第四章　高频功率放大器

通信电路与系统

教学目标：

1）了解高频功率放大器的功能、分类及技术指标

2）掌握丙类高频功率放大器的工作原理及折线分析法

3）了解丙类功率放大电路

教学内容：

4.1 概述

4.2 丙类高频功率放大器的工作原理

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析方法

4.4 丙类高频功率放大电路

4.1 概述

通信电路与系统

1. 高频功率放大器功能、特点、分类

1）**功能**：

- 用小功率高频输入信号去控制高频功率放大器，将直流电源能量转换为大功率高频能量输出。

2）**特点**：

- 工作频率高
- 相对频带窄

调频广播载波88~108MHz，信号带宽180kHz

3）**分类**：

- 按频带：窄带功率放大器与宽带功率放大器
- 按放大特性：非线性功放与线性功放
- 按工作类型：甲（A）、乙（B）、丙（C）、丁（D）、戊（E）类等

4.1 概述

2. 主要技术指标

- 输出功率：输出高频信号功率
- 效率：输出高频功率与直流提供的功率之比
- 谐波抑制度：

说明：

1）高频功放通常位于发射机的末级，根据不同应用，输出功率有不同要求，差异较大；

2）效率越高越好，可以减少能量损耗；

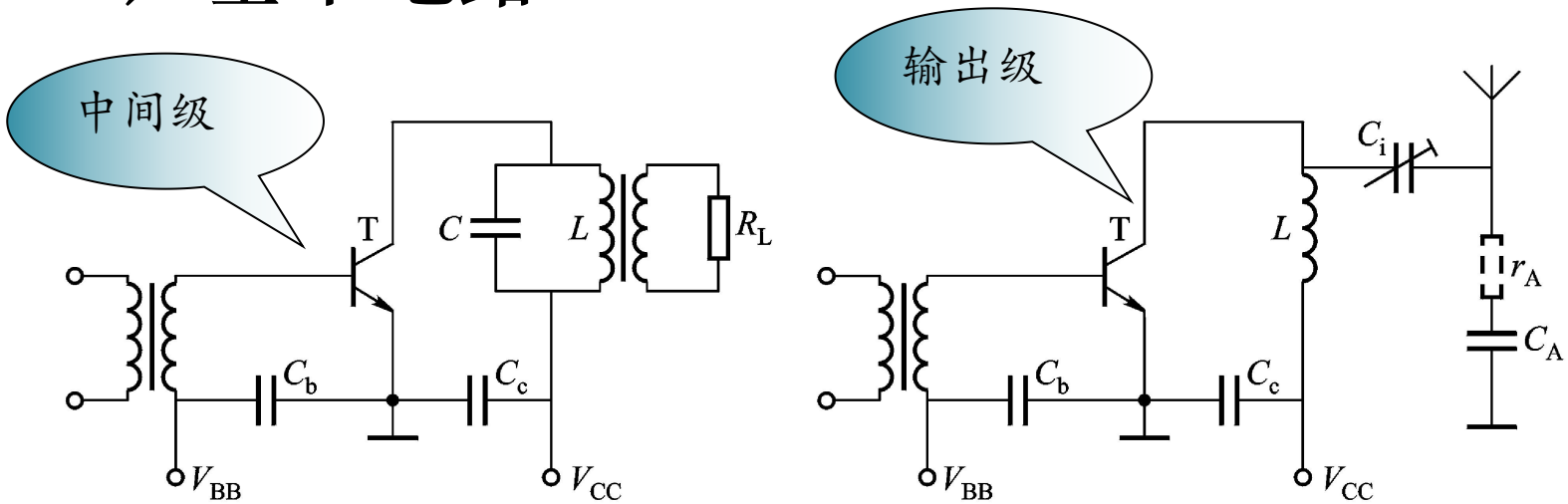
3）对于工作于非线性的功放，会产生谐波，利用谐波抑制度参数来衡量对谐波的抑制能力。

4.2 丙类高频功率放大器的工作原理

通信电路与系统

1. 基本电路及特点：

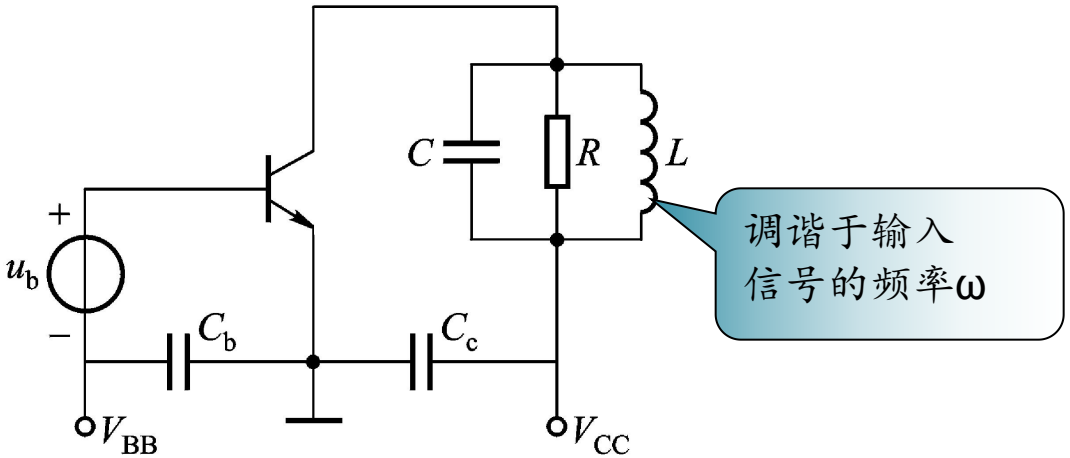
1）基本电路



(a) (b)

丙类功率放大器主要用于发射机中，可分为中间级和输出级，其中，中间级负载为包含后级输入阻抗的LC并联回路，输出级负载为天线，也可等效为LC并联回路，分析电路时采用简化原理电路。

4.2 丙类高频功率放大器的工作原理



2）特点：

a）为了提高效率，**发射结为负偏置**，由V_{BB}保证。**晶体管在信号的一个周期中只有部分时间是导通的，晶体管的输出电流为余弦脉冲**。

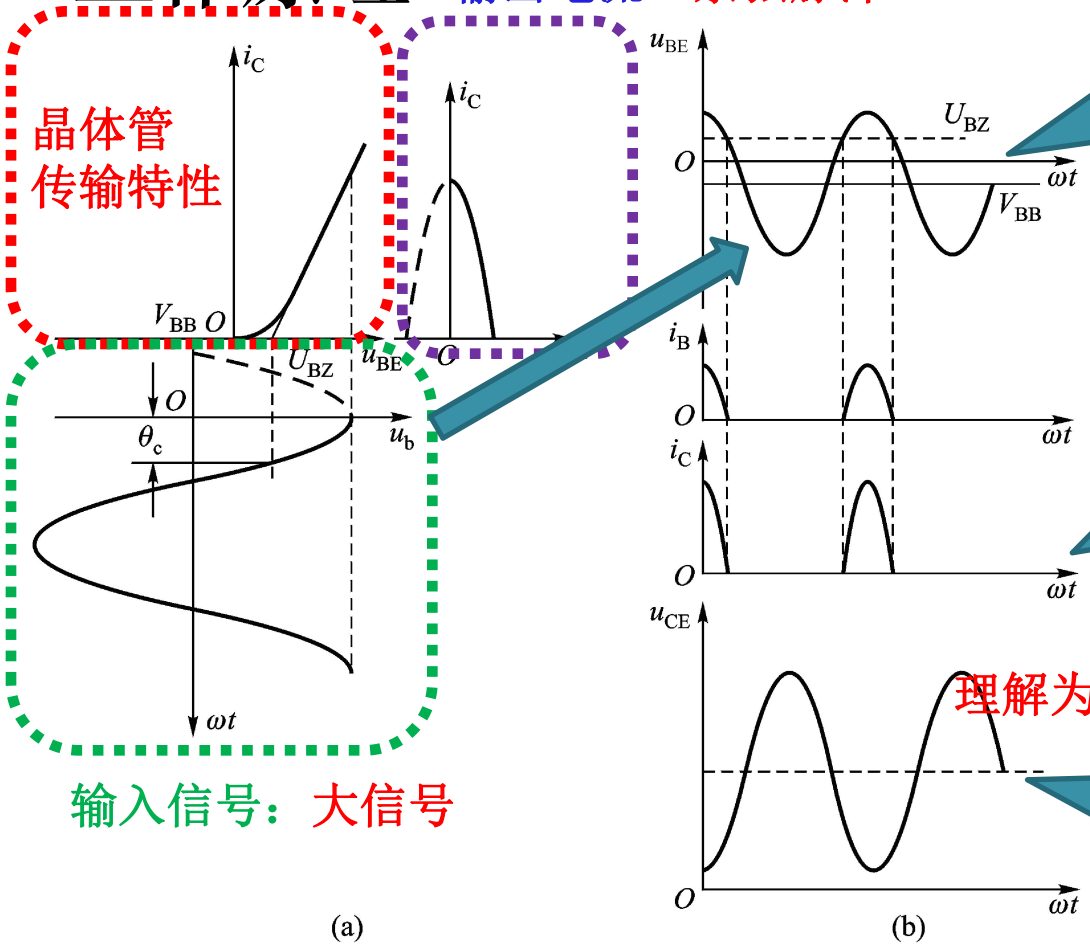
b）负载为LC并联谐振回路，一是为了从余弦脉冲电流中**取出基波分量**，二是为了实现前后级的**阻抗变换**。

4.2 丙类高频功率放大器的工作原理

通信电路与系统

2. 工作原理

输出电流：余弦脉冲



由BE结电压波形可知，电压小于U_{BZ}时，晶体管截止

输出电流为余弦脉冲

理解为什么能输出余弦电压？

输出电压为余弦脉冲的基波分量

输入信号：大信号

解释：为什么丙类功放能提高效率。

4.2 丙类高频功率放大器的工作原理

工作原理说明：

1）发射结采用负偏置，输入**幅度较大的**余弦信号u_b=$U_{bm}\cos\omega t$时，晶体管BE结电压u_{BE}=V_{BB}+$U_{bm}\cos\omega t$，u_{BE}大于导通电压U_{BZ}时，晶体管才导通，根据晶体管输出特性可知集电极电流**i_C为周期余弦脉冲**。

2）对周期余弦脉冲进行傅里叶级数展开，其包含**直流分量**、**基波分量**和**高次谐波分量**。

$$i_C = I_{C0} + I_{c1m}\cos\omega t + I_{c2m}\cos 2\omega t + \cdots + I_{cnm}\cos n\omega t$$

3）负载采用工作于基波频率的**LC并联谐振回路**，可以选出**基波分量**，保证功率放大器**输出的信号频率与输入信号频率一致**。输出电压可以表示为：

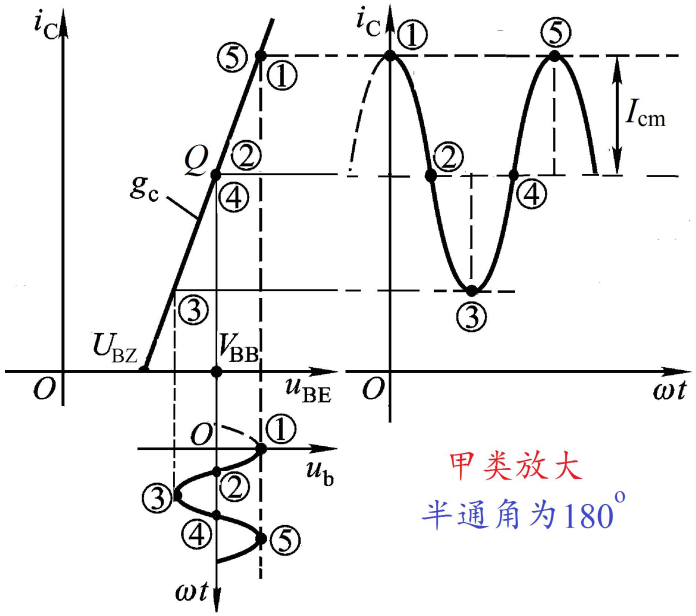
$$u_o = I_{c1m}\cos\omega t \cdot R_P = U_{cm}\cos\omega t$$

