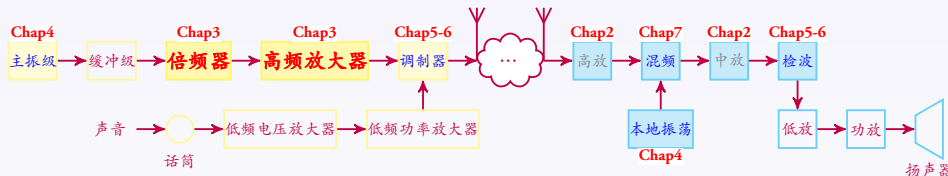


# 课程主要内容

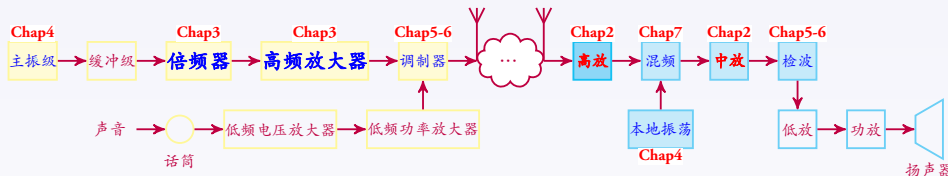


- ① Chap2 谐振回路 高频电路基础
- ② Chap2 小信号调谐放大器 放大选频
- ③ Chap3 调谐功率放大器 **功率效率 谐波抑制度**
- ④ Chap3 倍频器
- ⑤ Chap4 正弦波振荡器
- ⑥ Chap5 振幅调制与解调
- ⑦ Chap6 角度调制与解调
- ⑧ Chap7 变频器
- ⑨ Chap8 锁相环

- ① 电阻、电容、电感等无源线性元件
- ② 二极管、三极管等有源非线性器件
- ③ LC 谐振回路、基本放大电路、振荡器电路等

着重讨论发送设备和接收设备各单元的工作原理和组成，以及构成发送、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型电路和分析方法。

# 高频调谐功率放大器 VS. 小信号调谐放大器



## 高频调谐功率放大器

输入信号电压

几百毫伏到几伏

晶体管工作

延伸到非线性区域（截止和饱和区）；丙类状态；发射机高放

功率和效率

输出功率大，以满足天线发射和其他负载的要求

主要指标要求

输出功率、效率和谐波抑制制度等

## 小信号调谐放大器

微伏至毫伏

线性范围（放大区）；甲类状态；接收机高放、中放

功率较小，但通过匹配阻抗可以获得很大的功率增益；效率较低有足够的增益，满足通频带和选择性要求，工作稳定等

# 高频调谐功率放大器

郑海永

选课号：0202004      课程号：071502101211

上课时间地点：周 1/34 节/7108 周 4/12 节/7108

中国海洋大学 电子工程系

2012 年 10 月



# 本章主要内容

- ① 调谐功率放大器的用途与特点
- ② 调谐功率放大器的工作原理
- ③ 功率和效率
- ④ 调谐功率放大器的工作状态分析
- ⑤ 调谐功率放大器的实用电路
- ⑥ 功率晶体管的高频效应
- ⑦ 倍频器

# 目录

- 1 功率和效率
  - 功率
  - 效率

# 内容提要

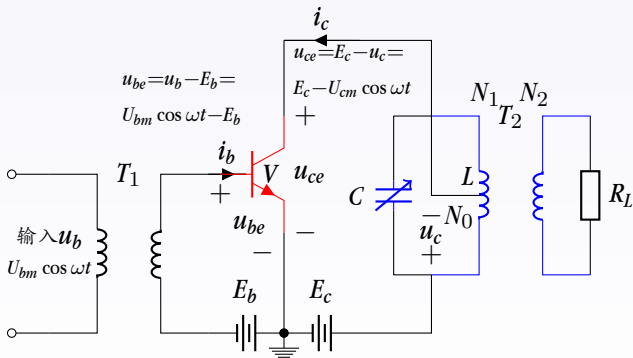
- 1 功率和效率
  - 功率
  - 效率

# 内容提要

- 1 功率和效率
  - 功率
  - 效率

# 能量转换

- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率





# 能量转换

- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率

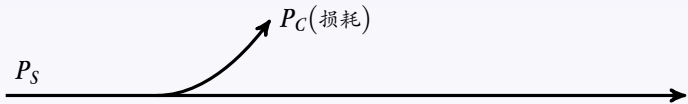
$P_S$



- 1 电源供给的直流功率  $P_{Source}$ 。
- 2 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_{Consumption}$ 。
- 3 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出交流功率  $P_{Output}$ 。
- 4 槽路损耗功率  $P_{Tank\ circuit}$ 。
- 5 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_{Load}$ 。

