



CEC

角度调制与解调 II

Angle Modulation & Demodulation II

2024年6月14日

学而不厌 诲人不倦



Chapter 8 角度调制与解调

- ➡ §8.1 概述
- ➡ §8.2 调角波的性质
- ➡ **§8.3 调频方法概述**
- ➡ §8.4 变容二极管调频
- ➡ §8.5 晶体振荡器直接调频
- ➡ §8.6 间接调频:由调相实现调频
- ➡ §8.7 可变延时调频
- ➡ §8.8 相位鉴频器
- ➡ §8.9 比例鉴频器
- ➡ §8.10 其他形式的鉴频器

8.3 调频方法概述

➤ 1. 频率调制的要求与分类

—产生调频信号的电路称为**调频器**，主要有四个要求：

- 已调波的瞬时频率与调制信号成比例地变化。**调频特性曲线**。
- 未调制时的载波频率，即已调波的中心频率具有一定的**稳定度**。
- **最大频移与调制频率无关**。
- **无寄生调幅**或寄生调幅尽可能小。

—产生调频信号的方法归纳起来主要有两类

- 第一类是用调制信号直接控制载波的瞬时频率——**直接调频**。
- 第二类是由调相变调频——**间接调频**。

不同的调频系统对最大频偏有不同的要求

调频广播：**75kHz**；电视伴音：**50kHz**；无线电话：**5kHz**



8.3 调频方法概述

➤ 2. 直接调频原理

— **直接调频**的基本原理是**用调制信号直接线性地改变载波振荡的瞬时频率**。因此，凡是能直接影响载波振荡瞬时频率的元件或参数，只要能够用调制信号去控制它们，并从而使载波振荡瞬时频率按调制信号变化规律线性地改变，都可以完成直接调频的任务。

如果载波由LC自激振荡器产生，则振荡频率主要由谐振回路的电感元件和电容元件所决定。因此，只要能用调制信号去控制回路的电感或电容，就能达到控制振荡频率的目的。

调频电路中

常用的**可控电容元件**有**变容二极管**和**电抗管**电路。

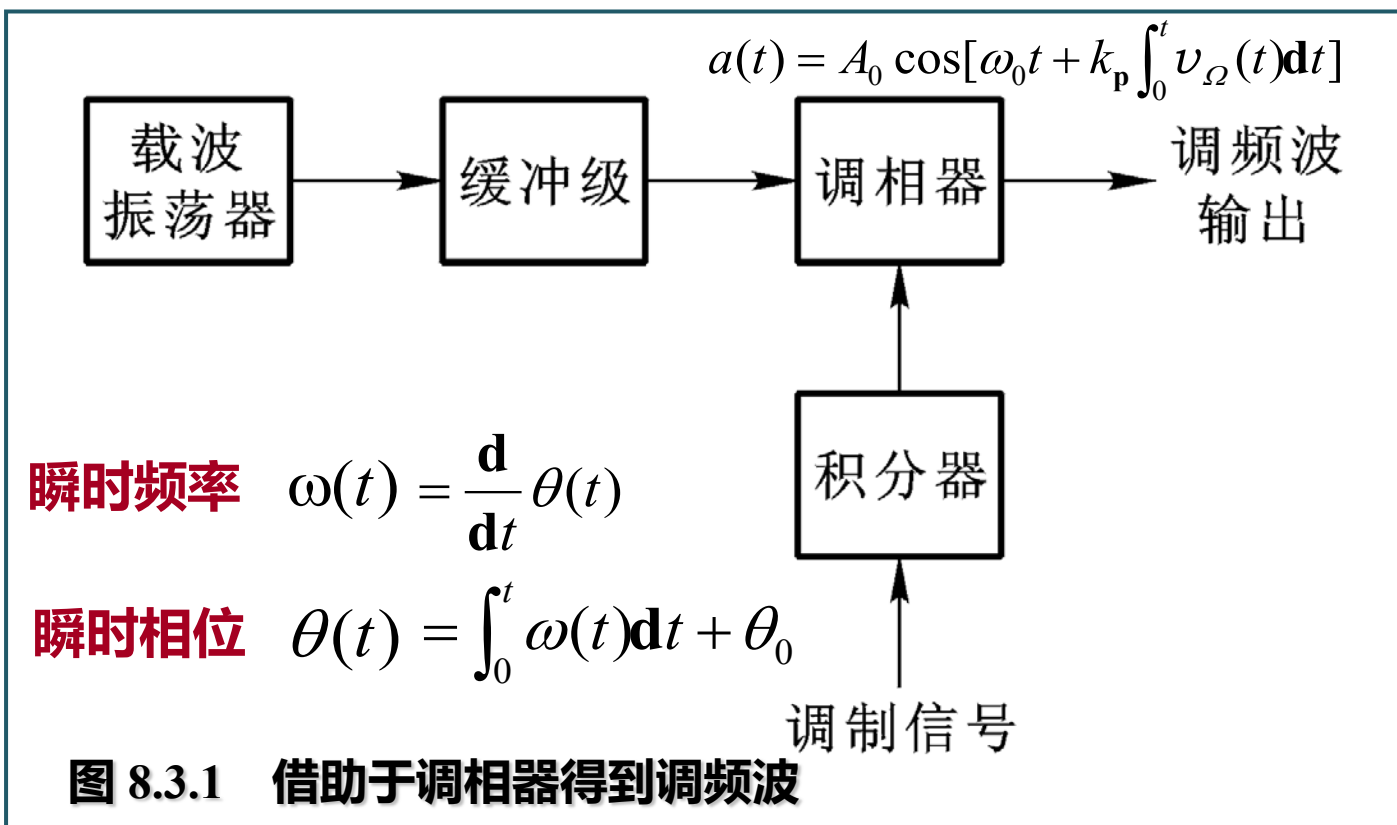
常用的**可控电感元件**是具有铁氧体磁芯的电感线圈或电抗管电路，而**可控电阻元件**有二极管和场效应管。

