

# 第3章 高频调谐功率放大器

---

## 3.1 概述

## 3.2 调谐功率放大器的工作原理

## 3.3 功率和效率

## 3.4 调谐功率放大器的工作状态分析

## 3.5 调谐功率放大器的实用电路

## 3.6 功率晶体管的高频效应

## 3.7 倍频器

## 3.8 集成高频功率放大电路及应用简介

## 3.1 概述

---

本章主要内容:

高频功率放大器的工作原理及其主要质量指标。

高频功率放大器是一种能量转换器件，它是将电源供给的直流能量转换为高频交流输出。

## 3.1 概述

---

1. 作用：放大信号，使之达到足够功率输出，以满足天线发射或其他负载的要求；

作为载波发射机及无线电发射机输出级或输出前一级。

2. 主要技术指标：功率、效率；要求输出功率大、效率高

3. 特点：

1. 输入信号强，电压在几百毫伏~几伏数量级附近；

2. 为了提高放大器的工作效率，它通常工作在丙类，即晶体管工作延伸到非线性区域——饱和区、截止区；

4. 分析方法：折线近似分析法

## 5、调谐功率放大器与小信号调谐放大器的异同

相同之处：放大信号均为高频信号，负载均为谐振回路

不同之处：

	调谐功率放大器	小信号调谐放大
激励信号幅度	几百mV-几V，大信号	uV-mV，小信号
放大器工作区域	非线性	线性
放大器工作状态	丙类	甲类
分析方法	折线法	解析法

## 6、低频功率放大器与高频功率放大器的异同

共同之处：都要求输出功率大和效率高。

不同之处：

	低频功率放大器	高频功率放大器
工作频率	20-20000Hz，低	几百kHz-几千MHz，高
相对带宽	高低频相差1000倍，宽	$\frac{2\Delta f}{f_0} < 1\%$ ，窄
负载	电阻；变压器	谐振回路-窄带 (传输线-宽带)
工作状态	甲类；乙类；甲乙类	丙类