# 能量转换

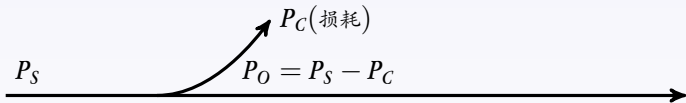
- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- 1 电源供给的直流功率  $P_{Source}$ 。
- 2 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_{Consumption}$ 。
- 3 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出交流功率  $P_{Output}$ 。
- 4 槽路损耗功率  $P_{Tank\ circuit}$ 。
- 5 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_{Load}$ 。

# 能量转换

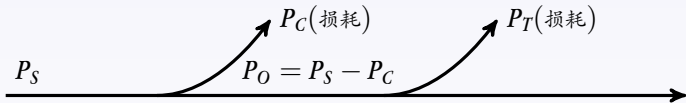
- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- 1 电源供给的直流功率  $P_{Source}$ 。
- 2 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_{Consumption}$ 。
- 3 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出交流功率  $P_{Output}$ 。
- 4 槽路损耗功率  $P_{Tank\ circuit}$ 。
- 5 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_{Load}$ 。

# 能量转换

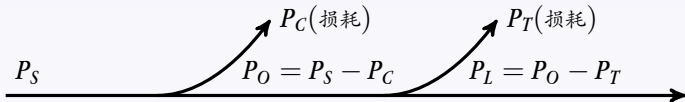
- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- 1 电源供给的直流功率  $P_{Source}$ 。
- 2 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_{Consumption}$ 。
- 3 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出交流功率  $P_{Output}$ 。
- 4 槽路损耗功率  $P_{Tank\ circuit}$ 。
- 5 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_{Load}$ 。

# 能量转换

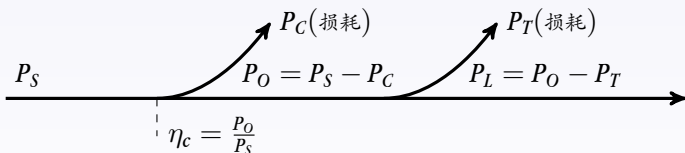
- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- 1 电源供给的直流功率  $P_{Source}$ 。
- 2 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_{Consumption}$ 。
- 3 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出交流功率  $P_{Output}$ 。
- 4 槽路损耗功率  $P_{Tank\ circuit}$ 。
- 5 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_{Load}$ 。

# 能量转换

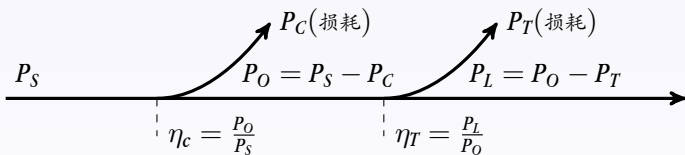
- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- ① 晶体管转换能量的效率（集电极效率） $\eta_c = \frac{P_O}{P_S}$ 。
- ② 槽路将交流功率  $P_O$  传送给负载的效率（槽路效率） $\eta_T = \frac{P_L}{P_O}$ 。

# 能量转换

- 通过**晶体管**把直流功率转换成交流功率
- 通过**槽路**把脉冲功率转换为正弦功率



- ① 晶体管转换能量的效率（集电极效率） $\eta_c = \frac{P_O}{P_S}$ 。
- ② 槽路将交流功率  $P_O$  传送给负载的效率（槽路效率） $\eta_T = \frac{P_L}{P_O}$ 。