其中，$U_{cm} = I_{c1m} \cdot R_P$

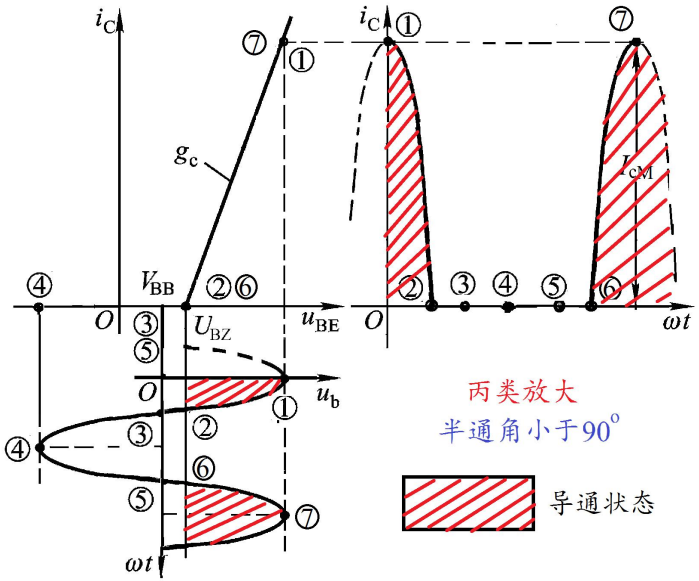
4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

对于丙类高频功率放大器，输入信号幅度较大，BE结反向偏置，晶体管工作于非线性状态，因此，小信号等效电路分析方法已不再适应。

将**晶体管静态特性理想化为折线**后，可以对功率放大器进行定性分析，称之为**折线分析法**。



小信号放大



丙类放大

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

折线分析法基本思路：

1）对晶体管输入、输出等静态特性进行**折线化处理**；

2）求出**余弦电流脉冲**及其各次谐波分量；

3）计算功率放大器的**输出功率、效率**等技术指标；

4）丙类功率放大器动态特性分析（分析负载、晶体管各级电压对功率放大器的工作状态的影响，以及对输出功率、效率等的影响）。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

1. 晶体管特性曲线的理想化

晶体管特性曲线理想化即进行折线化处理，可以折线化处理的原因是：输入的是个大信号，晶体管工作于非线性状态，折线化处理的目的是可以简化晶体管输出电流电压关系的数学表达。

理想化特性曲线基本原理：

① 在放大区，集电极电流和基极电流不受集电极电压影响，仅与基极电压成线性关系。

② 在饱和区，集电极电流与集电极电压成线性关系，而不受基极电压的影响。

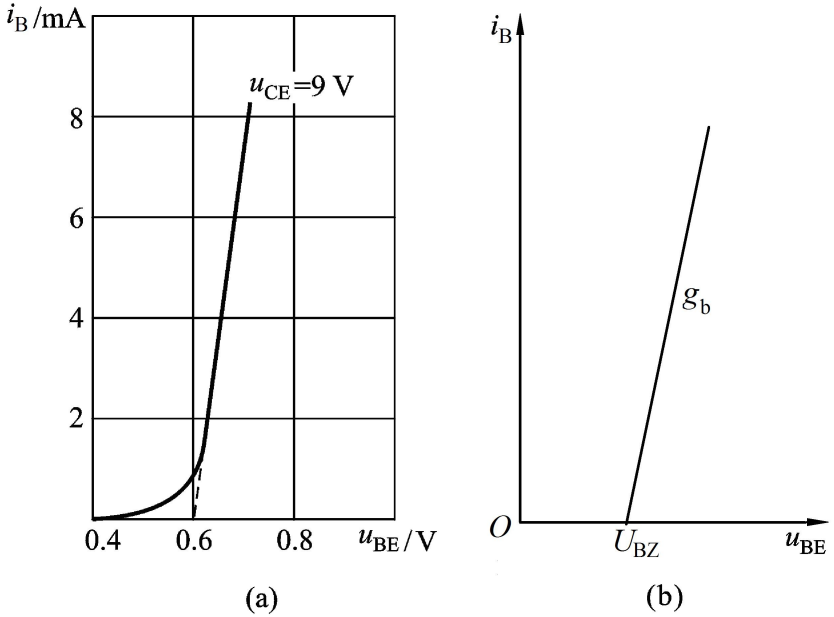
4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

1）输入特性曲线的理想化（i_B~u_{BE}）

图（a）为实际的输入特性曲线，实际上不同u_{CE}会略有差异，但是差异很小，所以只画了一条曲线。

图（b）进行了折线化处理，其中，u_{BZ}为导通电压。



折线化处理后，输入特性表示如下：

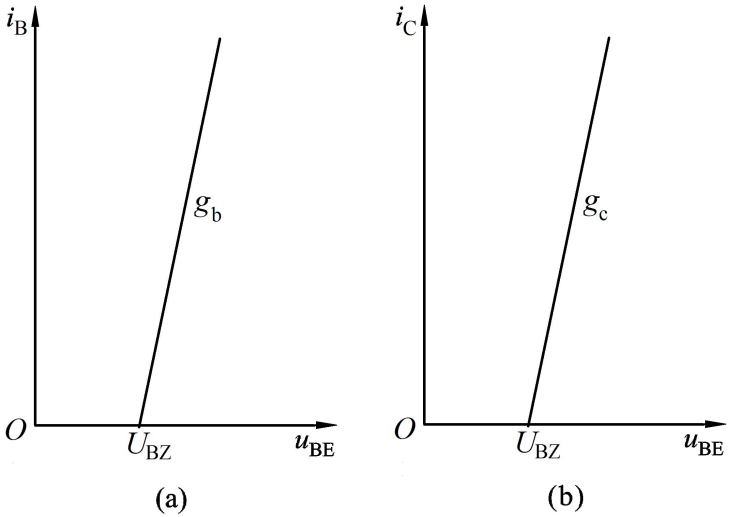
$$i_B = \begin{cases} 0 & (u_{BE} < U_{BZ}) \\ g_b(u_{BE} - U_{BZ}) & (u_{BE} \geq U_{BZ}) \end{cases}$$

其中，g_b为输入特性斜率，$g_b = \Delta i_B / \Delta u_{BE}$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

2）正向传输特性曲线的理想化（i_C~u_{BE}）

理想化正向传输特性曲线（图b）可以看成是将输入特性曲线（图a）斜率乘以β得到。



折线化处理后，正向传输特性表示如下：

$$i_C = \begin{cases} 0 & (u_{BE} < U_{BZ}) \\ g_c(u_{BE} - U_{BZ}) & (u_{BE} \geq U_{BZ}) \end{cases}$$

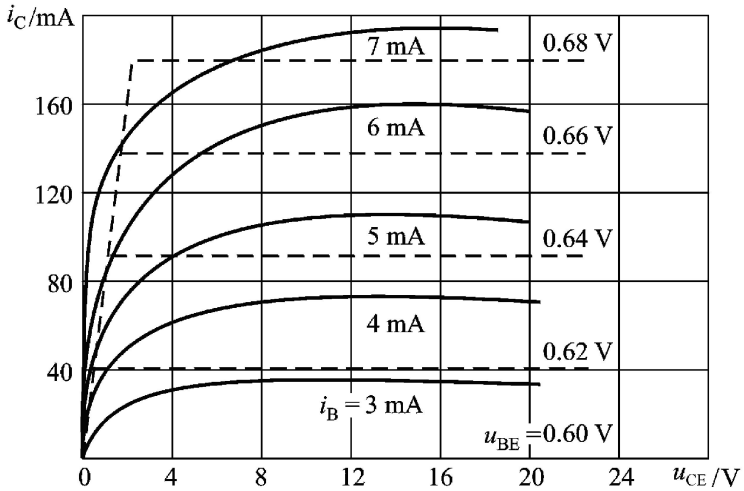
其中，g_c为正向传输特性斜率，也称跨导：

$$g_c = \Delta i_C / \Delta u_{BE} = \beta \cdot g_b$$

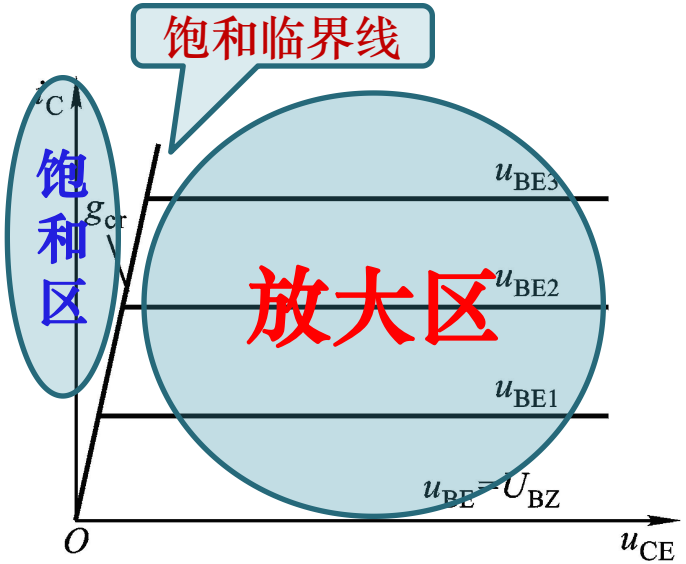
4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

3）输出特性曲线的理想化（i_C~u_{CE}）



(a)



(b)

饱和区： $i_C = g_{cr} u_{CE}$ $\quad g_{cr} = \Delta i_C / \Delta u_{CE}$

放大区： $i_C = g_c (u_{BE} - U_{BZ}) \quad (u_{BE} \geq U_{BZ})$

截止区： $i_C = 0 \quad (u_{BE} < U_{BZ})$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

