



CEC

Ch05

# 高频功率放大器

## High Frequency Power/Class C Amplifiers

2025年4月17日

学而不厌 诲人不倦

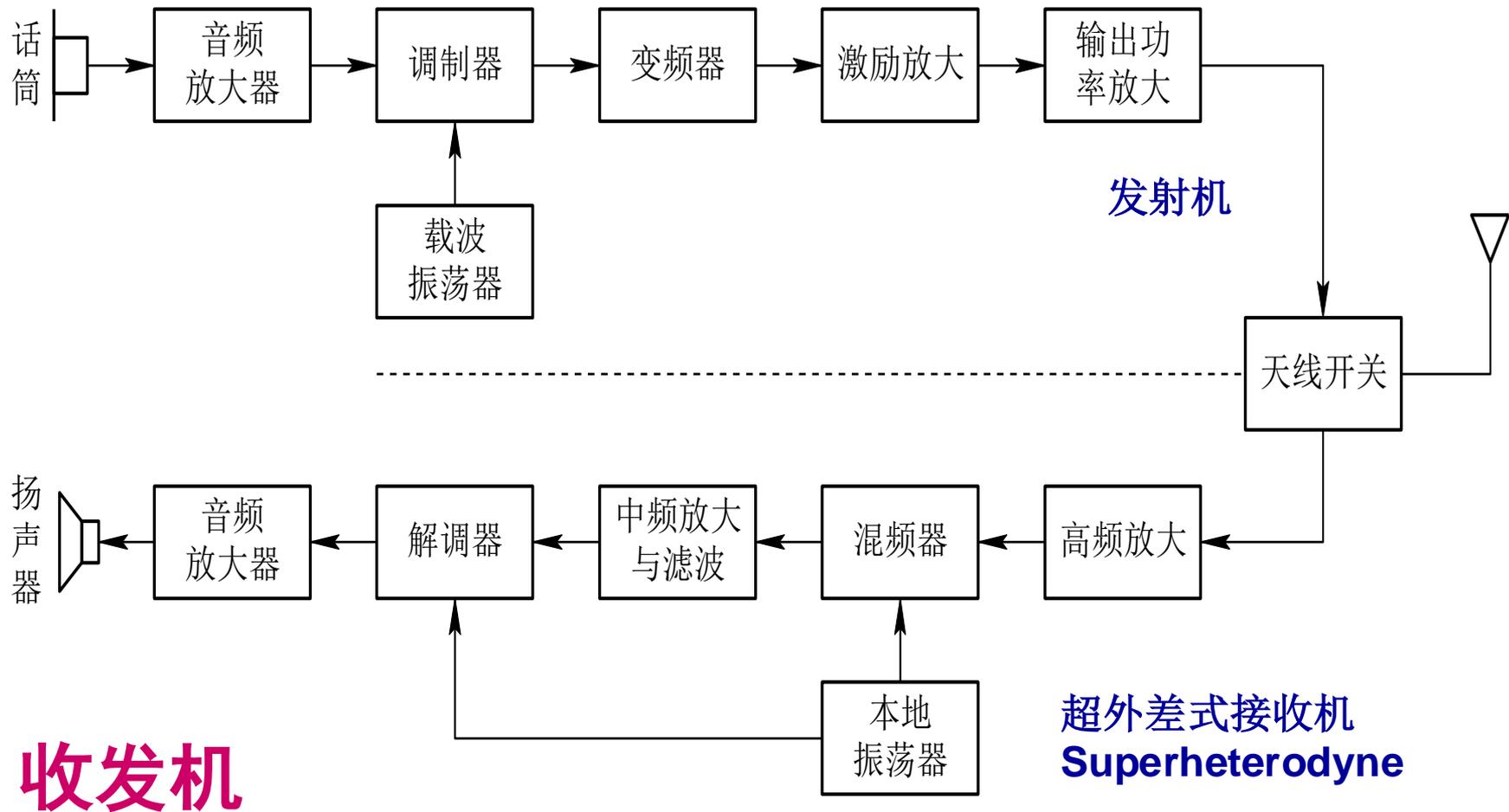


# Chapter 5 高频功率放大器

- ➡ **§5.1 概述**
- ➡ **§5.2 谐振功率放大器的工作原理**
- ➡ **§5.3 晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法**
- ➡ **§5.4 晶体管功率放大器的高频特性**
- ➡ **§5.5 高频功率放大器的电路组成**
- ➡ **§5.6 丁类(D类)功率放大器**
- ➡ **§5.7 戊类(E类)功率放大器**
- ➡ **§5.8 宽带高频功率放大器**
- ➡ **§5.9 功率合成器**
- ➡ **§5.10 晶体管倍频器概述**

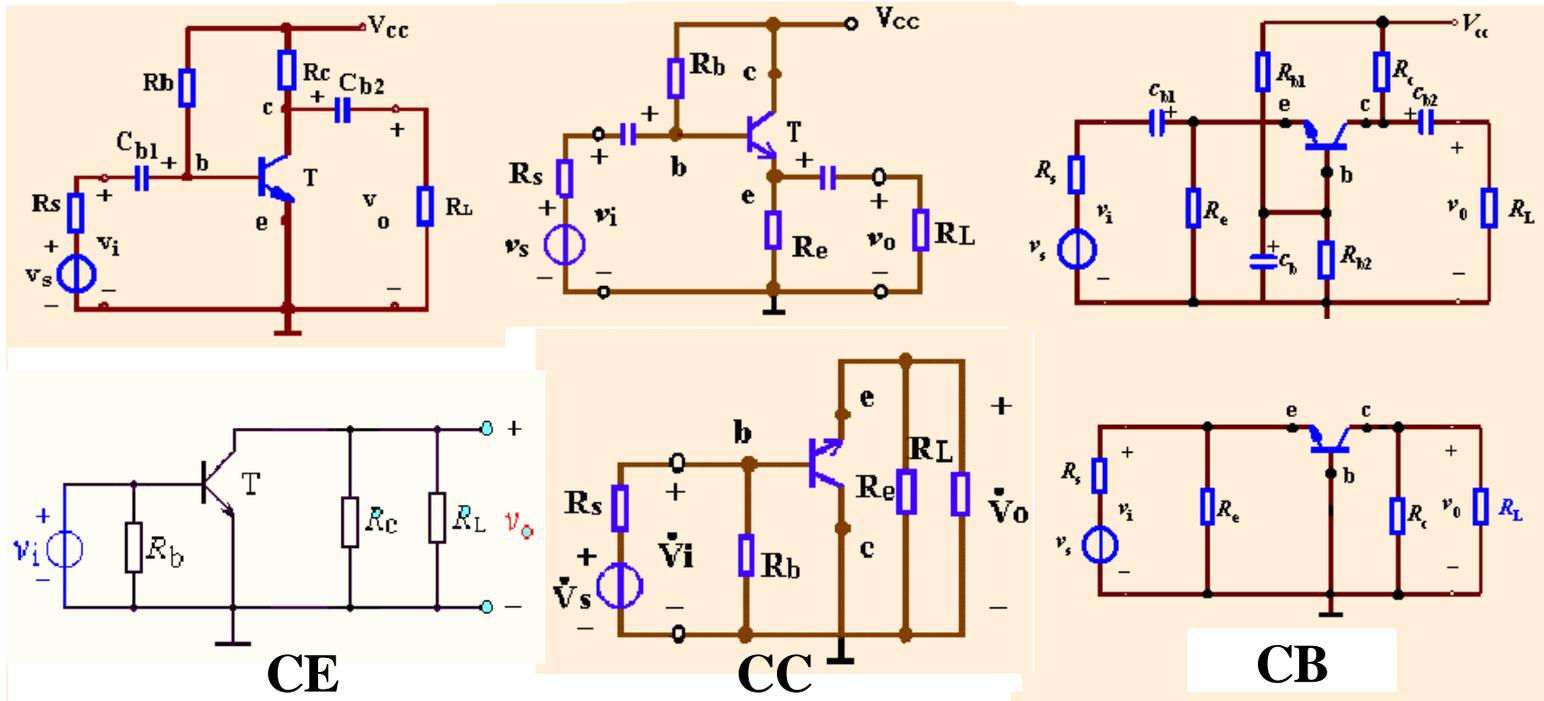
# 5.1 概述

## ➤ 1. 收发机设计



# 5.1 概述

## ➤ 2. 功率放大电路：以输出较大功率为目的 三种组态的基本放大电路



**电压增益:**  $-\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} \gg 1$

$\frac{(1 + \beta) \cdot (R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)} \approx 1$

