

第八章 锁相环路

锁相环路及其应用





本章内容



[返回总目录](#)

8.1 锁相环路

8.2 集成锁相环芯片

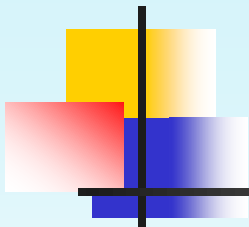
8.3 锁相环路的应用



本章重点与难点

(一) 本章重点

1. 锁相环的构成及工作原理;
2. 锁相环路各组成部分的分析; 锁相环路的数学模型;
3. 环路的捕获、锁定和跟踪、环路的同步带和捕捉带;
4. **CD4046 CMOS**单片锁相环路逻辑图和引出端功能图以及使用说明;
5. 锁相环路的特性以及应用。



(二) 本章难点

1. 锁相环的工作原理;
2. 锁相环路的数学模型。



相关英文词汇

- 1) Phase Locked Loop 锁相环
- 2) Low Pass Filter 低通滤波器
- 3) Voltage Controlled Oscillator
压控振荡器
- 4) Phase Detecting 鉴相器

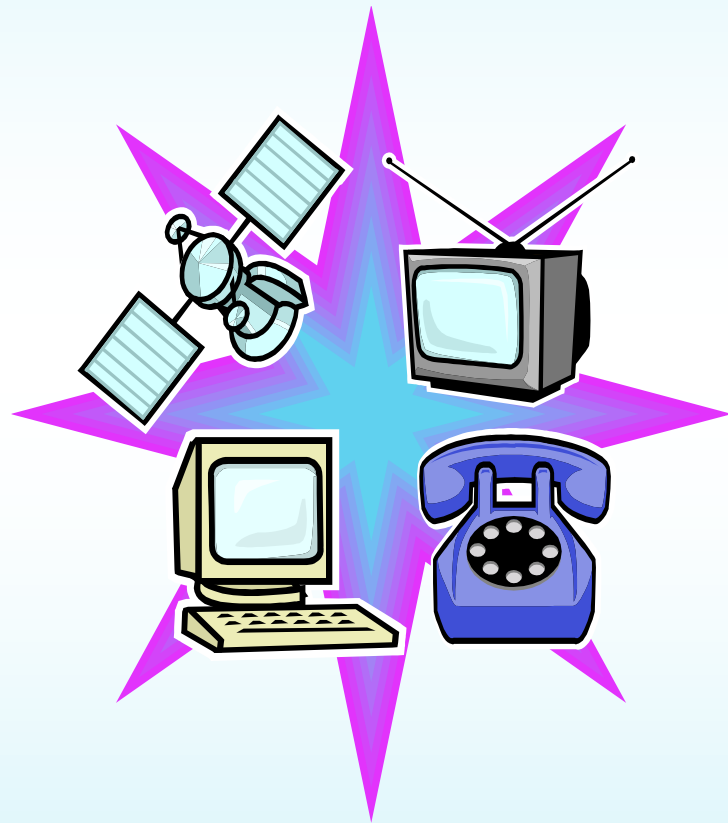


8.1 锁相环路 (PLL)

- 一、概述
- 二、基本锁相环的构成
- 三、锁相环路的基本工作原理
- 四、环路的捕获、锁定和跟踪
- 五、环路的同步带与捕捉带
- 六、锁相环路各组成部分的分析
- 七、锁相环路的数学模型

一、概述

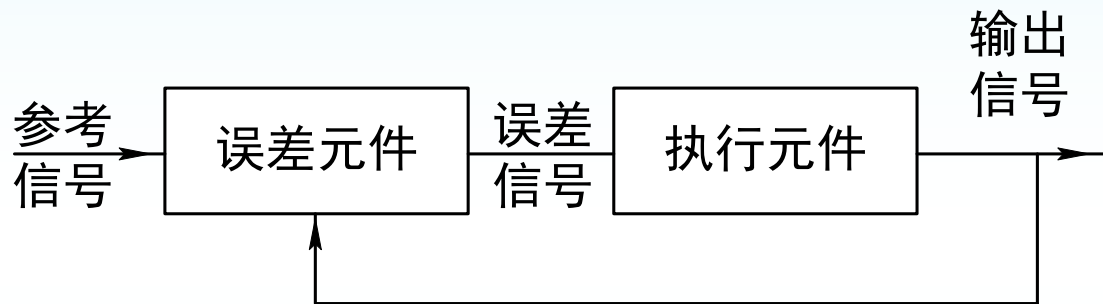
在无线电技术中，为了改善电子设备的性能，广泛采用各种的反馈控制电路。常用的有锁相环路（PLL）即自动相位控制电路，自动增益（AGC）电路以及自动频率控制（AFC）电路。



锁相环路的组成和分类

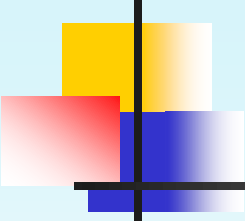
一、反馈控制电路的基本原理

反馈控制电路由误差元件和执行元件组成。



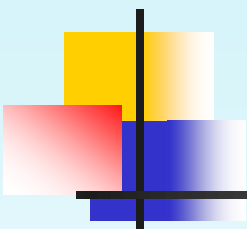
根据需要进行比较和调节的参量不同，反馈控制电路可分为：

1. 自动增益控制电路（AGC）
2. 自动频率控制电路（AFC）
3. 自动相位控制电路（APC），又称锁相环路（PLL）

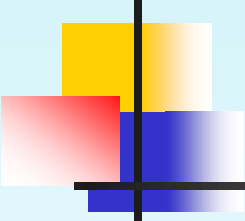


锁相环路早期应用于电视机的同步系统，使电视图像的同步性能得到了很大的改善。

上世纪50年代后期，随着空间科学的发展，**锁相环(PLL)在跟踪和接收来自宇宙飞行器(人造卫星、宇宙飞船)的微弱信号方面显示出了很大的优越性。**普通的超外差接收机，频带做得相当宽、噪声大，同时信噪比也大大降低。