# 第3章 高频调谐功率放大器

---

## 3.1 概述

## 3.2 调谐功率放大器的工作原理

## 3.3 功率和效率

## 3.4 调谐功率放大器的工作状态分析

## 3.5 调谐功率放大器的实用电路

## 3.6 功率晶体管的高频效应

## 3.7 倍频器

## 3.8 集成高频功率放大电路及应用简介

## 3.2 调谐功率放大器的工作原理

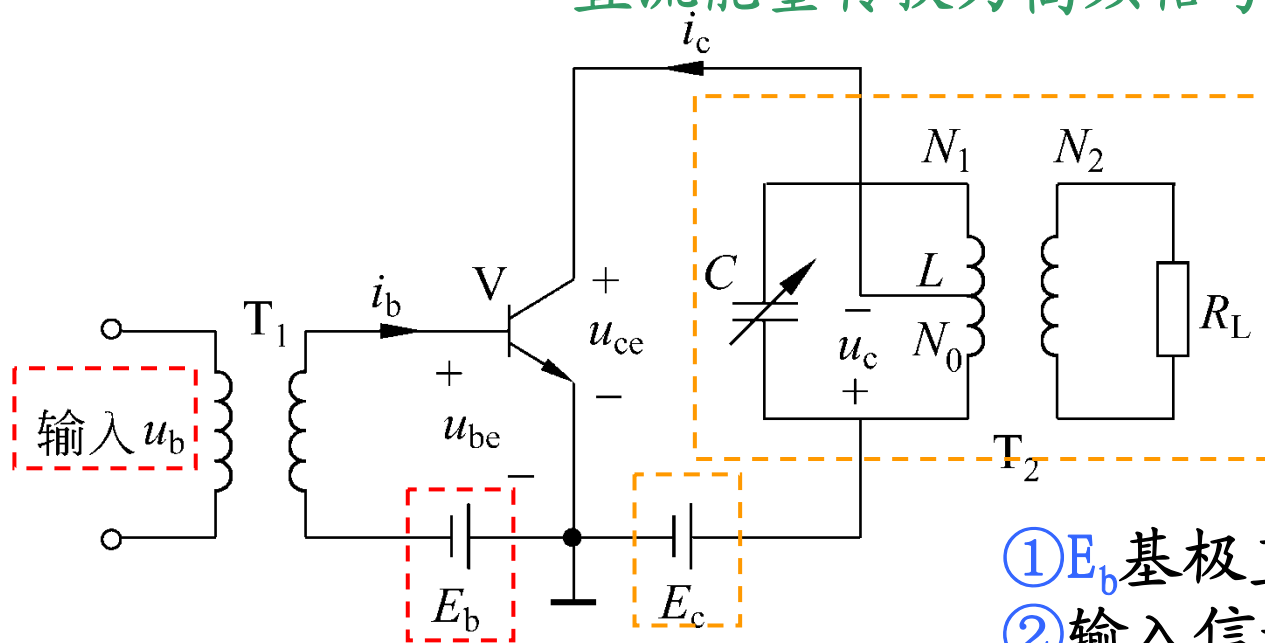
---

- 本章所分析的调谐功率放大器，又称为窄带高频功率放大器，以LC并联回路作为负载。

## 3.2 调谐功率放大器的工作原理

### 3.2.1 原理电路

晶体管在基极输入信号作用下，将 $E_c$ 提供的直流能量转换为高频信号能量。



高频功率放大器  
主要研究集电极  
回路的能量转换  
关系。

基极回路+集电极回路

①  $E_b$  基极直流电源

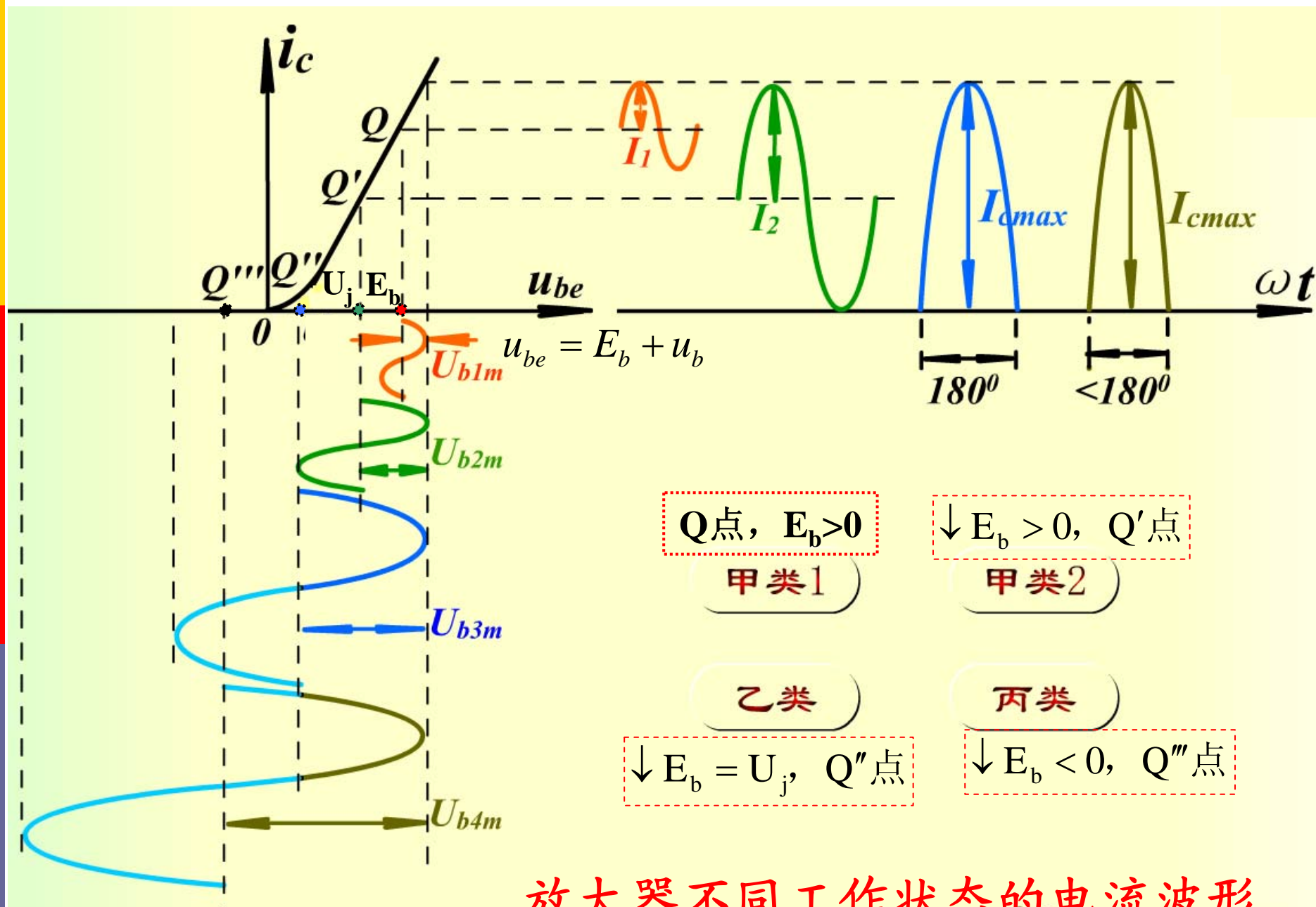
② 输入信号  $u_b$  经变压器  $T_1$  耦合到晶体管基-射极，这个信号也叫激励信号。

