

# 第6章 角度调制与解调

---

6.1 概述

6.2 调角波的性质

6.3 调频信号的产生

6.4 调频电路

6.5 调频波的解调

6.6 限幅器

6.7 调制方式的比较

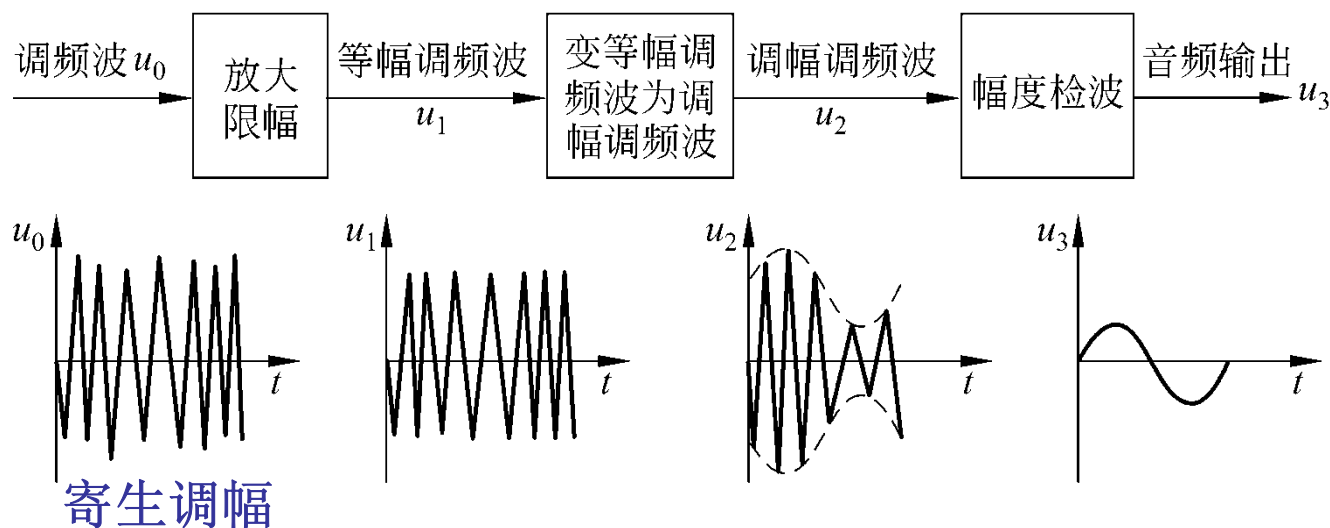
6.8 集成调频、解调电路芯片介绍

- 
- 调角波的解调就是从调角波中恢复出原调制信号的过程。
  - 调频波的解调电路称为频率检波器或鉴频器（FD）；  
调相波的解调电路称为相位检波器或鉴相器（PD）。

## 6.5 调频波的解调

□ 实现鉴频的方法:

1. 将调频波通过频率-幅度变换网络变成幅度随瞬时频率变化的调幅调频波，再经包络检波器检出调制信号。



2. 将调频波通过频率-相位变换网络变成调频调相波，然后通过相位检波器检出调制信号。

## 鉴频器的类型:

- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数器鉴频器

## 6.5.1 鉴频器的质量指标

1. 鉴频跨导 $g_d$ （鉴频灵敏度）——越大越好

单位频偏所产生输出电压的大小，  
又叫鉴频灵敏度，  
是鉴频特性在载频处的斜率

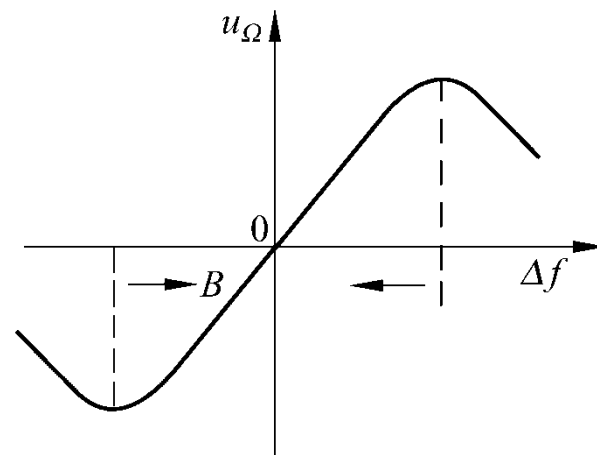
2. 鉴频频带宽度 $B$

——鉴频特性近似为直线的频率范围

$$B > 2 \Delta f$$

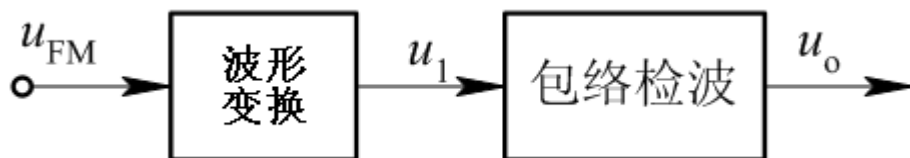
3. 非线性失真

4. 对寄生调幅应有一定的抑制能力



## 6.5.2斜率鉴频器

### 1. 斜率鉴频器的理论模型

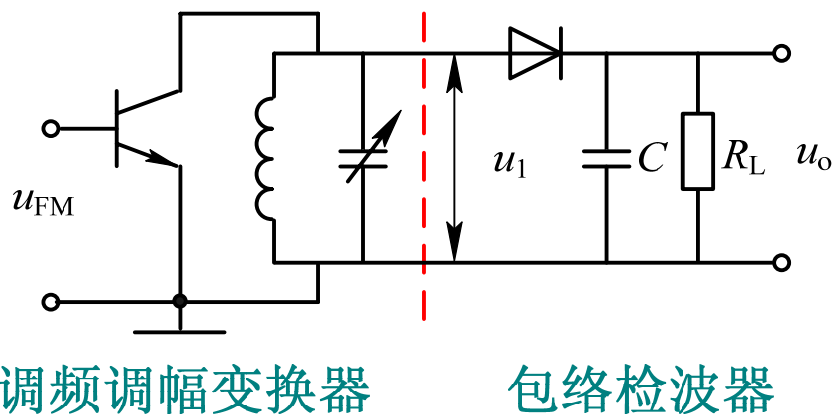


### 2. 单失谐回路斜率鉴频器

#### (1) 工作原理

调频调幅变换器实际上是一个以LC回路为负载的调谐放大器，但回路失谐；

波形变换原理：利用谐振回路对不同频率呈现不同阻抗的传输特性。

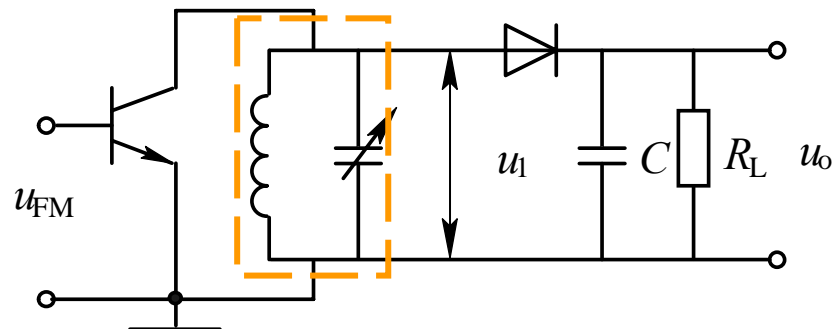


$$\frac{U}{U_m} = \frac{1}{\sqrt{1 + (Q \frac{2\Delta f}{f_0})^2}} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