# 内容提要

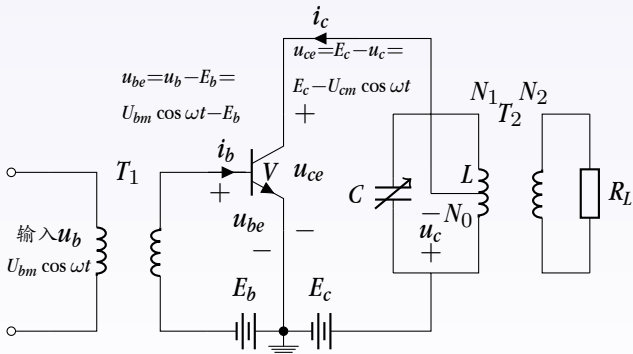
## 1 功率和效率

● 功率

● 效率



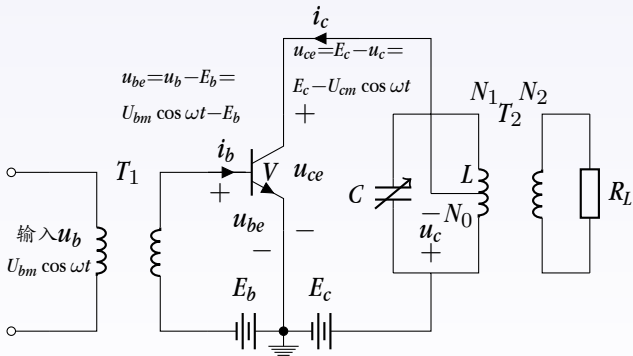
$$\text{功率 } P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$



$$\text{功率 } P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

交流有效值

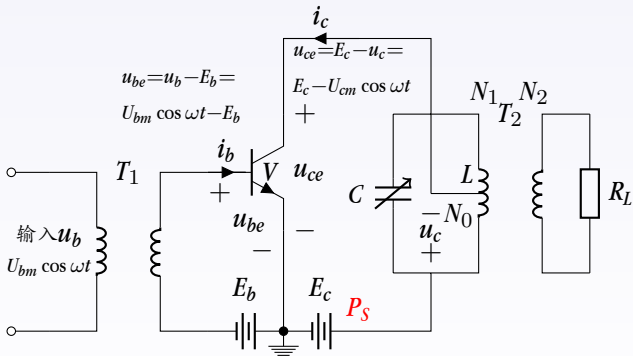
$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$



$$\text{功率 } P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

交流有效值

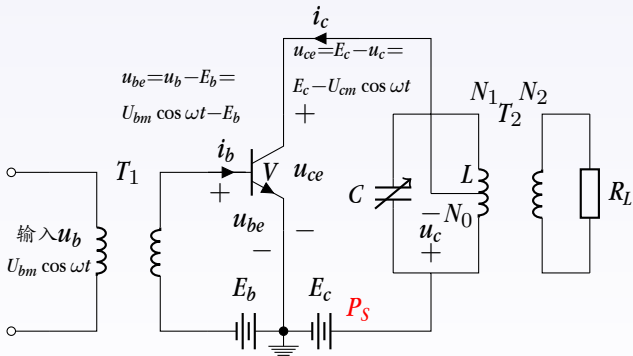
$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$



功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

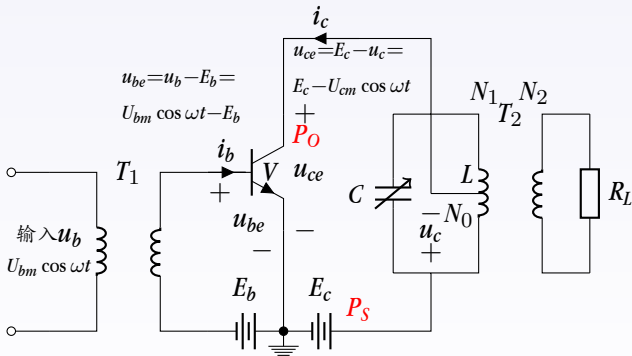
$$\textcircled{1} P_S = E_c I_{c0}$$



功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$\textcircled{1} P_S = E_c I_{c0}$$

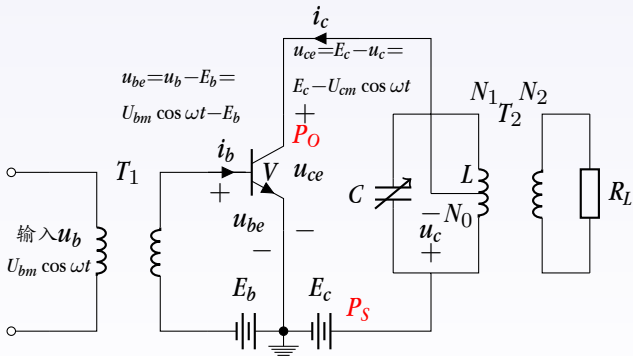


功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$① \quad P_S = E_c I_{c0}$$

$$② \quad P_O = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{cm} \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c1m}$$