$\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} \gg 1$

**电流增益:**  $\beta$

$\beta + 1$

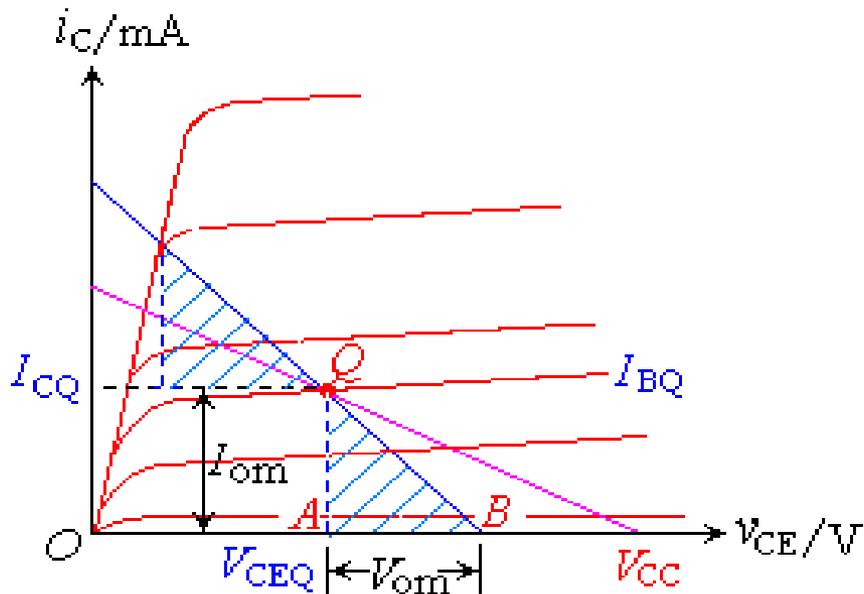
$\alpha$

# 5.1 概述

## ➤ 3. 功率放大电路的特点

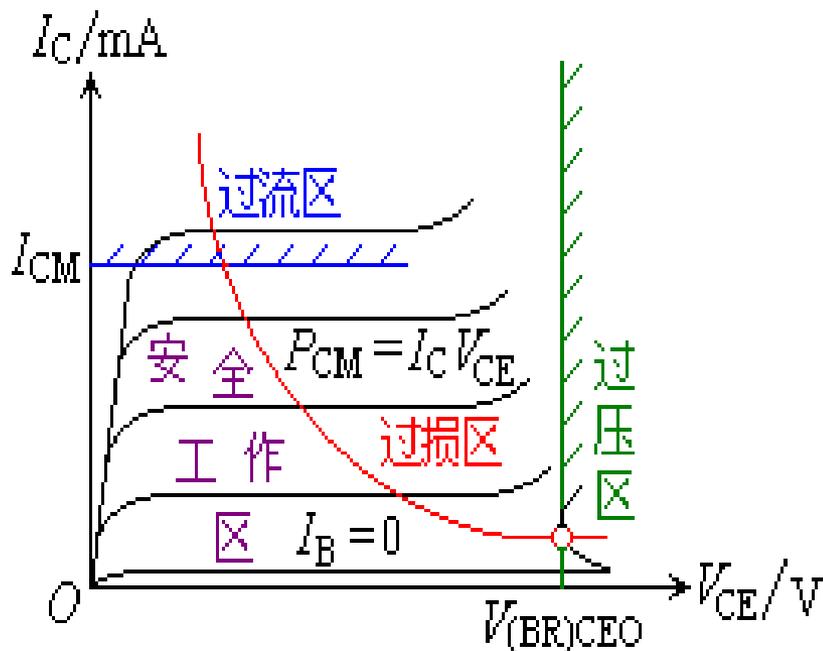
(1) 允许轻微非线性波形失真

(2) 管子工作在接近极限状态



$\triangle ABQ$  功率三角形

输出功率 
$$P_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} V_{om} I_{om}$$



要想  $P_o$  大，应使  $V_{om}$  和  $I_{om}$  都要大。

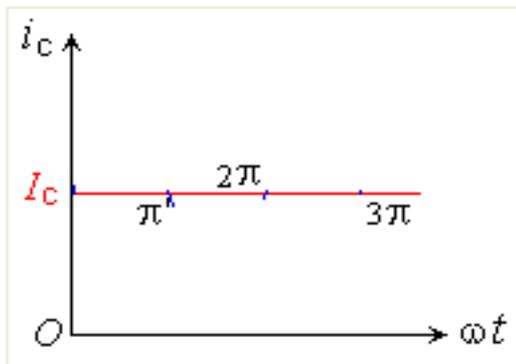
# 5.1 概述

## ➤ 4. 要解决的问题

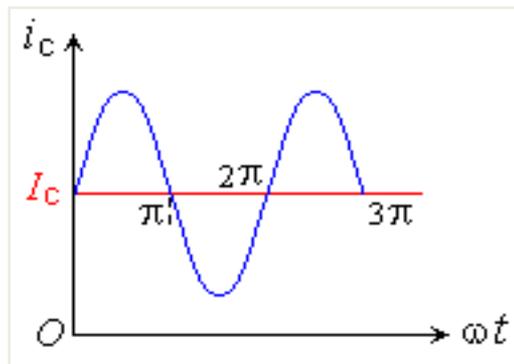
- 提高输出功率
- 减小失真 (线性度)
- 管子的保护
- 提高效率

$$\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{直流电源提供的直流功率}} = \frac{P_o}{P_{\Sigma}} = \frac{P_o}{P_o + P_T}$$

$$P_{\Sigma} (\text{直流电源功率}) = P_o (\text{交流功率}) + P_T (\text{直流功耗})$$



$$v_i = 0$$



$$v_i = V_0 \sin \omega t$$

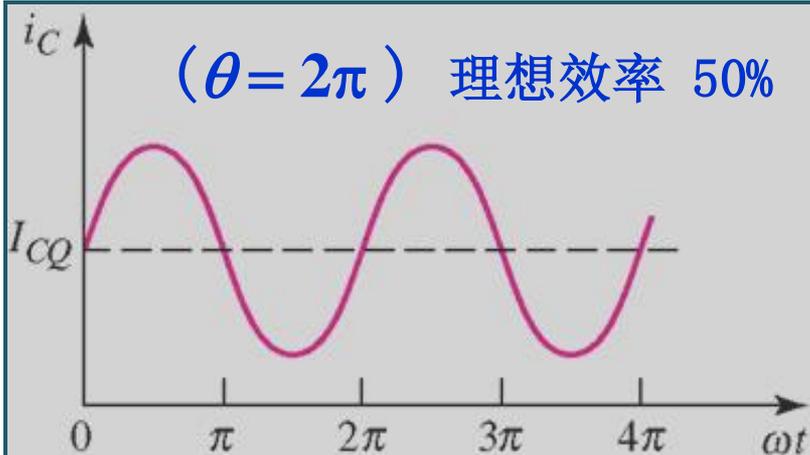
$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_c dt$$