8.3 调频方法概述

➤ 3. 间接调频原理

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + k_f \int_0^t v_\Omega(t) dt]$$

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + k_p v_\Omega(t)]$$





8.3 调频方法概述

➤ 3. 间接调频原理

设调制信号为 $v_{\Omega}(t)$,

对 $V_{\Omega}(t)$ 积分, 得瞬时相位

$$\theta(t) = \int_0^t [\omega_0 + k_f v_{\Omega}(t)] dt + \theta_0 = \omega_0 t + k_f \int_0^t v_{\Omega}(t) dt + \theta_0$$

调频波数学(相位)表达式

$$a(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + k_f \cdot \int_0^t v_{\Omega}(t) dt + \theta_0)$$

与调相波数学(相位)表达式 意义相同

$$a(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + k_P \cdot v_{\Omega}(t) + \theta_0)$$



Chapter 8 角度调制与解调

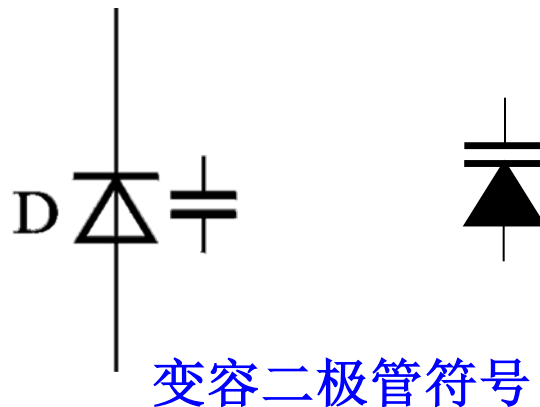
- ➡ §8.1 概述
- ➡ §8.2 调角波的性质
- ➡ §8.3 调频方法概述
- ➡ **§8.4 变容二极管调频**
- ➡ §8.5 晶体振荡器直接调频
- ➡ §8.6 间接调频:由调相实现调频
- ➡ §8.7 可变延时调频
- ➡ §8.8 相位鉴频器
- ➡ §8.9 比例鉴频器
- ➡ §8.10 其他形式的鉴频器

