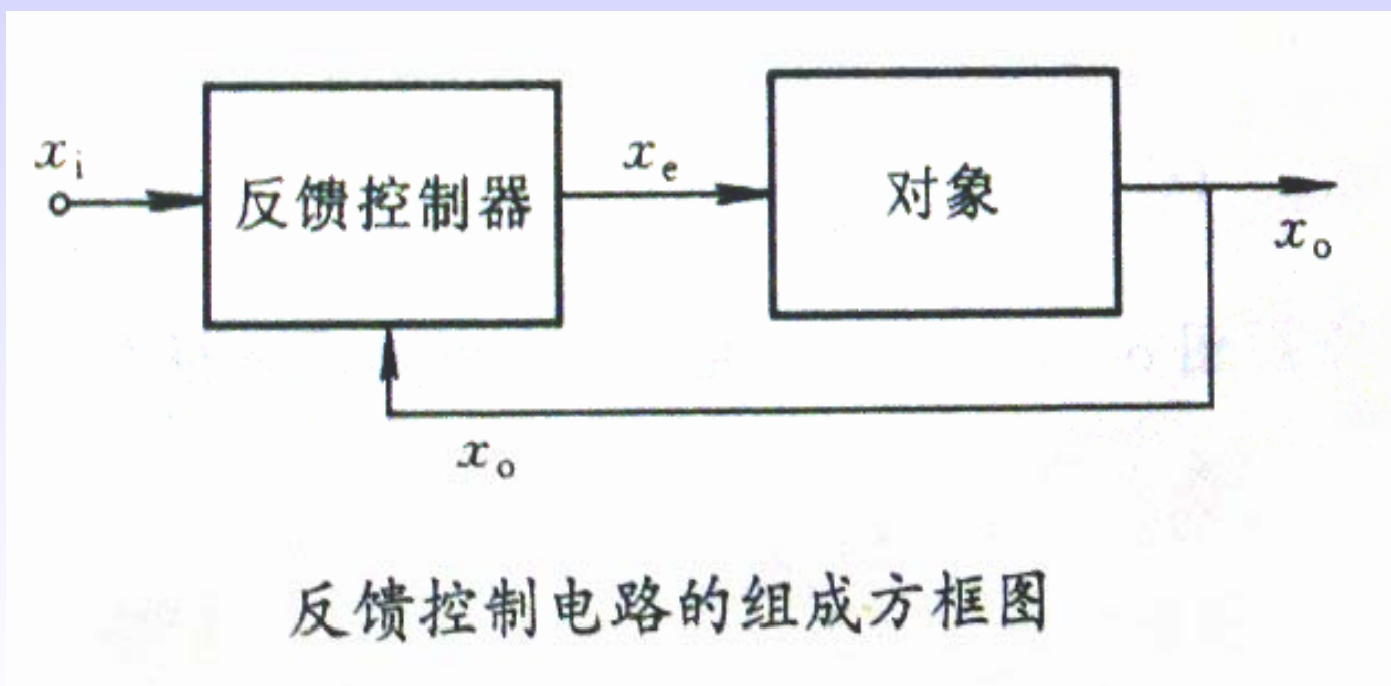
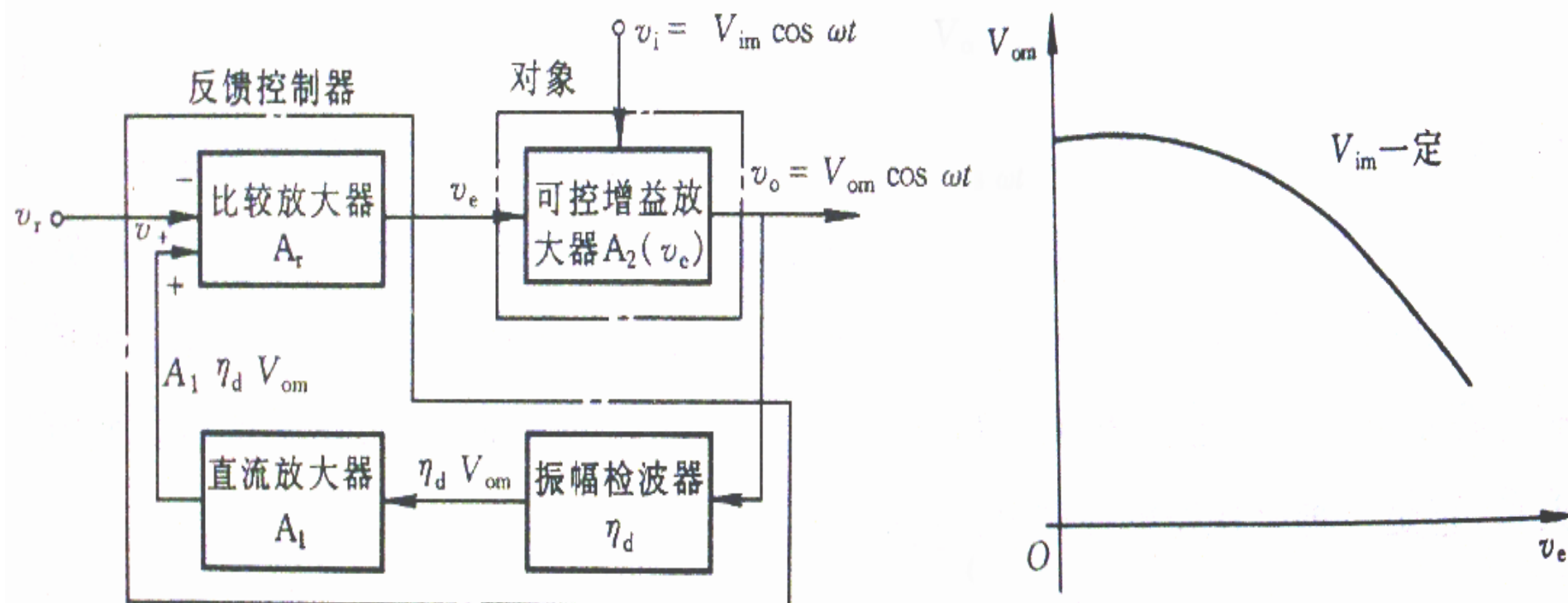