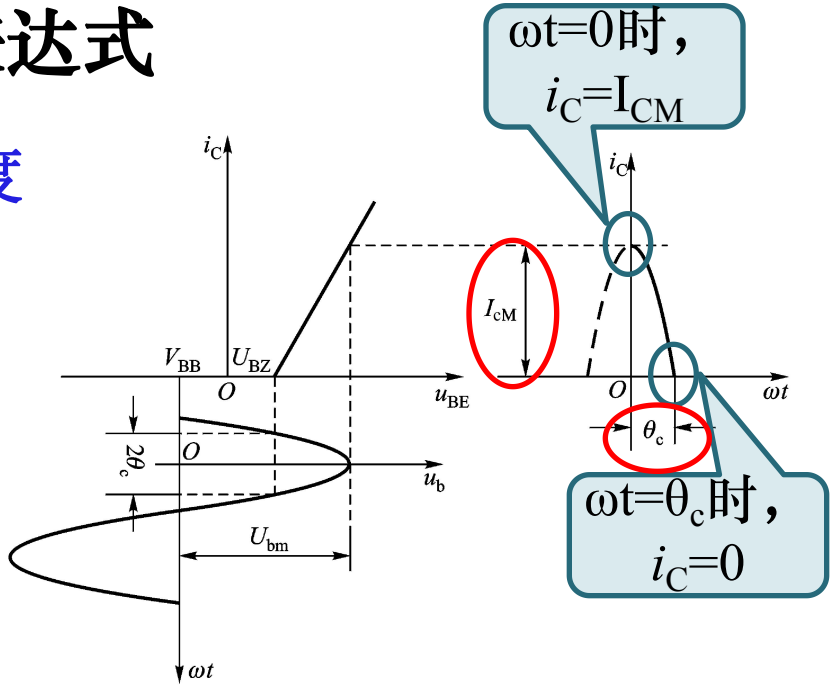
2. 余弦电流脉冲及各次谐波电流

为了计算功率放大器的输出功率和效率，需要先求出余弦电流脉冲及其分解系数。

1）余弦电流脉冲的表达式

余弦电流脉冲由脉冲高度 I_{CM} 和通角 θ_c 来决定。

$$\begin{cases} u_{BE} = V_{BB} + U_{bm}\cos\omega t \\ i_C = \begin{cases} 0 & (u_{BE} < U_{BZ}) \\ g_c(u_{BE} - U_{BZ}) & (u_{BE} \geq U_{BZ}) \end{cases} \end{cases}$$



$$i_C = g_c(V_{BB} + U_{bm}\cos\omega t - U_{BZ})$$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

根据余弦电流脉冲波形的两个特殊点（$\omega t=\theta_c$，$i_C=0$）及（$\omega t=0$，$i_C=I_{CM}$），可以求出脉冲高度I_{CM}和通角θ_c。

$$i_C = g_c(V_{BB} + U_{bm}\cos\omega t - U_{BZ})$$

由$\omega t=\theta_c$时，$i_C=0$，可得：

$$\cos\theta_c = \frac{U_{BZ} - V_{BB}}{U_{bm}}$$

由$\omega t=0$时，$i_C=I_{CM}$，可得：

$$I_{cM} = g_c U_{bm}(1-\cos\theta_c)$$

根据以上两个参数，可得余弦电流脉冲表达式：

$$i_C = I_{cM}\frac{\cos\omega t - \cos\theta_c}{1-\cos\theta_c}$$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

2）余弦电流脉冲的分解系数

余弦电流脉冲是个周期信号，可进行傅里叶级数展开：

$$i_C = I_{C0} + I_{c1m}\cos\omega t + I_{c2m}\cos 2\omega t + \cdots + I_{cnm}\cos n\omega t$$

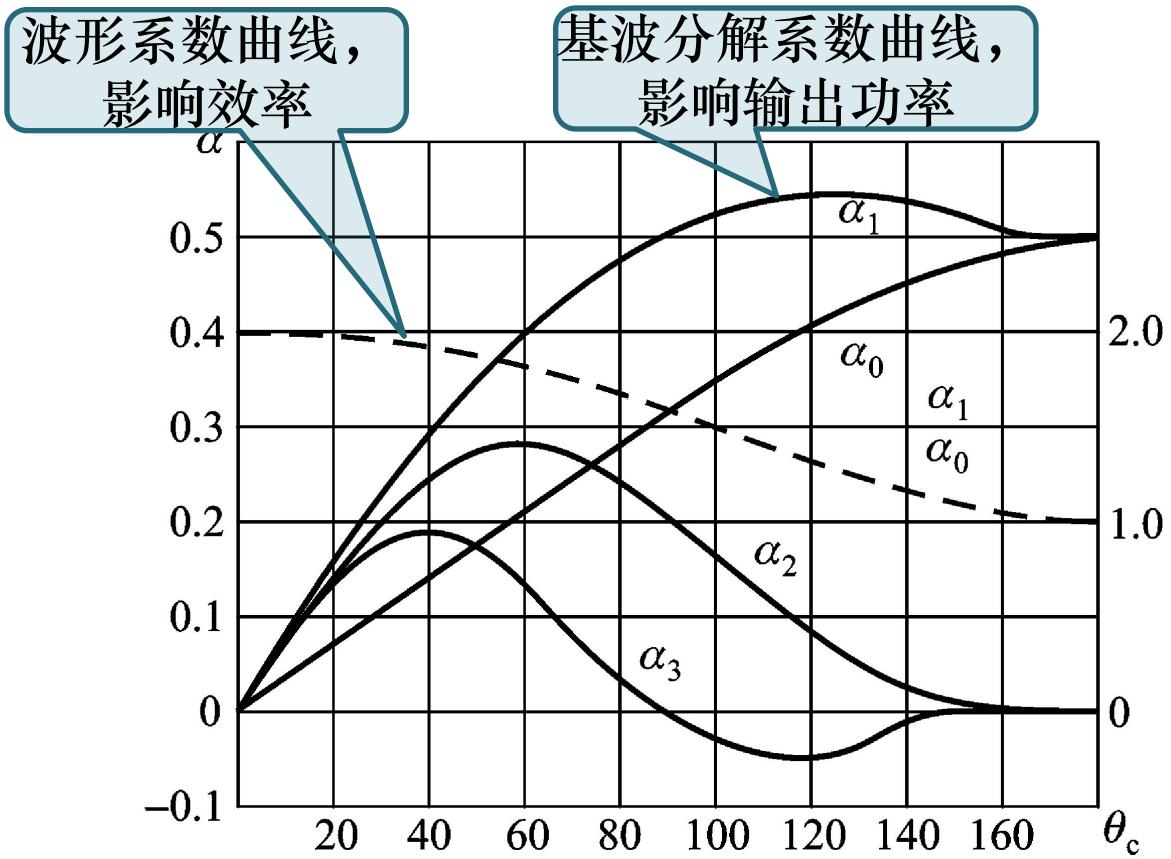
直流分量： $$I_{C0} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} i_C \mathrm{d}(\omega t) = \ldots\ldots = I_{cM}\alpha_0(\theta_c)$$

基波分量： $$I_{c1m} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} i_C \cos\omega t \mathrm{d}(\omega t) = \ldots\ldots = I_{cM}\alpha_1(\theta_c)$$

n次谐波分量： $$I_{cnm} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} i_C \cos n\omega t \mathrm{d}(\omega t) = \ldots\ldots = I_{cM}\alpha_n(\theta_c)$$

α称为余弦电流脉冲分解系数。$\alpha_0(\theta_c)$、$\alpha_1(\theta_c)$、$\alpha_n(\theta_c)$分别是直流分解系数、基波分解系数、n次谐波分解系数，这些系数都是通角θ_c的函数。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法



由基波分解系数曲线可以看出，基波分解系数随通角增大而增大130°左右达到最大值；由波形系数曲线可看出，波形系数随通角增大而减小，为了使功率放大器输出较高功率和效率，通角选择60~80°比较合适。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

3. 丙类功率放大器的功率和效率

- 直流电源供给的输入功率：

$$P_{=} = V_{CC} I_{C0}$$

- 高频输出功率：

$$P_o = \frac{1}{2} U_{cm} I_{c1m} = \frac{1}{2} I_{c1m}^2 R_P = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}^2}{R_P}$$

- 晶体管集电极损耗功率：

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

- 集电极效率：

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{=}} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm} I_{c1m}}{V_{CC} I_{C0}} = \frac{1}{2} \xi g_1(\theta_c)$$

ξ为电压利用系数
$\xi = U_{cm}/V_{cc}$

波形系数：$g_1(\theta_c) = I_{c1m} / I_{C0} = \alpha_1(\theta_c) / \alpha_0(\theta_c)$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

关于功率、效率的几个基本结论：

① 在电压利用系数ξ=1的理想条件下，甲类放大通角θ_c为180°，波形系数$g(\theta_c)$=1，其效率η_c=50%；乙类放大通角θ_c为90°，波形系数$g(\theta_c)$=1.57，其效率η_c=78.5%；丙类放大通角θ_c小于90°，其效率超过78.5%。所以，**通角越小，效率越高**。

② 在负载电阻一定的条件下，通角θ_c=120°时，输出功率最大，但是效率仅66%；通角θ_c=1~15°时，效率最高，但输出功率较小。

③ 实际应用时，为了兼顾输出功率和高效率，通常取通角θ_c=60~80°的丙类工作状态。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

4. 丙类功率放大器的动态特性及工作状态

丙类功率放大器的输出功率、效率与其工作状态有关，而决定其工作状态的因素包括负载、晶体管的各级电压等。

为了弄清楚负载、晶体管各级电压如何影响功率放大器的工作状态，进一步影响其输出功率、效率，需要研究以下两个主要问题：

① 如何确定功率放大器的工作状态？不同工作状态下输出功率、效率如何？

② 负载、晶体管各级电压如何影响放大器工作状态，以及如何影响功率放大器的输出功率、效率？

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

1）动态特性

动态特性是指电路参数确定后晶体管集电极电流i_C与BE结电压u_{BE}、CE结电压u_{CE}的函数关系，即$i_C=f(u_{BE},u_{CE})$，**其中，电路参数包括：**

- **晶体管参数：比如g_c，U_{BZ}等**
- **电源电压：比如V_{CC}、V_{BB}等**
- **输入信号参数：比如输入电压幅度U_{bm}**
- **输出信号参数：比如输出电压幅度U_{cm}**

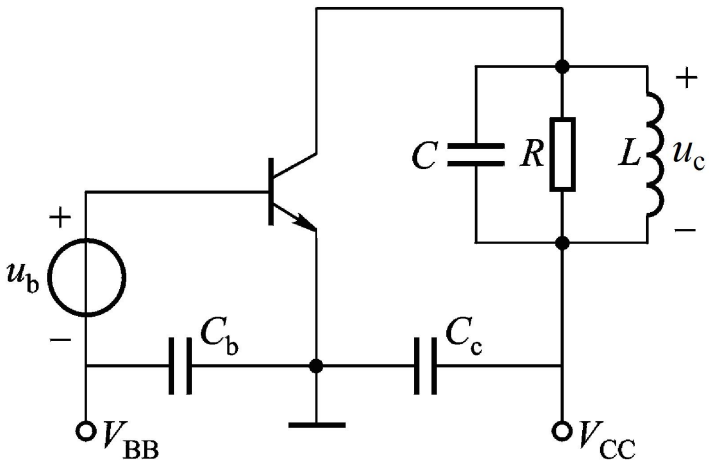
简单说，动态特性描述的是晶体管输入输出信号电压变化时集电极电流如何变化。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

动态特性的表示：

设输入信号u_b和输出信号u_c分别如下：



$$\begin{cases} u_b = U_{bm}\cos\omega t \\ u_c = U_{cm}\cos\omega t \end{cases}$$

外部关系

$$\begin{cases} u_{BE} = V_{BB} + U_{bm}\cos\omega t \\ u_{CE} = V_{CC} - U_{cm}\cos\omega t \end{cases} \Rightarrow u_{BE} = V_{BB} + U_{bm}\frac{V_{CC} - u_{CE}}{U_{cm}}$$

内部关系

$$i_C = g_c(u_{BE} - U_{BZ})$$ （仅导通段）

直线方程

$$\Rightarrow i_C = g_c\left(V_{BB} + U_{bm}\frac{V_{CC} - u_{CE}}{U_{cm}} - U_{BZ}\right) = \ldots = g_d(u_{CE} - U_0)$$

