

CEC

角度调制与解调 III

Angle Modulation & Demodulation III

2025年6月12日

學而不厭 誨人不倦

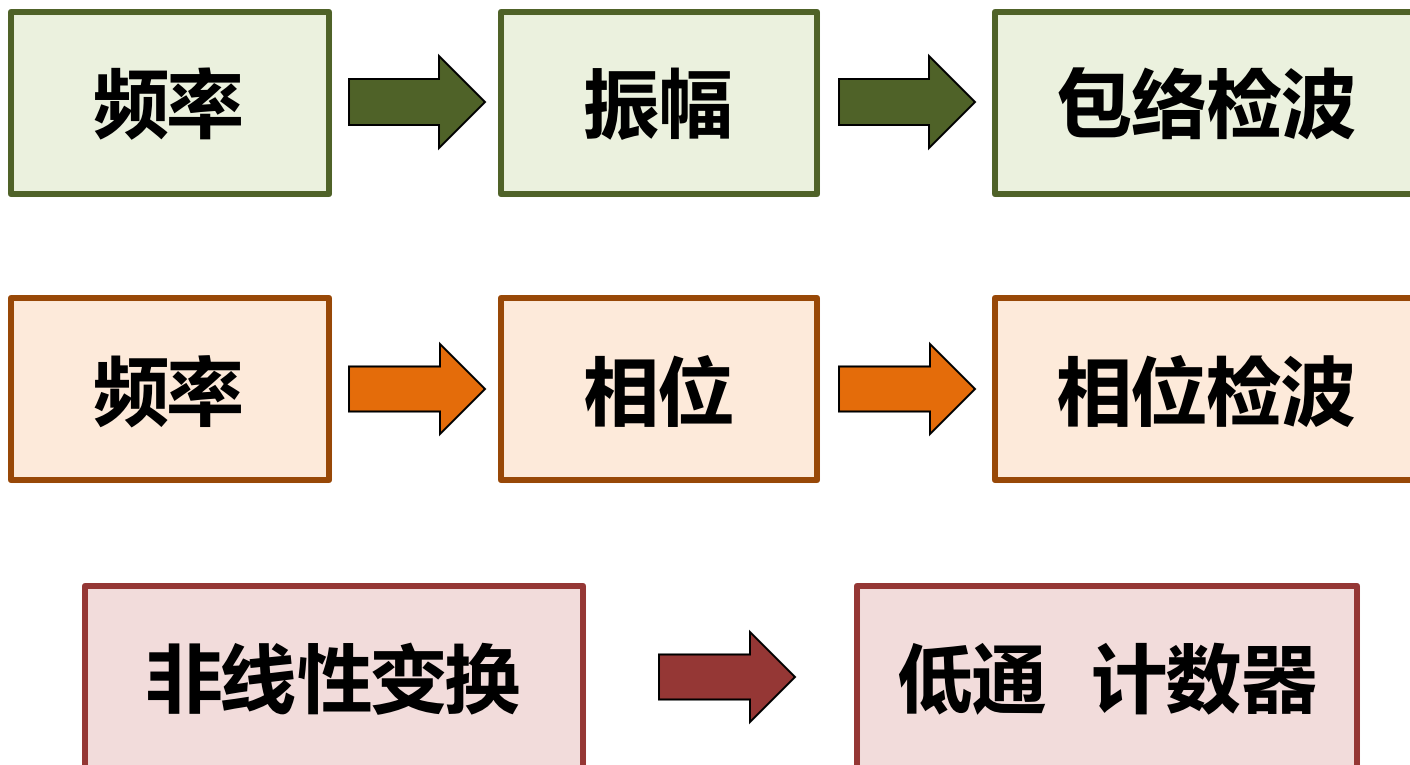


Chapter 8 角度调制与解调

- ➡ §8.1 概述
- ➡ §8.2 调角波的性质
- ➡ §8.3 调频方法概述
- ➡ §8.4 变容二极管调频
- ➡ §8.5 晶体振荡器直接调频
- ➡ §8.6 间接调频:由调相实现调频
- ➡ §8.7 可变延时调频
- ➡ **§8.8 相位鉴频器**
- ➡ §8.9 比例鉴频器
- ➡ §8.10 其他形式的鉴频器

