

第十章 高频功率放大器

(RF Power Amplifier)

高频功率放大器所处位置：发射机末级

功能：将已调制的通带信号放大到一定功率

送至天线发射

不能干扰相邻信道与本接收机

→ 大功率、高效率

→ 负载阻抗固定

→ 限制频带

第十章 高频功率放大器

- 10.1 谐振功率放大器的工作原理
- 10.2 C类谐振功率放大器工作状态分析
- 10.3 谐振功率放大器的电路组成
- 10.4 倍频器
- 10.5 D类功率放大器
- 10.6 功率合成与分配

10.1 谐振功率放大器的工作原理

功率放大器的主要目标：

- 得到足够大的**信号功率输出**（不同于小信号放大器）。
- 尽量追求**高效率、小失真、低电源电压**等性能。

功放的使用要求：

- 宽带功放 ($f_0/BW_{0.7} < 5$)
- 窄带功放 ($f_0/BW_{0.7} > 10$)

功放的重要指标：效率

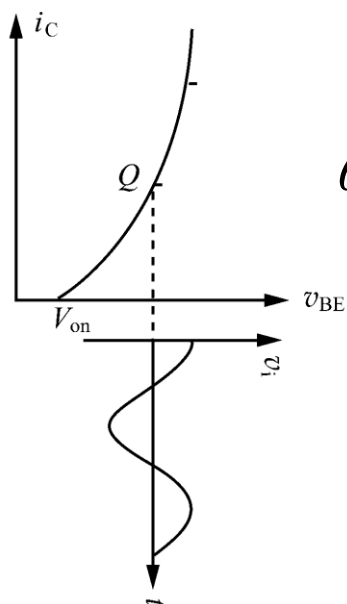
- 直流电源提供的能量一部分转变为交流信号输出，另一部分则消耗在晶体管及耦合电路上。
- 损耗的存在不仅导致经济指标的下降，更重要的是它转换成热能后会使得晶体管的温度迅速上升，对电路的正常工作造成严重影响。

