



CEC

Ch10

# 反馈控制电路

## Feedback Control Circuits ( AGC/AFC/PLL)

2023年6月10日

学而不厌 诲人不倦



# Chapter 10 反馈控制电路

## ➡ 概述

### ➡ §10.1 自动增益控制 ( AGC )

### ➡ §10.2 自动频率微调 ( AFC )

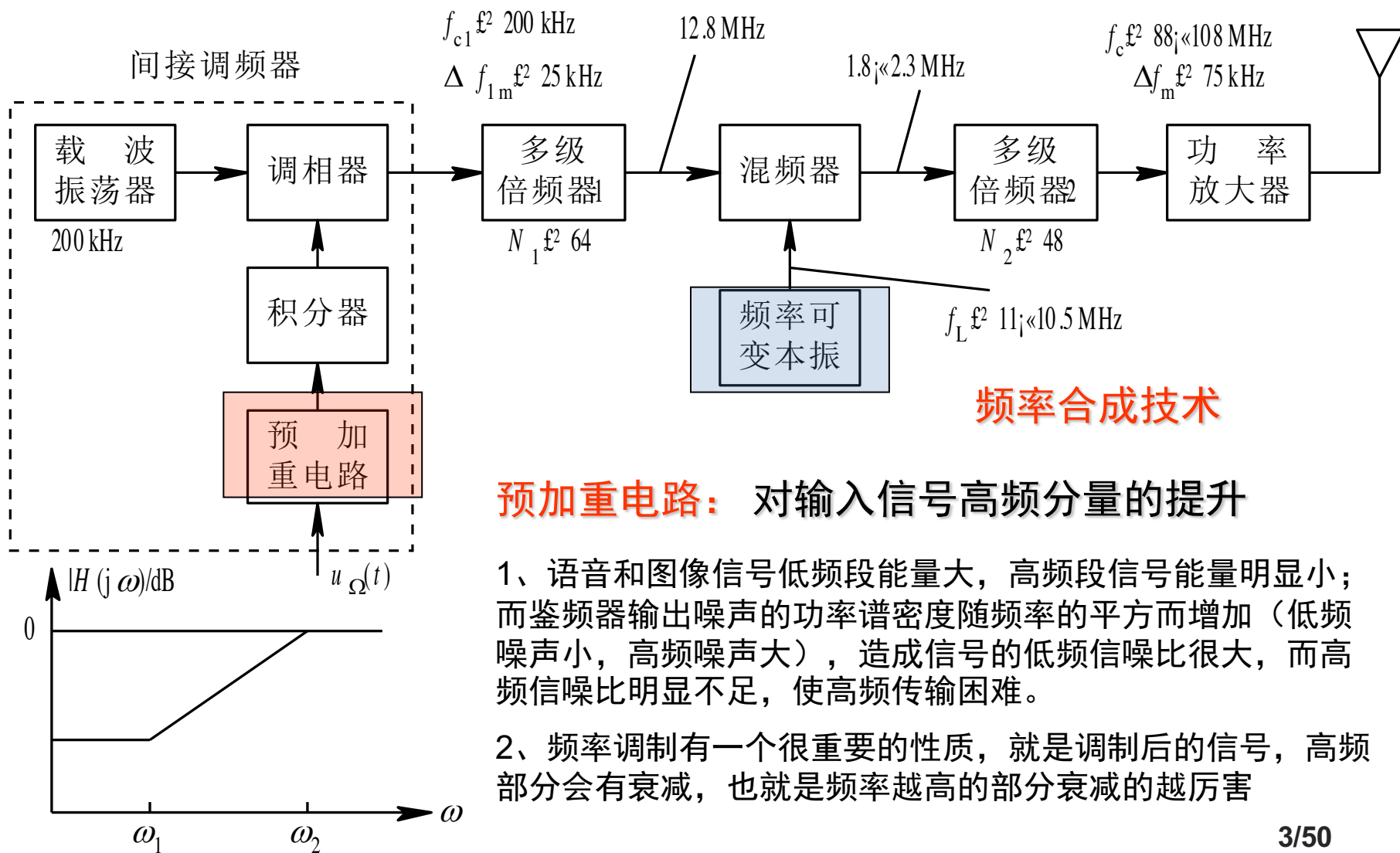
### ➡ §10.3 锁相环路的基本原理

### ➡ §10.4 锁相环路各部件及其数学模型

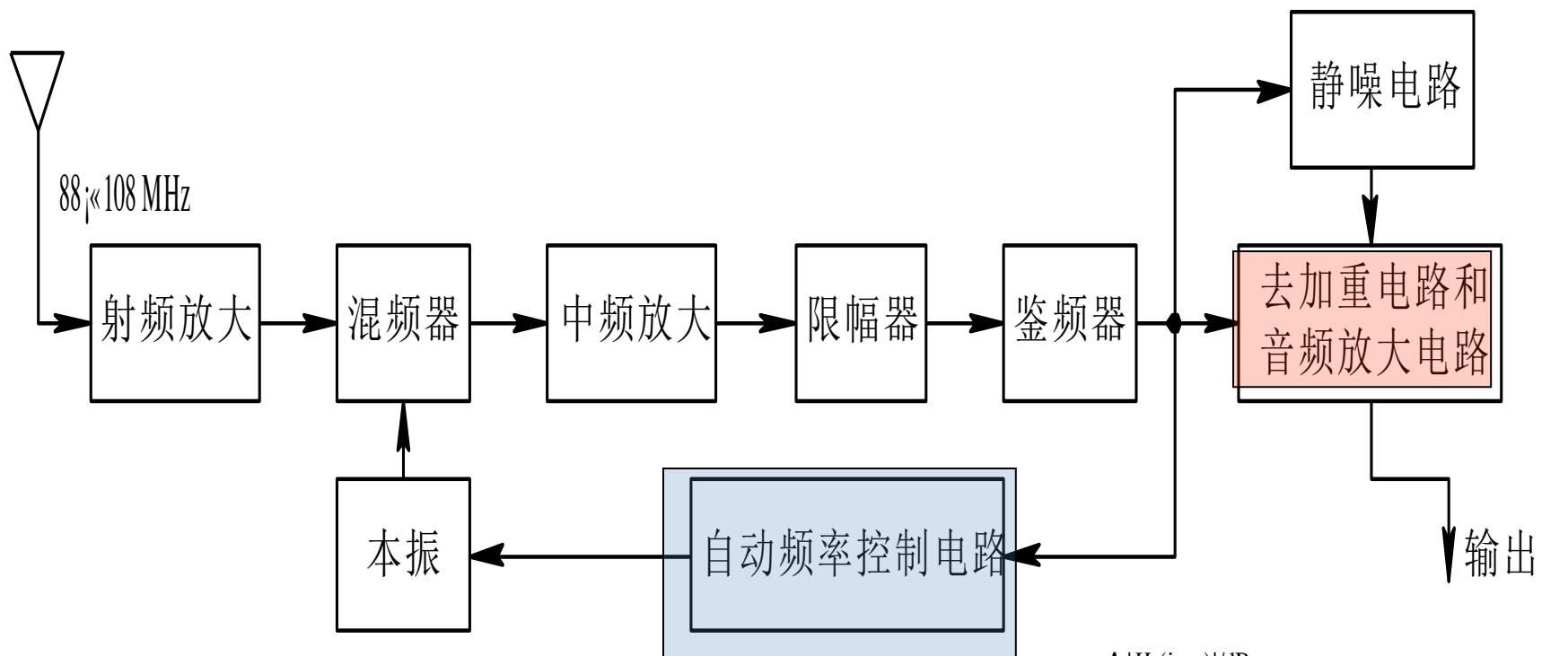
### ➡ §10.7 锁相环路的应用简介

# 概述

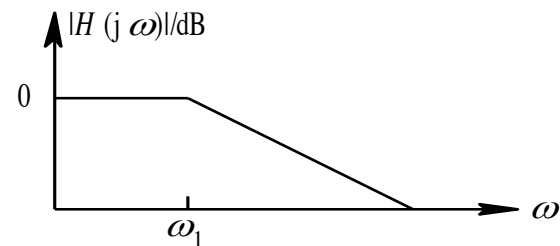
## 1. 典型FM整机原理



## ➤ 1. 典型FM整机原理



反馈控制技术

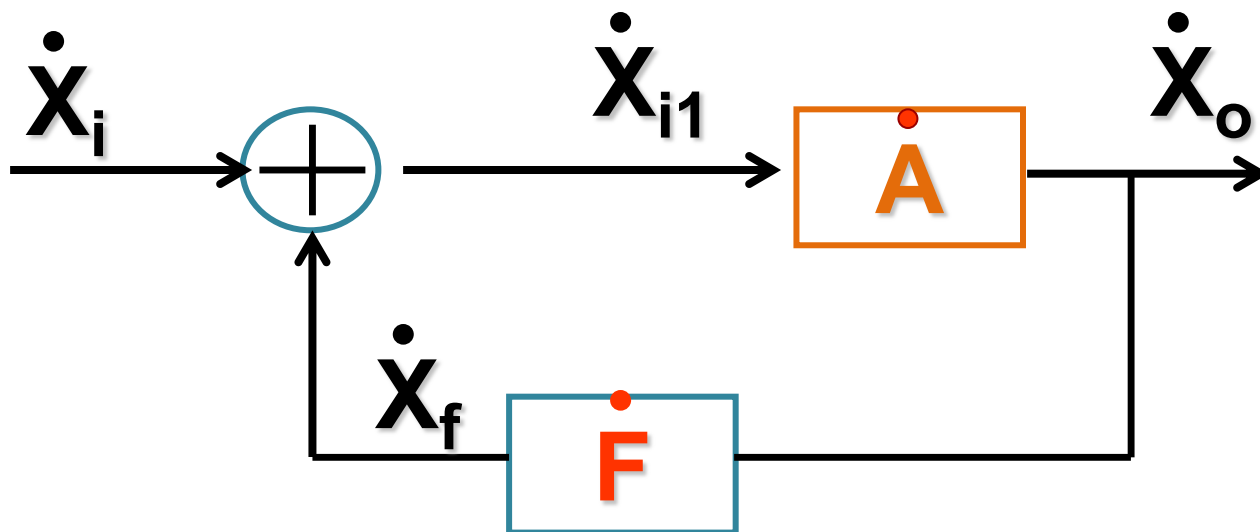


去加重电路

## ➤ 2. 反馈控制的概念

— 反馈控制是现代系统工程中的一种重要技术手段。在系统受到扰动的情况下，通过反馈控制作用，可使系统的某个参数达到所需的精度，或按照一定的规律变化。

### 反馈放大电路

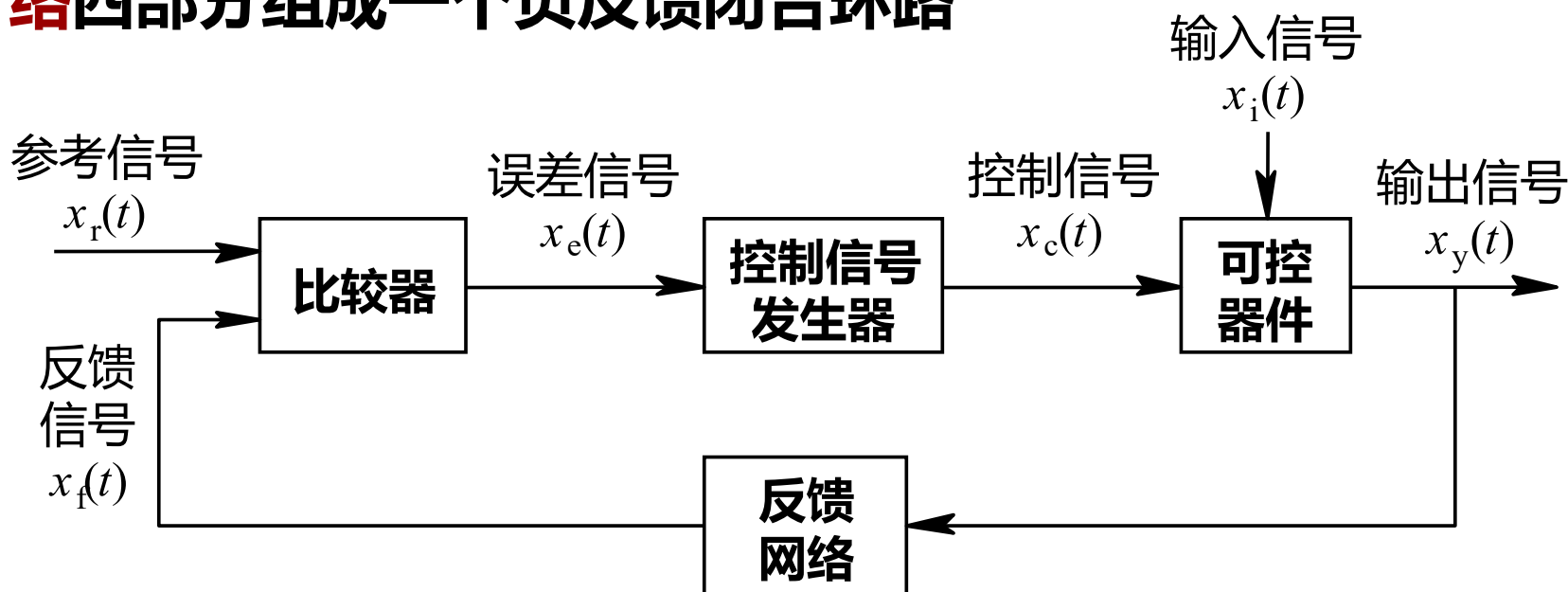


## ➤ 3. 反馈控制的分类

- **自动增益控制** (Automatic Gain Control, 简称**AGC**) , 它主要用于接收机中, 控制接收信号的增益, 以维持整机输出恒定, 使之几乎不随外来信号的强弱变化。
- **自动频率控制** (Automatic Frequency Control, 简称**AFC**) , 主要用于维持电子设备中工作频率的稳定。
- **自动相位控制** (Automatic Phase Control, 简称APC) , 又称为**锁相环路**(Phase Lock Loop, 简称**PLL**) , 它用于锁定相位, 是应用最广的一种反馈控制电路。