角调波的解调

➤ 概述



角调波的解调

► 时域微分

调频波数学表达式：

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \frac{k_f V_\Omega}{\Omega} \sin \Omega t]$$

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t]$$

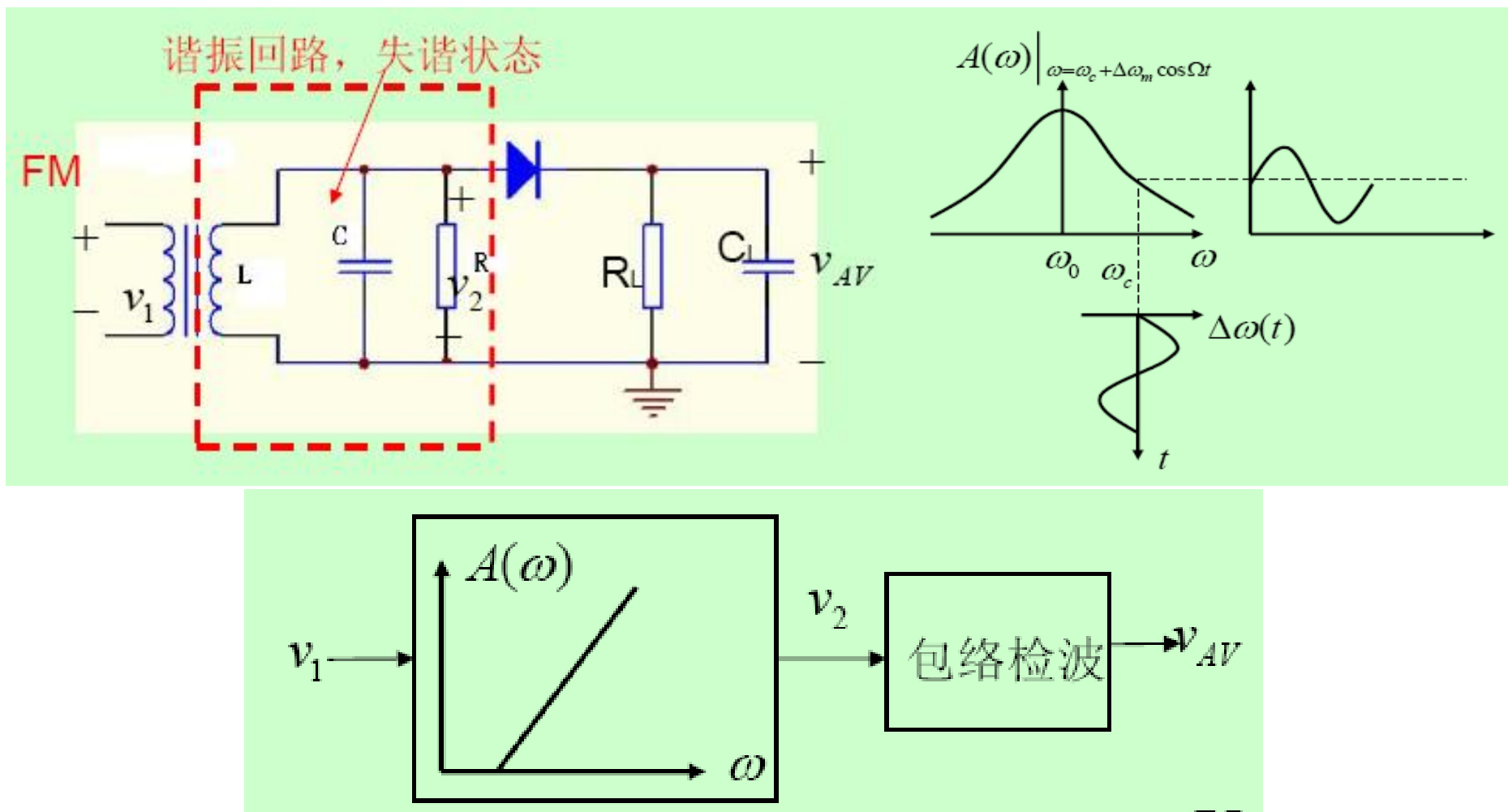
时域直接微分：

$$\begin{aligned} v_o(t) &= \frac{d}{dt} \{A_0 \cos[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t]\} \\ &= -A_0(\omega_0 + \Delta\omega_m \cos \Omega t) \sin[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t] \end{aligned}$$