10.1 谐振功率放大器的工作原理

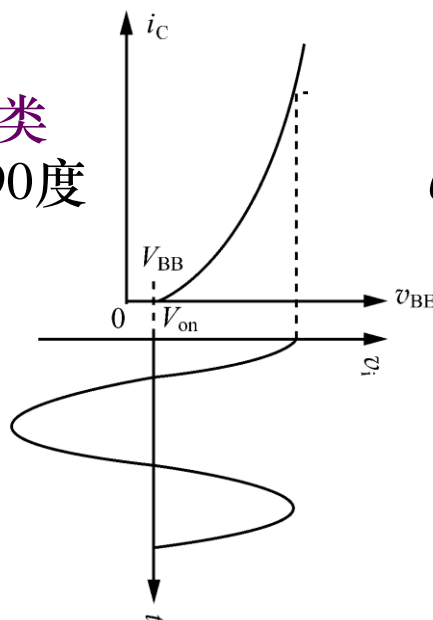
高频功率放大器的分类

① 按导通角分——A、B、C类

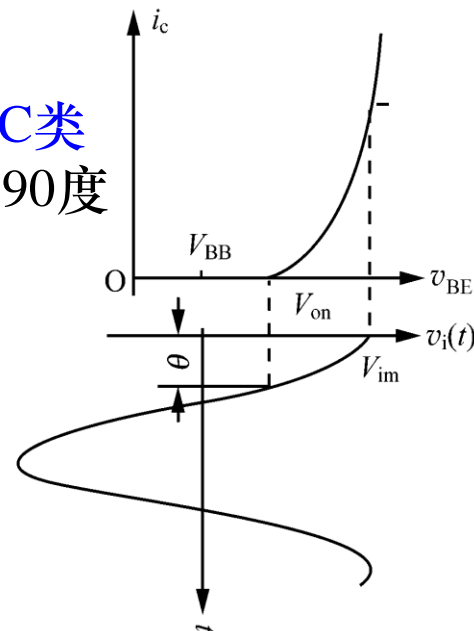
A类
 $\theta = 180^\circ$



B类
 $\theta = 90^\circ$



C类
 $\theta < 90^\circ$

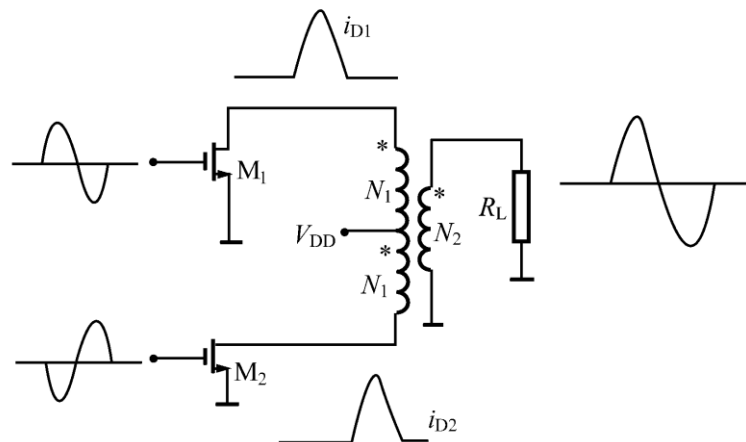


② 按等效电路分

ABC属于同一类——晶体管等效为受控电流源

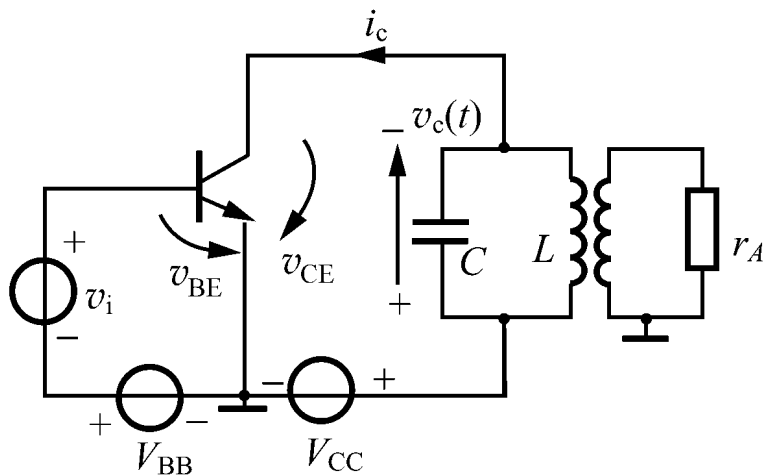
DE属于同一类——晶体管等效为开关

10.1 谐振功率放大器的工作原理

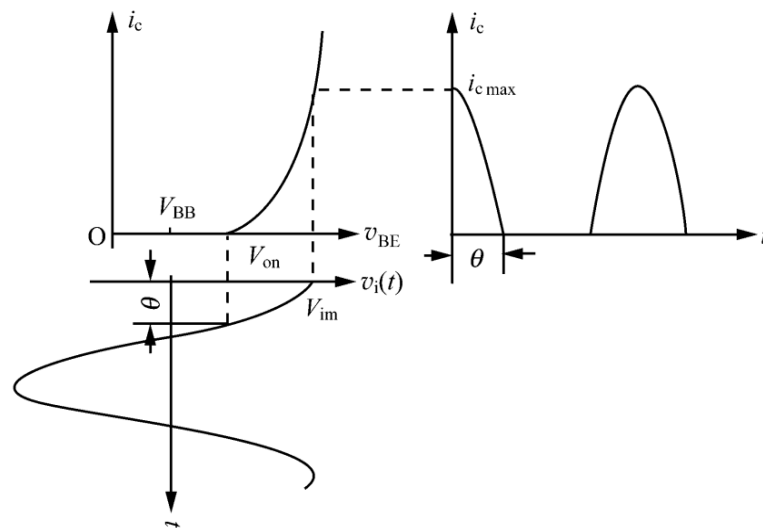


B类放大器

与B类放大器相比，
C类放大器**导通时间**
更小，管耗也就更小

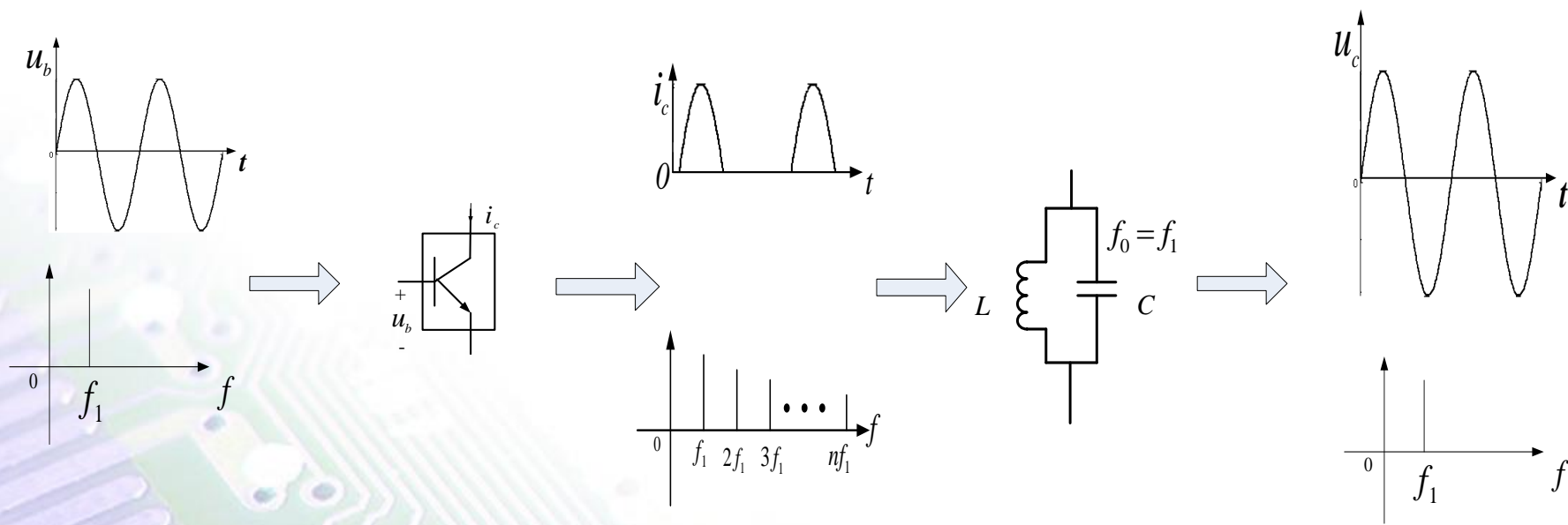


C类放大器



10.1 谐振功率放大器的工作原理

谐振功放如何提取基频分量：



10.1 谐振功率放大器的工作原理

提高效率的途径

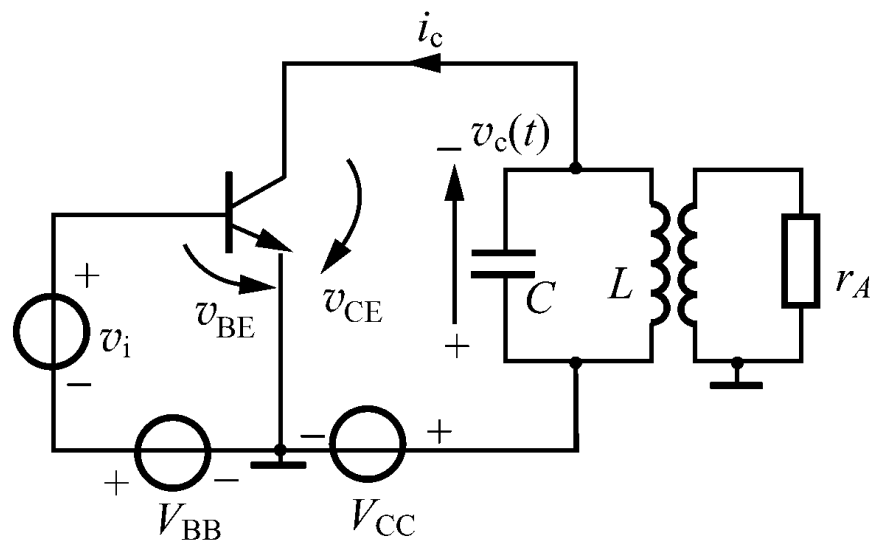
电路如图， i_c 导通角度为 θ ，功率效率计算如下：

$$P_o = \frac{1}{2} V_{om} \times I_{c1m} = \eta_c P_{dc}$$

$$P_{dc} = V_{cc} \times I_{c0} = P_o + P_C$$

$$P_C = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_c v_{CE} d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} i_c v_{CE} d\omega t$$

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{dc}} = \frac{P_o}{P_o + P_C}$$



从以上关系式可以看出，要提高效率，就要在不减少输出功率的前提下，尽量减小晶体管的集电极功耗 P_C 。

10.1 谐振功率放大器的工作原理

C类放大器的工作原理

- ✓ C类放大器的集电极电流波形是余弦脉冲形的，要在负载上得到完整的正弦电压波形输出，必须要借助于滤波器，因此集电极接谐振回路是最常见的方式。
- ✓ C类放大器一般都用来放大窄带信号，作为AM，FM通信机的末级射频功放使用。

● 折线分析法 (Broken Line Approximation)

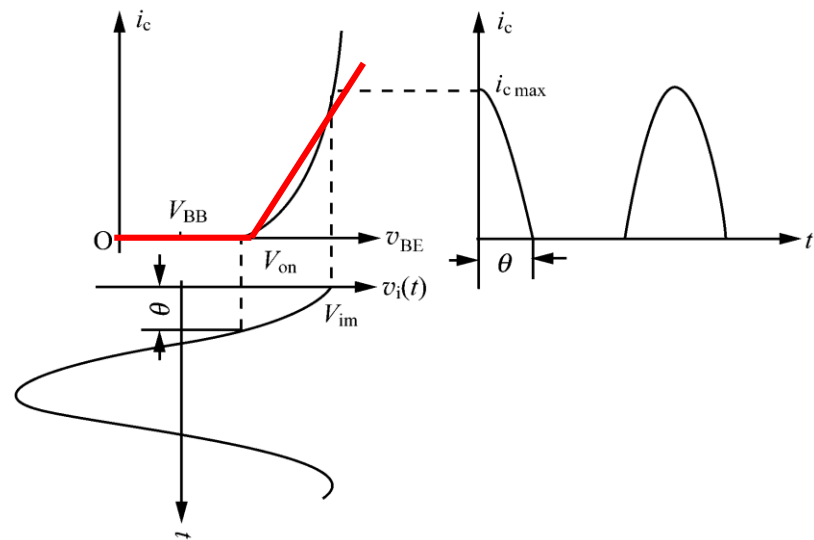
当输入信号比较大时，器件特性可用折线逼近描述：

器件的转移特性为：

$$\begin{cases} i_c = 0 & v_{BE} < V_{on} \\ i_c = g_m (v_{BE} - V_{on}) & v_{BE} > V_{on} \end{cases}$$

若设 $v_i(t) = V_{im} \cos \omega t$

则有： $v_{BE} = V_{BB} + V_{im} \cos \omega t$



10.1 谐振功率放大器的工作原理 - C类

$$\cos \theta = \frac{V_{\text{on}} - V_{\text{BB}}}{V_{\text{im}}} \Rightarrow \theta = \arccos \frac{V_{\text{on}} - V_{\text{BB}}}{V_{\text{im}}}$$

$$I_m = g_m V_{\text{im}} (1 - \cos \theta)$$

$$i_c = g_m V_{\text{im}} (\cos \omega t - \cos \theta) = \frac{I_m}{1 - \cos \theta} (\cos \omega t - \cos \theta)$$

$$(2n\pi - \theta < \omega t < 2n\pi + \theta, n = 0, 1, \dots)$$

将 i_c 展开为傅里叶级数:

$$i_c = I_{c0} + I_{c1} \cos \omega t + I_{c2} \cos 2\omega t + \dots + I_{cn} \cos n\omega t + \dots$$

$$I_{c0} = \frac{I_m}{\pi} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}$$

$$I_{c1} = \frac{I_m}{\pi} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}$$

\vdots

$$I_{cn} = \frac{2I_m}{\pi} \frac{\sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta)}$$

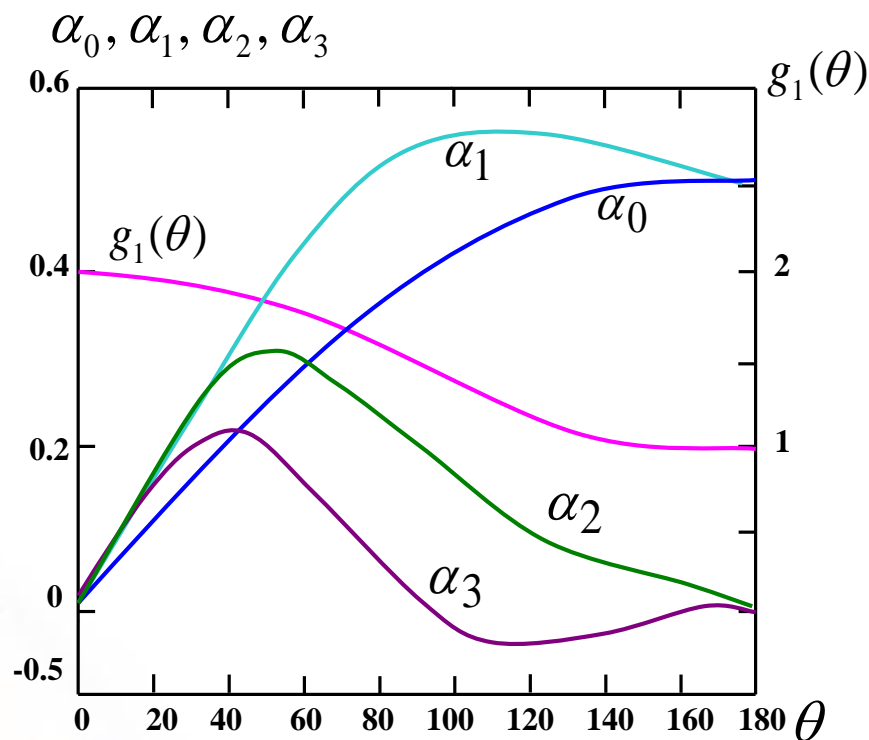
10.1 谐振功率放大器的工作原理 - C类

令 $\alpha_n(\theta) = \frac{I_{cn}}{I_m}$ 为余弦电流分解系数，则有 $I_{cn} = \alpha_n(\theta)I_m$