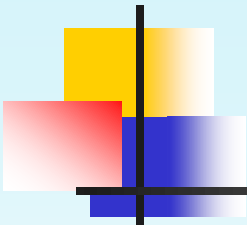


- 而在锁相环接收机中，由于中频信号可以锁定，所以频带可以做得很窄（几十赫兹以下），则带宽可以下降很多。所以输出信噪比也就大大提高了。只有采用锁相环路（PLL）做成的窄带锁相跟踪接收机才能把深埋在噪声中的信号提取出来。



锁相环路——是一个相位误差控制系统，是将参考信号与输出信号之间的相位进行比较，产生相位误差电压来调整输出信号的相位，以达到与参考信号同频的目的。

随着电子技术的发展，集成锁相环的出现，各种电子系统中锁相环路的用途极为广泛。例如，锁相接收机、微波锁相振荡源、锁相调频器、锁相鉴频器等等，在锁相频率合成器中，锁相环路具有稳频作用，能够完成频率的加、减、乘、除等运算，可以作为频率的加减器、倍频器、分频器等使用。

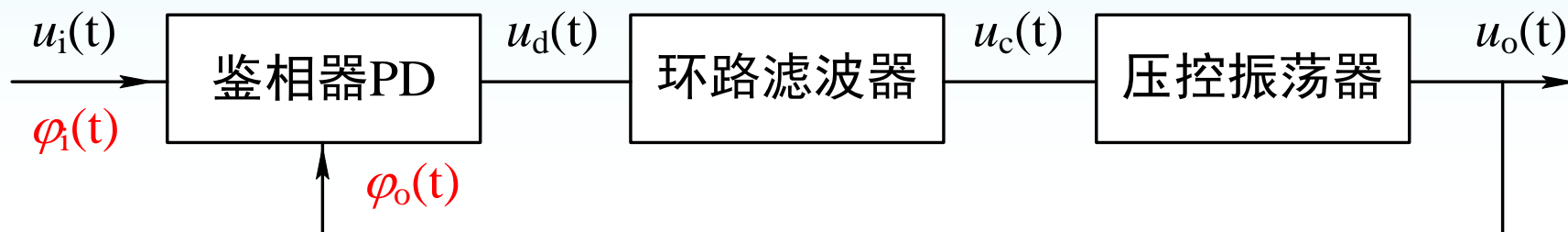


锁相环路不仅能完成频率合成的任务，而且还具有优良的滤波性能。这种滤波性能不仅能够得到很窄的通频带，而且其中心频率又可变。这些性能是普通的滤波器所不能比拟的。

目前在比较先进的模拟和数字通信系统中大都使用了锁相环路。煤矿中目前主要开始应用的是锁相环调制器和解调器。

二、基本锁相环的构成

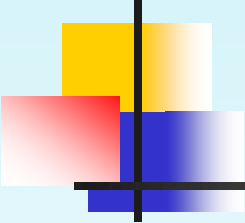
基本的锁相环路是由鉴相器（PD）、环路滤波器（LF）和压控振荡器（VCO）三部分组成：



鉴相器： $u_d(t) = K_d[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)] = K_d\varphi(t)$

压控振荡器： $\omega(t) = \omega_0 + K_\omega u_c(t)$

式中， ω_0 为压控振荡器的中心频率。

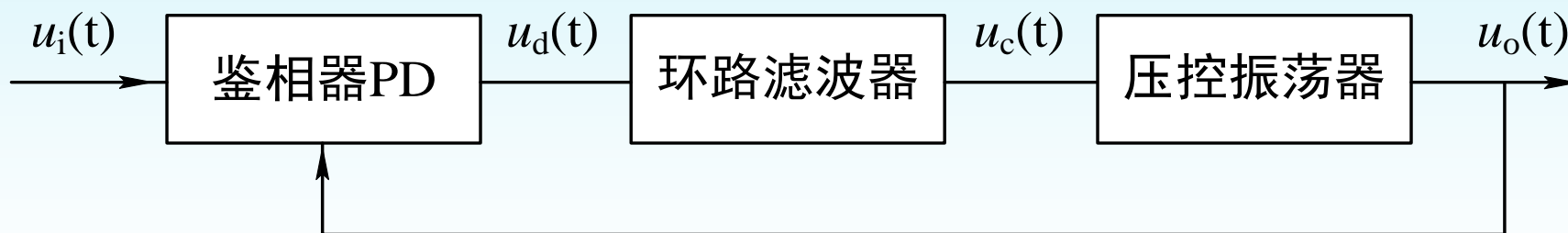


鉴相器是相位比较器，用来比较输入信号 $u_i(t)$ 与压控振荡器输出信号 $u_o(t)$ 的相位，输出电压对应于这两个信号相位差的函数。

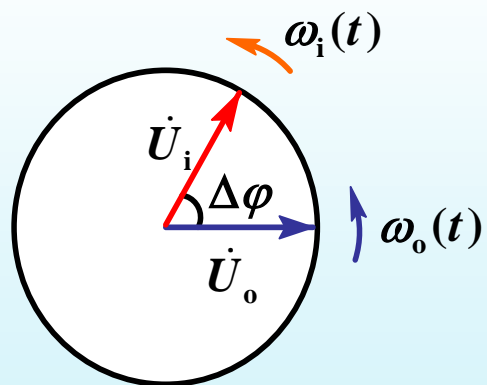
环路滤波器是滤除 $u_d(t)$ 高频分量及噪声，以保证环路所要求的性能。

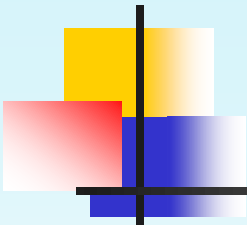
压控振荡器受环路滤波器输出电压 $u_c(t)$ 的控制，使振荡频率向输入信号的频率靠拢，直至两者的频率相同，使得VCO输出信号的相位和输入信号的相位保持某种特定的关系，达到相位锁定的目的。

