

# 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. 5调谐功率放大器的实用电路

---

调谐功率放大器的管外电路包括:

- 直流馈电电路
- 自给偏压
- 滤波匹配网络

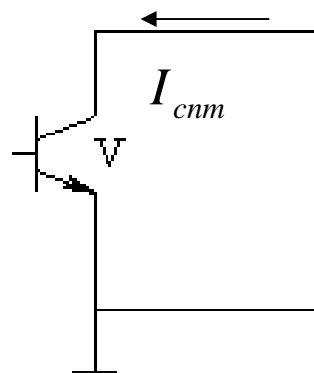
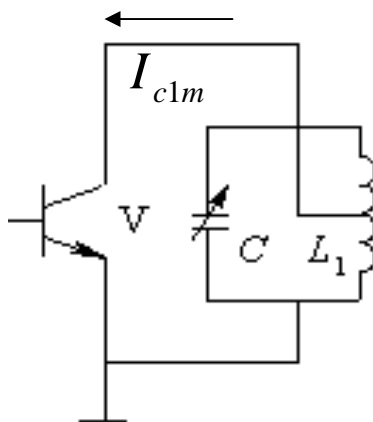
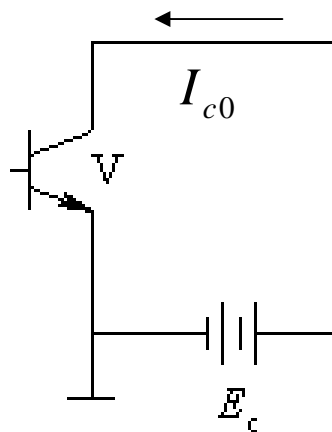
其作用:

- (1) 保证晶体管各电极获得相应的馈电电源;
- (2) 通过匹配网络将交流输出功率有效地传输到负载。

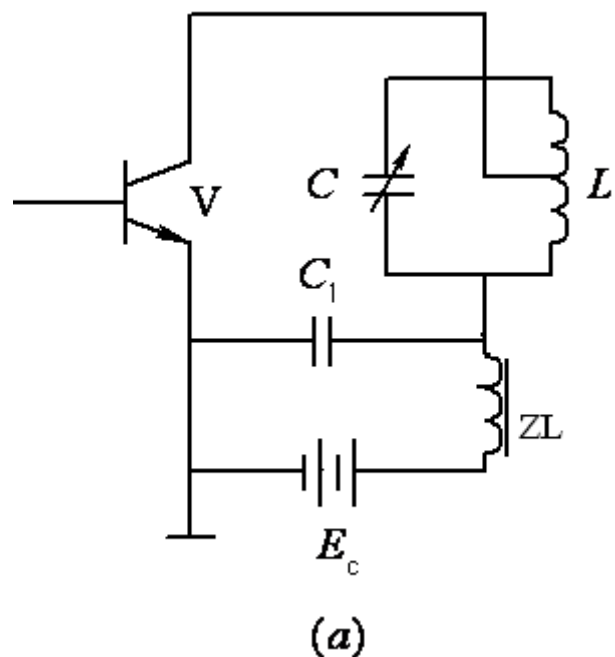
## 3.6.1 直流馈电电路

### 1、馈电原则——直流和交流信号有各自正常的通路

- (1) 直流 $I_{c0}$ 由 $E_c$ 顺畅地输置集电极。
- (2) 谐振基频 $I_{c1m}$ 只应在负载回路上产生电压降，其余部分对 $I_{c1m}$ 应短路。
- (3) 保证外电路对高频谐波分量呈短路，不消耗功率。

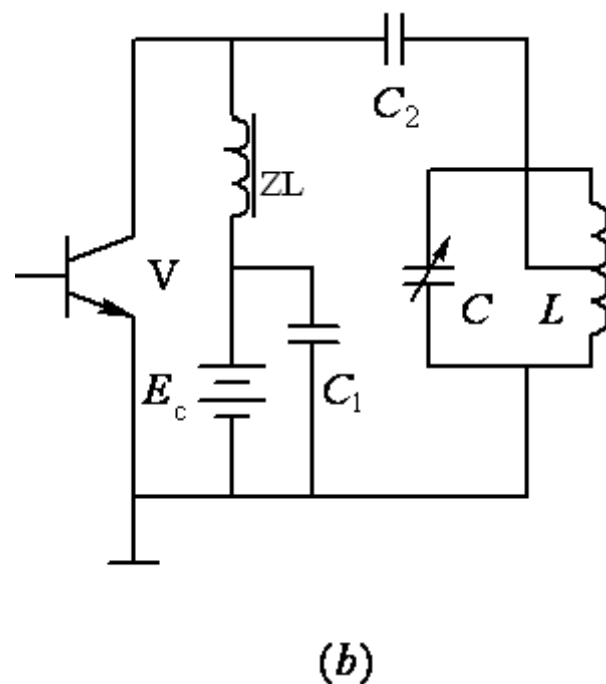


## 2、集电极馈电电路



(a) **串馈**：晶体管、电源、谐振回路三者串联连接

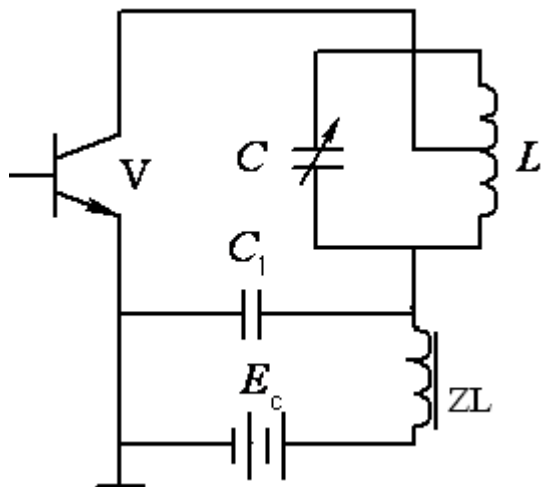
$ZL$ 是高频扼流圈，“通直流、阻高频”  
 $C_1$ 是旁路电容，“阻直流、通高频”