右图为 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ 的曲线。

讨论：

- n 增加, α_n 减小
- 最佳 $\theta = 120^\circ$, 使 α_1 最大。
- $g_1(\theta) = \alpha_1(\theta) / \alpha_0(\theta)$, 与效率有关。



10.1 谐振功率放大器的工作原理 - C类

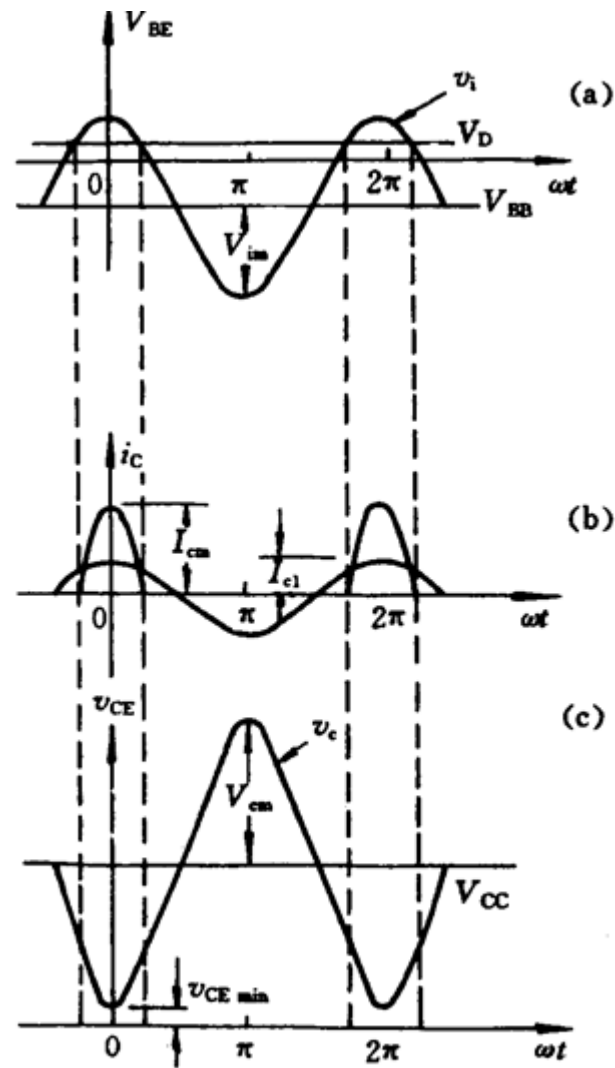
✓ C类放大器晶体管的转移特性用折线逼近时，在信号的整周期内输出端**不进入饱和区**的情况下，求解步骤如下：

a) 由 $V_{BB}, V_{on}, V_{im} \rightarrow \theta, I_{cm}$

b) 求解 $i_c(t), I_{c0}, I_{c1}, I_{c2}, \dots$

c) 求解 $V_{om}, P_o, P_{dc}, \eta_c$

各级电流电压波形如图。



调谐功率放大管的电压、电流波形

10.1 谐振功率放大器的工作原理 - C类

计算结果如下：

$$v_c(t) = -i_{c1}(t) |Z_e(\omega_0)| \approx -I_{cm} \alpha_1(\theta) R_p \cos \omega_0 t$$

$$P_{dc} = I_{c0} \times V_{cc} = \alpha_0(\theta) I_{cm} V_{cc}$$

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{1}{2} I_{c1}^2 R_p = \frac{\alpha_1^2(\theta)}{2} I_{cm}^2 R_p \\ &= \frac{1}{2} V_{cm} I_{c1} = \frac{\alpha_1(\theta)}{2} \xi V_{cc} I_{cm} \end{aligned}$$

$$\xi = \frac{V_{cm}}{V_{cc}}$$

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{dc}} = \frac{1}{2} \xi \frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)}$$

集电极电压利用率

随着 ξ 上升，输出功率和效率都会上升。



10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分析

● C类功放的动态负载线

- ✓ 工作特点：在输入正弦信号一周内管子导通和截止状态交替
 - 非线性工作；输出阻抗变化
- ✓ 动态负载线是由管子的集电极电流和电压共同决定的动态点的运动轨迹

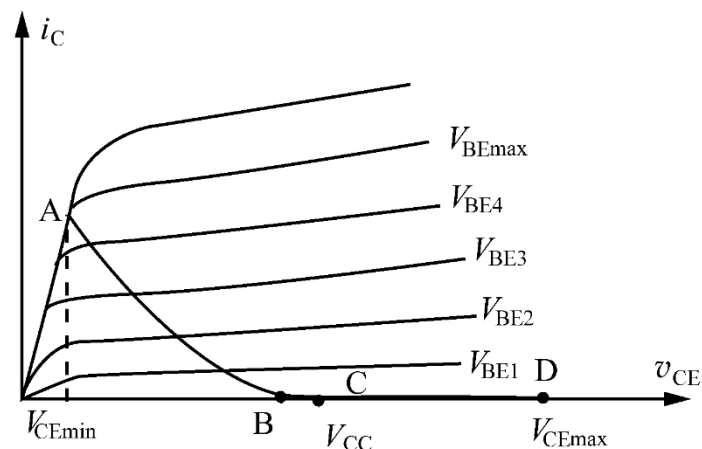
$$v_{BE} = V_{BB} + V_{im} \cos \omega t$$

$$v_{CE} = V_{CC} - i_{c1} R_P = V_{CC} - V_{cm} \cos \omega t$$

- ✓ 外电路输出方程描述的是集电极电压与基波电流的关系

➤ 逐点描绘C类放大器的动态负载线

(参考P453表10.4.1)



10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分类

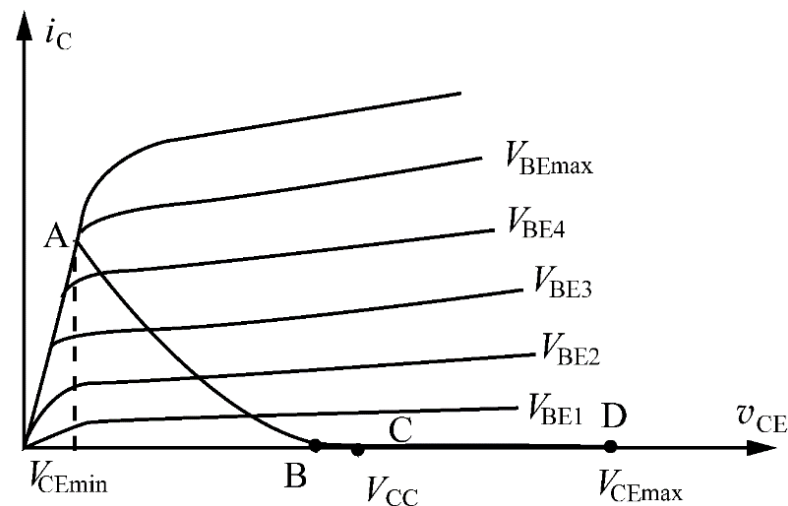
➤ C类功放的三种工作状态和四个电路要素

□ 三种工作状态

a. 随着输入幅度的增加，集电极电流脉冲的幅度和电压幅度也会增加，当电压幅度增大到一定程度时就会导致**进入饱和区**，即 $v_{CEmin} < v_{BEmax}$ ，在这一段时间内集电极电流会不升反降，动态线上端回落，电流波形出现凹陷。我们把这种状态称为**过压状态**。

b. 相应的把 $v_{CEmin} = v_{BEmax}$ 的情况称为**临界状态**；

c. 把 $v_{CEmin} > v_{BEmax}$ 的情况称为**欠压状态**。



10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分析

➤ C类功放的三种工作状态和四个电路要素（续）

□ 四个电路要素

考虑C类功放的工作过程可以看出，放大器的工作状态由四个要素决定：

V_{BB} , V_{im} , V_{cc} , R_p 。改变任何一个要素都有可能使电路的状态变化。

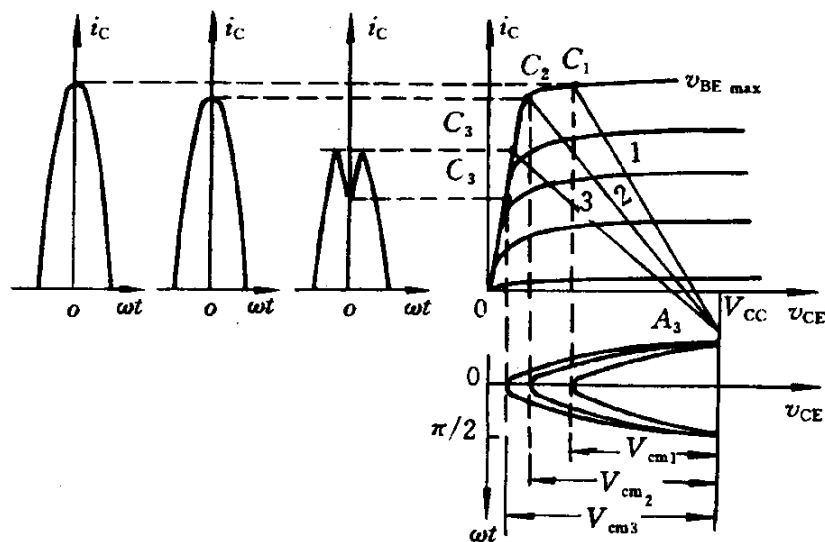
10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分类