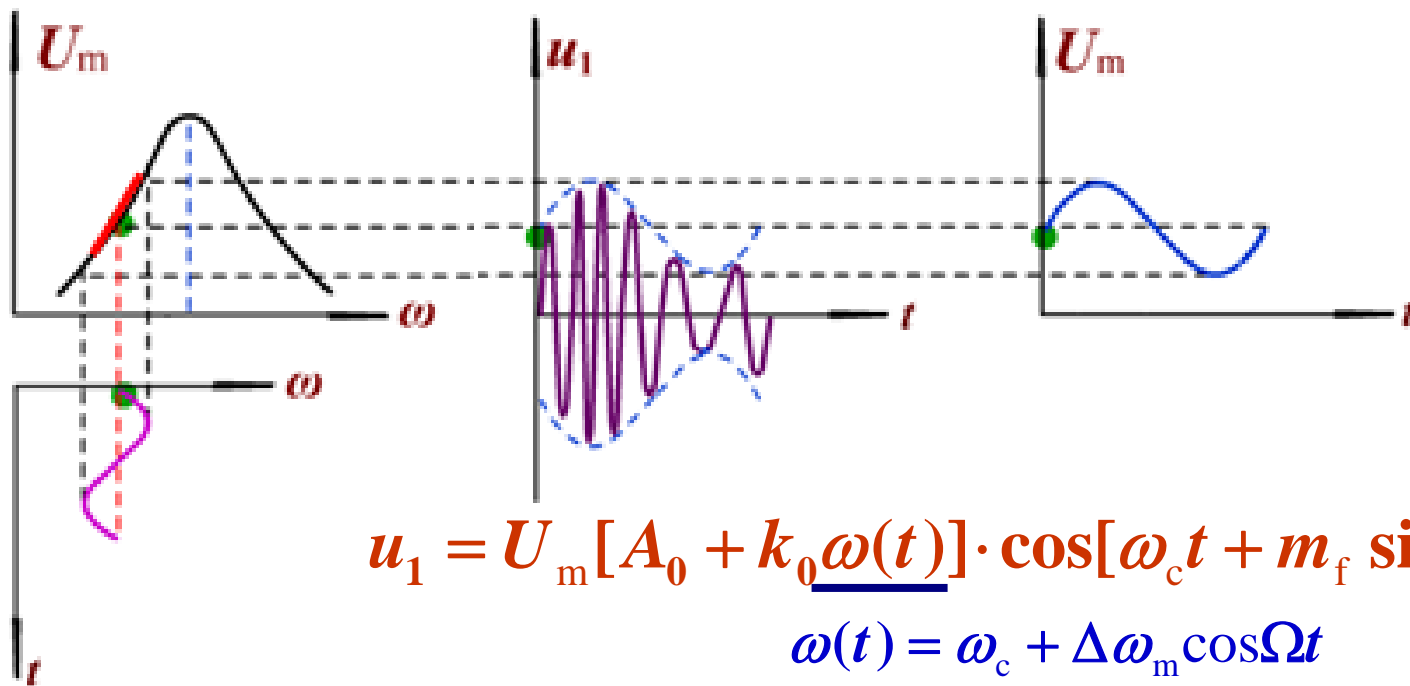
$\Delta f = f - f_0$  失谐量

调频波载波频率  $f_c \neq f_0$ ，使LC回路工作在失谐状态。

在频率变化的一小段范围内，谐振回路的幅频特性可近似认为是线性的。



调频调幅变换器 包络检波器



$$u_1 = U_m [A_0 + k_0 \omega(t)] \cdot \cos[\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \varphi]$$

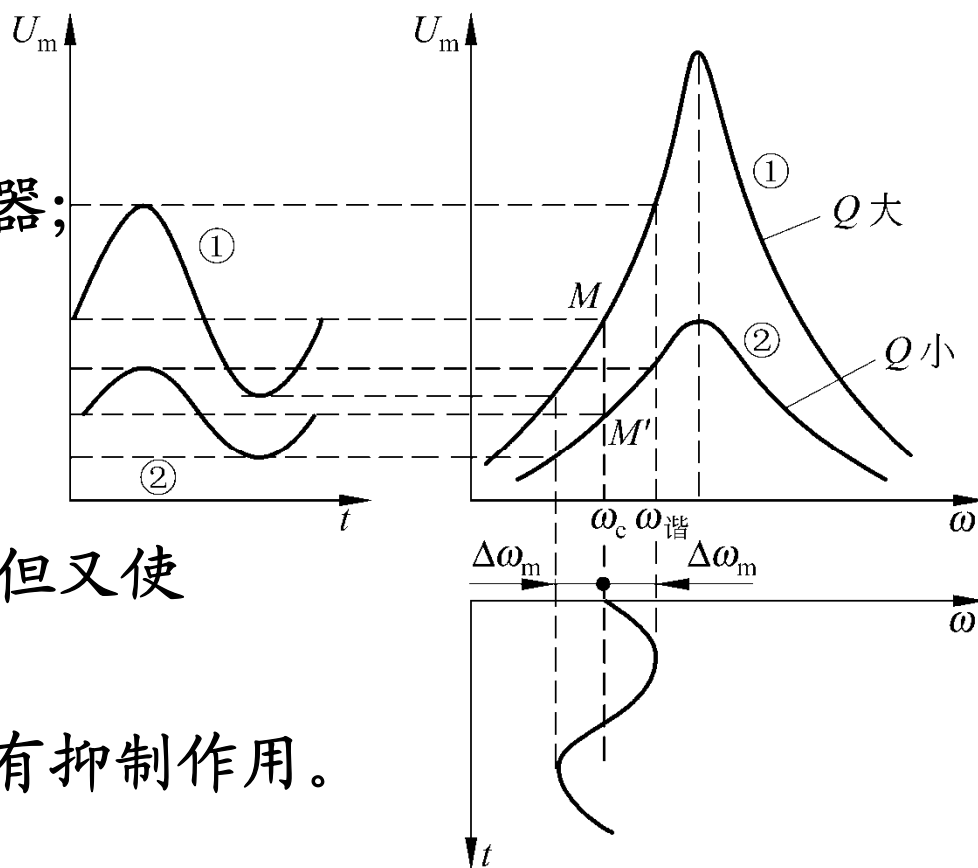
$$\omega(t) = \omega_c + \Delta \omega_m \cos \Omega t$$