调幅调频波

角调波的解调

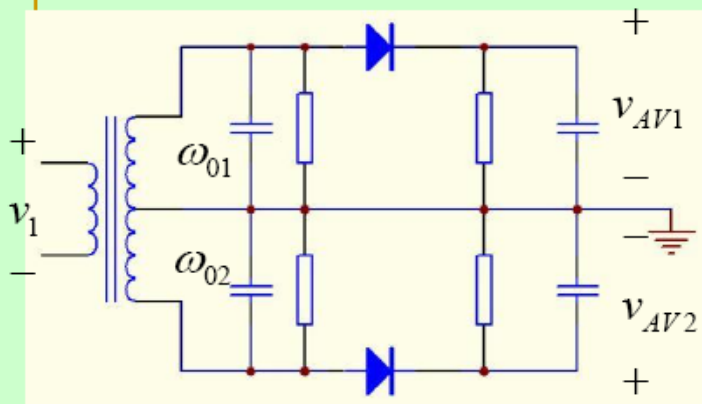
频域微分：单失谐回路鉴频器



角调波的解调

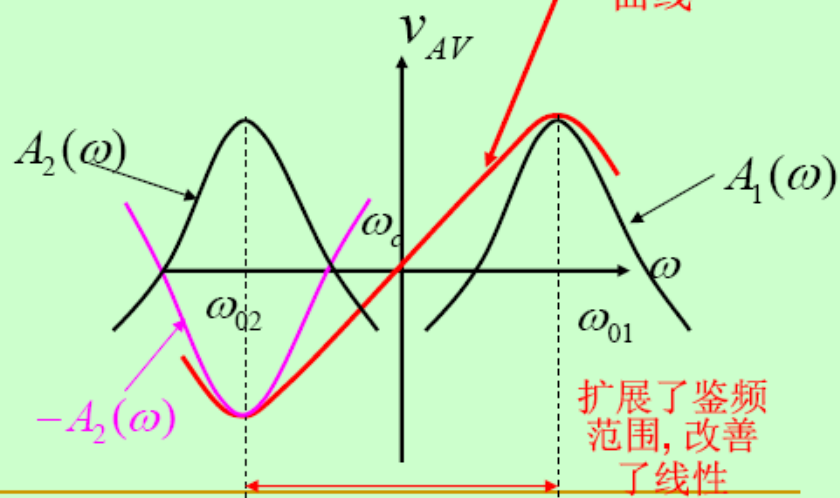
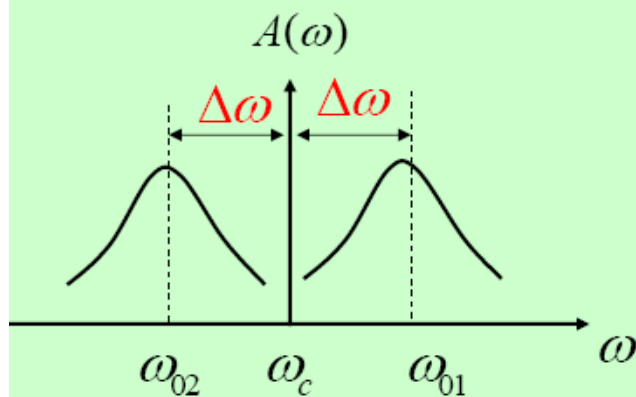
频域微分：双失谐回路鉴频器

