CEC

# 角度调制与解调 II

## Angle Modulation & Demodulation II

2025年6月5日

学而不厭 誨人不倦

# Chapter 8 角度调制与解调

# 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**

## 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，

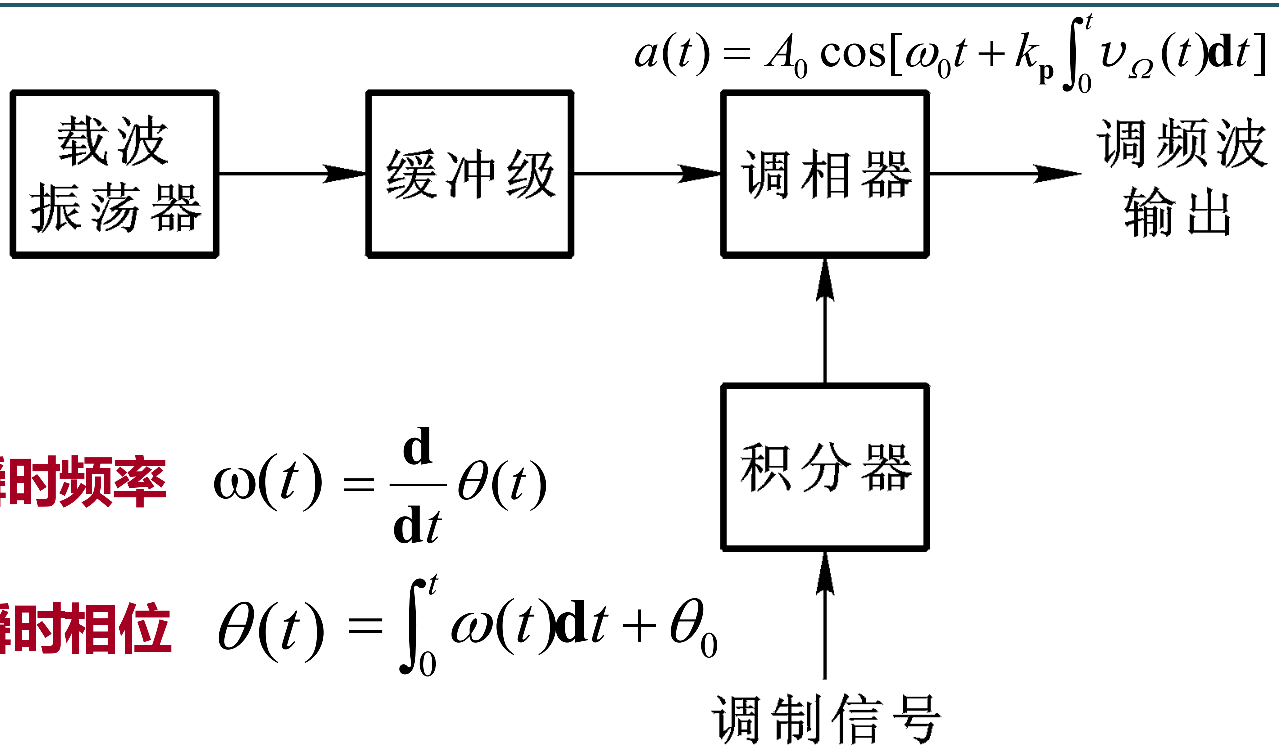
而可控电阻元件有二极管和场效应管。

# 8.3 调频方法概述

## 3. 间接调频原理

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

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




**瞬时频率** $\omega(t) = \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\theta(t)$

**瞬时相位** $\theta(t) = \int_0^t \omega(t)\mathrm{d}t + \theta_0$

**图 8.3.1　借助于调相器得到调频波**

## 3. 间接调频原理

设调制信号为$v_{\Omega}(\mathrm{t})$,

对 $V_{\Omega}(\mathrm{t})$ 积分，得瞬时相位

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

调频波数学(相位)表达式

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

与调相波数学(相位)表达式 意义相同

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

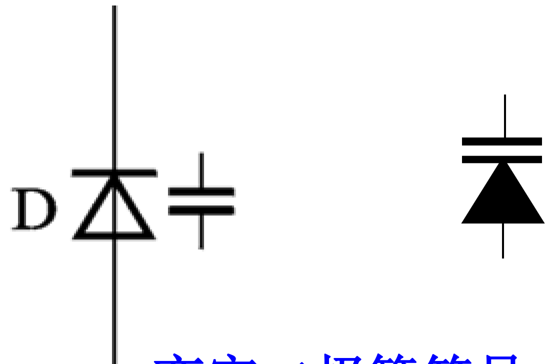
# Chapter 8 角度调制与解调

# 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：

$$C_{\mathbf{j}} = \frac{C_{\mathbf{j0}}}{(1+\dfrac{\upsilon_R}{V_{\mathbf{D}}})^{\gamma}}$$