8.4 变容二极管调频

➤ 1. 基本原理

变容二极管是利用半导体PN结的结电容随反向电压变化这一特性而制成的一种半导体二极管。结电容 C_j 与反向电压 v_R 存在如下关系：

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{v_R}{V_D}\right)^\gamma}$$



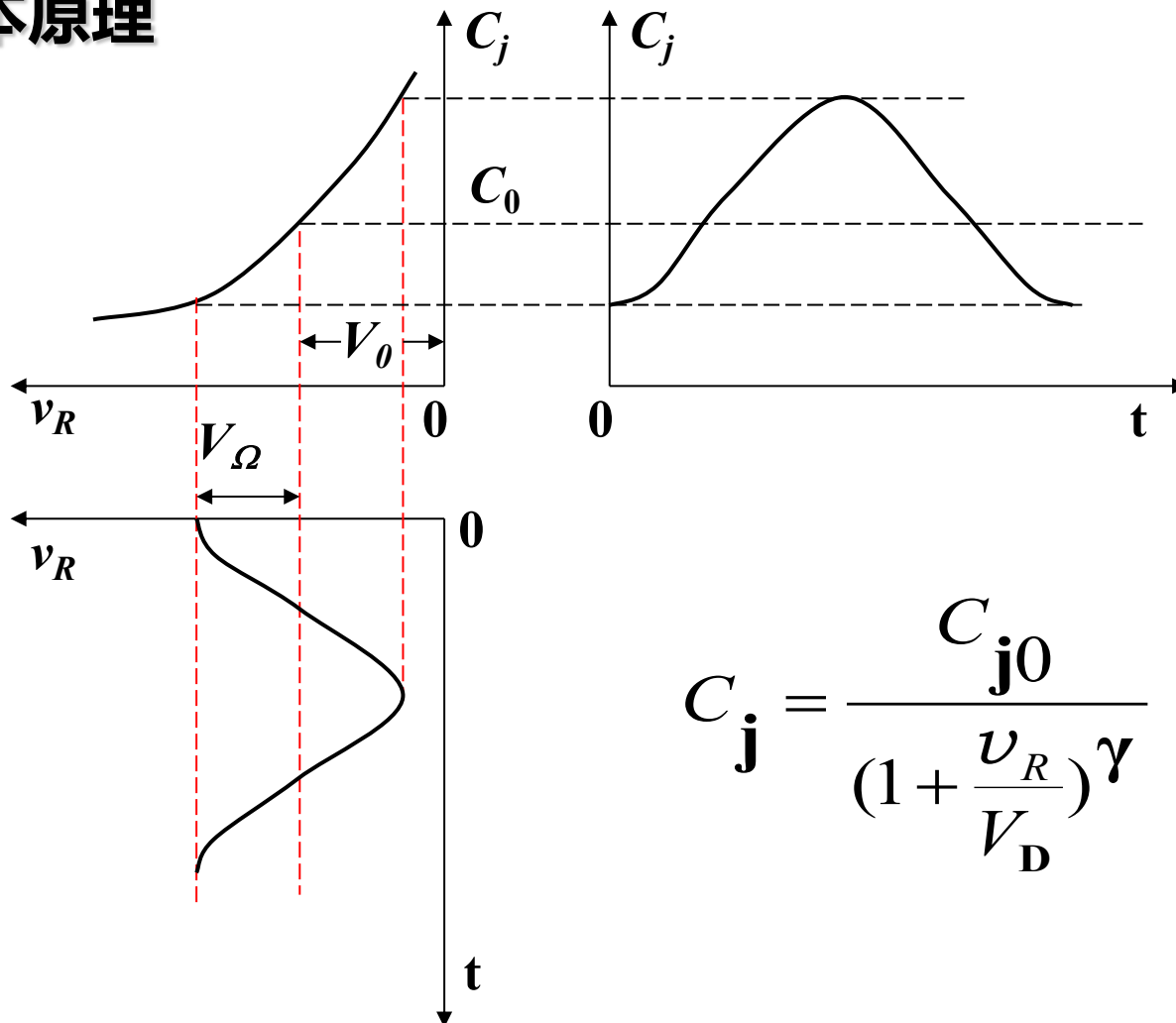
式中 C_{j0} ： $v_R = 0$ 时的电容值（零偏置电容）

v_R ： 反向偏置电压， V_D ： PN结势垒电位差。

γ ： 结电容变化指数，通常 $\gamma=1/2 \sim 1/3$ ，经特殊工艺制成的超突变结电容 $\gamma=1 \sim 5$

8.4 变容二极管调频

➤ 1. 基本原理



$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{v_R}{V_D}\right)^\gamma}$$

工作过程: $|v_R| \downarrow \Rightarrow C_j \uparrow \Rightarrow C_\Sigma \uparrow \Rightarrow f \downarrow \Rightarrow$ 最后达到调频。

8.4 变容二极管调频



➤ 2. 变容二极管调频电路

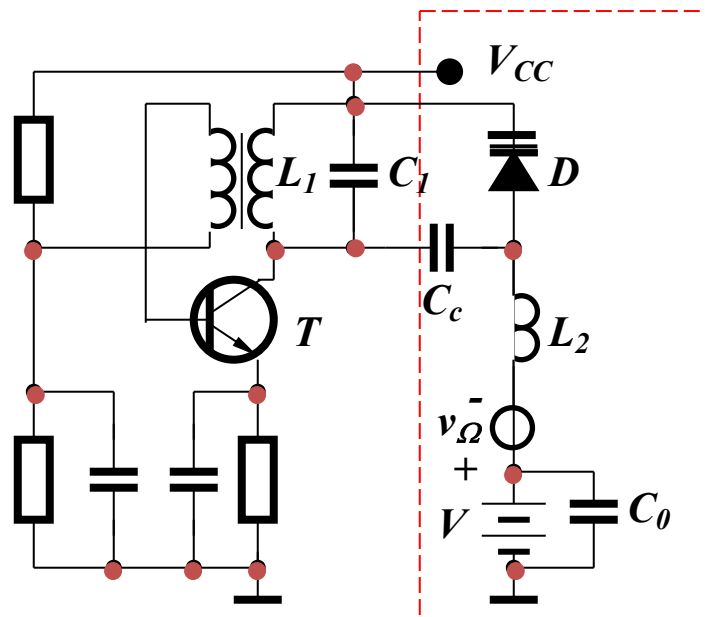


图8.4-2 变容二极管调频电路

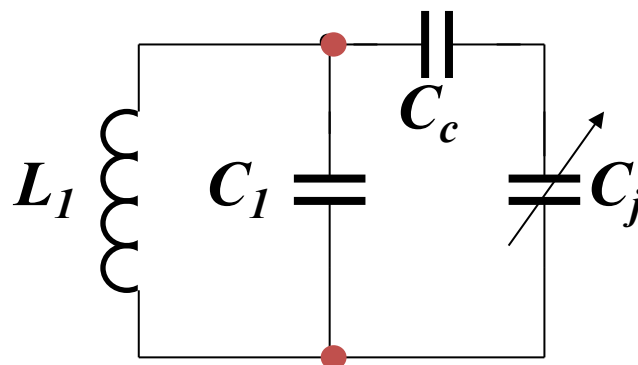


图8.4-3 等效电路

加在变容二极管上的反向电压: $v_R = V_{CC} - V + v_{\Omega}(t) = V_o + v_{\Omega}(t)$

C_c 一是耦合电容, 同时起隔直作用;

C_0 一是对调制信号的旁路电容; L_2 一是高频扼流圈。

8.4 变容二极管调频

➤ 2. 变容二极管调频电路

目标：主要找出 $\omega(t)$ 与 $v_{\Omega}(t)$ 定量关系，
(即 $\Delta\omega(t)$ 与 $v_{\Omega}(t)$ 关系)

当调制信号 $v_{\Omega}(t)=0$ 时，变容二极管电容为：

$$C_0 = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_0}{V_D}\right)^{\gamma}} = \frac{C_{j0}}{\left(\frac{V_D + V_0}{V_D}\right)^{\gamma}}$$

这时振荡回路的总电容为：

$$C = C_1 + \frac{C_c C_0}{C_c + C_0} = C_1 + \frac{C_c}{1 + \frac{C_c}{C_0}}$$

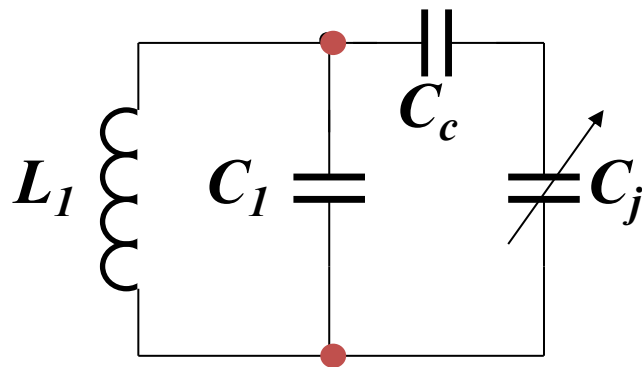


图8.4-3 等效电路

8.4 变容二极管调频

➤ 2. 变容二极管调频电路

当调制信号为单音频 $v_{\Omega}(t)=V_{\Omega}\cos\Omega t$ 时, 电容为:

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_0 + V_{\Omega}\cos\Omega t}{V_D}\right)^{\gamma}} = \frac{C_{j0}}{\left(\frac{V_D + V_0}{V_D}\right)^{\gamma} \left(1 + \frac{V_{\Omega}}{V_D + V_0}\cos\Omega t\right)^{\gamma}}$$

