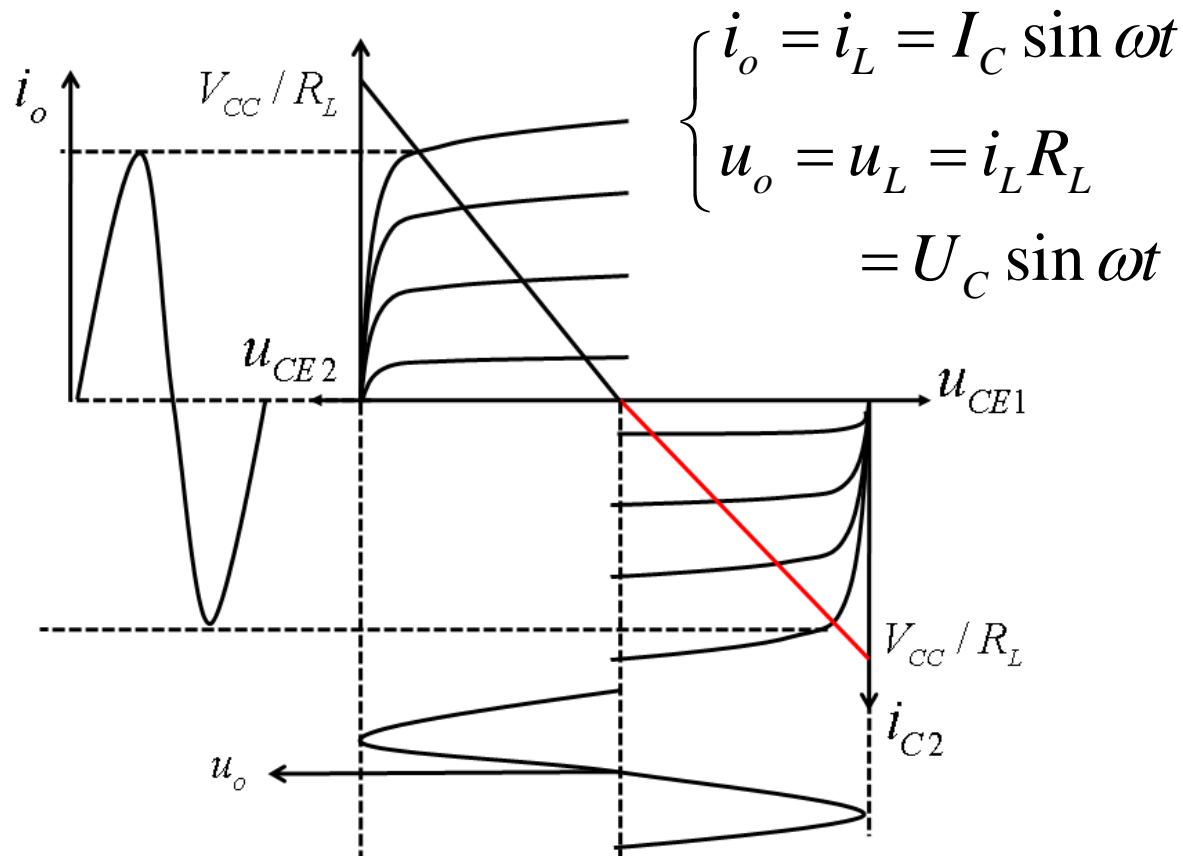
乙类推挽功放电路 的性能分析

静态：两个功放管
截止，电流为0



正半周： $u_{CE1} = V_{CC} - i_{C1}R_L = V_{CC} - I_C \sin \omega t \cdot R_L$

负半周： $u_{CE2} = -V_{CC} + i_{C2}R_L = -V_{CC} + I_C \sin \omega t \cdot R_L$



3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

性能指标计算

$$\begin{cases} i_o = I_C \sin \omega t \\ u_o = U_C \sin \omega t \end{cases}$$

$$P_o = \frac{1}{2} U_C I_C = P_L$$

$$\begin{aligned} P_{DC1} &= V_{CC} I_{C0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} i_C d\omega t \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{CC} I_C \sin \omega t d\omega t = -\frac{V_{CC} I_C}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = \frac{I_C}{\pi} V_{CC} \end{aligned}$$

$$\therefore P_{DC} = 2P_{DC1} = \frac{2I_C}{\pi} V_{CC}$$

$$\eta_C = \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{\frac{1}{2} U_C I_C}{\frac{2I_C}{\pi} V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \frac{U_C}{V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \xi$$