(b) **并馈**

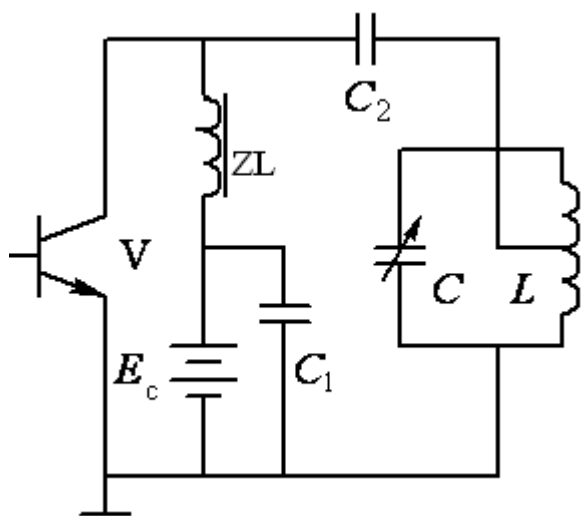
$C_1$ 是旁路电容；  
 $C_2$ 是隔直流电容

## 比较:



**串馈电路**中，谐振回路通过 $C_1$ 接地，它们对地的分布电容不会影响谐振频率，因此串馈电路适于工作在**频率较高**的情况。

但谐振回路元件不能直接接地，调整不便。



**并馈电路**中，谐振回路元件可以直接接地，在电路板上安装比串馈电路方便。

但 $ZL$ 、 $C_2$ 对地的分布电容直接影响回路的谐振频率，限制放大器在更高频段工作。

### 3. 扼流圈、旁路电容的选择

---

□ 一般扼流圈的阻抗应比相应支路的阻抗大一个数量级，而旁路电容应比相应支路小一个数量级

□ 串馈: 
$$X_{C_1} = \left( \frac{1}{5 \sim 20} \right) R_C, \quad X_{ZL} = (5 \sim 20) R_C$$

□ 并馈: 
$$X_{C_2} = \left( \frac{1}{5 \sim 20} \right) R_C, \quad X_{ZL} = (5 \sim 20) R_C$$

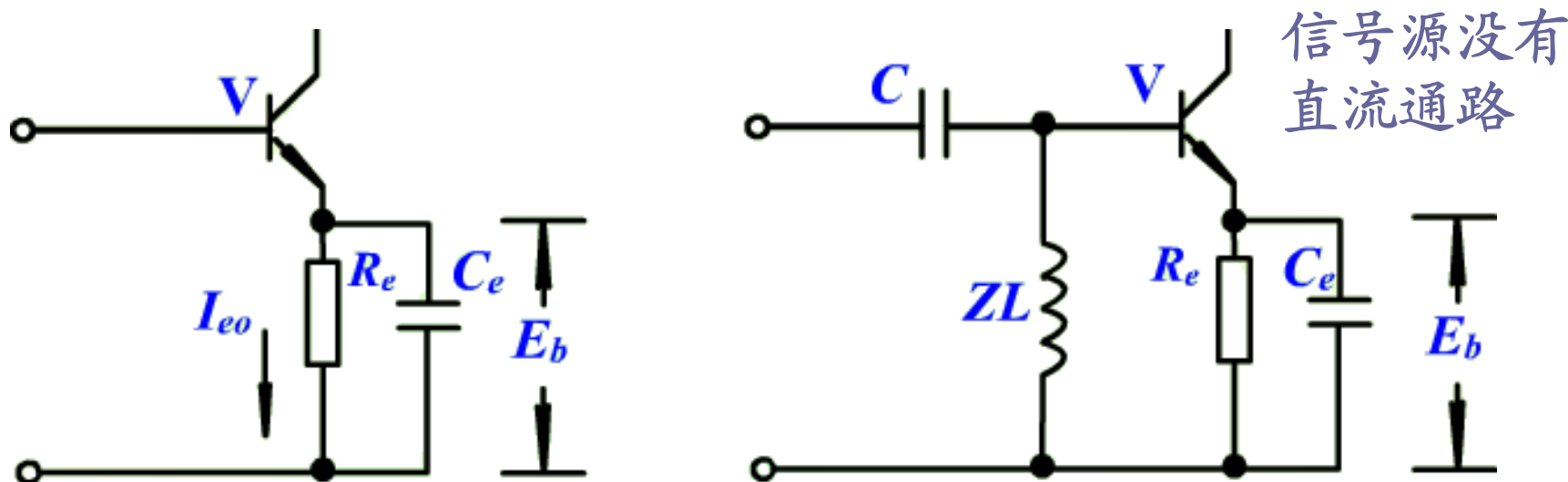
经验公式

### 3.6.2 基极的自给偏压

---

丙类放大器基极电路的电源 $E_b$ ，很少采用独立电源，而多采用射极或基极电流的直流成分，通过一定的电阻造成压降，称为自给偏压。

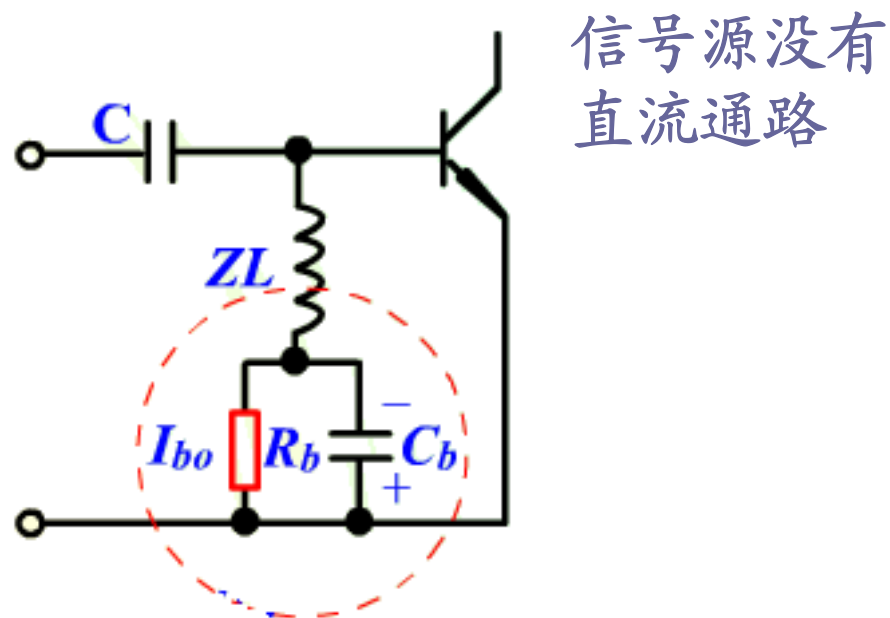
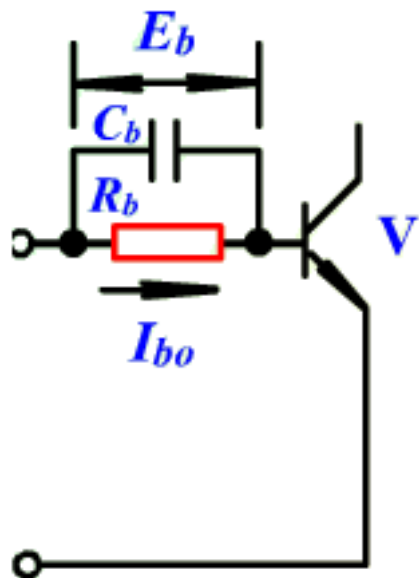
# 1. 射极电流自给偏压