第9章 通信系统中的反馈控制电路

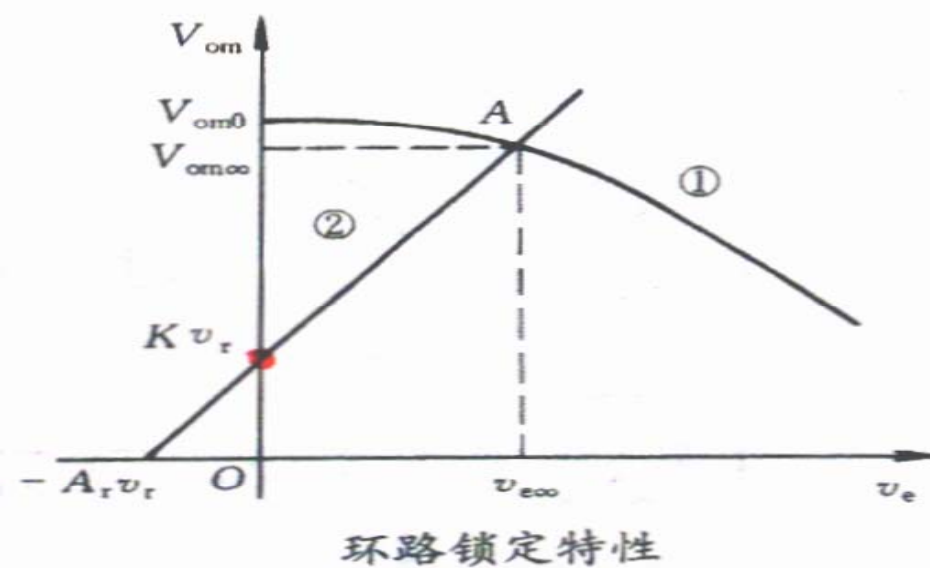
反馈控制电路概述



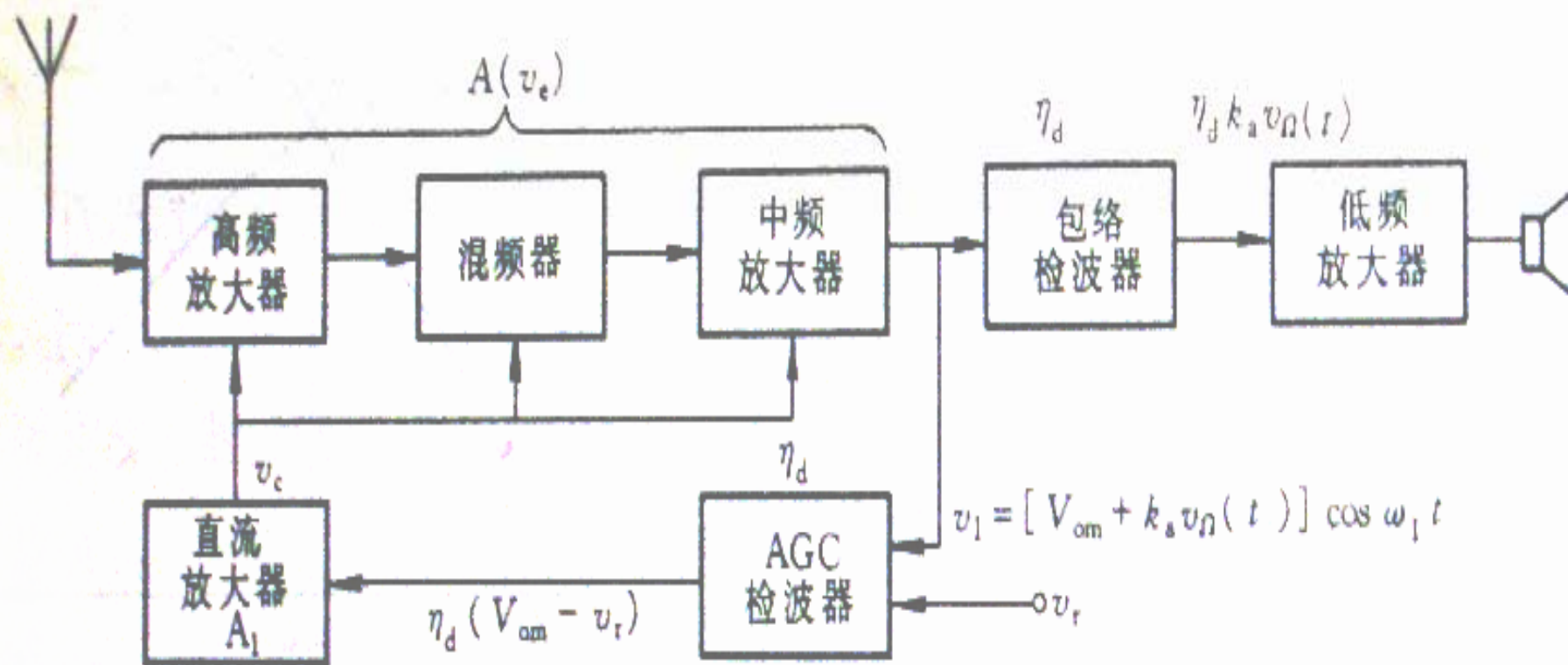
自动电平控制电路 自动频率控制电路 自动相位控制电路



自动电平控制电路

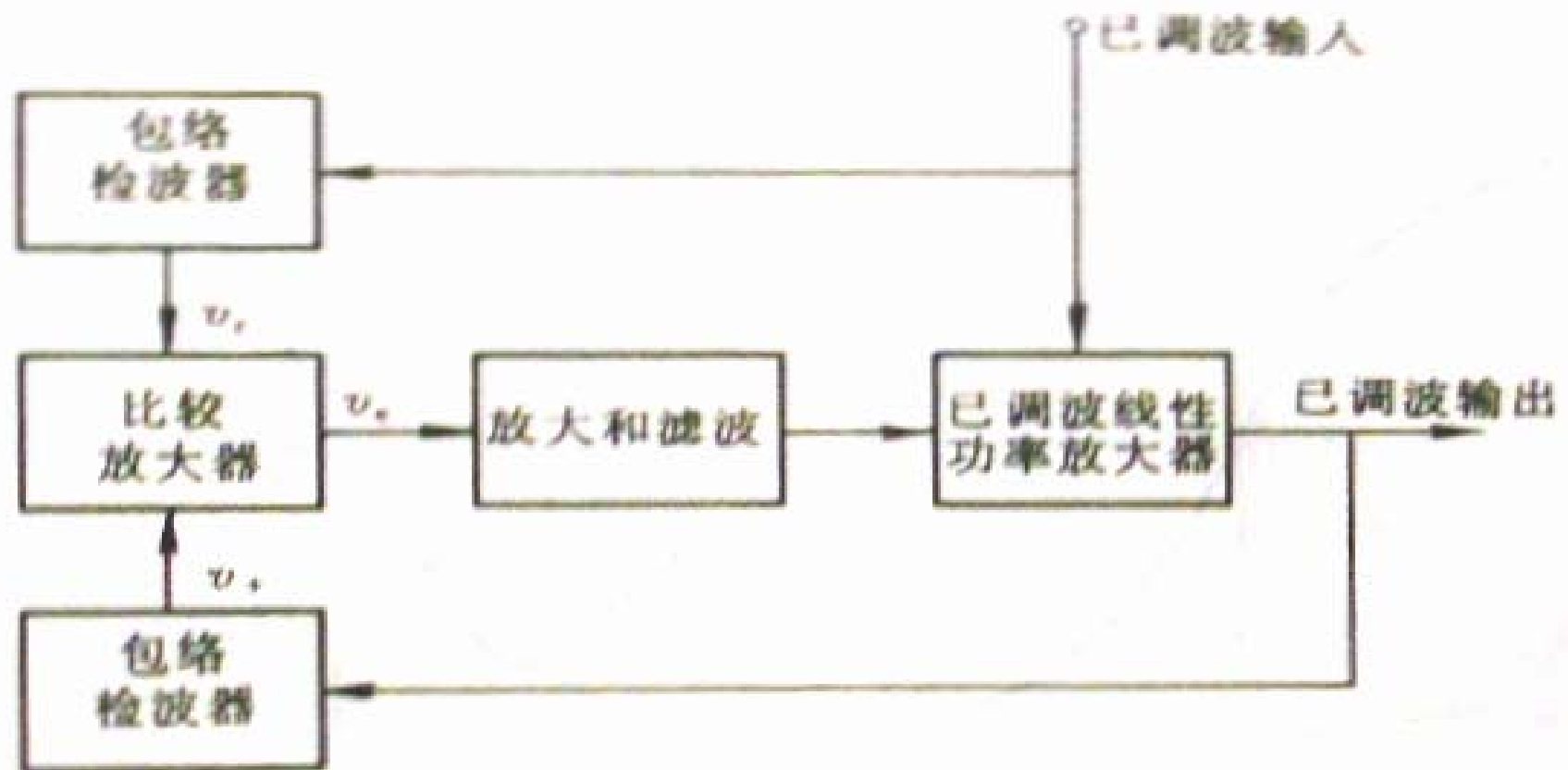


$$v_s = [V_{om} + k_a v_{\Omega}(t)] \cos \omega_c(t)$$

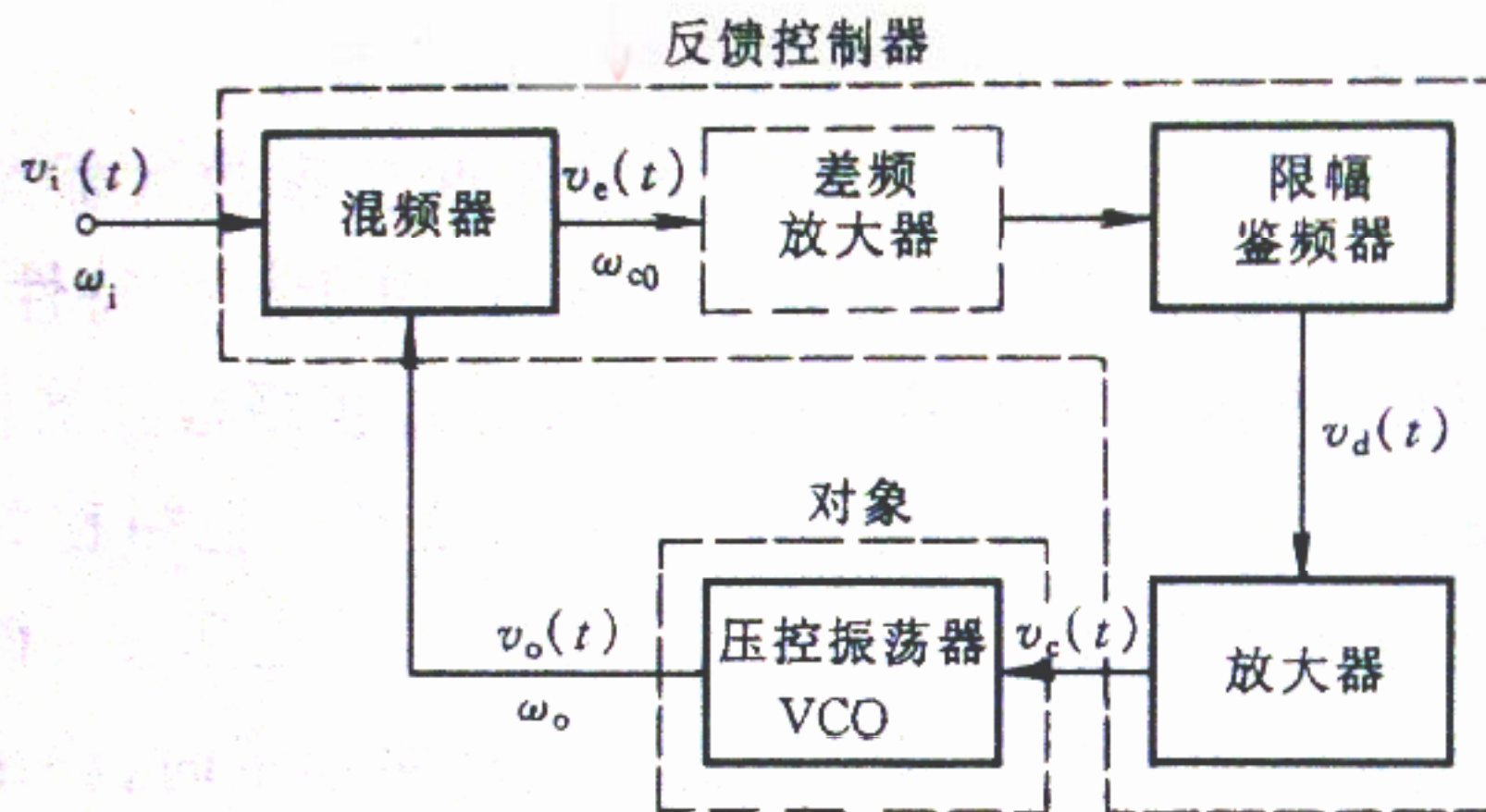


带有 AGC 电路的调幅接收机的组成方框图

自动电平控制电路应用



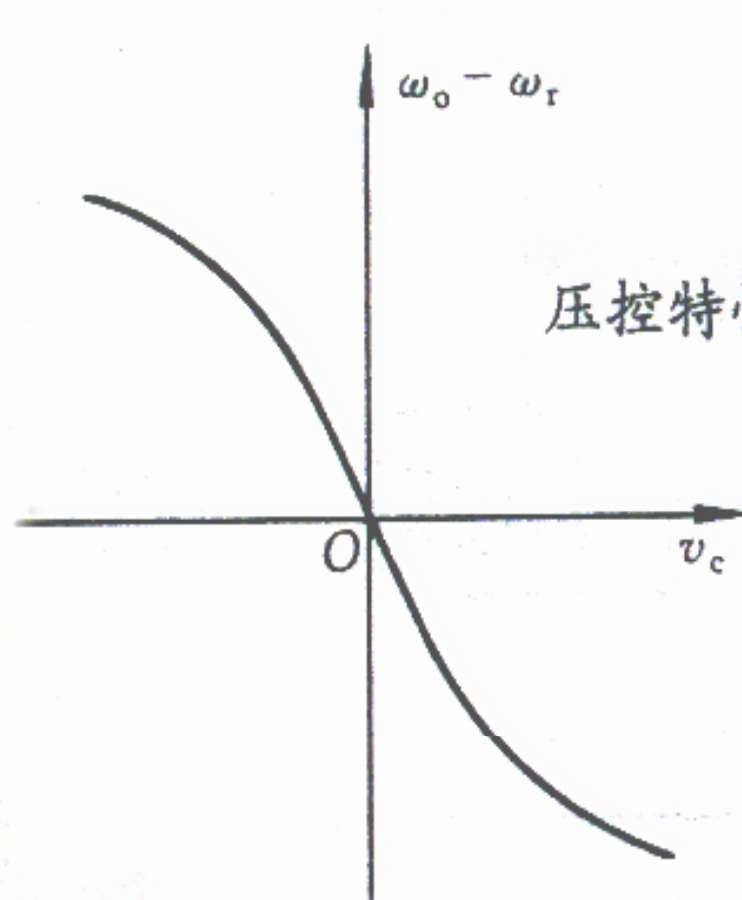
带有自动电平控制电路的线性功率放大器



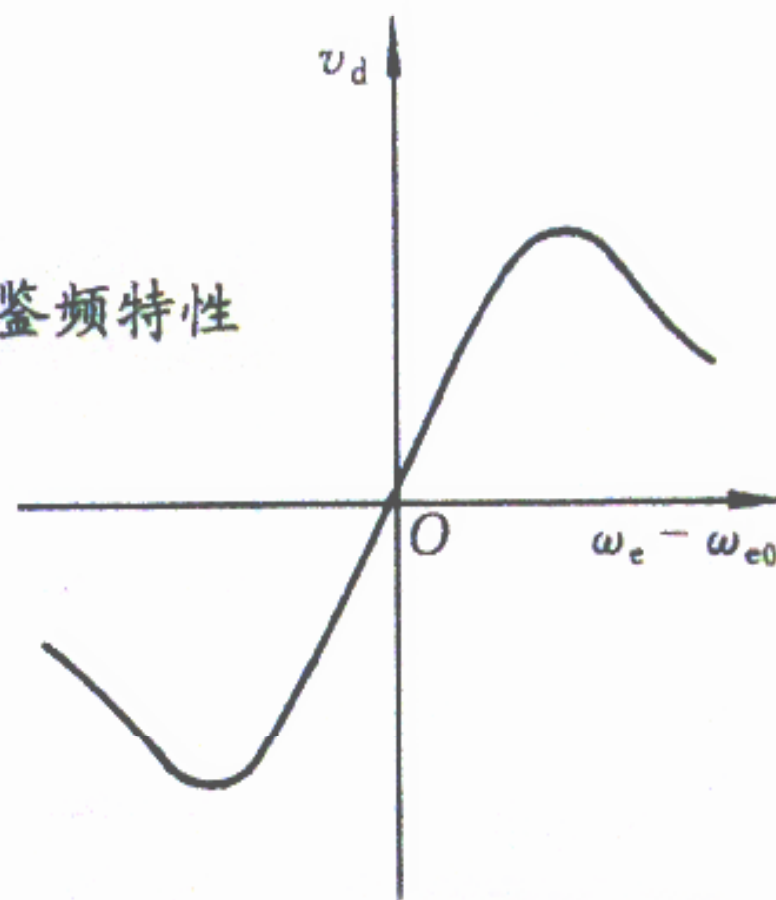
自动频率控制电路的组成方框图

自动频率控制电路

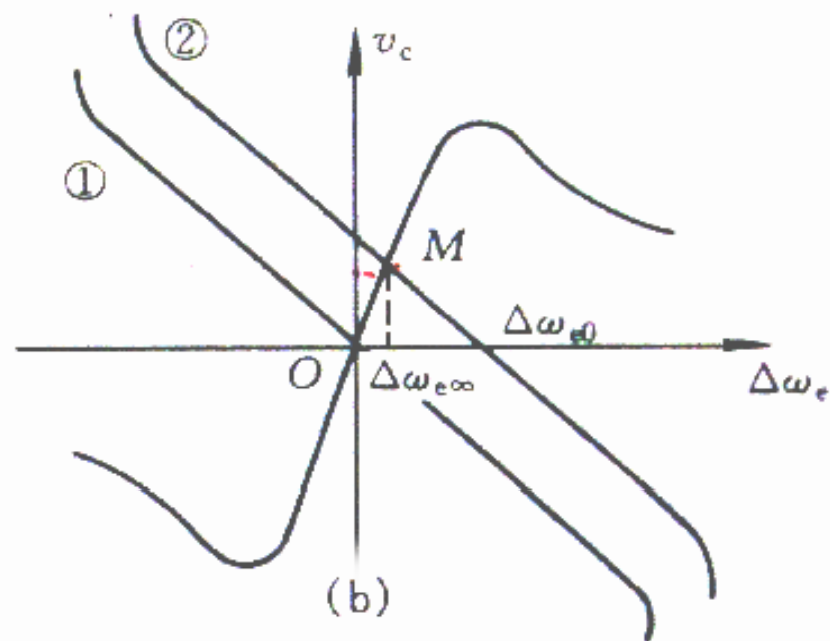
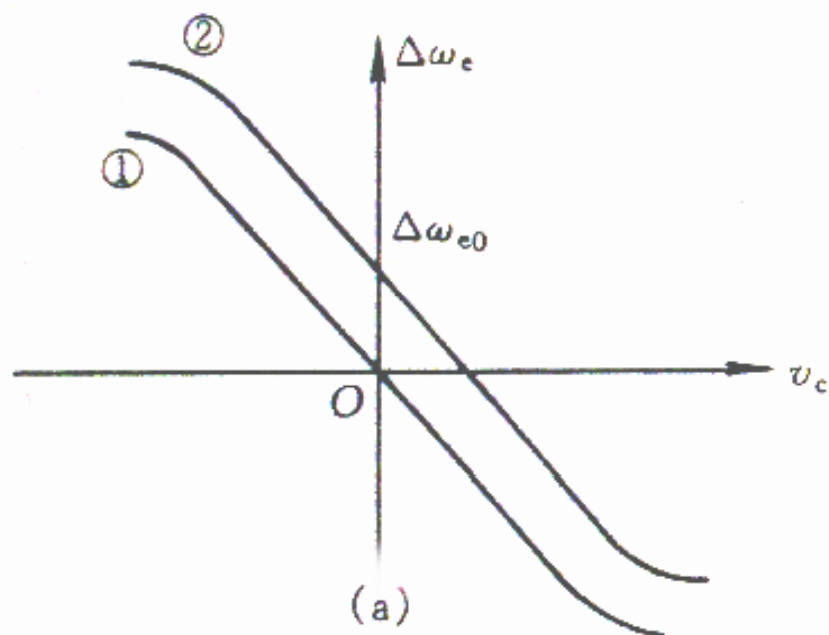
压控特性和鉴频特性