其中，

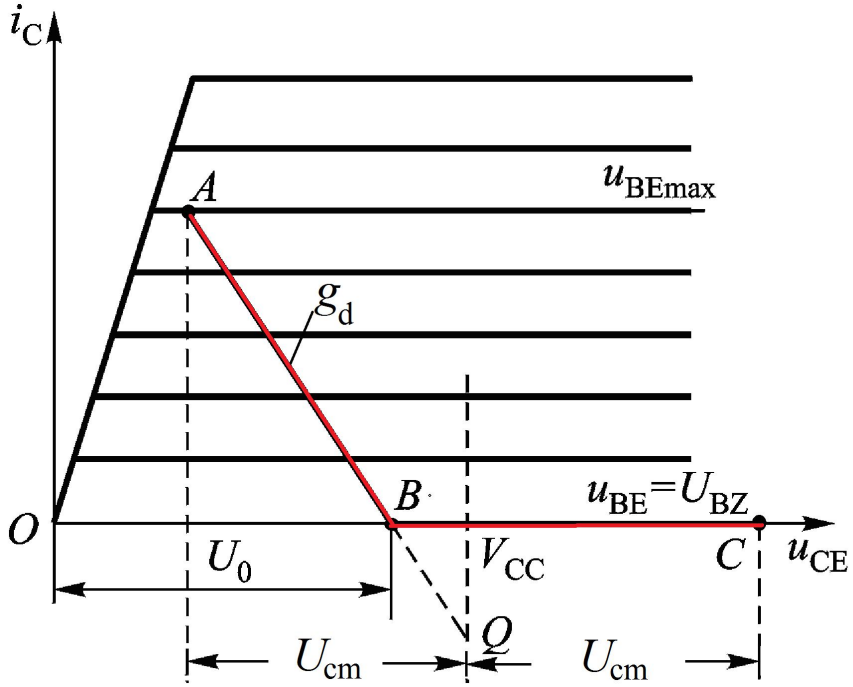
$$g_d = -g_c U_{bm}/U_{cm}$$

$$U_0 = V_{CC} - U_{cm}\cos\theta_c$$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

动态特性的画法： 由动态特性的表示可知，晶体管导通时，i_c与u_{CE}一条直线关系，晶体管截止时，电流i_c=0，因此，**动态特性是一条折线**。

如右图，AB段表示晶体管导通时的动态特性，BC段表示晶体管截止时的动态特性。



两种画法：

① 截距法

② 虚拟电流法

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

截距法：

根据截距U_0和斜率g_d画出动态特性

步骤如下：

① **先确定B点**：在输出特性的u_{CE}轴上取$u_{CE}=U_0=V_{CC}-U_{cm}\cos\theta_c$对应的点为B点；

② **再确定A点**：过B点做斜率为g_d的射线与$u_{BEmax}=V_{BB}+U_{bm}$的交点为A点；

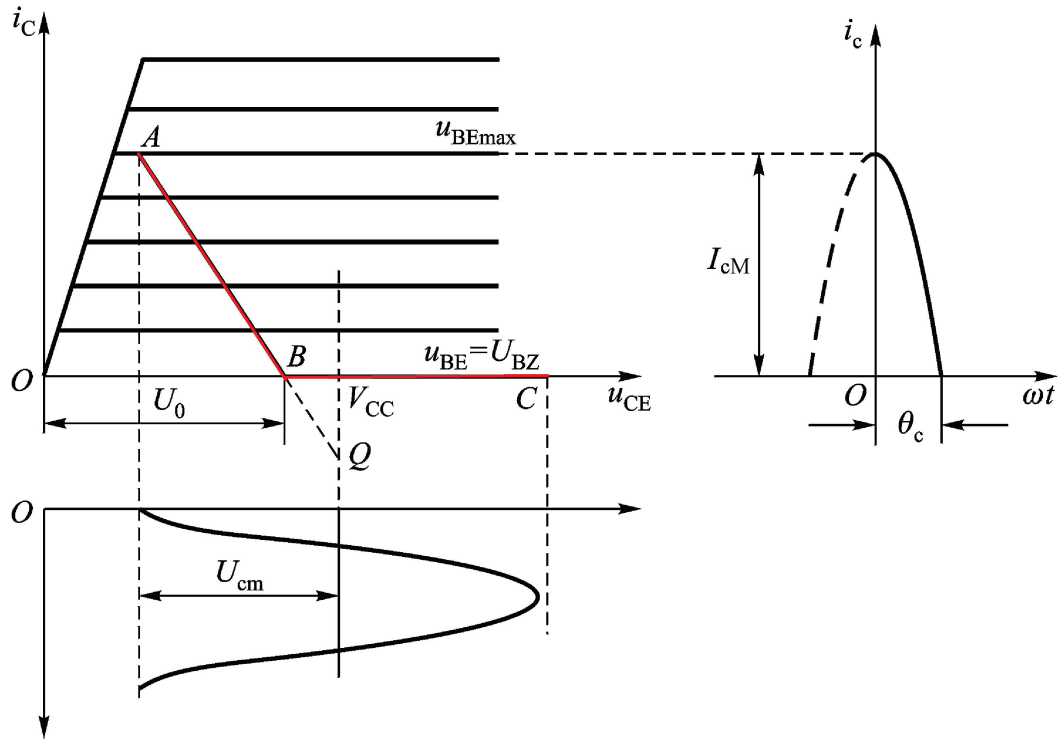
③ **最后确定C点**：在输出特性的u_{CE}轴上取$u_{CEmax}=V_{CC}+U_{cm}$对应的点为C点；

④ **连接AB及BC构成的折线即为动态特性**

以上方法中，第②步斜率g_d不方便定量画出。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

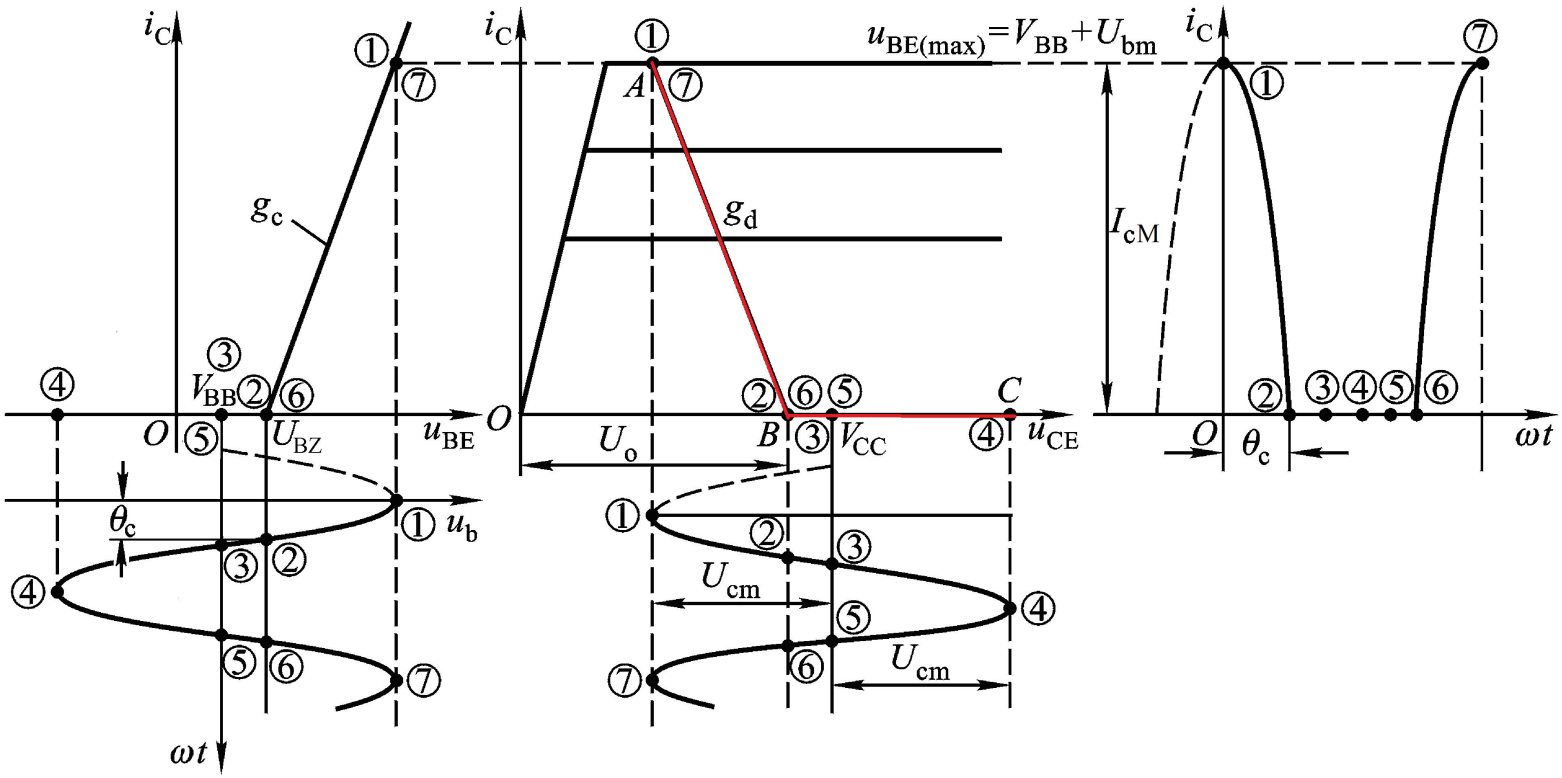
截距法画出的动态特性及输出电流电压如下图：



通信电路与系统

廣東工業大學
Guangdong University of Technology

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法



输入信号　　输出电压　　集电极电流

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

虚拟电流法：

作图步骤：

① **先确定Q点**：延长线段AB与V_{CC}线的交点，该点对应的电流值$I_Q=-g_c(U_{BZ}-V_{BB})$为负值，实际不存在，称为**虚拟电流**；

② **再确定A点和B点**：A点由$u_{CEmin}=V_{CC}-U_{cm}$与$u_{BEmax}=V_{BB}+U_{bm}$来确定，连接QA与u_{CE}轴交于B点；

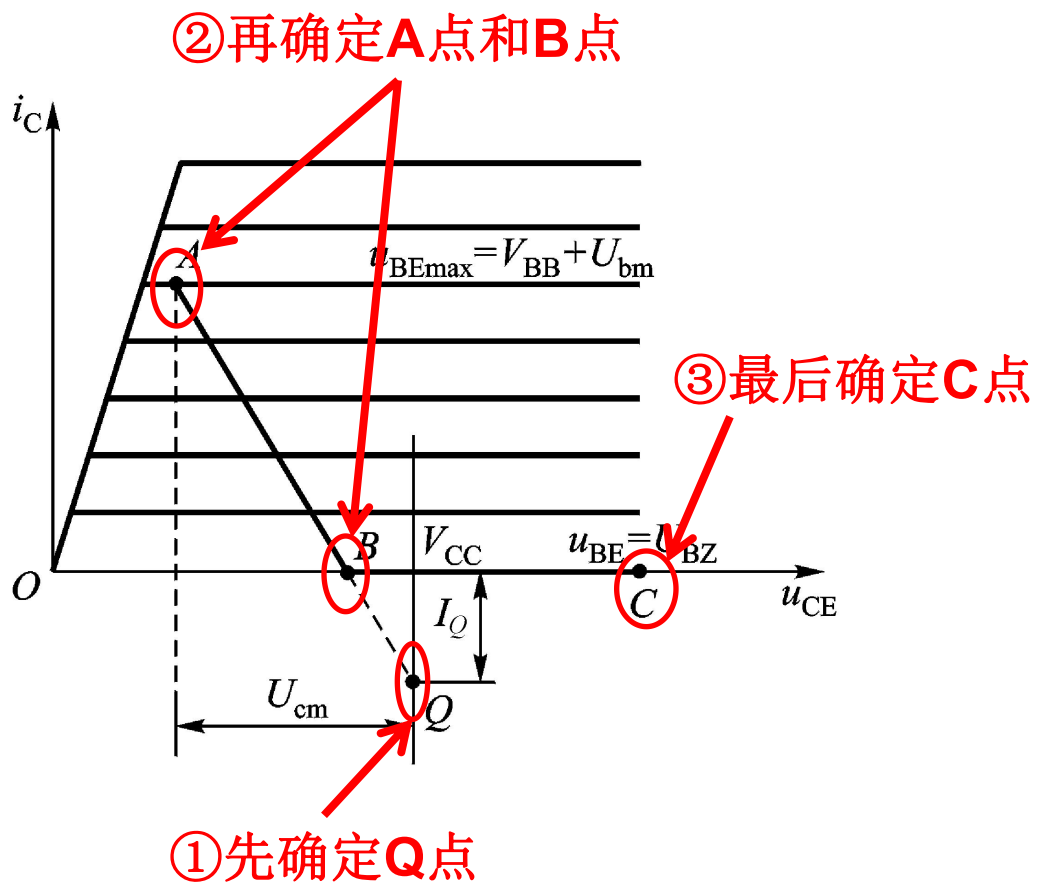
③ **最后确定C点**：由$u_{CEmax}=V_{CC}+U_{cm}$确定；