- 降低静态功耗，即减小静态电流。

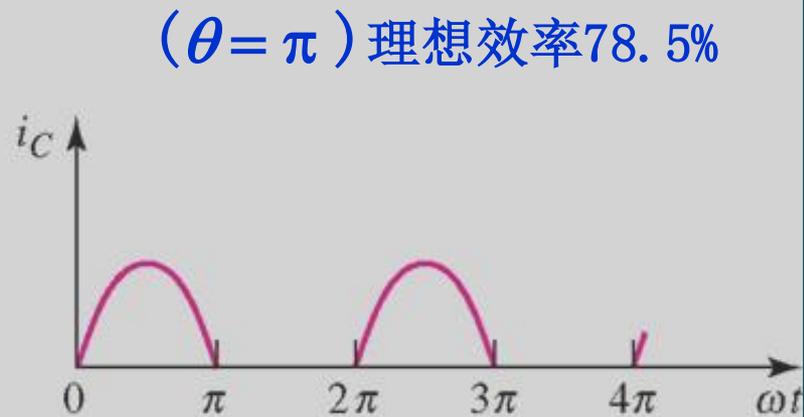


# 5.1 概述

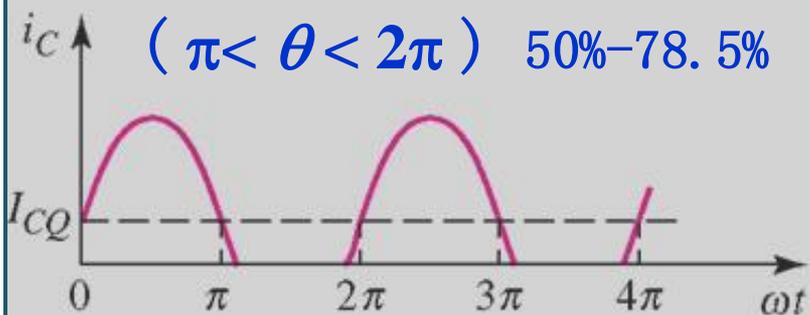
## ➤ 5. 高频功率放大器的分类



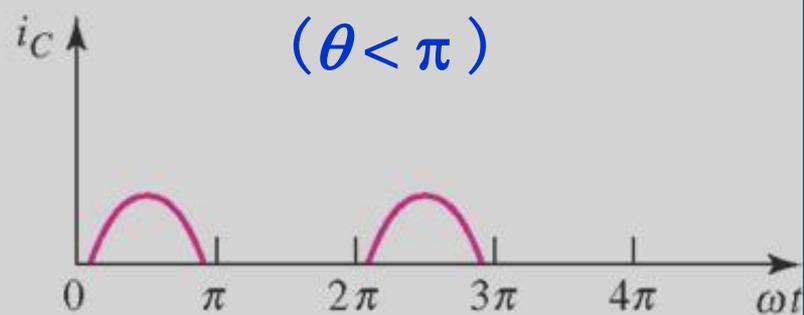
(a) 甲类 class-A amplifier



(b) 乙类 class-B amplifier



(c) 甲乙类 class-AB amplifier

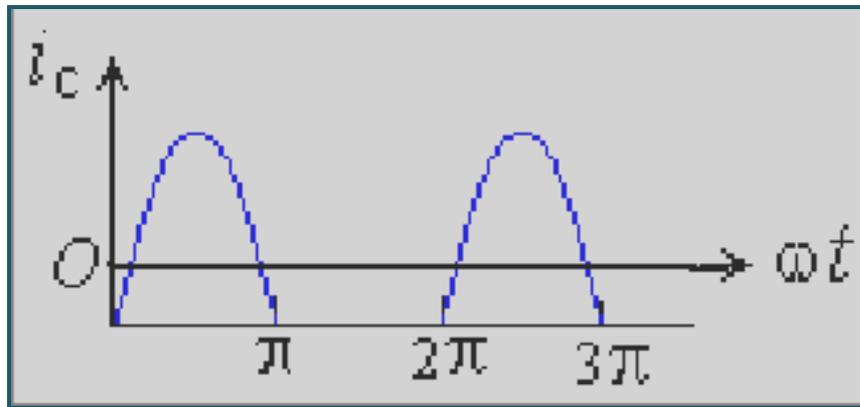


(d) 丙类 class-C amplifier

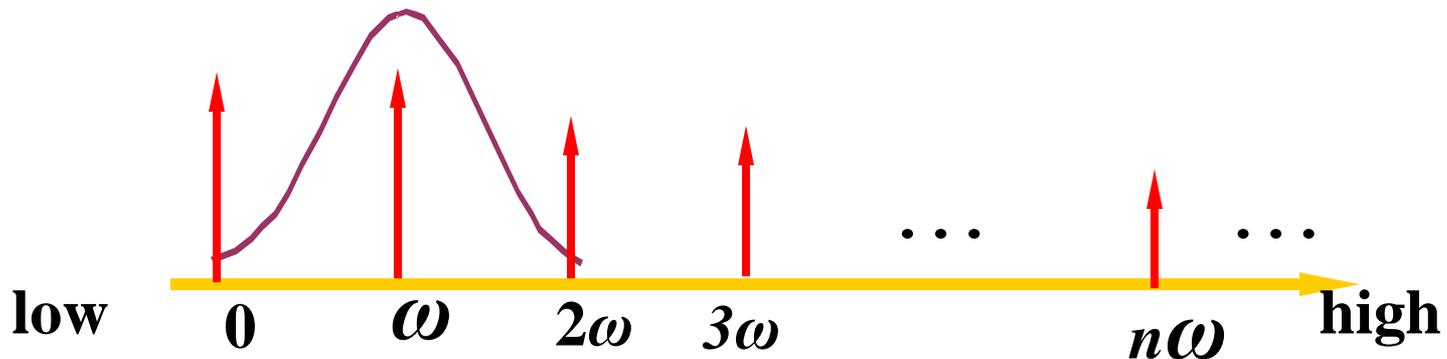
# 5.1 概述

## ➤ 6. 效率与失真问题的解决

丙类(C类)放大器的效率最高，但是波形失真也最严重。

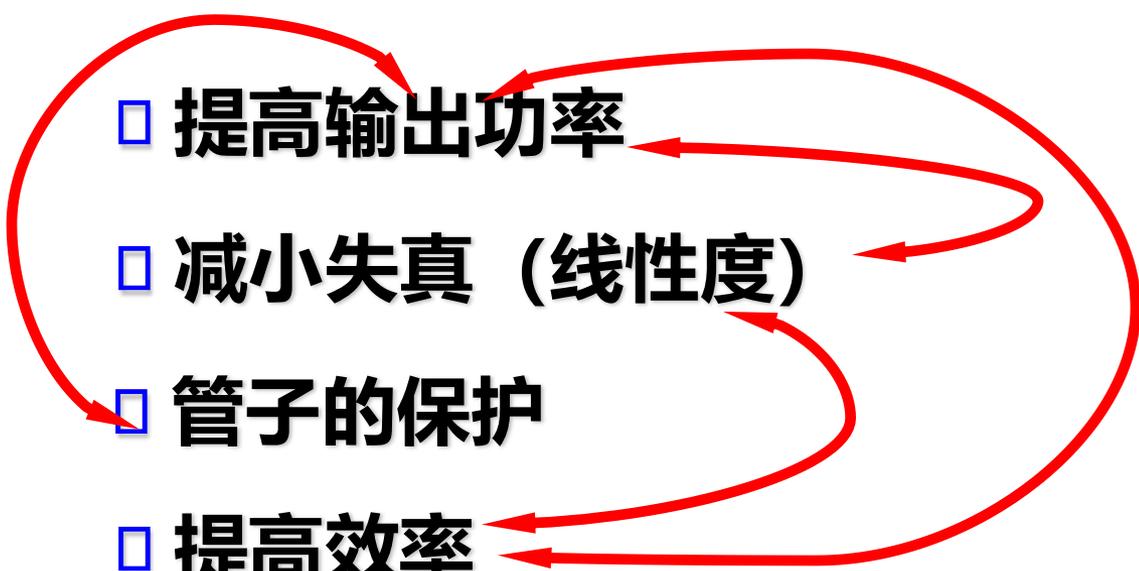


$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \sin \omega t + I_{cm2} \sin 2\omega t + \dots + I_{cmn} \sin n\omega t + \dots$$



## 5.1 概述

### ➤ 7. 功放设计中的折中关系

- 提高输出功率
  - 减小失真（线性度）
  - 管子的保护
  - 提高效率
- 

#### 遗留问题:

- (1) 丙类导通角 $<180^\circ$ ，何时最优？
- (2) 放大、临界、饱和，何处最优？



# Chapter 5 高频功率放大器

- ➡ §5.1 概述
- ➡ **§5.2 谐振功率放大器的工作原理**
- ➡ §5.3 晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法
- ➡ §5.4 晶体管功率放大器的高频特性
- ➡ §5.5 高频功率放大器的电路组成
- ➡ §5.6 丁类(D类)功率放大器
- ➡ §5.7 戊类(E类)功率放大器
- ➡ §5.8 宽带高频功率放大器
- ➡ §5.9 功率合成器
- ➡ §5.10 晶体管倍频器概述