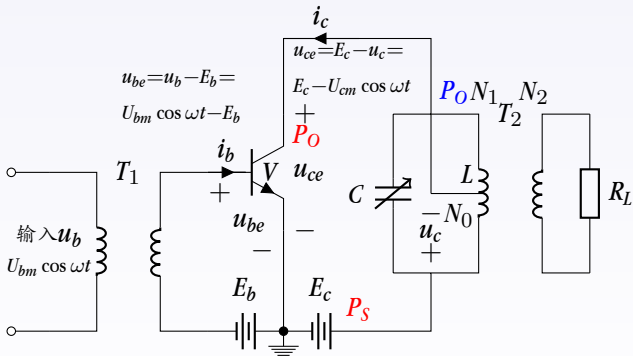


功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

①  $P_S = E_c I_{c0}$

②  $P_O = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{cm} \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c1m}$



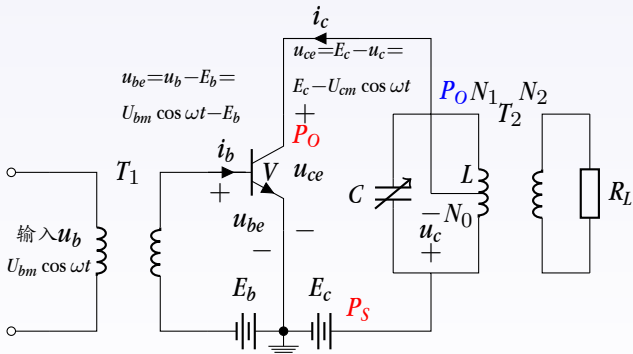
功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$① P_S = E_c I_{c0}$$

$$② P_O = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{cm} \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c1m}$$

$$③ P_O = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{U_m^2}{2Q_L \omega L}$$





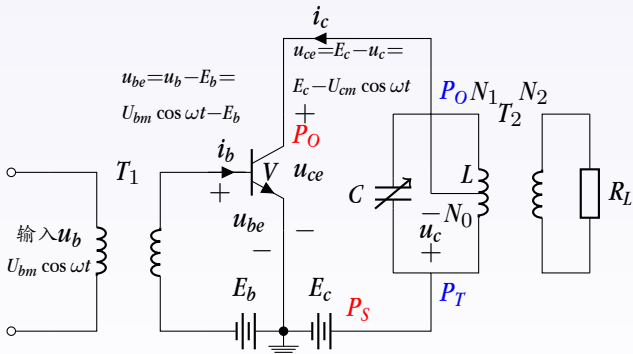
功率  $P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$   
交流有效值

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$① \quad P_S = E_c I_{c0}$$

$$② \quad P_O = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{cm} \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c1m}$$

$$③ \quad P_O = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{U_m^2}{2Q_L \omega L}$$



$$\text{功率 } P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

交流有效值

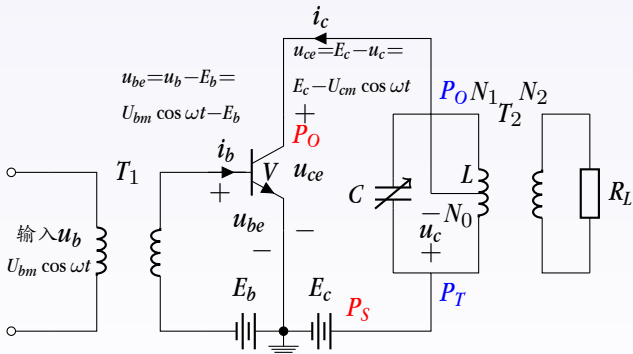
$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{有效值}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

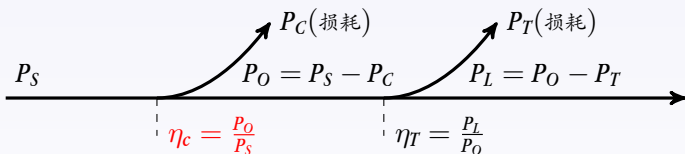
$$① \quad P_S = E_c I_{c0}$$

$$② \quad P_O = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{cm} \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c1m}$$