$$u_{be} = u_b + (-E_b)$$

③  $E_c$  为集电极直流电源

④ LC 并联谐振回路，作为集电极负载，这个回路也叫槽路。

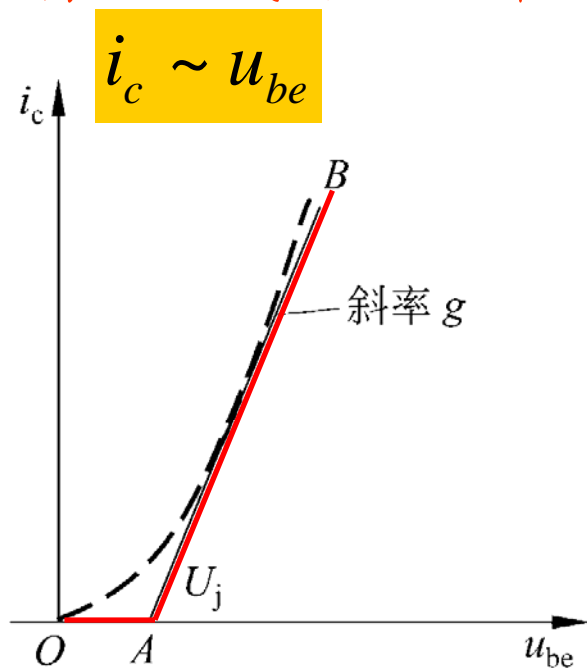




放大器不同工作状态的电流波形

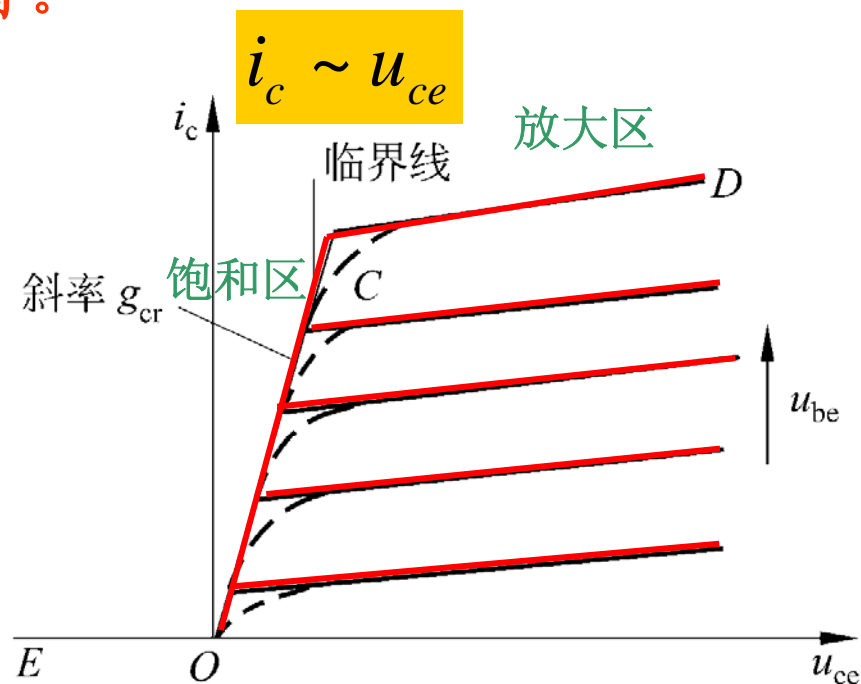
### 3.2.2 晶体管特性的折线化

所谓折线近似分析法，是将电子器件的特性理想化，**每条特性曲线用一组折线来代替。**



(a) 转移特性曲线

$$i_c = g(u_{be} - U_j) \quad (u_{be} > U_j)$$



(b) 输出特性曲线

$$i_c = g_{cr} u_{ce}$$

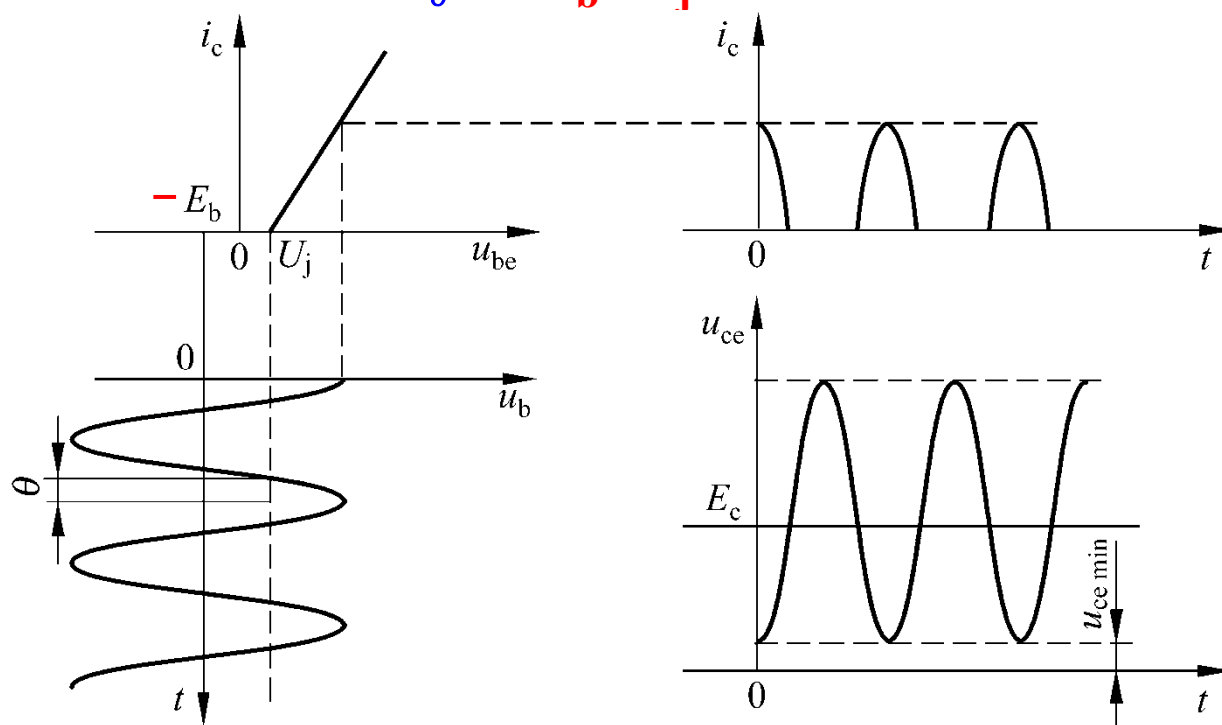
### 3.2.3 晶体管导通的特点、导通角

#### 1. 晶体管导通的特点

无信号：晶体管截止

有信号：激励信号  $u_b < E_b + U_j$  截止

激励信号  $u_b > E_b + U_j$  导通



## 2. 导通角

在转移特性的放大区

$$i_c = g(u_{be} - U_j) \quad (u_{be} > U_j)$$

假设输入信号  $u_b = U_{bm} \cos \omega t$ ，则加到晶体管基-射极的电压为  $u_{be} = U_{bm} \cos \omega t - E_b$ ，晶体管导通范围内集电极电流  $i_c$  的表达式

$$i_c = g(U_{bm} \cos \omega t - E_b - U_j) \quad (1)$$

通常把集电极电流导通时间相对应角度的一半称为集电极电流的**导通角**，用  $\theta$  表示。在丙类工作状态下  $\theta < 90^\circ$ 。