## 5.2 谐振功率放大器的工作原理

### ➤ 1. 获得高效率的条件

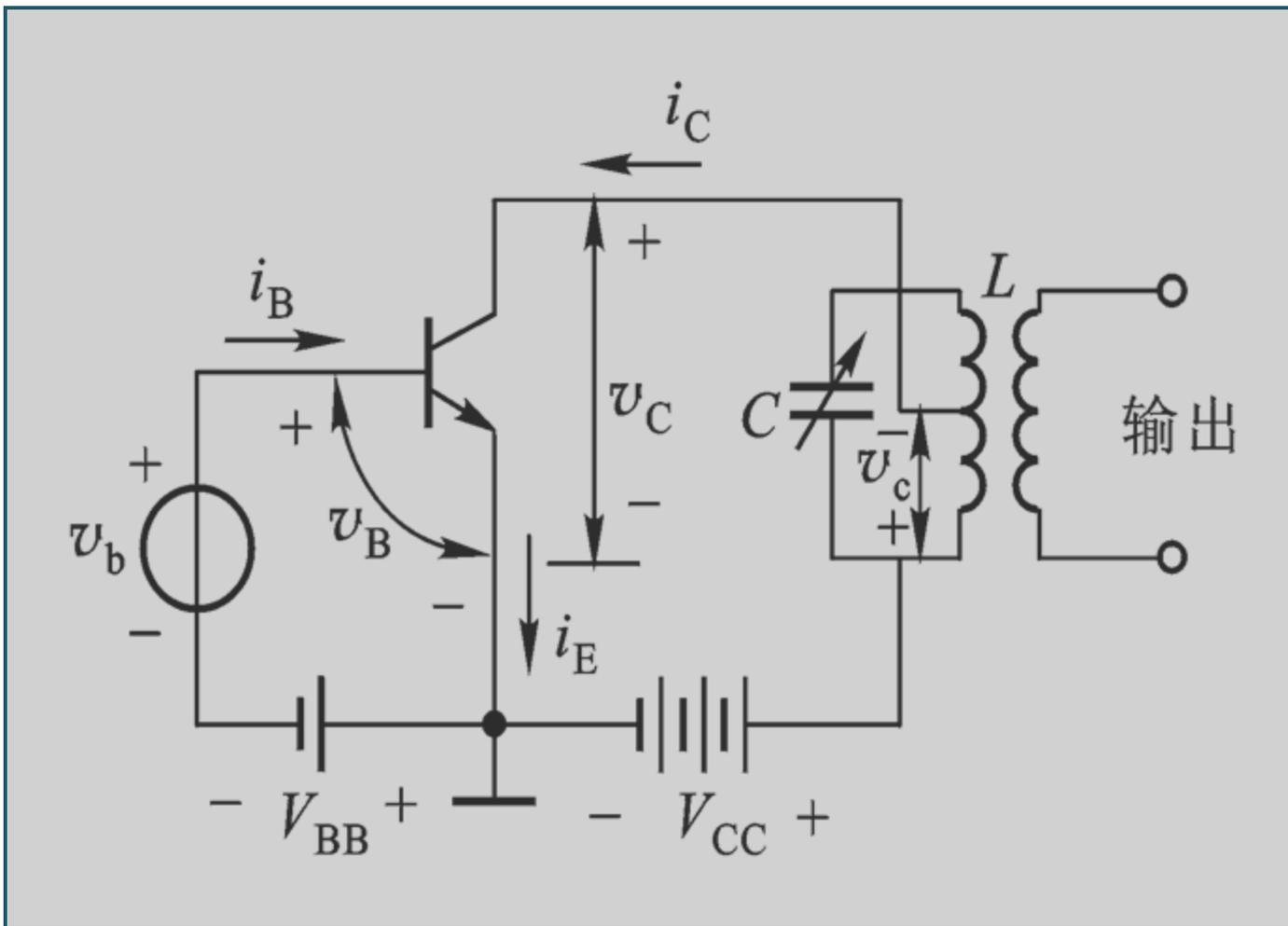


图 5.2.1 高频功率放大器的基本电路

## 5.2 谐振功率放大器的工作原理

### ➤ 1. 获得高效率的条件

—小信号谐振放大器与丙类谐振功率放大器工作状态分别为小信号甲类与大信号丙类。因此，丙类谐振功率放大器采用负电源作基极偏置。

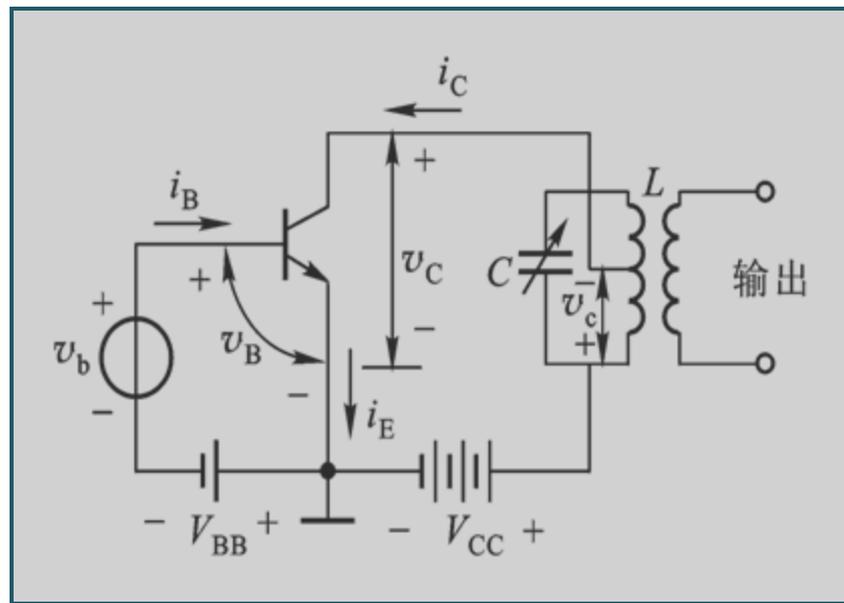
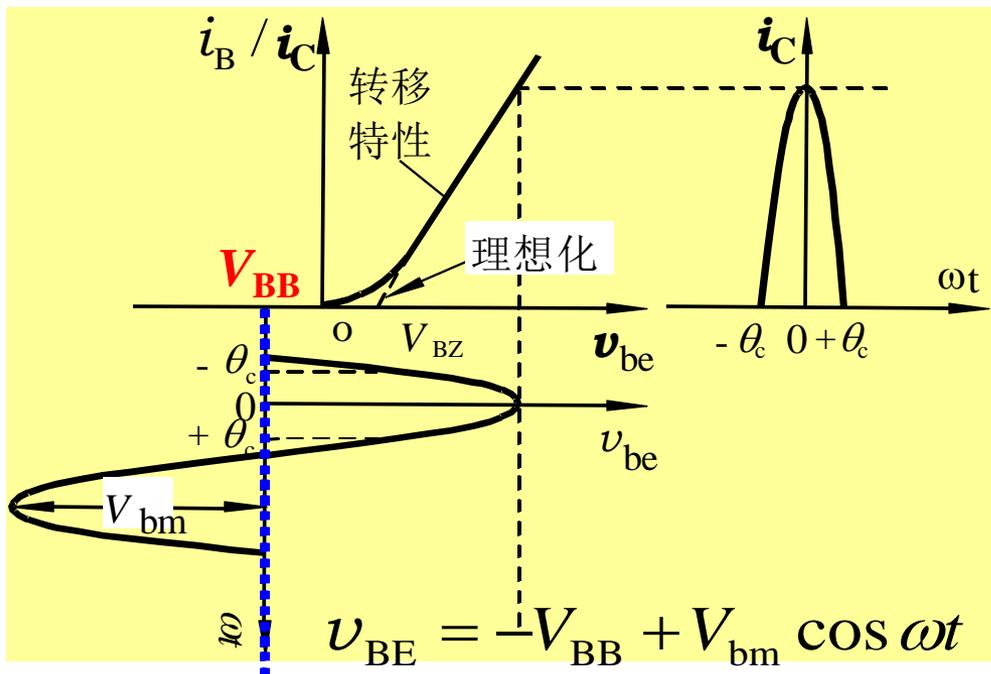
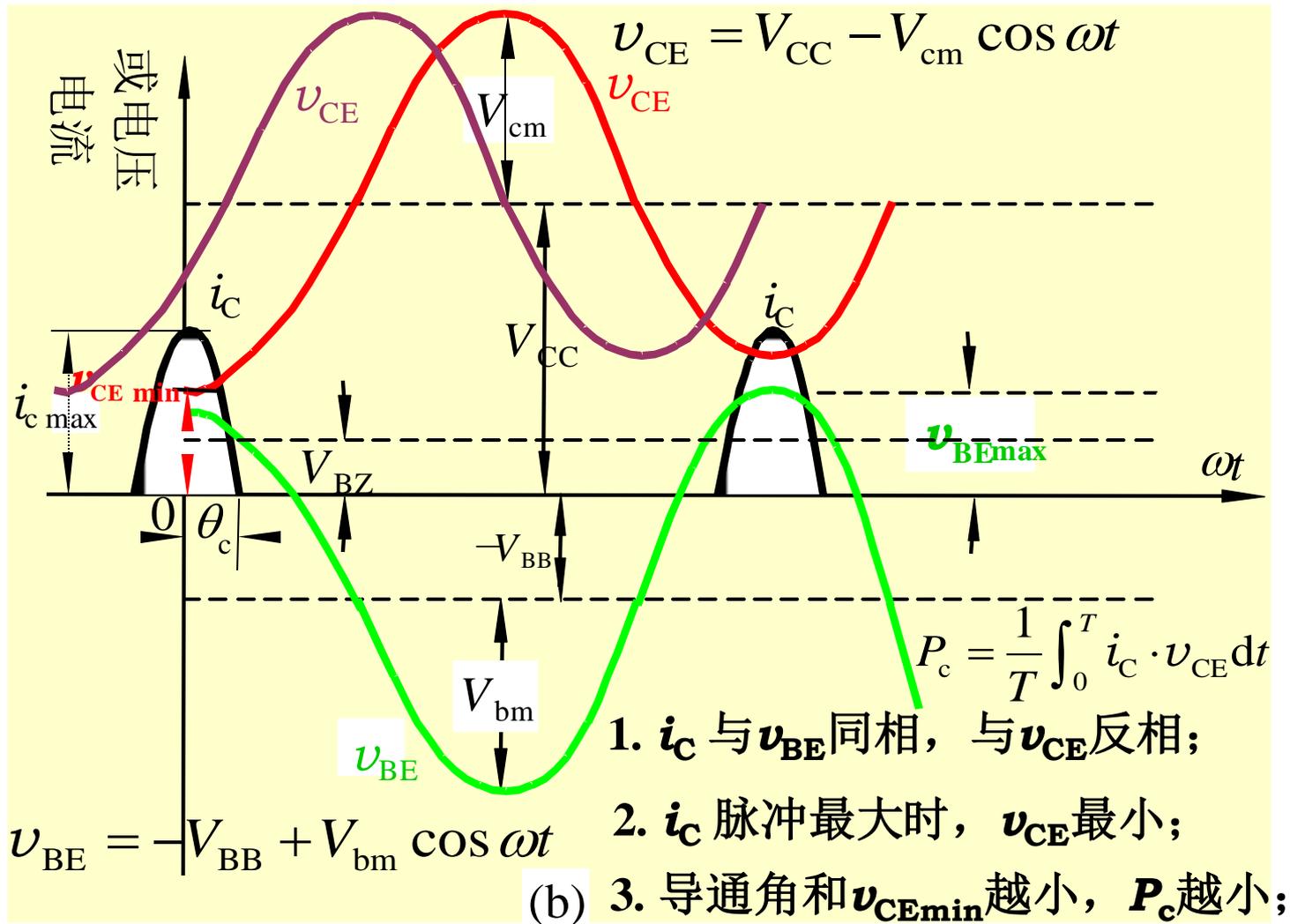