■ 双失谐回路鉴频



$$\Delta\omega = \omega_{01} - \omega_c = \omega_c - \omega_{02}$$

$$v_{AV} = v_{AV1} - v_{AV2} = V_{1m} k_d [A_1(\omega) - A_2(\omega)]$$



8.8 相位鉴频器

➤ 1. 工作原理

— 利用回路的相位-频率特性实现调频-调幅波变换，再进行包络检波

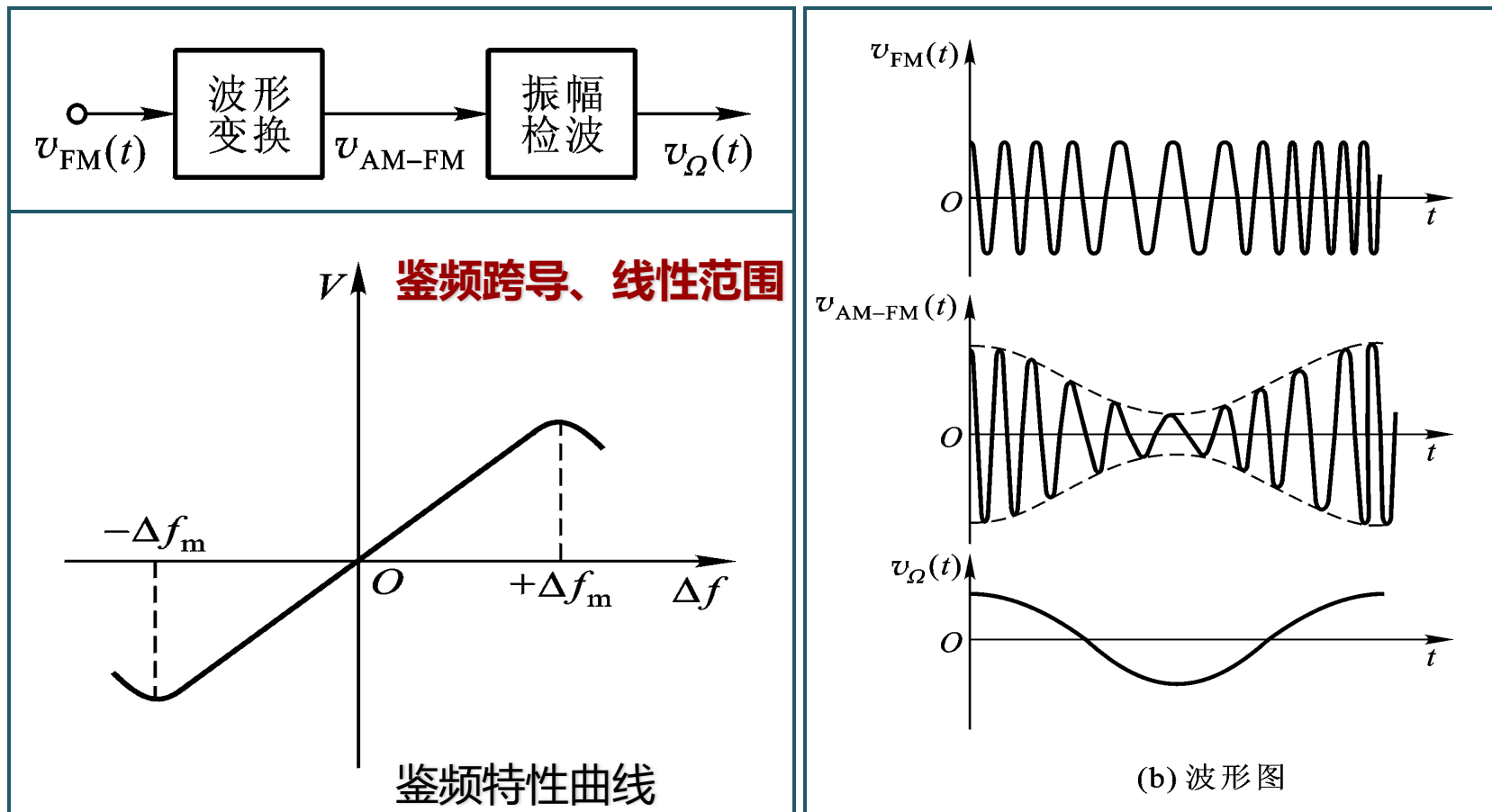
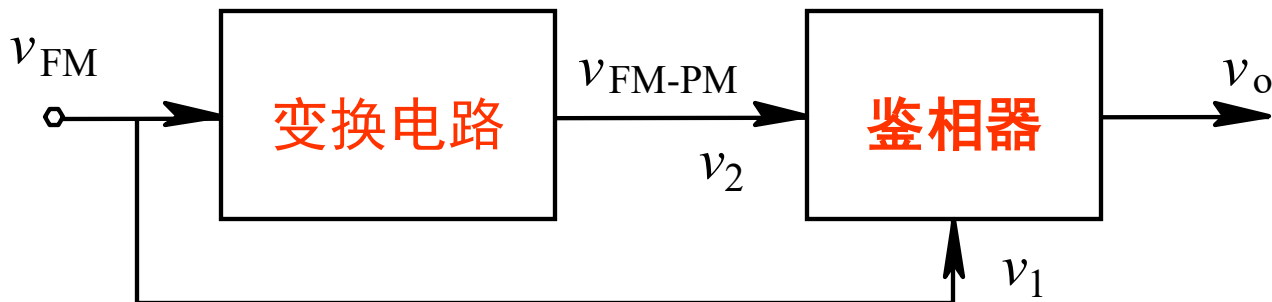