## (2) 鉴频特性分析

① 鉴频灵敏度的大小与变换器幅频特性 $f_0$ 处的斜率成正比——斜率鉴频器；

② 变换器幅频特性线性范围较窄，若要增大，就要降低LC回路的 $Q$ 值，但又使鉴频灵敏度降低；

③ 对输入信号寄生调幅没有抑制作用。

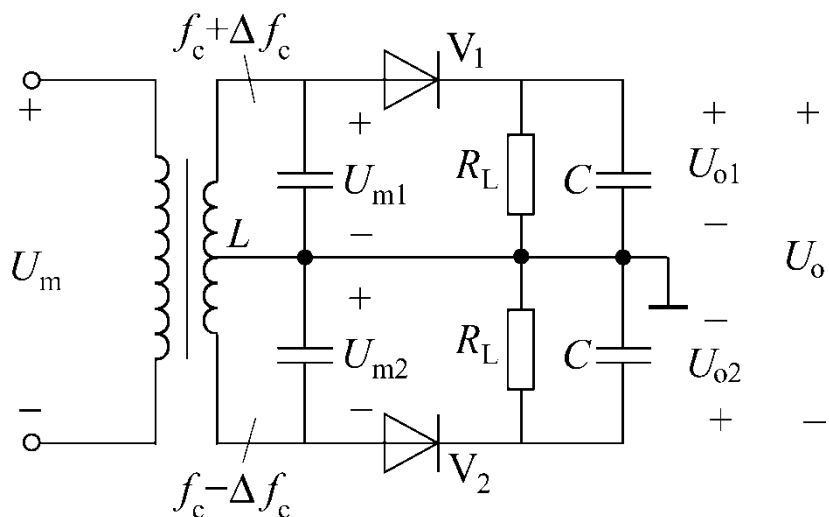


一般用于质量要求不高的接收机中。



### 3. 参差调谐鉴频器（双失谐回路斜率鉴频器）

#### (1) 电路

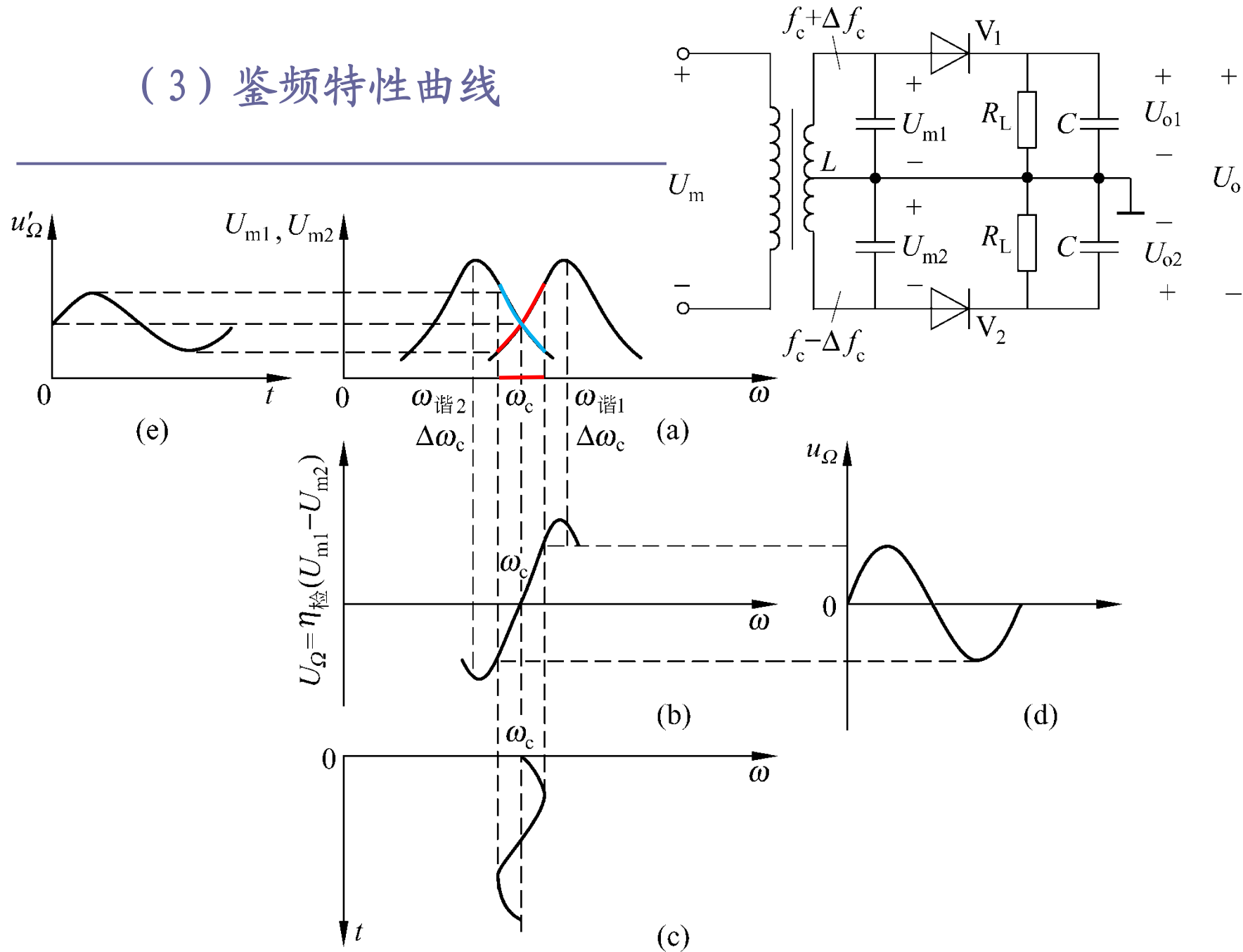


初级LC回路调谐在输入调频信号的中心频率 $f_c$ 上，次级上下两个回路分别调谐在 $f_1$ 和 $f_2$ 上。设 $f_1 > f_c$ ， $f_2 < f_c$ ，且 $f_1 - f_c = f_c - f_2 = \Delta f_c$ 。

#### (2) 鉴频工作原理

载波状态 $U_{o1} = U_{o2}$ ， $U_o = 0$ ； $f > f_c$ 时， $U_{o1} > U_{o2}$ ， $U_o$ 为正值； $f < f_c$ 时， $U_{o1} < U_{o2}$ ， $U_o$ 为负值。

### (3) 鉴频特性曲线



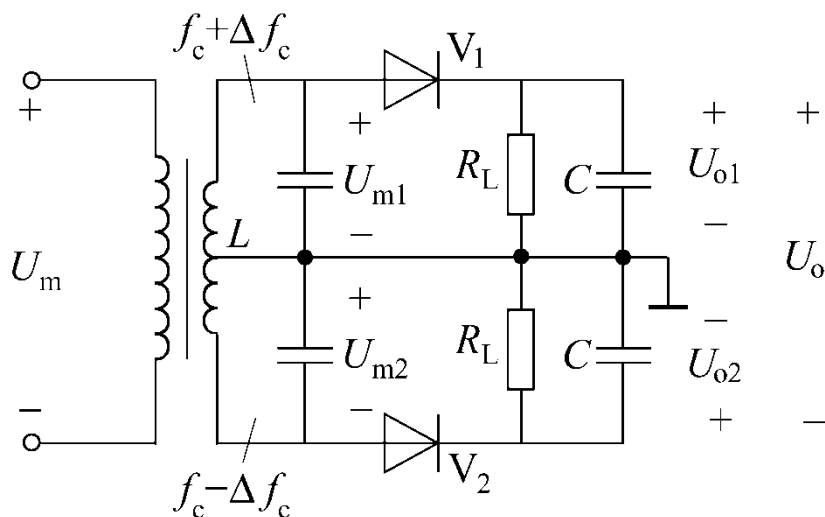
## (4) 优缺点

### ① 优点

鉴频灵敏度较高，其输出电压比单失谐回路斜率鉴频器的输出大一倍。

### ② 缺点

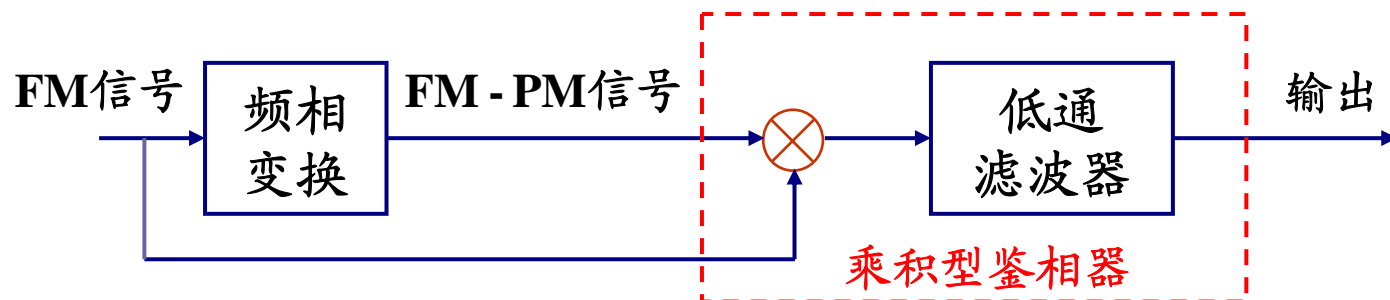
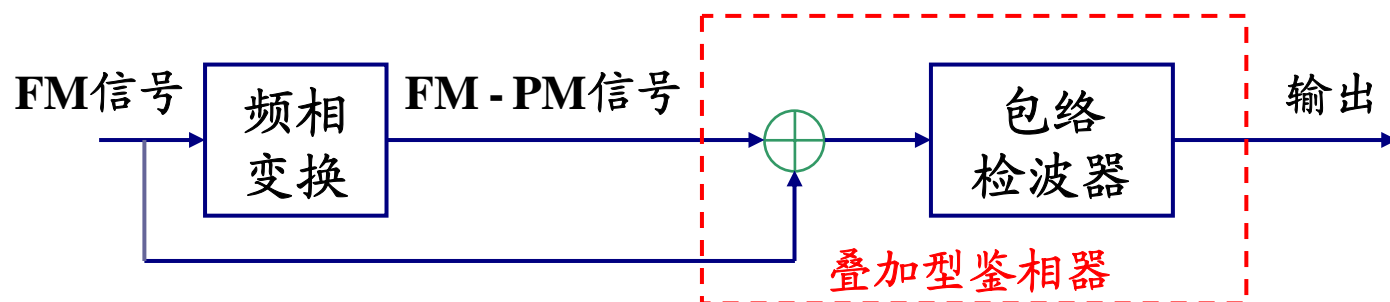
要求上下两个回路严格对称，三个回路要分别调谐到三个不同的准确频率上，给实际调整增加了困难。