④ **连接AB及BC构成的折线即为动态特性。**

虚拟电流法容易作图，用得比较多！

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

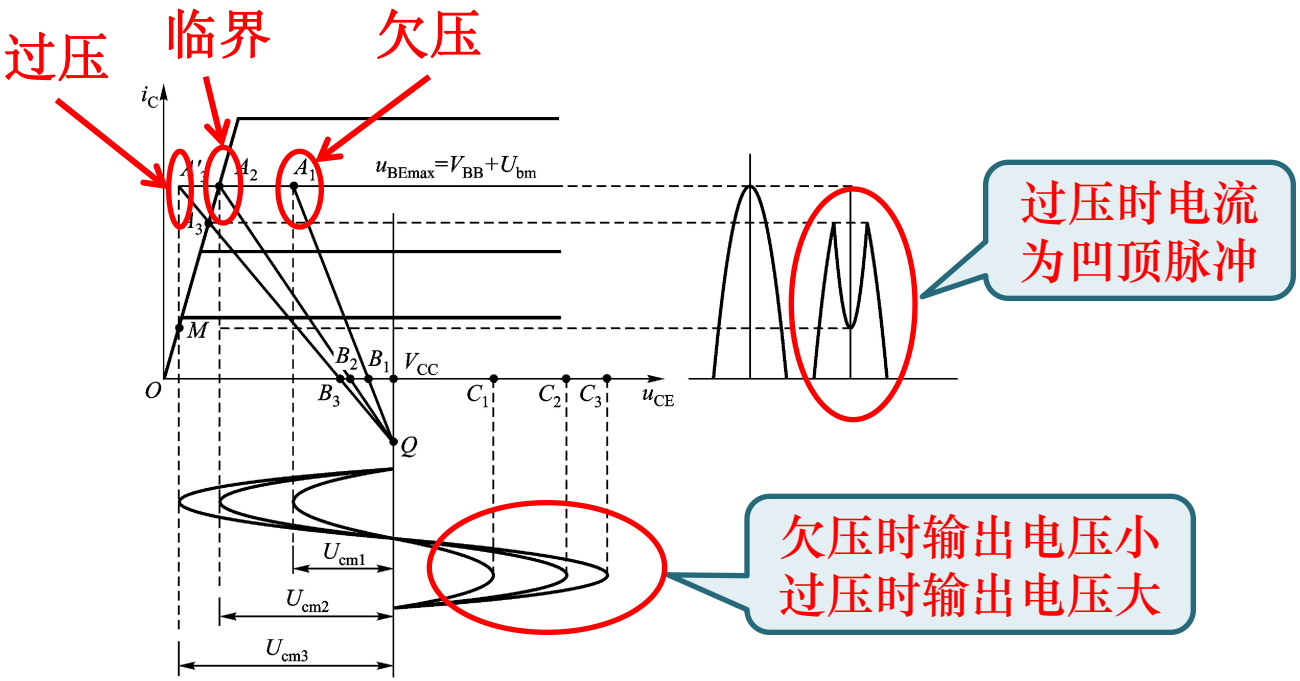
虚拟电流法作图示意图



4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

2）三种工作状态：

丙类放大时，根据输入信号激励的一周内，晶体管是否进入饱和区来区分，分为欠压、临界、过压三种状态。实际可以根据动态特性图中A点位置判断。



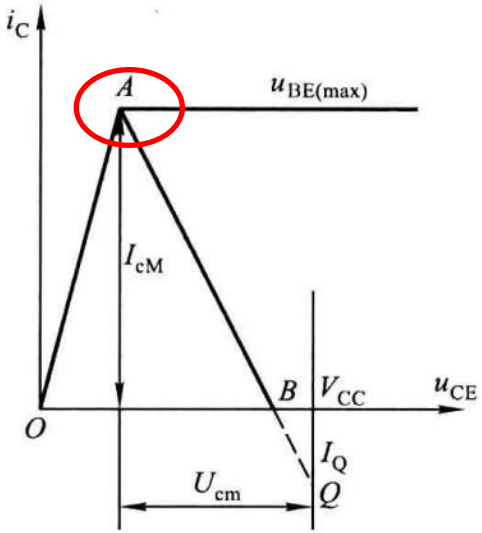
功率放大器技术指标分析举例

通信电路与系统

已知：某高频功率晶体管的饱和临界线跨导为 g_{cr}=0.8s，用它做成谐振功率放大器，选定 V_{cc}= 24V，θc=70°，I_{CM}=2.2A，并工作于临界工作状态，

试求：R_p、$P_=$、P_o、P_c、η_c。

分析：工作于临界工作状态，包含以下信息：



$I_{CM}=g_{cr}(V_{cc}-U_{cm})$

$U_{cm}=I_{c1m}R_p$ → R_p=?

解：

(1) $I_{cM} = g_{cr}(V_{CC} - U_{cm})$

$V_{CC} - U_{cm} = I_{cM}/g_{cr} = 2.2/0.8\ \text{V} = 2.75\ \text{V}$

$U_{cm} = V_{CC} - 2.75 = (24 - 2.75)\ \text{V} = 21.25\ \text{V}$

$$R_p = \frac{U_{cm}}{I_{c1m}} = \frac{U_{cm}}{I_{cM}\alpha_1(70°)} = \frac{21.25}{2.2 \times 0.436}\ \Omega = 21.15\ \Omega$$

其中，$\alpha_1(70°) = 0.436$。

(2) $P_= = V_{CC}I_{C0} = V_{CC}I_{cM}\alpha_0(70°) = 24 \times 2.2 \times 0.253\ \text{W} = 13.36\ \text{W}$

(3) $P_o = \frac{1}{2}U_{cm}I_{c1m} = \frac{1}{2}U_{cm}I_{cM}\alpha_1(70°) = \frac{1}{2} \times 21.25 \times 2.2 \times 0.436\ \text{W} = 10.19\ \text{W}$

(4) $P_c = P_= - P_o = (13.36 - 10.19)\text{W} = 3.17\ \text{W}$

(5) $\eta_c = P_o/P_= = 10.19/13.36 = 76.3\%$

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

5. 负载特性：**在晶体管及V_{CC}、V_{BB}、U_{bm}一定时，改变回路谐振电阻R_p，功率放大器的工作状态、电流、电压、功率、效率随R_p变化的关系。**

分析思路：基于动态特性的画法，分析谐振电阻Rp变化时如何影响工作状态的变化，进一步分析电流、电压，以及功率、效率的变化。

动态特性

电阻Rp的变化 → 工作状态的变化 → 电流、电压、功率、效率的变化

R_p变化时，决定动态特性的A、B、C、Q等点或斜率g_d，哪些是变化的？哪些是不变的？

工作状态变化时，电流电压如何变化？

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

1）负载变化对工作状态的影响：

当V_{CC}、V_{BB}、U_{bm}等不变，仅R_p变化时，可知

① $u_{BEmax}=V_{BB}+U_{bm}$不变，说明A点在u_{BEmax}线上；

② V_{CC}，$I_Q[=-g_c(U_{BZ}-V_{BB})]$不变，说明Q点不变。

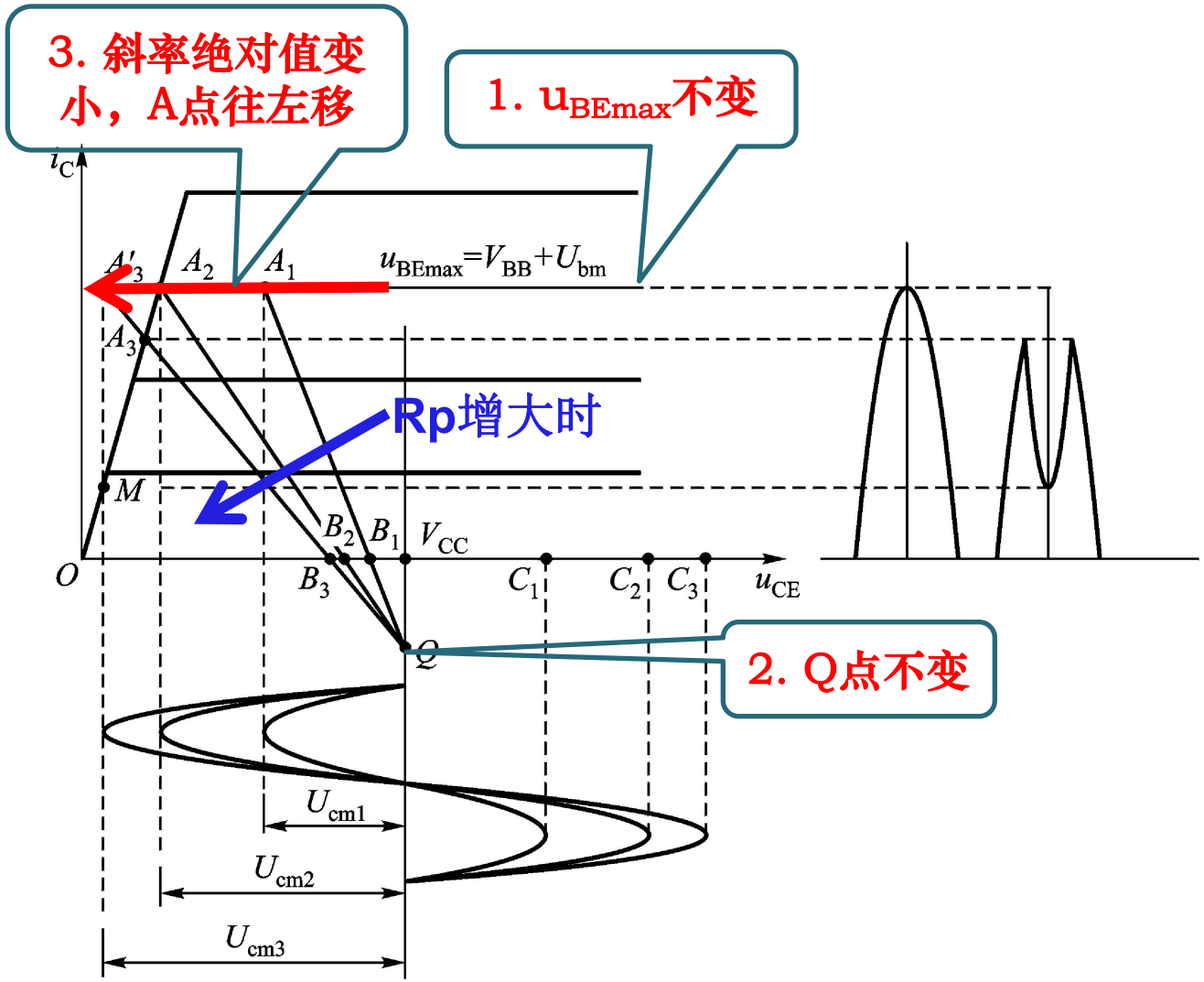
③ 导通角 $\cos\theta_c=(U_{BZ}-V_{BB})/U_{bm}$ 不变，斜率

$$g_d=-g_c\frac{U_{bm}}{U_{cm}}=\ldots\ldots=-\frac{1}{(1-\cos\theta_c)\alpha_1(\theta_c)R_p}$$