变容二极管符号

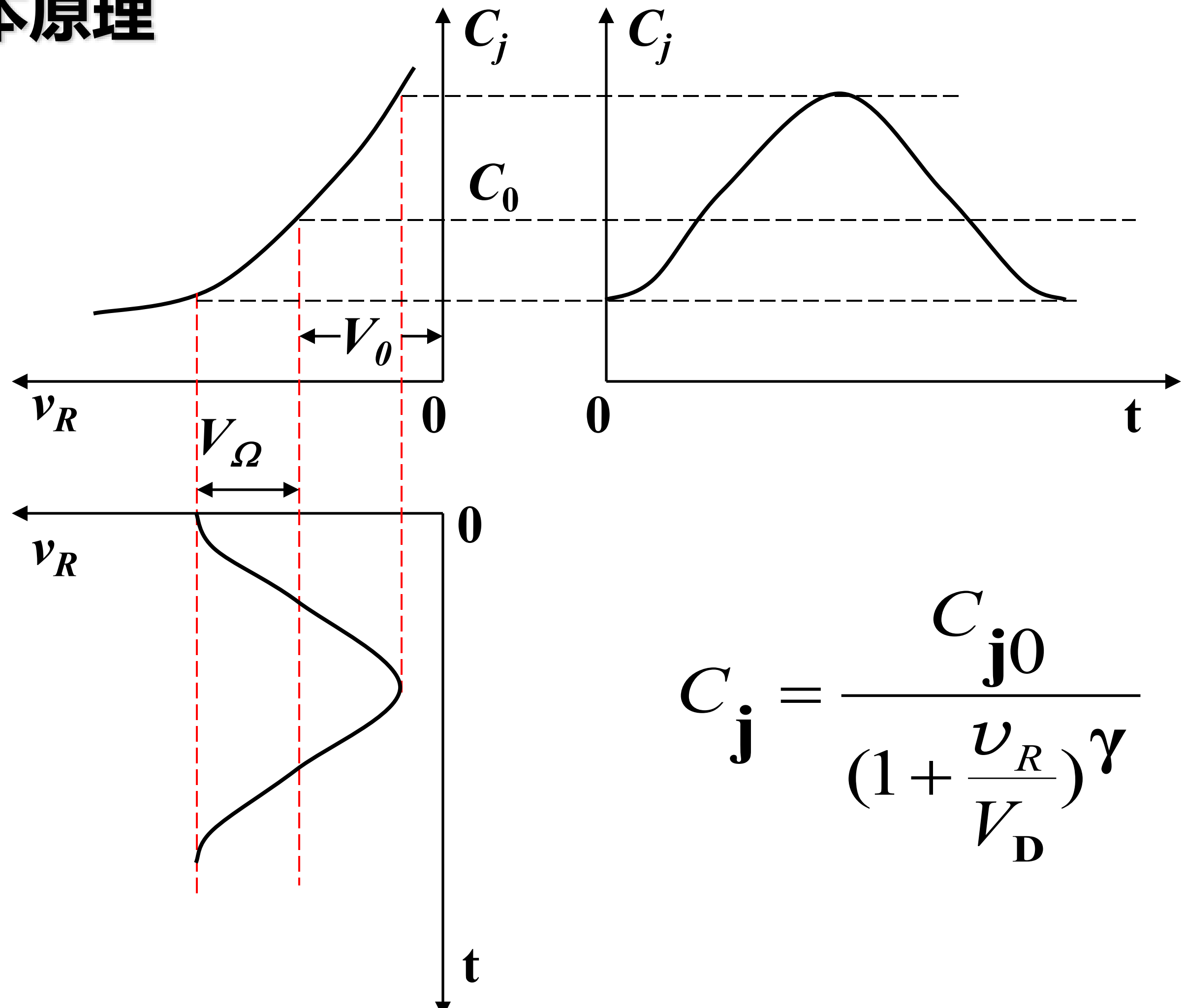
式中$C_{j0}$： $\upsilon_{\mathbf{R}}=0$ 时的电容值（零偏置电容）