(a) 压控特性

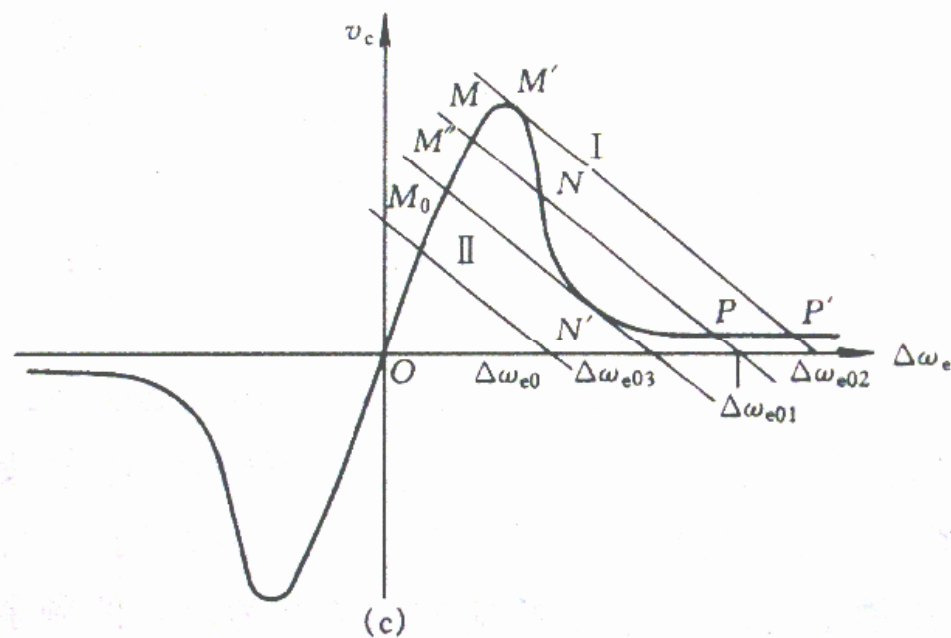


(b) 鉴频特性

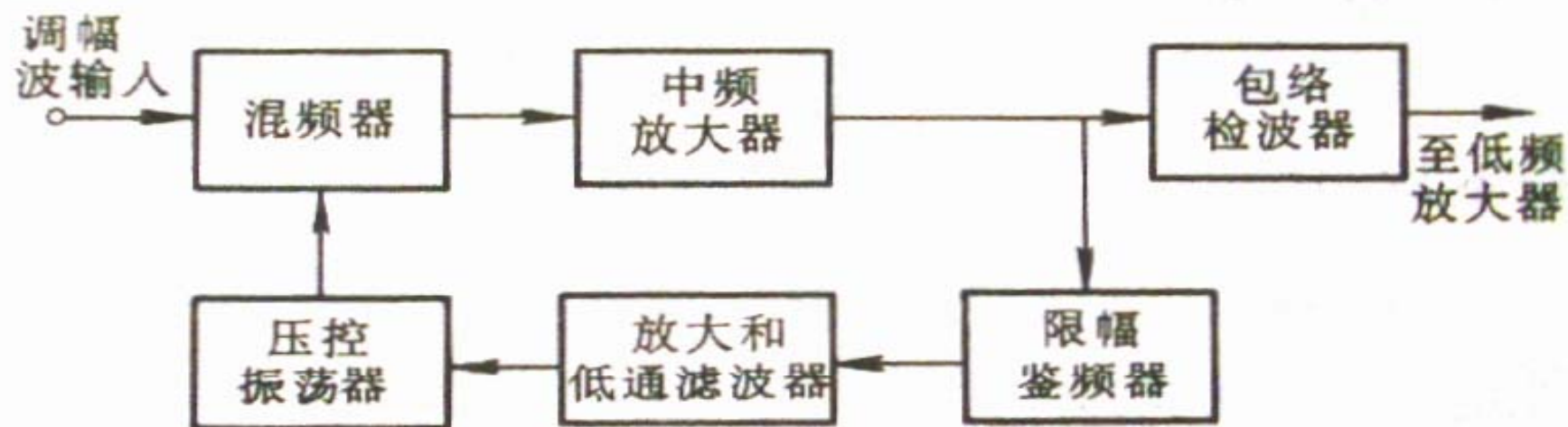


(a) 压控特性

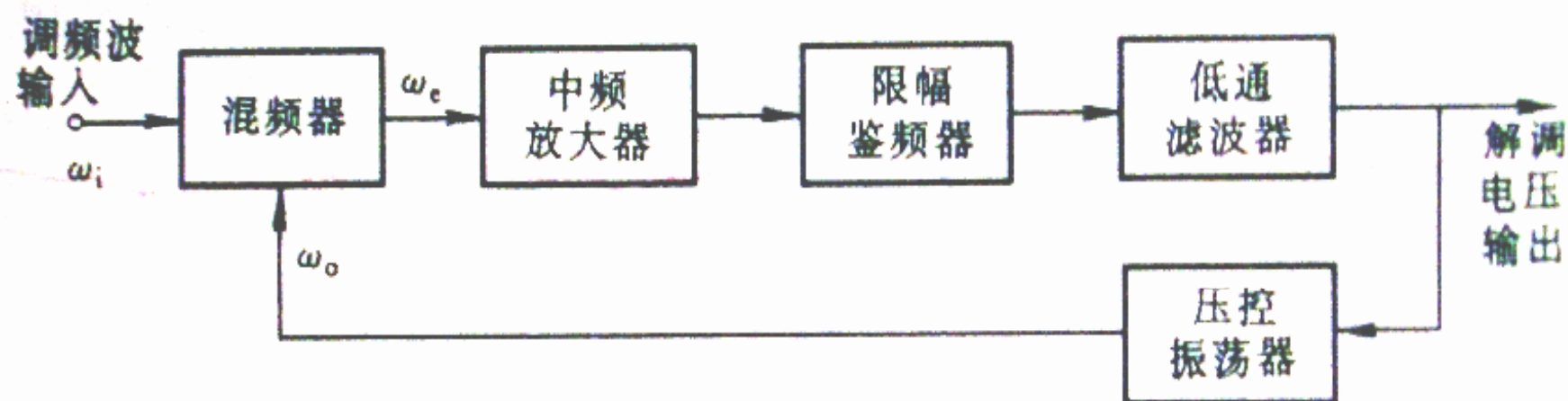
(b) 频率比较特性(鉴频特性)



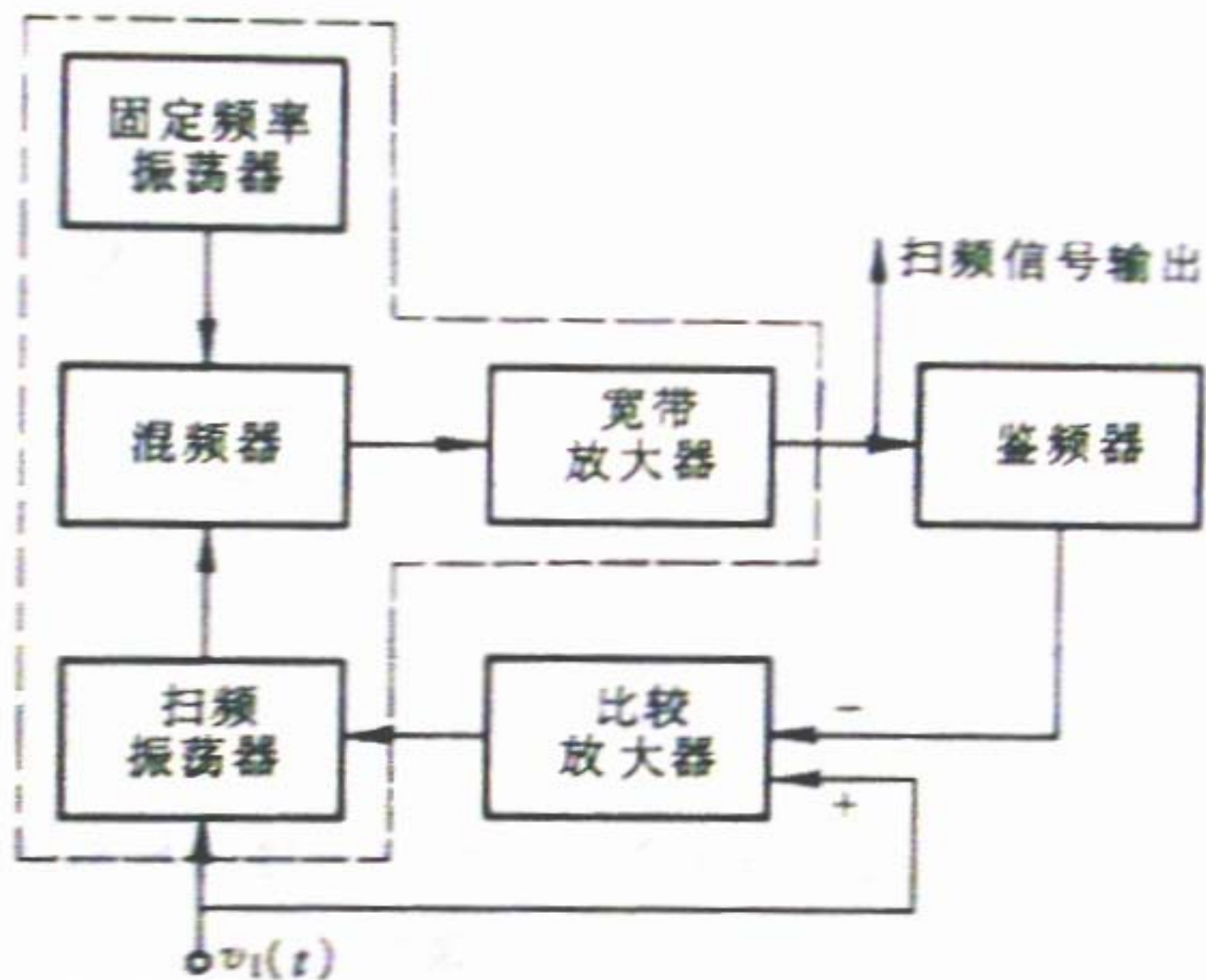
自动频率控制电路应用



采用自动频率微调电路的调幅接收机的组成方框图



调频负反馈解调电路的组成方框图



采用自动频率控制电路的扫频信号发生器的组成方框图

自动相位控制电路

锁相环路概述

一、发展历史

二、锁相环路的特点

三、锁相环路分析方法

§ 锁相环路概述

一.发展历史

锁相技术是通信、导航、广播与电视通信、仪器仪表测量、数字信号处理及国防技术中得到广泛应用的一门重要的自动反馈控制技术.