则 $C_j = C_0(1 + m\cos\Omega t)^{-\gamma}$ m 调制深度

当 $v_{\Omega}(t) \neq 0$ 时, 振荡回路的总电容为:

$$C' = C_1 + \frac{C_c C_j}{C_c + C_j} = C_1 + \frac{C_c}{1 + \frac{C_c}{C_j}}$$

$$C' = C_1 + \frac{C_c}{1 + \frac{C_c}{C_0}(1 + m\cos\Omega t)^{\gamma}}$$



8.4 变容二极管调频

➤ 2. 变容二极管调频电路

$$\Delta C(t) = C' - C = \frac{C_c}{1 + \frac{C_c}{C_0}(1 + m \cos \Omega t)^\gamma} - \frac{C_c}{1 + \frac{C_c}{C_0}}$$

经过分析,进行泰勒级数展开(具体分析见教科书)。

当 $\gamma=1$ 时, $\Delta C(t)$ 与 $v_\Omega(t)$ 有下列关系:

$$\text{当 } \frac{C_c}{C_0} m \cos \Omega t \ll 1 + \frac{C_c}{C_0} \quad \text{则} \quad \Delta C(t) = \frac{C_c^2 / C_0}{(1 + C_c / C_0)^2} m \cos \Omega t$$

*这就是说, $\Delta C(t)$ 与 $v_\Omega(t)$ 恰好成正比关系。如果 $\Delta C(t)$ 很小,

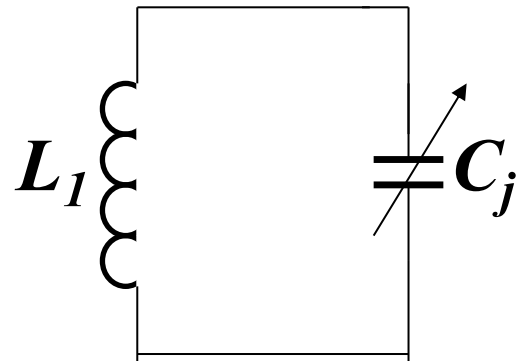
$$\text{由 } \frac{\Delta f}{f_o} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} \text{ 可知, } \Delta f \text{ 也与 } \Delta C \text{ 成正比例关系。}$$

最后可以得出, Δf 与 $v_\Omega(t)$ 恰好成正比关系的结论。

8.4 变容二极管调频

➤ 2. 变容二极管调频电路

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_j L_1}} \quad C_j = C_0(1 + m \cos \Omega t)^{-\gamma}$$



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_0 L_1}} (1 + m \cos \Omega t)^{\frac{\gamma}{2}}$$

当 $\gamma=2$ $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_0 L_1}}$ 时, 则得 $f = f_o(1 + m \cos \Omega t)$

理想线性调制条件 $\gamma = 2$

小频偏条件下, $\gamma=1$, Δf 与 $V_\Omega(t)$ 近似线性。

大频偏条件下, $\gamma=2$, Δf 与 $V_\Omega(t)$ 近似线性。



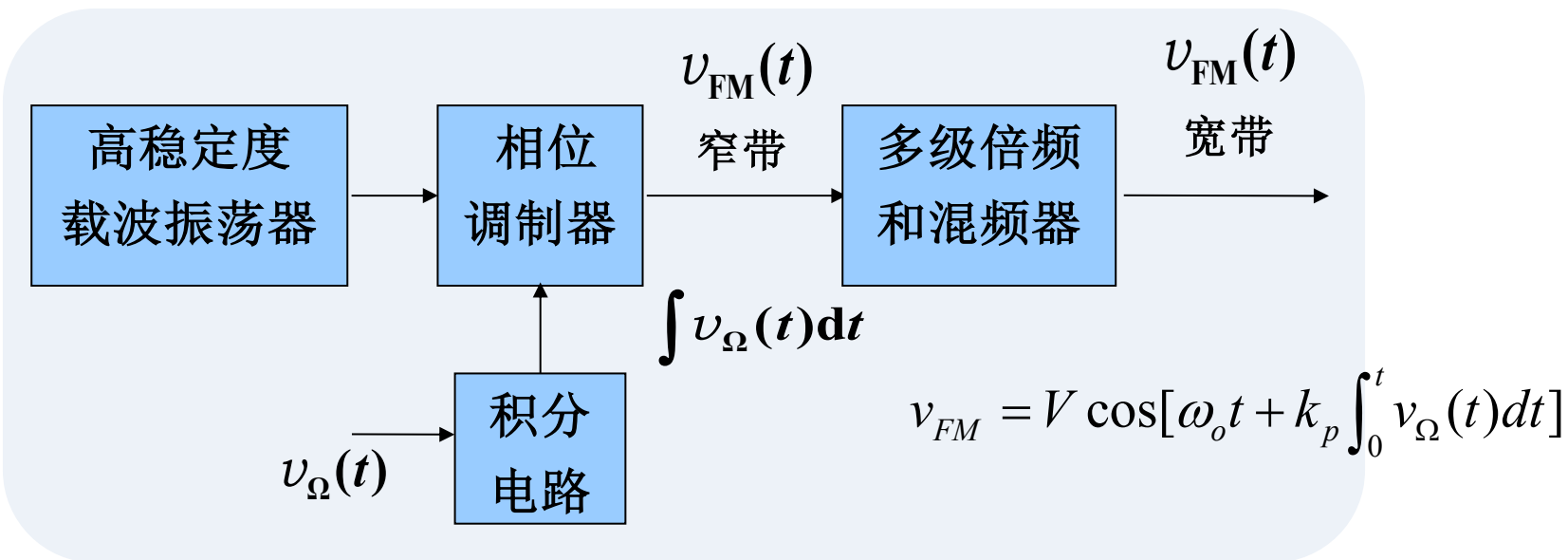
Chapter 8 角度调制与解调

- ➡ §8.1 概述
- ➡ §8.2 调角波的性质
- ➡ §8.3 调频方法概述
- ➡ §8.4 变容二极管调频
- ➡ §8.5 晶体振荡器直接调频
- ➡ **§8.6 间接调频:由调相实现调频**
- ➡ §8.7 可变延时调频
- ➡ §8.8 相位鉴频器
- ➡ §8.9 比例鉴频器
- ➡ §8.10 其他形式的鉴频器