ξ - 电源电压利用系数

忽略 U_{CES} 时, $\eta_{C\max} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

从原理电路到实用电路，还需解决如下问题：

- ① 交越失真 —— 加偏置电路；
- ② 双电源 —— 单电源供电；
- ③ 互补管难配 —— 准互补推挽电路；
- ④ 安全 —— 过载保护；
- ⑤ 充分激励 —— 输入激励电路。

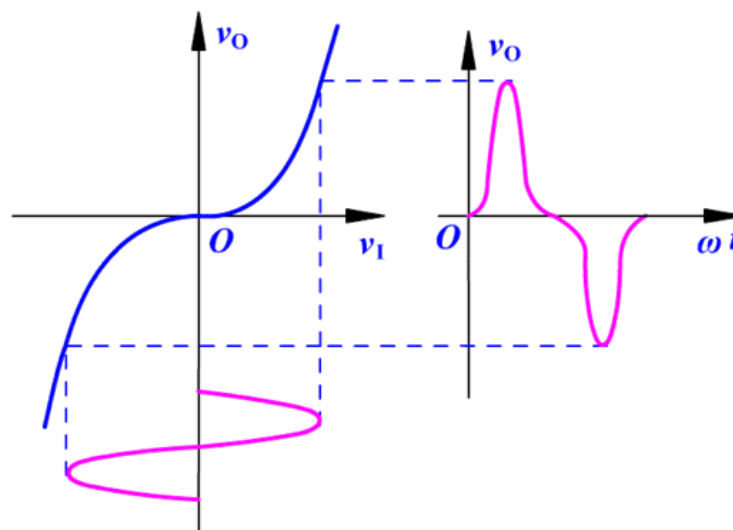
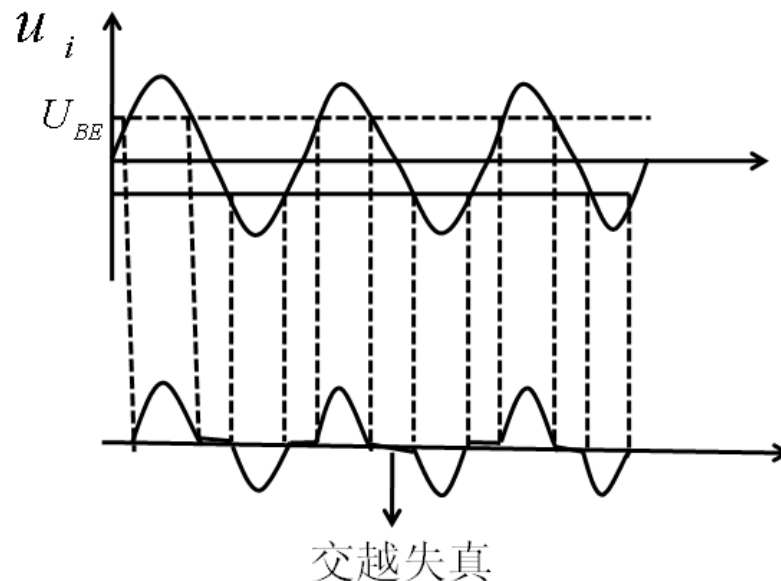
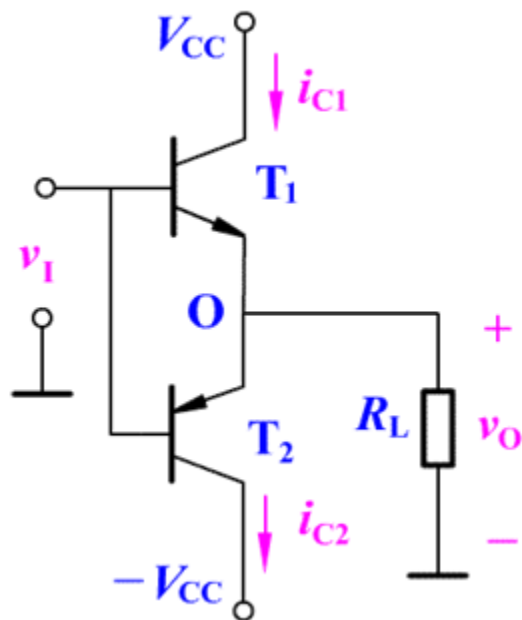
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