$\upsilon_{\mathbf{R}}$： 反向偏置电压，$V_D$：PN结势垒电位差。

$\gamma$：结电容变化指数，通常$\gamma=1/2\sim1/3$，经特殊工艺制成的超突变结电容$\gamma=1\sim5$

# 8.4 变容二极管调频

## ➢1. 基本原理




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

**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

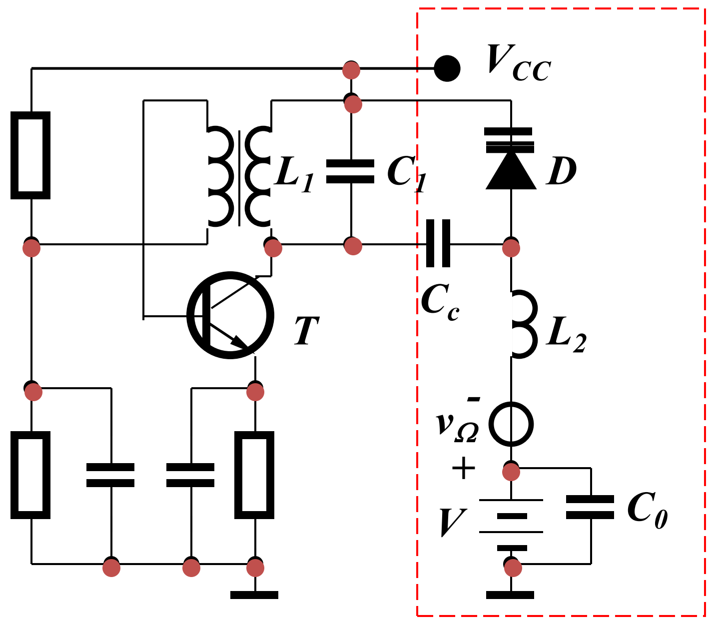



图8.4-2 变容二极管调频电路

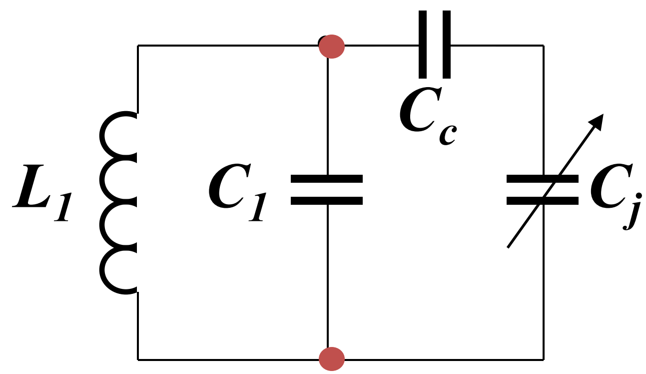



图8.4-3 等效电路

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

$C_c$ —是耦合电容，同时起隔直作用;

$C_0$ —是对调制信号的旁路电容;　　$L_2$ —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)

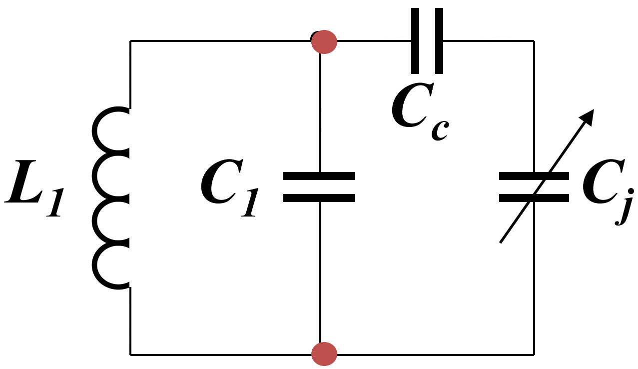



图8.4-3 等效电路

**当调制信号$v_\Omega(t)=0$时，变容二极管电容为：**

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

**这时振荡回路的总电容为：**

$$C=C_1+\frac{C_cC_0}{C_c+C_0}=C_1+\frac{C_c}{1+\frac{C_c}{C_0}}$$

## 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：

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

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

$m$ 调制深度

当 $v_\Omega(t)\neq0$ 时，振荡回路的总电容为：

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

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

## 2. 变容二极管调频电路

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

**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：**

**当** $\dfrac{C_c}{C_0}m\cos\Omega t<<1+\dfrac{C_c}{C_0}$ **则** $\Delta C(t)=\dfrac{C_c^2/C_0}{(1+C_c/C_0)^2}m\cos\Omega t$

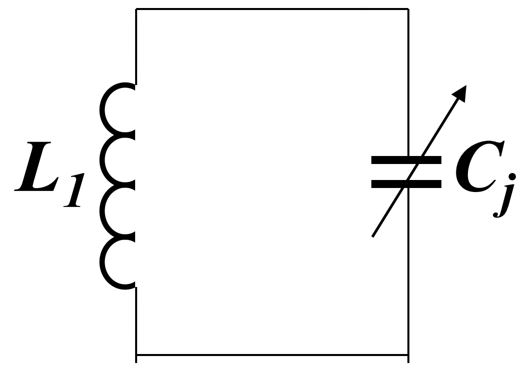
***这就是说，$\Delta C(t)$与 $v_\Omega(t)$ 恰好成正比关系。 如果$\Delta C(t)$很小,**

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

**最后可以得出，$\Delta f$ 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




$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{C_jL_1}}\qquad C_j=C_0(1+m\cos\Omega t)^{-\gamma}$$

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{C_0L_1}}(1+m\cos\Omega t)^{\frac{\gamma}{2}}$$

当 $\gamma=2$ $\quad f_o=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{C_0L_1}}$ 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，$\gamma=1$，$\Delta f$ 与 $V_\Omega(t)$近似线性。**