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 基本原理

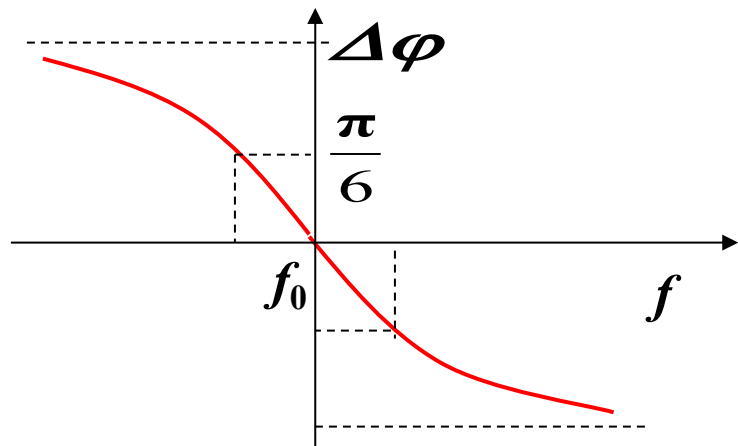
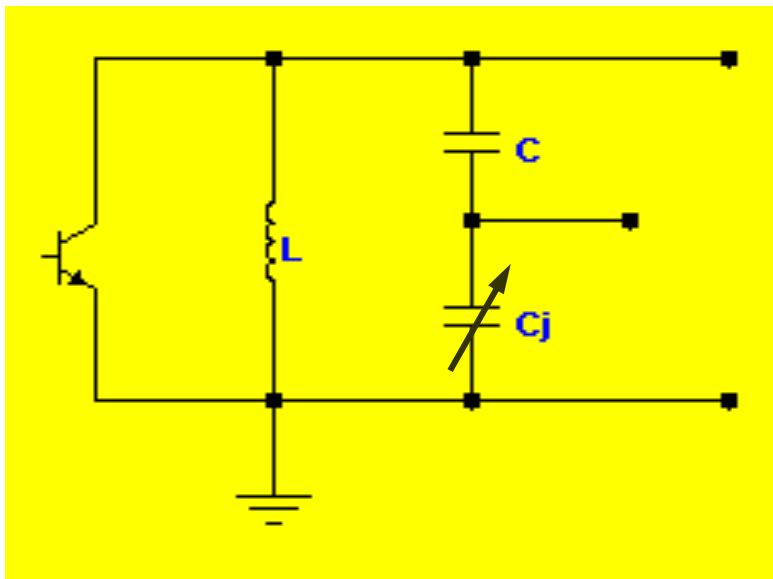
- 直接调频中心频率稳定度都不高。
- 晶体振荡器直接调频的中心频率稳定度虽有提高，但频偏太小。
- 间接调频则采用高稳定度的晶体振荡器作为主振级，然后调制信号积分后对这个稳定的载频信号进行调相，这样一来就可得到中心频率稳定度高的调频信号。



8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

- 谐振回路或移相网络的调相方法
- 用调制信号控制谐振回路或移相网络的电抗或电阻元件以实现调相

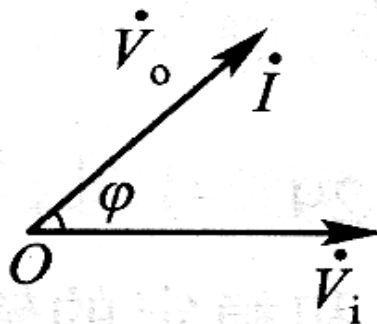
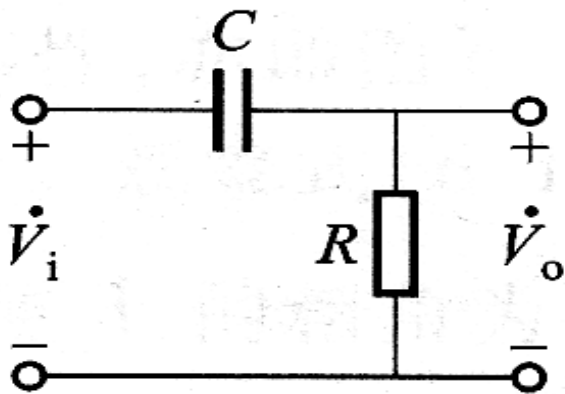


$$\Delta\varphi = -\arctan\left(Q \frac{2\Delta f}{f_0}\right)$$

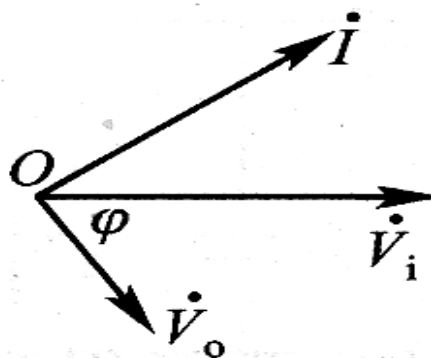
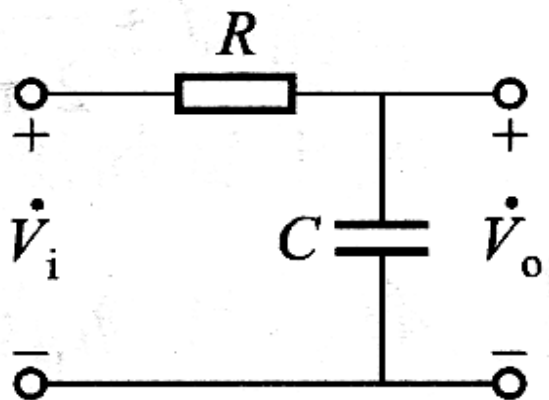
8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