- 20世纪30年代——接收设备锁相同步控制
- 20世纪40年代——电视接收同步扫描
- 20世纪50年代——锁相接收机实现卫星通信技术
- 20世纪60年代——各部件制作费用昂贵，所以它的发展受限制
- 20世纪70年代——成为现代通信、电子技术领域中不可缺少的重要控制技术

- 20世纪80年代以后——数字锁相、集成锁相以及频率合成技术，大大推动数字通信、卫星通信的发展

总之,锁相环路是朝着集成化.多用化.数字化的方向发展。

二、锁相环路的特点

- 1.具有频率准确跟踪性能
- 2.具有良好窄带高频跟踪性能（称载波跟踪型）
- 3.具有良好的带通滤波性能（称调制跟踪型）
- 4.具有良好门限效应
- 5.易集成化，数字化

三、锁相环路分析方法

图解法:相图法.描述函数法

§ 锁相环路基本工作原理

一、框图与各部分作用

二、环路工作原理

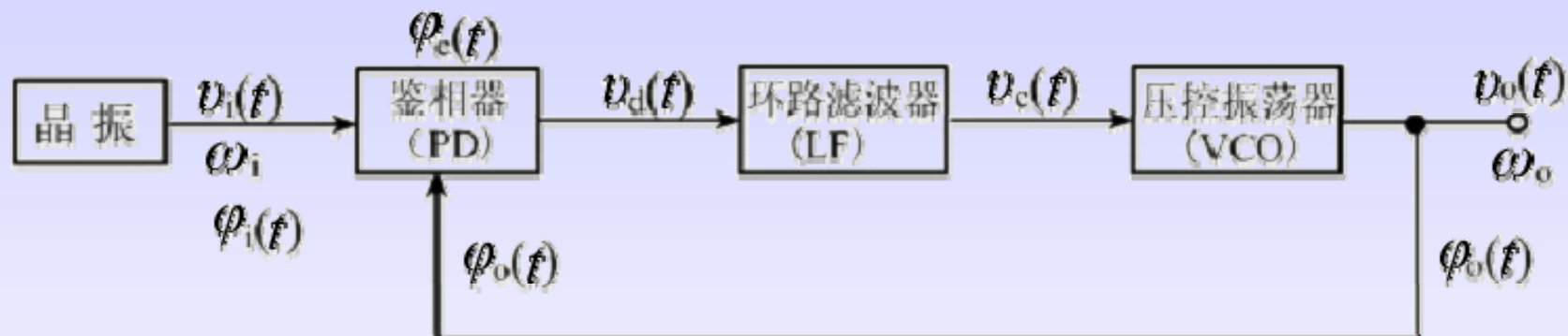
三、环路相位模式和环路方程

四、环路滤波器

§ 锁相环路基本工作原理

一、框图与各部分作用

- 框图



- 各部分的作用

- ▲ **PD** ———— 产生误差电压 $v_d(t)$
- ▲ **LF** ———— 产生控制电压 $v_c(t)$
- ▲ **VCO** ———— 产生瞬时输出频率

二、环路工作原理

1、原理与环路锁定的充分必要条件

- 原理

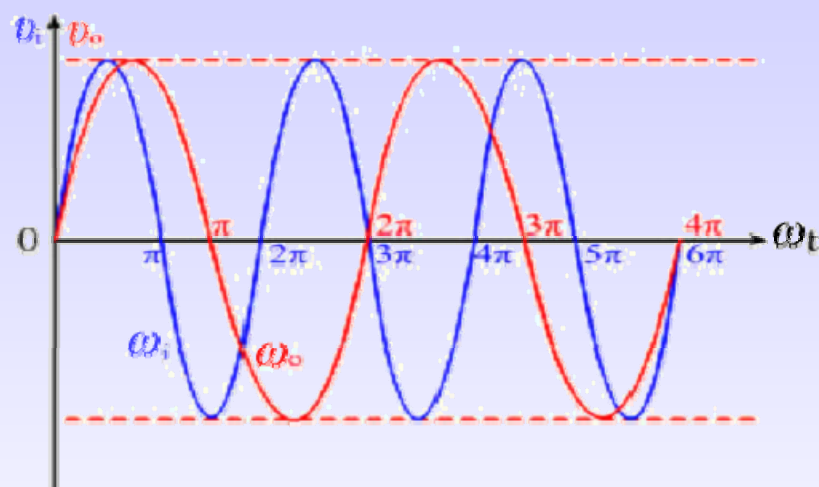
PLL环路在某一因素作用下，利用输入与输出信号的相位差 $\varphi_e(t)$ 产生误差电压，并滤除其中非线性成分与噪声后的纯净控制信号 $v_c(t)$ 控制压控振荡器，使 $\varphi_e(t)$ 朝着缩小固有角频差方向变化，一旦 $\varphi_e(t)$ 趋向很小常数 $\varphi_{e\infty}$ （称为剩余相位差）时，则锁相环路被锁定了，即 $\omega_0 = \omega_i$

- 充分必要条件

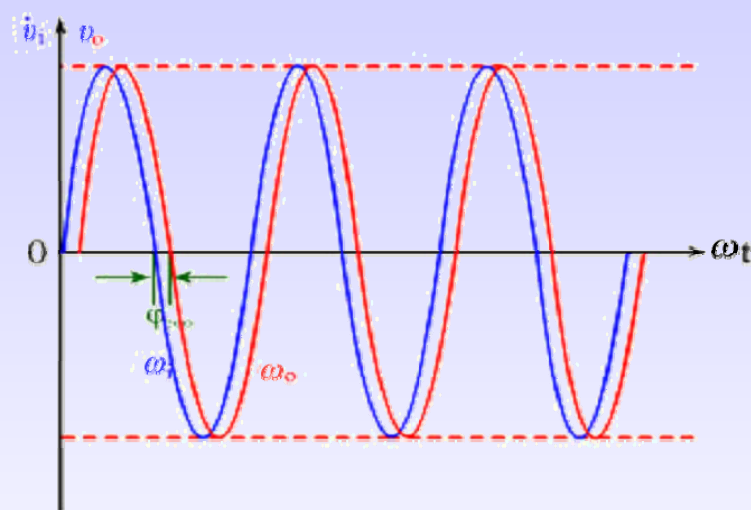
$$\varphi_e(t) = \varphi_{e\infty} \quad \omega_0 = \omega_i$$

2.举例说明 （以一阶锁相环为例）

未锁定



锁定



可见，环路锁定过程中 $\varphi_e(t)$ 是从 $0 \sim 2\pi$ 周期的变化，若干周期后使 $\varphi_e = \varphi_{e\infty}$ 则环路被锁定。

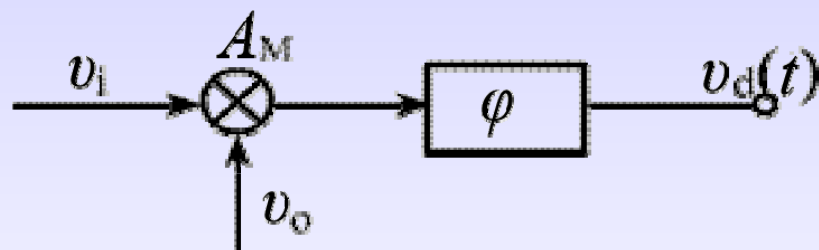
三、环路相位模式和环路方程

1. 相位模式

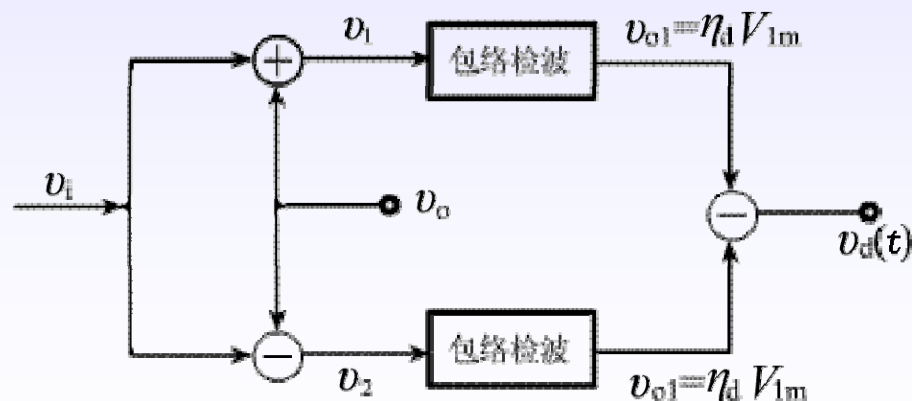
① 求环路中各部件的数学表示式与数学模式

A, 鉴相器 (PD)

乘积型

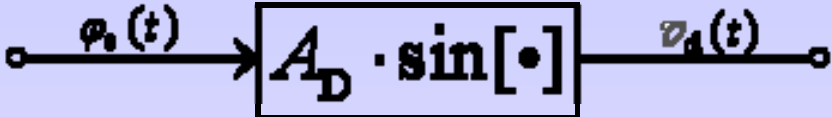


叠加型

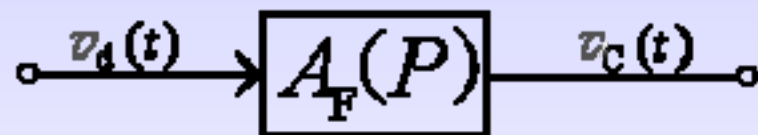


其中: $v_i = V_{im} \sin[\omega_i t + \varphi'(t)]$ $v_o = V_{om} \cos[\omega_r t + \varphi_0(t)]$

若上述经PD输出的误差电压可表示为 $v_d(t) = A_D \cdot \sin \varphi_e(t)$

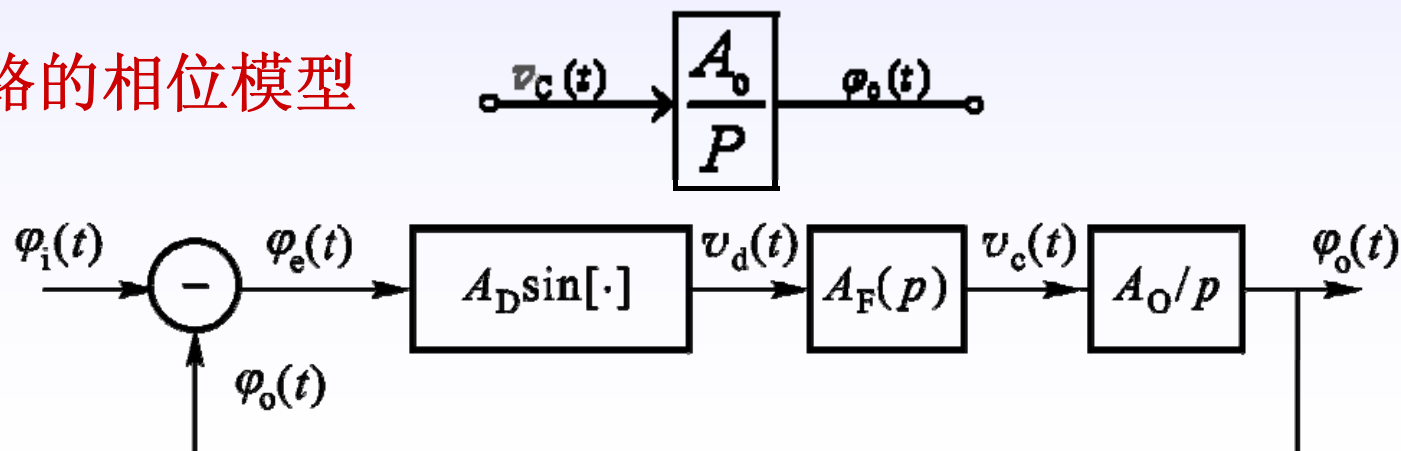
则数学模型为 

B, 环路滤波器 (LF) $v_c(t) = v_d(t) A_F(p)$



C, 压控振荡器 (VCO) $\varphi_o(t) = \frac{A_o}{P} v_c(t)$

②. 环路的相位模型



2. 环路方程及其物理意义

① 方程 $p\varphi(t) = p\varphi_0(t) + A_D A_F(p) A_0 \sin \varphi_0(t)$

② 物理意义

a) 各项的物理意义

b) 方程的物理意义: 在任何时候环路开环输入固有角频率永远恒等于环路闭环瞬时角频差和环路控制角频差之和。在锁定过程瞬时角频差逐渐减小, 控制角频差逐渐增大, 它们之和永远恒等于开环时输入固有角频差。

3. 结论

① 只有环路锁定时, 瞬时角频差为0, 才实现了频率准确跟踪.