## ➤ 4. 反馈控制系统组成与分析

— 主要包括**比较器**、**控制信号发生器**、**可控制件**和**反馈网络**四部分组成一个负反馈闭环回路

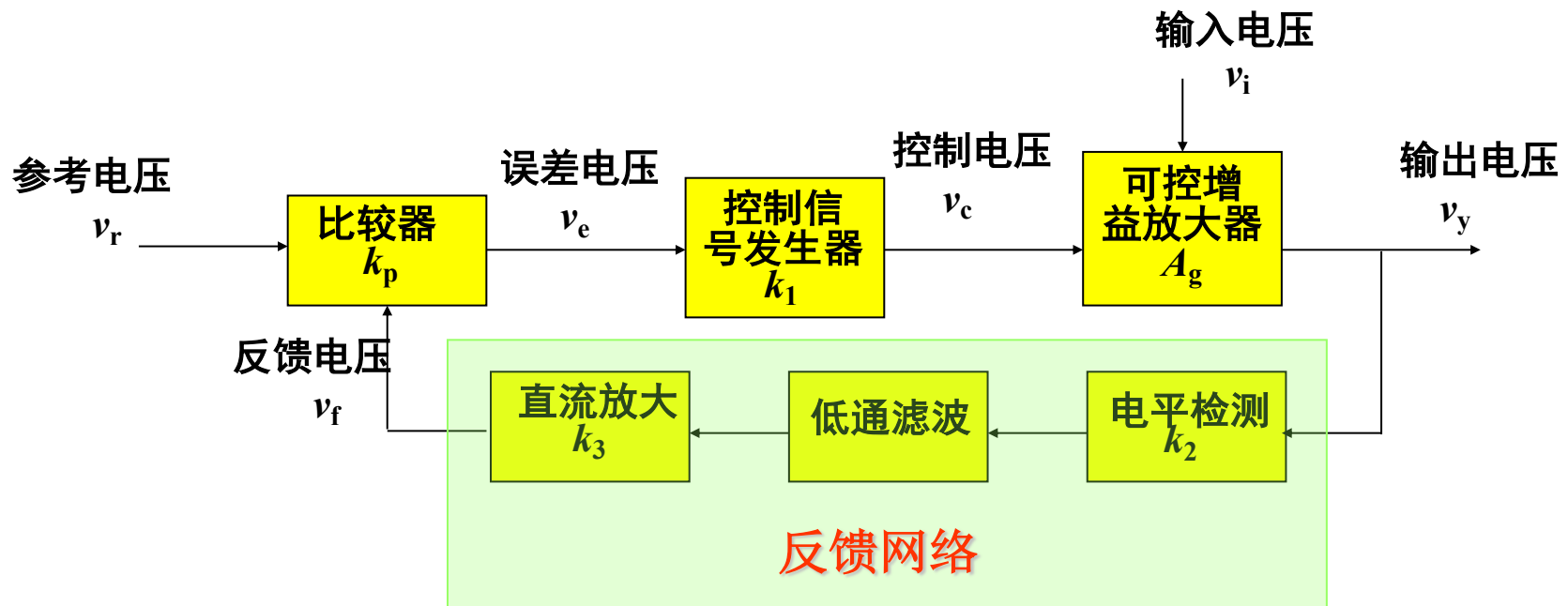


反馈控制系统的组成

闭环传递函数 
$$H_T(s) = \frac{X_y(s)}{X_r(s)} = \frac{k_p k_c H_1(s)}{1 + k_p k_c H_1(s) H_2(s)}$$

## 10.1 自动增益控制

➤ **1. 概念**：自动增益控制(AGC)电路是电子设备特别是接收设备的重要辅助电路之一，其主要作用是使设备的输出电平保持为一定的数值。因此也称自动电平控制(ALC)电路。





# 10.1 自动增益控制



## ➤ 2. 自动增益控制(AGC)的作用

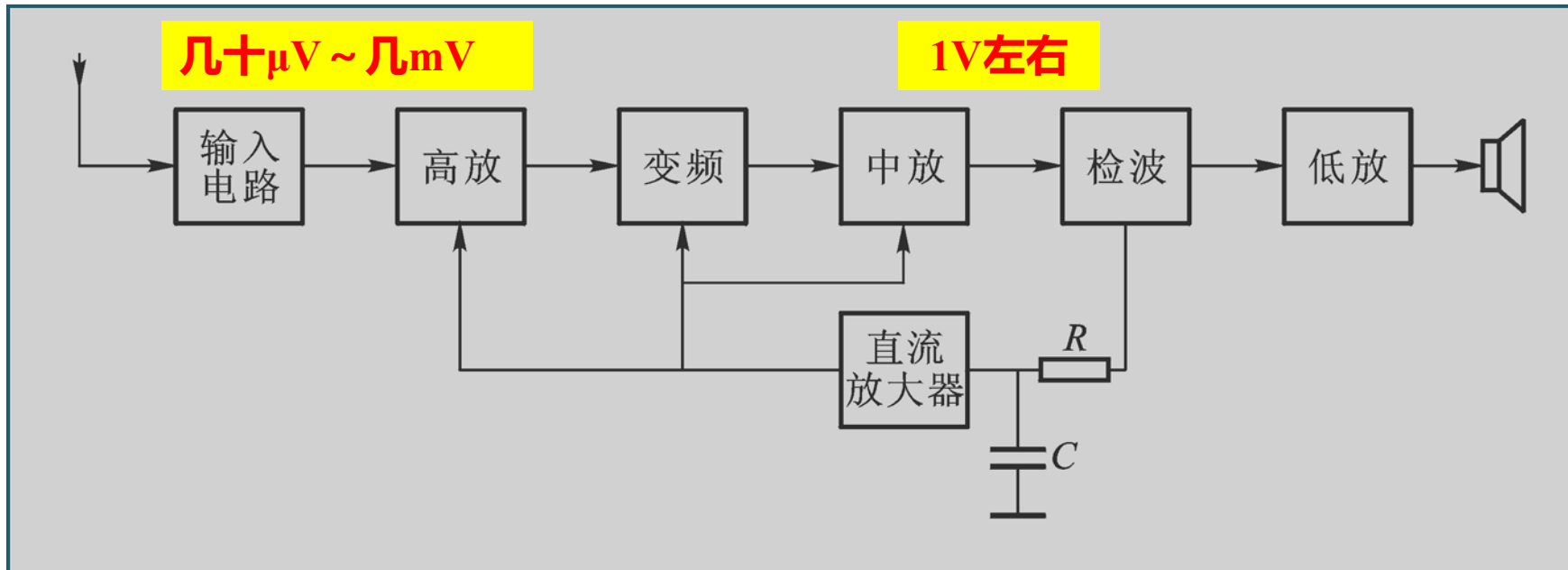


图10.1.1 具有AGC的超外差式接收机方框图

自动增益控制电路的作用是，当输入信号电压变化很大时，保持接收机输出电压几乎不变。

# 10.1 自动增益控制



## ➤ 3. 简单AGC电路

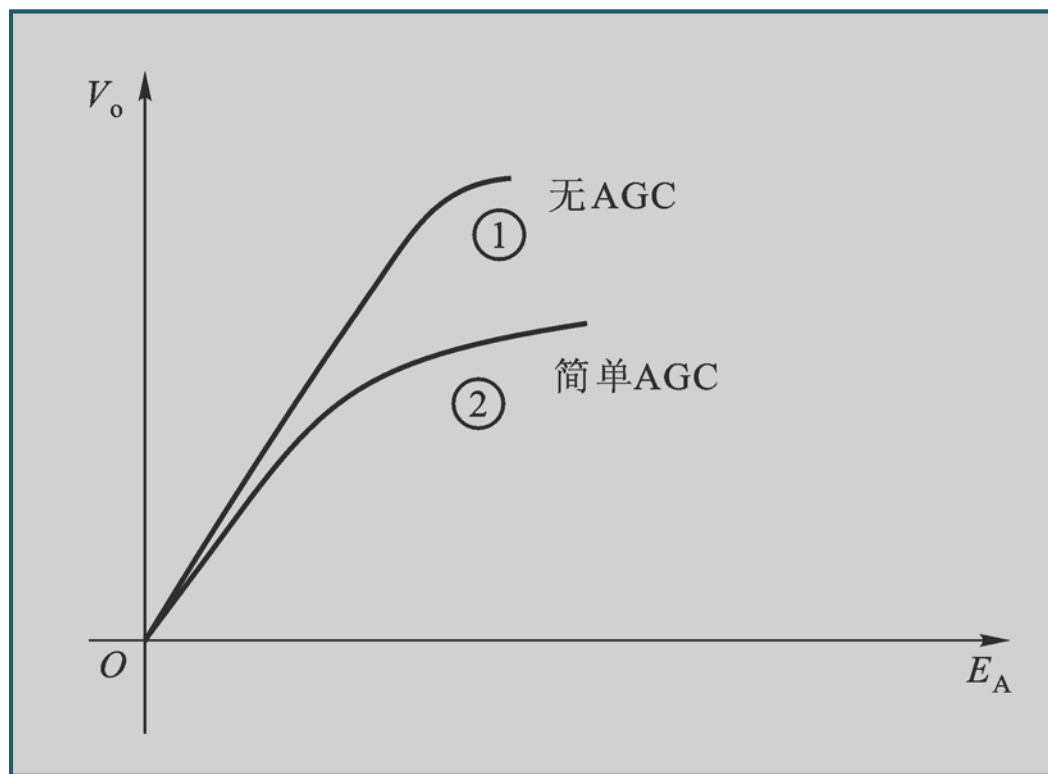


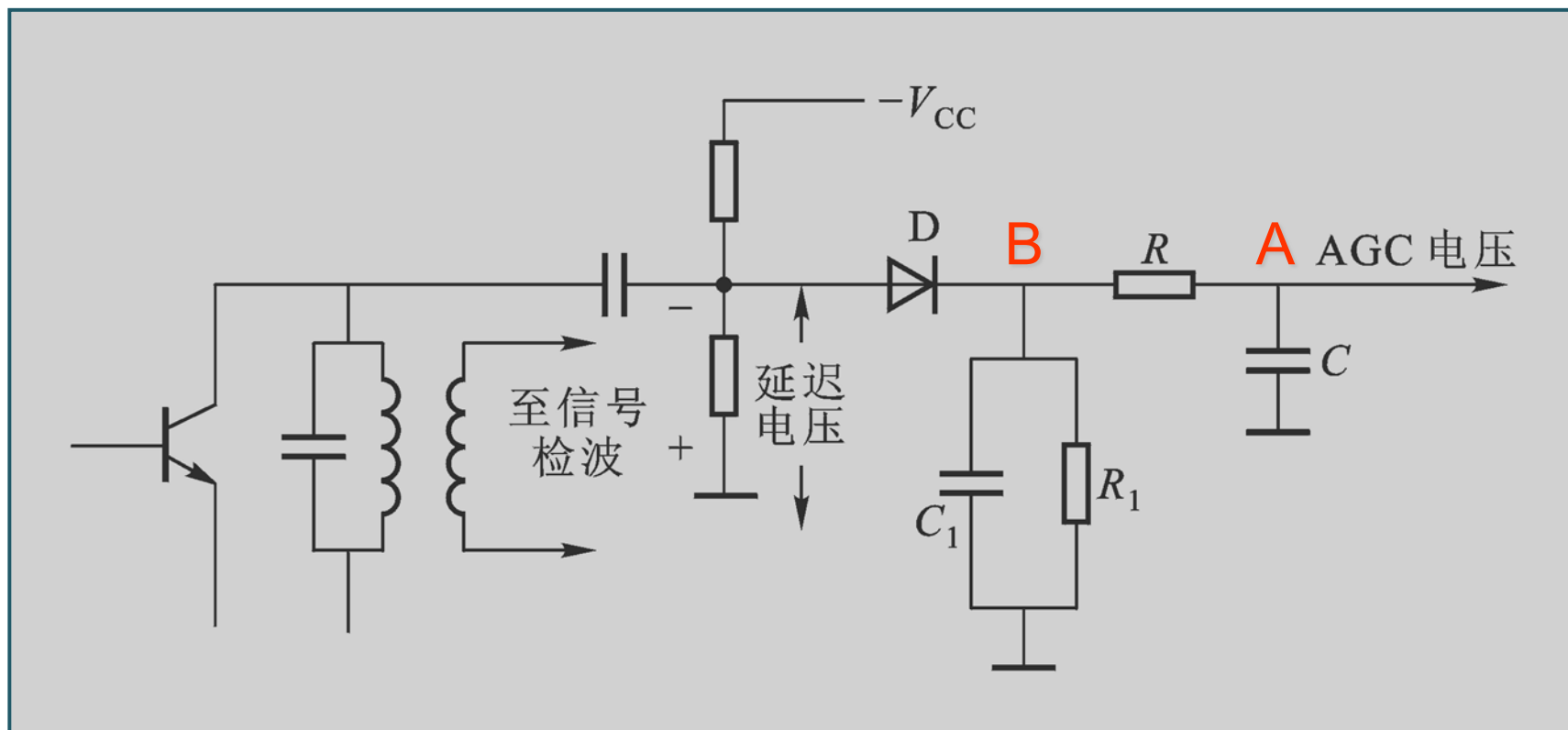
图10.1.2 简单的AGC特性曲线

只要有输入信号，AGC电路就起作用，适合输入信号很大的场合。

## 10.1 自动增益控制



### ➤ 4. 延迟AGC电路



在二极管上加有一负电压（由负电源分压获得），称为延迟电压。

## ➤ 4. 延迟AGC电路

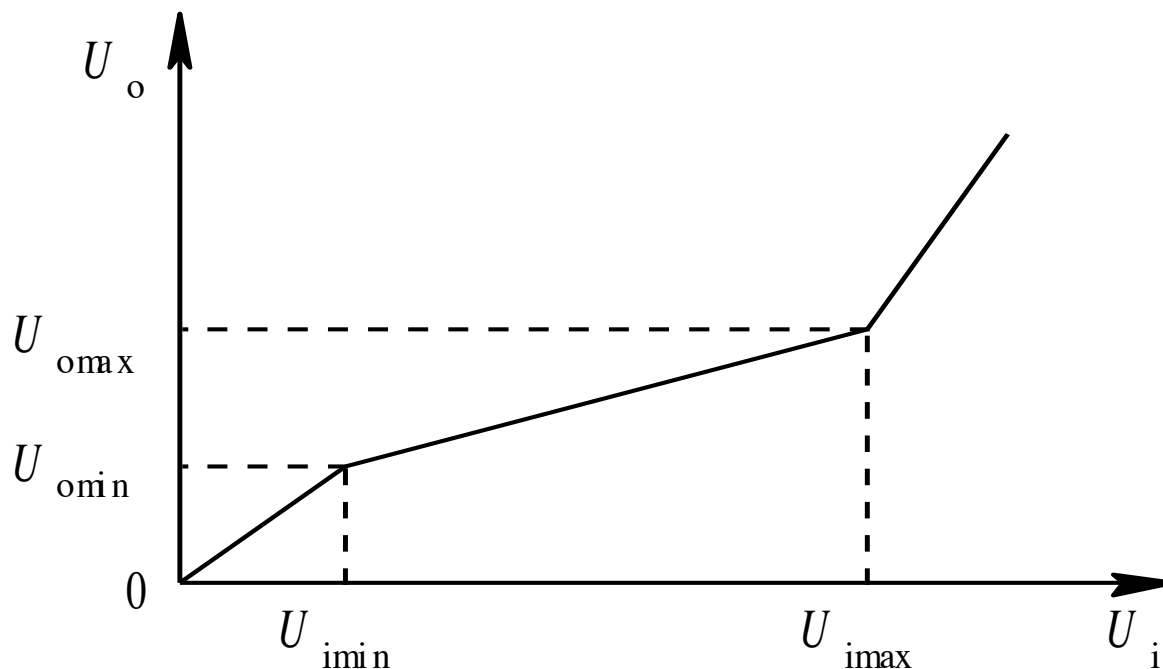


图10-1-4 延迟AGC特性曲线

在延迟AGC电路里有一个起控门限，即比较器参考电压 $U_r$ ，它对应的输入信号振幅 $U_{imin}$



# Chapter 10 反馈控制电路

- ➡ 概述
- ➡ §10.1 自动增益控制 ( AGC )
- ➡ **§10.2 自动频率微调 ( AFC )**
- ➡ §10.3 锁相环路的基本原理
- ➡ §10.4 锁相环路各部件及其数学模型
- ➡ §10.7 锁相环路的应用简介