➤ C类功放的负载特性

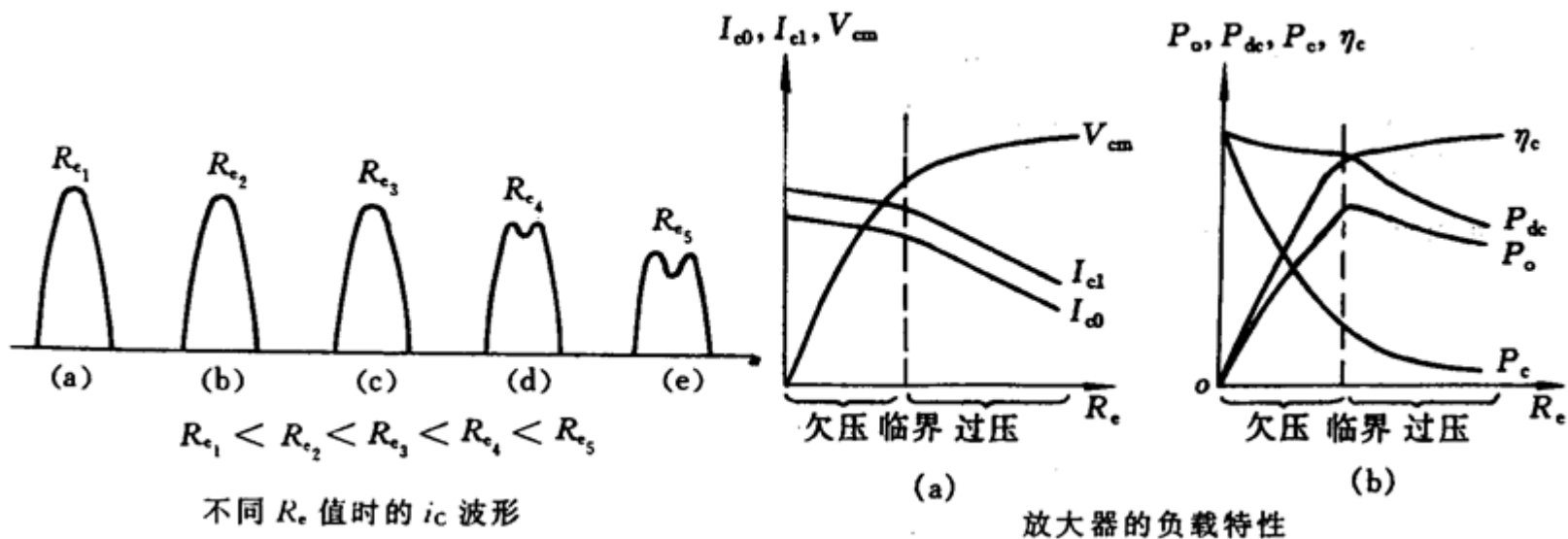
负载特性是指 V_{BB} , V_{im} , V_{CC} 保持不变, 放大器的输出电流、电压、功率、效率等随 R_p 变化的特性。

右图给出了 R_p 变化时 i_c 波形的变化情况。

- 在欠压区, R_p 越小, I_{cm} 越大
- R_p 过大, 可能进入过压区, i_c 出现凹陷。



10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分析

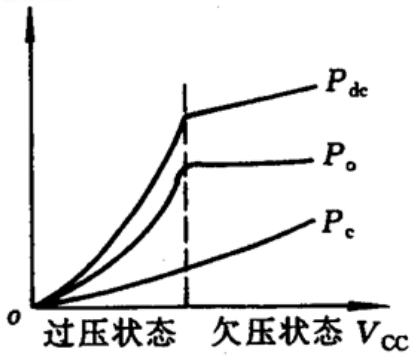
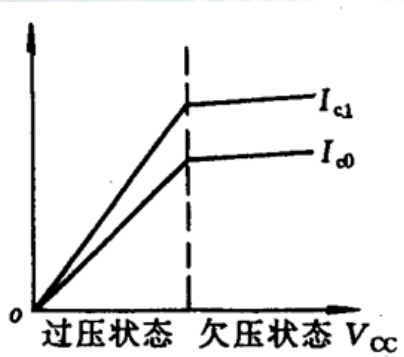
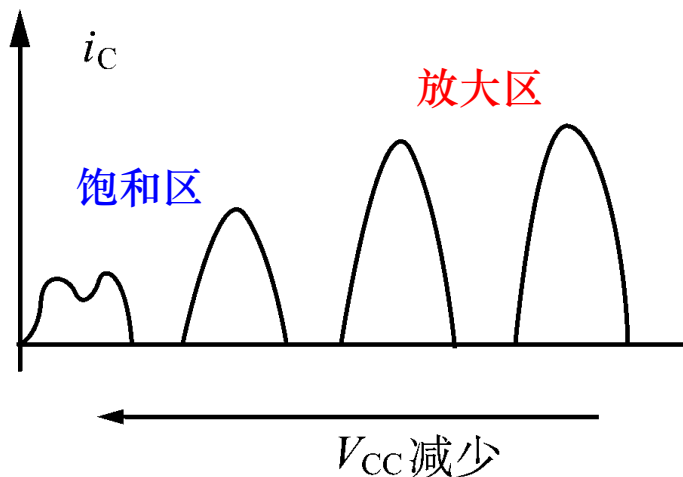
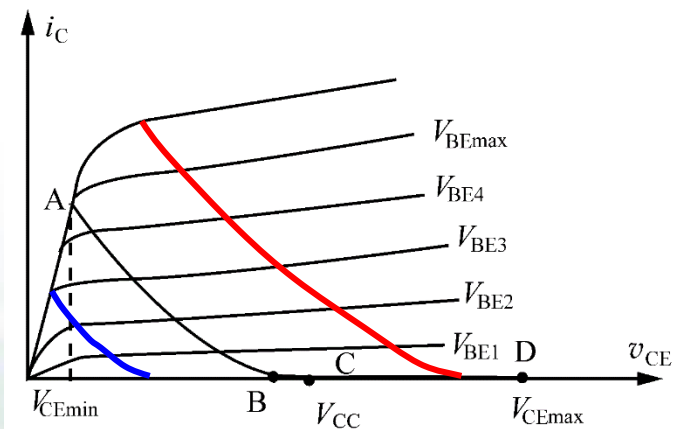


- **欠压:** I_{c1} 基本不随 R_p 变化, 功率和效率随 R_p 增大而增大; R_p 太小时 P_c 很高 ($\approx P_{dc}$), 超过 P_{cM} 会导致过热毁坏。用于调幅信号放大。
- **临界:** 输出功率和效率都比较高, 最常采用。用于FM信号放大。
- **过压:** 效率高、管耗小、输出功率小。推动级调到弱过压, 有稳幅作用。

10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分类

集电极调幅特性

V_{BB} , V_{im} , R_p 不变, 输出电流电压随 V_{CC} 变化的特性。



(a)

(b)