### 6.5.3 相位鉴频器

相位鉴频器由两部分组成：①将调频信号的瞬时频率变化变换到附加相移上的频相转换网络；②检出附加相移变化的相位检波器。

相位检波器又称鉴相器，有乘积型和叠加型两种实现电路。

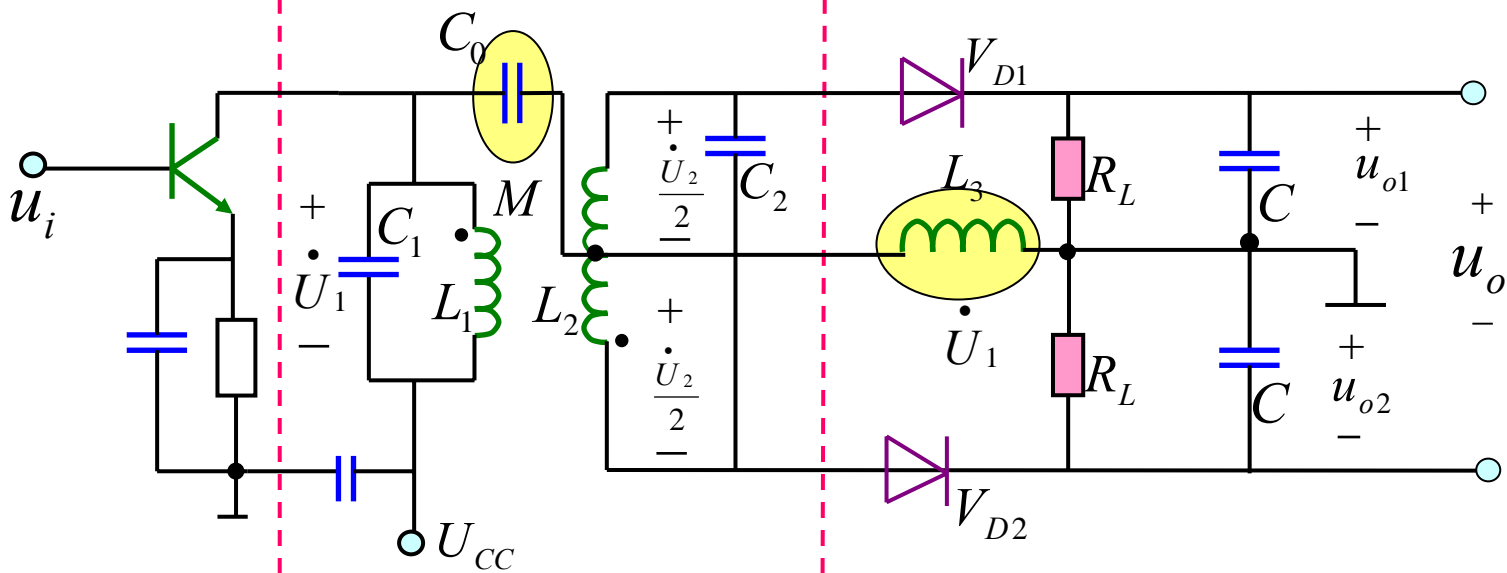


# 1. 电感耦合相位鉴频器

限幅放大

变换网络

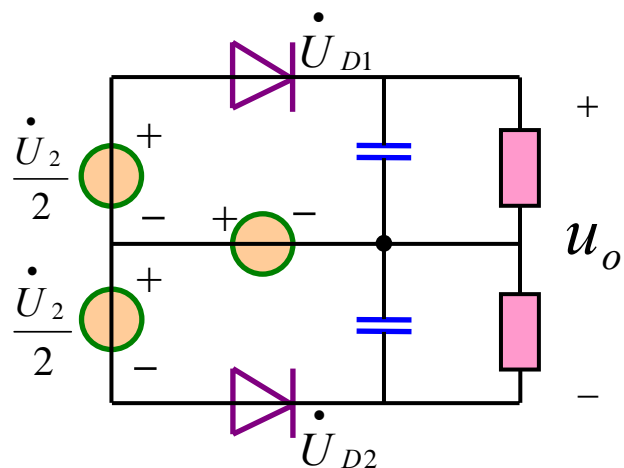
平衡叠加型鉴相器

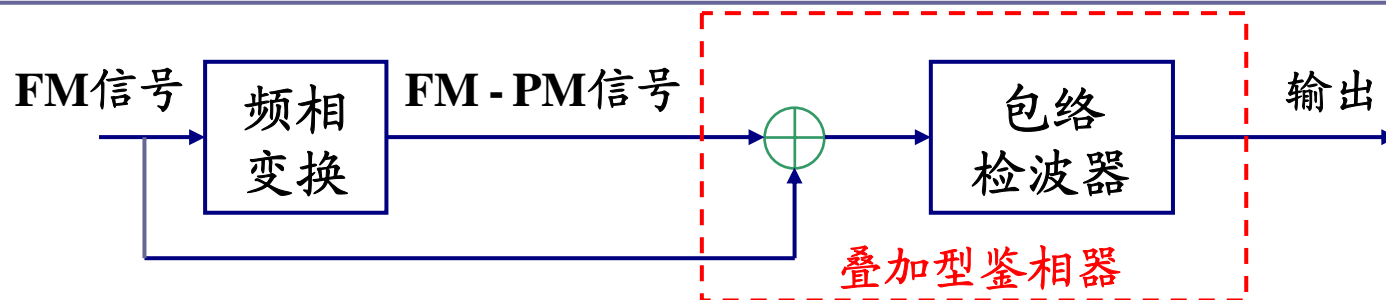


$L_3$  高频扼流圈

高频  $\frac{1}{\omega C_3} \ll \omega L_3$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{C3} + \dot{U}_{L3} \approx \dot{U}_{L3}$$

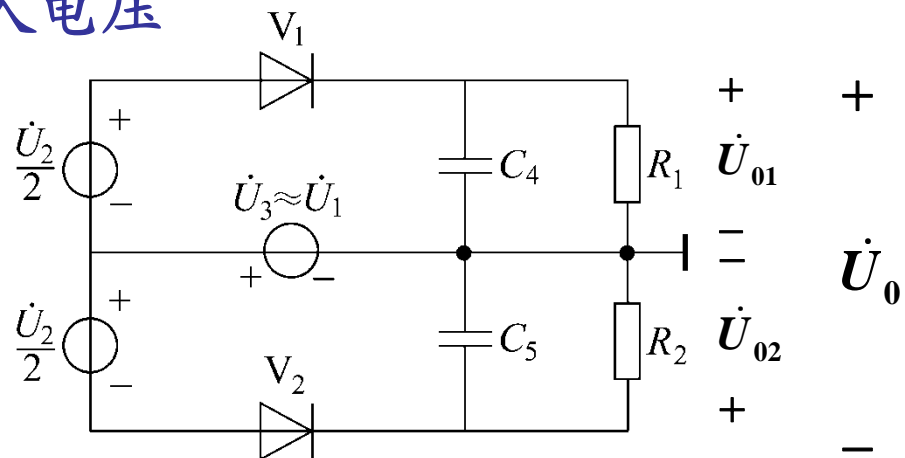




实际加到上、下包络的输入电压

$$\dot{U}_{d1} = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_2}{2}$$

$$\dot{U}_{d2} = \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_2}{2}$$

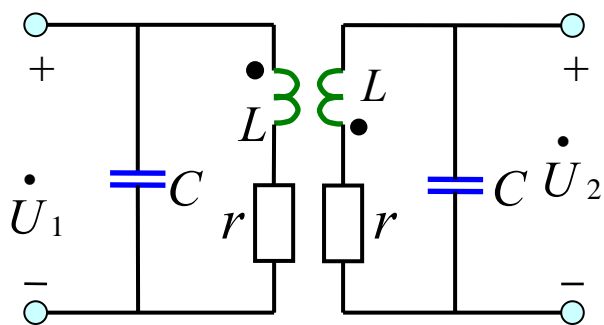


经过包络检波，得检波器的输出： $U_{01}$ 、 $U_{02}$

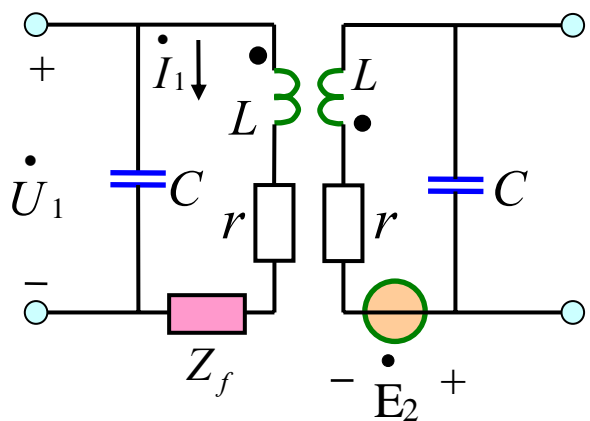
$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{01} - \dot{U}_{02}$$

# 1) 频率-相位变换

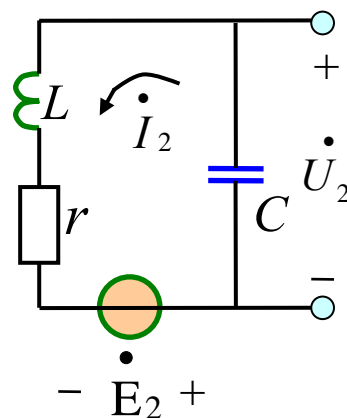
## $L_1C_1$ 和 $L_2C_2$ 为互感耦合双调谐回路——频相转换网络