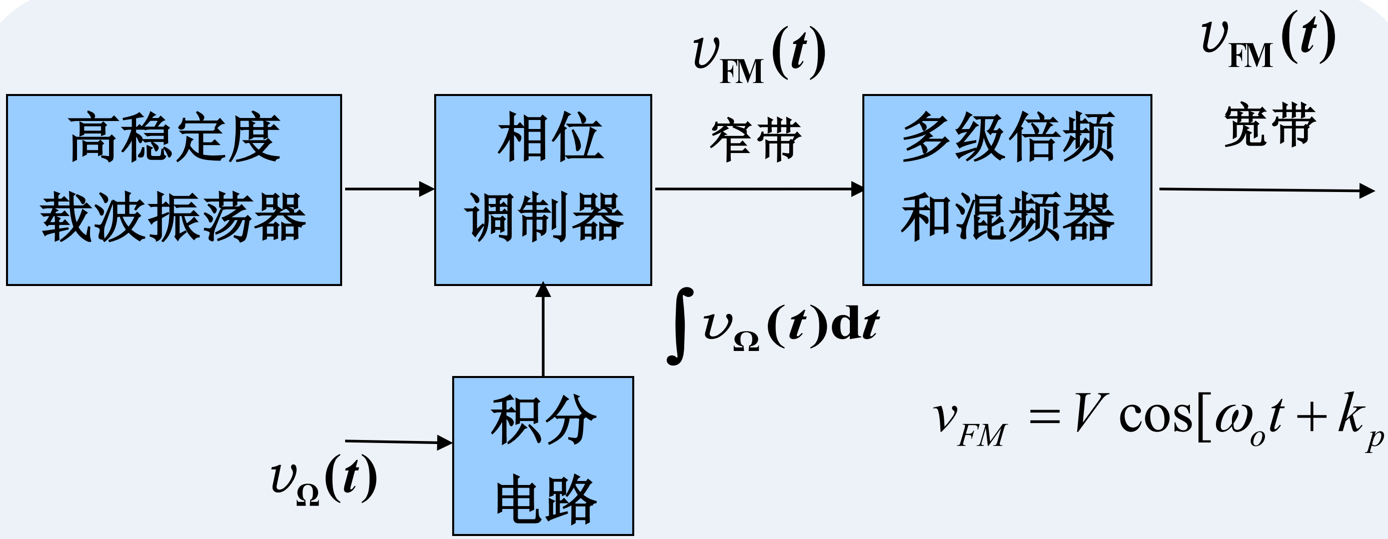
**大频偏条件下，$\gamma=2$，$\Delta f$ 与 $V_\Omega(t)$ 近似线性。**