## 10.2 自动频率微调



### ➤ 1. 基本原理

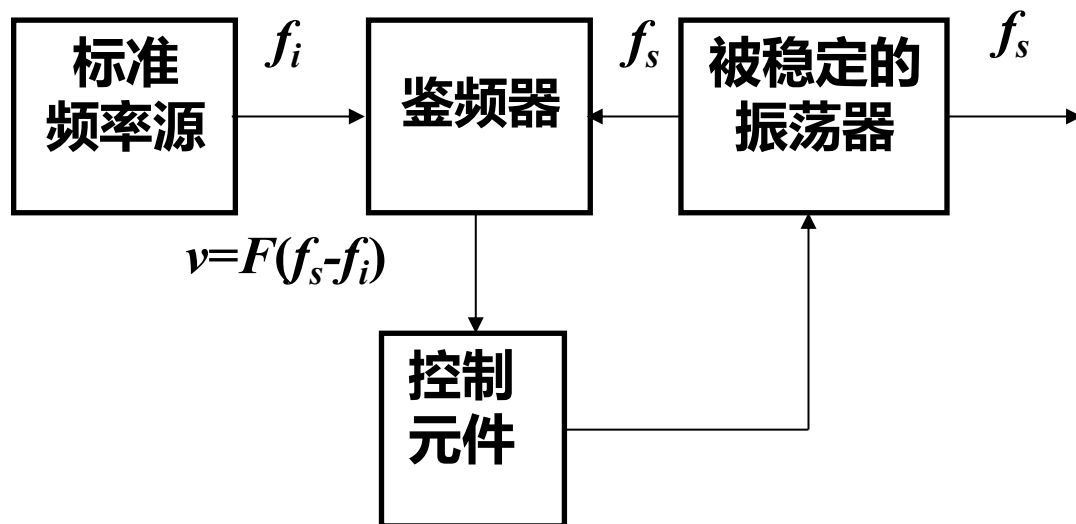


图10.2-1 自动频率微调系统原理方框图

振荡器的频率经常由于各种因素的影响而发生变化，偏离了预期的数值。用自动频率微调可以使自激振荡器频率自动锁定到近似等于预期的标准频率上。

## 10.2 自动频率微调



### ➤ 1. 基本原理

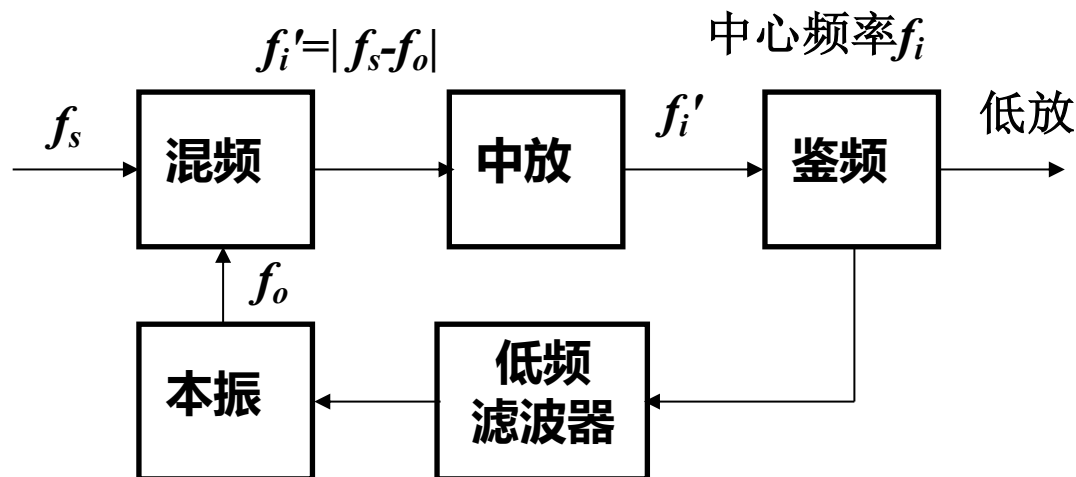


图10.2-2 调频通信机的AFC系统方框图

当鉴频器有误差电压输出，低通滤波器输出直流电压，它控制本振  $f_o$  改变，直到  $|f_i' - f_i|$  减小到等于剩余频差为止。这个固定的剩余频差称为**剩余失谐**。显然它越小越好。

## 10.2 自动频率微调



### ➤ 2. 鉴频特性曲线、调制特性曲线

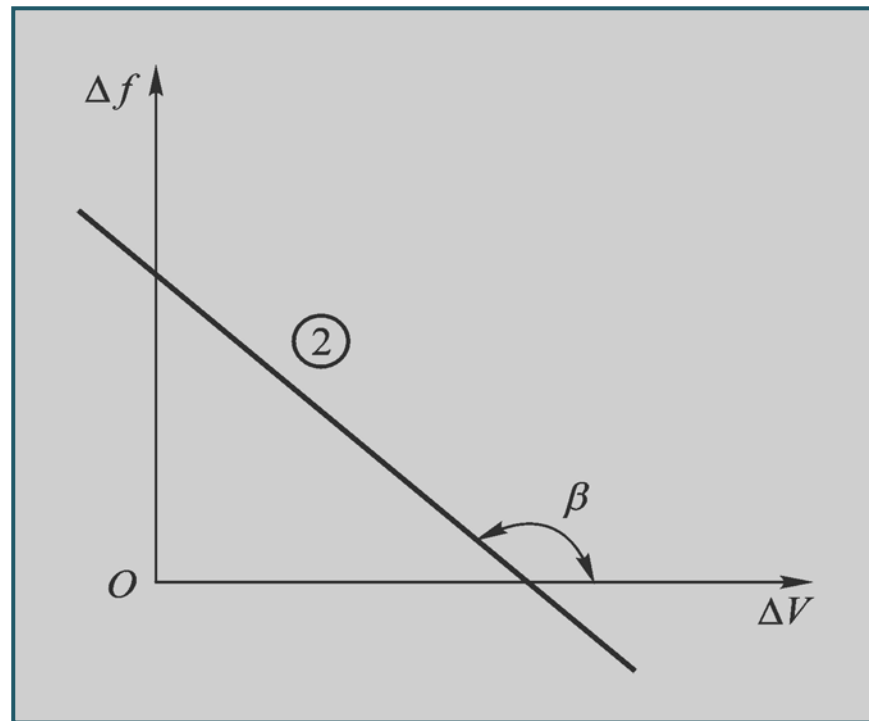
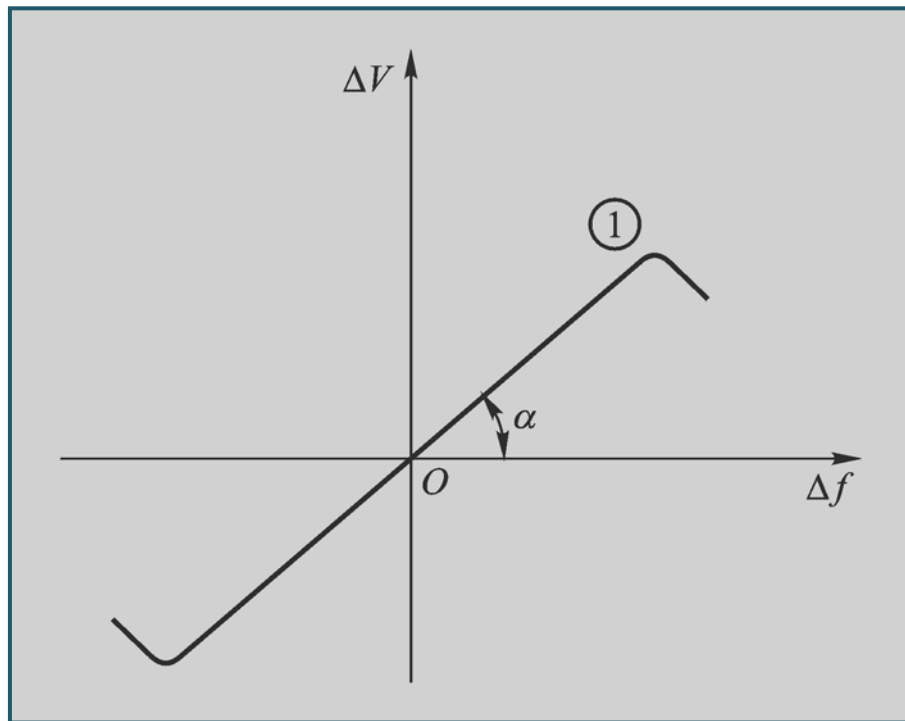