图 5.2.1 高频功率放大器的基本电路

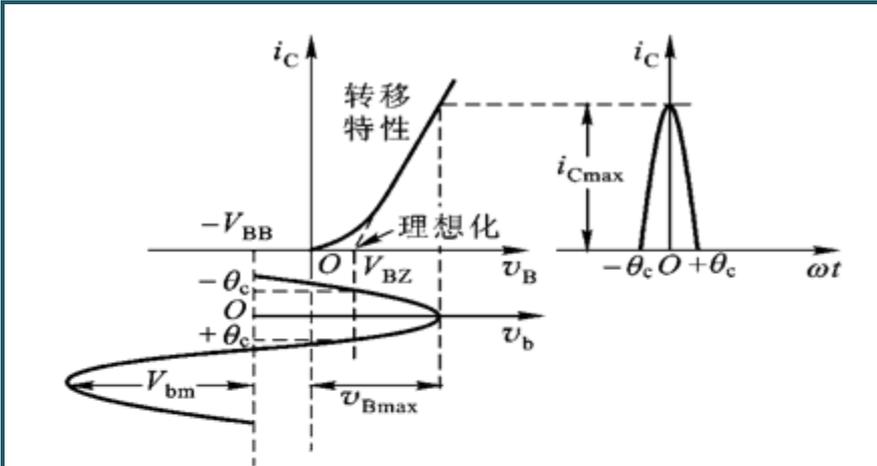
# 5.2 谐振功率放大器的工作原理

## ➤ 1. 获得高效率的条件

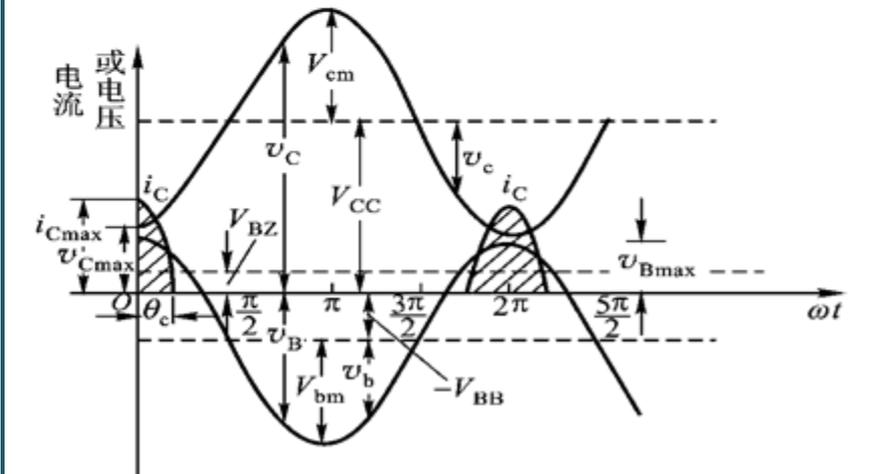


# 5.2 谐振功率放大器的工作原理

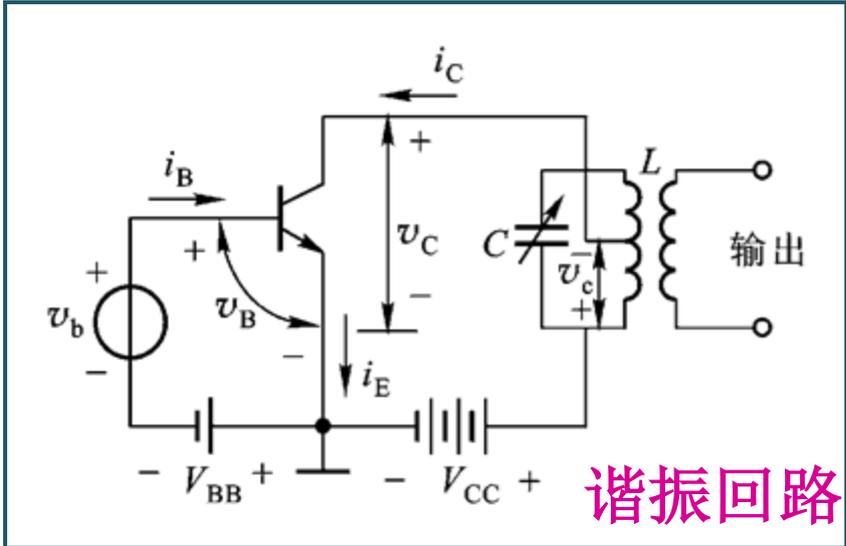
## 2. 功率关系



(a)



(b)



谐振回路

电路正常工作（丙类、谐振）时，外部电路关系式：

$$v_{BE} = -V_{BB} + V_{bm} \cos \omega t$$

$$v_{CE} = V_{CC} - V_{cm} \cos \omega t$$

$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega t + I_{cm2} \cos 2\omega t + \dots + I_{cmn} \cos n\omega t + \dots$$

## 5.2 谐振功率放大器的工作原理

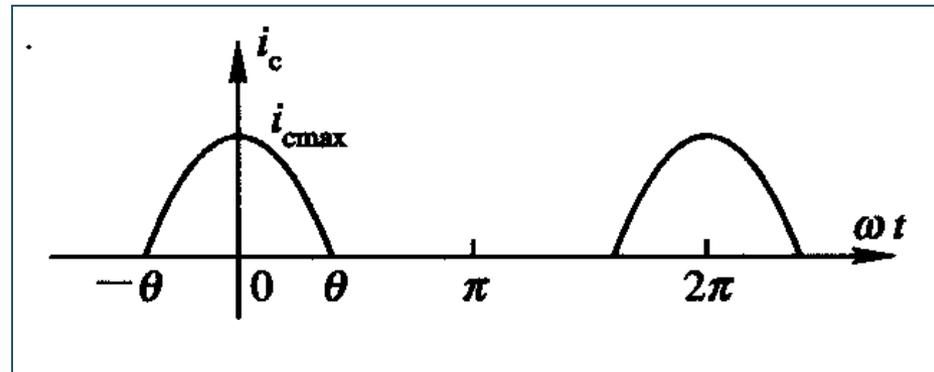
### ➤ 2. 功率关系

根据傅立叶级数理论，**周期性脉冲**可以分解成**直流**、**基波**(信号频率分量)和**各次谐波分量**, 即:

$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega t + I_{cm2} \cos 2\omega t + \dots + I_{cmn} \cos n\omega t + \dots$$

$$I_{cm0} = i_{c\max} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)} = i_{c\max} a_0(\theta)$$

$$I_{cm1} = i_{c\max} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)} = i_{c\max} a_1(\theta)$$