# Chapter 8 角度调制与解调

# 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。

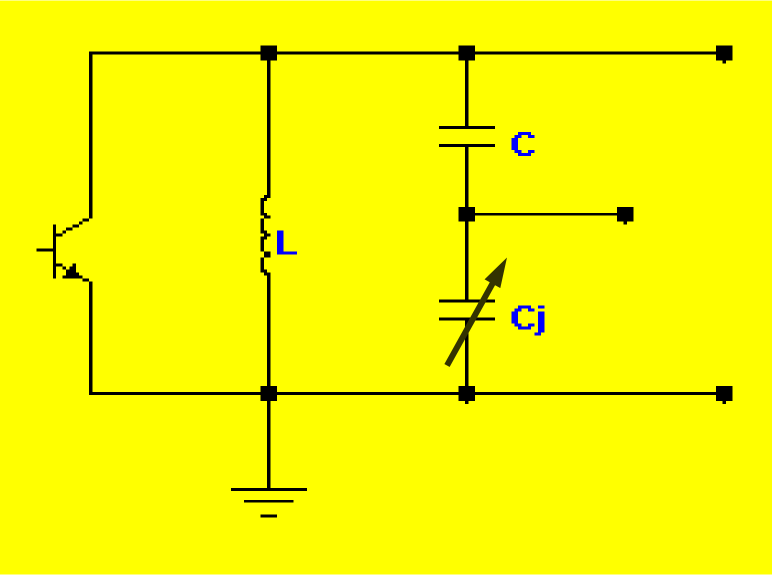


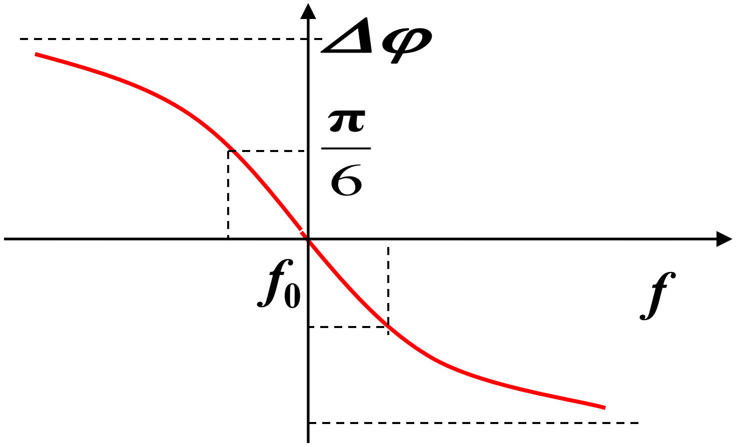

$$v_{FM} = V\cos[\omega_o t + k_p \int_0^t v_\Omega(t)dt]$$

# 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



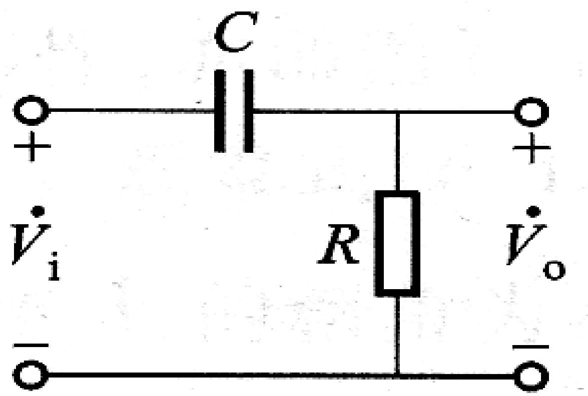



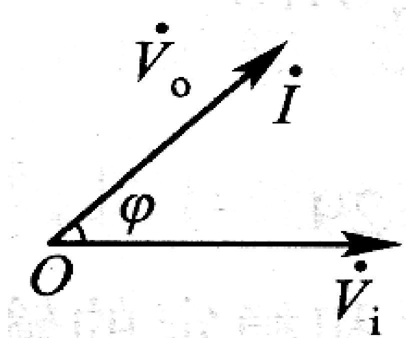

$$\Delta\varphi = -\arctan\left(Q\frac{2\Delta f}{f_0}\right)$$

# 8.6 间接调频:由调相实现调频

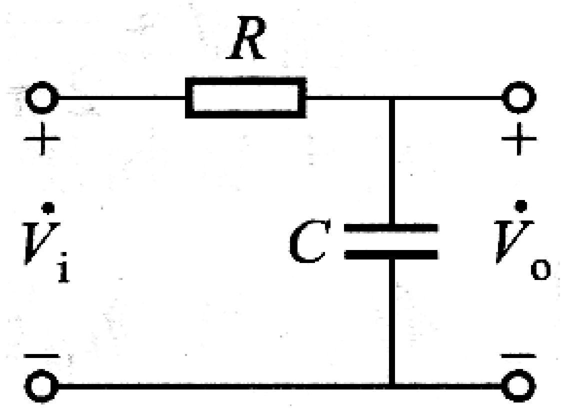
## 1. 调相的方法

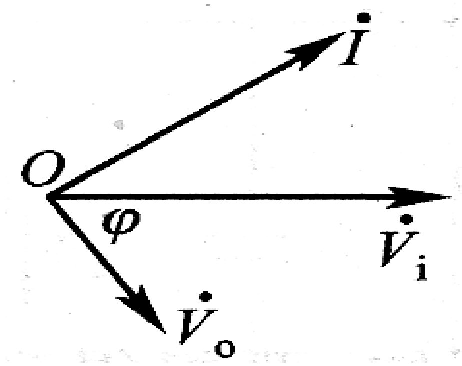
- 利用移相网络调相




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



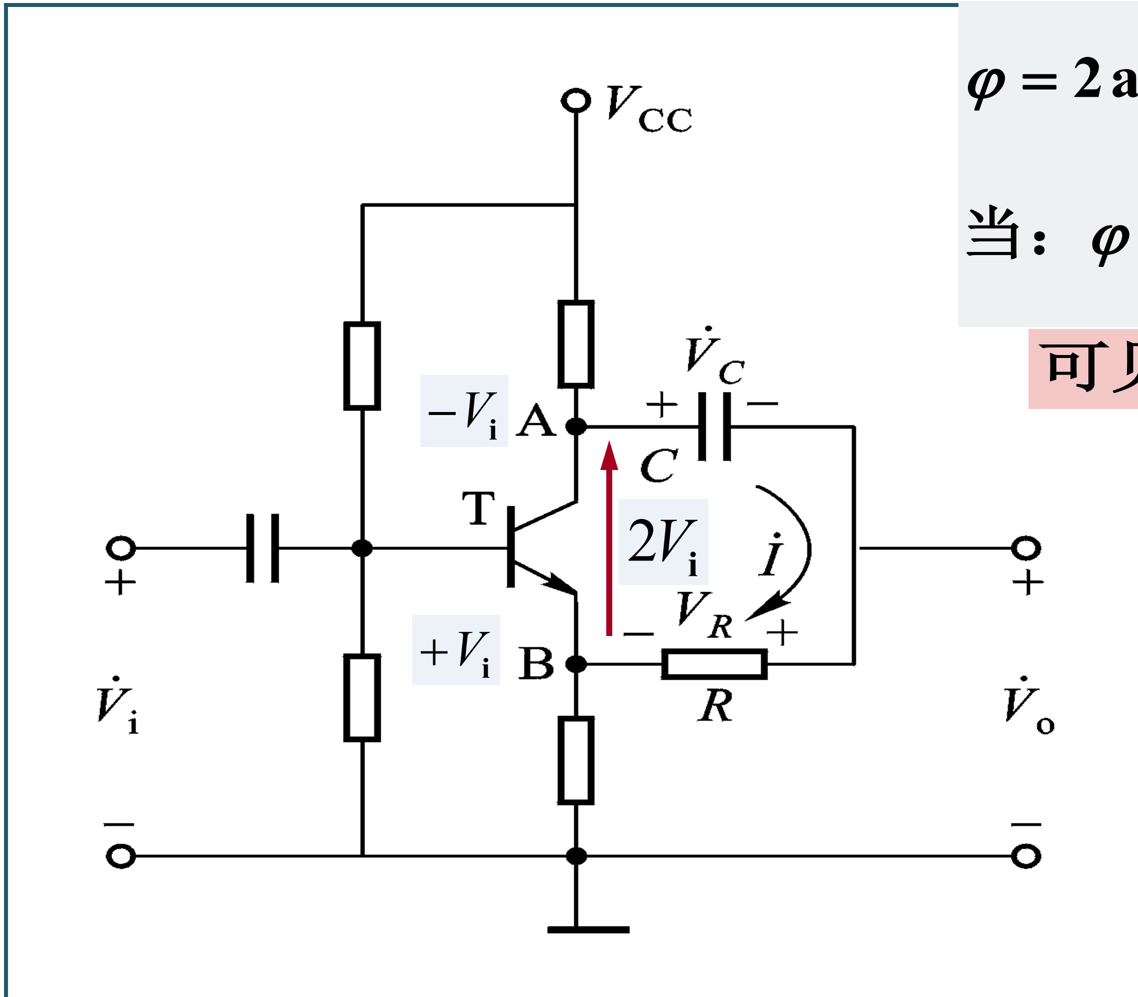

$$F = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