三、锁相环的基本原理



利用输入信号和压控振荡器输出信号之间的相位误差去消除频率误差。当电路达到平衡状态之后，虽然有剩余相位误差存在，但频率误差可以消除，从而实现无误差的频率跟踪。

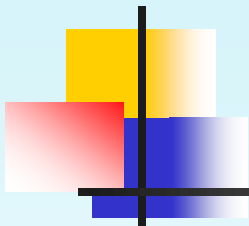




设输入信号和本振信号（压控振输出信号）分别是正弦和余弦信号，它们在鉴相器内进行比较，鉴相器的输出是一个与两者的相位差成比例的电压，一般把它称为**误差电压**。环路低通滤波器滤除鉴相器中的高频分量，然后把输出电压加到VCO的输入端，VCO送出的本振信号频率随着输入电压的变化而变化。



锁相环路的基本原理



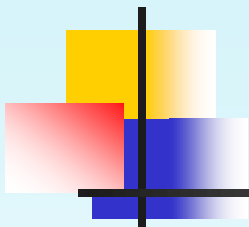
如果二者频率不一致，则鉴相器的输出将产生低频变化分量并通过低通滤波器使VCO的频率发生变化。最后如果本振信号的频率和输入信号的频率保持一致，两者的相位差保持某一恒定值，则鉴相器的输出将是一个恒定直流电压，环路低通滤波器的输出也是一个直流电压，这时，环路处于“锁定状态”。



四、 环路的捕获、锁定和跟踪

1. 环路锁定

如果环路有一个输入信号 $u(t)$ ，开始时输入频率总是不等于VCO的自由振荡频率，即 $\omega_i \neq \omega_0$ 。如果 ω_i 与 ω_0 相差不大，在适当的范围内，鉴相器输出一误差电压，经环路滤波器变换后控制VCO的频率，使其输出频率变化接近到 ω_i ， $\omega_i = \omega_0$ ，而且两信号的相位差为常数。

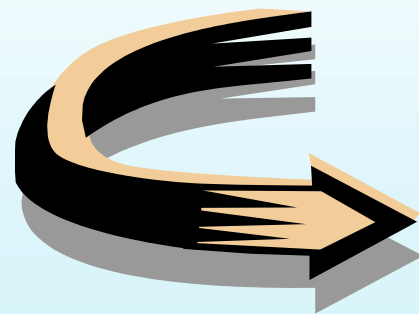


2. 环路捕获

从信号加入到环路锁定，叫环路的捕获过程。

3. 环路跟踪

环路锁定以后，这时环路进入锁定状态。一旦入锁以后，压控频率就等于基准频率，且 f_o 随 f_i 而变化，这就称为跟踪。





4. 判断环路是否锁定的方法

1) 在有双踪示波器的情况下

开始，环路处于失锁状态，加大输入信号频率，用双踪示波器观察压控振荡器的输出信号和环路的输入信号，当两个信号由不同步变成同步，且 $f_i=f_o$ 时，表示环路已经进入锁定状态。

2) 单踪——普通示波器

在没有双踪示波器的情况下，在单踪示波器上可以用李沙育图形来判定环路是否处于锁定状态。把鉴相器的输入信号 $u_i(t)$ 加到示波器的垂直偏转板上，把 $u_o(t)$ 加到水平偏转板（或者相反），并使两信号幅度相等。如果环路已锁定，且在理想情况下，即李沙育图形应是一个圆。