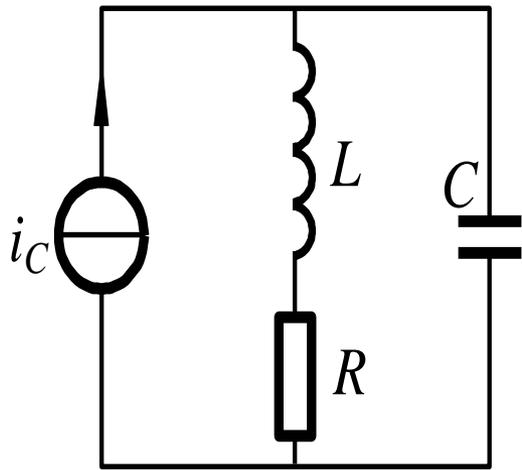
$$I_{cmn} = i_{c\max} \frac{2 \sin n\theta \cos \theta - 2n \sin \theta \cos n\theta}{n\pi(n^2 - 1)(1 - \cos \theta \cos \theta)} = i_{c\max} a_n(\theta) \quad (n > 1)$$

其中  $\theta$  称为导通角,  $a_0(\theta)$ ,  $a_1(\theta)$ ,  $a_n(\theta)$  分别称为余弦脉冲的直流、基波、 $n$ 次谐波的分解系数,

## 5.2 谐振功率放大器的工作原理

### ➤ 2. 功率关系

$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega t + I_{cm2} \cos 2\omega t + L \\ + I_{cmn} \cos n\omega t + L$$



并联谐振电路各次谐波与基频  
的阻抗值之比：

$$\left| \frac{(Z_p)_{n\omega}}{(Z_p)_\omega} \right| = \frac{n}{(n^2 - 1)Q}$$

$$\left| \frac{(Z_p)_{2\omega}}{(Z_p)_\omega} \right| = 0.0667 \quad \left| \frac{(Z_p)_{3\omega}}{(Z_p)_\omega} \right| = 0.0375 \quad \dots\dots$$

放大器的负载为并联谐振回路，当谐振频率 $\omega_0$ 等于激励信号频率 $\omega$ 时，回路对 $\omega$ 频率呈现一大谐振电阻 $R_p$ ，因此式中基波分量在回路上产生电压，而对远离 $\omega$ 的直流和谐波分量 $2\omega$ 、 $3\omega$ 等呈现很小的阻抗，因而这些频率成分的输出很小，几乎为零，可以忽略。



## 5.2 谐振功率放大器的工作原理

### ➤ 2. 功率关系

$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega t + I_{cm2} \cos 2\omega t + \dots + I_{cmn} \cos n\omega t + \dots$$

**直流功率:**  $P_{=} = V_{CC} \cdot I_{c0}$

在集电极电路中，谐振回路得到的高频功率(高频一周的平均功率)即**输出交流功率**:

$$P_o = \frac{1}{2} V_{cm} \cdot I_{cm1} = \frac{V_{cm}^2}{2R_p} = \frac{1}{2} I_{cm1}^2 R_p$$

**集电极效率:**

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{=}} = \frac{\frac{1}{2} V_{cm} \cdot I_{cm1}}{V_{CC} I_{c0}} = \frac{1}{2} \xi g_1(\theta_c)$$

**集电极电压利用系数:**  $\xi = \frac{V_{cm}}{V_{CC}}$

**波形系数**  $g_1(\theta_c) = \frac{I_{cm1}}{I_{c0}}$

直流输入功率与集电极输出高频功率之差就是**集电极损耗功率** $P_c$ ，即:

$$P_c = P_{=} - P_o$$

**输出功率** $P_o$ 和**集电极损耗功率** $P_c$ 之间的关系为

$$P_o = \frac{\eta_c}{1 - \eta_c} P_c$$



# Chapter 5 高频功率放大器

- §5.1 概述
- §5.2 谐振功率放大器的工作原理
- **§5.3 晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法**
- §5.4 晶体管功率放大器的高频特性
- §5.5 高频功率放大器的电路组成
- §5.6 丁类(D类)功率放大器
- §5.7 戊类(E类)功率放大器
- §5.8 宽带高频功率放大器
- §5.9 功率合成器
- §5.10 晶体管倍频器概述