根据导通角的定义，当  $\omega t = \theta$  时， $i_c = 0$ ，即

$$g(U_{bm} \cos \theta - U_j - E_b) = 0 \Rightarrow \cos \theta = \frac{U_j + E_b}{U_{bm}} \quad (2)$$

### 3.2.4 集电极余弦脉冲电流分析

---

式(2)代入式(1)得到

$$i_c = gU_{bm}(\cos \omega t - \cos \theta)$$

当  $\omega t = 0$  时,  $i_c$  为最大值, 用  $I_{c\max}$  表示, 则

$$I_{c\max} = gU_{bm}(1 - \cos \theta) \Rightarrow gU_{bm} = \frac{I_{c\max}}{1 - \cos \theta}$$

代入得到

$$i_c = \frac{I_{c\max}}{1 - \cos \theta}(\cos \omega t - \cos \theta)$$

若将尖顶余弦脉冲分解为傅里叶级数

$$i_c = I_{c0} + I_{c1m} \cos \omega t + I_{c2m} \cos 2\omega t + \dots$$

其中, **直流分量幅值**

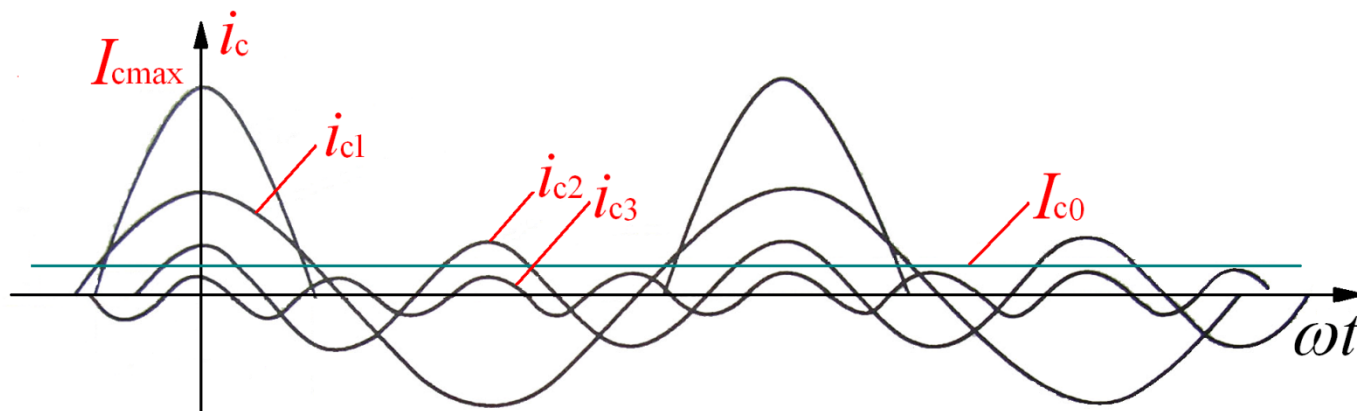
$$I_{c0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_c d\omega t = I_{c\max} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)} = I_{c\max} \alpha_0(\theta)$$

## 基波分量幅值

$$I_{c1m} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_c \cos \omega t d\omega t = I_{cmax} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)} = I_{cmax} \alpha_1(\theta)$$

## $n$ 次谐波分量幅值

$$I_{cnm} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_c \cos n\omega t d\omega t = I_{cmax} \alpha_n(\theta)$$



P61: 例3-1

$\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  称作余弦脉冲分解系数，它们是导通角  $\theta$  的函数。