② 环路进入锁定的条件为 $|\Delta\omega_i| \leq A_{\Sigma 0}$; 显然 $A_{\Sigma 0}$ 愈大 $\varphi_{e\infty}$ 愈小, 环路稳定性愈好。

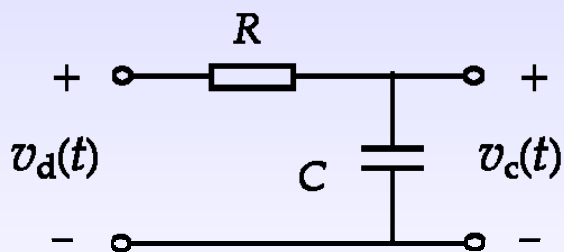
③环路锁定过程 φ_e 是变化的,所以 $v_d(t)$ 是交变的电压;一旦锁定 V_d 为直流电压。

④环路方程是非线性微分方程,其中非线性取决于鉴相器,而微分方程阶数取决于环路滤波器多项式 $F(P)$ 的阶数。

四、环路滤波器 常用的环路滤波器有:

1. RC积分滤波器

电压传输系数为:



$$H(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}}, \quad \tau = RC$$

若作为作为环路滤波器

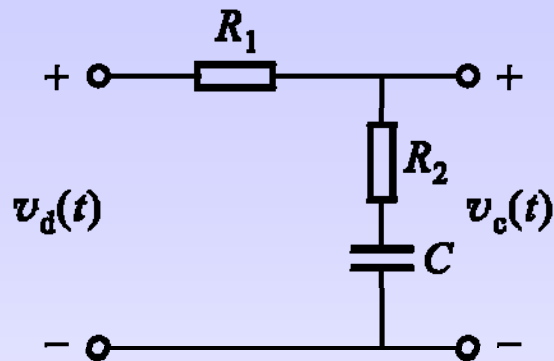
$$A_F(s) = A_F \cdot F(s) = 1 \times \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}}$$

其中 $A_F = 1$ $F(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}}$

, $F(s)$ 为一个极点而无零点的多项式

2. 无源RC比例积分滤波器

电压传输系数为：



$$H(s) = \frac{\tau_2(s + \frac{1}{\tau_2})}{(\tau_1 + \tau_2)(s + \frac{1}{\tau_1 + \tau_2})} \quad \begin{aligned} \tau_1 &= R_1 C \\ \tau_2 &= R_2 C \end{aligned}$$

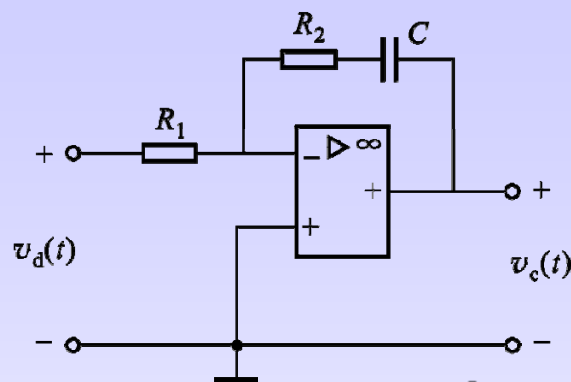
若作为环路滤波器：

$$A_F(s) = A_F \cdot F(s) = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau_2}}{s + \frac{1}{\tau_1 + \tau_2}}$$

其中 $A_F = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$, $F(s) = \frac{s + \frac{1}{\tau_2}}{s + \frac{1}{\tau_1 + \tau_2}}$

$F(s)$ 为一个极点一个零点的多项式

3. 有源RC比例积分（或RC理想积分）滤波器



电压传输系数为：
$$H(s) = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau_2}}{s} \quad \tau_1 = R_1 C \quad \tau_2 = R_2 C$$

若作为环路滤波器：
$$A_F(s) = A_F \cdot F(s) = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau_2}}{s}$$

其中 $A_F = \frac{\tau_2}{\tau_1}$, $F(s) = \frac{s + \frac{1}{\tau_2}}{s}$, $F(s)$ 为一个极点一个零点的多项式

因为极点在原点，所以是理想的积分环节。

§ 锁相环路分析

锁相环路线性化分析的条件和环路传递函数

环路的非线性分析

§ 锁相环路分析

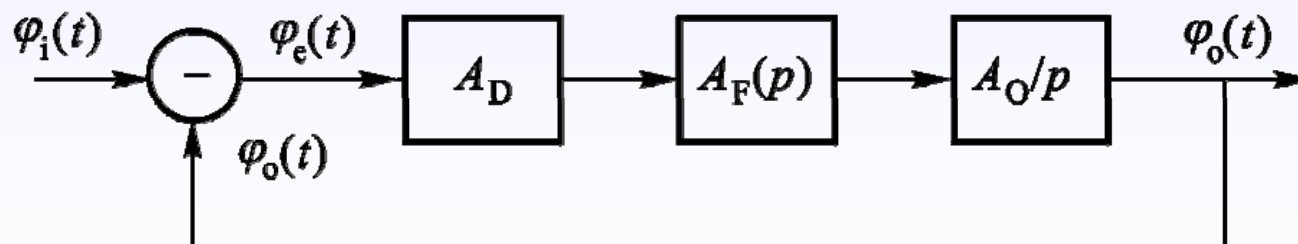
锁相环路线性化分析的条件和环路传递函数

一、环路线性化

1. 线性化条件: $\varphi_e \leq \frac{\pi}{6}$

2. 线性化环路方程: $p\varphi_e(t) + A_D A_O A_F(p)\varphi_e(t) = p\varphi_i(t)$

3. 线性化环路相位模式:



二、环路传递函数

- 线性网络可以用传递函数描述
- 线性环路系统可以用环路传递函数描述
- 用复频域传递函数描述可以简化系统的分析,所以可用复频域环路传递函数描述PLL.

1. 复频域中线性环路方程(P→S代之)

$$s\varphi_o(s) + A_D A_O A_F(s)\varphi_o(s) = s\varphi_i(s)$$

2. 环路传递函数定义:

环路传递函数是表示输出与输入相位拉氏变换之比

3. 环路传递函数类型

- 开环传递函数 $H_o(s) = \frac{\varphi_o(s)}{\varphi_e(s)}$
- 闭环传递函数 $H(s) = \frac{\varphi_o(s)}{\varphi_i(s)}$
- 误差传递函数 $H_e(s) = \frac{\varphi_e(s)}{\varphi_i(s)}$

4. 结论

- $H(s)$. $H_e(s)$ 均与 $H_o(s)$ 有关
- 环路滤波器不同, $F(s)$ 不同, 环路传递函数也不同,
可将分母标准化后进行比较。

三、环路传递函数分母标准化

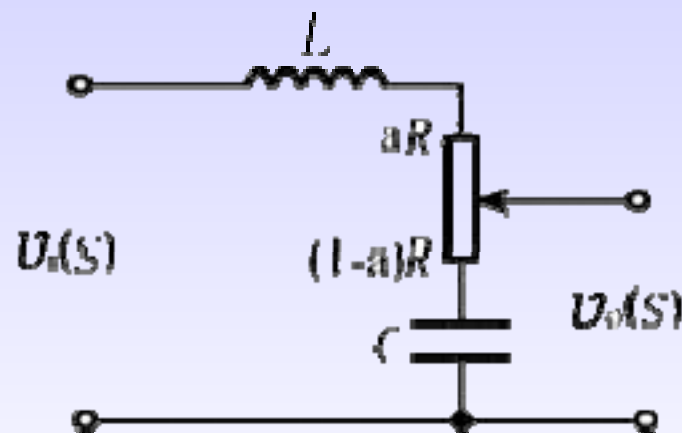
1. 举例说明：

L.R.C串联振荡网络标准化传递函数并画出幅频特性

- 先求传递函数 $H(S)$:
- 把分母进行标准化为:

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2$$

- $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$



- 标准化传递函数 $H(s) = \frac{2(1-a)\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$
- 频域中传递函数 $H(j\omega) = \frac{j2(1-a)\xi\omega_n\omega + \omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + j2\xi\omega_n\omega}$

- 画出 $|H(j\omega)| = H(\omega) \sim \omega / \omega_c$ 幅频特性



点击演示

若 $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$ ，对应 $\xi = 0.707$ 中幅频特性下降了 3dB

称 $\omega = \omega_n$ 为截止角频率，此频率用下标 c，记为 $\omega_c = \omega_n$

结论：

- 分母标准化便于环路比较
- $H(\omega) \sim \frac{\omega}{\omega_n}$ ，呈低通滤波特性
- 截止频率 $\omega_c = \omega_n$

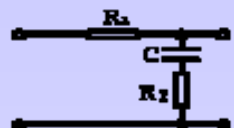
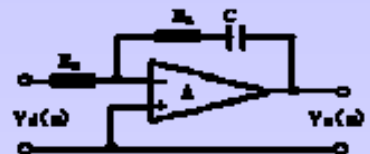
2. 不同环路分母标准化的环路传递函数

不同环路 ω_n 、 ξ 都不同

（由下表表示）

表 2-1 不同的环路滤波器具有不同的环路传递函数的表示式

<div>环路滤波器</div> <div>环路传递函数及 ω_n, ξ</div>	<div>通阻</div> <div>$A_F(s) = 1$</div>	<div>RC 积分</div> <div> </div> <div>$A_F(s) = \frac{1}{1 + s\tau}, \quad \tau = RC$</div>
$H_C(s) = \frac{A_D A_O A_F(s)}{s}$	$\frac{A_D A_O}{s}$	$\frac{\frac{A_D A_O}{\tau}}{s^2 + \frac{\tau}{\tau}}$
	标准化 $\frac{\omega_n^2}{s}$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s}$
$H(s) = \frac{A_D A_O A_F(s)}{s + A_D A_O A_F(s)}$	$\frac{A_D A_O}{s + A_D A_O}$	$\frac{\frac{A_D A_O}{\tau}}{s^2 + \frac{s}{\tau} + \frac{A_D A_O}{\tau}}$
	$\frac{\omega_n^2}{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$
$H_v(s) = \frac{s}{s + A_D A_O A_F(s)}$	$\frac{s}{s + A_D A_O}$	$\frac{s^2 + \frac{s}{\tau}}{s^2 + \frac{s}{\tau} + \frac{A_D A_O}{\tau}}$
	$\frac{s}{s + \omega_n^2}$	$\frac{s^2 + 2\xi\omega_n s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$
ω_n, ξ	$\omega_n = \sqrt{A_D A_O}$ $\xi = \frac{1}{2\sqrt{A_D A_O}}$	$\omega_n = \sqrt{\frac{A_D A_O}{\tau}}$ $\xi = \frac{1}{2\sqrt{A_D A_O}}$

<div> <div>环断</div> <div>传递</div> <div>函数及</div> <div>ω_n, ξ</div> </div>	<div> <div>环路</div> <div>误差函数</div> </div>	<div> <div>无源比例 RC 积分</div>  $A_F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{1 + s(\tau_1 + \tau_2)}$ $\tau_1 = R_1C \quad \tau_2 = R_2C$ </div>	<div> <div>有源比例 RC 积分</div>  $A_F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_1} \quad \tau_1 = R_1C \quad \tau_2 = R_2C$ <div>(理想积分环节)</div> </div>
	$F_o(s) = \frac{A_D A_O A_F(s)}{s}$	$\frac{A_D A_O (1 + s\tau_2)}{\frac{\tau_1 + \tau_2}{s^2} + \frac{s}{\tau_1 + \tau_2}}$	$\frac{(s - \frac{1}{\tau_2}) \frac{A_D A_O \tau_2}{\tau_1}}{s^2}$
		<div> <div>标准化</div> $\frac{s\omega_n(2\xi - \frac{\omega_n}{A_D A_O}) + \omega_n^2}{s(s + \frac{\omega_n^2}{A_D A_O})}$ </div>	<div> <div>标准化</div> $\frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2}$ </div>
	$H(s) = \frac{A_D A_O A_F(s)}{s + A_D A_O A_F(s)}$	$\frac{A_D A_O \frac{s\tau_2 + 1}{\tau_1 + \tau_2}}{s^2 + \frac{1 + A_D A_O \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} s + \frac{A_D A_O}{\tau_1 + \tau_2}}$	$\frac{A_D A_O \tau_2 (s + \frac{1}{\tau_2})}{s^2 + \frac{A_D A_O \tau_2}{\tau_1} s + \frac{A_D A_O}{\tau_1}}$
		$\frac{s\omega_n(2\xi - \frac{\omega_n}{A_D A_O}) + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$	$\frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$
<div> <div>ω_n, ξ</div> </div>	$H_e(s) = \frac{s}{s + A_D A_O A_F(s)}$	$\frac{s^2}{s^2 + \frac{1 + A_D A_O \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} s + \frac{A_D A_O}{\tau_1 + \tau_2}}$	$\frac{s^2}{s^2 + \frac{A_D A_O \tau_2}{\tau_1} s + \frac{A_D A_O}{\tau_1}}$
		$\frac{s(s + \frac{\omega_n^2}{A_D A_O})}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$	$\frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$
		$\omega_n = \sqrt{\frac{A_D A_O}{\tau_1 + \tau_2}}$ $\xi = \frac{1}{2}(\tau_2 + \frac{1}{A_D A_O})\sqrt{\frac{A_D A_O}{\tau_1 + \tau_2}}$	$\omega_n = \sqrt{\frac{A_D A_O}{\tau_1}}$ $\xi = \frac{\tau_2}{2}\sqrt{\frac{A_D A_O}{\tau_1}}$