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

# 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




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

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

可见：$\varphi$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］

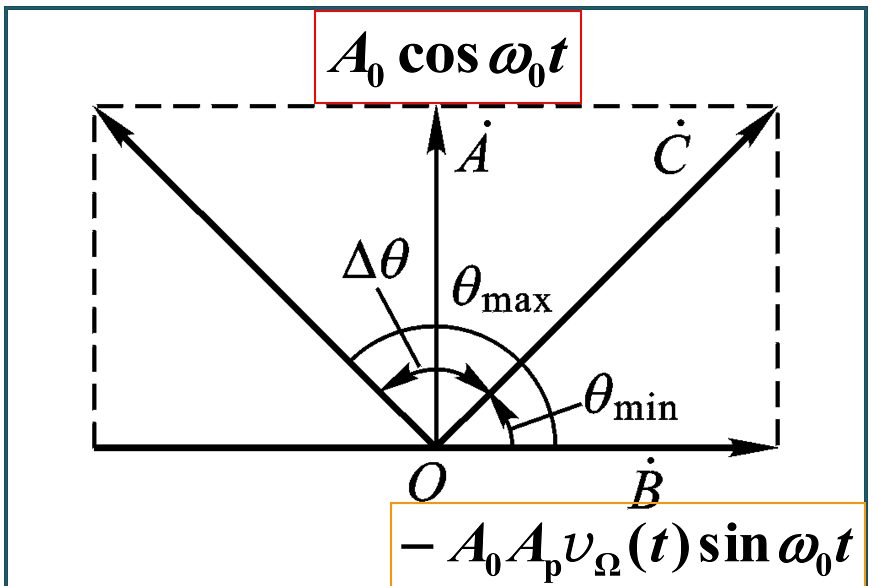
$$a(t) = A_0 cos[\omega_0 t + k_p V_\Omega cos\Omega t]$$

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

当： $k_p |\upsilon_\Omega(t)| \le \dfrac{\pi}{6}$

$$a(t) \approx \underbrace{A_0 \cos \omega_0 t}_{A} - \underbrace{A_0 A_p \upsilon_\Omega(t) \sin \omega_0 t}_{B}$$

C




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

## 1. 调相的方法

- 合成调相法 [阿姆斯特朗法 Armstrong method]