说明斜率的绝对值与R_p成反比。

根据以上分析可知，当R_p变化时，Q点不变，**随着R_p由小变大**，斜率的绝对值由大变小，射线QA逆时针旋转，A点沿u_{BEmax}线从右往左移动，**工作状态从欠压到临界，再到过压**。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法



4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

2）工作状态变化对电流电压的影响

从欠压到临界阶段：

① 这个阶段u_{BEmax}不变，因此I_{CM}不变，通角θ_c也不变，因此，余弦电流脉冲i_C不变，**随R_p增大直流分量I_{C0}和基波分量I_{c1m}也不变**。

② 根据$U_{cm}=I_{c1m}*R_p$可知，**U_{cm}随R_p增大而增大**。

从临界到过压阶段：

① 余弦电流脉冲i_C出现凹顶，**随着R_p增大，直流分量I_{C0}和基波分量I_{c1m}会逐渐变小**。

② 根据$U_{cm}=I_{c1m}*R_p$可知，随着**R_p增大，I_{c1m}会逐渐变小，增长变缓慢，U_{cm}最终趋向于V_{CC}**。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

3）工作状态变化对功率效率的影响

从欠压到临界阶段：

① 因为V_{CC}和I_{C0}都不变，根据$P_{=}=V_{CC}*I_{C0}$可知，直流电源输入的功率**$P_{=}$不变**。

② 因为I_{c1m}不变，根据$P_O=I_{c1m}^2*R_p/2$可知，**P_O随R_p增大而线性增大**。

③ **因为$P_{=}$不变，P_O随R_p增大而线性增大，**根据$\eta_c=P_O/P_{=}$可知，效率**η_c随R_p增大而线性增大。**

④ **因为$P_{=}$不变，P_O随R_p增大而线性增大，**根据$P_C=P_{=}-P_O$可知，**P_C随R_p增大而线性减小**。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

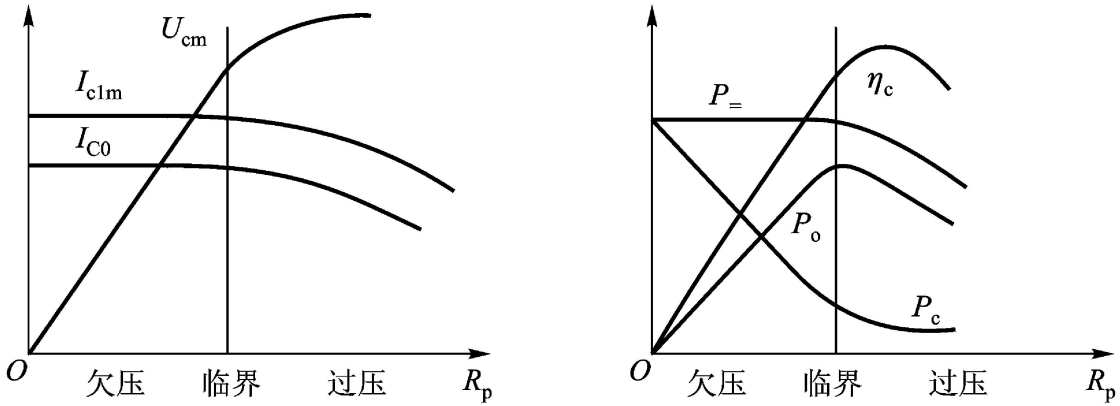
通信电路与系统

从临界到过压阶段：

① 因为V_{CC}不变，I_{C0}随R_p增大减小，根据$P_{=}=V_{CC}*I_{C0}$可知，直流电源输入的功率**$P_{=}$减小**。

② 因为u_{cm}缓慢增大且趋向于V_{CC}，根据$P_O=u_{cm}^2/2R_p$可知，**P_O随R_p增大而减小**。

③ 弱过压区，P_O的下降比$P_{=}$的下降缓慢，η_c略增，进入强过压区，I_{c1m}下降较大，η_c会下降。



4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

几点结论：

① **在欠压状态**的大部分范围内，输出功率和效率都较低，而集电极损耗功率大，因此，功放很少工作在这个状态。

② **在临界状态**，输出功率最大，而且集电极效率也高，通常用于发射机的功率输出级。

③ **在过压状态**，谐振电阻变化时，输出电压振幅U_{cm}变化较小，多用于需要维持输出电压比较平稳的场合，比如发射机的中间放大级。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

6. 各级电压变化对工作状态的影响

分析高频功放的V_{CC}、V_{BB}、U_{bm}等对工作状态的影响，分析思路与负载特性的分析思路相同。

1）改变V_{CC}对工作状态的影响

g_c、U_{BZ}和V_{BB}、U_{bm}、R_P保持不变，仅改变V_{CC}

① $u_{BEmax}=V_{BB}+U_{bm}$**不变**，说明A点在u_{BEmax}线上；

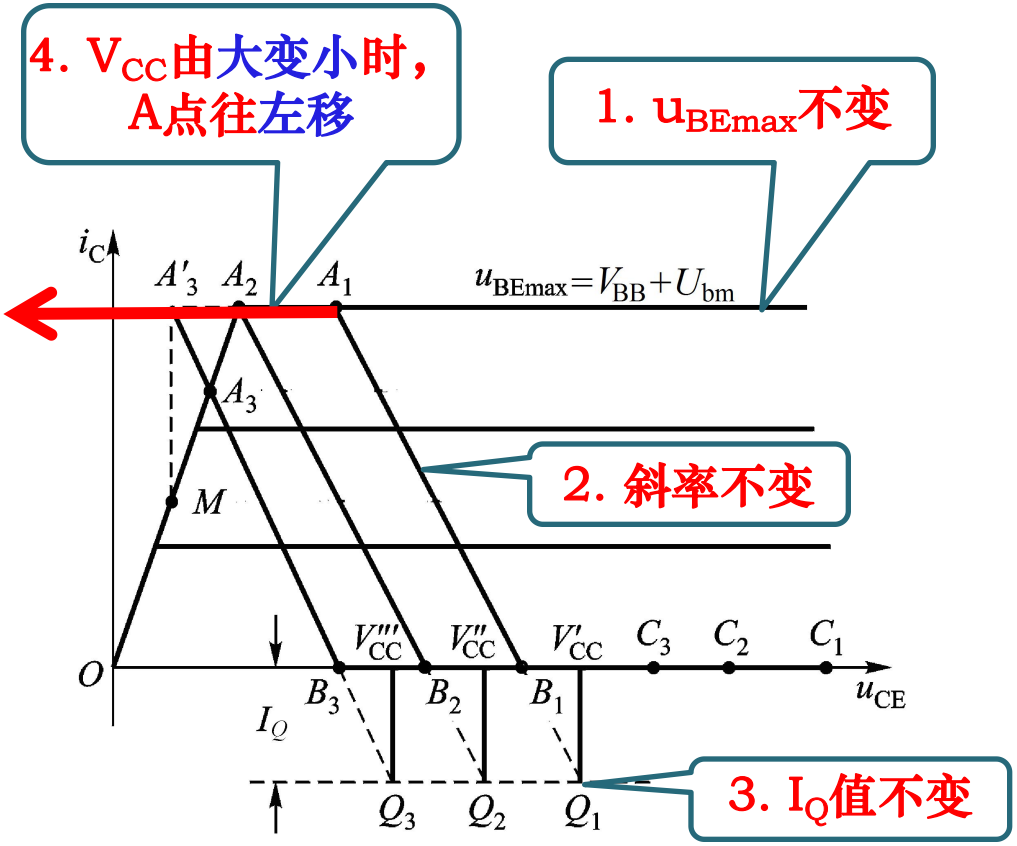
② $\cos\theta_c=(U_{BZ}-U_{BB})/U_{bm}$ 不变，$g_d=-1/[(1-\cos\theta_c)\alpha_1(\theta_c)R_P]$ 不变，即AB段的**斜率不变（仅临界至欠压阶段）**。

③ $I_Q=-g_c(U_{BZ}-V_{BB})$ **不变**。

④ V_{CC}变化时，AB段**水平移动**，**V_{CC}由大变小**时，A点在u_{BEmax}线上从右往左移动，依次经历**欠压、临界、过压**三个状态。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

动态特性变化示意图



4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

V_{CC}变化对电流、功率的影响

对电流的影响：

① 欠压到临界阶段u_{BEmax}不变，因此I_{CM}不变，通角θ_c也不变，因此，余弦电流脉冲i_C不变，**V_{CC}变化时I_{C0}和I_{c1m}也不变**。

② 进入过压阶段，i_C变成凹顶脉冲，**V_{CC}变小时I_{C0}和I_{c1m}也变小，近似线性。**

对功率的影响：

已知$P_==V_{CC}*I_{C0}$，$P_O=I_{c1m}^2*R_p/2$，$P_C=P_=-P_O$，

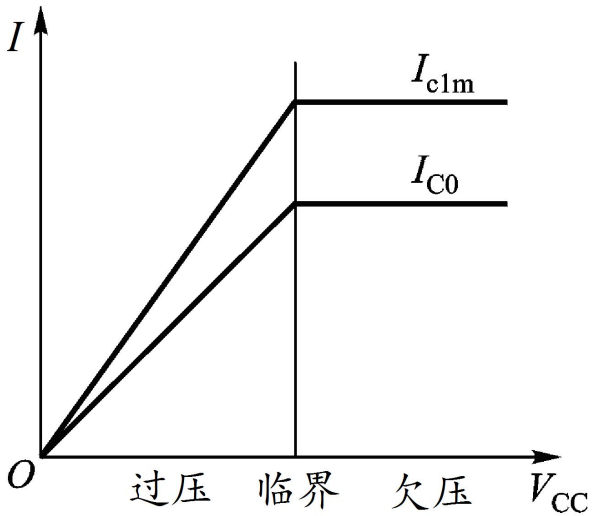
① 欠压到临界阶段，**V_{CC}增大时$P_=$增大，P_O不变，P_C变小。**