## 5.3 谐振功放的折线近似分析法

### ➤ 1. 晶体管特性曲线的理想化

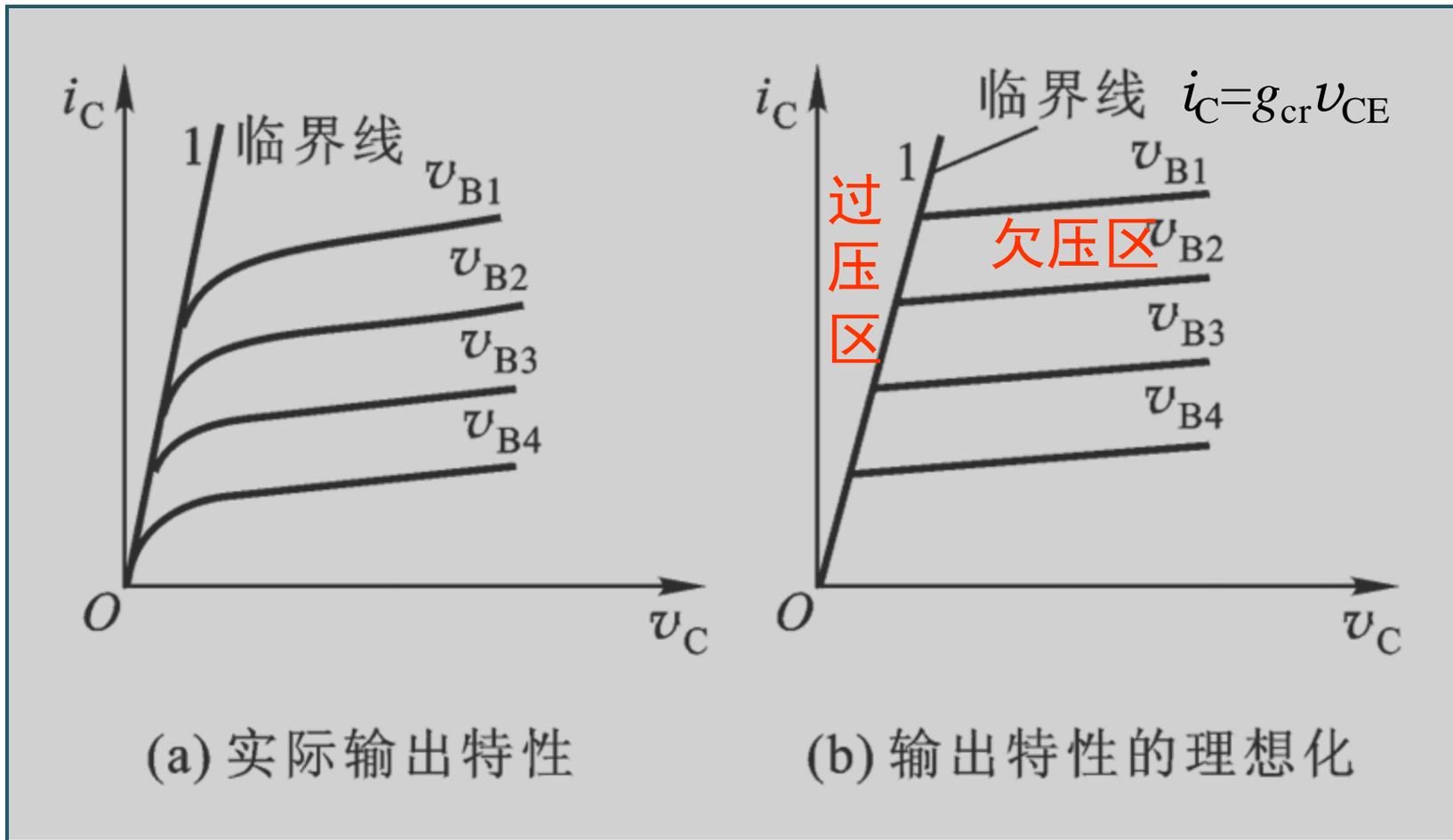


图 5.3.1 晶体管的输出特性及其理想化

## 5.3 谐振功放的折线近似分析法

### ➤ 1. 晶体管特性曲线的理想化

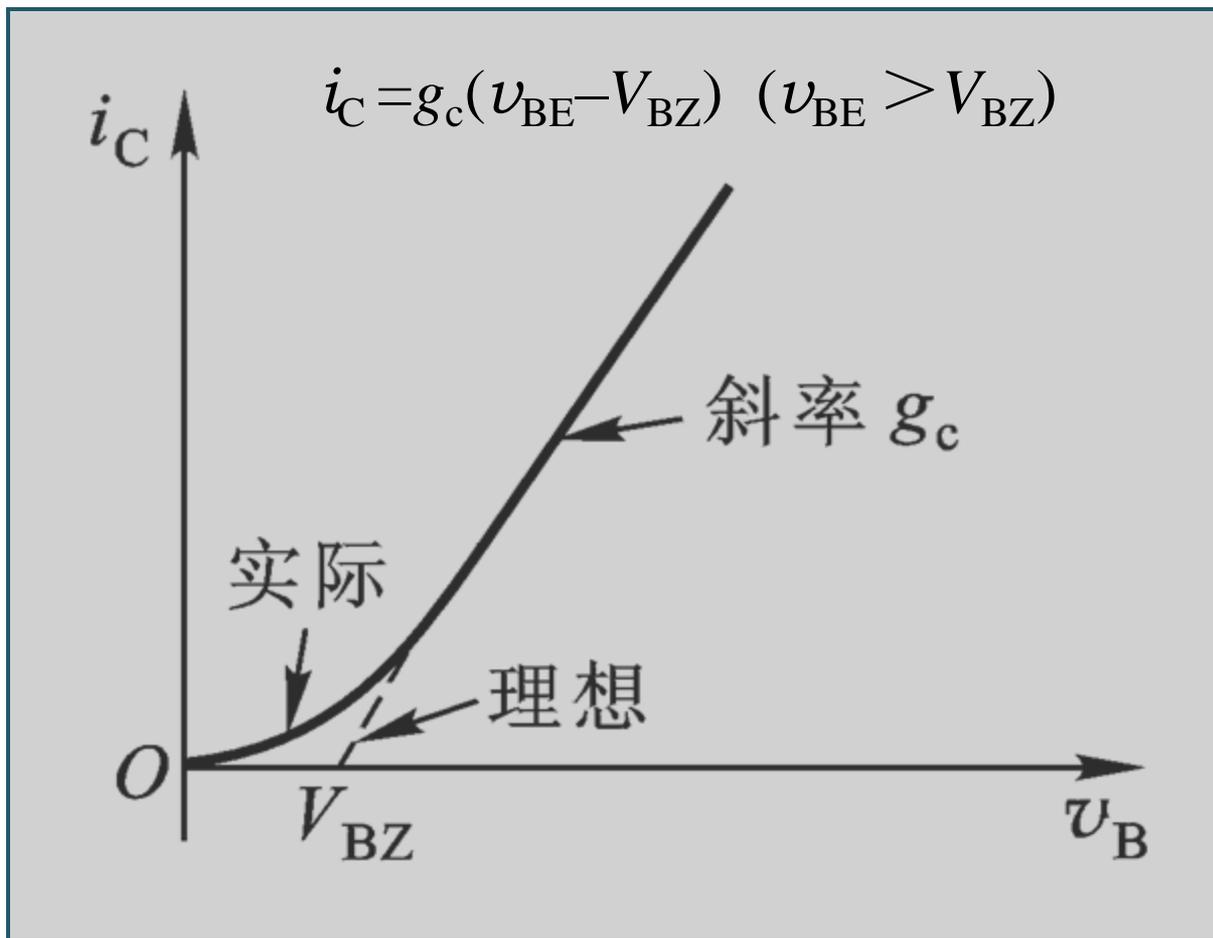
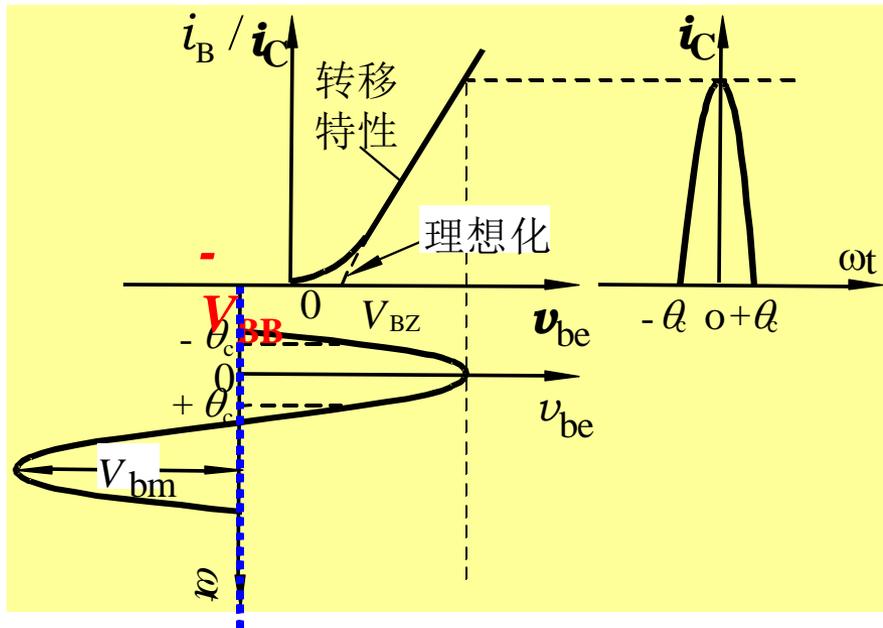


图 5.3.2 晶体管静态转移特性及其理想化

# 5.3 谐振功放的折线近似分析法

## ➤ 2. 集电极余弦电流脉冲的分解



$$\begin{aligned}
 i_C &= g_c (v_{BE} - V_{BZ}) \quad (v_{BE} > V_{BZ}) \\
 &= g_c (V_{bm} \cos \omega t - V_{BZ} - V_{BB}) \\
 &= g_c V_{bm} (\cos \omega t - \cos \theta_c)
 \end{aligned}$$

当  $\omega t = \theta_c$  时,  $i_C = 0$

$$\cos \theta_c = \frac{|V_{BB}| + V_{BZ}}{V_{bm}}$$

$$v_{BE} = -V_{BB} + V_{bm} \cos \omega t \quad \text{当 } \omega t = 0 \text{ 时, } i_C = i_{C \max} = g_c V_{bm} (1 - \cos \theta_c)$$

$$\frac{i_C}{i_{C \max}} = \frac{\cos \omega t - \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c}$$

取决于脉冲高度  $i_{C \max}$  与通角  $\theta_c$

## 5.3 谐振功放的折线近似分析法

### ➤ 2. 集电极余弦电流脉冲的分解

$$i_C = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega t + I_{cm2} \cos 2\omega t + \dots + I_{cmn} \cos n\omega t + \dots$$

$$\frac{i_C}{i_{Cmax}} = \frac{\cos \omega t - \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c}$$

由傅里叶级数求系数，得

$$I_{c0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta_c}^{+\theta_c} i_C d\omega t = i_{Cmax} \alpha_0(\theta_c)$$

$$I_{cmn} = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta_c}^{+\theta_c} i_C \cos(n\omega t) d\omega t = i_{Cmax} \alpha_n(\theta_c)$$

其中：尖顶余弦脉冲的分解系数

$$\alpha_0(\theta_c) = \frac{\sin \theta_c - \theta_c \cos \theta_c}{\pi(1 - \cos \theta_c)} \quad \alpha_1(\theta_c) = \frac{\theta_c - \cos \theta_c \sin \theta_c}{\pi(1 - \cos \theta_c)}$$

$$\alpha_n(\theta_c) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sin n\theta_c \cos \theta_c - n \cos n\theta_c \sin \theta_c}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta_c)}$$

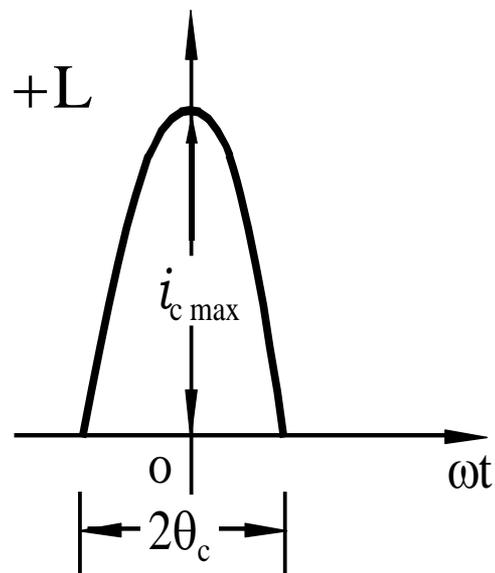


图6.3.3 尖顶余弦脉冲

波形系数

$$g_1(\theta_c) = \frac{I_{cm1}}{I_{c0}} = \frac{\alpha_1(\theta_c)}{\alpha_0(\theta_c)}$$

$$g_1(\theta_c) = \frac{\theta_c - \cos \theta_c \sin \theta_c}{\sin \theta_c - \theta_c \cos \theta_c}$$