1. **交越失真**: 在零偏置条件下, 考虑到导通电压的影响, 输出电压波形在衔接处出现的失真, 称**交越失真**。

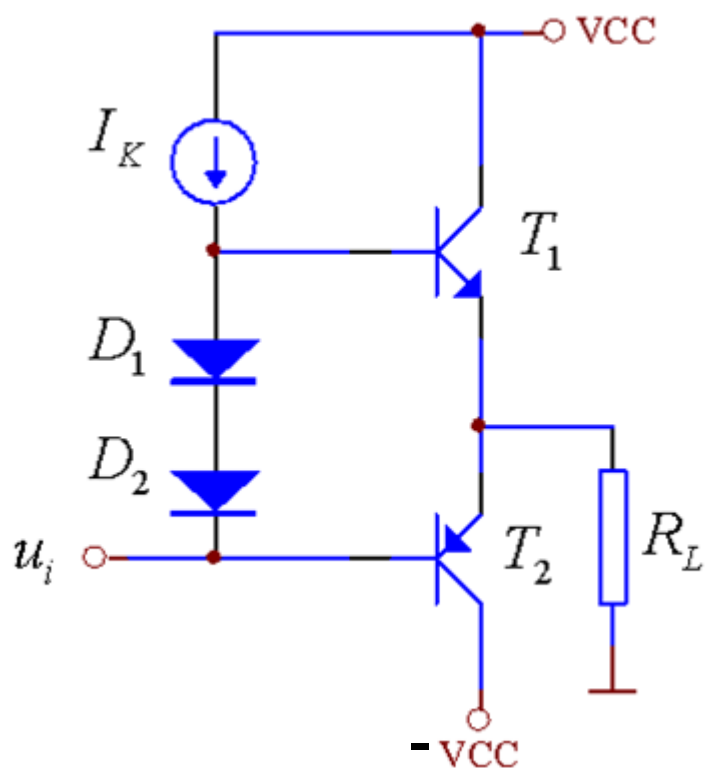


3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

克服交越失真的方法：给功放管以合适的偏置，使其处于微导通状态。



(1) 二极管偏置电路

D_1, D_2 在恒流源作用下导通，其导通电压作为功放管的偏置电压，从交流角度看，二极管导通电阻很小， u_i 加到 T_1 基极。

具有温度补偿作用：

$$T^{\uparrow} \rightarrow \begin{cases} i_C^{\uparrow} \\ U_T^{\downarrow} \rightarrow U_{BE}^{\downarrow} \rightarrow (i_E, i_C)^{\downarrow} \end{cases}$$

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

(2) 偏置倍增电路

R_1 取得较大, 保证 $I_{C3} \gg I_{R1}$, 使 $I_{C3} \approx I_K$ 。

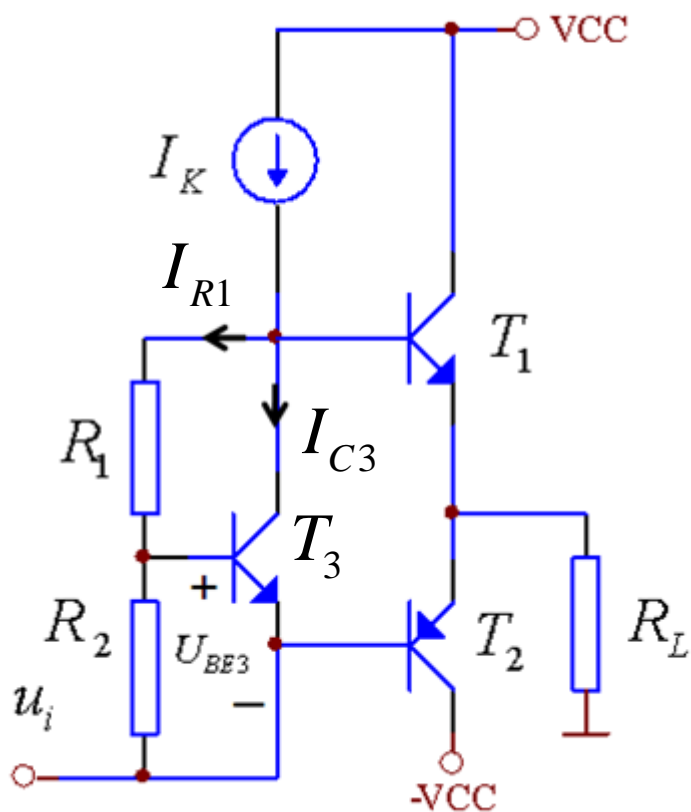
由 T_3 、 R_1 、 R_2 组成, 且由电流源 I_K 激励, 为互补功率管 T_1 、 T_2 提供偏置电压。

$$\therefore U_{BE3} = U_r \ln \frac{I_K}{I_S}$$

$$U_{BE3} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{BE1} + U_{EB2})$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{BE1} + U_{EB2} &= \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_{BE3} \\ &= U_r \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \ln \frac{I_K}{I_S} \end{aligned}$$