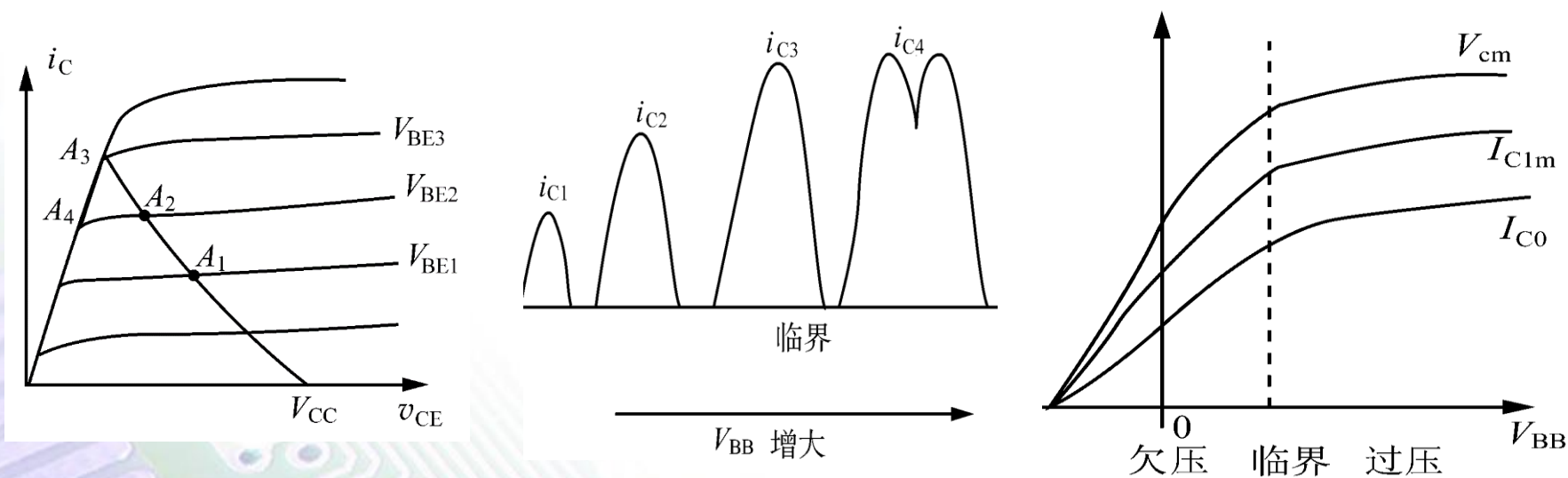
V_{CC} 对工作状态的影响

I_{c1} 在过压区随 V_{CC} 近似线性变化, 可实现调幅信号的放大——**高电平调幅**。

10.2 C类谐振功率放大器工作状态的分析

基极调幅特性

V_{im} , V_{cc} , R_p 不变, 输出电流电压随 V_{BB} 变化的特性。



输出电流电压在欠压区随 V_{BB} 近似线性变化, 可用来实现调幅。

10.3 谐振功率放大器的电路组成

谐振功率放大器由晶体管、馈电电路和匹配电路组成。

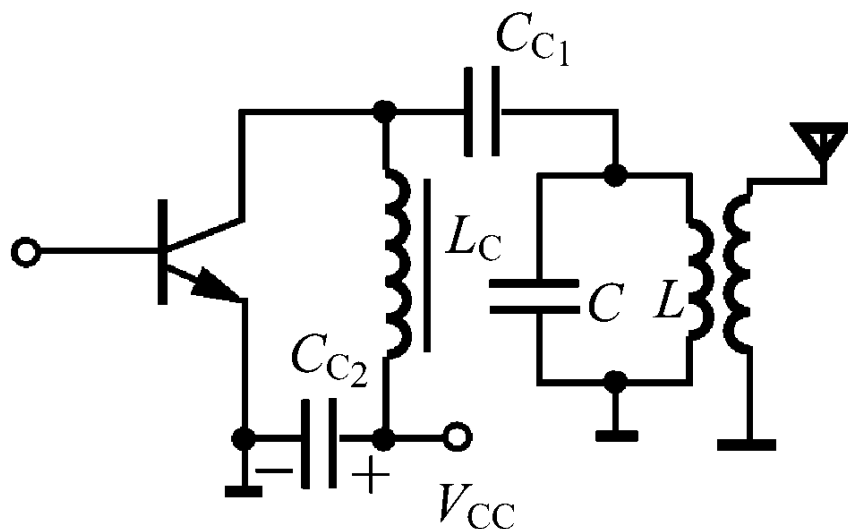
• 馈电电路

作用：为晶体管提供合适的集电极回路和基极回路的直流供电。

根据馈电电路与回路的连接关系，可分为串馈与并馈两种形式。

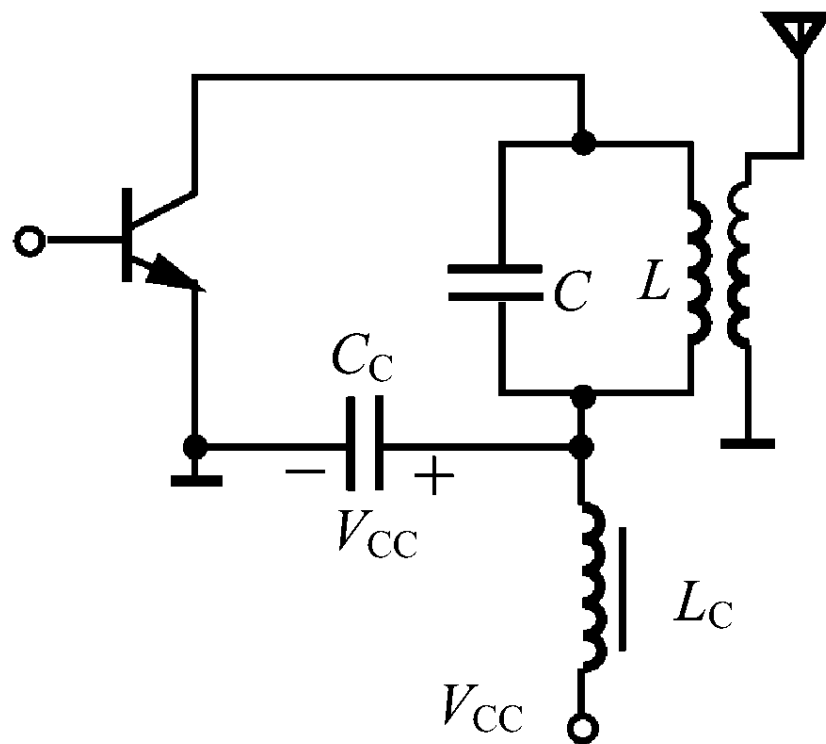
并馈：馈电电路与回路、晶体管并联。

$$v_{CE} = V_{CC} + v_c(t)$$



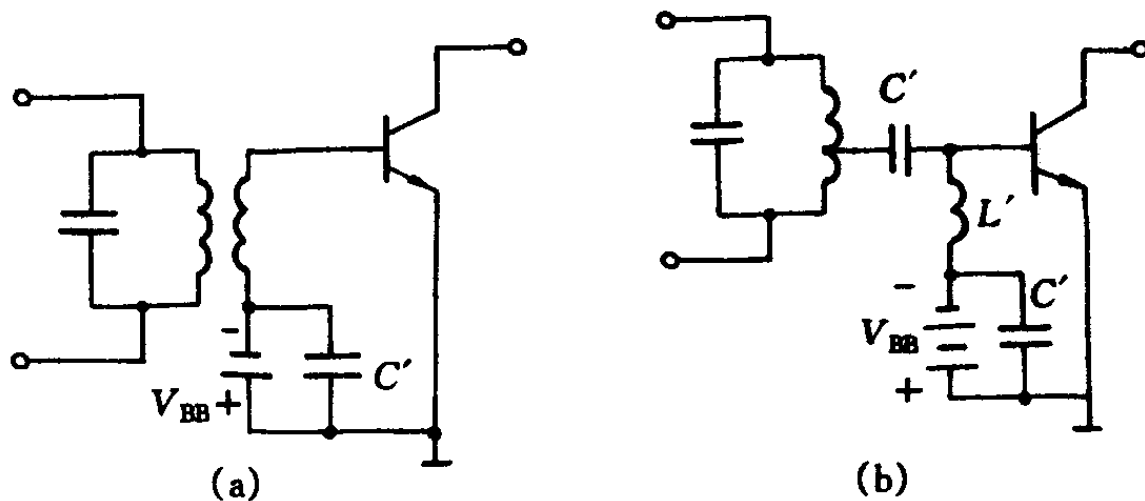
10.3 谐振功率放大器的电路组成

串馈： 馈电电路（电源、扼流圈等）与回路、晶体管串联。



10.3 谐振功率放大器的电路组成

基极馈电电路用 V_{BB} 时，也有串馈和并馈两种形式。

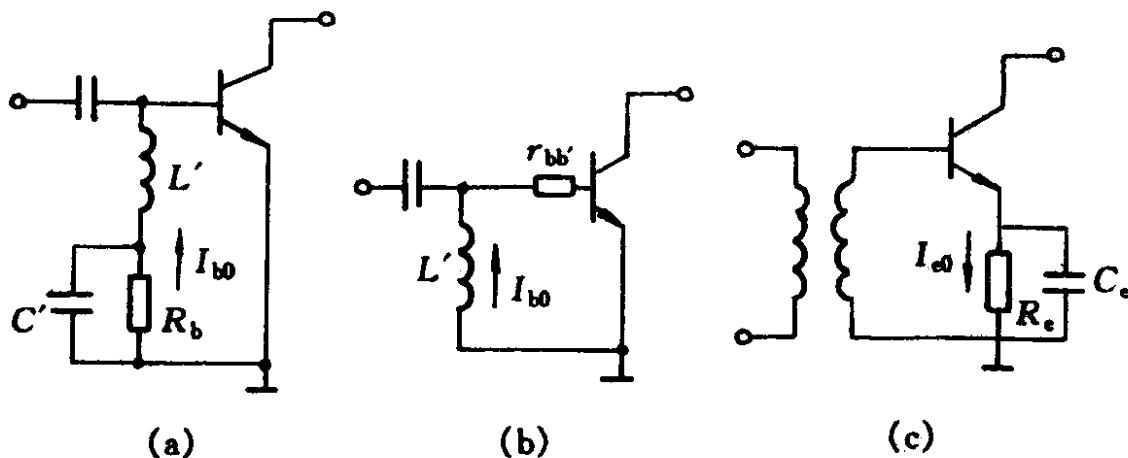


基极馈电的两种形式
(a) 串馈；(b) 并馈

10.3 谐振功率放大器的电路组成

基极馈电的自给偏压

- ✓ 由于基极电流脉冲的平均值一般不为0，在偏置电阻（或扼流圈内阻）上会产生一个负的偏压，可作为基极直流偏置电压
- ✓ 若基极电流脉冲幅度增大，所产生的负偏压就增大，会导致基极的激励信号减小，从而抑制了基极电流增大的趋势，具有自稳幅的效果。