射极电流的直流成分  $I_{e0}$  通过偏置电阻  $R_e$  形成电压  $I_{e0}R_e$ ，其极性对晶体管是个反偏压，调整  $R_e$  可以改变偏压的大小。  
 $C_e$  对交流旁路，其放电时间常数应足够大，以保证偏压不随交流波动。



## 2. 基极电流自给偏压



基极直流成分  $I_{b0}$  通过  $R_b$  造成的电压  $I_{b0}R_b = E_b$ , 对基极是个反偏压。  
调整  $R_b$  可以改变偏压的大小

### 3. 说明

---

1) 四种偏置电路中，加到 $b-e$ 间的直流偏置电压均随输入信号电压振幅的大小而变化。

2) 当未加输入信号时，电路的偏置均为零。当输入信号电压由小加大时，加到 $b-e$ 间的直流偏置电压均向负值方向增大。这种偏置电压随输入信号电压振幅而变化的特性称为自给偏置效应。

### 3.5.3 输入、输出匹配网络

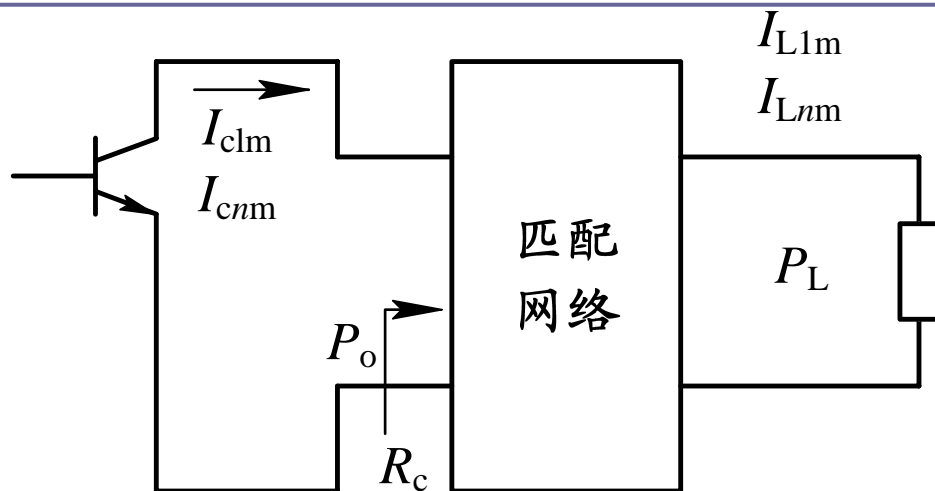
---

为了使功率放大器具有最大的输出功率，除了正确设计晶体管的工作状态外（如临界状态），还必须具有良好的输入、输出匹配网络。

**输入匹配网络：**信号源输出阻抗=放大器输入阻抗  
以获得最大的激励功率。

**输出匹配网络：**将负载调节到放大器所需的最佳负载电阻  
以保证放大器传输到负载的功率最大

## 对输出匹配网络的主要要求:



1) 匹配网络应有**选频作用**，充分滤除不需要的直流和谐波分量，以保证外接负载上仅输出高频基波功率。

2) 匹配网络还应具有**阻抗变换作用**，以保证放大器工作在所设计的状态。

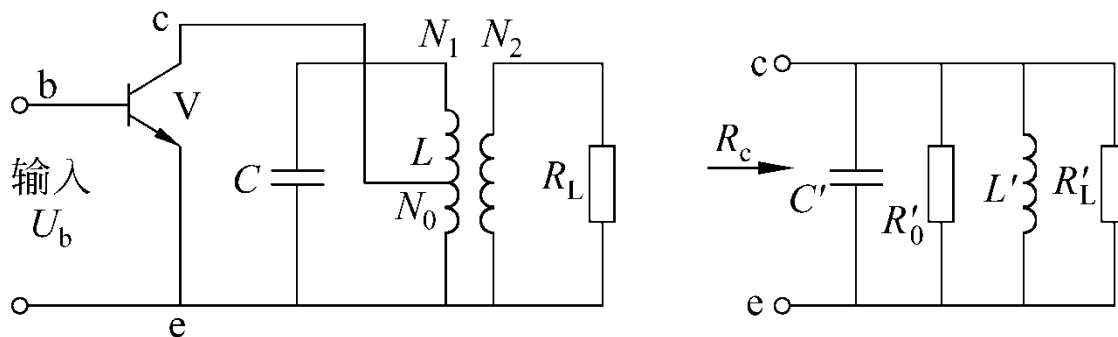
3) 匹配网络应能将功率管输出的信号功率高效率传送到外接负载，即要求**匹配网络的效率（槽路效率  $\eta_L$ ）**高。

## 匹配电路形式:

1. 并联谐振回路匹配电路
2. 滤波器型匹配电路

# 1. 并联谐振回路匹配电路

## 1) 电路



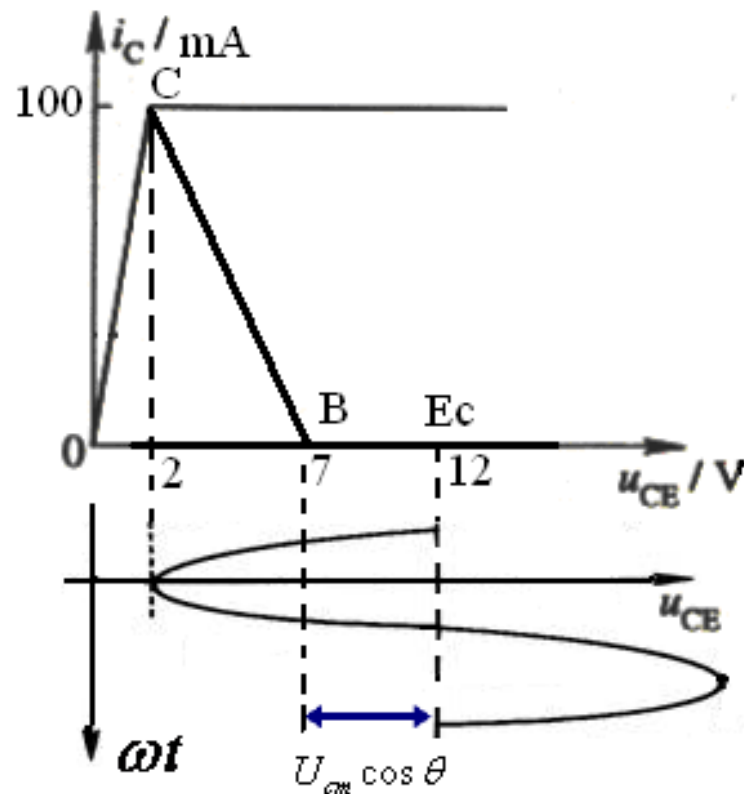
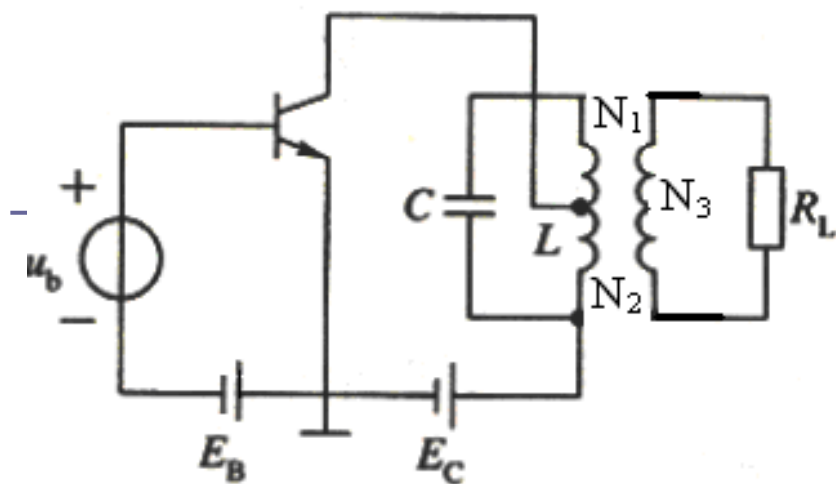
## 2) 最佳负载电阻 $R_{cp}$ 的估算