可通过调节 $\frac{R_1}{R_2}$ 来得到所需的偏压



3.2 甲类、乙类功率放大器



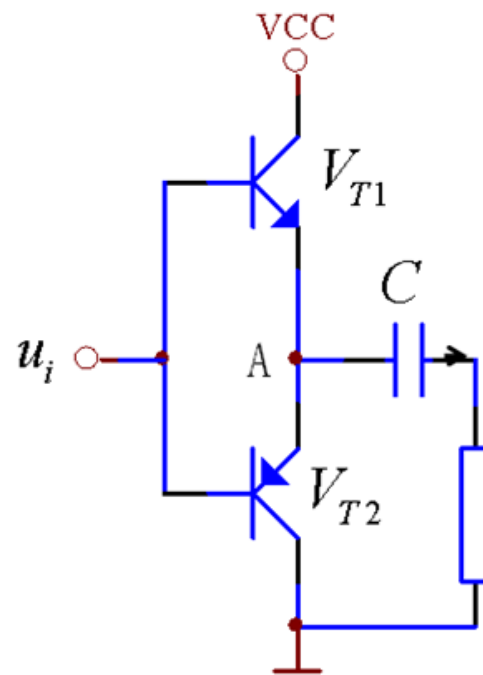
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2、单电源供电的互补推挽电路

① 单电源供电。

② 负载串接大容量隔直电容 C 。 V_{CC} 与两管串接，若两管特性配对，则 $V_A = V_{CC}/2$ ， C 等效为电压等于 $V_{CC}/2$ 的直流电源。

③ u_i 需为交流叠加在 $V_{CC}/2$ 上。



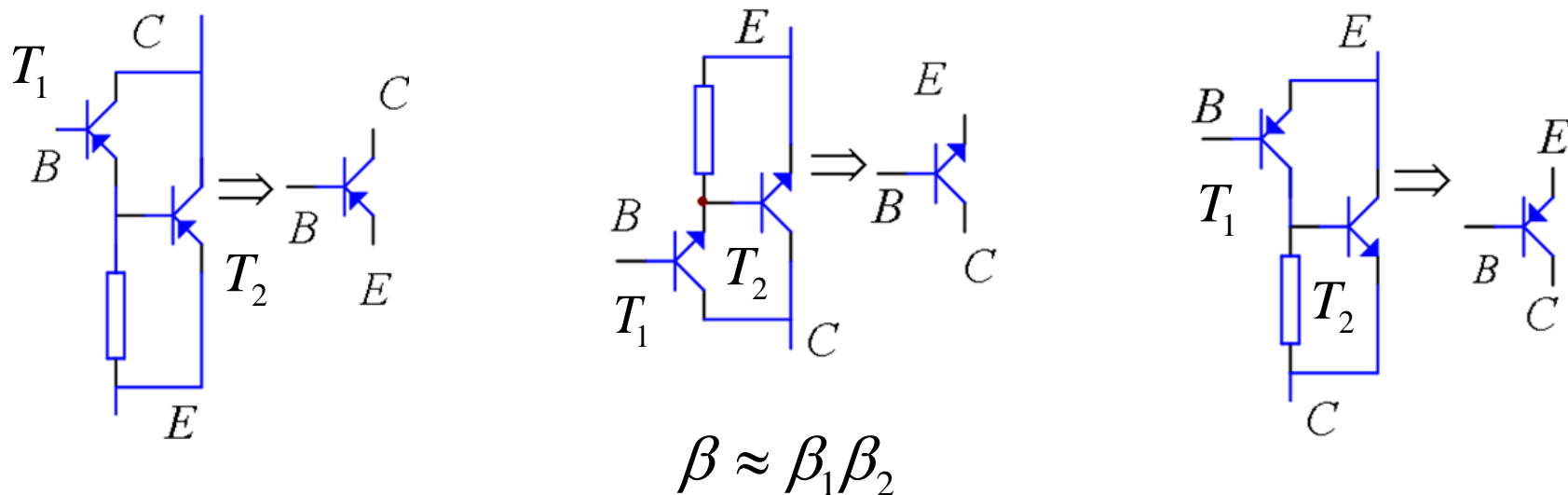
3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.2.2 乙类推挽功率放大器