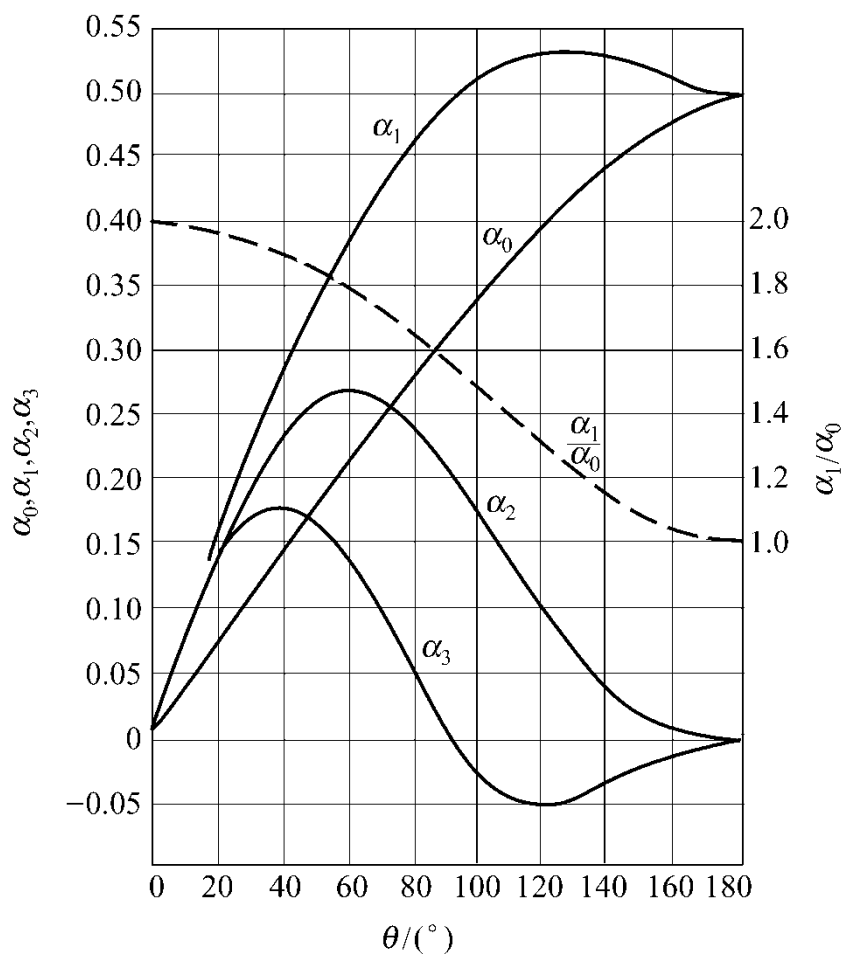
$\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  的特点：

1.  $\alpha_1 > \alpha_0$

2.  $\theta \downarrow \text{---} \text{---} \text{---} \alpha_0 \downarrow, \alpha_1 \downarrow$