因为互感电势由另一线圈的电流引起的，所以写互感电势的式子时，只要考虑它的参考方向与引起这个电势或电压的电流的参考方向对同名端是否一致。



$$\dot{E}_2 = j\omega M \dot{I}_1$$



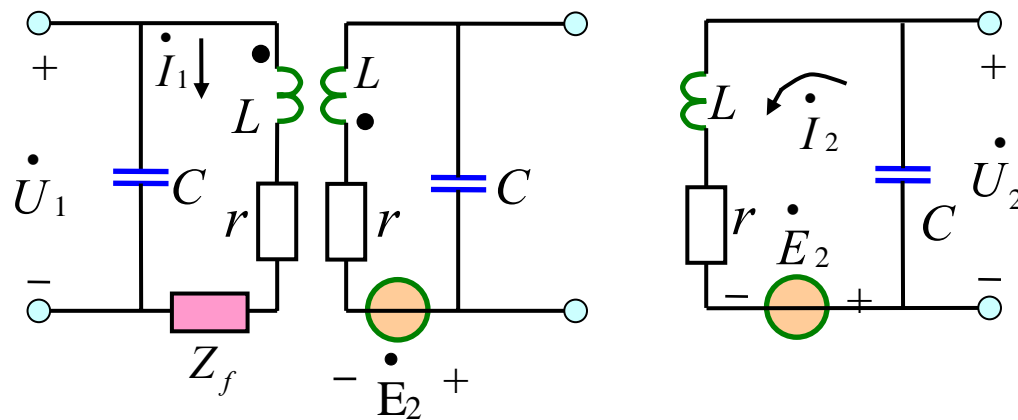
$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + j\omega L_1 + Z_f} \approx \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1}$$

$$\dot{E}_2 = j\omega M \dot{I}_1 = \frac{M}{L_1} \dot{U}_1$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_2}{r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_2 = j \frac{1}{\omega C_2} \frac{M}{L_1} \frac{\dot{U}_1}{r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} = \frac{jA}{1 + j\xi} \dot{U}_1 = \frac{A\dot{U}_1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \left/ \frac{\pi}{2} - \arctg \xi \right.$$

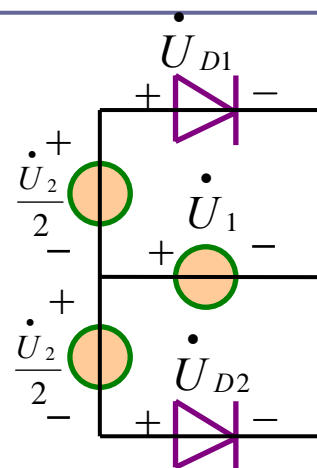
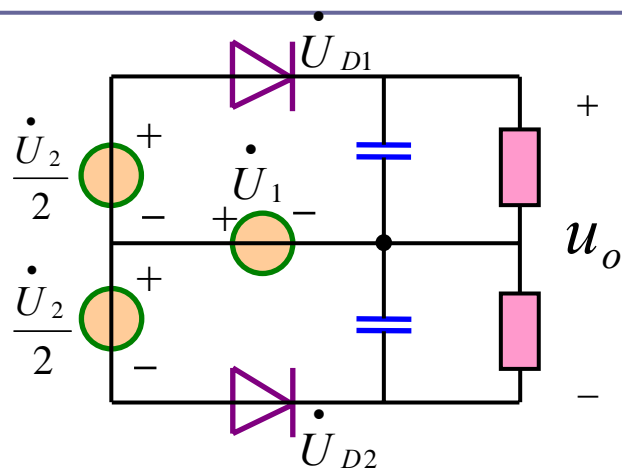
$$\xi = \frac{\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}}{r_2} = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_c}$$



$\omega$  变,  $U_2$  对  $U_1$  的相位差随  $\omega$  变化

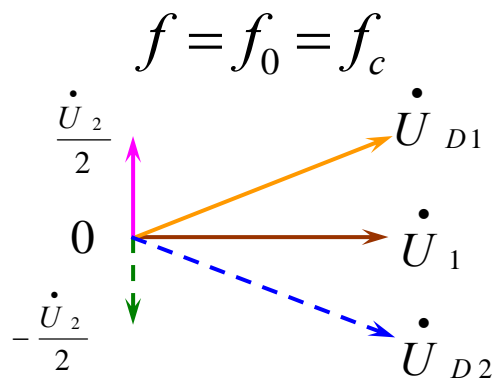


## 2) 相位-幅度变换

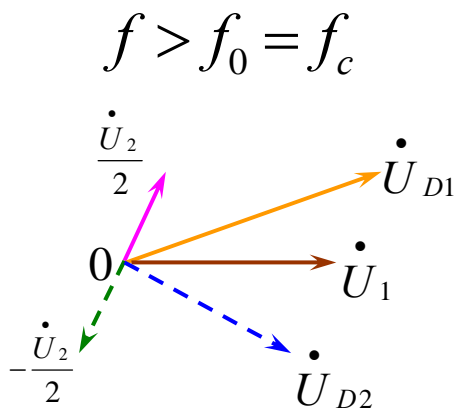


$$\dot{U}_{D1} = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_2}{2}$$

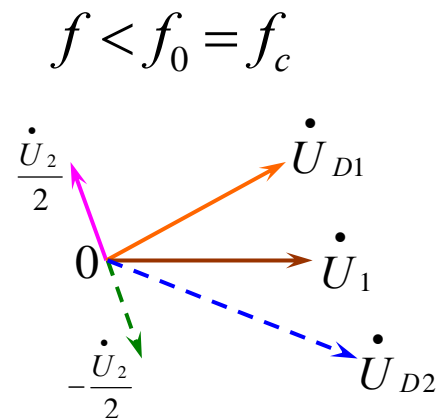
$$\dot{U}_{D2} = \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_2}{2}$$



$$|\dot{U}_{D1}| = |\dot{U}_{D2}| \quad u_o = 0$$



$$|\dot{U}_{D1}| > |\dot{U}_{D2}| \quad u_o > 0$$



$$|\dot{U}_{D1}| < |\dot{U}_{D2}| \quad u_o < 0$$

### 3) 检波输出

$$K_{d1} = K_{d2} = K_d$$

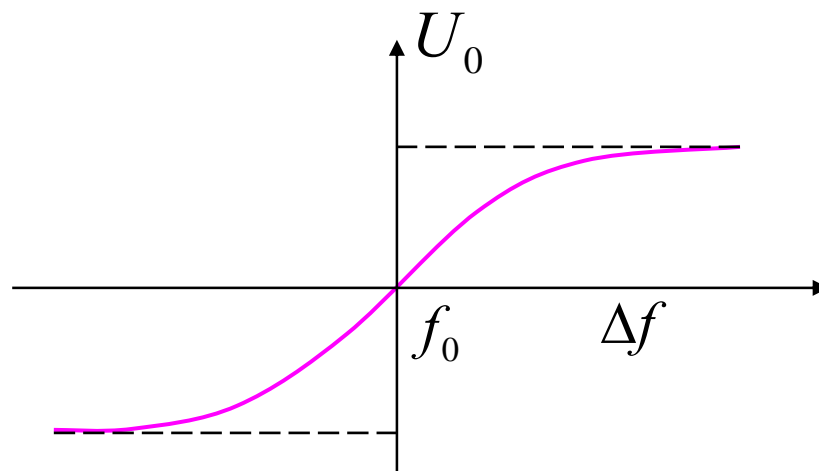
包络检波器的输出分别为：

$$u_{o1} = K_{d1} |\dot{U}_{D1}|$$

$$u_{o2} = K_{d2} |\dot{U}_{D2}|$$

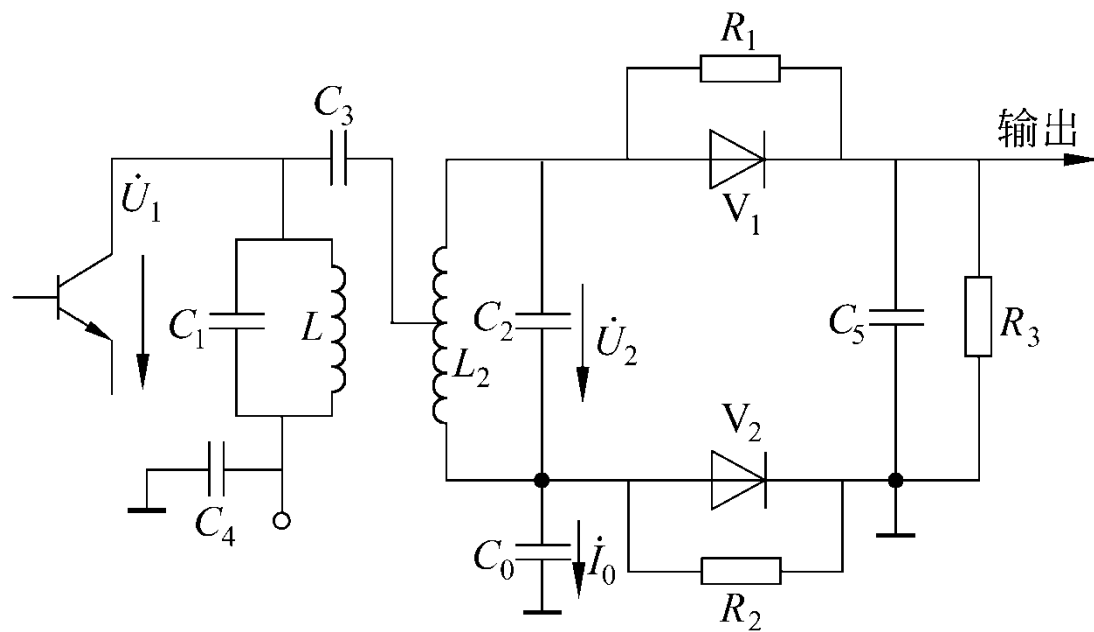
鉴频器的输出电压为

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = K_d (|\dot{U}_{D1}| - |\dot{U}_{D2}|)$$