图10.2.3 鉴频特性曲线 图10.2.4 压控振荡器的调制特性曲线



## 10.2 自动频率微调

### ➤ 3. AFC的动态平衡点

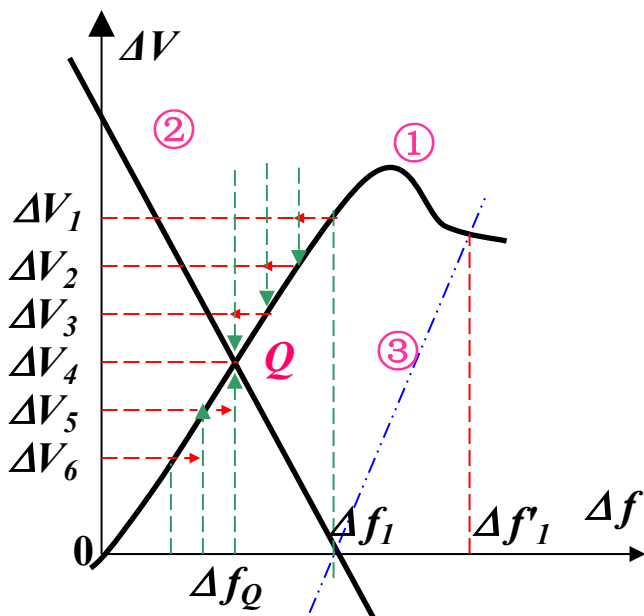


图10.2-5 用图解法确定平衡点

为了求AFC系统的动态平衡点，把上述两条曲线画在同一个坐标系中，**两条特性曲线的交点即为平衡点。**

$\Delta f_Q$  称为剩余失谐  $\Delta f_1$  称为初始失谐

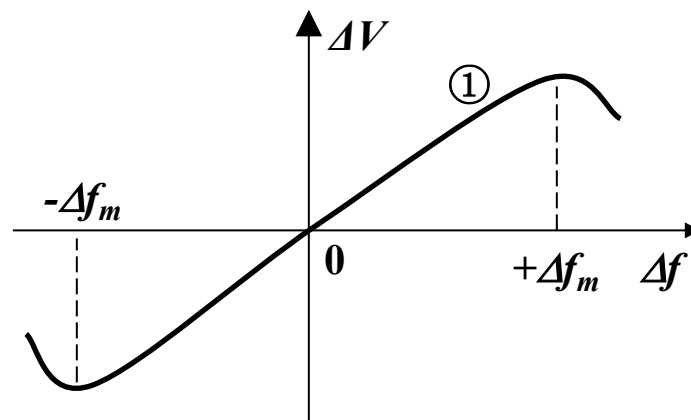


图10.2-3 鉴频特性曲线

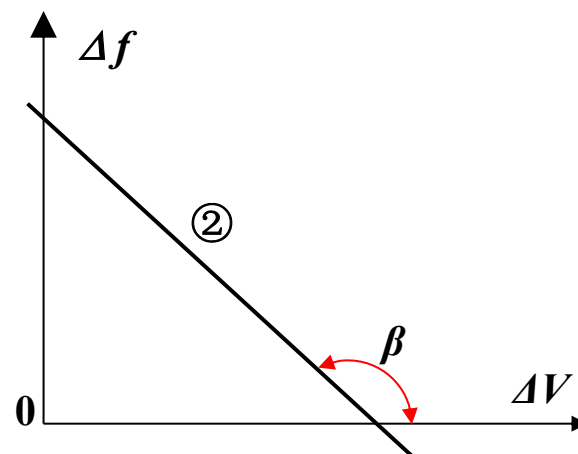


图10.2-4 调制特性曲线

## 10.2 自动频率微调



### ➤ 4. AFC的捕捉带

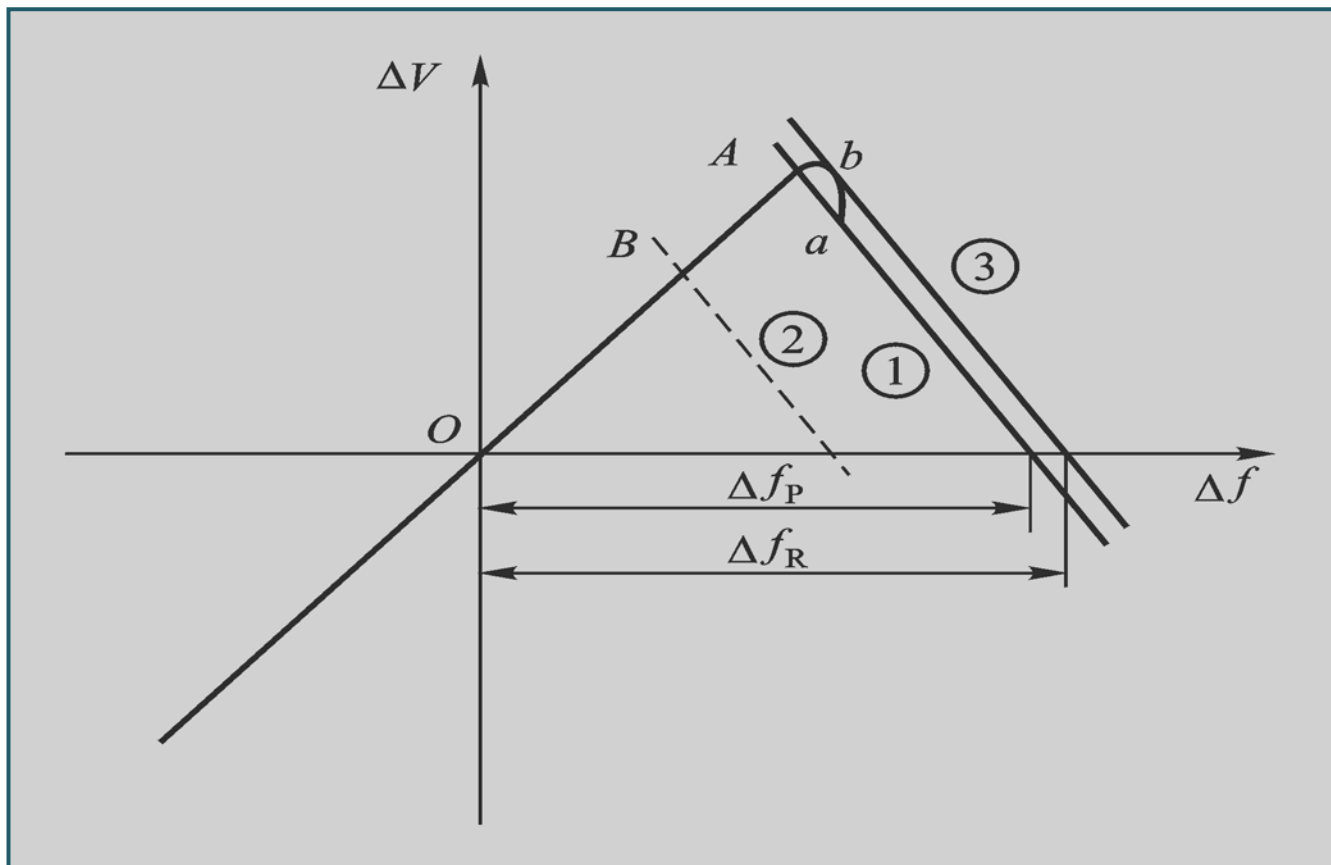


图10.2.6 捕捉带 $\Delta f_p$ 的确定



# Chapter 10 反馈控制电路

---

## ➡ 概述

### ➡ §10.1 自动增益控制 ( AGC )

### ➡ §10.2 自动频率微调 ( AFC )

### ➡ §10.3 锁相环路的基本原理

### ➡ §10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➡ §10.7 锁相环路的应用简介

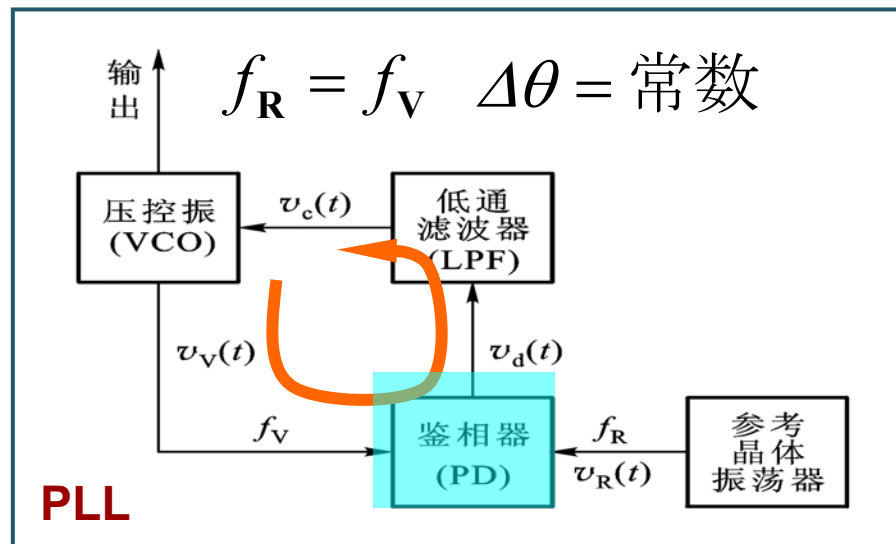
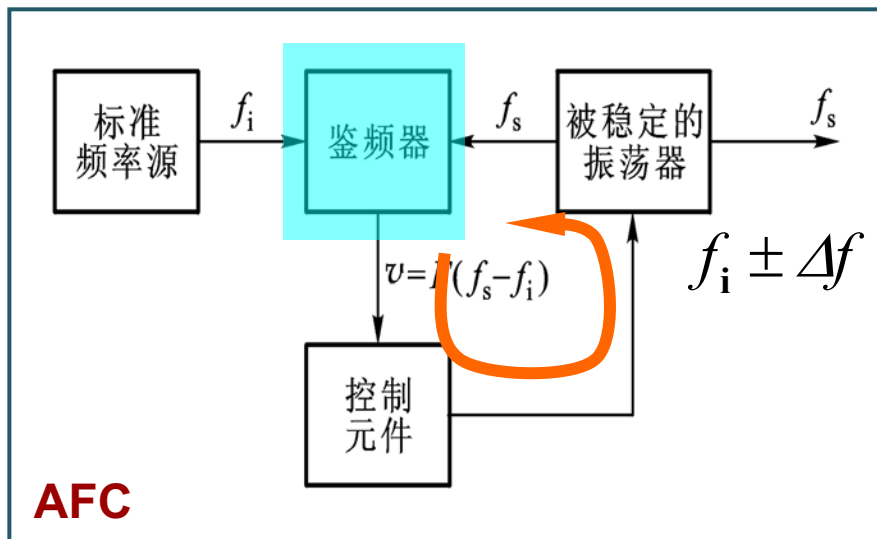
# 10.3 锁相环路的基本原理

## ➤ 1. 基本原理

– AFC和PLL电路都是以消除频率误差为目的的反馈控制电路。

**AFC电路**利用**频率误差电压**去消除频率误差，当电路达到平衡状态后，必然会有**剩余频率误差存在**，即**频率误差不可能为零**，这是AFC的固有缺点。

**锁相环**利用**相位误差**去消除频率误差，当电路达到平衡状态后，**尽管存在剩余相位误差**，但**频率误差可以降低到零**。



# 10.3 锁相环路的基本原理

## ➤ 1. 基本原理

- 锁相环是一个相位负反馈控制系统，主要包括三个基本部件：
- 鉴相器 (Phase Detector，缩写为PD)，环路滤波器 (Loop Filter，缩写为LF)，电压控制振荡器 (Voltage Controlled Oscillator，缩写为VCO)

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \theta(t)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta_0$$

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\theta_e(t)}{dt} = 0$$

$$\omega_R = \omega_V$$

当两个振荡信号频率相等时，则它们的相位差保持不变；反之，若两个振荡信号的相位差是个恒定值，则它们的频率必然相等。

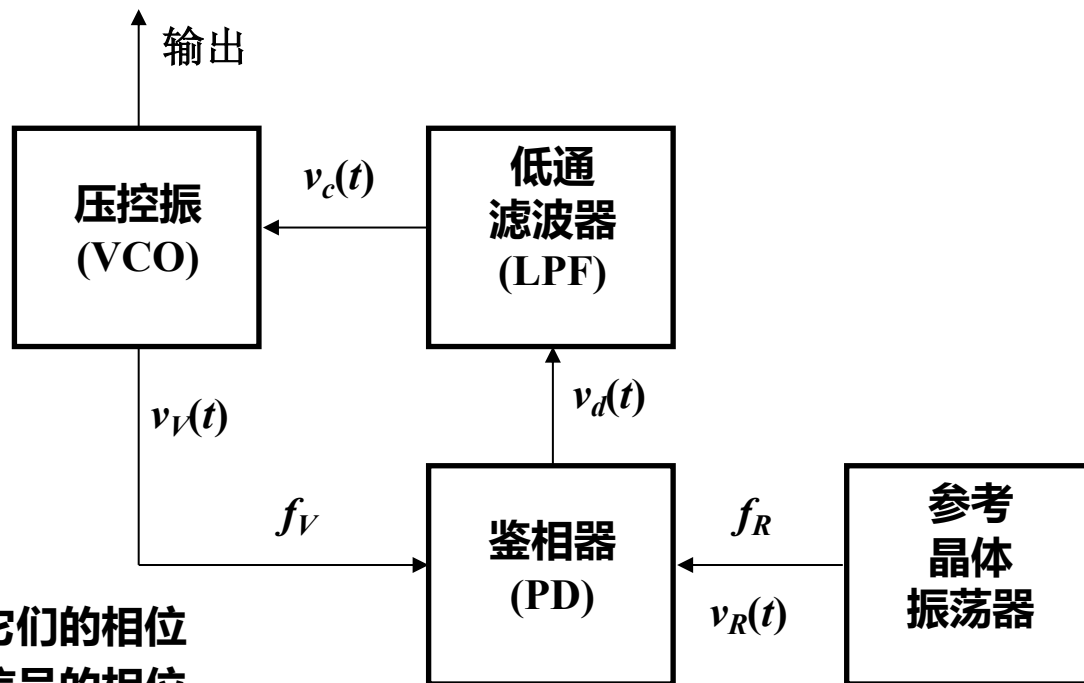


图10.3-1 锁相环路的基本方框图



# Chapter 10 反馈控制电路

---

➡ 概述

➡ §10.1 自动增益控制 ( AGC )

➡ §10.2 自动频率微调 ( AFC )

➡ §10.3 锁相环路的基本原理

➡ **§10.4 锁相环路各部件及其数学模型**

➡ §10.7 锁相环路的应用简介

# 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

## ➤ 1. 基本锁相环路

- 锁相环路（Phase locked loop缩写PLL）是一种相位自动控制电路，其作用是实现环路输出信号与输入信号之间无误差的频率跟踪，仅存在某一固定的相位差。

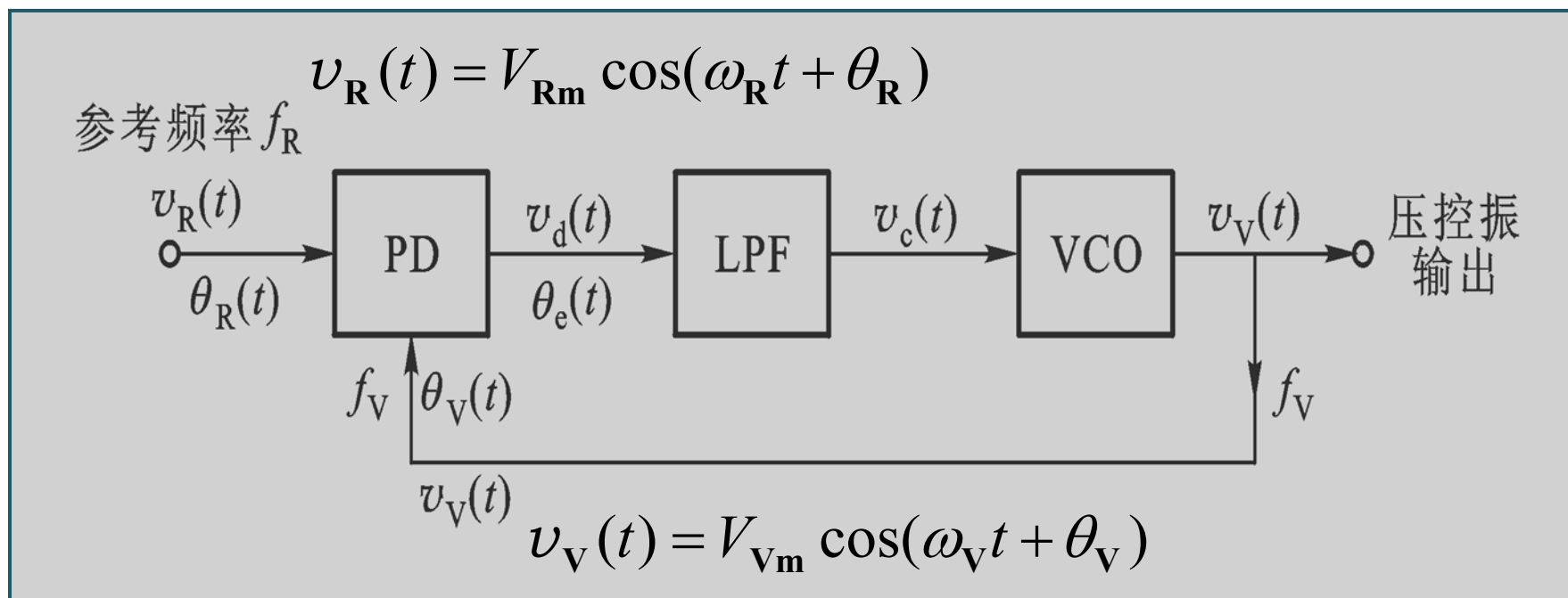


图12.4.1 基本锁相环路方框图

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 2. 鉴相器PD的数学模型

— 鉴相器的作用是对两个信号的相位进行比较。当它们之间的相位发生变化时，鉴相器即输出一个与相位检变化成正比例误差电压去控制VCO的频率，以保持 $f_V$ 与 $f_R$ 同步。

**压控振荡器信号为：**  $v_V(t) = V_{Vm} \cos[\omega_V t + \theta_V]$

**参考频率信号为：**  $v_R(t) = V_{Rm} \cos[\omega_R t + \theta_R]$

**把上两式改为：**  $v_V(t) = V_{Vm} \cos[\omega_0 t + \theta_V(t)]$

$$v_R(t) = V_{Rm} \cos[\omega_R t + \theta_R(t)]$$

**为了分析方便以VCO的固有瞬时相位 $\omega_0 t$ 作为参考，令：**

$$\theta_1(t) = [\omega_R t + \theta_R(t)] - \omega_0 t = (\omega_R - \omega_0)t + \theta_R(t) = \Delta\omega_0 t + \theta_R(t)$$

$$v_V(t) = V_{Vm} \cos[\omega_0 t + \theta_V(t)] \quad v_R(t) = V_{Rm} \cos[\omega_0 t + \theta_1(t)]$$



## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 2. 鉴相器PD的数学模型

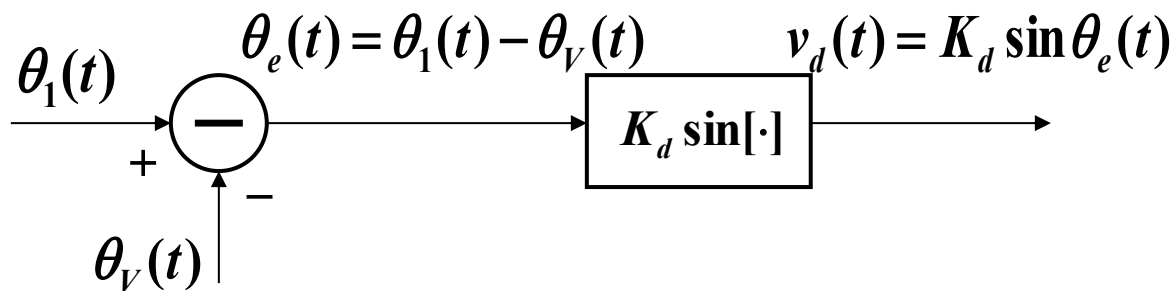


图10.4-8 鉴相器的线性化数学模型(时域)

$$v_d(t) = K_d \sin[\theta_1(t) - \theta_v(t)] = K_d \sin \theta_e(t)$$

当 $\theta_e \leq 30^\circ$ 时，鉴相特性近似线性，因此上式改写成：

$$K_d = \frac{v_d(t)}{\theta_1(t) - \theta_v(t)} = \frac{v_d(t)}{\theta_e(t)}$$

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 2. 鉴相器PD的数学模型

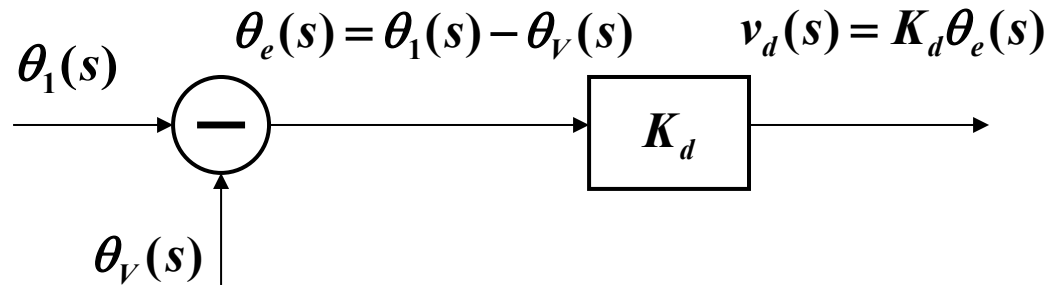


图10.4-9 鉴相器的线性化数学模型(频域)

**为了得到频域的鉴相特性，需对它进行拉氏变换得：**

$$K_d = \frac{V_d(s)}{\theta_1(s) - \theta_v(s)} = \frac{V_d(s)}{\theta_e(s)}$$

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 3. 低通滤波器LPF的数学模型

#### 1) RC滤波器

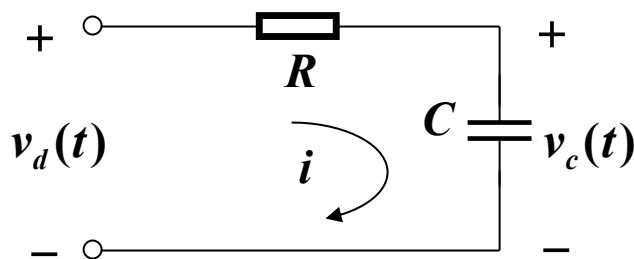


图10.4-10 一阶RC低通滤波器

系统传输函数时域形式：

$$F_1(p) = \frac{v_c(t)}{v_d(t)} = \frac{1/RC}{(1/RC) + p} = \frac{1}{1 + p\tau} \quad \tau = RC$$

系统传输函数频域形式：

$$F_1(j\omega) = \frac{V_c(j\omega)}{V_d(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad F_1(s) = \frac{V_c(s)}{V_d(s)} = \frac{1}{1 + s\tau}$$

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 3. 低通滤波器LPF的数学模型

#### 2) 无源比例积分滤波器

系统传输函数频域形式：

$$F_2(s) = \frac{V_c(s)}{V_d(s)} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{sC}}$$

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

式中： $\tau_1 = R_1C$ ;  $\tau_2 = R_2C$ .

$$F_2(j\omega) = \frac{j\omega R_2C + 1}{j\omega C(R_1 + R_2) + 1}$$

$$F_2(j\omega) \approx \frac{R_2C}{C(R_1 + R_2)} = \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$$

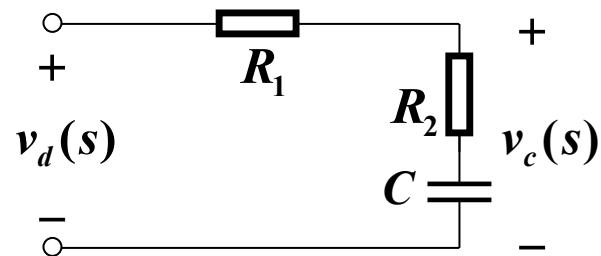


图10.4-11 超前滞后网络

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 3. 低通滤波器LPF的数学模型

#### 3) 有源比例积分滤波器

$$I_i(s) = \frac{V_d(s)}{R_1}$$

$$I_r(s) = \frac{V_c(s)}{R_2 + \frac{1}{sC}}$$

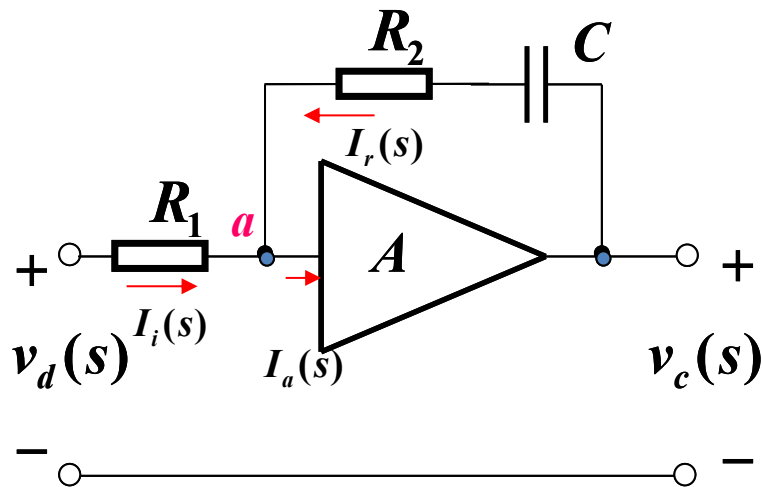


图10.4-12 有源超前滞后网络

$$I_a(s) = I_i(s) + I_r(s) = 0 \quad \text{或} \quad I_i(s) = -I_r(s)$$

系统传输函数频域形式：

$$F_3(s) = \frac{V_c(s)}{V_d(s)} = \frac{(R_2 + \frac{1}{sC})I_r}{R_1 I_i} = -\frac{s\tau_2 + 1}{s\tau_1} = -\frac{\tau_2}{\tau_1} + \frac{1}{s\tau_1}$$

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 4. 压控振荡器数学模型 (VCO)

线性区间 $\omega_V$ 与 $v_c$ 关系为：

$$\omega_V(t) = \omega_o + K_V v_c(t)$$

瞬时相位可由积分得到：

$$\int_0^t \omega_V(t) dt = \omega_o t + K_V \int_0^t v_c(t) dt$$

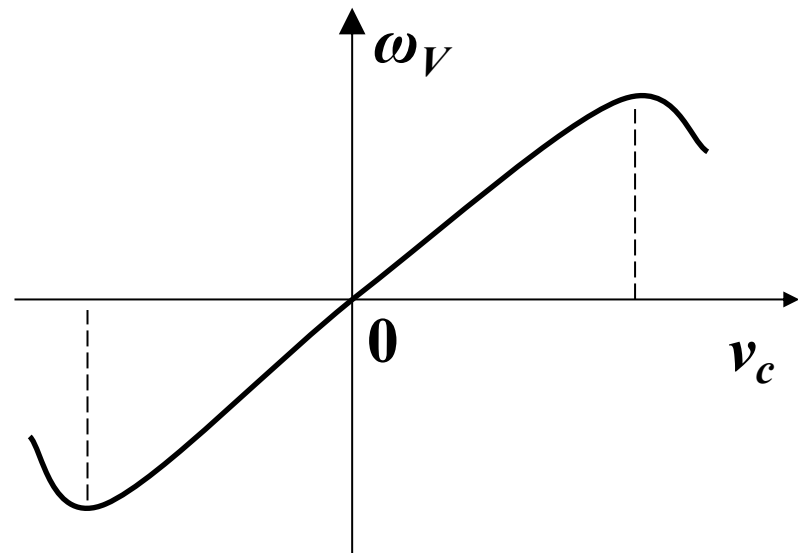


图10.4-13 VCO特性曲线

与式  $v_V(t) = V_{Vm} \cos[\omega_0 t + \theta_V(t)]$  比较得

$$\theta_V(t) = K_V \int_0^t v_c(t) dt$$

积分符号改为微分算子 $p$ 的倒数

$$\theta_V(t) = K_V \frac{1}{p} v_c(t)$$

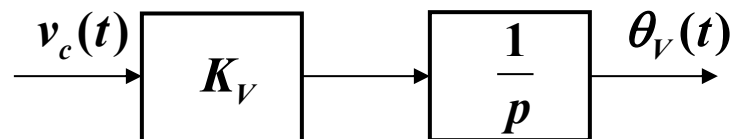


图10.4-14 压控振荡器的数学模型(时域)

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 4. 压控振荡器数学模型 (VCO)

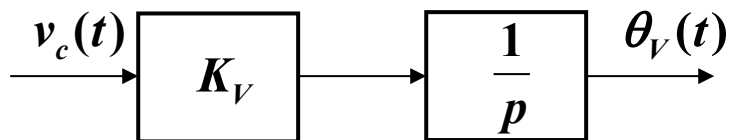


图10.4-14 压控振荡器的数学模型(时域)

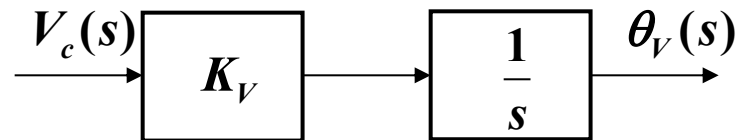


图10.4-14 压控振荡器的数学模型(频域)

积分符号改为微分算子 $p$ 的倒数

$$\theta_v(t) = K_V \frac{1}{p} v_c(t)$$

改为拉氏变换形式，则有：

$$\theta_v(s) = K_V \frac{1}{s} V_c(s)$$

由此得到VCO的传输函数为：

$$\frac{\theta_v(s)}{V_c(s)} = K_V \frac{1}{s}$$

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 5. 锁相环路的数学模型

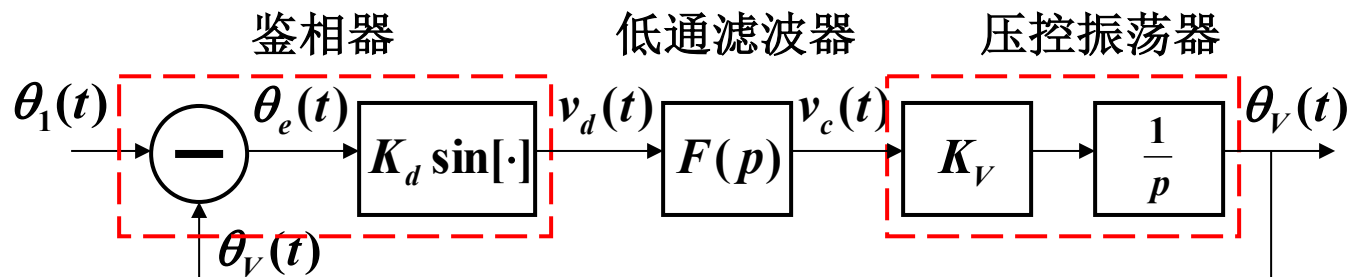


图10.4-15 锁相环路的数学模型(时域)

根据上图可得到锁相环路的基本方程为：

$$\theta_V(t) = K_d \sin[\theta_1(t) - \theta_V(t)] \cdot F(p) \cdot K_V \cdot \frac{1}{p}$$

设 $\theta_e(t) = \theta_1(t) - \theta_V(t)$ 则上式为：

$$\theta_e(t) - \theta_1(t) = -K_d \cdot K_V \sin \theta_e(t) \cdot F(p) \cdot \frac{1}{p}$$





## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 5. 锁相环路的数学模型

对上式两边进行微分得：

$$\frac{d\theta_e}{dt} + K \cdot F(p) \sin \theta_e(t) - \frac{d\theta_1}{dt} = 0$$

上式为锁相环路的非线性微分方程。  $K=K_dK_v$

第一项表示瞬时相位误差随时间的变化率,即瞬时频差;

第二项表示VCO在控制电压作用下的角频率变化,即控制频差;

第三项表示输入信号随时间的变化率,即初相频差或固有频差。

当 $|\theta_e(t)| \leq 30^\circ$ 时,  $\sin \theta_e(t)$ 可用 $\theta_e(t)$ 代替, 因此上述方程得:

$$\theta_v(t) = K \cdot [\theta_1(t) - \theta_v(t)] \cdot F(p) \cdot \frac{1}{p}$$

上式改换成频域为:  $\theta_v(s) = K \cdot [\theta_1(s) - \theta_v(s)] \cdot F(s) \cdot \frac{1}{s}$



## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 5. 锁相环路的数学模型

锁相环路的基本方程的频域形式：

$$\theta_v(s) = K \cdot [\theta_1(s) - \theta_v(s)] \cdot F(s) \cdot \frac{1}{s}$$

整个锁相环路的闭环传输函数：

$$H(s) = \frac{\theta_v(s)}{\theta_1(s)} = \frac{KF(s)}{s + KF(s)} \quad (\text{基本公式一})$$

相角  $\theta_e(s) = \theta_1(s) - \theta_v(s)$  表示误差，因此误差传输函数为：

$$H_e(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_1(s)} = 1 - \frac{\theta_v(s)}{\theta_1(s)} = 1 - H(s) = \frac{s}{s + KF(s)} \quad (\text{基本公式二})$$

基本公式二表示在闭环条件下  $\theta_1(s)$  与  $\theta_e(s)$  之间的关系。

锁相环路的开环传输函数：

$$H_o(s) = \frac{\theta_v(s)}{\theta_e(s)} = \frac{KF(s)}{s} \quad (\text{基本公式三})$$