李沙育图形

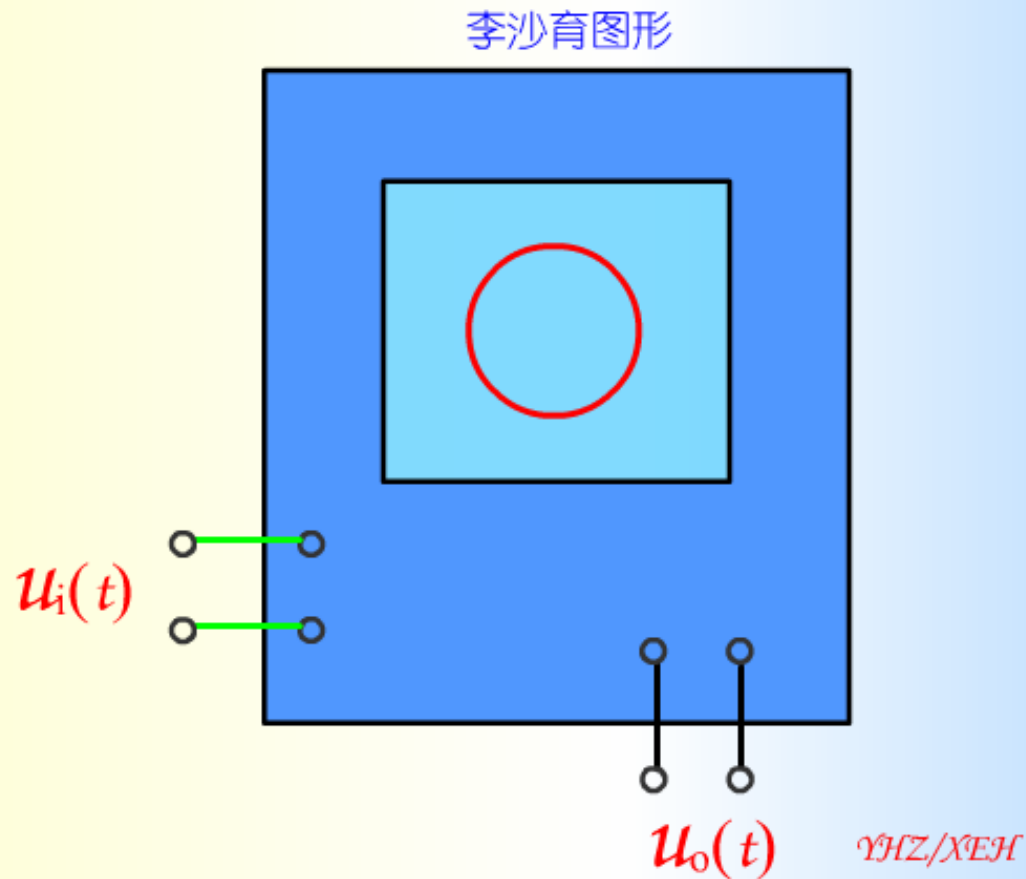


图8-8 用李沙育图形判断环路是否锁定



五、 环路的同步带与捕捉带

设压控振荡器的自由振荡频率 f_0 与输入基准信号频率 f_i 相差较远。随着基准频率 f_i 向压控振荡频率 f_0 靠拢，达到某一频率，这时环路进入锁定状态。一旦入锁以后，压控频率就等于基准频率，且 f_0 随 f_i 而变化，这就称为跟踪。

若再继续增加 f_i ， f_0 不再随 f_i 之变化。但反之，若降低 f_i ，则当它回到 f'_2 时，环路并不入锁，只有当 f_i 降低到一个更低的频率 f_2 的时候，环路才重新入锁。