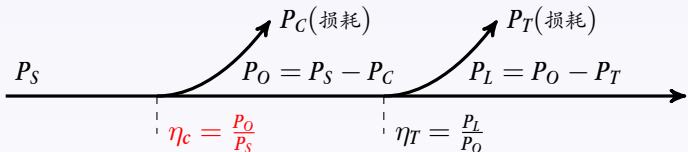
$$③ \quad P_O = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{U_m^2}{2Q_L \omega L}$$

$$④ \quad P_T = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_0} = \frac{U_m^2}{2R_0} = \frac{U_m^2}{2Q_0 \omega L}$$

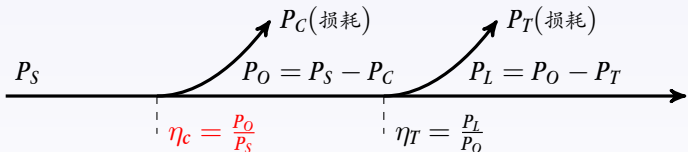


集电极效率  $\eta_c$ 

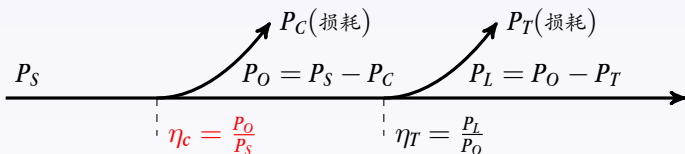
$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1 U_{cm}}{\alpha_0 E_c}$$

集电极效率  $\eta_c$ 

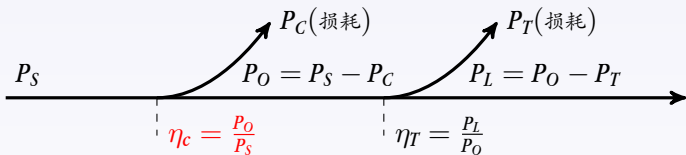
$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1 U_{cm}}{\alpha_0 E_c}$$

集电极效率  $\eta_c$ 

$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$$

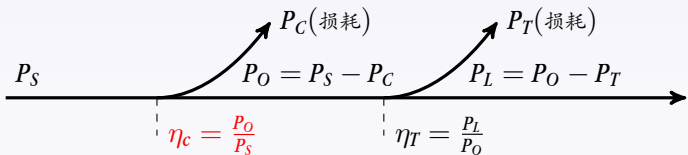
集电极效率  $\eta_c$ 

$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$$

集电极效率  $\eta_c$ 

$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$$

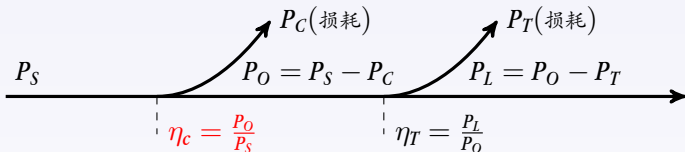
- 集电极电流利用系数  $\frac{\alpha_1}{\alpha_0} \sim \theta$       $\theta = 40^\circ \sim 70^\circ$
- 集电极电压利用系数  $\frac{U_{cm}}{E_c} = \frac{\alpha_1 I_{c \max} R_c}{E_c}$       $u_{ce \min} = E_c - U_{cm}$

集电极效率  $\eta_c$ 

$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$$

- 集电极电流利用系数  $\frac{\alpha_1}{\alpha_0} \sim \theta$       $\theta = 40^\circ \sim 70^\circ$
- 集电极电压利用系数  $\frac{U_{cm}}{E_c} = \frac{\alpha_1 I_{c \max} R_c}{E_c}$       $u_{ce \min} = E_c - U_{cm}$



集电极效率  $\eta_c$ 

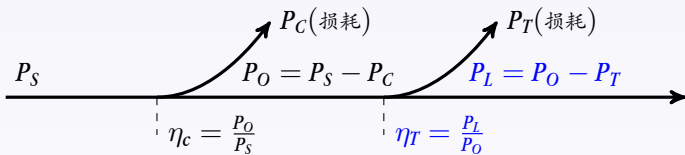
$$\eta_c = \frac{P_O}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{U_{cm} I_{c1m}}{2 E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}}{E_c} \frac{\alpha_1 I_{c \max}}{\alpha_0 I_{c \max}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$$