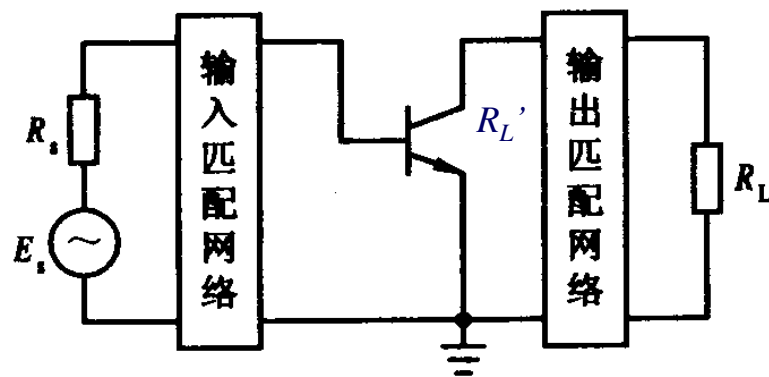
几种常用的产生基极偏置的方法

10.3 谐振功率放大器的电路组成

• 输出、输入与极间耦合回路

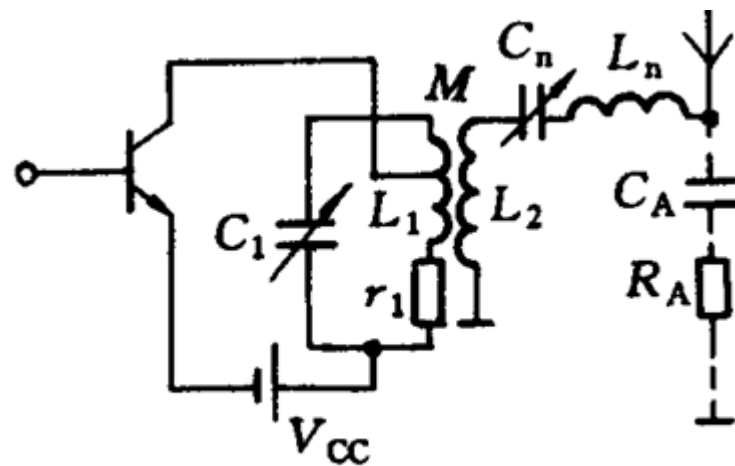
对耦合回路的主要要求为：

- 1) 实现**阻抗变换**，与晶体管的输入阻抗和输出阻抗相匹配。
- 2) **选频**输出，滤除谐波分量。
- 3) 匹配网络的**损耗尽量小**。



放大器的匹配网络

1. 复合输出回路



复合输出回路

10.3 谐振功率放大器的电路组成

谐振功率放大器的实用电路

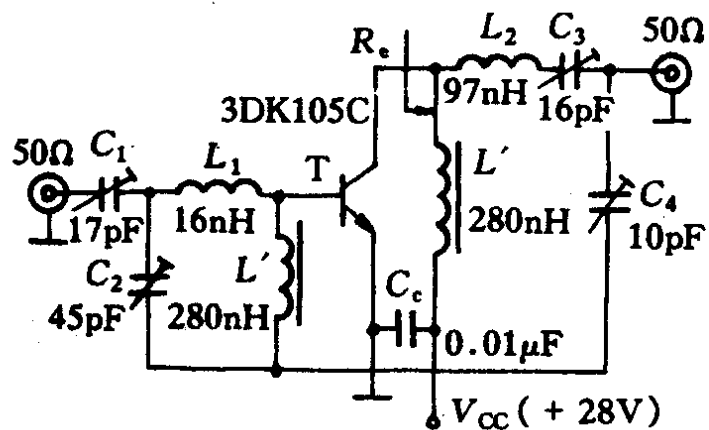


图 3-21 160MHz 谐振功率放大电路

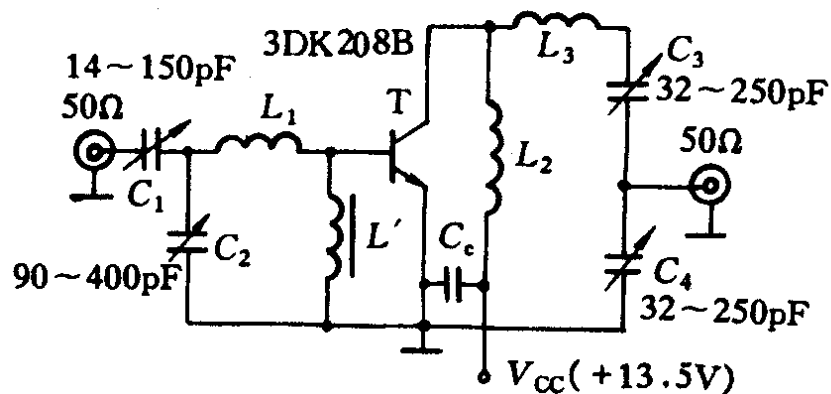


图 3-22 50MHz 谐振功率放大电路

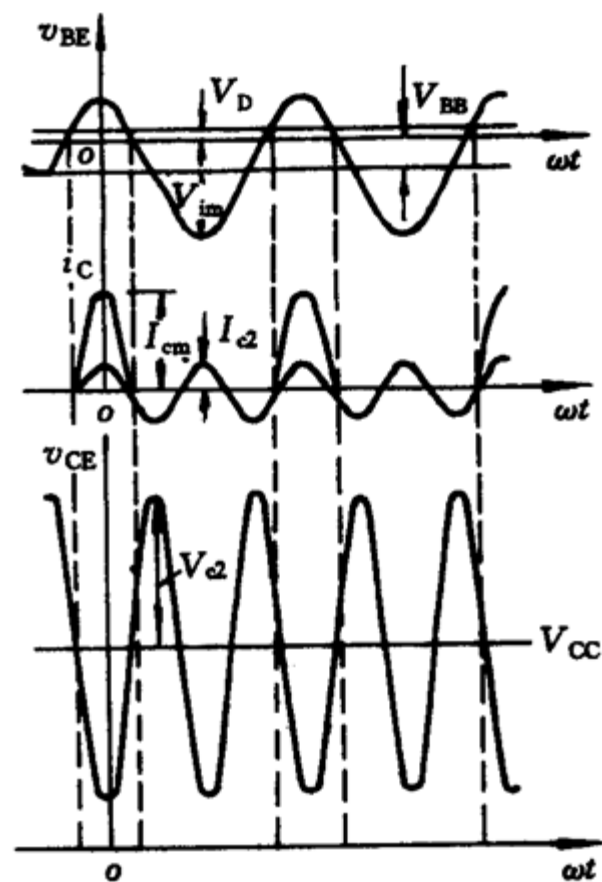
10.4 倍频器

C类放大器的输出回路调谐到2次或其它高次谐波频率上时，回路选出高次谐波电压输出，得到 **n 倍频器**。

2倍频器的电流电压波形如图。

$\theta = 120^\circ/n$ 时有最大谐波输出。

可采用陷波电路减小低次谐波的影响。



二倍频器的电压、电流波形

10.6 功率合成与分配

将多个协同工作（输入相同）的功率放大器的输出送到同一个负载上，称为**功率合成**；将一个功率放大器的输出送到多个不同的负载上，称为**功率分配**。

功率合成与分配的关键是：

- 1) **有效性**：功放能够输出额定功率并能有效地送到负载上。
- 2) **隔离性**：各功放（或负载）的工作状态互不影响。

不能简单地采用放大器并联工作的方式进行功率合成。

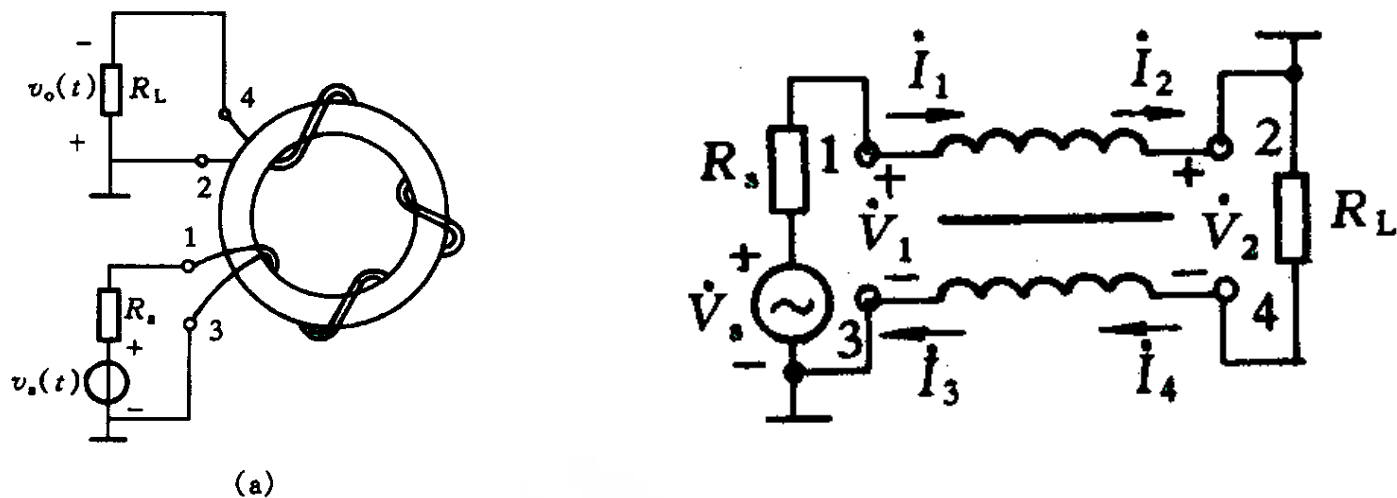
传输线变压器是实现功率合成与分配的主要器件。

10.6 功率合成与分配

传输线变压器

传输线变压器是一种兼具变压器和传输线两种原理进行工作的无源器件。

其结构和电路符号如图：



外加激励和负载时，其基本关系式为： $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$ ， $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_3 = \dot{I}_4$

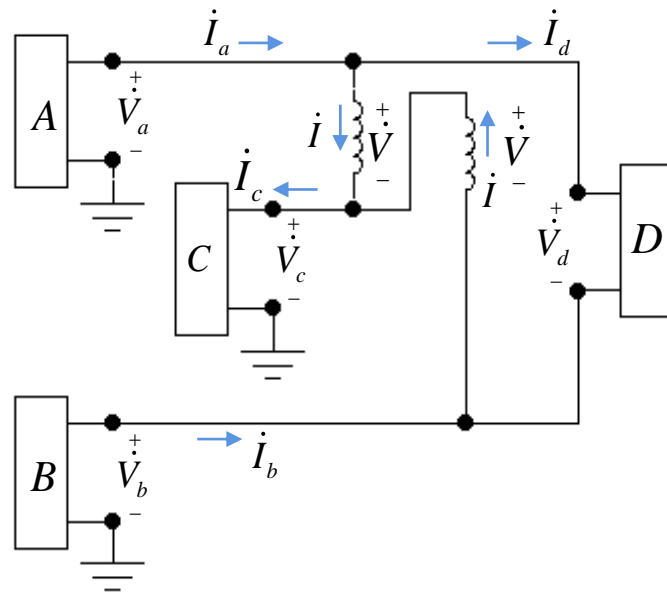
与两根直导线相比，上式对直导线仍然成立，但没有端口1-3与端口2-4间的隔离作用，不能保证隔离性能。

10.6 功率合成与分配

“魔T”网络

把如图传输线网络称为“魔T”网络。该网络具有4个端口，分别为分支端A、分支端B、混合端C、混合端D。从该图分析可得基本关系：

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_a - \dot{I}_d = \dot{I}_b + \dot{I}_d \\ \Rightarrow \begin{cases} \dot{I}_d = \frac{1}{2}(\dot{I}_a - \dot{I}_b) \\ \dot{I}_c = 2\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_b \end{cases} \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_a - \dot{V} = \dot{V}_b + \dot{V} \\ \Rightarrow \begin{cases} \dot{V}_c = \frac{1}{2}(\dot{V}_a + \dot{V}_b) \\ \dot{V}_d = \dot{V}_a - \dot{V}_b = 2\dot{V} \end{cases} \end{aligned}$$



若A、B端口加源，C、D端口加负载则为功率合成网络；若C、D端口加源，A、B端口加负载则为功率分配网络。

从图中可以看出，A、B、C端口是不平衡的，D端口是平衡的。也可以把D端口转换为不平衡的。

10.6 功率合成与分配

功率合成:

- 同相功率合成:

如果A、B端加同相的信号源, $I_a = I_b$, $V_a = V_b$, C、D端加负载, 则有 $I_d = 0$, $V_d = 0$, $I_c = 2I_a$, $V_c = V_a$, $P_c = I_c V_c = 2I_a V_a = 2P_a = 2P_b$, AB端信号源输出的功率合成到C端的负载上输出。D端输出功率为0。

负载等效到A、B端口的等效电阻为 $R_a = R_b = 2R_c$

- 反相功率合成:

如果A、B端加反相的信号源, $I_a = -I_b$, $V_a = -V_b$, C、D端加负载, 则有 $I_c = 0$, $V_c = 0$, $I_d = I_a$, $V_d = 2V_a$, $P_d = I_d V_d = 2I_a V_a = 2P_a = 2P_b$, AB端信号源输出的功率合成到D端的负载上输出。C端输出功率为0。

负载等效到A、B端口的等效电阻为 $R_a = R_b = R_d/2$

10.6 功率合成与分配

功率分配：

- 同相功率分配：

如果C端加信号源，A、B端加相同的负载，且D端接电阻，则有 $I_a = I_b = I_c / 2$ ， $V_a = V_b = V_c$ ， $V_d = 0$ ， $I_d = 0$ ， $P_a = P_b = I_a V_a = V_c I_c / 2 = P_c / 2$ ，C端信号源的功率分配到A、B端的负载上同相输出。

负载等效到C端口的等效电阻为 $R_c = R_a / 2 = R_b / 2$

- 反相功率分配

如果D端加信号源，A、B端加相同的负载，且C端接电阻，则有 $I_a = -I_b = I_d$ ， $V_a = -V_b = V_d / 2$ ， $V_c = 0$ ， $I_c = 0$ ， $P_a = P_b = I_a V_a = I_d V_d / 2 = P_d / 2$ ，D端信号源的功率分配到A、B端的负载上反相输出。

负载等效到D端口的等效电阻为 $R_d = 2R_a = 2R_b$

10.6 功率合成与分配

隔离条件

隔离条件要求两个分支端的工作情况要相互独立，不能因一个端口短路或开路而影响到另一个端口的工作。

对于**功率合成器**，设 I_a 不等于 I_b ，有：

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \frac{1}{2}\dot{V}_d + \dot{I}_c R_c = \frac{1}{4}R_d(\dot{I}_a - \dot{I}_b) + R_c(\dot{I}_a + \dot{I}_b) \\ &= \dot{I}_a\left(\frac{1}{4}R_d + R_c\right) - \dot{I}_b\left(\frac{1}{4}R_d - R_c\right)\end{aligned}$$

若满足 $R_c = R_d/4$ ，则 $V_a = R_d I_a/2$ ，与 I_b 大小无关。同理可证明，在满足此条件的情况下， V_b 与 I_a 无关。

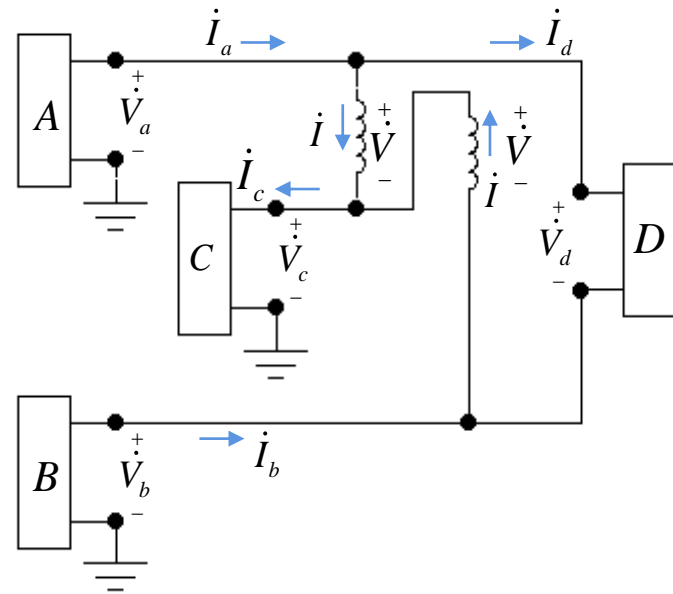
10.6 功率合成与分配

对于**功率分配器**，隔离的含义是指无论另一个分支端的阻抗如何变化，在本分支端的负载上得到的功率维持不变。

对于同相分配器，设C端口信号源 V_{cs} 内阻为 R_c ，D端口接匹配电阻 R_d ，A端口负载变化，有：

设满足条件 $R_c = \frac{1}{2}R$ ， $R_d = 2R$ ， $R_b = R$

A端失配 $R_a \neq R \Rightarrow \dot{I}_d \neq 0$ ， $2\dot{V} = \dot{I}_d R_d$



10.6 功率合成与分配

$$\begin{aligned}\dot{V}_{cs} &= \dot{V} - \dot{I}_c R_c - \dot{I}_b R_b = \frac{1}{2} \dot{I}_d R_d - 2\dot{I} \frac{R}{2} - (\dot{I} - \dot{I}_d)R \\ &= 2(\dot{I}_d - \dot{I})R = -2\dot{I}_b R\end{aligned}$$