从曲线可以看出：

- 谐波次数越高其振幅值越小；
- 对某一次谐波而言，总有一个相应的值  $\theta$  可使振幅为最大值。



### 3. 2. 5槽路电压

#### 1. 波形——基本正弦波

条件：1) 槽路调谐于基波

2)  $Q_L$  足够高

#### 2. 大小

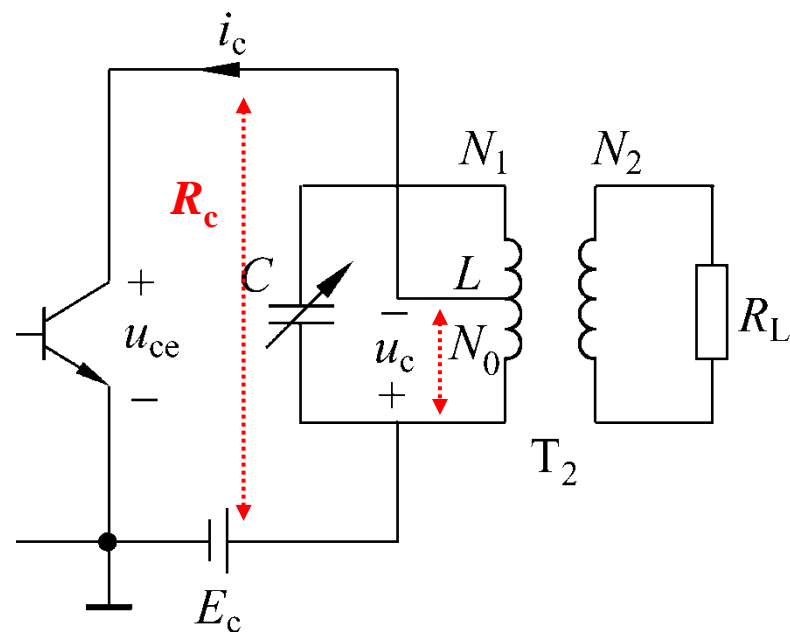
$$u_{ce} = E_c - U_{cm} \cos \omega t$$

$$U_{cm} = I_{c1m} R_c$$

$R_c$ ——抽头部分谐振电阻

$$R_c = \left(\frac{N_0}{N_1}\right)^2 R = \left(\frac{N_0}{N_1}\right)^2 \left[ R_0 // \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L \right] = \left(\frac{N_0}{N_1}\right)^2 \left[ Q_0 \omega_0 L // \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L \right]$$

$R_0$ ——并联回路谐振电阻





# 第3章 高频调谐功率放大器

---

3.1 概述

3.2 调谐功率放大器的工作原理

**3.3 功率和效率**

3.4 调谐功率放大器的工作状态分析

3.5 调谐功率放大器的实用电路

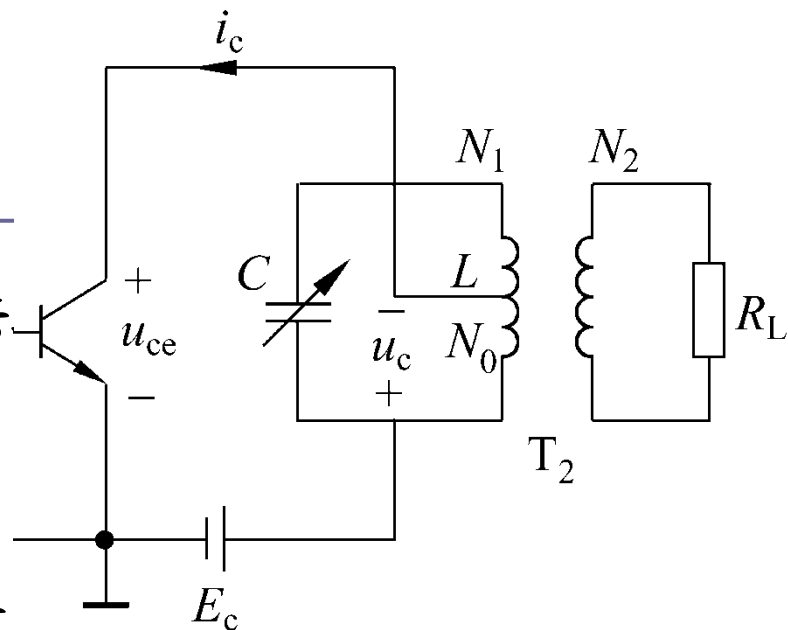
3.6 功率晶体管的高频效应

3.7 倍频器

3.8 集成高频功率放大电路及应用简介

### 3. 功率和效率

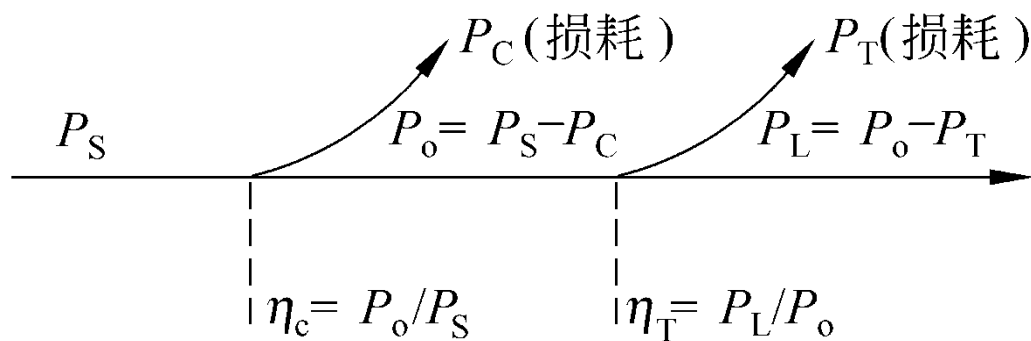
功率放大器输出功率大，电源供大。为了尽量减小损耗，合理地利用解功率放大器的功率和效率问题。