图 8.1.1 利用波形变换电路进行鉴频

8.8 相位鉴频器

➤ 1. 工作原理



$$v_1 = V_1 \cos[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t]$$

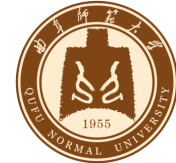
$$v_2 = V_2 \cos[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi(t)]$$

上述两个信号同时作用于鉴相器，鉴相器的输出电压 v_o 是瞬时相位差的函数，即：

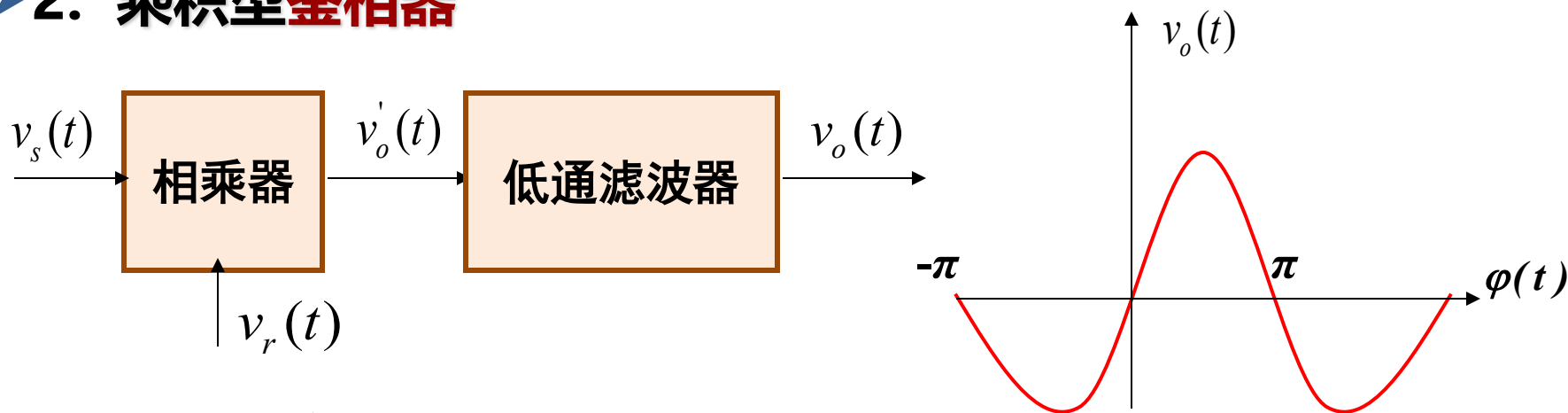
$$v_o = f[\varphi(t)]$$

通常 v_2 为调相波， v_1 为参考信号。与调幅信号的解调类似，也有**乘积型**和**叠加型**两类。

8.8 相位鉴频器



➤ 2. 乘积型鉴相器



设：鉴相器输入PM信号。

$$\text{即： } v_s(t) = V_s \cos[\omega_o t + \varphi(t)] \quad \text{而} \quad \varphi(t) = k_P v_{\Omega}(t)$$