— 利用移相网络调相



$$\varphi = \arctan \frac{1}{\omega RC}$$



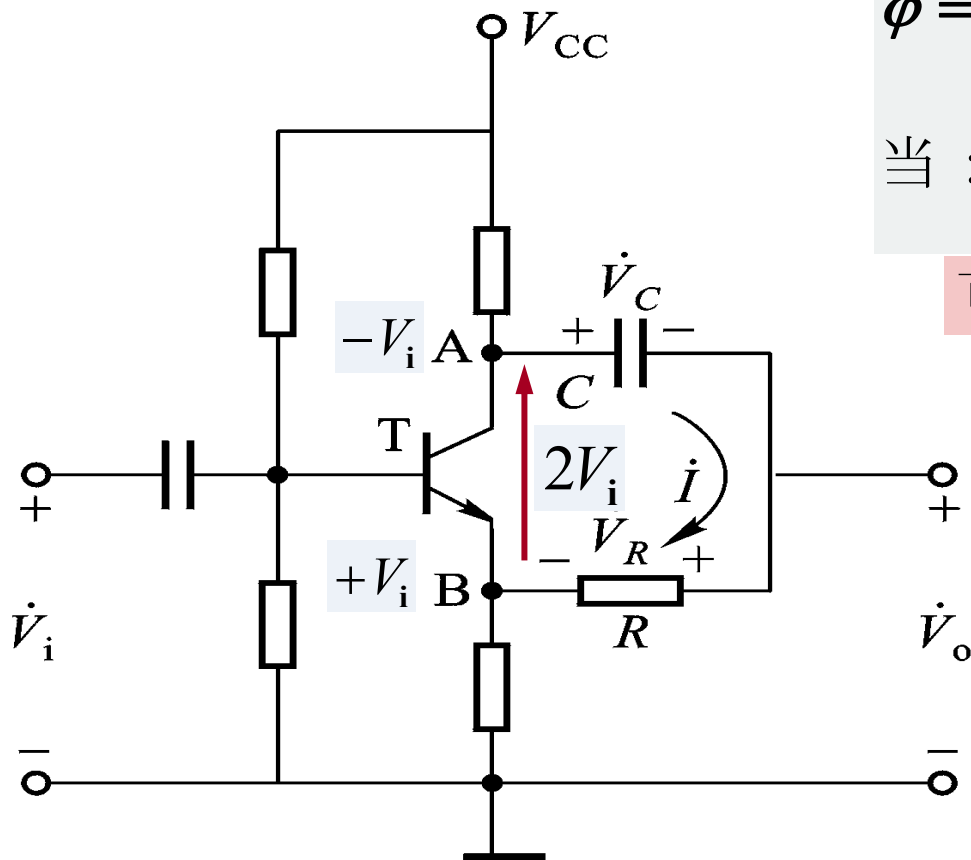
$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan \omega RC$$

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

— 利用移相网络调相



$$\varphi = 2 \arctan \frac{V_C}{V_R} = 2 \arctan \frac{1}{\omega_0 CR}$$

$$\text{当} : \varphi \leq \frac{\pi}{6}, \text{ 则} : \varphi \approx \frac{2}{\omega_0 CR}$$

可见： φ 与C或R成反比

- 若调制信号也与C或R成反比，则调制信号与 φ 成正比

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

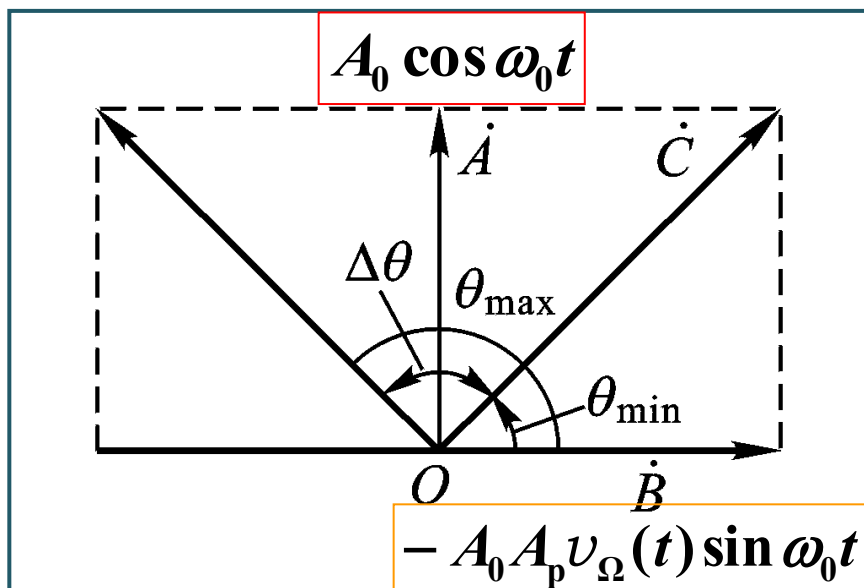
– 合成调相法 [阿姆斯特朗法 Armstrong method]

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + k_p V_\Omega \cos \Omega t]$$

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t \cos[A_p v_\Omega(t)] - A_0 \sin \omega_0 t \sin[A_p v_\Omega(t)]$$

当 : $k_p |v_\Omega(t)| \leq \frac{\pi}{6}$

$$a(t) \approx \underbrace{A_0 \cos \omega_0 t}_C - \underbrace{A_0 A_p v_\Omega(t)}_B \underbrace{\sin \omega_0 t}_A$$