放大器工作在临界状态的等效电阻，就是放大器阻抗匹配所需的**最佳负载电阻**。

$$U_{cm} = E_c - U_{ces}$$

$$\text{因为 } P_o = \frac{1}{2} I_{c1m} U_{cm} \Rightarrow I_{c1m} = \frac{2P_o}{U_{cm}} = \frac{2P_o}{E_c - U_{ces}}$$

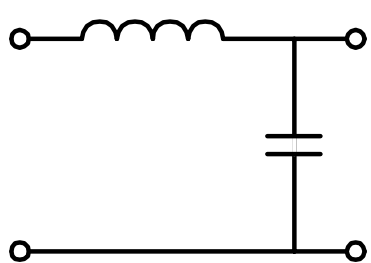
$$\text{所以 } R_{cp} = \frac{(E_c - U_{ces})^2}{2P_o}$$



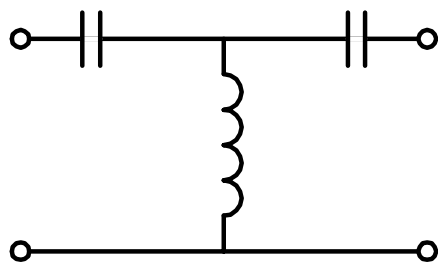
- 已知谐振功放如左图所示，要求其工作状态如右图。已知  $R_L=100 \Omega$ ,  $f_0=30\text{MHz}$ ,  $B_{0.7}=1.5\text{MHz}$ ,  $C=100\text{pF}$ ,  $E_c=12\text{V}$ ,  $N_1+N_2=60$ , 求  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  (假定忽略谐振回路自身损耗)

## 2、滤波器型匹配网络

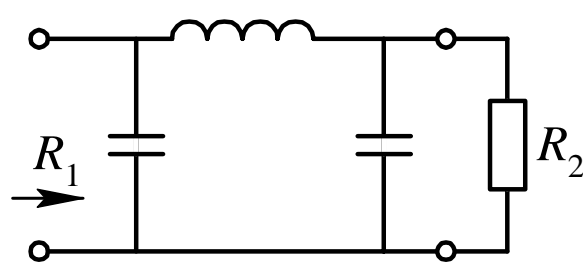
在甚高频或大功率输出级，广泛利用 $L$ 、 $C$ 变换网络来实现调谐和阻抗匹配。从结构来看，可分为L型、T型、 $\Pi$ 型三种类型。



(a)



(b)

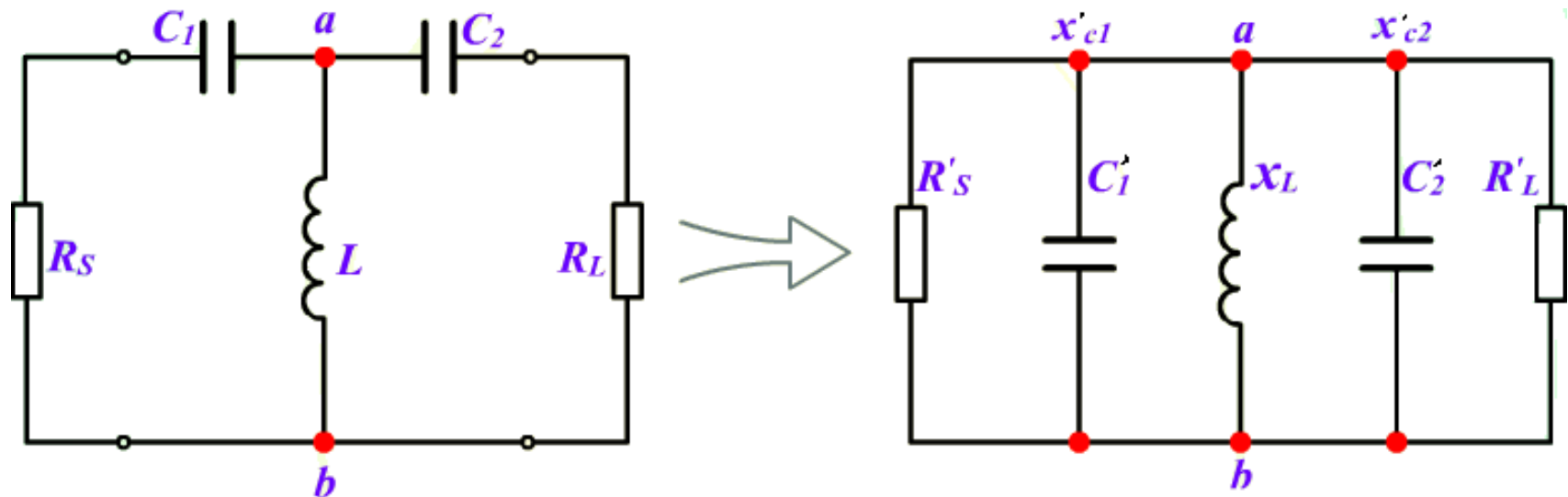


(c)