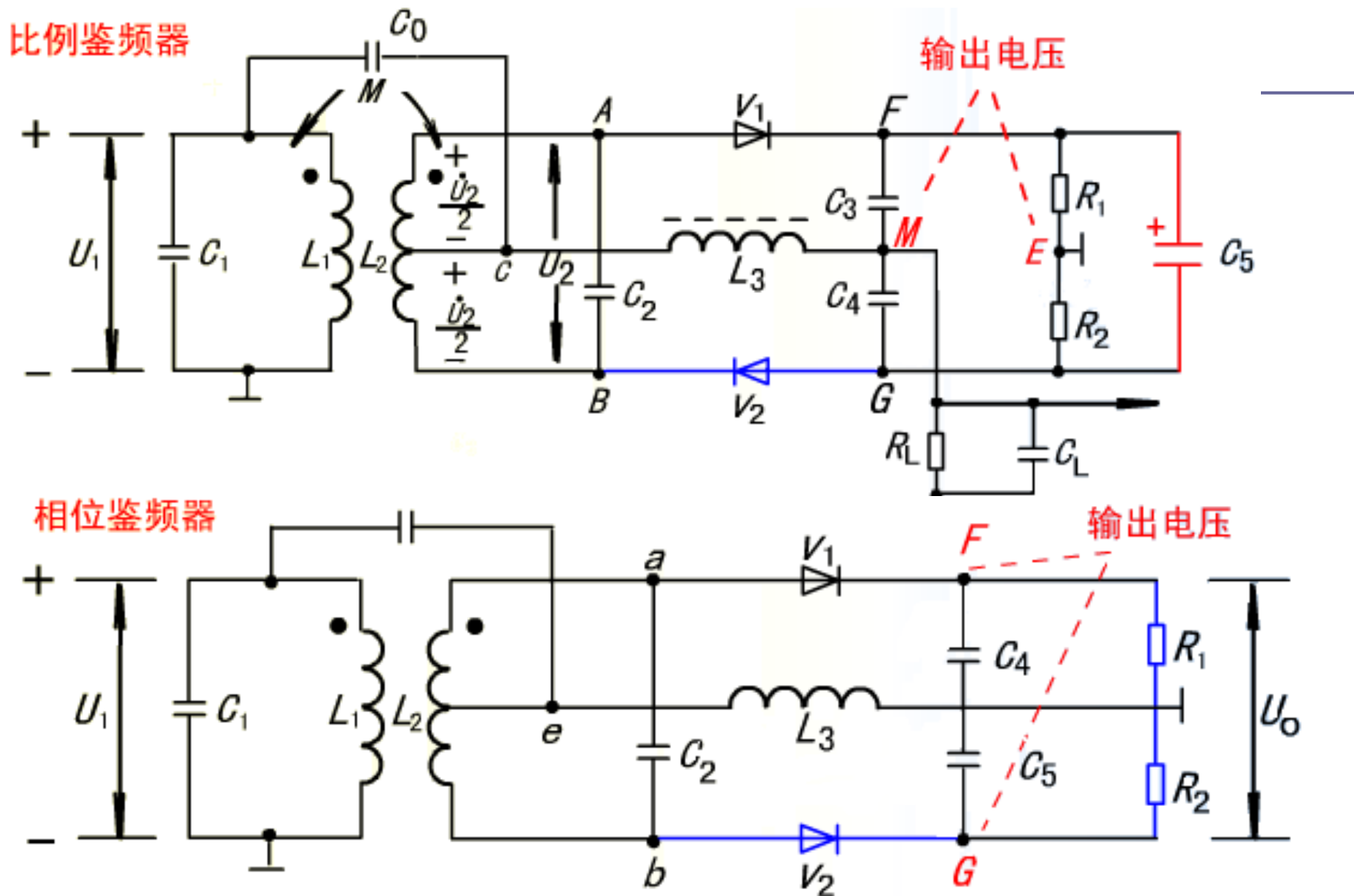


- 
- $\omega$  变,  $U_2$  对  $U_1$  的相位差随  $\omega$  变化
  - 检波器的输入电压幅度  $U_{D1}$ 、 $U_{D2}$  随  $\omega$  变
  - 每一检波器的输出电压  $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$  随  $\omega$  变
  - 总的检波器输出电压  $U_o$  随  $\omega$  变

## 2. 电容耦合相位鉴频器——自学



### 6.5.4 比例鉴频器——具有限幅和鉴频功能（P197图6—40）



频相转换网络与相位鉴频器相同；检波电路与输出端的电路不同。

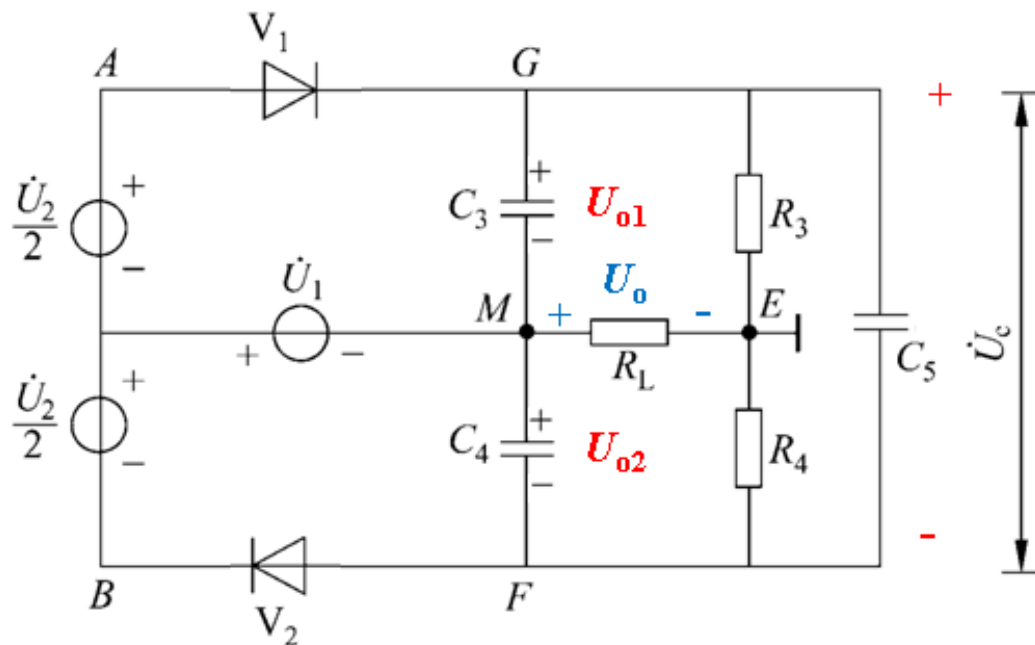
---

$V_2$ 的极性相反；

$C_3, C_4, R_1, R_2$ 组成一个桥路，输出端 电压从桥的中点提取而不是  $F$ 、 $G$ 两端；

$C_5$ 是大电容，几十  $\mu F$ 。

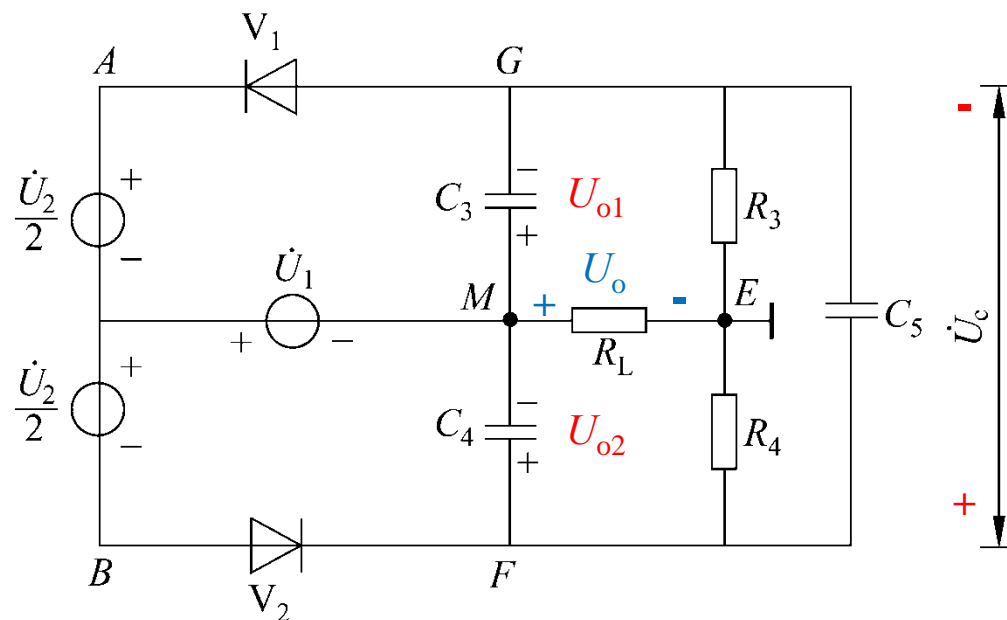
# 工作原理



加到上、下两包络的输入电压  $\dot{U}_{d1} = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_2}{2}$   $\dot{U}_{o1} = \eta_d \dot{U}_{d1}$

$$U_{d2} = -\dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_2}{2} \quad \dot{U}_{o2} = \eta_d \dot{U}_{d2}$$