基本公式三为开环条件下误差信号  $\theta_e(s)$  沿环路传输一周的函数。

## 10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➤ 5. 锁相环路的数学模型

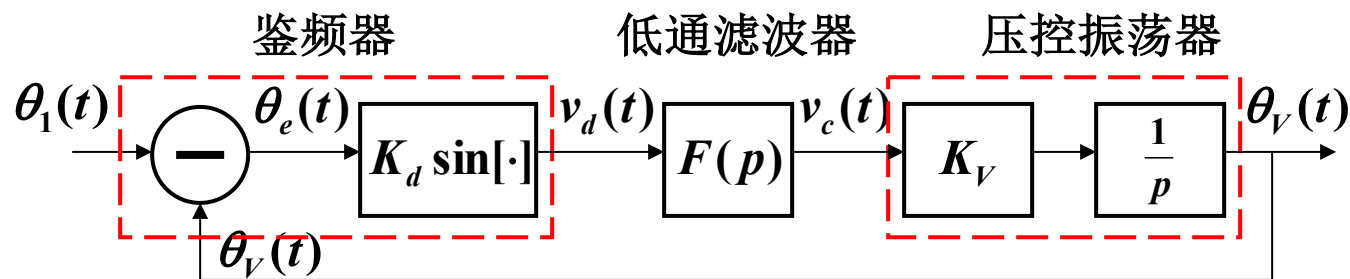


图10.4-15 锁相环路的数学模型(时域)

**总结：**1) 锁相环路的闭环传输函数；2) 锁相环路的误差传输函数；3) 锁相环路的开环传输函数。

$$H(s) = \frac{\theta_V(s)}{\theta_1(s)} = \frac{KF(s)}{s + KF(s)} \quad H_o(s) = \frac{\theta_V(s)}{\theta_e(s)} = \frac{KF(s)}{s}$$

$$H_e(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_1(s)} = 1 - \frac{\theta_V(s)}{\theta_1(s)} = 1 - H(s) = \frac{s}{s + KF(s)}$$



# Chapter 10 反馈控制电路

## ➡ 概述

### ➡ §10.1 自动增益控制 ( AGC )

### ➡ §10.2 自动频率微调 ( AFC )

### ➡ §10.3 锁相环路的基本原理

### ➡ §10.4 锁相环路各部件及其数学模型

### ➡ §10.7 锁相环路的应用简介

## 10.5 锁相环路的应用



### ➤ 1. L562 窄带跟踪接收机

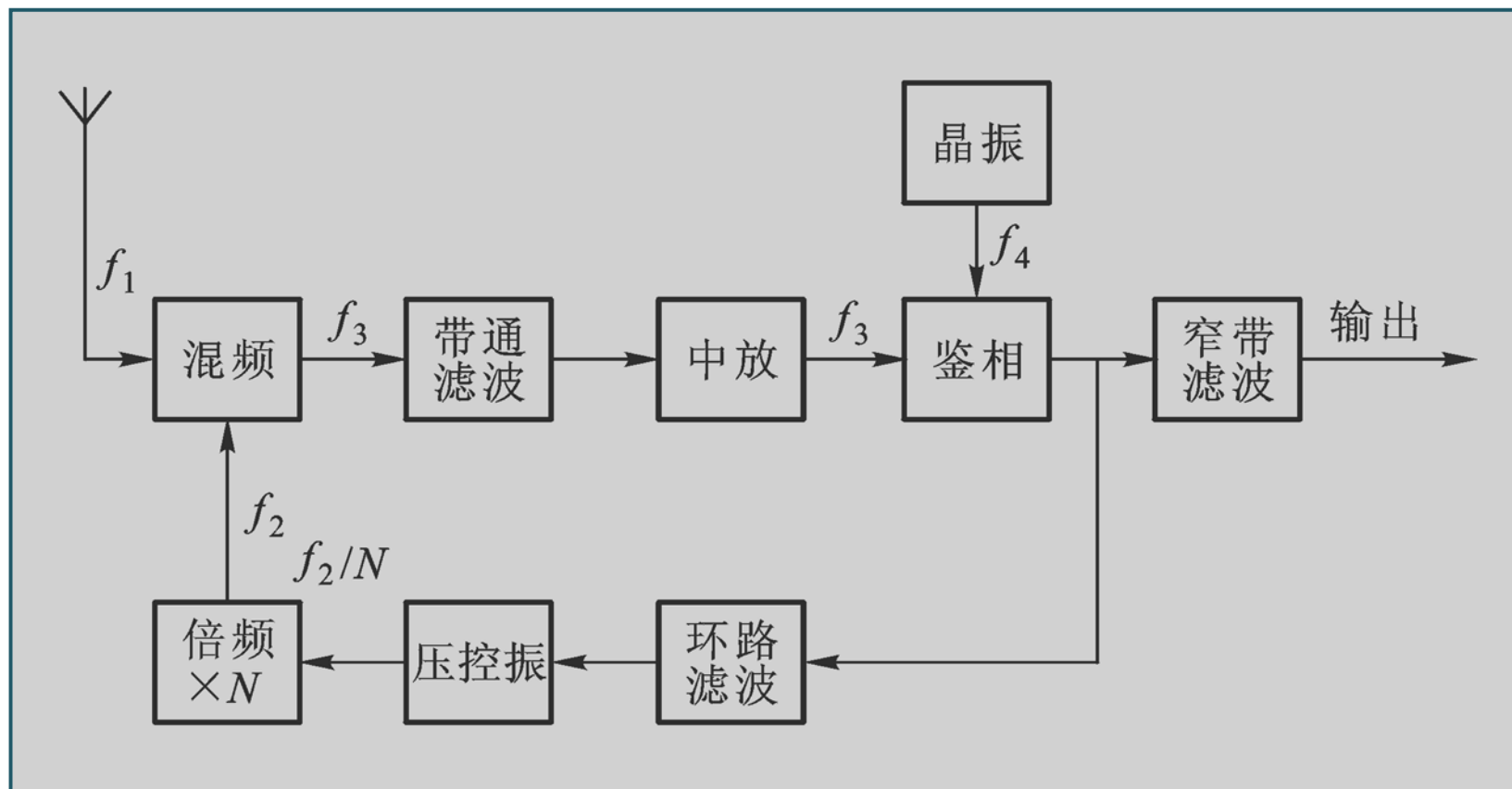


图10.7.1 L562窄带跟踪接收机方框图

## 10.5 锁相环路的应用



### ➤ 2. 锁相环路调频器

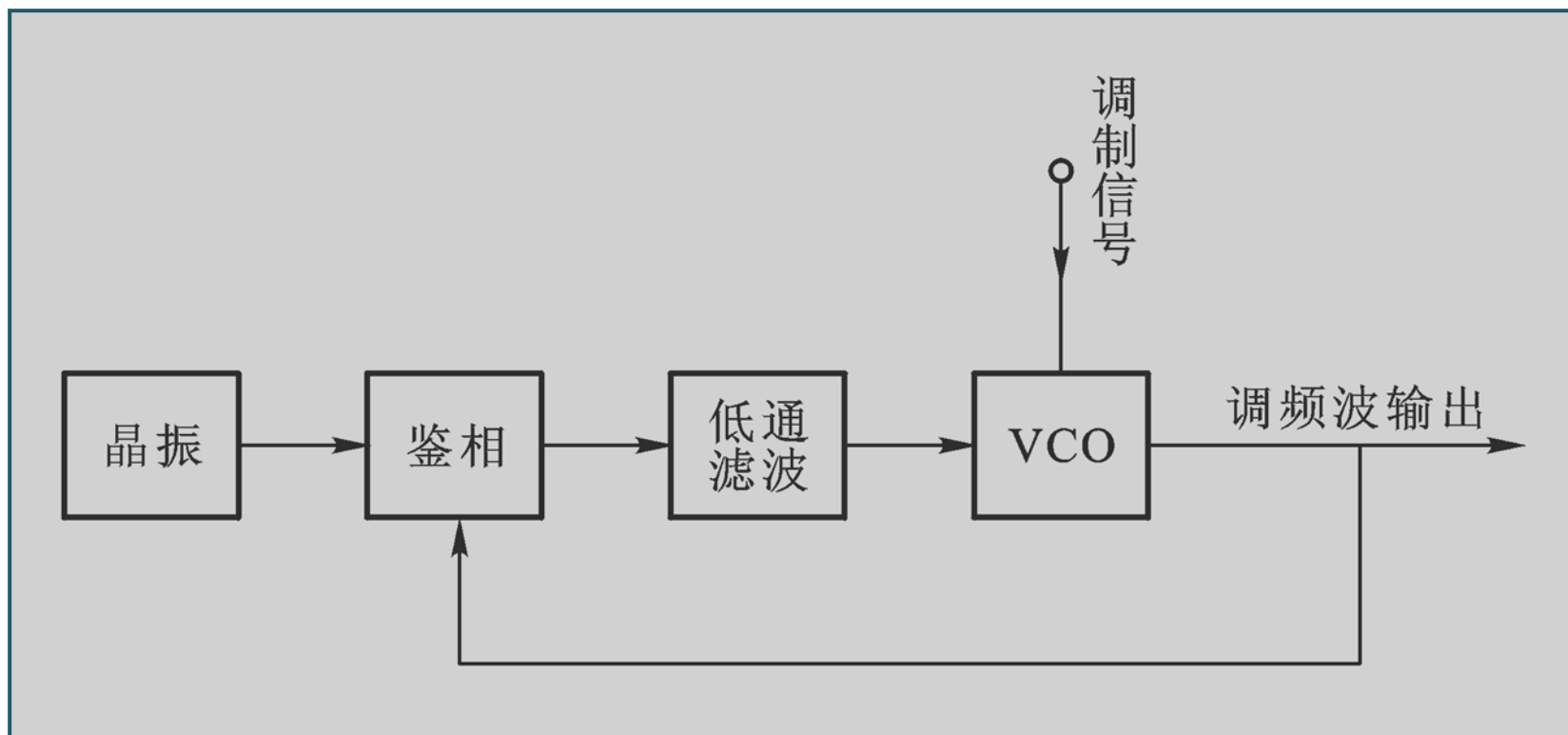


图10.7.2 锁相环路调频器方框图

## 10.5 锁相环路的应用



### ➤ 3. 锁相环路鉴频器

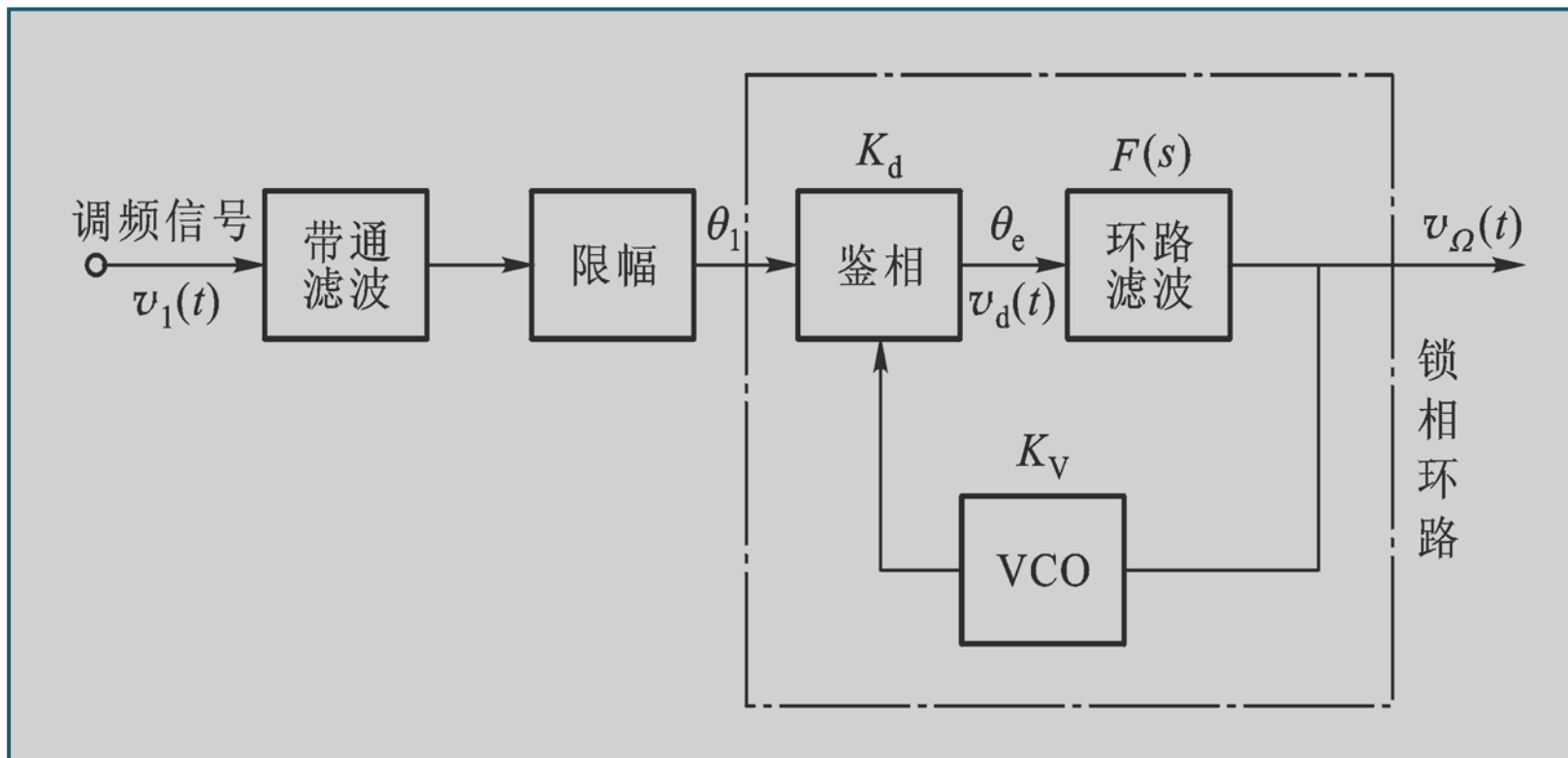
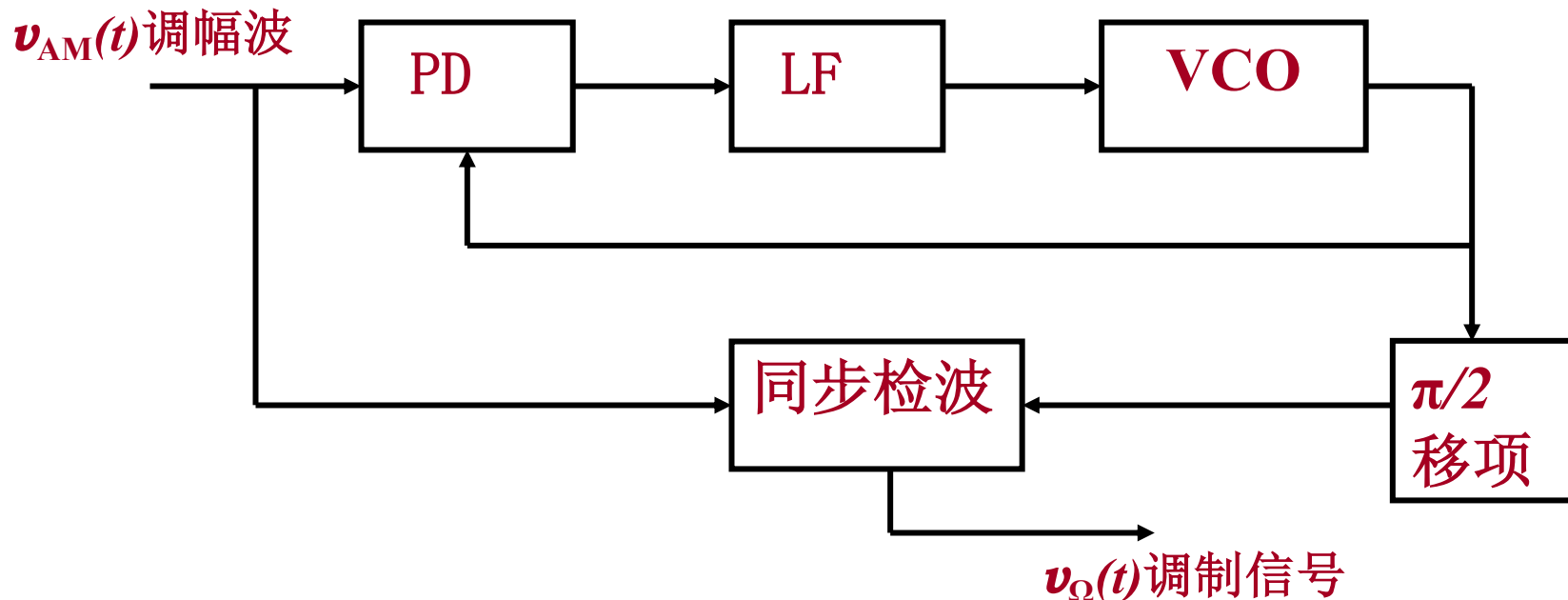