系统能保持跟踪的最大频差 $|f_2' - f_1'|$

称为同步带。

环路能捕捉成功的最大初始频差 $|f_2 - f_1|$

称为环路的捕捉带，

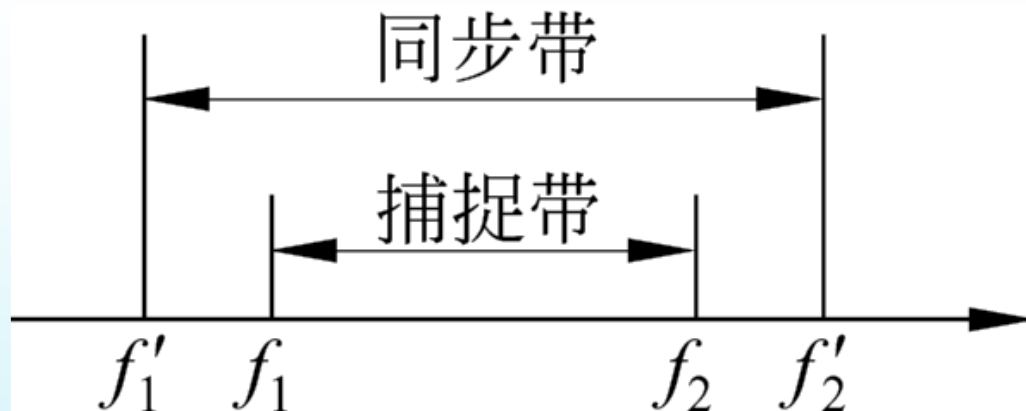


图8-9 环路同步带和捕捉带



环路捕获、跟踪与锁定

环路同步带和捕捉带

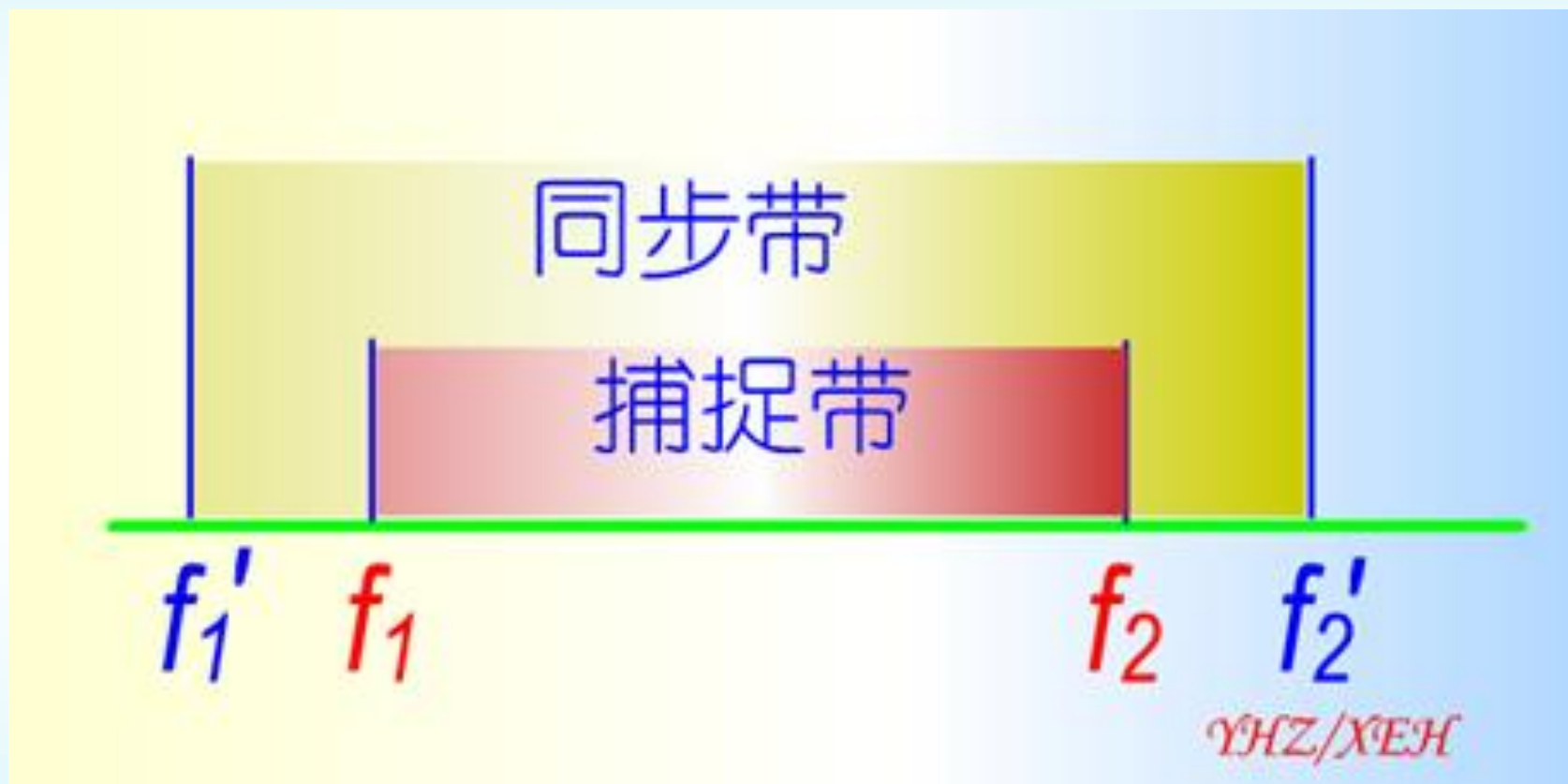


图8-9 环路同步带和捕捉带



六、锁相环路各组成部分的分析

1. 鉴相器

1) 鉴相器（正弦波鉴相器）及其数学模型

任何一个理想的模拟乘法器可以作为有正弦特性的鉴相器。设输入信号为

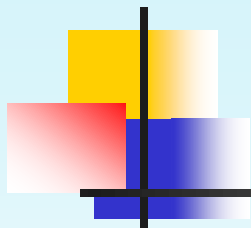
$$u_i(t) = U_{1m} \sin[\omega_i t + \theta_i(t)] \quad (8-1)$$

压控振荡器的输出信号为

$$u_o(t) = U_{2m} \cos[\omega_o t + \theta_o(t)] \quad (8-2)$$

这样 $u_i(t)$ 瞬时相位为

$$[\omega_i t + \theta_i(t)] = \omega_o t + [(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t)]$$



$$= \omega_o t + \varphi_i(t)$$

按上面的新定义，可将式（8-1）、（8-2）改写为

$$u_i(t) = U_{1m} \sin[\omega_o t + \varphi_i(t)]$$

$$u_o(t) = U_{2m} \cos[\omega_o t + \theta_o(t)] = U_{2m} \cos[\omega_o t + \varphi_o(t)]$$