B端口获得的功率为：
$$P_b = I_b^2 R = \left(\frac{-V_{cs}}{2R} \right)^2 R = \frac{V_{cs}^2}{4R}$$

与A端口也匹配时的功率相同 → A端口的负载变化对B端口不产生影响。

同理可证B口对A口亦无影响。所需满足的隔离条件为：

$$R_c = \frac{1}{2} R, \quad R_d = 2R, \quad R_b = R, \quad R_a = R$$

10.6 功率合成与分配

对于反相分配器，设D端口信号源 V_{ds} 内阻为 R_d ，C端口接匹配电阻 R_c ，A端口负载变化，有：

$$\text{设满足条件 } R_c = \frac{1}{2}R, R_d = 2R, R_b = R$$

$$\text{A端失配 } R_a \neq R \Rightarrow \dot{V}_c \neq 0$$

$$\dot{V}_c = \dot{I}_c R_c = \dot{V} - \dot{I}_b R_b = \frac{1}{2}(\dot{V}_{ds} + \dot{I}_d R_d) - \dot{I}_b R_b$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{ds} &= 2\dot{I}_c R_c + 2\dot{I}_b R_b - \dot{I}_d R_d = 2\dot{I}R + 2\dot{I}_b R - 2\dot{I}_d R \\ &= 2\dot{I}_b R + 2(\dot{I} - \dot{I}_d)R = 4\dot{I}_b R\end{aligned}$$

$$\text{B端口获得的功率为： } P_b = I_b^2 R = \left(\frac{V_{ds}}{4R}\right)^2 R = \frac{V_{ds}^2}{16R}$$

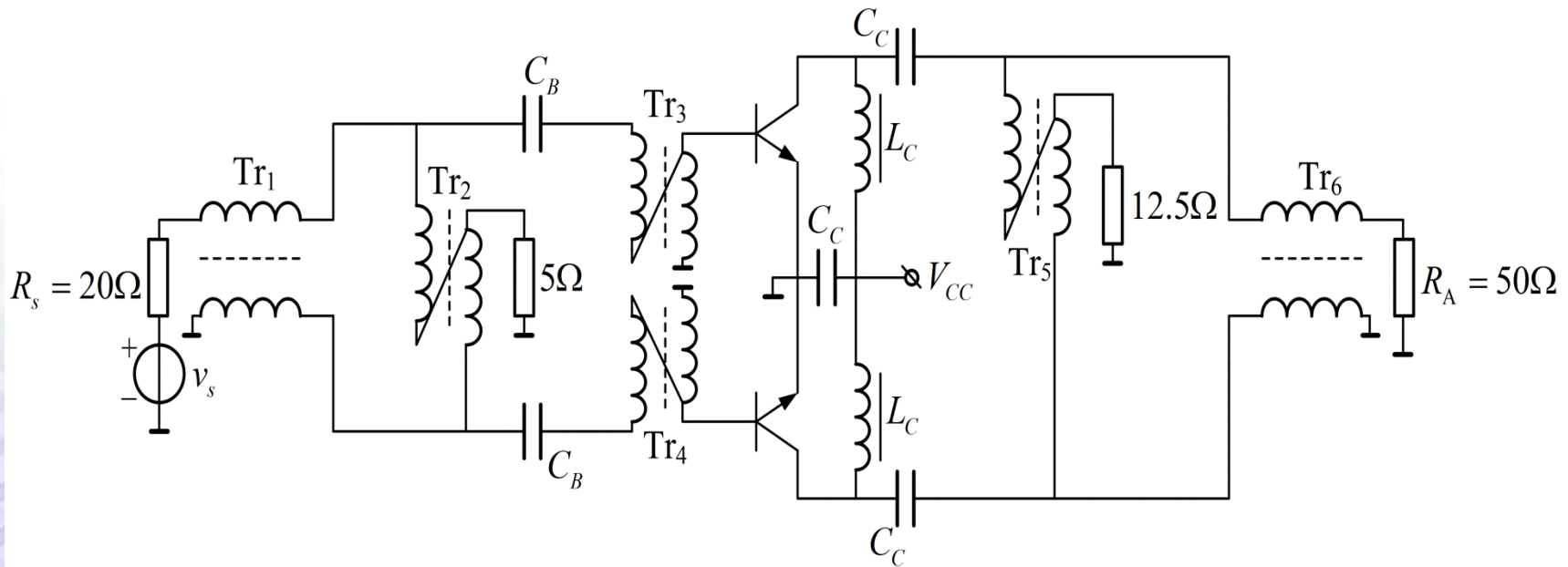
与A端口也匹配时的功率相同 → A端口的负载变化对B端口不产生影响。

同理可证B口对A口亦无影响。所需满足的隔离条件为：

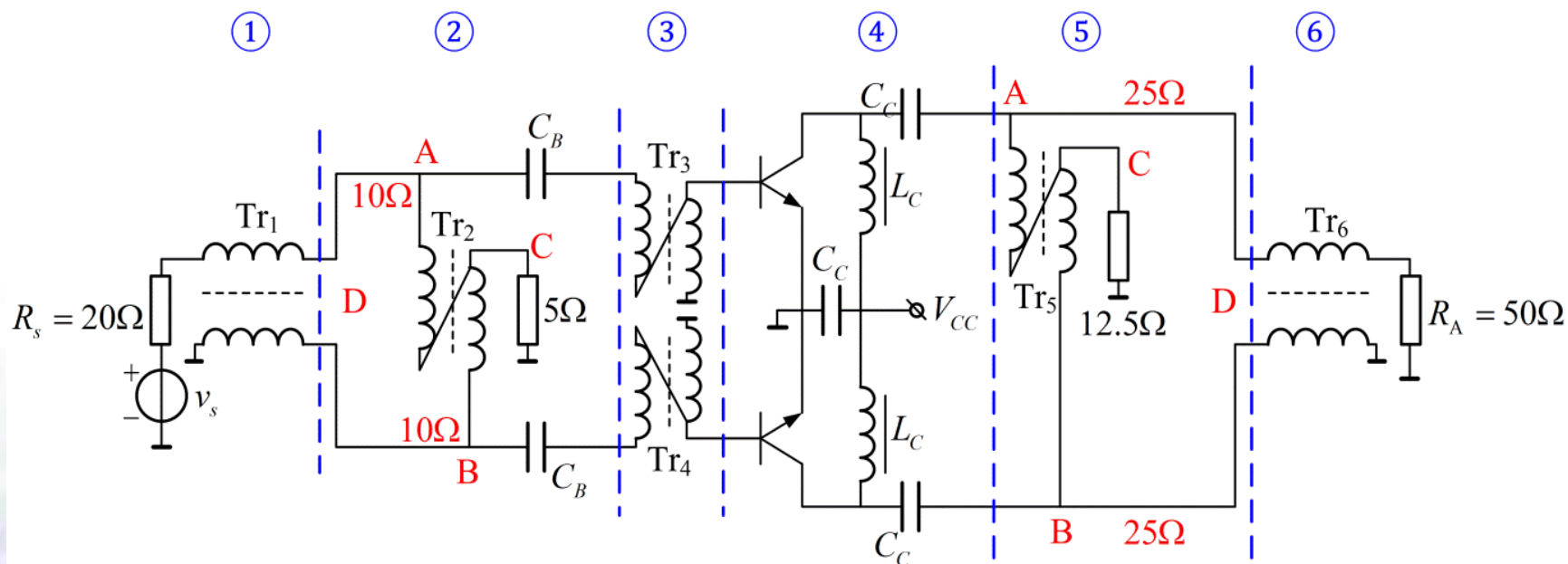
$$R_c = \frac{1}{2}R, R_d = 2R, R_b = R, R_a = R$$

10.6 功率合成与分配

例题：分析图中各传输线变压器的用途，标出相应的A、B、C、D端口及各端口的等效电阻，并说明电路各部分的功能。



10.6 功率合成与分配



- ① Tr_1 实现非平衡转平衡；
- ② Tr_2 为反相功率分配器；
- ③ Tr_3 和 Tr_4 分别实现A、B两路信号的4:1阻抗变换；
- ④ 晶体管实现功率放大， V_{CC} 提供管子直流偏置， C_c 为隔直电容， L_c 为高频扼流圈；
- ⑤ Tr_5 为反相功率合成器；
- ⑥ Tr_6 完成平衡转不平衡，合成信号从天线发射， R_A 为天线负载。

本章要点

- **掌握**C类功放的电路特点及其基本工作原理，影响放大器效率的因素及提高效率的途径。
- **掌握**折线近似条件下C类功放电路的求解。
- **掌握**C类功放的三种工作状态、判定条件、四个基本因素对工作状态的影响。
- 了解C类功放的电路组成：馈电电路、耦合电路的工作原理和基本电路形式。
- **掌握**功率合成器与分配器的电路与工作原理：魔T网络的基本电路、4个端口的作用和特点、匹配条件和隔离条件。

作业

➤ 10-2、10-3、10-5、10-13、10-14