## 5.3 谐振功放的折线近似分析法

### ➤ 2. 集电极余弦电流脉冲的分解

—根据基波分量 $I_{cm1}$ 、集电极效率 $\eta_c$ 和输出功率 $P_o$ 随通角 $\theta_c$ 变化的情况，选择合适的工作状态。

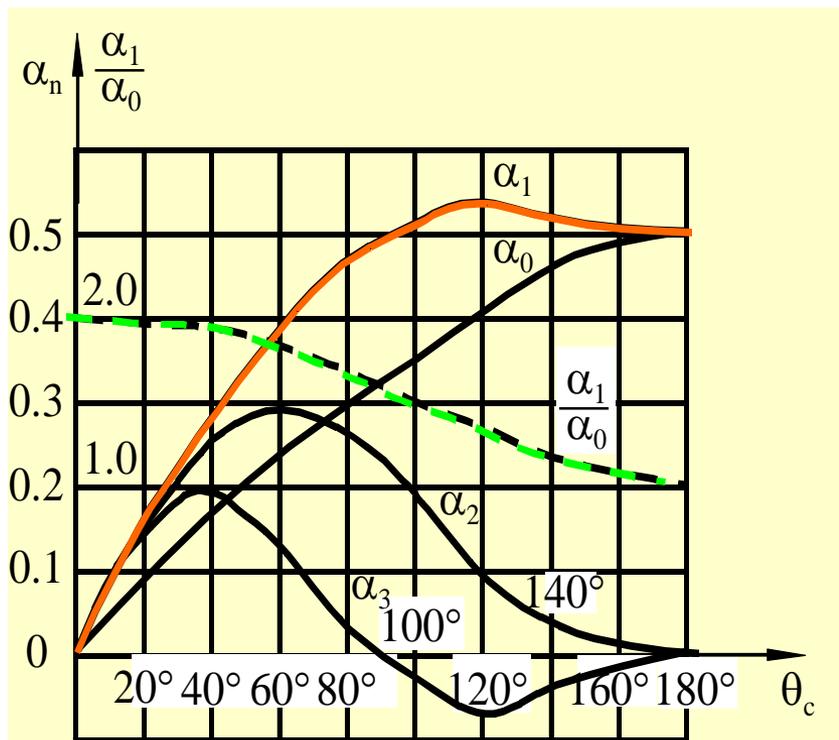


图5-9 尖顶脉冲的分解系数

$$\alpha_0(\theta_c) = \frac{\sin \theta_c - \theta_c \cos \theta_c}{\pi(1 - \cos \theta_c)}$$

$$\alpha_1(\theta_c) = \frac{\theta_c - \cos \theta_c \sin \theta_c}{\pi(1 - \cos \theta_c)}$$

$$\alpha_n(\theta_c) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sin n\theta_c \cos \theta_c - n \cos n\theta_c \sin \theta_c}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta_c)}$$

当 $\theta_c \approx 120^\circ$ 时， $I_{cm1}/i_{Cmax}$ 最大。在 $i_{Cmax}$ 与负载阻抗 $R_p$ 为某定值的情况下，输出功率将达到最大值。但此时放大器处于甲乙类状态，效率太低。

## 5.3 谐振功放的折线近似分析法

### ➤ 2. 集电极余弦电流脉冲的分解

—根据基波分量 $I_{cm1}$ 、集电极效率 $\eta_c$ 和输出功率 $P_o$ 随通角 $\theta_c$ 变化的情况，选择合适的工作状态。

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{dc}} = \frac{1}{2} \frac{V_{cm} I_{cm1}}{V_{CC} I_{c0}} = \frac{1}{2} \xi \frac{\alpha_1(\theta_c)}{\alpha_0(\theta_c)} = \frac{1}{2} \xi g_1(\theta_c)$$

$$g_1(\theta_c) = \frac{\alpha_1(\theta_c)}{\alpha_0(\theta_c)} = \frac{\theta_c - \cos \theta_c \sin \theta_c}{\sin \theta_c - \theta_c \cos \theta_c}$$

由曲线可知：极端情况 $\theta_c=0$ 时，

$$g_1(\theta_c) = \frac{\alpha_1(\theta_c)}{\alpha_0(\theta_c)} = 2$$

如果此时 $\xi=1$ ， $\eta_c$ 可达100%。

$$I_{cm1} = i_{Cmax} \alpha_1(0) = 0$$

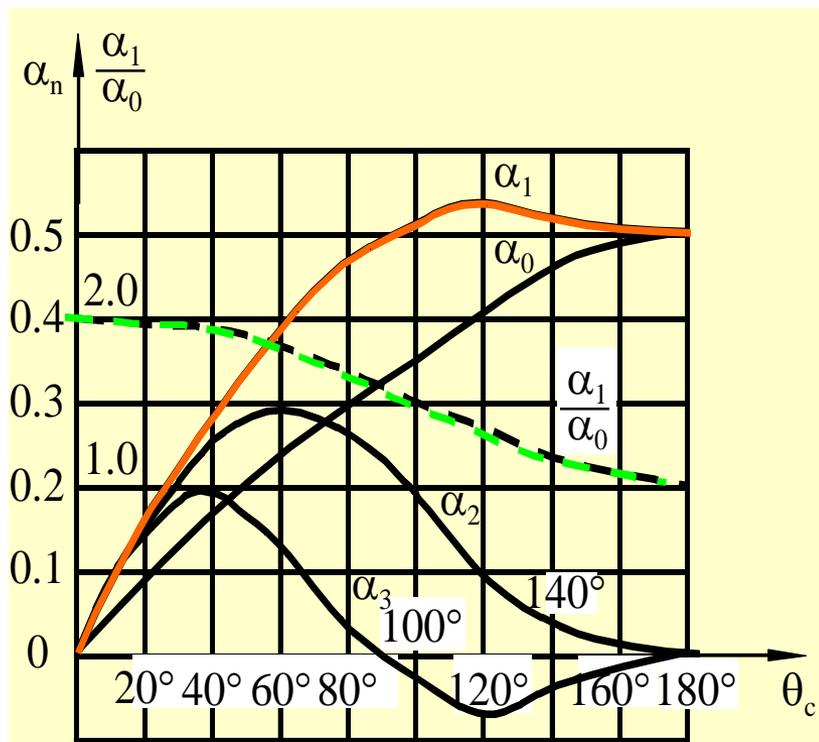


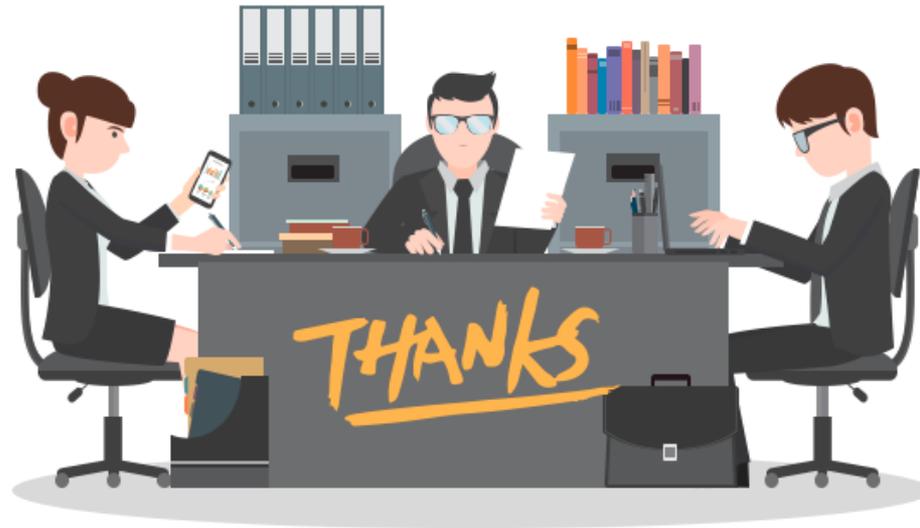
图6-9 尖顶脉冲的分解系数

**为了兼顾功率与效率，最佳通角取70°左右。**



## 小结

1. 掌握**甲乙丙类功率放大器的特点，丙类功放的特点和优点；**
2. **谐振功率放大器电路基本结构及其工作原理，基极反偏，导通角，谐振回路。**
3. **谐振功放获得高效率的条件，需要借助于集电极余弦脉冲的分解。谐振功放的功率关系；**



*Thank You !*

Q & A