- 合成矢量C的长度和相角都受到调制信号 $V_\Omega(t)$ 的控制。

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

— 合成调相法 [阿姆斯特朗法 Armstrong method]

$$a(t) \approx A_0 \cos \omega_0 t - A_0 A_p v_{\Omega}(t) \sin \omega_0 t$$

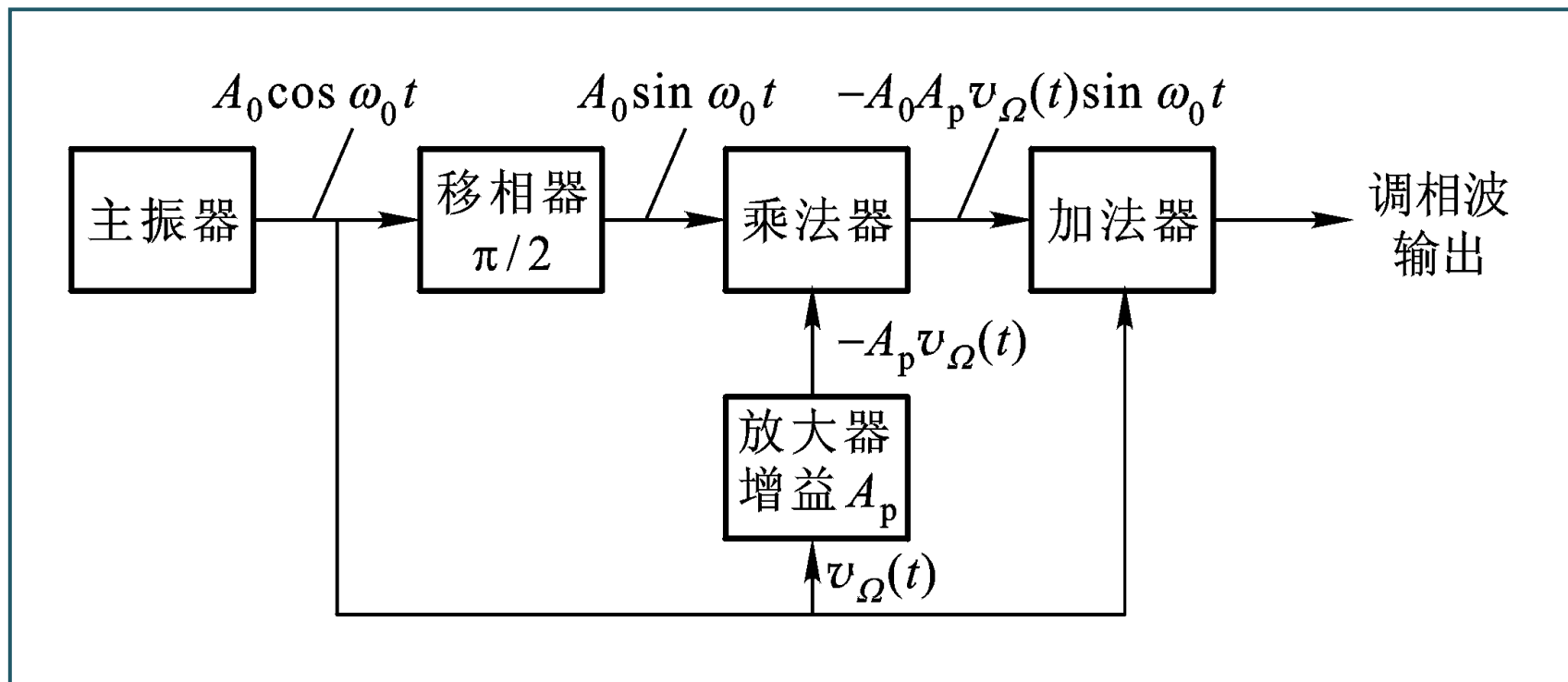


图 8.6.5 实现矢量合成法的方框图

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 1. 调相的方法

— 合成调相法 [阿姆斯特朗法 Armstrong method]