而另一输入信号 $v_r(t)$ 为 $v_s(t)$ 的**同频正交载波**。

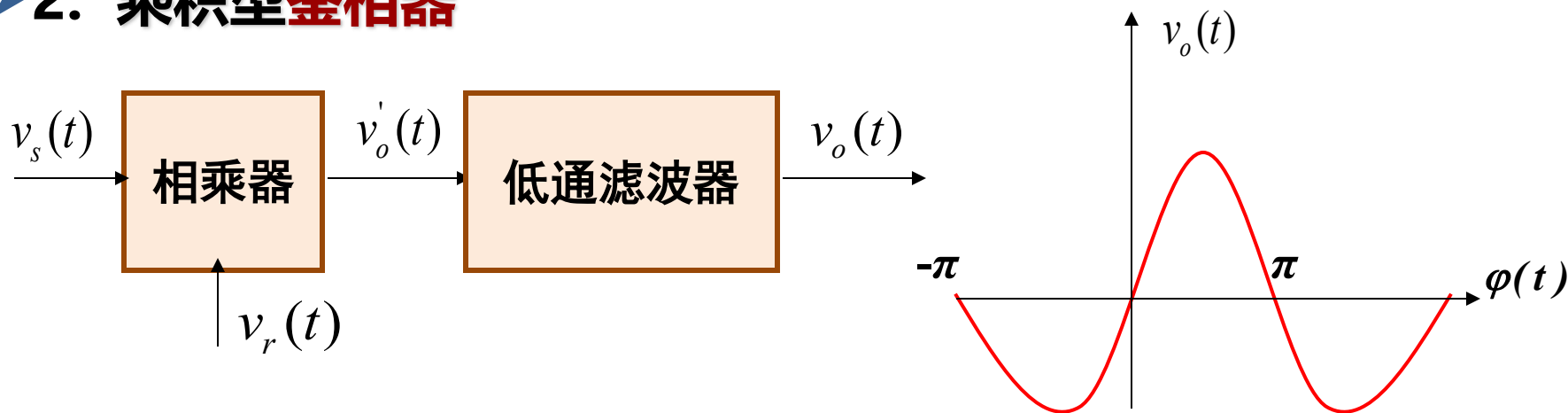
$$\text{即： } v_r(t) = V_r \cos(\omega_o t + \frac{\pi}{2})$$

则相乘器的输出信号 $v_o'(t)$ 为：

$$v_o'(t) = k v_s(t) v_r(t) = \frac{1}{2} k V_s V_r \left\{ \cos(\varphi(t) - \frac{\pi}{2}) + \cancel{\cos[2\omega_o t + \varphi(t) + \frac{\pi}{2}]} \right\}$$

可见：乘积型鉴相器具有正弦形鉴相特性

➤ 2. 乘积型鉴相器



$$v_o'(t) = k v_s(t) v_r(t) = \frac{1}{2} k V_s V_r \left\{ \cos(\varphi(t) - \frac{\pi}{2}) + \cos[2\omega_o t + \varphi(t) + \frac{\pi}{2}] \right\}$$

其中 k 为相乘器的乘积因子。经低通滤波器后，输出电压 $v_o(t)$ 为：

$$v_o(t) = \frac{1}{2} k V_s V_r \cos[\varphi(t) - \frac{\pi}{2}] = \frac{1}{2} k V_s V_r \sin \varphi(t) \quad \text{其中 } \varphi(t) = k_P v_{\Omega}(t)$$

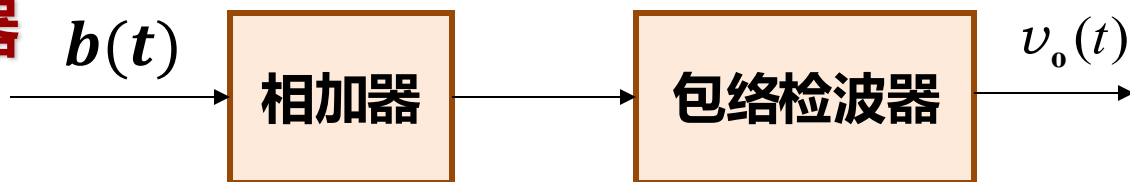
如果满足 $|\varphi(t)| \leq \frac{\pi}{12}$ ，则有 $\sin \varphi(t) \cong \varphi(t)$ 。