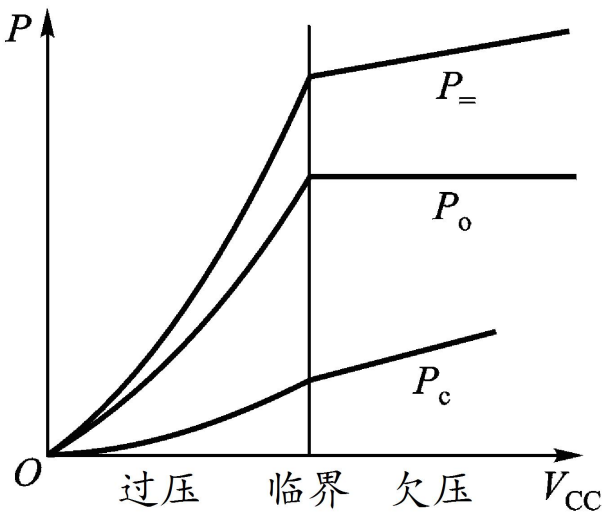
② 过压阶段，**$P_=$，P_O，P_C都随V_{CC}变小而变小**。

4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

VCC对电流功率的影响

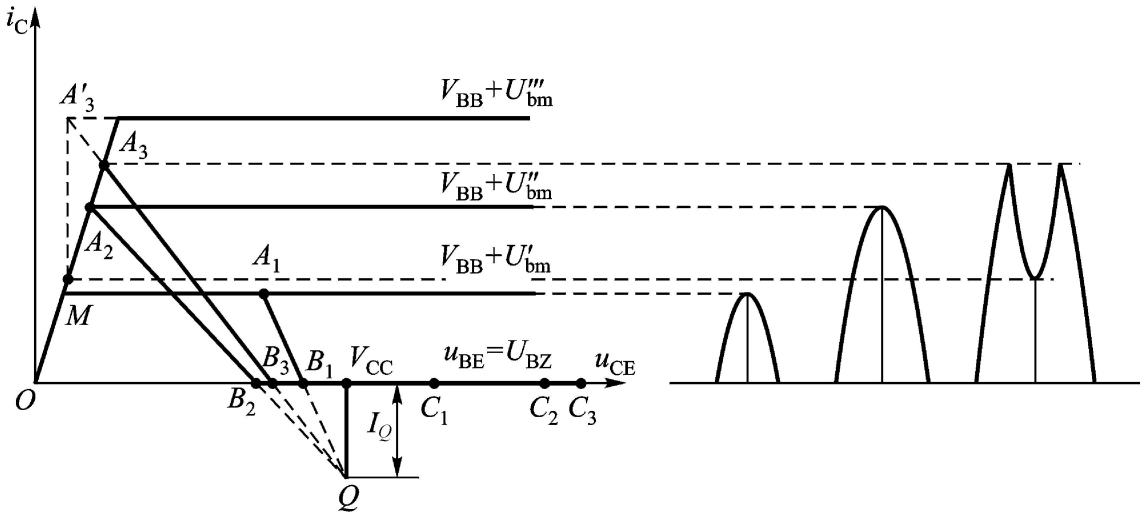


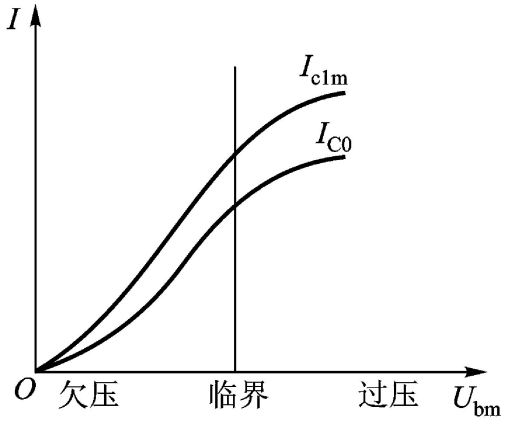


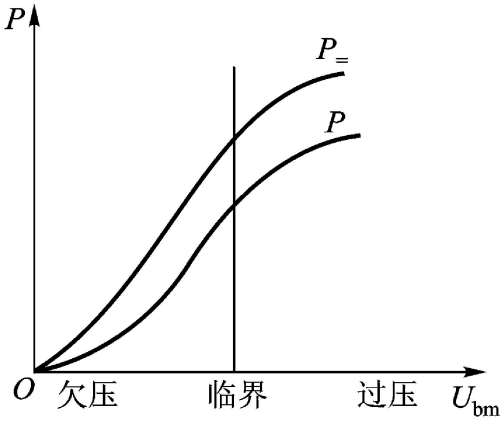
4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

2）改变U_{bm}对工作状态的影响



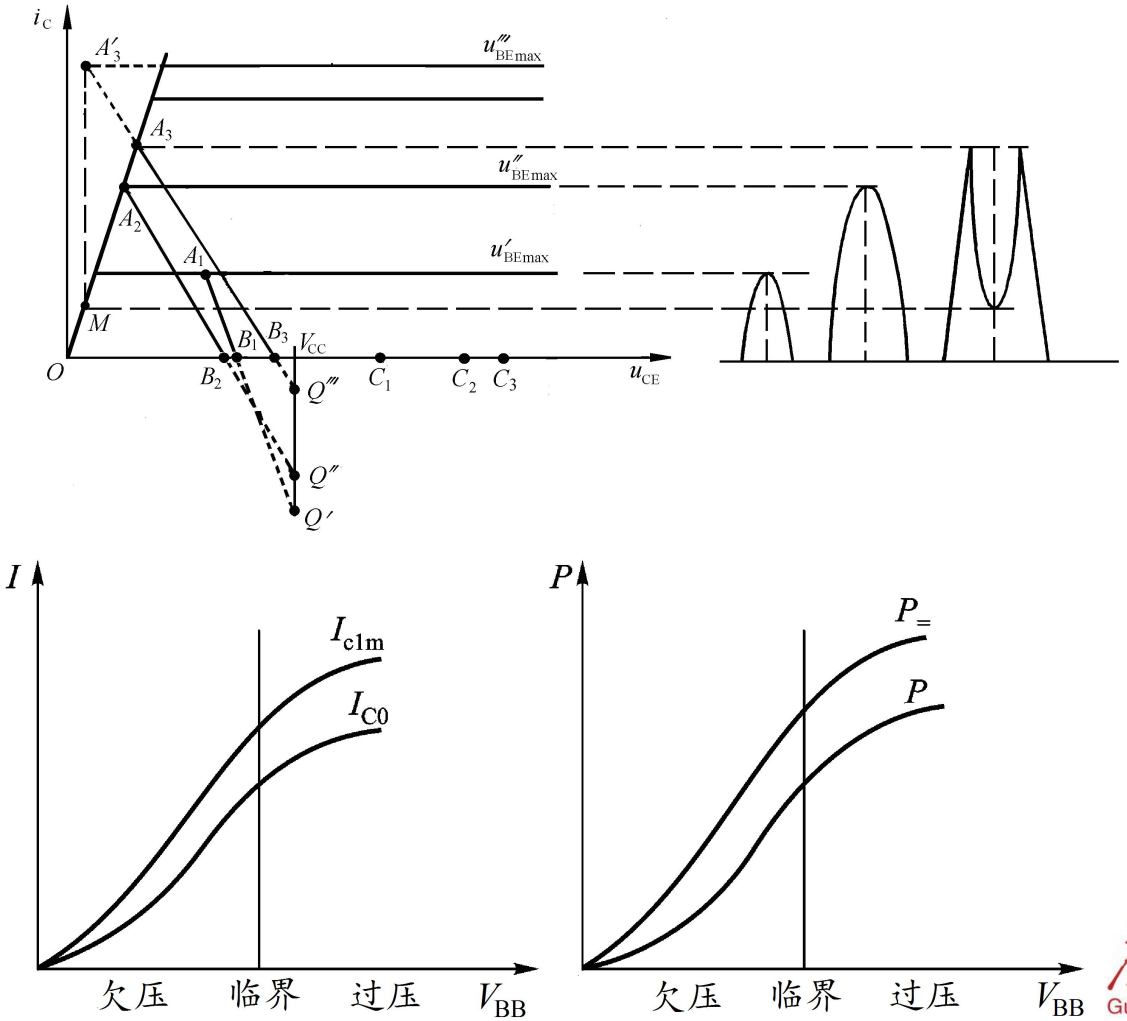




4.3 丙类高频功率放大器的折线分析法

通信电路与系统

3）改变V_{BB}对工作状态的影响



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

4.4 丙类功率放大电路

- 丙类功率放大器由：输入回路、晶体管、输出回路构成。
- 输入、输出回路作用包括：提供直流偏置、实现滤波、实现阻抗匹配。
- 从电路实现角度看，包括以下两部分
  - 直流馈电电路：集电极馈电和基极馈电
  - 匹配网络：输入匹配网络、输出匹配网络和级间匹配网络