2. 复合管技术：解决互补推挽电路的异型配对困难问题。



(1) 复合管类型与第一个管子相同；

$$I_{CEO} = I_{CEO2} + \beta_2 I_{CEO1}$$

(2) 电阻R分流 T_1 管的穿透电流 I_{CEO1} ，否则 I_{CEO1} 被 T_2 放大，使得

(3) 一般 T_1 为一对小功率异型管， T_2 为一对同型大功率管，解决异型大功率管配对困难的问题；

3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3. 自举电路（输入激励电路）

(1) 必要性：互补功放，功率管为射随器， $A_v < 1$ 。若要求输出最大信号功率，则要求激励级提供振幅接近电源电压的推动电压（单电源为 $V_{CC}/2$ ）。

(2) 未加自举电容的电路

T_3 ：输入激励级

直流负载为 R (忽略 T_1 和 T_2 基极电流)

$$u_{CE3} = 2V_{CC} - i_{C3}R$$

见图①线

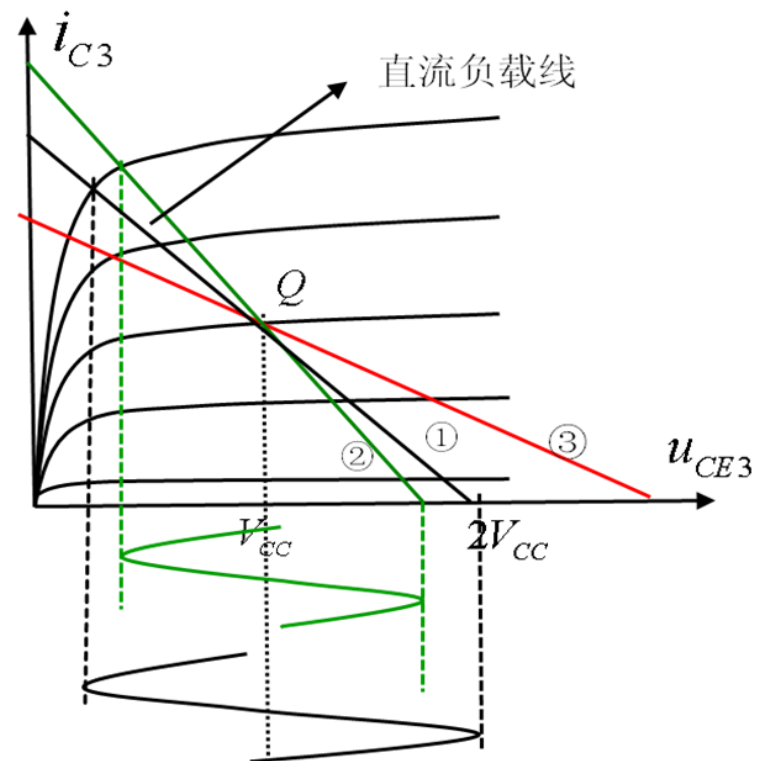
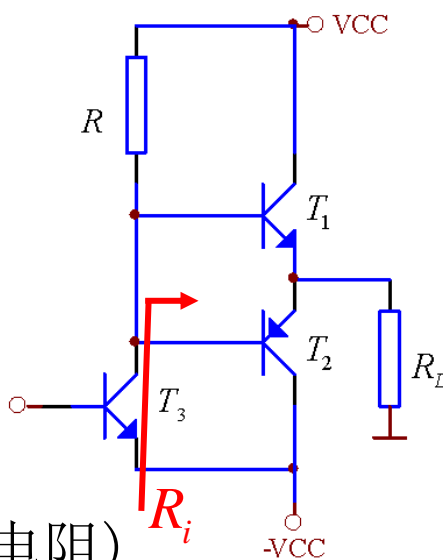
直流负载线斜率： $-1/R$