即输出电压 $v_o(t)$ 与 $\varphi(t)$ 成线性关系，可实现线性鉴相。

8.8 相位鉴频器

➤ 3. 叠加型相位鉴频器

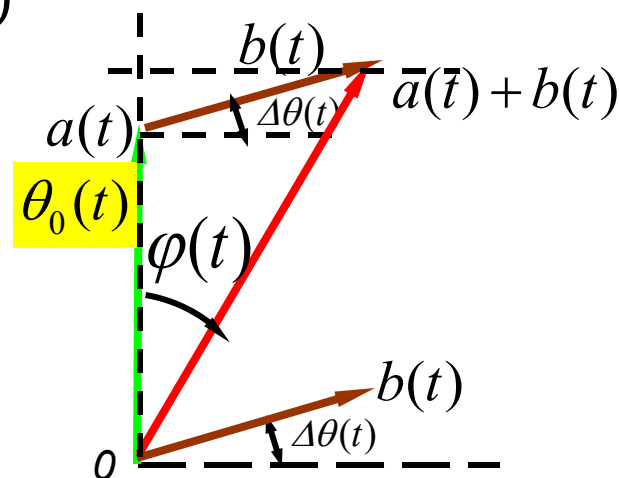
调频信号



$$\begin{aligned} a(t) &= V_0 \cos(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t) \\ &= V_0 \cos \theta_0(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(t) &= V_{bm} \cos[\theta_0(t) + \theta(\omega_0) + \Delta\theta(t)] \\ &= V_{bm} \cos[\theta_0(t) - \frac{\pi}{2} + \Delta\theta(t)] \end{aligned}$$

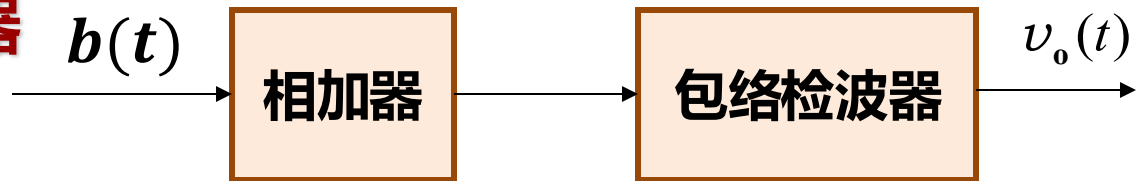
$$a(t) + b(t) = V(t) \cos[\theta_0(t) - \varphi(t)]$$



$$\begin{aligned} V(t) &= \sqrt{[V_0 + V_{bm} \sin \Delta\theta(t)]^2 + [V_{bm} \cos \Delta\theta(t)]^2} \\ &= \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2 + 2V_0 \cdot V_{bm} \sin \Delta\theta(t)} \\ &= \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \sqrt{1 + \frac{2V_0 \cdot V_{bm}}{V_0^2 + V_{bm}^2} \sin \Delta\theta(t)} \end{aligned}$$

8.8 相位鉴频器

➤ 3. 叠加型相位鉴频器



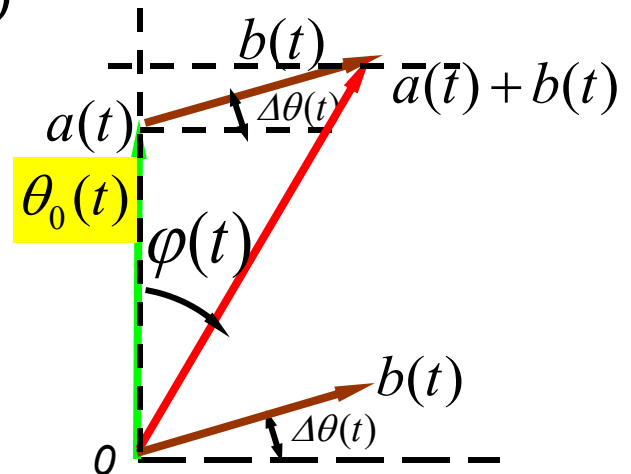
$$V(t) = \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \sqrt{1 + \frac{2V_0 \cdot V_{bm}}{V_0^2 + V_{bm}^2} \sin \Delta\theta(t)} \quad a(t)$$

$$\approx \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \left[1 + \frac{1}{2} M \sin \Delta\theta(t) \right]$$

$$\approx \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \left[1 + \frac{1}{2} M \cdot \Delta\theta(t) \right]$$