$$a(t) \approx A_0 \cos \omega_0 t - A_0 A_p v_{\Omega}(t) \sin \omega_0 t$$

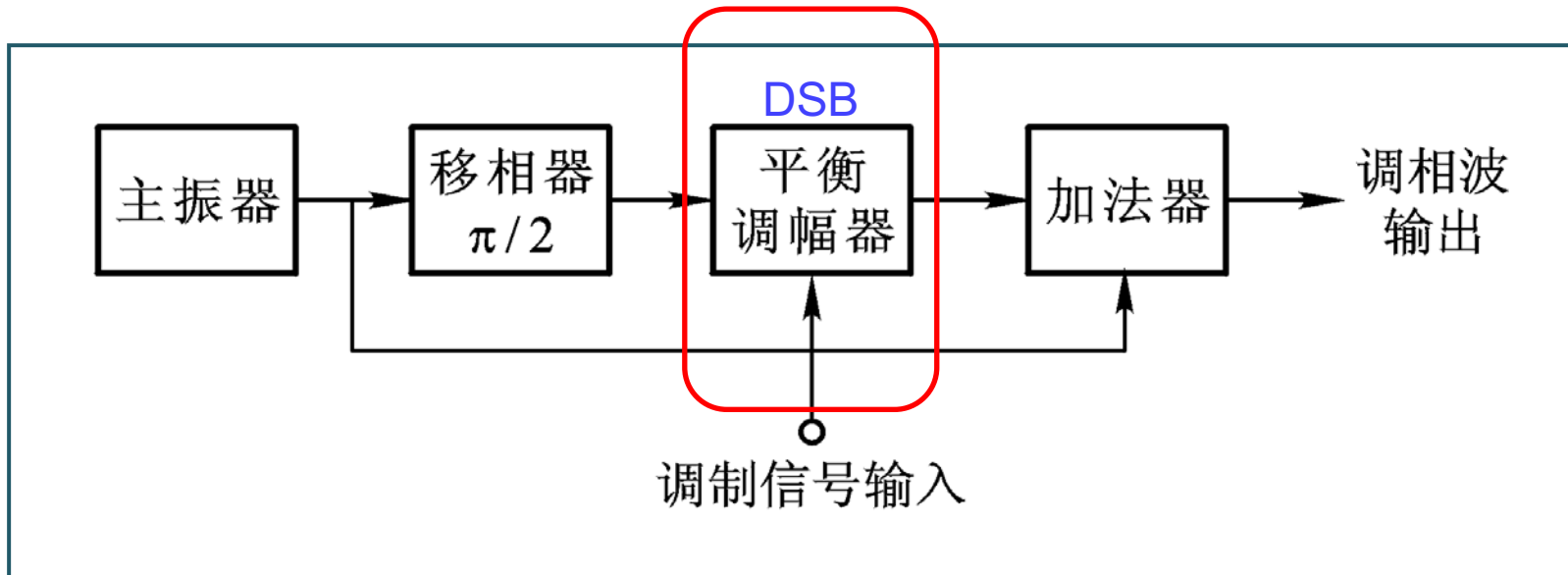
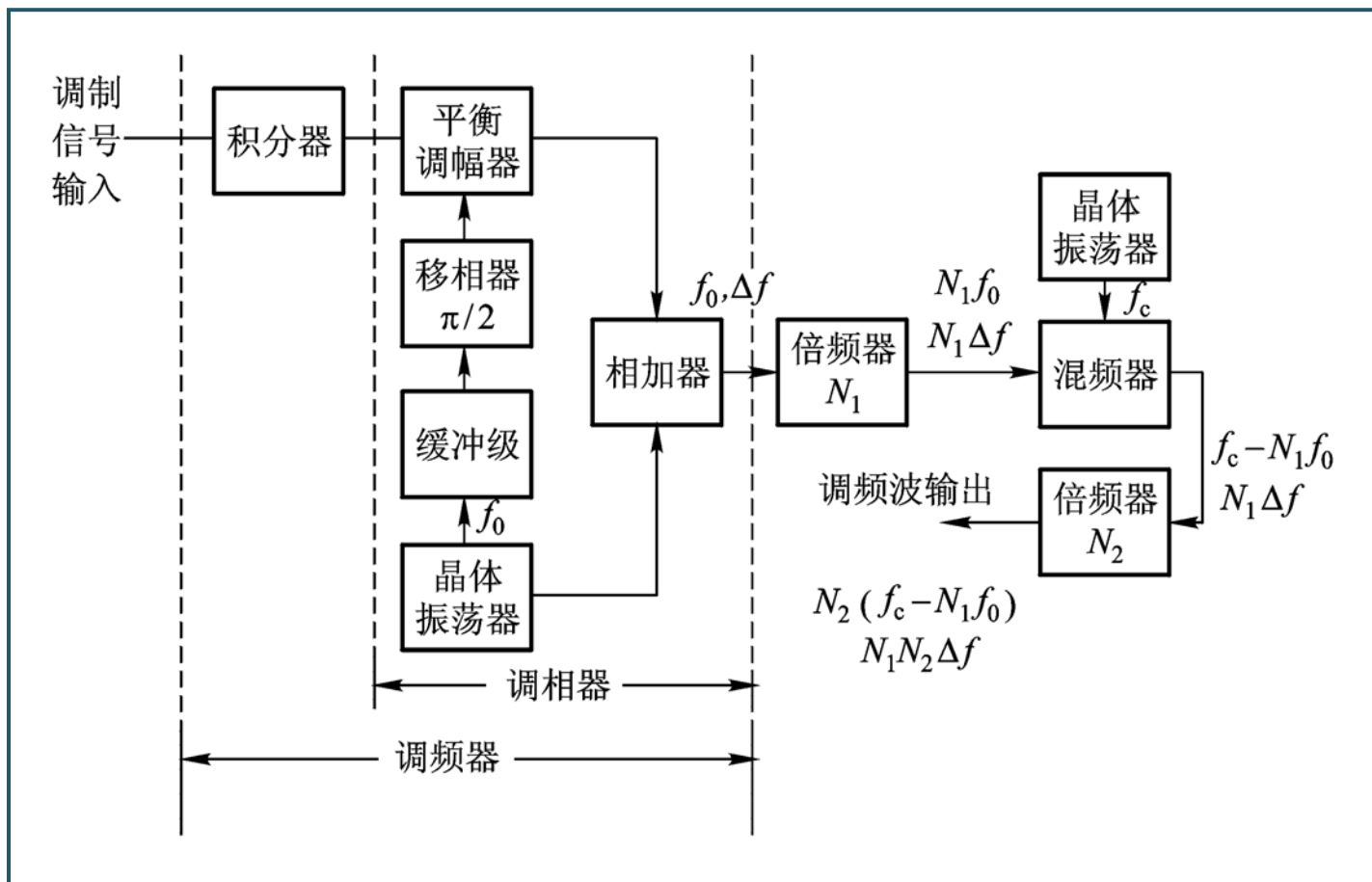


图 8.6.6 用载波振荡与双边带调幅波叠加以实现调相

8.6 间接调频:由调相实现调频

➤ 2. 间接调频的实现

$$v_{FM} = V \cos[\omega_o t + k_p \int_0^t v_{\Omega}(t) dt] \rightarrow \boxed{\text{积分}} \rightarrow \boxed{\text{调相}} \rightarrow$$





本章小结

1. 掌握**调频和调相的原理、基本概念**以及二者异同点，掌握调频波**调制指数与带宽**的关系，理解贝塞尔函数分析频谱的方法，掌握**调频和调相的关系**。
2. 掌握变容二极管直接调频的分析方法。熟悉间接调频的几种方法：**谐振回路、移相网络、矢量合成**。



Thank You !

Q & A