比例鉴频器的输出电压  $U_o = \frac{U_c}{2} - U_{o1} = \frac{1}{2}(U_{o2} - U_{o1})$



$$U_o = \frac{1}{2}(U_{o1} - U_{o2}) = \frac{1}{2}U_c \cdot \frac{1 - U_{o2}/U_{o1}}{1 + U_{o2}/U_{o1}}$$

$U_o$  取决于比值  $U_{o2}/U_{o1}$



## 限幅原理

$$\begin{aligned}U_o &= \frac{1}{2}(U_{o2} - U_{o1}) = \frac{1}{2} \frac{(U_{o1} + U_{o2})(U_{o2} - U_{o1})}{(U_{o1} + U_{o2})} \\&= \frac{1}{2} U_c \cdot \frac{U_{o2} - U_{o1}}{U_{o2} + U_{o1}} = \frac{1}{2} U_c \cdot \frac{1 - U_{o1}/U_{o2}}{1 + U_{o1}/U_{o2}}\end{aligned}$$

由于 $U_c$ 恒定不变， $U_o$ 只取决于比值 $U_{o1}/U_{o2}$ ，所以把这种鉴频器称为**比例鉴频器**。

如果输入调频信号伴随有寄生调幅现象，使 $U_{o1}$ 和 $U_{o2}$ 同时增大或减小，比值 $U_{o1}/U_{o2}$ 可维持不变，因而输出电压与输入调频波的幅度变化无关，该电路有抑制寄生调幅作用。

另外，由相位鉴频器， $\frac{U_{o1}}{U_{o2}}$  随频率发生变化，所以输出也随频率发生变化。

## 6.5.5 脉冲计数式鉴频器：（自学）

---

P200. 图6—45

1、工作原理：单位时间内零点的数目正好反映了频率的高低。



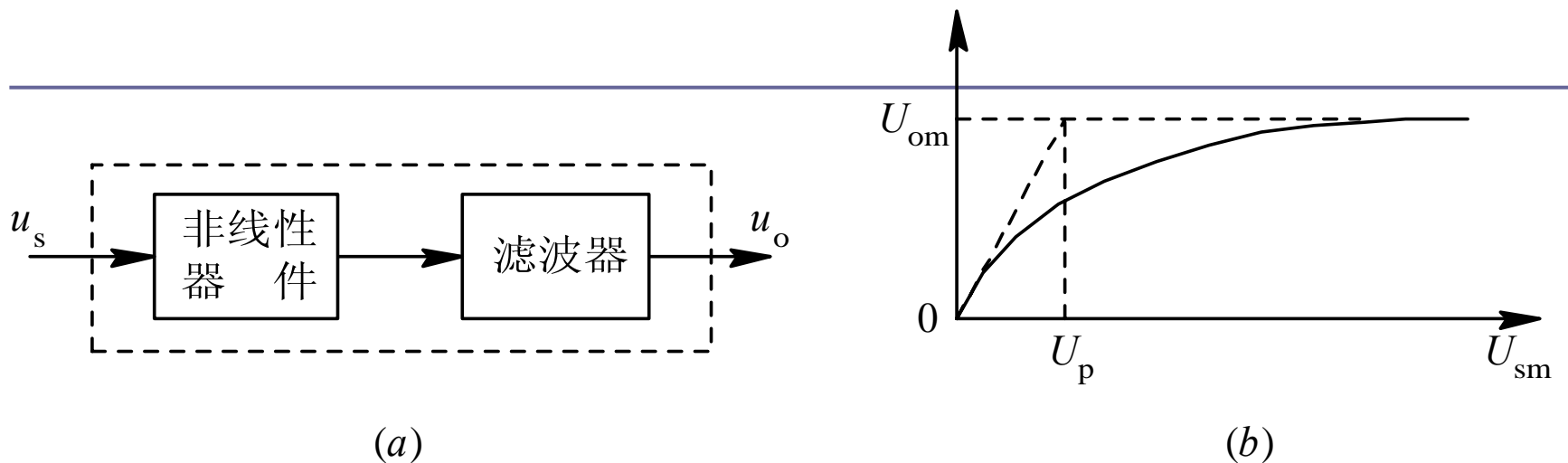
2、优点：线性好，频带很宽，可作成集成电路。

## 6.6 限幅器

---

在传输过程中，由于各种干扰的影响，将使调频信号产生寄生调幅，通过鉴频器后，会使输出电压产生失真。为了消除寄生调幅的影响，鉴频器前加了一级限幅器，使调频波变为等幅调频波。

限幅器通常由非线性元件和谐振回路组成。带有寄生调幅的调频信号通过非线性元件后变成调频方波，调频方波利用付氏级数展开，包含各次谐波，然后通过谐振回路或其它形式的带通滤波器滤掉，得到恒定振幅的调频正弦波。

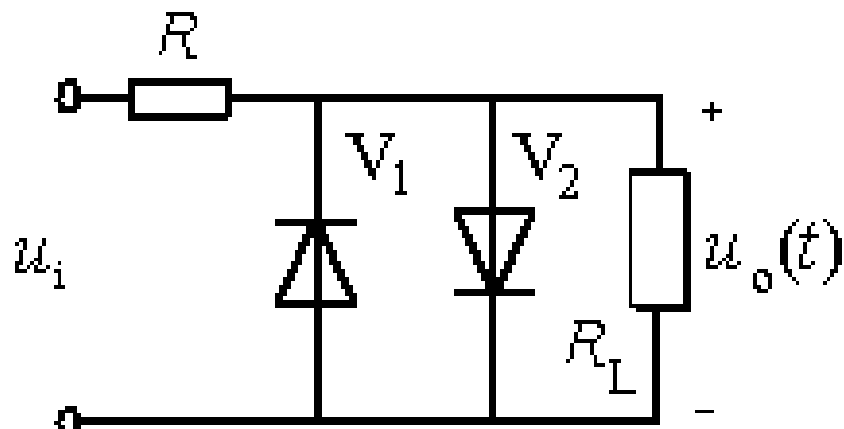


限幅器的性能可由图 (b) 示的限幅特性曲线表示。 $U_p$  表示限幅器进入限幅状态的最小输入信号电压, 称为**门限电压**。对限幅器的要求主要是在限幅区内要有平坦的限幅特性, 门限电压要尽量小。

## 6.6.1. 二极管限幅器

$P_{202}$ . 图6-48(a)在调频放大器的基础上,  
加两个二极管  $V_1, V_2$  组成。

等效电路:



$u_i$  正半周,

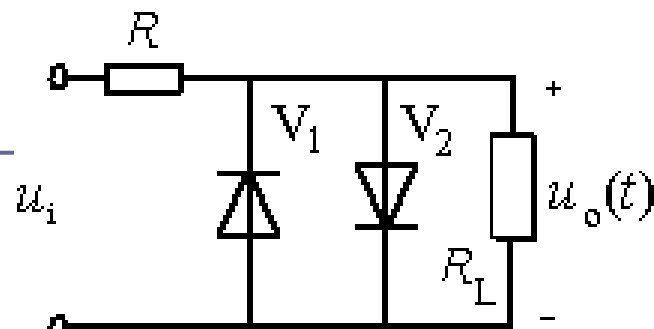
$u_i < U_D$  (二极管起始导通电压) ,

二极管  $V_1$ 、 $V_2$  截止,  $u_o(t) = u_i(t) \frac{R_L}{R + R_L}$

$u_i > U_D$ ,  $V_1$  截止,  $V_2$  导通,

$$u_o(t) = u_i(t) \frac{R_L \parallel R_D}{R + R_L \parallel R_D} \approx u_i \frac{R_D}{R + R_D}$$