通过环路滤波器，则鉴相器的输出为

$$u_d(t) = \frac{1}{2} A_m U_{1m} U_{2m} \sin[\varphi_i(t) - \varphi_o(t)]$$

$$u_d(t) = K_d \sin \varphi(t) \quad (8-8)$$


$$u_d(t) = K_d \sin \varphi(t)$$

- 式中
$$K_d = \frac{1}{2} A_m U_{1m} U_{2m}$$

- 其中 A_m 为乘法器的增益系数，量纲为 $1/V$ 。

$$\varphi(t) = \varphi_i(t) - \varphi_o(t)$$

- 鉴相器的作用是将两个输入信号的相位差 $\varphi(t)$ 转变为输出电压 $u_d(t)$ 。

由式 (8-8) 可得鉴相特性，如图8-2所示。

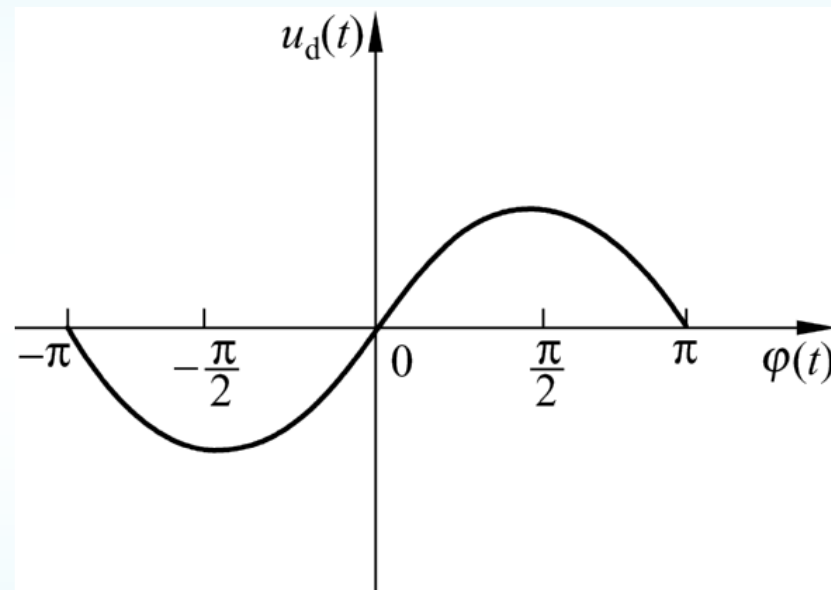


图8-2 正弦鉴相特性曲线

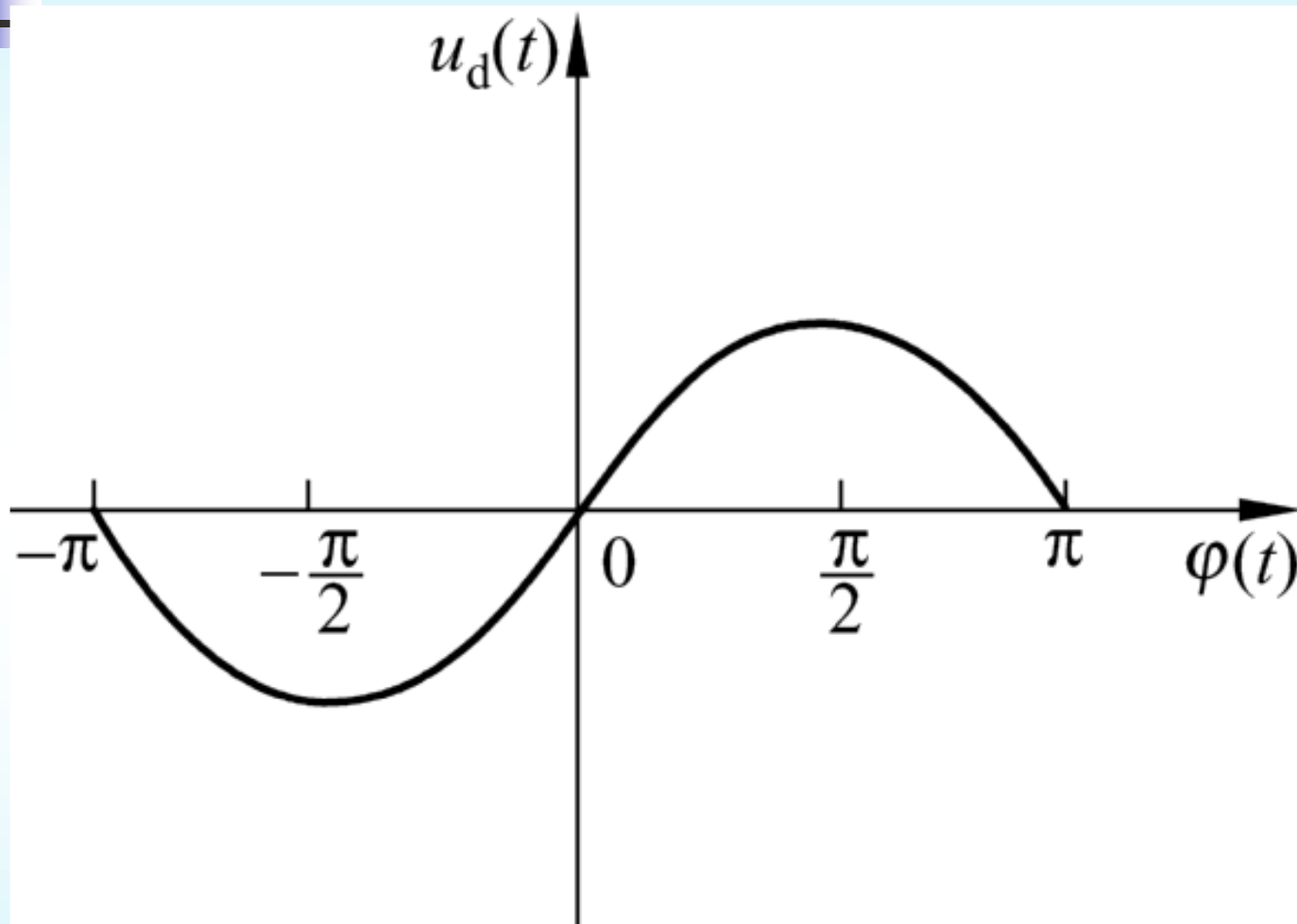


图8-2 正弦鉴相特性曲线



2) 鉴相器线性化的数学模型

当 $|\varphi_i(t)-\varphi_o(t)|\leq \pi/6$ 时,

$$\sin[\varphi_i(t)-\varphi_o(t)] \approx \varphi_i(t)-\varphi_o(t),$$

因此可以把式 (8-8) 写成

$$u_d(t) \approx K_d [\varphi_i(t)-\varphi_o(t)] = K_d \varphi(s)$$

所以, 当 $\varphi(t) \leq \pi/6$ 时, 鉴相特性近似为直线,
 $u_d(t)$ 与 $\varphi(t)$ 成正比。

式 (8-11) 表示时域的关系, 若对它进行拉氏变换, 便可得到频域内的鉴相特性, 表示为

$$u_d(s) = K_d \varphi(s) \quad (8-11)$$

时域中鉴相器数学模型如图8-3所示。

频率域中鉴相器数学模型如图8-4所示。

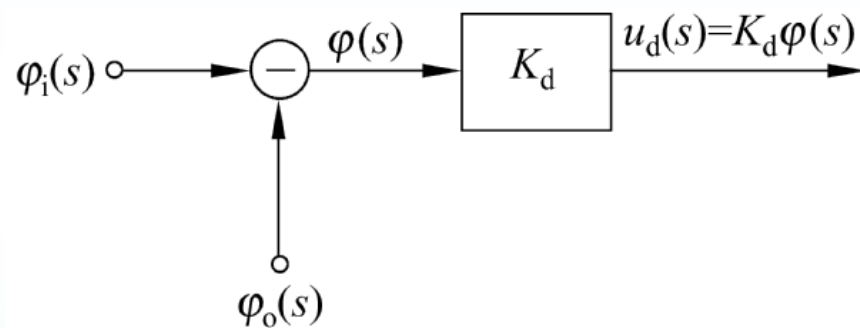
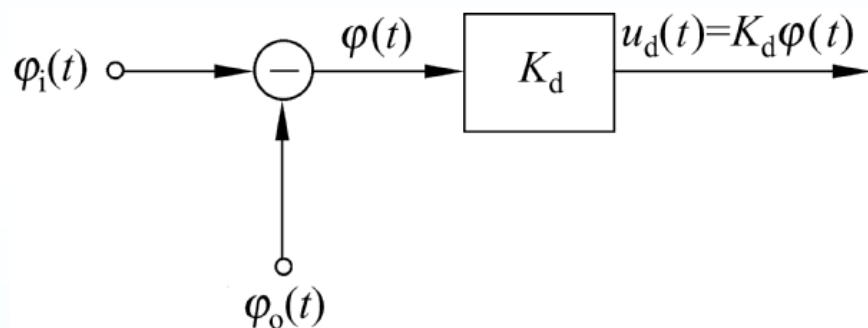