- 集电极电流利用系数  $\frac{\alpha_1}{\alpha_0} \sim \theta$       $\theta = 40^\circ \sim 70^\circ$
- 集电极电压利用系数  $\frac{U_{cm}}{E_c} = \frac{\alpha_1 I_{c \max} R_c}{E_c}$       $u_{ce \min} = E_c - U_{cm}$

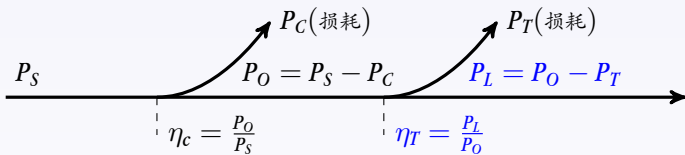
**例** 某放大器电源电压  $E_c = 12V$ ，管子饱和压降为  $1V$ ，则

$U_{cm} = E_c - u_{ce \min} = 12 - 1 = 11V$ ，电压利用系数  $\frac{U_{cm}}{E_c} = \frac{11}{12} = 0.917$ ，则

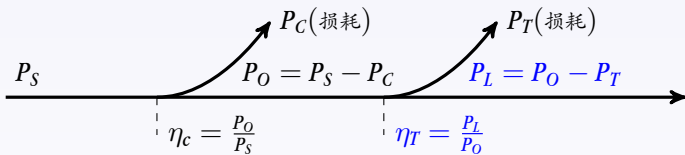
$$\eta_c = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c} = \frac{1}{2} (1.7 \sim 1.9) \times 0.917 = 0.78 \sim 0.87$$

槽路效率  $\eta_T$ 

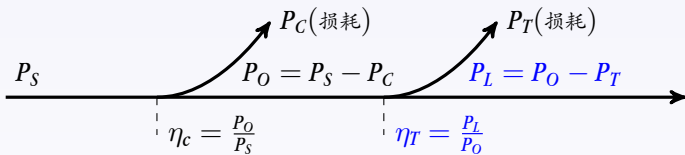
$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

槽路效率  $\eta_T$ 

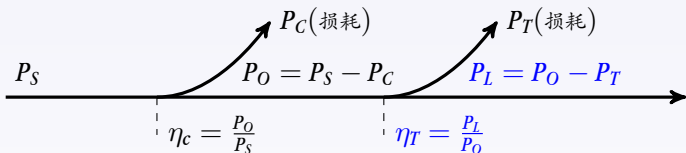
$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

槽路效率  $\eta_T$ 

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

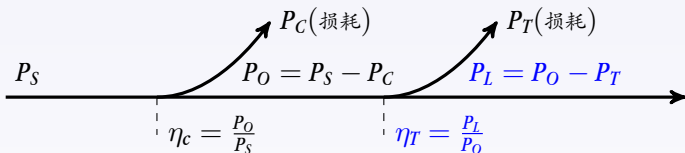
槽路效率  $\eta_T$ 

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

槽路效率  $\eta_T$ 

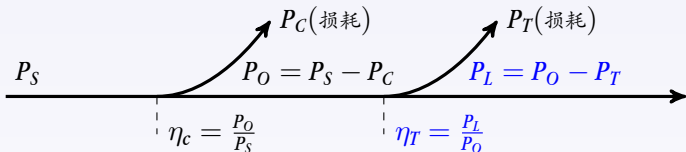
$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

- $Q_0$  愈大,  $Q_L$  愈小, 则  $\eta_T$  愈高。
- 由于受到槽路元件质量的限制,  $Q_0$  不可能很大, 一般几十到几百。
- $Q_L$  也不能太小, 否则槽路滤波效果太差, 输出波形不好, 一般至少  $Q_L = 5 \sim 10$ 。

槽路效率  $\eta_T$ 

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

- $Q_0$  愈大,  $Q_L$  愈小, 则  $\eta_T$  愈高。
- 由于受到槽路元件质量的限制,  $Q_0$  不可能很大, 一般几十到几百。
- $Q_L$  也不能太小, 否则槽路滤波效果太差, 输出波形不好, 一般至少  $Q_L = 5 \sim 10$ 。

槽路效率  $\eta_T$ 

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_O} = \frac{P_O - P_T}{P_O} = \frac{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L} - \frac{U_m^2}{2Q_0\omega L}}{\frac{U_m^2}{2Q_L\omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