调谐功率放大器有如下几种功率

1. 电源供给的直流功率  $P_S$ ;
2. 通过晶体管转换的交流功率，即晶体管集电极输出的交流功率  $P_o$ ;
3. 通过槽路送给负载的交流功率，即  $R_L$  上得到的功率  $P_L$ ;
4. 晶体管在能量转换过程中的损耗功率，即晶体管损耗功率  $P_C$ ;
5. 槽路损耗功率  $P_T$ ;

电源供给的功率 $P_S$ ，一部分( $P_C$ )损耗在管子，使管子发热；另一部分( $P_o$ )转换为交流功率，输出给槽路。通过槽路一部分( $P_T$ )损耗在槽路线圈和电容中，另一部分( $P_L$ )输出给负载 $R_L$ 。



## 1. 集电极效率 $\eta_c$

- 直流电源供给功率  $P_S = E_c I_{c0}$
- 集电极交流输出功率  $P_o = 1/2 U_{cm} I_{c1m}$
- 放大器的能量转换效率（集电极效率）

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m}}{E_c I_{c0}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{cm} I_{c \max} \alpha_1(\theta)}{E_c I_{c \max} \alpha_0(\theta)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{cm}}{E_c} \cdot \frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)}$$

讨论:

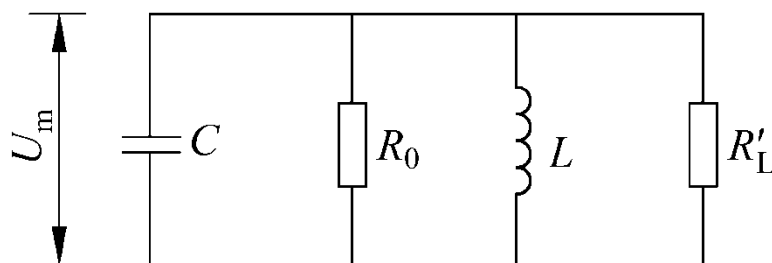
(1)  $\frac{U_{cm}}{E_c}$  —— 集电极电压利用系数

(2)  $\frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)}$  —— 集电极电流利用系数

$\frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)} \uparrow$ ,  $\eta_c \uparrow$ , 但  $\theta \downarrow$ ,  $P_o \downarrow$ 。 图3-4

为了兼顾功率和效率, 通常取  $\theta = 60^\circ \sim 80^\circ$ 。

## 2. 槽路效率



- $P_L$ —— 负载功率， $R_L$  所吸收的功率；
- $P_T$ —— 槽路损耗功率，槽路空载电阻 $R_0$ 所吸收的功率。

$$\eta_T = \frac{P_L}{P_o} = \frac{P_o - P_T}{P_o} = \frac{\frac{1}{2} \frac{U_m^2}{Q_L \omega L} - \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{Q_0 \omega L}}{\frac{1}{2} \frac{U_m^2}{Q_L \omega L}} = \frac{Q_0 - Q_L}{Q_0}$$

$\eta_T$  取决于槽路的空载和有载品质因数。由于受到槽路元件质量的限制， $Q_0$  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  $Q_L = 5 \sim 10$ 。  $\eta_T \approx 0.8 - 0.9$

### 3. 晶体管损耗 $P_c$ ——选用晶体管容量的依据

---

$P_{64}$ 例子中经计算 $P_c=0.31W$ ,

电路设计时所选用的晶体管功率容量大于 $0.31W$ , 例如可以取 $P_{CM}=0.5W$ 晶体管。

$P_{CM}$ ——集电极最大允许损耗功率（功率容量）

为什么不是 $P_{CM}=1W$ ?

$$\eta_c = \frac{P_0}{P_s} = \frac{P_0}{P_0 + P_c}$$

所以选择满足条件的小功率容量的晶体管。

## 结论:

---

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。 $\eta_c$  高要适当选取  $\theta$ ，电压利用系数尽可能大； $\eta_T$  高，要求槽路空载品质因数  $Q_0$  大，即应选用低损耗的电感和电容元件。

□ 作业：3-14

□ 例：P65:3-2

□ 作业：3-17