(a) L型; (b) T型; (c)  $\Pi$ 型



## 仅分析T型网络



利用电路的串并联等效变换，将其变换为并联电路

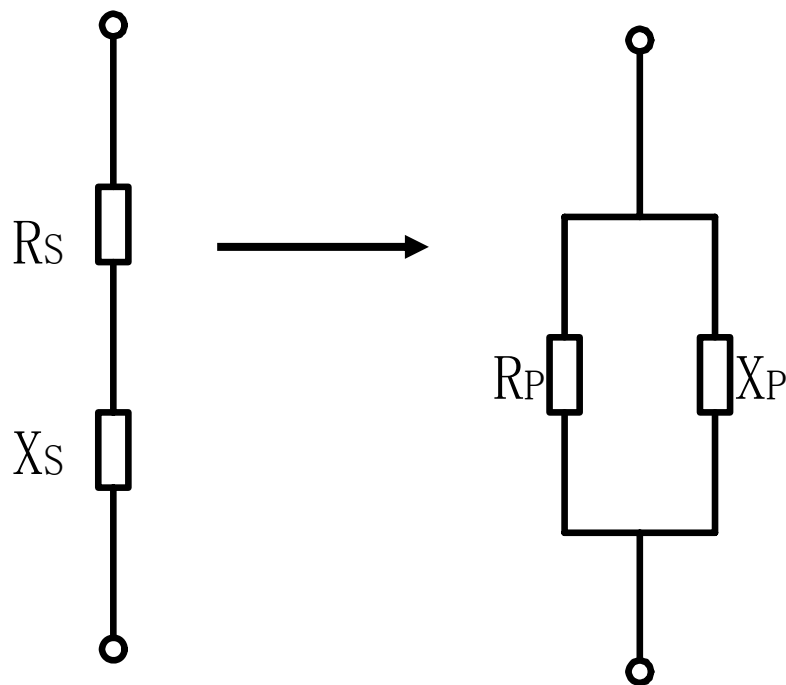
其中用到串、并联阻抗的等效变换：

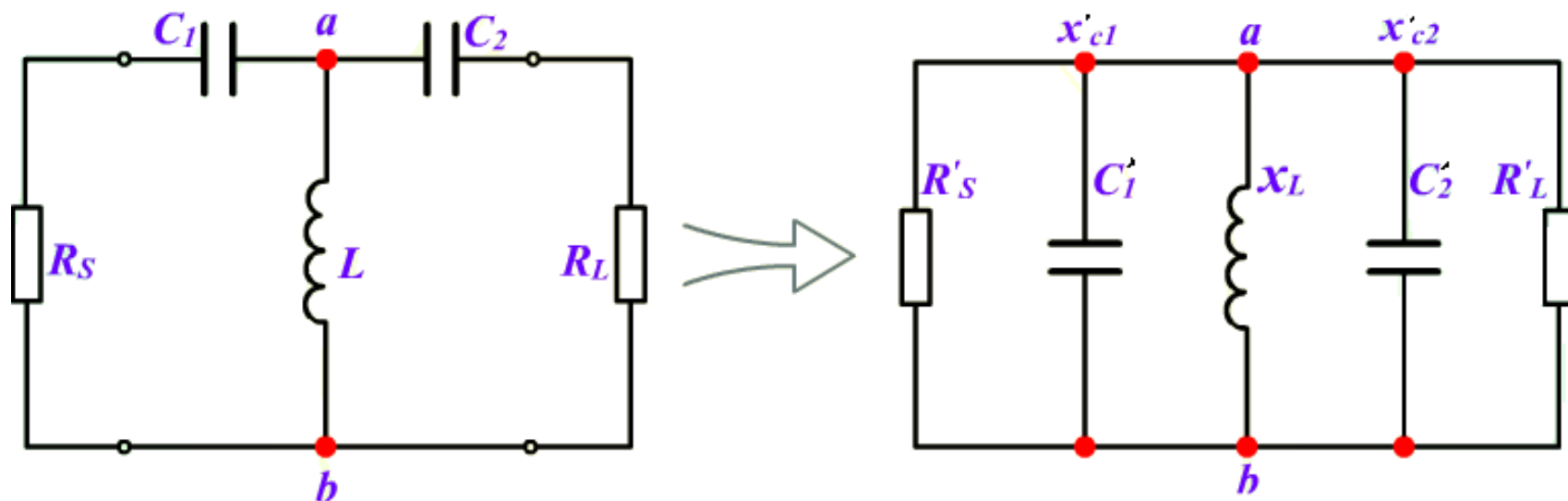
$$\text{由 } R_s + jX_s = \frac{jR_p X_p}{R_p + jX_p}$$

$$\therefore R_s \approx \frac{R_p}{1+Q^2}, X_s \approx \frac{X_p}{1+\frac{1}{Q^2}},$$

$$\text{其中 } Q = \frac{X_s}{R_s} = \frac{R_p}{X_p}$$

$$\therefore R_p = (1+Q^2) R_s, X_p = (1+\frac{1}{Q^2}) X_s$$



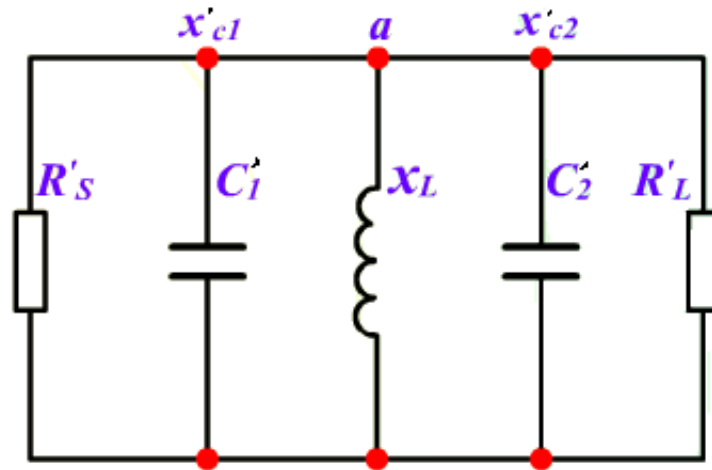


$$R'_s = (1 + Q_1^2) R_s, \quad X'_{C_1} = \frac{1 + Q_1^2}{Q_1^2} X_{C_1}, \quad Q_1 = \frac{X_{C_1}}{R_s} \left( X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} \right)$$

$$R'_L = (1 + Q_2^2) R_L, \quad X'_{C_2} = \frac{1 + Q_2^2}{Q_2^2} X_{C_2}, \quad Q_2 = \frac{X_{C_2}}{R_L} \left( X_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} \right)$$

T型网络中的各个参数满足什么条件时，能够实现匹配？

$$X_L = \omega L, X'_{C1} = \frac{1}{\omega C'_1}, X'_{C2} = \frac{1}{\omega C'_2}$$