图8-3 鉴相器的线形化数学模型（时域）

图8-4 鉴相器的线形化数学模型（频域）

2. 环路滤波器

环路滤波器是线性电路，由线性元件电阻、电感和电容组成，有时还包括运算放大器在内。它是低通滤波器。在锁相环路中，常用的滤波器有以下三种。

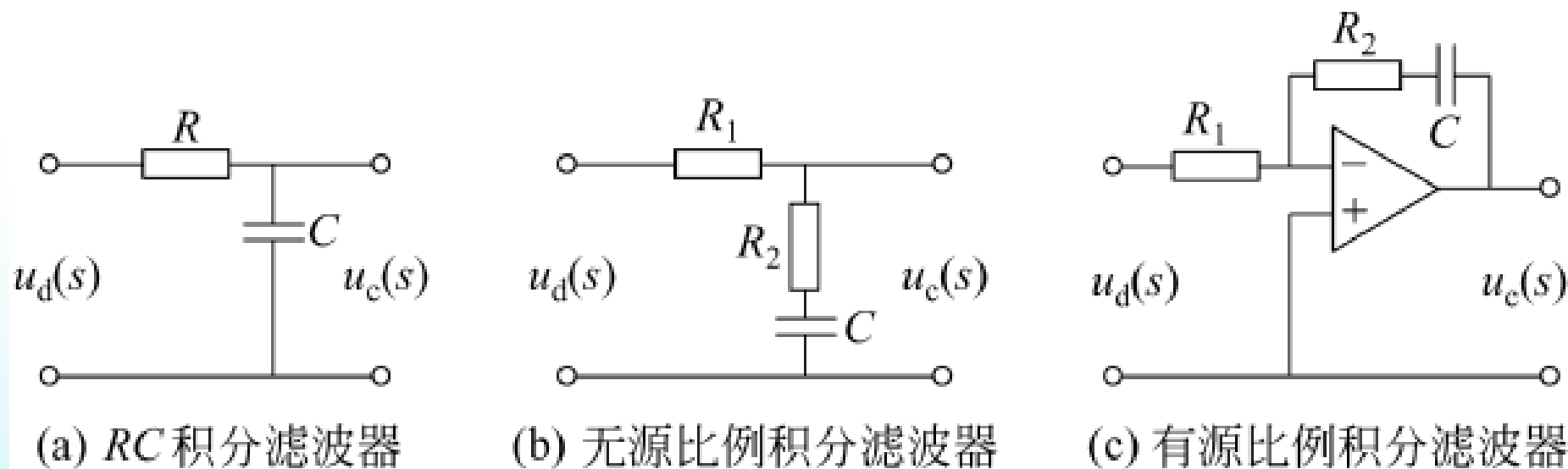


图8-5 确三种常用的环路滤波器

1) RC 积分滤波器

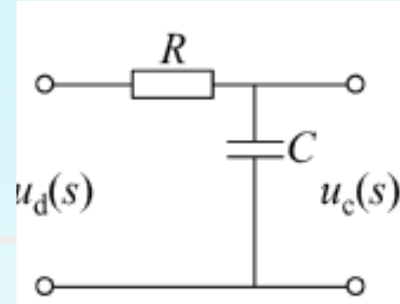


图8-5 (a) 为一阶 RC 低通滤波器，它的作用是将 $u_d(t)$ 中高频分量滤掉，得到控电压 u_c 。滤波器的传递函数为输出电压与输入电压之比，即

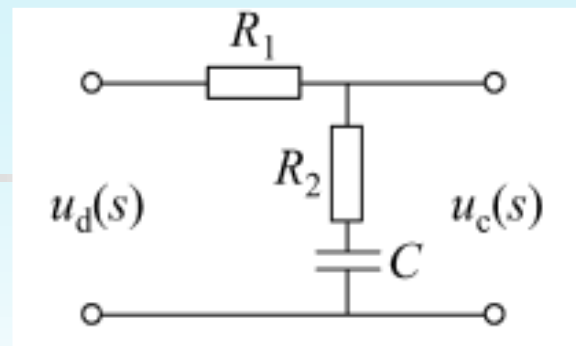
$$H(j\omega) = \frac{u_c(j\omega)}{u_d(j\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{j\omega CR + 1}{j\omega C}} = \frac{1}{j\omega CR + 1} = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}}$$

改为拉氏变换形式，用 s 代替 $j\omega$ 得

$$H(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{\frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\tau}} = \frac{1}{s\tau + 1} \quad (8-12)$$

($\tau=RC$)

2) 无源比例积分滤波器

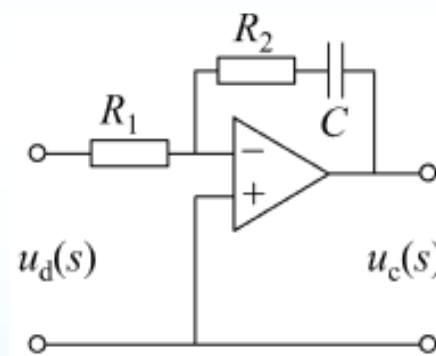


其传递函数为

$$H(s) = \frac{u_c(s)}{u_d(s)} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{s\tau_2 + 1}{s(\tau_1 + \tau_2) + 1} \quad (8-13)$$

$$(\tau_1 = R_1C, \tau_2 = R_2C)$$

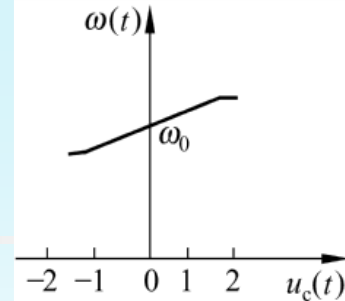
3) 有源比例积分滤波器



在运算放大器的输入电阻和开环增益趋于无穷大的条件下，其传递函数为

$$H(s) = \frac{u_c(s)}{u_d(s)} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC}}{R_1} = \frac{s\tau_2 + 1}{s\tau_1} \quad (8-14)$$

3. 压控振荡器



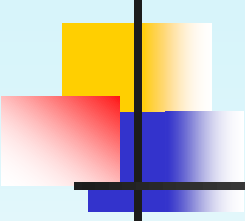
压控振荡器就是在振荡电路中采用压控元件作为频率控制器件。压控元件一般都是变容二极管，它实际上就是一种电压—频率变换器。它在锁相环路中起着电压—相位变换的作用。压控振荡器的特性可用调频特性来表示，如图8-6（a）所示。在一定范围内，