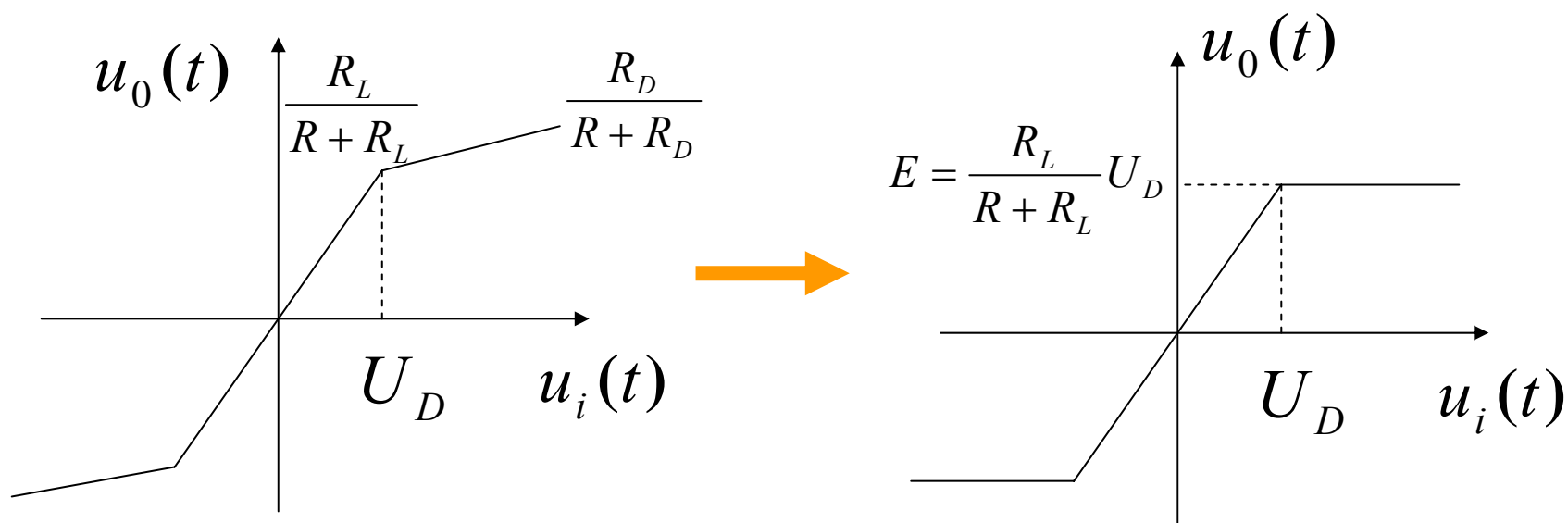
$R_D$  — 二极管的导通内阻, 很小。



同理:  $u_i(t)$  负半周,

$|u_i| < U_D$ ,  $V_1$ 、 $V_2$  截止;  $|u_i| > U_D$ ,  $V_1$  导通,  $V_2$  截止。

$$\text{当 } R_D \ll R, \quad \frac{R_D}{R + R_D} \rightarrow 0$$



## 6.6.2 三极管限幅器

---

图6-49

在输入信号较小时，限幅器处于放大状态，起普通放大器的作用；

当输入信号加大时，工作在截止和饱和区，起限幅作用。



# 第6章 角度调制与解调

---

6.1 概述

6.2 调角波的性质

6.3 调频信号的产生

6.4 调频电路

6.5 调频波的解调

6.6 限幅器

6.7 调制方式的比较

6.8 集成调频、解调电路芯片介绍

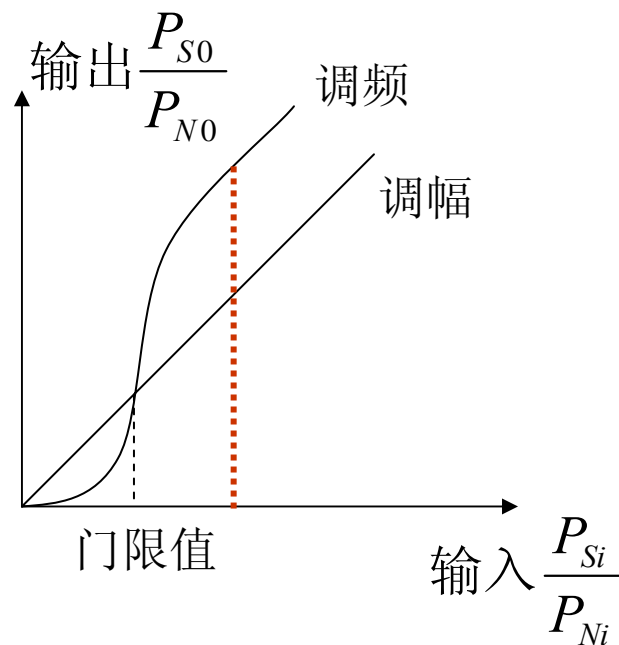
## 6.7 调制方式的比较:

主要比较用得较多的两种方式：调频、调幅。

1. 抗干扰性能——很重要的指标，通信的距离、可靠性在很大程度上取决于抗干扰性能的好坏。

一般调频系统的抗干扰性优于调幅系统。

条件是输入信噪比： $\frac{P_{Si}}{P_{Ni}}$  必须  
大于某一临界值（门限值）。



## 2、占用频带的宽度

---

调幅  $B = 2F$ ; 调频  $B = 2(\Delta f + F)$ 。

调幅制所占用的频带窄。

## 3、发射机所需的功率

调幅波:  $P_{\Sigma} = (1 + \frac{1}{2}m_a^2)P_c$ ; 调频波:  $P_{\Sigma} = P_c$  (调制前载波功率)

所以调频发射机所需要的功率小。

## 4、强信号堵塞现象

在移动通信中, 在强信号情况, 接收机使调幅波限幅, 失去调幅波特点, 使调幅波失真, 造成接收机不能接收。

——强信号堵塞现象

所以调幅信号会出现强信号堵塞现象, 而调频系统则不会。

# 本章小结

1. 角度调制分为**调频**和**调相**。调频的**瞬时频率**随调制信号变化，调相波的**瞬时相位**随调制信号变化。

调角波的频谱不是调制信号频谱的线性搬移，而是产生了无数个组合频率分量，其频谱结构与调制指数 $m$ 有关，这一点与调幅是不同的。

2. 角度调制包含的频谱虽然是无限宽，但略去小于未调高频载波振幅10%以下的边频，可认为调角信号占据的有效带宽为

$$B=2(m_f+1)F=2(\Delta f+F)。$$

3. **调频波**的频带宽度与调制信号频率无关，近似为**恒定带宽调制**，**调相波**的频带宽度随调制信号的频率而变化。

4. 调角波的平均功率与调制前的载波功率相等。调制的过程仅是将原来的载频功率重新分配到各个边频上，而总的功率不变。

	调频波	调相波
瞬时频率	$\omega_f(t) = \omega_c + K_f u_\Omega(t)$	$\frac{d\varphi_P(t)}{dt} = \omega_c + K_P \frac{du_\Omega}{dt}$
瞬时相位	$\varphi_f(t) = \int \omega_f(t) dt = \omega_c t + K_f \int u_\Omega(t) dt$	$\varphi_P(t) = \omega_c t + K_P u_\Omega(t)$
最大频移	$\Delta\omega_m = K_f U_{\Omega m}$	$\Delta\omega_m = K_P \Omega U_{\Omega m}$
最大相移 调制指数	$m_f = \frac{K_f U_{\Omega m}}{\Omega} = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega} = \frac{\Delta f_m}{F}$	$m_P = K_P U_{\Omega m} = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega}$
表达式	$U_m \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$	$U_m \cos(\omega_c t + m_P \cos \Omega t)$

## 5. 实现调频的方法有两类：直接调频与间接调频。

---

直接调频是用调制信号去控制振荡器中的可变电抗元件，使其振荡频率随调制信号线性变化；

间接调频是将调制信号积分后，再对高频载波进行调相，获得调频信号。

- 变容二极管、电抗管、晶体振荡器直接调频
- 相移法——变容二极管调相

直接调频中心频率的频率稳定度低；间接调频时中心频率的频率稳定度高，但难以获得大的频偏，需采用多次倍频、混频加大频偏。

6. 调频波的解调称为鉴频，调相波的解调称为鉴相。

鉴相的主要方法有：

- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器

（自身具有限幅功能）

限幅 → 波形变换（等幅  $u_{FM} \rightarrow u_{AM-FM}$ ）→ 包络检波

限幅 → 波形变换（等幅  $u_{FM} \rightarrow u_{PM-FM}$ ）→ 相位检波

（等幅  $u_{FM} \rightarrow u_{PM-FM} \rightarrow u_{AM-PM-FM}$ ）→ 包络检波）

7. 调制方式的比较  $\begin{cases} \text{调频} \\ \text{调幅} \end{cases} \quad (1)(2)(3)(4)$