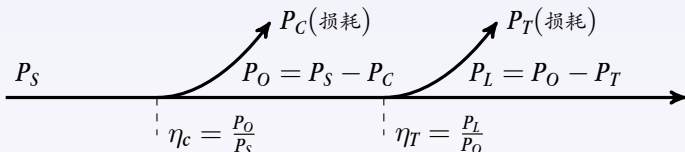
- $Q_0$  愈大,  $Q_L$  愈小, 则  $\eta_T$  愈高。
- 由于受到槽路元件质量的限制,  $Q_0$  不可能很大, 一般几十到几百。
- $Q_L$  也不能太小, 否则槽路滤波效果太差, 输出波形不好, 一般至少  $Q_L = 5 \sim 10$ 。

例

若  $Q_0 = 50$ ,  $Q_L = 10$ , 则

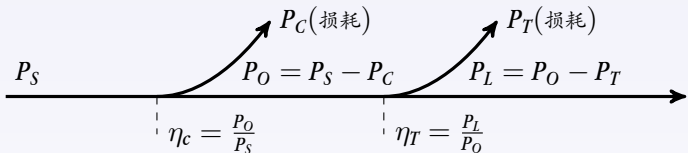
$$\eta_T = \frac{50 - 10}{50} = 0.8$$





若已知  $\eta_c$  和  $\eta_T$ , 则可以根据负载要求的输出功率  $P_L$  计算晶体管损耗

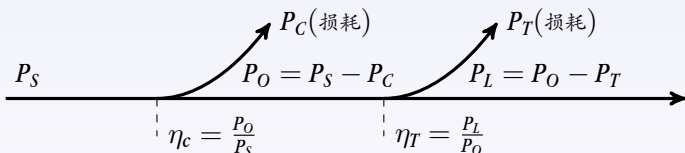
$$\begin{aligned}
 P_C &= P_S - P_O = \frac{P_O}{\eta_c} - P_O = P_O \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = \frac{P_L}{\eta_T} \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) \\
 &= \frac{P_L}{0.8} \left( \frac{1}{0.8} - 1 \right) = 0.31P_L
 \end{aligned}$$



若已知  $\eta_c$  和  $\eta_T$ ，则可以根据负载要求的输出功率  $P_L$  计算晶体管损耗

$$\begin{aligned}
 P_C &= P_S - P_O = \frac{P_O}{\eta_c} - P_O = P_O \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = \frac{P_L}{\eta_T} \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) \\
 &= \frac{P_L}{0.8} \left( \frac{1}{0.8} - 1 \right) = 0.31P_L
 \end{aligned}$$

- 若  $P_L = 1\text{W}$ ，则  $P_C = 0.31\text{W}$ ，所选用晶体管功率容量必须大于此值。
- 可选用集电极最大允许损耗功率（即功率容量） $P_{CM} = 0.5\text{W}$  的管子。

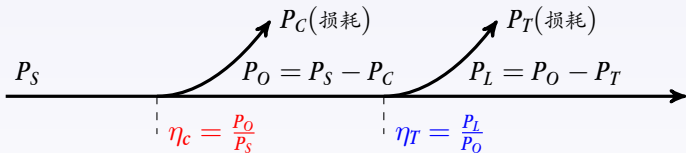


若已知  $\eta_c$  和  $\eta_T$ ，则可以根据负载要求的输出功率  $P_L$  计算晶体管损耗

$$\begin{aligned}
 P_C &= P_S - P_O = \frac{P_O}{\eta_c} - P_O = P_O \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = \frac{P_L}{\eta_T} \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) \\
 &= \frac{P_L}{0.8} \left( \frac{1}{0.8} - 1 \right) = 0.31P_L
 \end{aligned}$$

- 若  $P_L = 1\text{W}$ ，则  $P_C = 0.31\text{W}$ ，所选用晶体管功率容量必须大于此值。
- 可选用集电极最大允许损耗功率（即功率容量） $P_{CM} = 0.5\text{W}$  的管子。

# 功率和效率



为了尽可能利用小功率容量的管子和电源，输出较大的功率，应力求  $\eta_c$  和  $\eta_T$  高，

- $\eta_c = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{U_{cm}}{E_c}$  高，则要适当选取  $\theta$ ，电压利用系数尽可能大。
- $\eta_T = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0} = 1 - \frac{Q_L}{Q_0}$  高，要求槽路空载品质因素  $Q_0$  大，即应选用低损耗的电感和电容元件。