图10.7.3 锁相环路鉴频器方框图

## 10.5 锁相环路的应用



### ➤ 4. 锁相环路调幅波解调

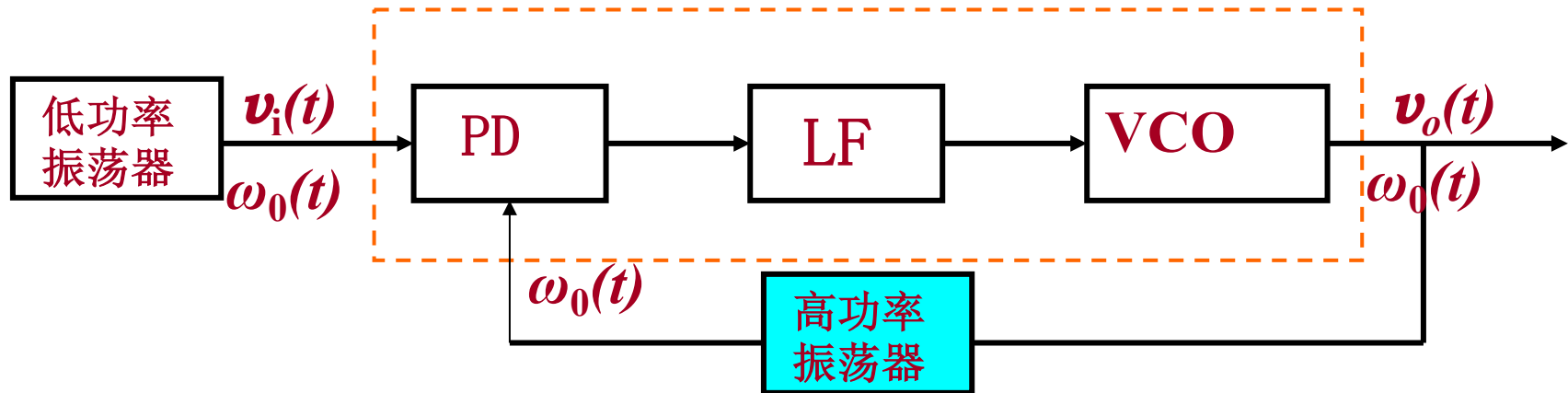


用锁相环路对调幅波进行解调，实际上是利用锁相环路供给一个稳定度高的载波信号电压，与调幅波在非线性器件中进行乘积检波，输出即可获得原调制信号。



## 10.5 锁相环路的应用

### ➤ 5. 锁相环路振荡器的稳定与提纯



一个振荡器工作在非常低的电平下，它具有较好的长期稳定度；另一个振荡器工作于较高的电平下，短期稳定度好。将后一振荡器锁定在前一振荡器上，就可以获得长期与短期稳定度都很好的振荡源。

## 10.5 锁相环路的应用

### ➤ 5. 锁相环路倍频器与分频器

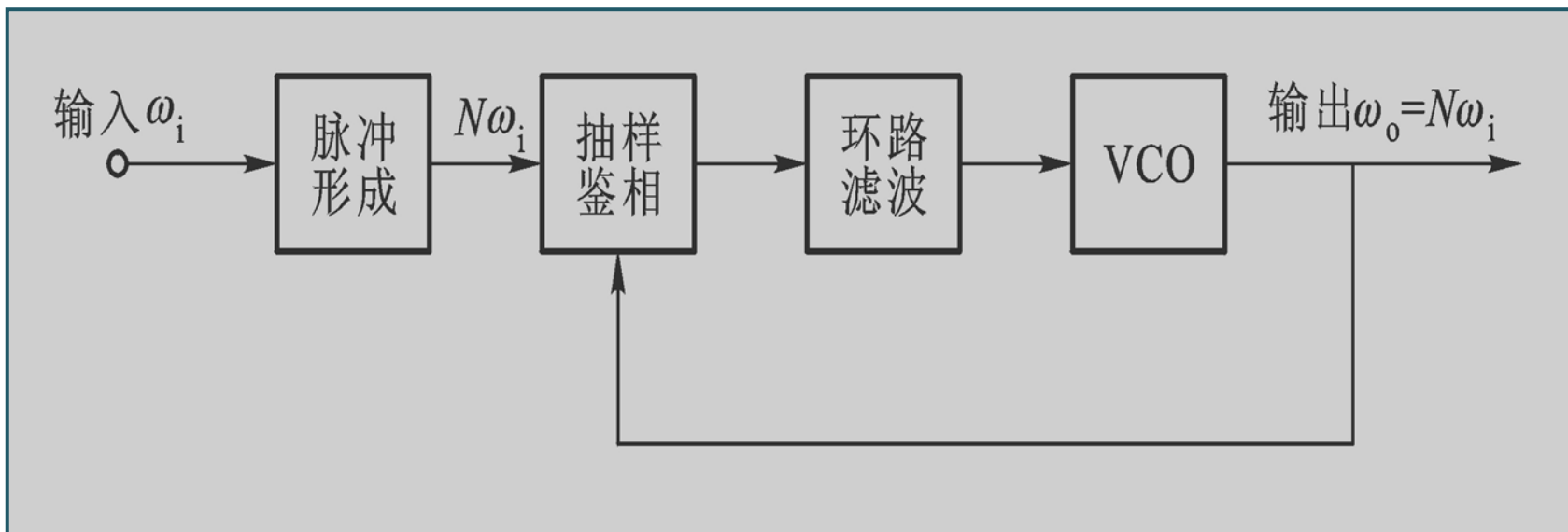


图10.7.3 脉冲锁相倍频器

若将一个振荡器通过锁相环路锁定在它的谐波或分谐波上，就可以组成倍频器或分频器。

## 10.5 锁相环路的应用

### ➤ 5. 锁相环路倍频器与分频器

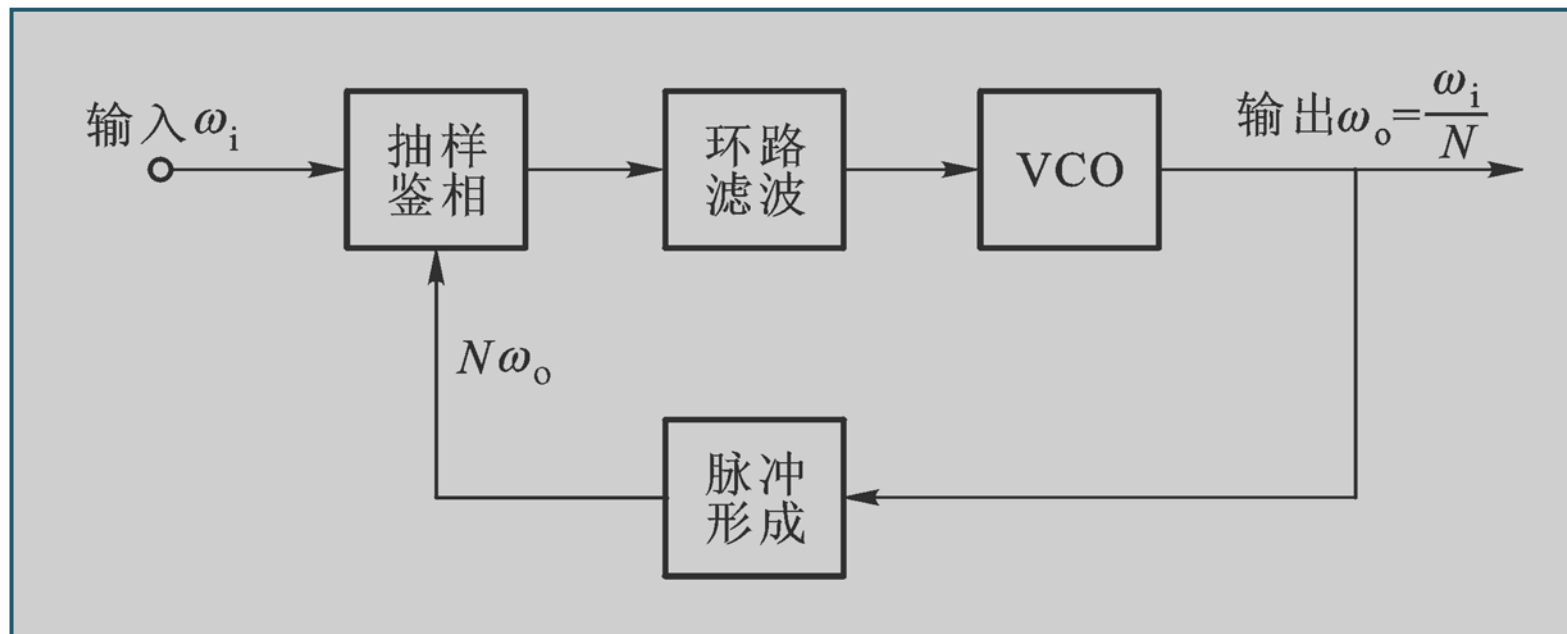


图10.7.3 脉冲锁相分频器

若将一个振荡器通过锁相环路锁定在它的谐波或分谐波上，就可以组成倍频器或分频器。



CEC

Ch11

# 频率合成技术

## Frequency Synthesis Technology

2023年6月10日

学而不厌 诲人不倦



# Ch11 频率合成技术

## ➤ 1. 频率合成技术概述

- **频率直接合成法**：将两个基准频率直接在混频器中进行混频，以获得所需的新频率。**基准频率由石英晶体振荡器产生。**
- 如果是用多个石英晶体产生基准频率，因而产生混频的两个基准频率相互之间是独立的，就叫**非相干式直接合成**。
- 如果只用一块石英晶体作为标准频率源，因而产生混频的两个基准频率（通过倍频器产生的）彼此之间是相关的，就叫**相干式直接合成**。
- **频率间接合成法**：利用**锁相环路**，控制VCO输出频率与参考晶振频率或其某次谐波相同。主要包括：脉冲控制锁相法、模拟锁相环路法与**数字锁相环路法**。