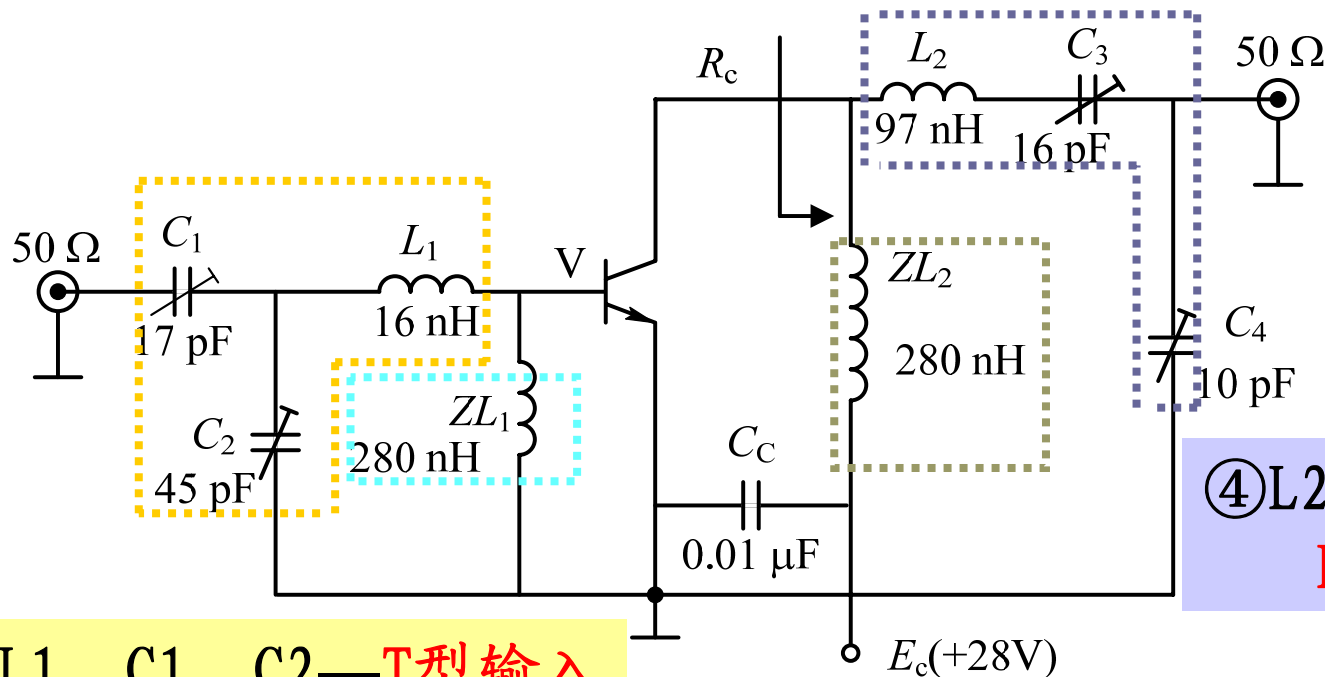
(1) 根据匹配条件:  $R'_S = R'_L$

(2) 根据谐振条件:  $\frac{1}{X'_{C1}} + \frac{1}{X'_{C2}} = \frac{1}{X_L}$

T型网络的工作条件为:  $\frac{R_L}{R_S} (1 + Q_{C2}^2) > 1, Q_{C2} = \frac{x_{C2}}{R_L}$

推导过程: P77. 式3-57——3-64

### 3.5.4 高频功率放大器实用电路举例



①  $L_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ —T型输入

④  $L_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ —  
L型输出

② 基极采用自给电源偏压，由高频扼流圈  $ZL_1$  中的直流电阻产生小的负偏压  $E_b$ 。

③ 集电极回路，通过  $ZL_2$  接直流电源，构成并馈电路

# 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

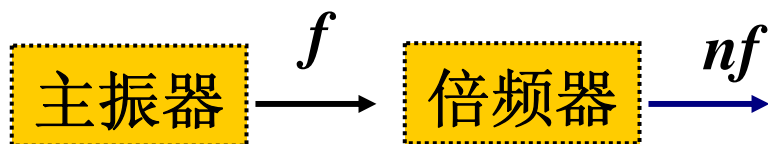
3.7 倍频器

3.8 集成高频功率放大电路及应用简介

## 3.7 倍频器

---

倍频器是一种将输入信号频率成整数倍（2倍、3倍…… $n$ 倍）增加的电路。它主要用于甚高频无线电发射机或其它电子设备。



- 一、为什么采用倍频器
- 二、倍频器的种类
- 三、丙类倍频器的工作原理
- 四、使用时注意问题

## 一、为什么采用倍频器

---

1. 降低设备的主振频率。由于振荡器频率愈高稳定性愈差，一般采用频率较低而稳定度较高的晶体振荡器，以后加若干级倍频器达到所需频率。一般具有高稳定性的晶体频率通常不超过5 MHz。所以工作频率高，要求稳定性又严格的通信设备和电子仪器就需要倍频。

2. 对于调相或调频发射机，利用倍频器可以加大相移或频移，即可增加调制度。

3. 可以提高发射机的工作频率稳定性。



## 二、倍频器的种类

---

1. 丙类倍频器

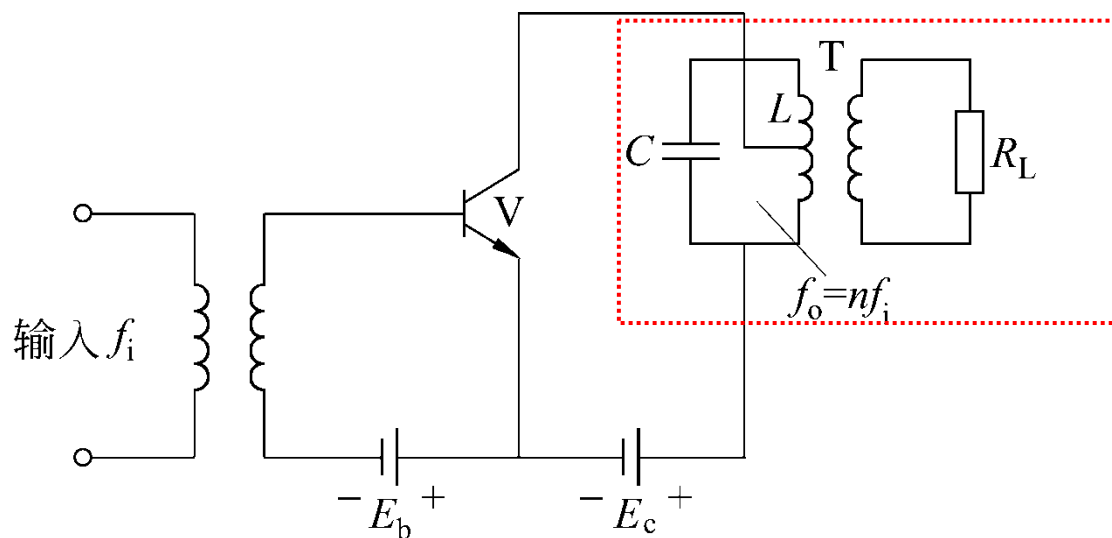
2. 参变量倍频器

(利用晶体管PN结结电容随电压变化的非线性)