结论：

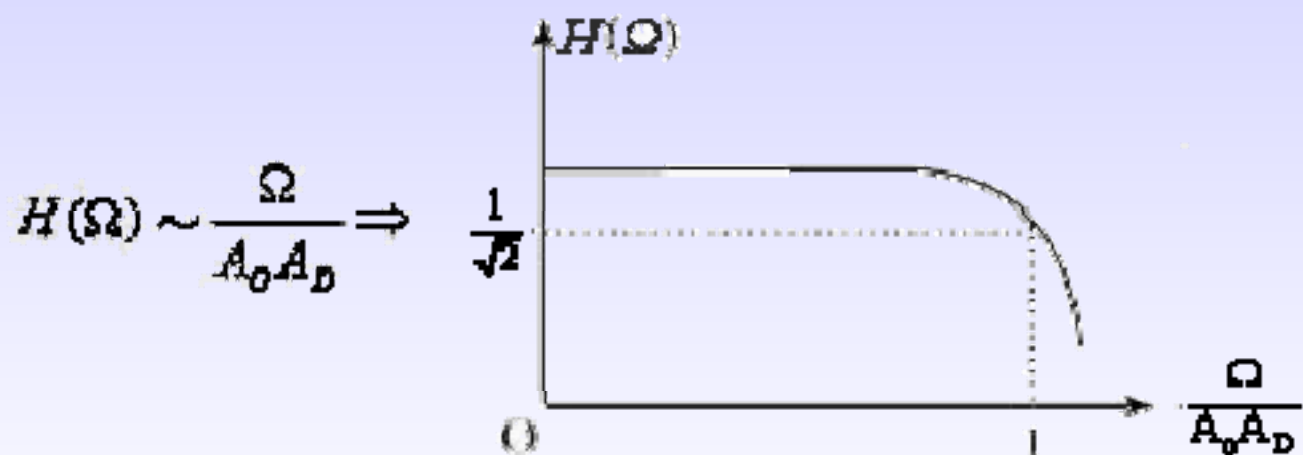
- 环路不同，环路传递函数不同， ω_n 、 ξ 也不相同
- 无环路滤波器的环路为一阶环，常用的环路滤波器形式中任意取一节作为环路滤波器构成的环路均是二阶环，二阶
- 环路得到广泛应用。
环路通常称为*阶*型环，其中“阶”用大写一、二、三表示，它取决于环路传递函数分母的最高次幂数，“型”用1、2、3表示，取决于环路中理想积分环节的个数。

四、环路跟踪性能分析

以一阶环路频响特性为例（对输入相位的调制频率 Ω 而言）

1. 闭环传递函数频响特性

$$H(j\Omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Omega}{A_O A_D}\right)^2}} \quad \phi(\Omega) = \arctan \frac{\Omega}{A_O A_D}$$

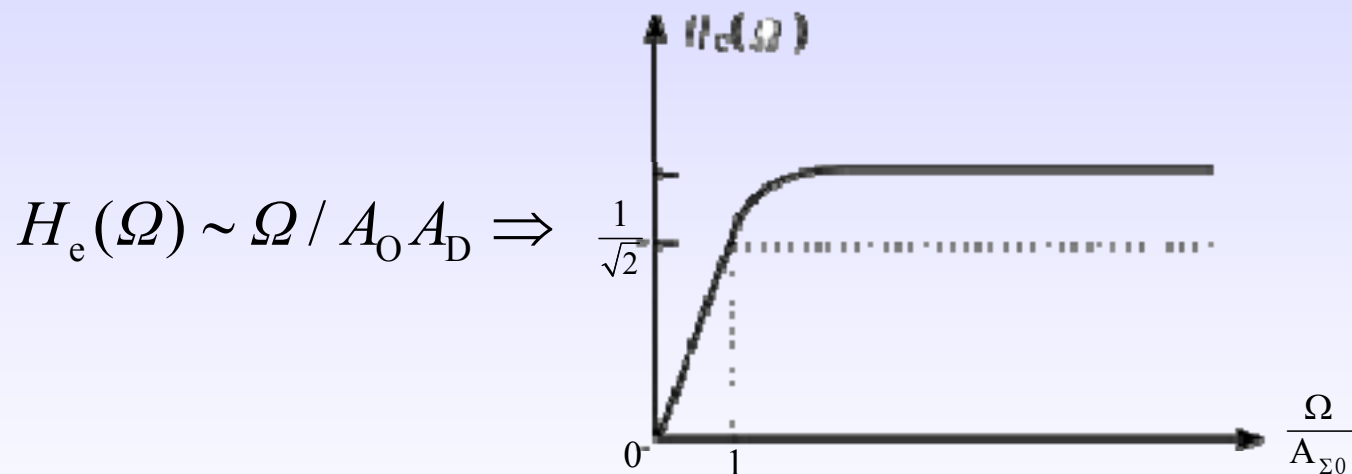


可见：

- 一阶环闭环传递函数频响特性呈低通滤波特性
- 截止角频率 $\Omega_C = A_O A_D = A_{\Sigma O}$

2. 误差传递函数频响特性

$$H_e(j\Omega) = \frac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2 + \left(\frac{\Omega_c}{A_O A_D}\right)^2}} \quad \phi(\Omega) = \frac{\pi}{2} \arctan \frac{\Omega}{\frac{\Omega_c}{A_O A_D}}$$



可见:

一阶环路误差传递函数呈高滤波特性

- **结论:**

a) 一阶环闭环传递函数频响特性呈低通滤波；误差传递函数频响特性呈高通滤波

b) 一阶环截止角频率 $\Omega_c = A_0 A_D = A_{\Sigma 0}$ ，为提高环路抑制干扰和噪声能力，应使 Ω_c 愈小愈好，这与提高环路稳定性使 $A_{\Sigma 0}$ 愈大愈好二者出现矛盾，所以一阶锁相环无实用价值。

c) 实际中二阶锁相环可以兼顾环路抑制干扰、噪声能力与环路稳定性能，所以得到广泛应用。

环路的非线性分析

一、基本概念

1. 相图法
2. 相平面
3. 相点
4. 相轨迹
5. 相轨迹方程

二、一阶环路的相图

1. 一阶环的相轨迹方程. 相图的特点

①. 求相轨迹方程

$$\dot{\varphi}_e = \Delta\omega_i - A_{\Sigma O} \sin \varphi_e(t) \quad A_{\Sigma O} = A_O A_D$$

②. 相图



点击演示

③. 相图特点

- 相轨迹有方向
- 平衡点**A**（稳定）**B**（不稳定）有无数多个

$$\varphi_{eA} = 2n\pi + \arcsin \frac{\Delta\omega_i}{A_{\Sigma 0}} \quad \varphi_{eA} = (2n-1)\pi - \arcsin \frac{\Delta\omega_i}{A_{\Sigma 0}}$$

- 锁定充分必要条件

$$\varphi_e(t) = \varphi_{e\infty} = \arcsin \frac{\Delta\omega_i}{A_{\Sigma 0}} \quad \omega_i = \omega_o \quad (|\Delta\omega_i| \leq A_{\Sigma 0})$$

2. 一阶环路的同步带、捕捉带和快捕带

①. 同步带



点击演示

环路原先是锁定的，在某外因作用下，环路偏离了锁定状态，使环路能重新入锁的允许最大输入固有角频差 $|\pm\Delta\omega_H| = A_{\Sigma O}$ ，称一阶环路的同步带。

②. 捕捉带



点击演示

环路原先是失锁的，在某外因作用下，逐渐缩小输入固有角频差，一旦环路能进入锁定所允许的最大固有角频， $|\pm\Delta\omega_p| = \frac{A_{\Sigma O}}{20}$ ，称一阶环路的捕捉带

③. 快捕带



点击演示

不经 2π 周期跳跃即可入锁，允许最大固有角频差 $|\pm\Delta\omega_L| = A_{\Sigma O}$ ，称为一阶环路的快捕带

3. 一阶环路差拍状态和频率牵引现象

①差拍现象

②频率牵引现象



点击演示

可见 $\Delta\omega_i' < \Delta\omega_i$ 经若干周期频率牵引后可进入锁定

亦即:使VOC的输出频率 $\omega_o(t)$ 缓慢的趋于输入信号频率 , 这可以由下面频率牵引图的演示过程看出。

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_r$$

$$\Delta\omega_r = \omega_i - \omega_r$$

$$\Delta\omega = \omega_i - \omega_o$$

锁定过程:

$$\Delta\omega = \Delta\omega \downarrow + \Delta\omega_o \uparrow$$

锁定:

$$\Delta\omega_i = \Delta\omega_o$$

$$= A_{xp} \sin \varphi_{xp}$$



点击演示

§ 锁相环路的应用

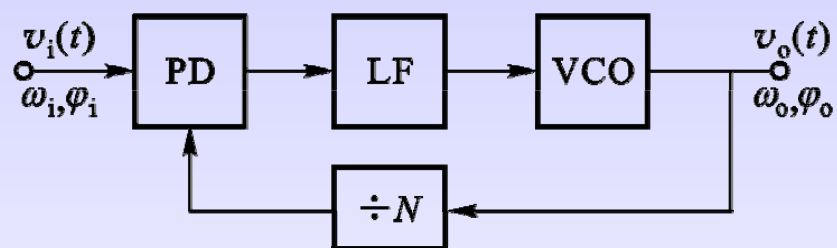
锁相倍频、分频和混频

锁相调频、调相、鉴频、鉴相及其同步检波

§ 锁相环路的应用

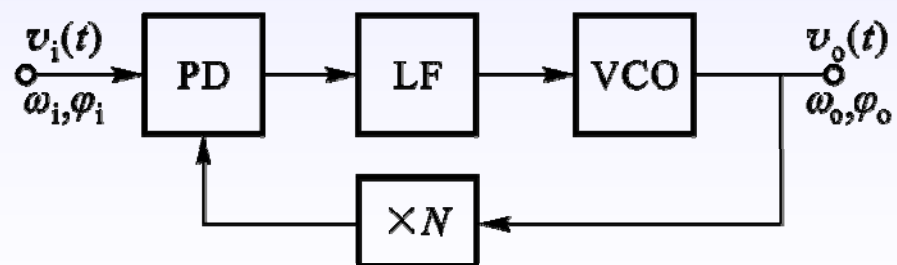
锁相倍频. 分频和混频

一、锁相倍频



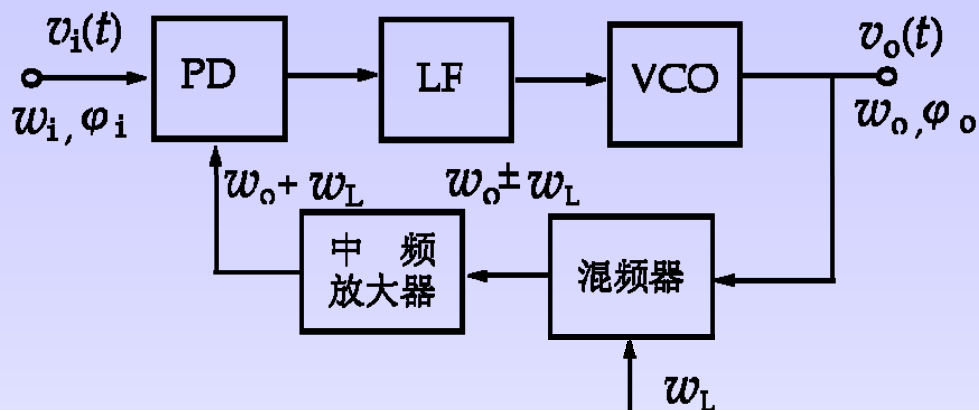
锁定时 $\omega_o = N\omega_i$

二、锁相分频



锁定时 $\omega_o = \omega_i / N$

三、锁相混频

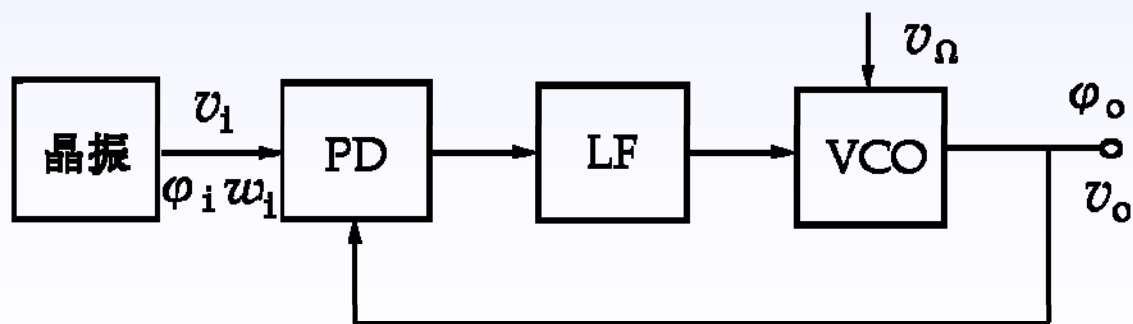


锁定时 $\omega_o = \omega_i - \omega_L = \omega_i$

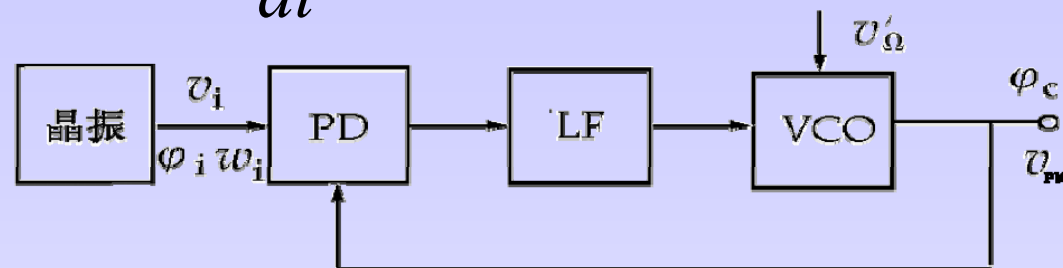
锁相调频、调相、鉴频、鉴相及其同步检波

一、锁相调频、调相

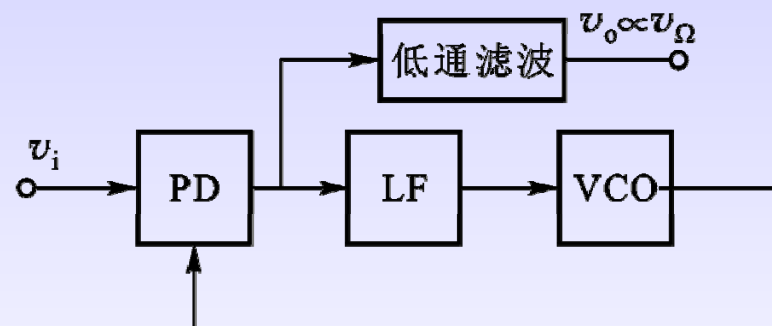
- 锁相调频:



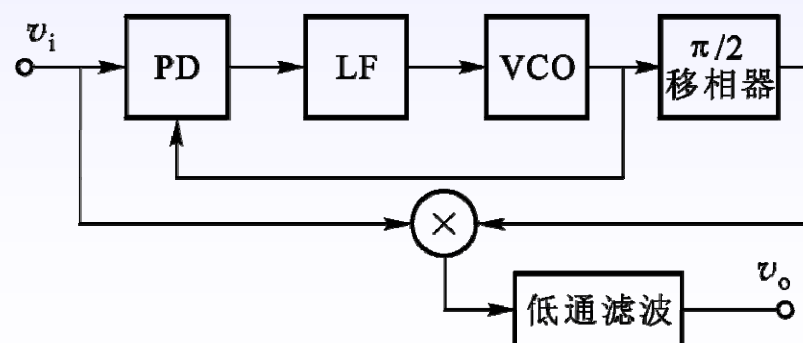
- 锁相调相: $v_{\Omega}' = \frac{dv_{\Omega}(t)}{dt}$



二、鉴频、鉴相



三、锁相同步检波



§ 频率合成

概念

锁相频率合成器

直接数字式频率合成器

§ 频率合成

概念

一、 频率合成含义

二、 频率合成的优缺点

三、 频率合成技术实现方法

四、 性能指标

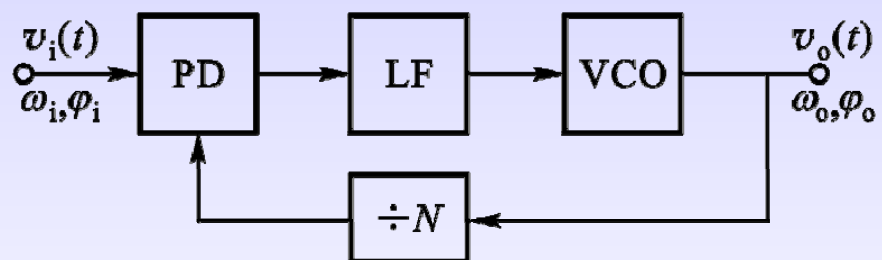
1. 频率转换时间
2. 频率稳定性和准确度
3. 频谱纯度
4. 频率间隔
5. 频率范围