4.4 丙类功率放大电路

通信电路与系统

1. 直流馈电电路

- 集电极馈电：**提供V_{CC}**
- 基极馈电：**提供V_{BB}**

1）集电极馈电

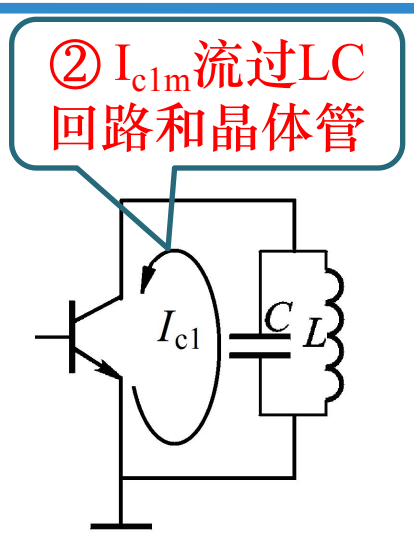
集电极电流为余弦脉冲，可分解为直流、基波、高次谐波，不同分量馈电不同。

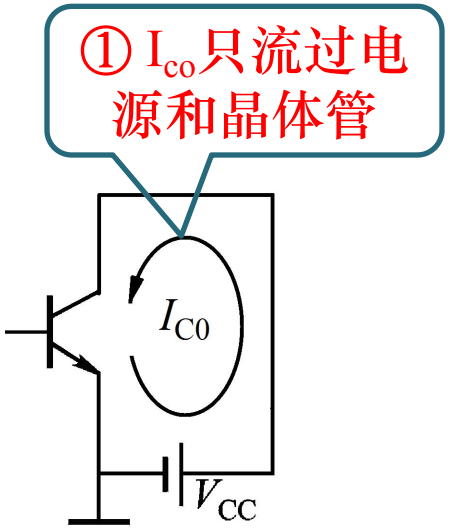
馈电电路原则：

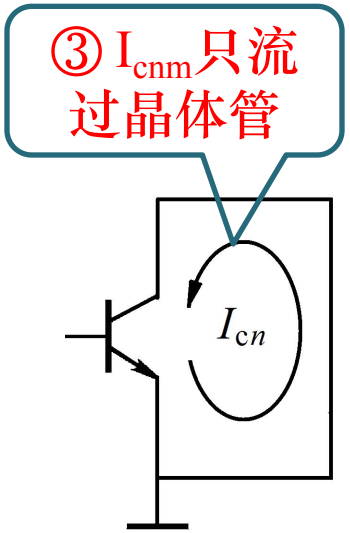
① I_{co}馈电

② I_{c1m}馈电

③ I_{cnm}馈电







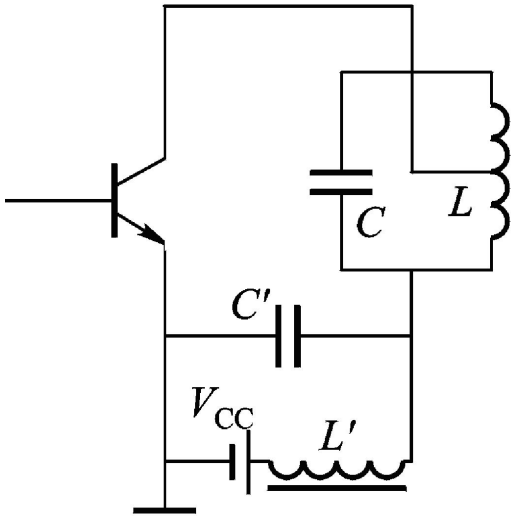
4.4 丙类功率放大电路

串联馈电电路：电源、LC回路、晶体管串联

①对于直流分量I_{co}，L和L'短路，C和C'开路，所以Ico仅流过电源和晶体管。

②对于基波分量I_{c1m}，L'开路，C'短路，LC回路谐振等效为纯电阻，所以I_{c1m}流过晶体管和LC回路。

③对于谐波分量I_{cnm}，L'开路，C和C'短路，所以I_{cnm}仅流过晶体管。



集电极串联馈电

特点：馈电元件L'和C'处于高频地电位，对地安装电容不影响LC回路的谐振频率；LC回路处于直流高电位，回路元件L和C不能接地，安装和调试不方便。

4.4 丙类功率放大电路

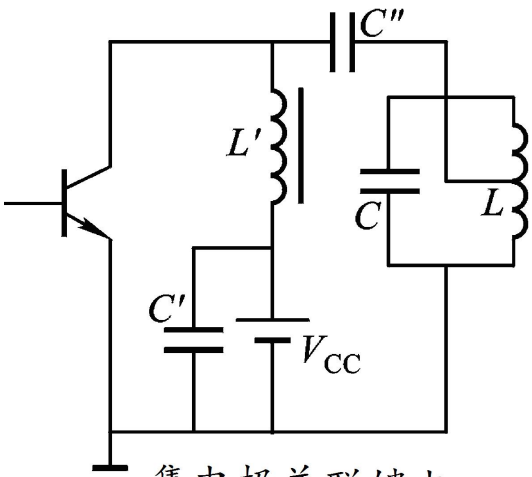
通信电路与系统

并联馈电电路：电源、LC回路、晶体管并联

①对于直流分量I_{co}，L'短路，C'和C"开路，所以Ico仅流过电源和晶体管。

②对于基波分量I_{c1m}，L'开路，C"短路，LC回路谐振等效为纯电阻，所以I_{c1m}流过晶体管和LC回路。

③对于谐波分量I_{cnm}，L'开路，C和C"短路，所以I_{cnm}仅流过晶体管。



集电极并联馈电

特点：馈电元件L'和C"处于高频高电位，对地安装电容会影响LC回路的谐振频率；LC回路处于直流地电位，回路元件L和C可以接地，安装和调试比较方便。

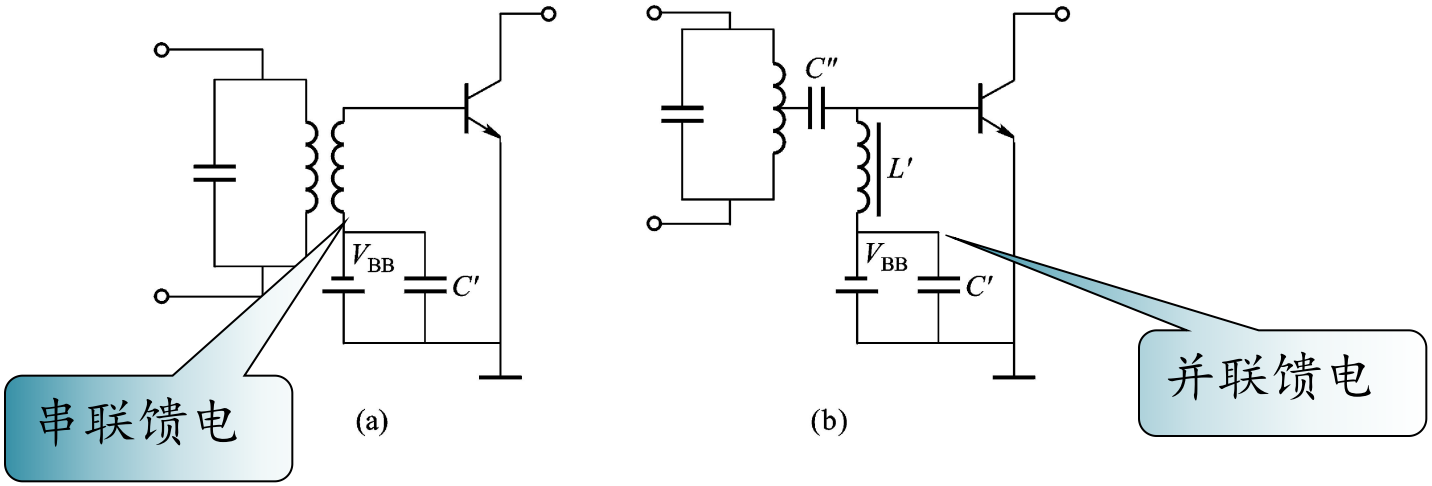
4.4 丙类功率放大电路

通信电路与系统

2）基极馈电

包括外加偏置和自给偏置两种，每种又分为串联和并联电路

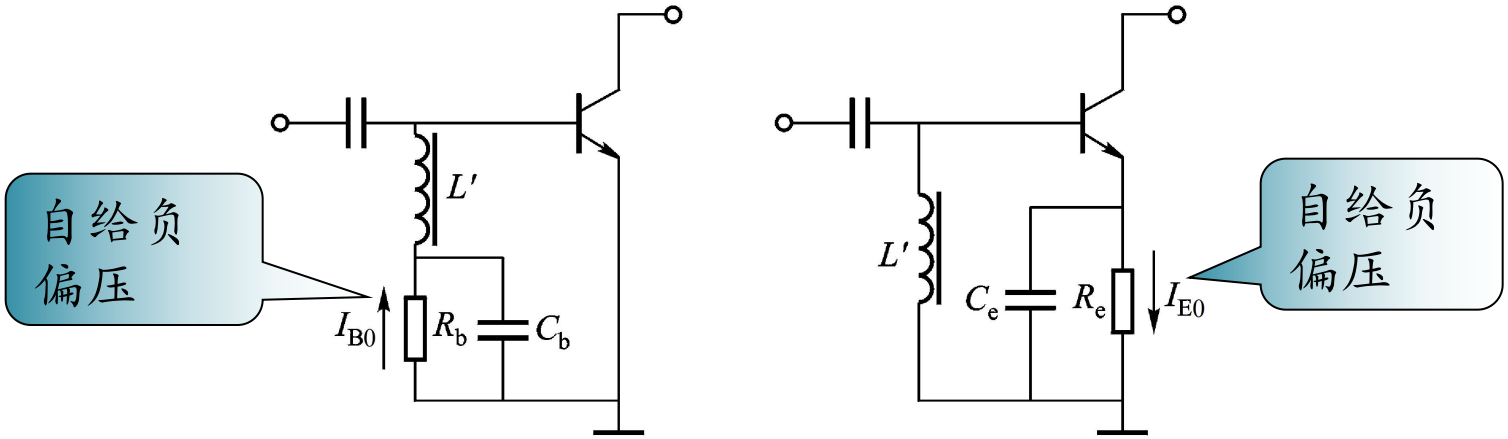
外加偏置电路



4.4 丙类功率放大电路

通信电路与系统

自给偏置电路（适应于功率大于1W的情形）



(a) (b)

4.4 丙类功率放大电路

2. 匹配网络

匹配网络分为：

- 输入匹配网络：信号源与功放之间
- 输出匹配网络：功放与天线之间
- 级间耦合匹配网络：推动级与输出级之间

匹配网络作用：

- 实现滤波
- 阻抗匹配：在给定电路条件下，通过匹配网络将负载电阻转换成高频功放工作状态所需的最佳电阻。
  比如，对于输出级，要求输出功率最大，最佳电阻R_p应保证功放工作于临界状态，而对于中间级，要求输出电压变化小，R_p应保证功放工作于过压状态。

4.4 丙类功率放大电路

匹配网络电路

通常采用由L、C组成的L形、π形和T形网络

① L形匹配网络：最简单、最基本的匹配网络，Q值固定（由需要匹配的两个阻抗确定），不一定能满足滤波性能。

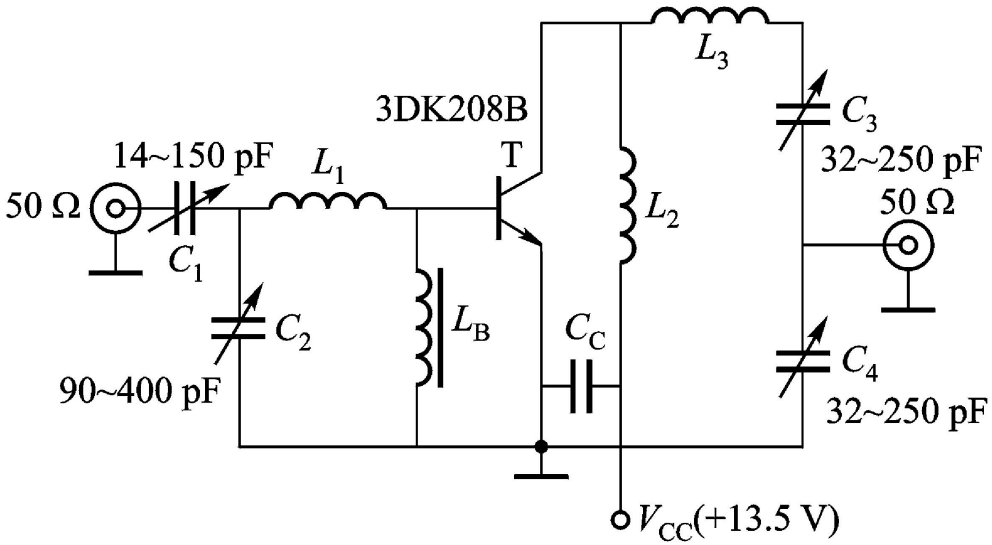
② π形和L形匹配网络：由三个元件构成，Q值可选，比较灵活，使用比较多。

对于输入匹配网络，信号源内阻通常比功放输入电阻大；对于级间耦合匹配网络，推动级输出电阻通常大于输出级的输入电阻；对于输出匹配网络，输出级的输出电阻通常小于天线或传输线的电阻，典型情况为50欧。

在设计实际电路时，输入、输出及级间耦合匹配网络通常采用π形和L形匹配网络。

4.4 丙类功率放大电路

功放实际电路举例：



基极输入回路由C_1、C_2和L_1组成T型匹配网络。集电极馈电采用串联方式，输出回路由L_2、L_3、C_3和C_4构成π型匹配网络。

4.5 其它功率放大器

除了丙类功率放大器，还包括以下几类：

- D类功率放大器：输入为大信号，需要两个晶体管工作于开关状态，输出效率高。
- E类功率放大器：与D类功放类似，只需要一个晶体管。
- 宽带高频功率放大器：无需调谐，适用于需要经常变换频道的场景。
- 功率合成：适用于输出功率较大的场景，比如几百千瓦至兆瓦级的功放。

本章小结

1. 功放的功能、分类、技术指标
2. 丙类功放的工作原理
3. 功放的折线分析方法

- 晶体管静态特性曲线的理想化（折线化处理）
- 集电极余弦电流脉冲的表示及分解
- 功放的技术指标计算：直流功率、高频功率、集电极效率等
- 动态特性分析：动态特性、工作状态、负载特性、各级电压对工作状态的影响