本节主要介绍用丙类放大器构成的倍频器，即所谓“丙类倍频器”。

### 三、丙类倍频器的工作原理

丙类放大器晶体管集电极电流脉冲中含有丰富的谐波分量。如果集电极调谐回路谐振在二次或三次谐波频率上，放大器就主要有二次或三次谐波电压输出。这样丙类放大器就成了二倍频器或三倍频器。



丙类倍频器的原理电路

设倍频器输入电压为  $u_{be} = U_{bm} \cos \omega t - E_b$

输出电压为  $u_{ce} = E_c - U_{cnm} \cos n\omega t$

式中  $U_{cnm}$  是谐振回路两端  $n$  次谐波电压幅值。

倍频器输出的功率和效率为

$$P_{on} = \frac{1}{2} I_{cnm} U_{cnm} = \frac{1}{2} U_{cnm} \alpha_n(\theta) I_{c\max}$$
$$\eta_{cn} = \frac{\frac{1}{2} I_{cnm} U_{cnm}}{\frac{1}{2} I_{c0} E_c} = \frac{\alpha_n(\theta) U_{cnm}}{\alpha_0(\theta) E_c}$$

丙类倍频器的输出功率和效率将远低于丙类放大器，且随着次数的增大而迅速降低。

$$\frac{P_{o2}}{P_{o1}} = \frac{\alpha_2(\theta)}{\alpha_1(\theta)} \approx 0.7$$

P60图3-4

## 四、使用时注意问题

---

### 1. 选择适当的导通角 $\theta$

导通角  $\theta$  为  $60^\circ$  或  $40^\circ$  时, 二次或三次谐波系数最大, 即此时输出的功率和效率也最大。

最佳导通角  $\theta$  与倍频次数的关系为  $\theta_n = 120^\circ / n$

谐波次数  $\uparrow$ ,  $\theta \downarrow$

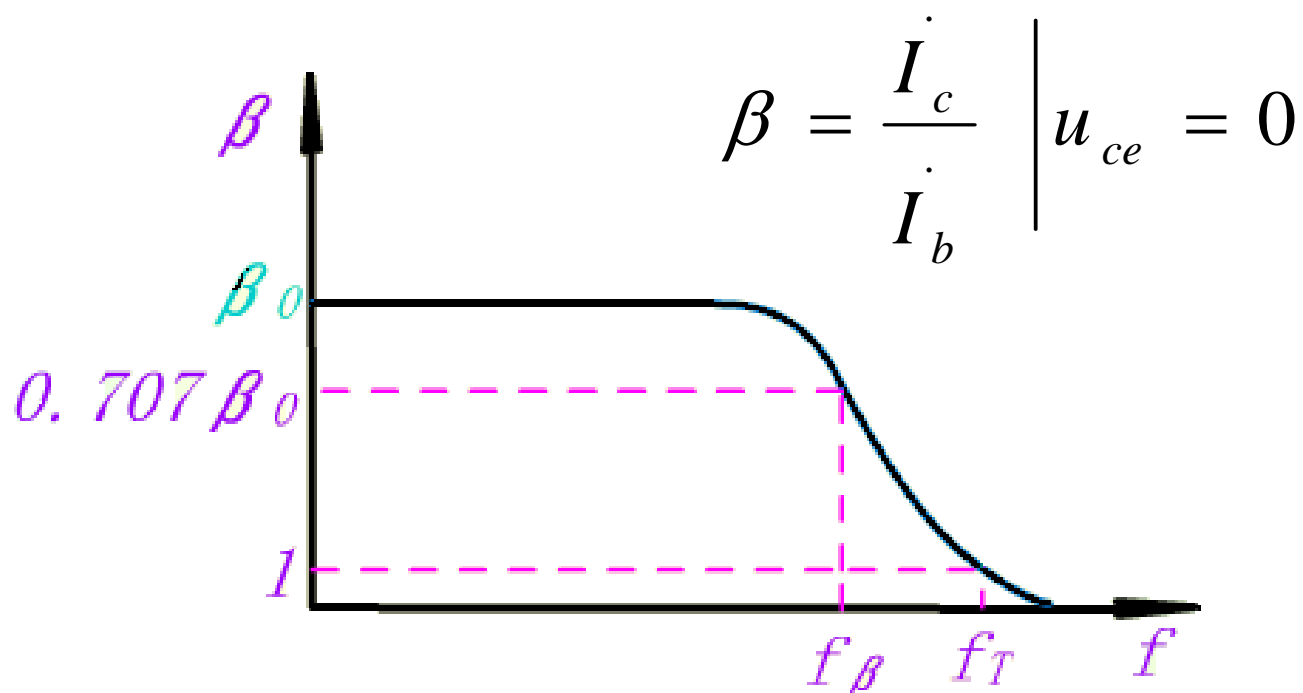
### 2. 谐波次数越高, $\alpha$ 越小

一般倍频值为常为  $2 \sim 3$ . 若要提高倍频次数, 可采用多级倍频。参量倍频器的次数可达40。

### 3.7 功率晶体管的高频效应

□ 晶体管工作在高频时性能要复杂的多。

1. 电流放大倍数  $\beta$ :



## (1) 在低频时, 认为 $\beta$ 是一个常数 $\beta_0$

---

$f < 0.5 f_\beta$  — 晶体管低频工作区

$f_\beta$  是指  $\beta$  下降到  $0.707\beta_0$  时所对应的频率, 称为  $\beta$  的截止频率。

在低频区, 可不考虑晶体管电抗元件对外电路的影响。

(2)  $0.5 f_\beta < f < 0.2 f_T$  — 中频区

$\beta$  随频率升高而呈下降趋势。

$f_T$  指  $\beta$  下降到 1 时的频率, 称为晶体管的特征频率。

在中频区, 应考虑晶体管结电容对外电路的影响。

### (3) $f > 0.2 f_T$ —— 高频区

在此工作区，要考虑结电容的影响，还要考虑各级引线电感及载流子在基区渡越时间造成的影响。

$f > f_\beta$  时， $\beta$  随  $f$  的增加而直线下降，并且满足  $f_T = f\beta$

(4) 当  $f > f_T$ ，晶体管失去放大电流的能力，但仍有电压放大能力。

当  $f = f_{\max}$ ，晶体管完全失去放大作用  $f_{\max} \approx \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\beta_0}{r_{b'b} r_{b'e} C_{b'e} C_{b'c}}}$   
 $f_{\max}$  称为晶体管的最高频率或极限频率。