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

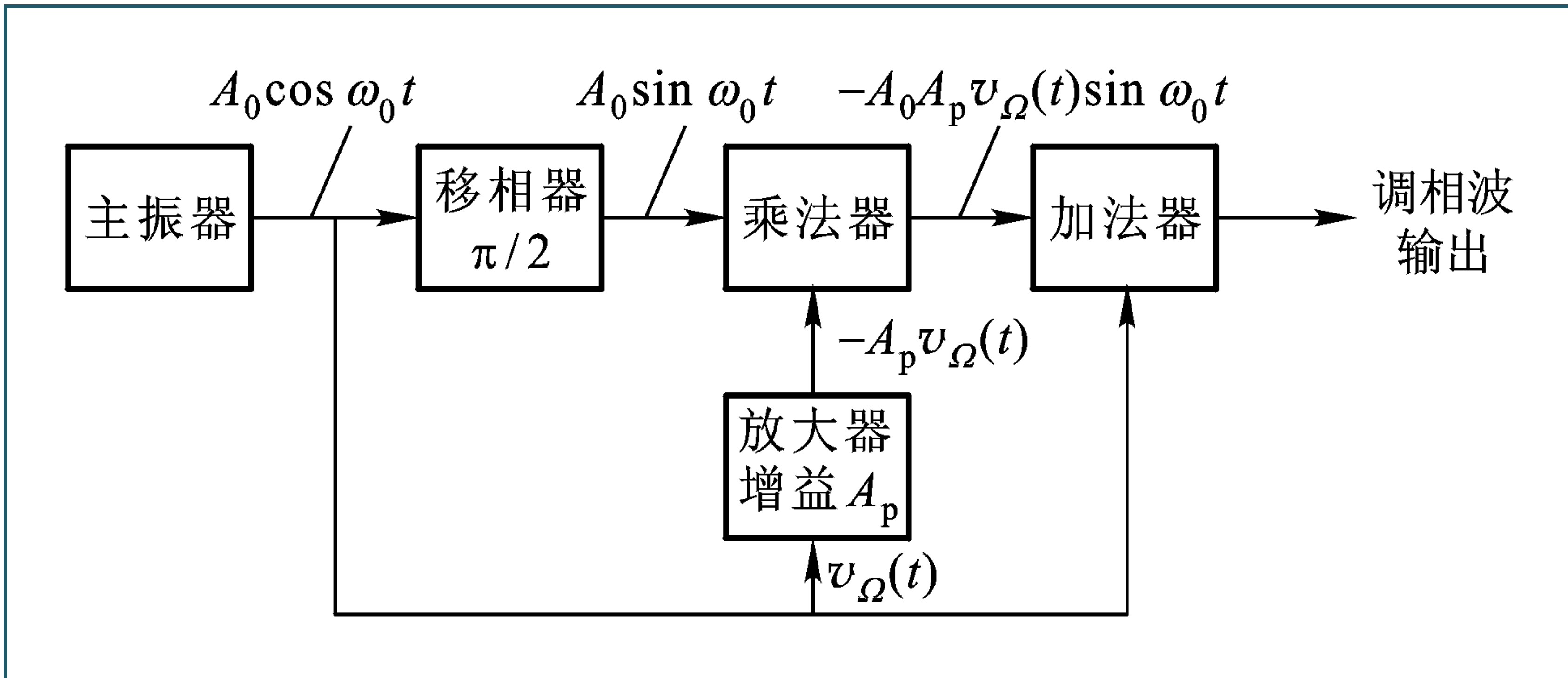



**图 8.6.5 实现矢量合成法的方框图**

## 1. 调相的方法

- 合成调相法 [阿姆斯特朗法 Armstrong method]