# Ch11 频率合成技术

## ➤ 2. 非相干式直接频率合成

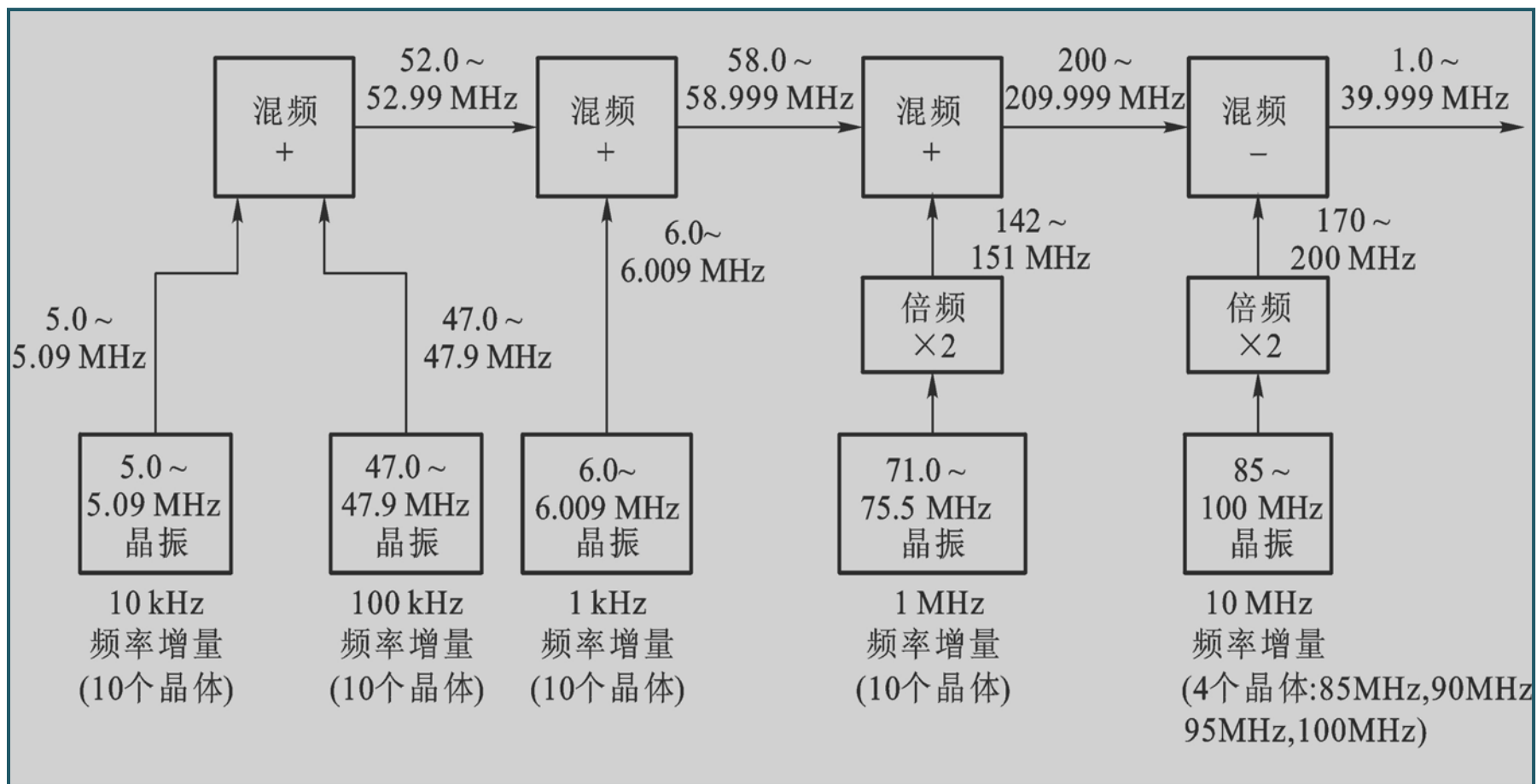


图11.2.2 非相干式直接合成器方框图举例

# Ch11 频率合成技术

## ➤ 3. 相干式直接频率合成

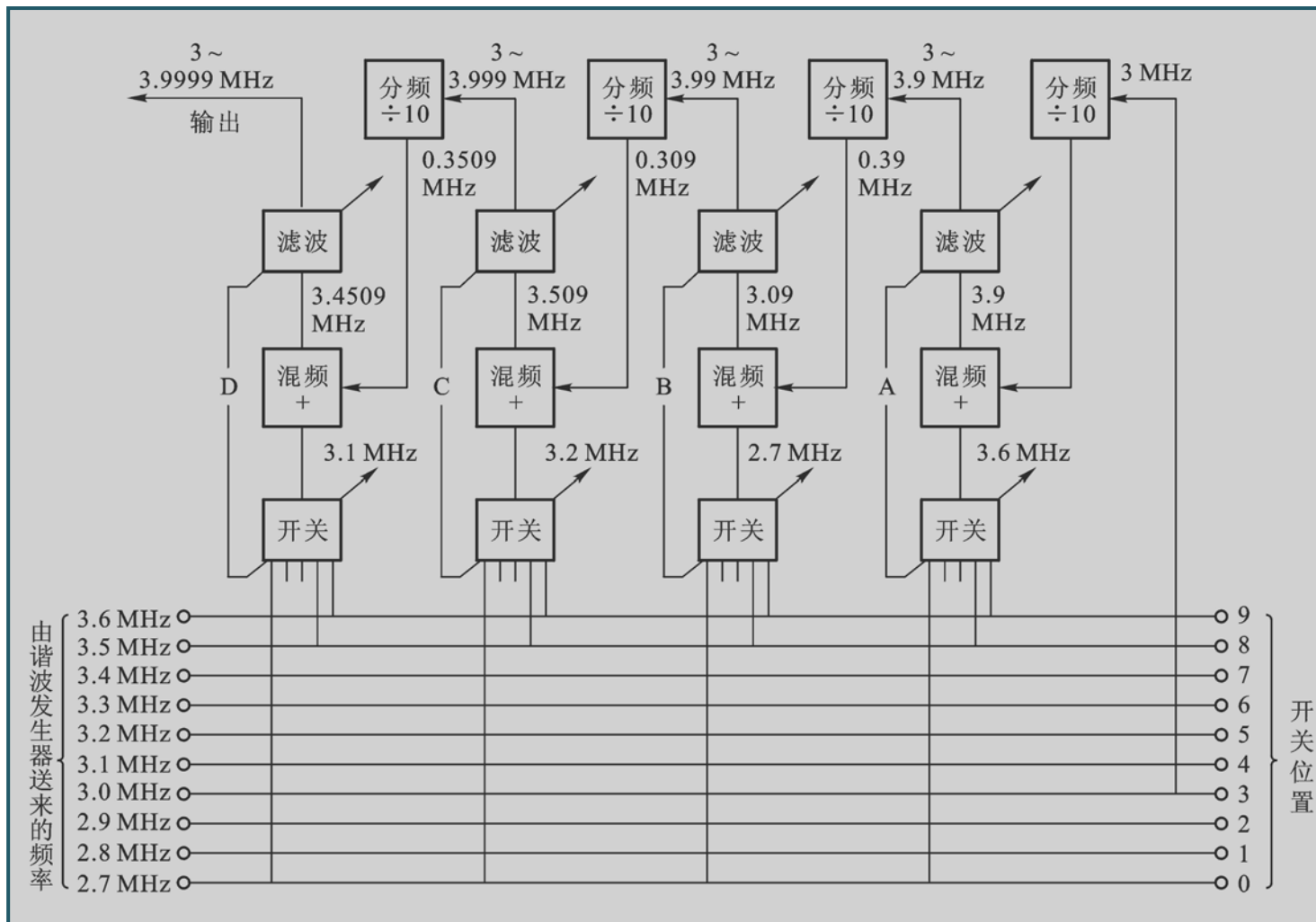
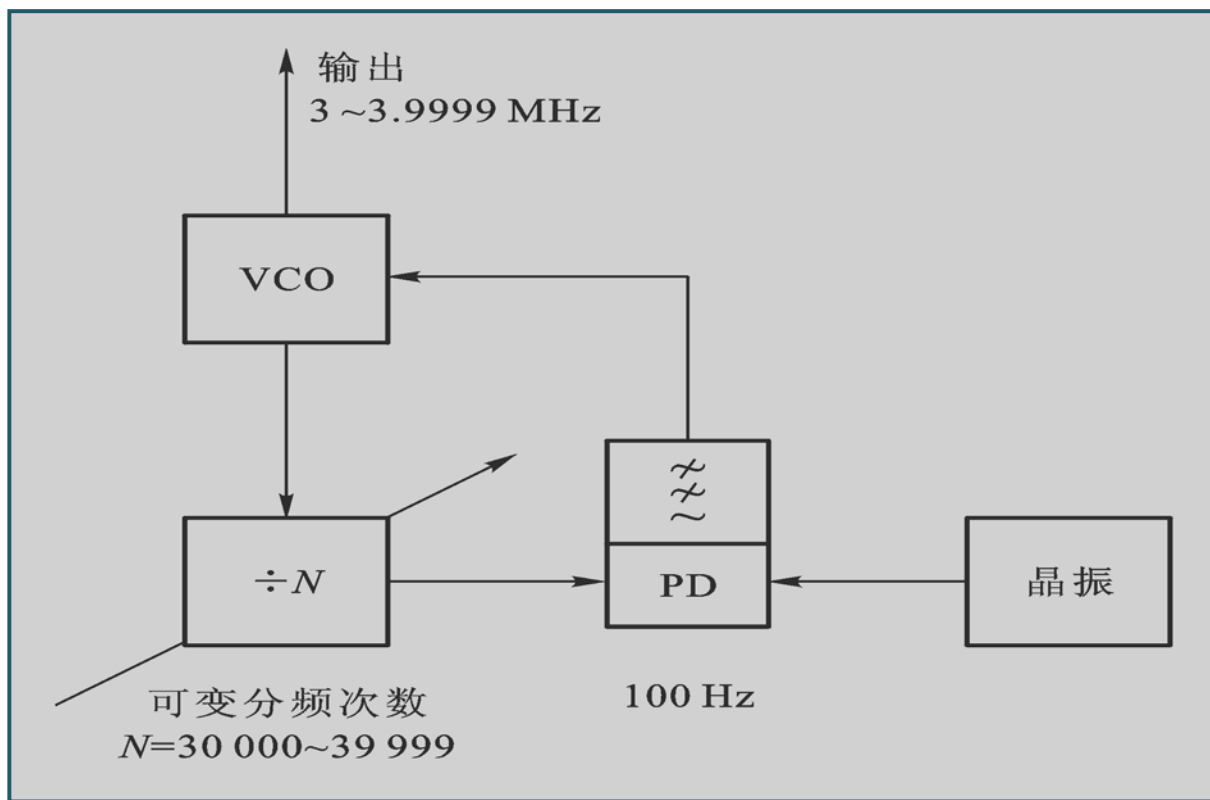


图11.2.3 相干式直接合成器举例

# Ch11 频率合成技术

## ➤4. 数字锁相环路频率合成技术

—应用数字逻辑电路把VCO频率一次或多次降低至鉴相器频率上，再与参考频率在鉴相电路中进行比较，所产生的误差信号用来控制VCO的频率，使之锁定在参考频率的稳定度上。





# Ch11 频率合成技术

## ➤ 4. 数字锁相环路频率合成技术

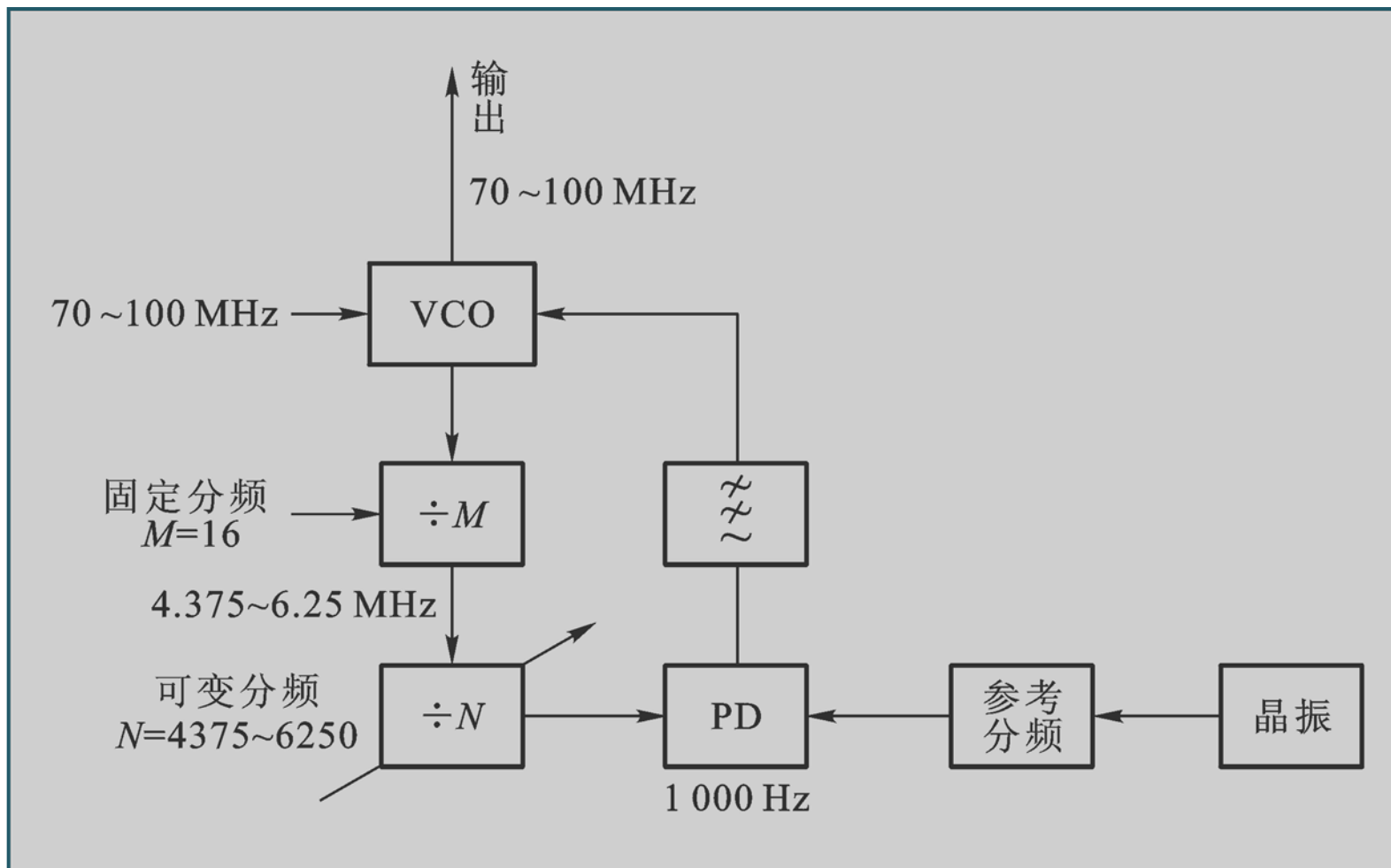
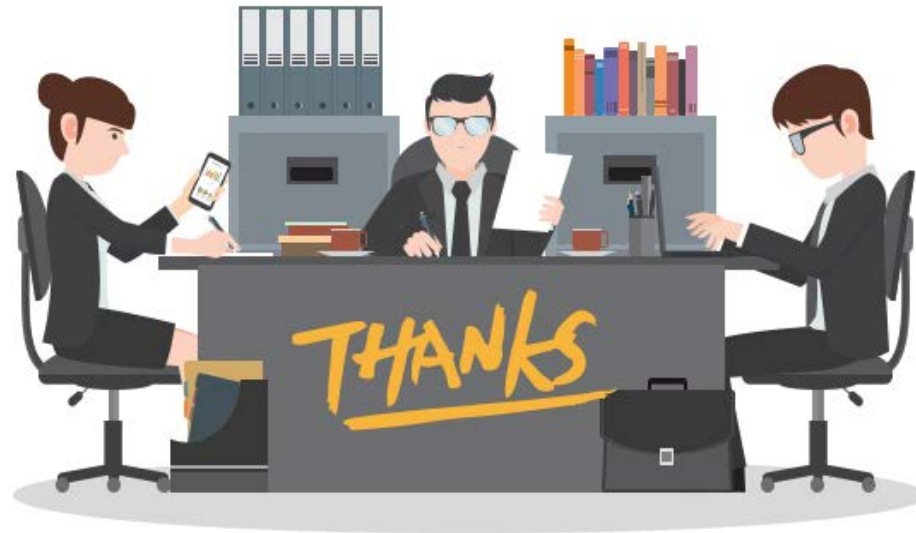


图11.3.7 压控振荡频率>10MHz时的除法降频方案



## 本章小结

1. 掌握AGC、AFC、APC/PLL的基本原理和框图。
2. 理解锁相环路的数学模型。
3. 理解锁相环路的应用。
4. 理解频率直接合成技术：非相干式和相干式直接合成器。
5. 掌握锁相环路实现频率合成的基本原理框图。



*Thank You !*

Q & A