$\omega(t)$ 与 $u_c(t)$ 是成线性关系的，可用下式表示，即

$$\omega(t) = \omega_0 + K_\omega u_c(t) \quad (8-15)$$

式中 ω_0 — 压控振荡器的中心频率

K_ω 是一个常数，其量纲为 $1/s \cdot V$ 或 Hz/V 。它表示单位控制电压所引起的振荡角频率变化的大小。



但在锁相环路中，我们需要的是它的相位变化，由(8-15)可求出瞬时相位为

$$\varphi_{o1}(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + \int_0^t K_{\omega} u_c(t) dt \quad (8-16)$$

所以由控制电压引起的相位变化，即压控振荡器的输出信号为

$$\varphi_o(t) = \varphi_{o1}(t) - \omega_0 t = \int_0^t K_{\omega} u_c(t) dt \quad (8-17)$$

由此可见，压控振荡器在环路中起了一次理想积分器的作用，因此压控振荡器是一个固有积分环节。

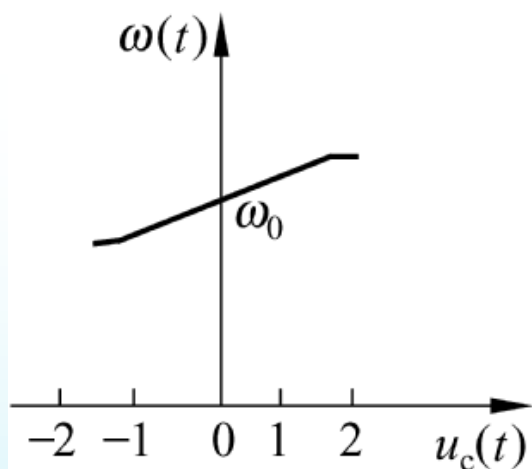
$$\varphi_o(s) = K_{\omega} \frac{1}{s} u_c(s)$$

若将式 (8-17) 改为拉氏变换形式,

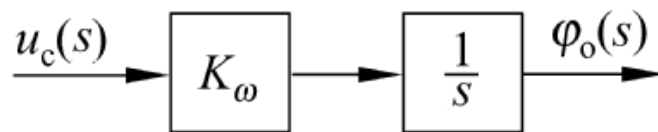
则VCO的传输函数为

$$\frac{\varphi_o(s)}{u_c(s)} = K_{\omega} \cdot \frac{1}{s}$$

因此, VCO的数学模型可用图8-6 (b) 表示。



(a) 调频特性



(b) 数学模型

图8-6 压控振荡器

七、锁相环路的数学模型

■ 将上面得到的鉴相器，滤波器与压控振荡器的数学模型代换到图8-1中，可得出PLL的数学模型。

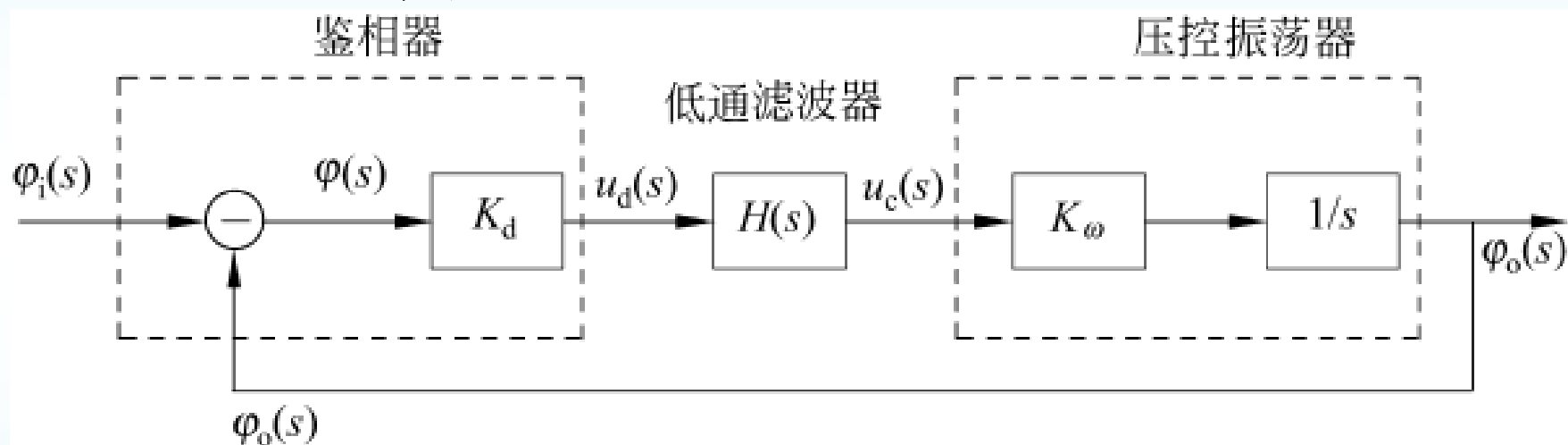
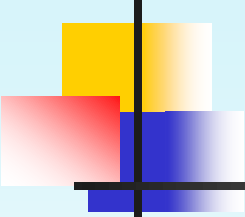


图8-7 锁相环路的数学模型

根据此图，即可得出锁相环路的基本方程式为：

$$\varphi_o(s) = [\varphi_i(s) - \varphi_o(s)] \cdot K_d \cdot H(s) \cdot K_\omega \cdot \frac{1}{s}$$



■ 或写成

$$F(s) = \frac{\varphi_o(s)}{\varphi_i(s)} = \left[\frac{\varphi_i(s) - \varphi_o(s)}{\varphi_i(s)} \right] K_d \cdot K_\omega \cdot H(s) \cdot \frac{1}{s}$$
$$= \frac{K_d \cdot K_\omega H(s)}{s + K_d \cdot K_\omega H(s)}$$

$F(s)$ 表示整个锁相环路的闭环传输函数。
它表示在闭环条件下，输入信号的相角 $\varphi_i(s)$
与VCO输出信号相角 $\varphi_o(s)$ 之间的关系。