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

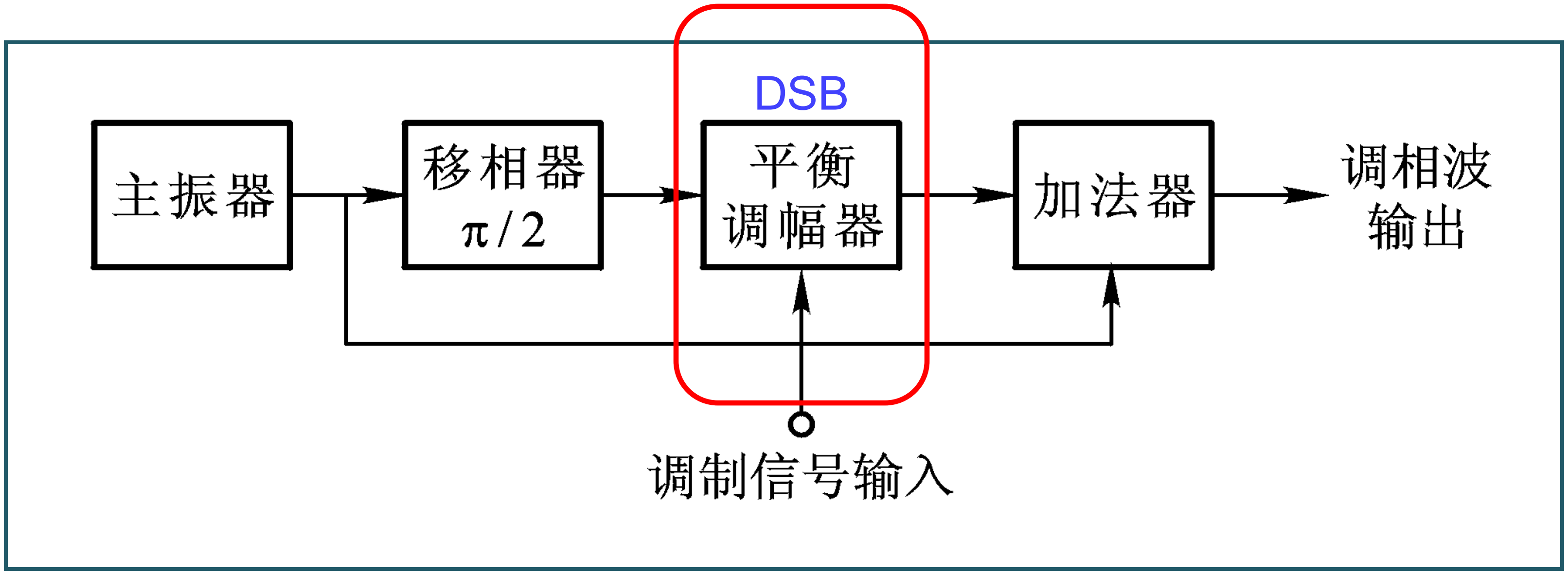
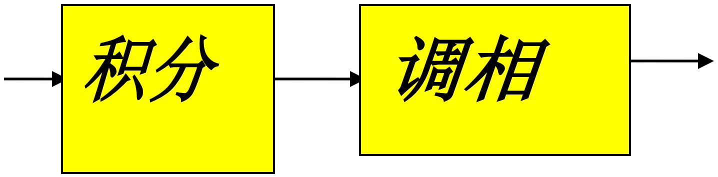
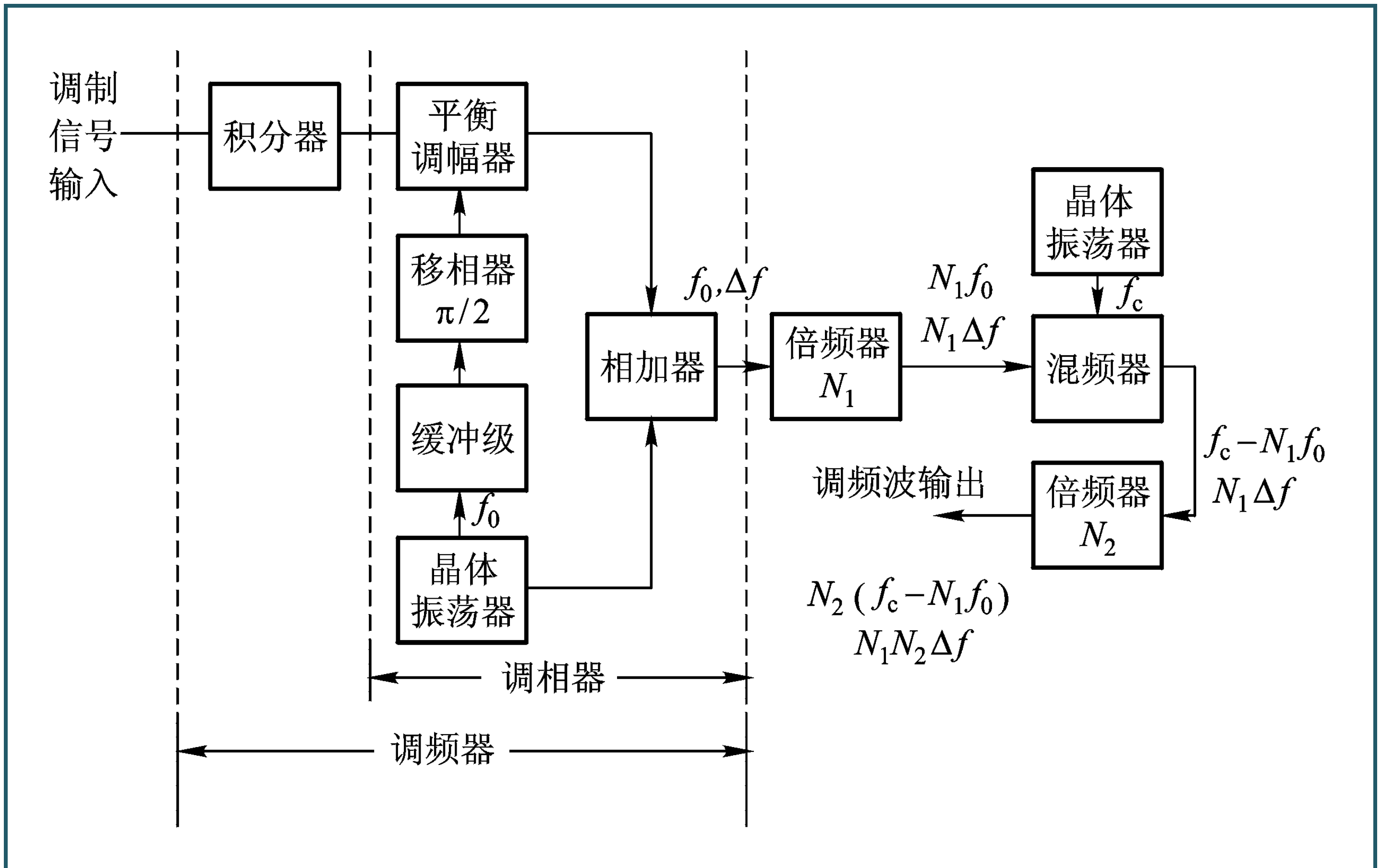



图 8.6.6 用载波振荡与双边带调幅波叠加以实现调相

## ➢2. 间接调频的实现

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



# 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