---

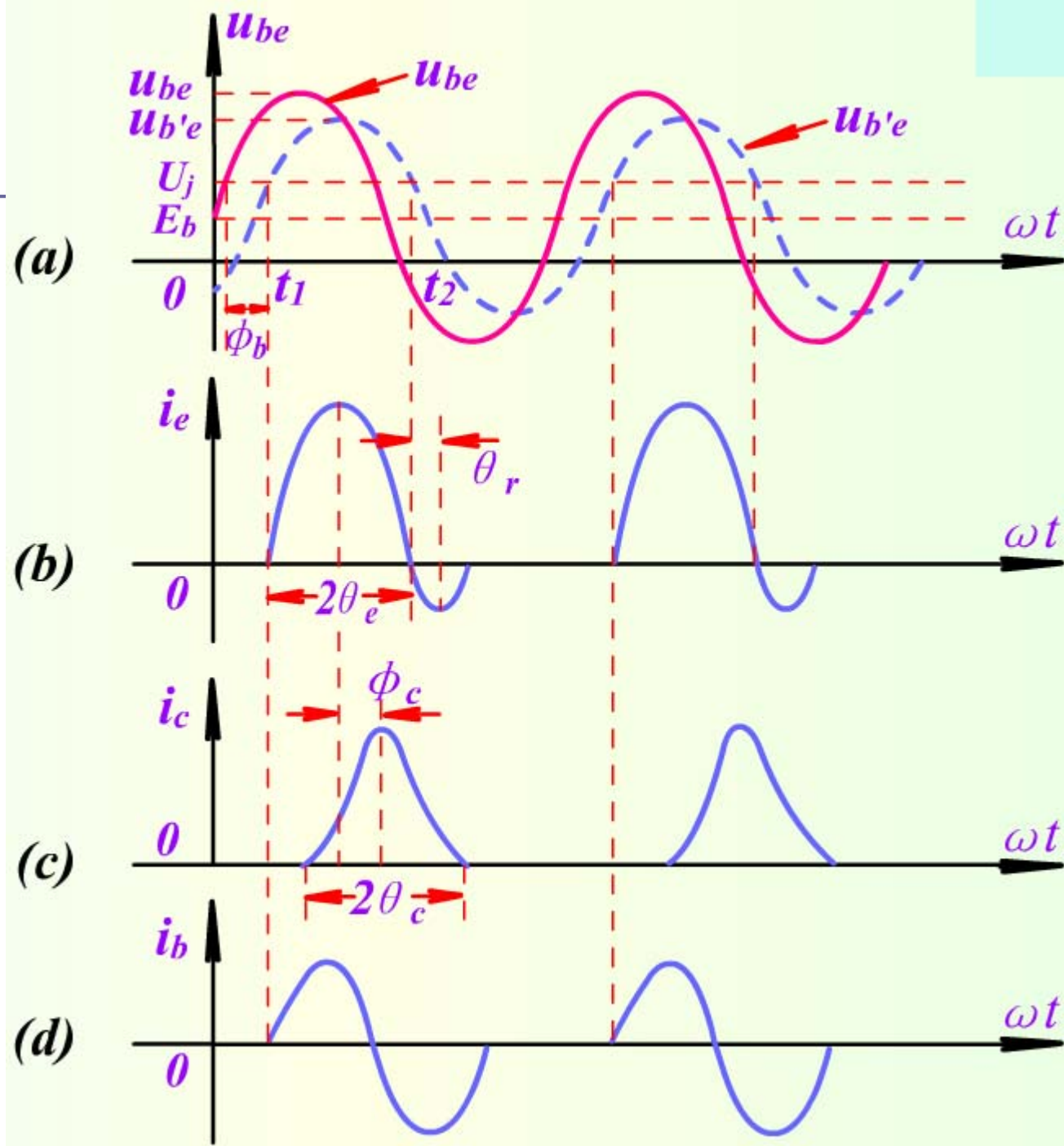
2. 载流子渡越时间的影响:

低频时, 认为  $i_b$ 、 $i_c$  同时发生,  $\frac{i_c}{i_b} = \beta$

高频时, 由于基区载流子渡越时间的影响:

- (1) 发射极处于截止状态后,  $i_e$  有反向电流;
- (2)  $i_c$  比  $i_b$ 、 $i_e$  滞后一个相角, 脉冲展宽, 幅值也比低频时小得多;
- (3)  $I_b = I_e - I_c$ , 直流分量减少。





---

### 3. 对饱和压降的影响

工作频率增加时，饱和压降显著增加。

综合结论：P70-71 ①——⑤

## 本章小结

---

调谐、选频、滤波、匹配，以获得高输出功率和效率是本章的几个核心问题。

1. 高频调谐功率放大器可以工作在甲类、乙类或丙类状态。丙类工作状态时输出功率虽不及甲类和乙类的大，但效率高，节约能源，所以是高频功放中经常选用的一种电路形式。

2. 丙类调谐功放效率高的原因是晶体管导通时间短，集电极的功耗减小。但导通角越小，输出功率也越小。因此，选择合适的导通角是丙类调谐功率放大器在兼顾输出功率和效率时应着重考虑的一个问题。

3. 由于丙类工作，导通角小于 $90^\circ$ ，集电极电流 $i_c$ 是余弦脉冲，但由于槽路的选频作用，仍能得到正弦波形的输出。

4. 调谐功放的工作状态和性能分析常采用折线分析法，来分析调谐功放的动态特性、负载特性、调制特性、放大特性等。

5. 丙类调谐功放的基极偏压是负偏压，常采用自给偏压来实现。集电极采用直流馈电线路。

6. 为使放大器具有最大的输出功率，必须具有良好的输入、输出匹配网络。

7. 倍频器：利用丙类功率放大器，使集电极回路谐振于 $nf$ 。

8. 高频效应

1、2、3、4是重点；5、6、7、8了解。

# 本章要点:

---

## □ 丙类高频调谐功率放大器的三种工作状态:

- (1) 欠压状态
- (2) 临界状态
- (3) 过压状态

## □ 高频调谐功率放大器的外部特性: 指外部参数对放大器的工作状态和性能所造成的影响。

- (1) 负载特性
- (2) 放大特性
- (3) 基极调制特性
- (4) 集电极调制特性

---

## □ 主要参数关系的公式

- (1) 电流导通角
- (2) 集电极脉冲电流
- (3) 集电极输出功率
- (4) 直流电源提供功率
- (5) 集电极功耗
- (6) 集电极效率
- (7) 槽路效率