锁相频率合成器

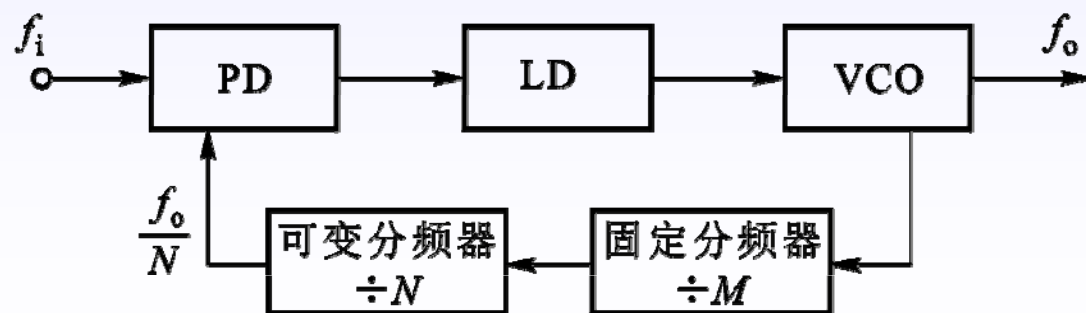
目前最广泛应用的是数字锁相频率合成器

一、单环频率合成器

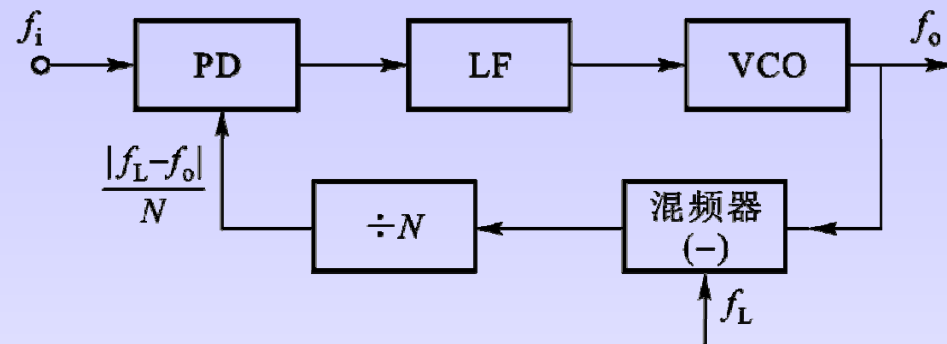
1. 基本单环频率合成器



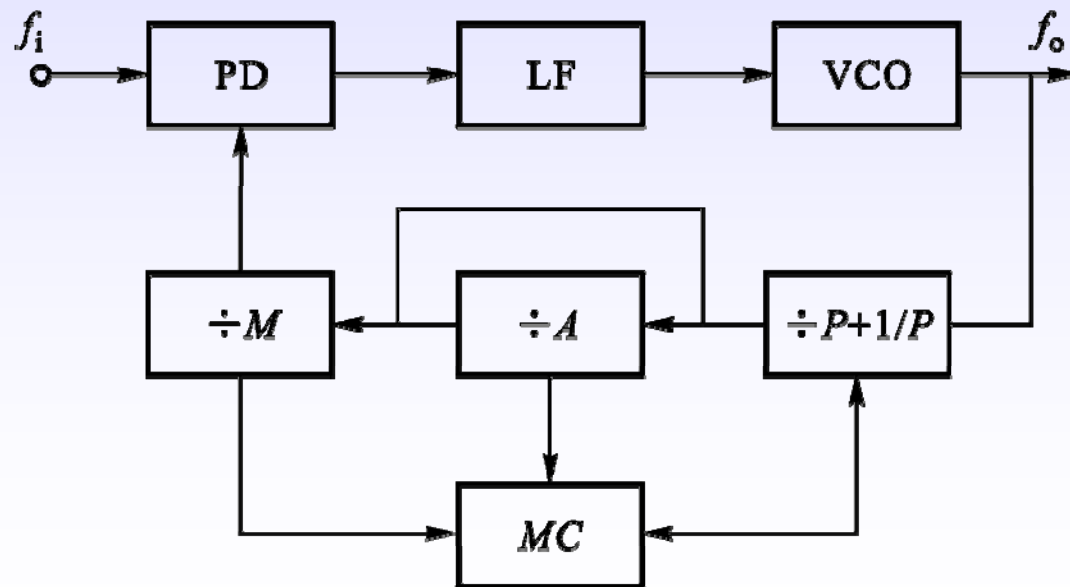
2. 带有前置分频的数字频率合成器



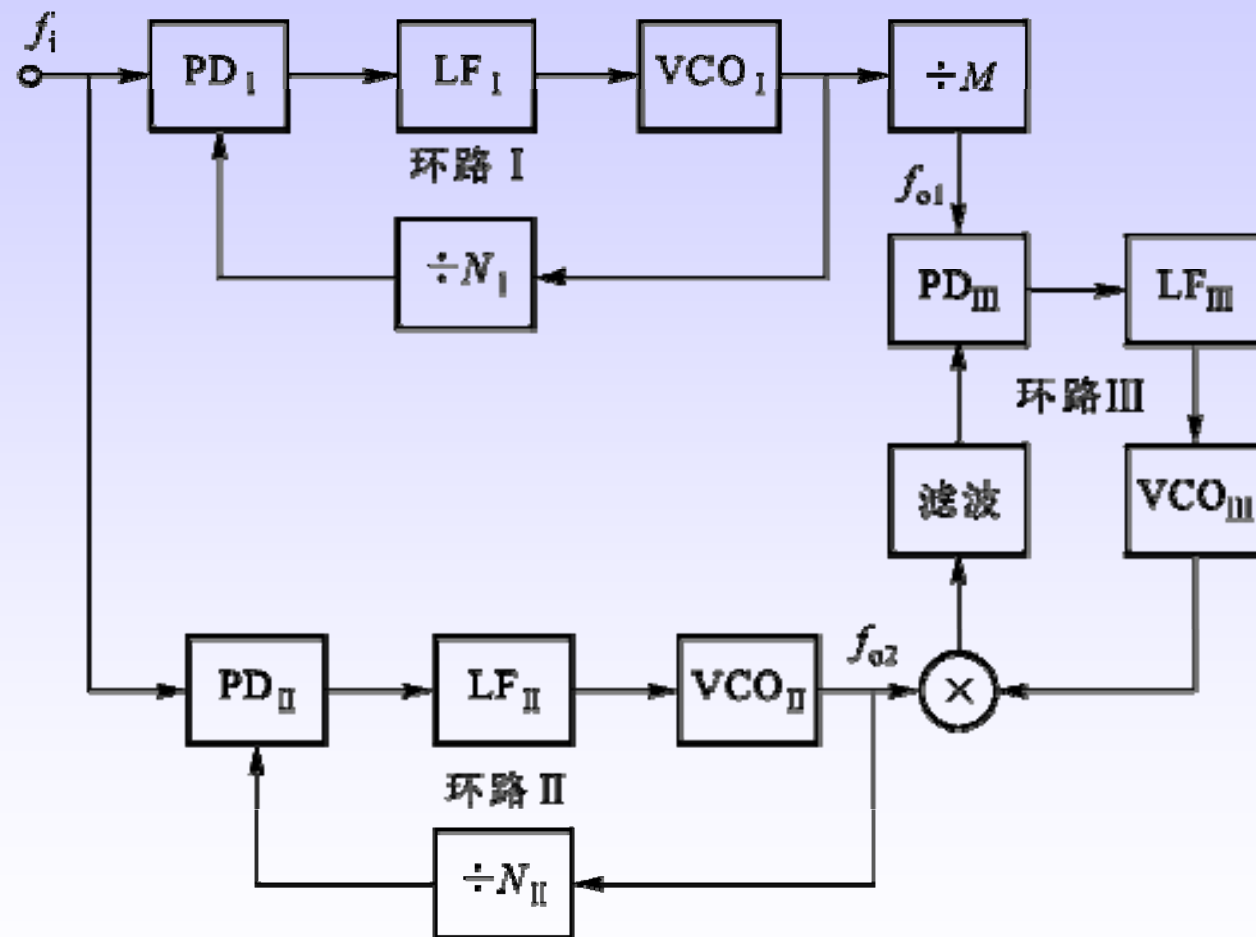
3. 下变频型的单环频率合成器



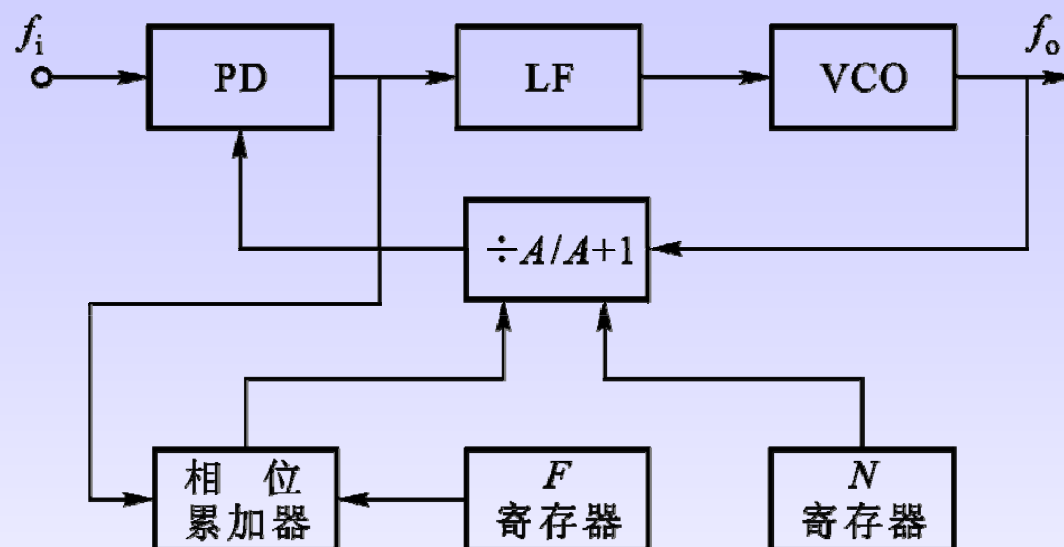
4. 双模前置分频器型单环频率合成器



二、多环频率合成器



三、小数分频频率合成器



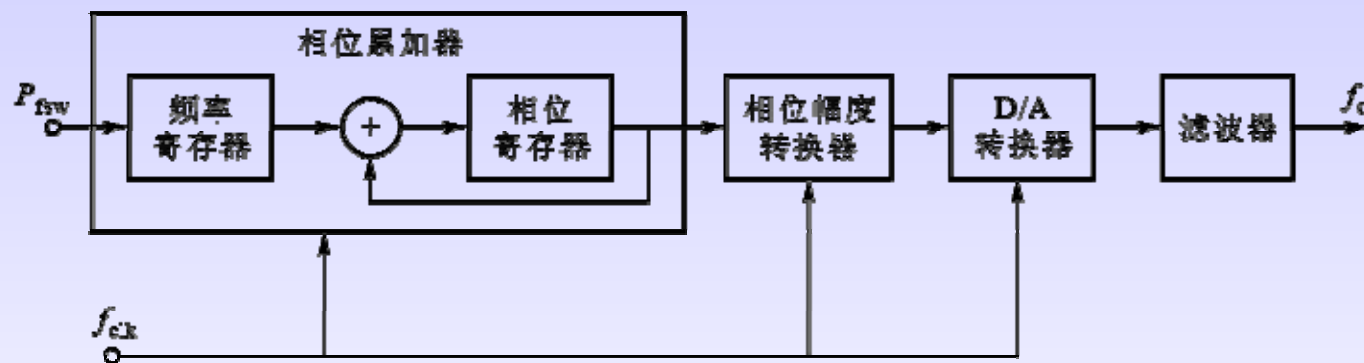
7-5-3 直接数字式频率合成器

有极高的分辨率、快速的频率转换时间、很宽的相对带宽，任意的波形输出能力和数字调制等优点，是实现设备全数字化的一个关键技术。

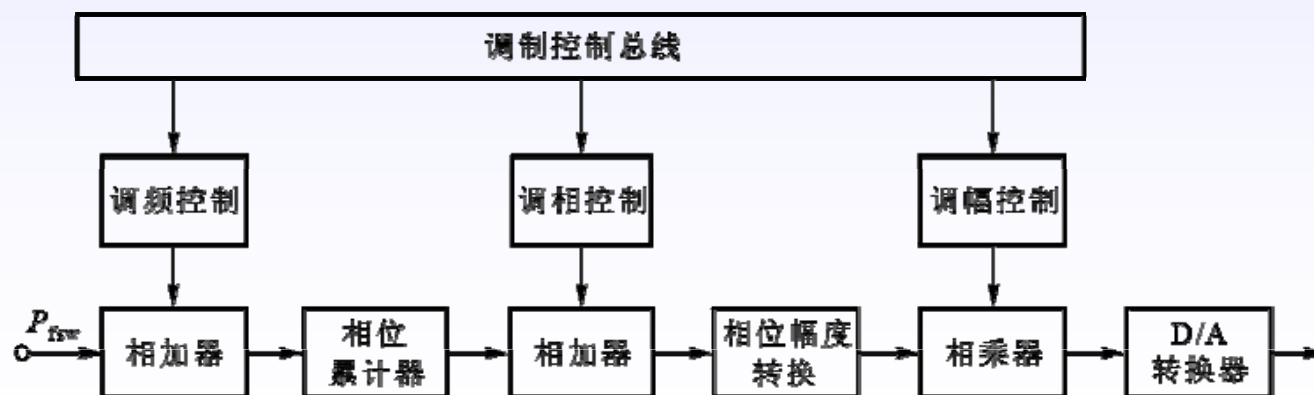
一、DDS原理

1.框图

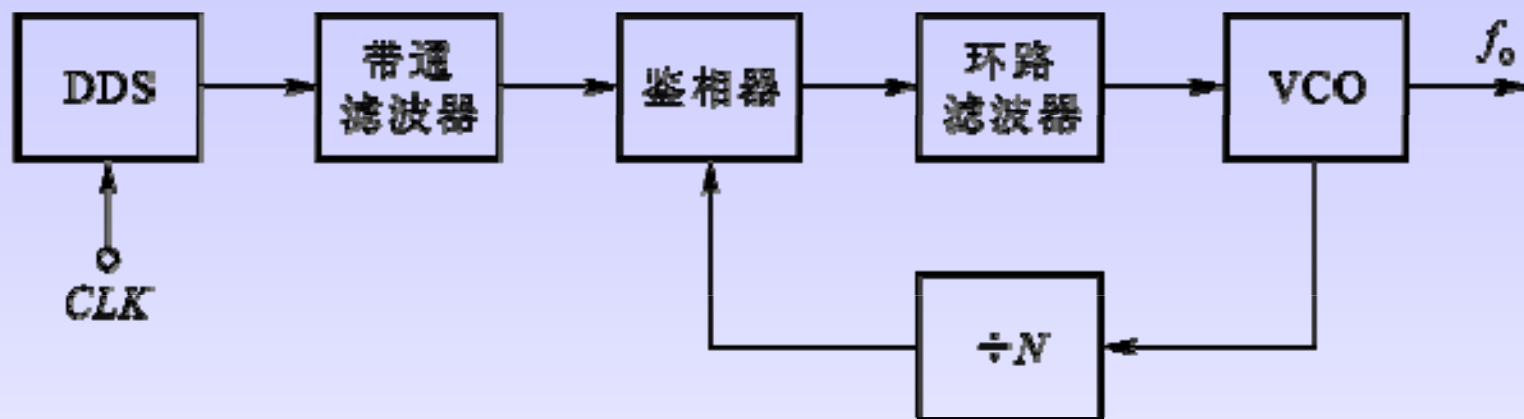
①直接数字频率合成器原理框图



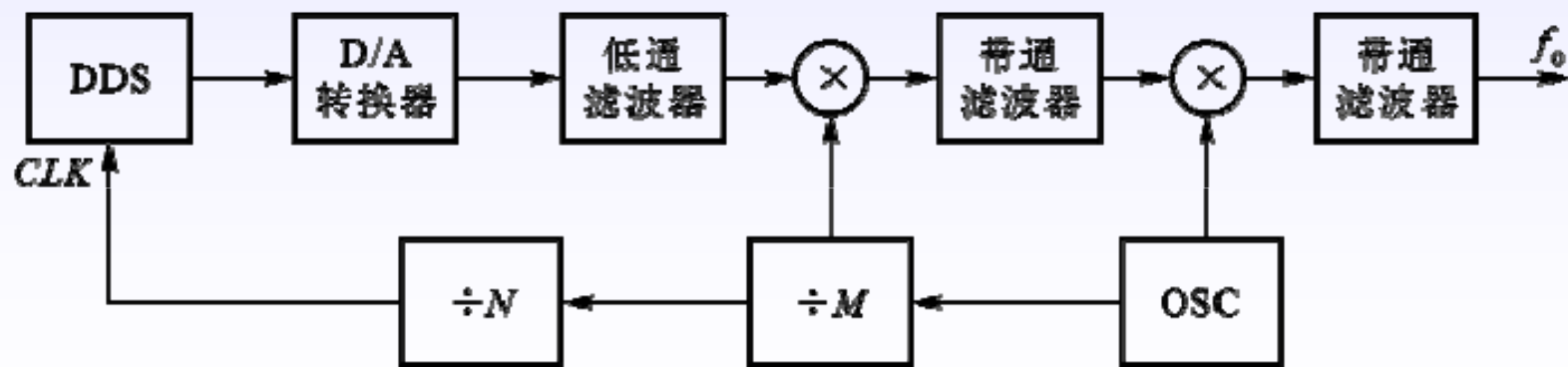
② DDS合成器结构框图



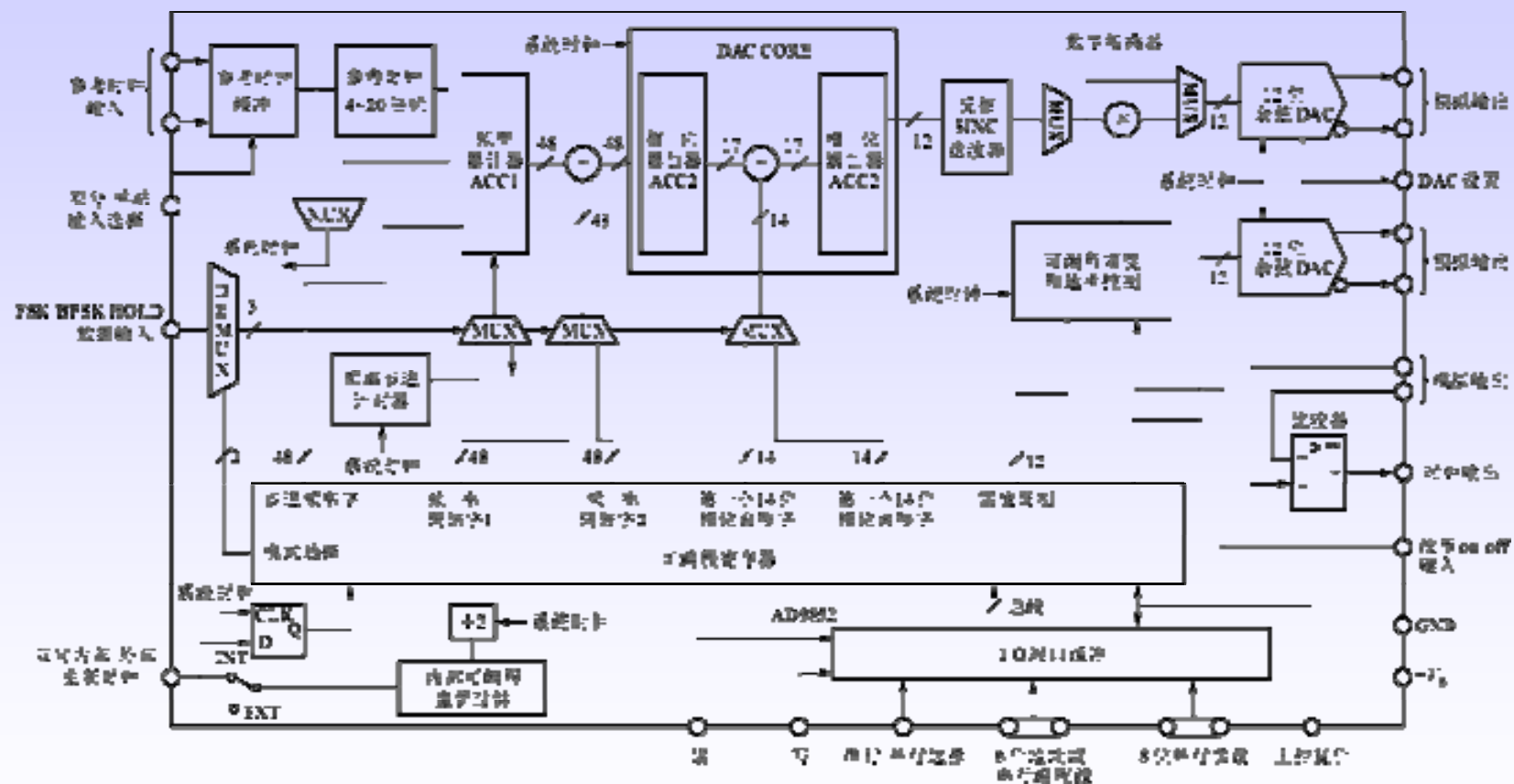
③ DDS和锁相环混合合成器框图



2. DDS和混频器组合的合成器



二、AD9852直接数字式频率合成器



点击图片时可放大