交流负载线斜率： $-1/R_L'$

见图②线

$$R_L' = R // R_i \text{ (功放管输入电阻)}$$

交流负载线比直流负载线短，对应不失真电压幅度减小。



3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

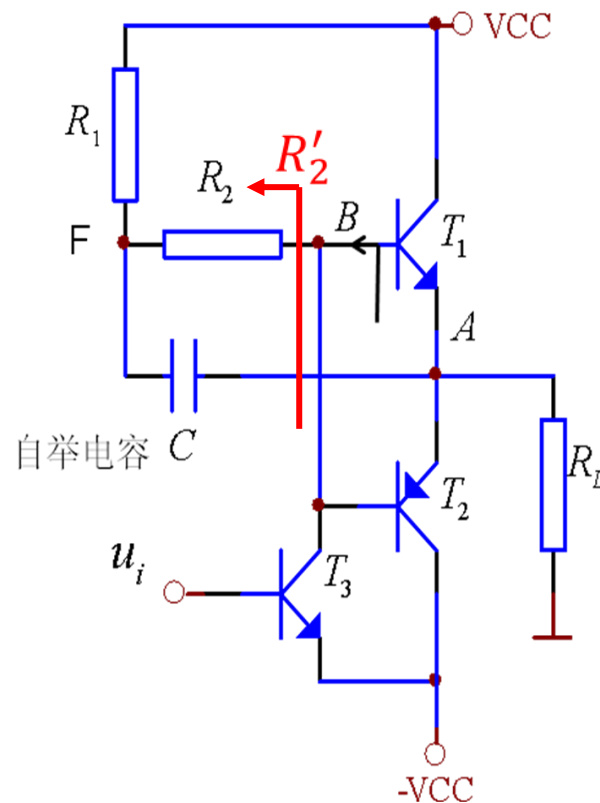
(3) 自举电路

R_1 , R_2 , C , 取代 R 。特点：交流电位由A点经C自举到F点，即 $V_A \approx V_F$ 。

对交流而言，有 $u_A = u_F$, $u_B - u_A$ 很小，即 u_B 接近 u_A 。从B点往 R_2 方向看的等效电阻为

$$i_{R_2} = \frac{(u_B - u_F)}{R_2} = \frac{(u_B - u_A)}{R_2}$$

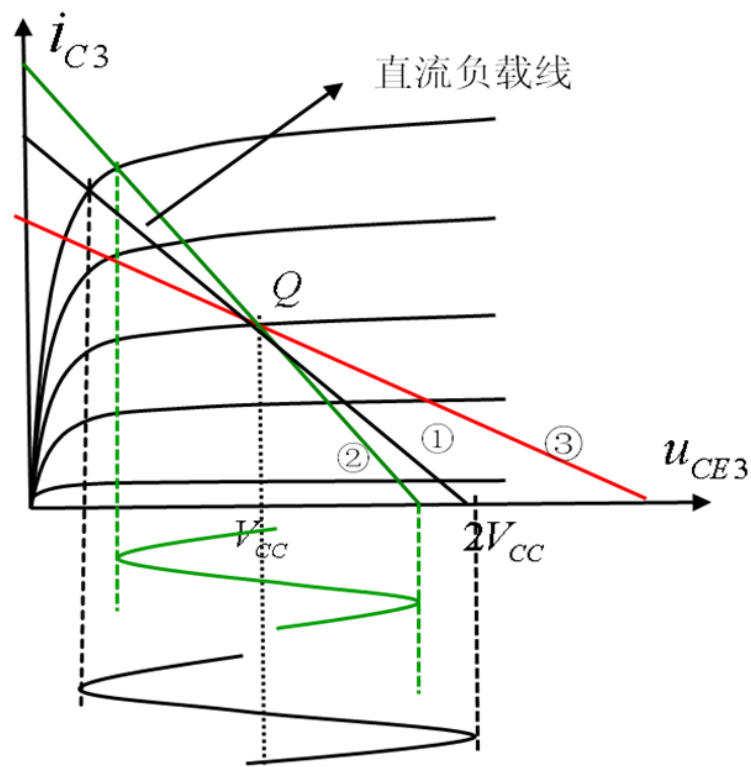
$$R_2' = \frac{u_B}{i_{R_2}} = \frac{R_2}{1 - \frac{u_A}{u_B}} \gg R_2 \Rightarrow R_L' = R_i // R_2' \approx R_i > R$$



3.2 甲类、乙类功率放大器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



加入自举电容后，推动级的交流负载大于直流负载，交流负载线对应为图③线，输出电压不再受截止失真影响，接近 V_{CC} 。

3.2 甲类、乙类功率放大器

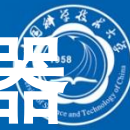


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4. 保护电路

必要性：实际可能发生负载短路、电流迅速增大等**异常现象**，造成功率管损坏。为了**安全**起见，一般大功率功放管电路都加有**过压、过流、过热保护电路**。

措施：尽管这些保护电路的结构因生产厂家的不同而不同，但总的思想是相同的，即当发生上述可能损坏功放管的不正常现象时，降低功放管的激励电流使功放管处于小功率状态。



- 作业：3.1, 3.3, 3.5