当 $|M| \ll 1$, $|\Delta\theta(t)|$ 较小时,

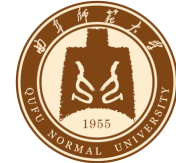
$$\varphi(t) = \arctan \left[\frac{V_{bm} \cos \Delta\theta(t)}{V_0 + V_{bm} \sin \Delta\theta(t)} \right]$$



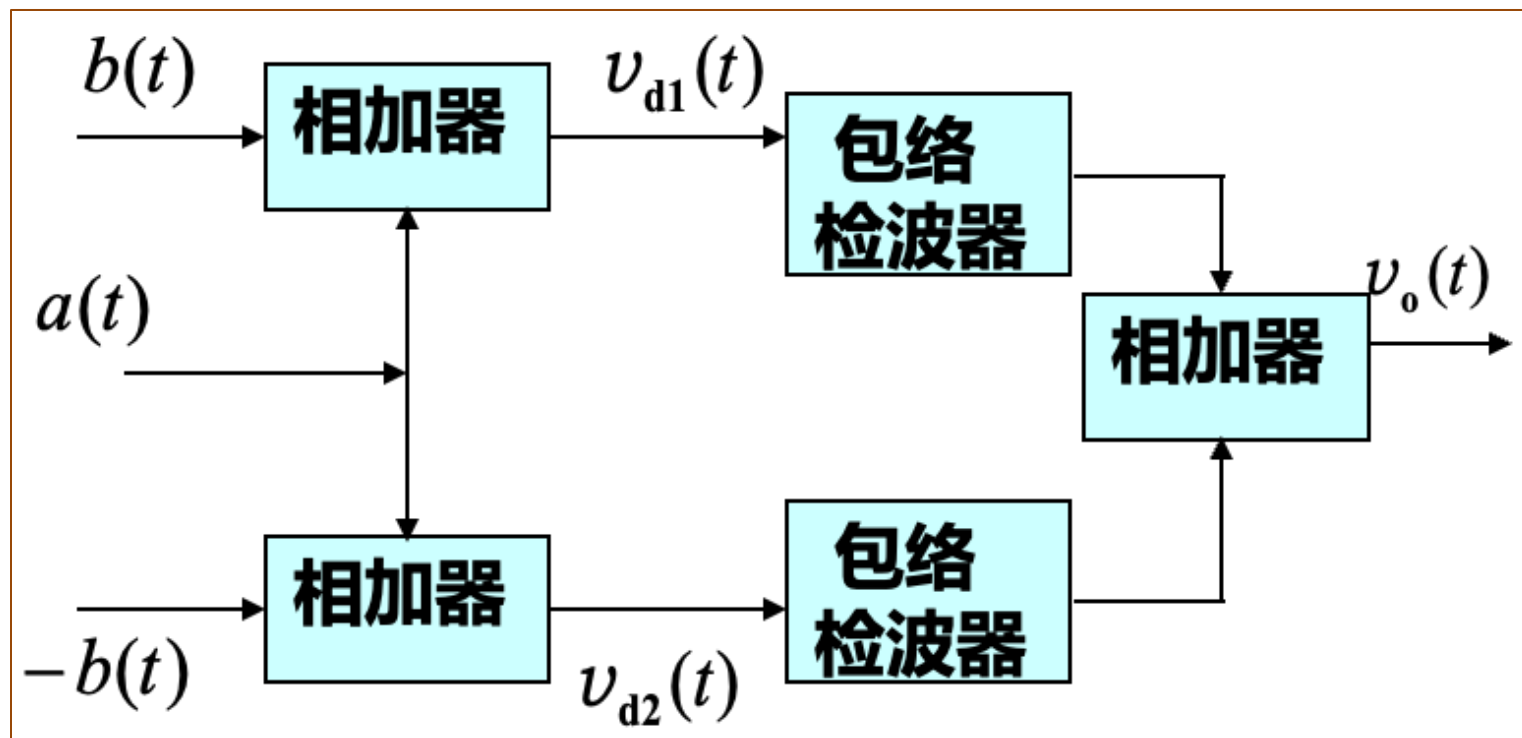
例如 $|\Delta\theta(t)| \leq \frac{\pi}{12}$

上述分析表明, 包络 $V(t)$ 的变化反映 $\Delta\theta$ 的变化,

8.8 相位鉴频器



➤ 3. 叠加型相位鉴频器—平衡鉴相电路

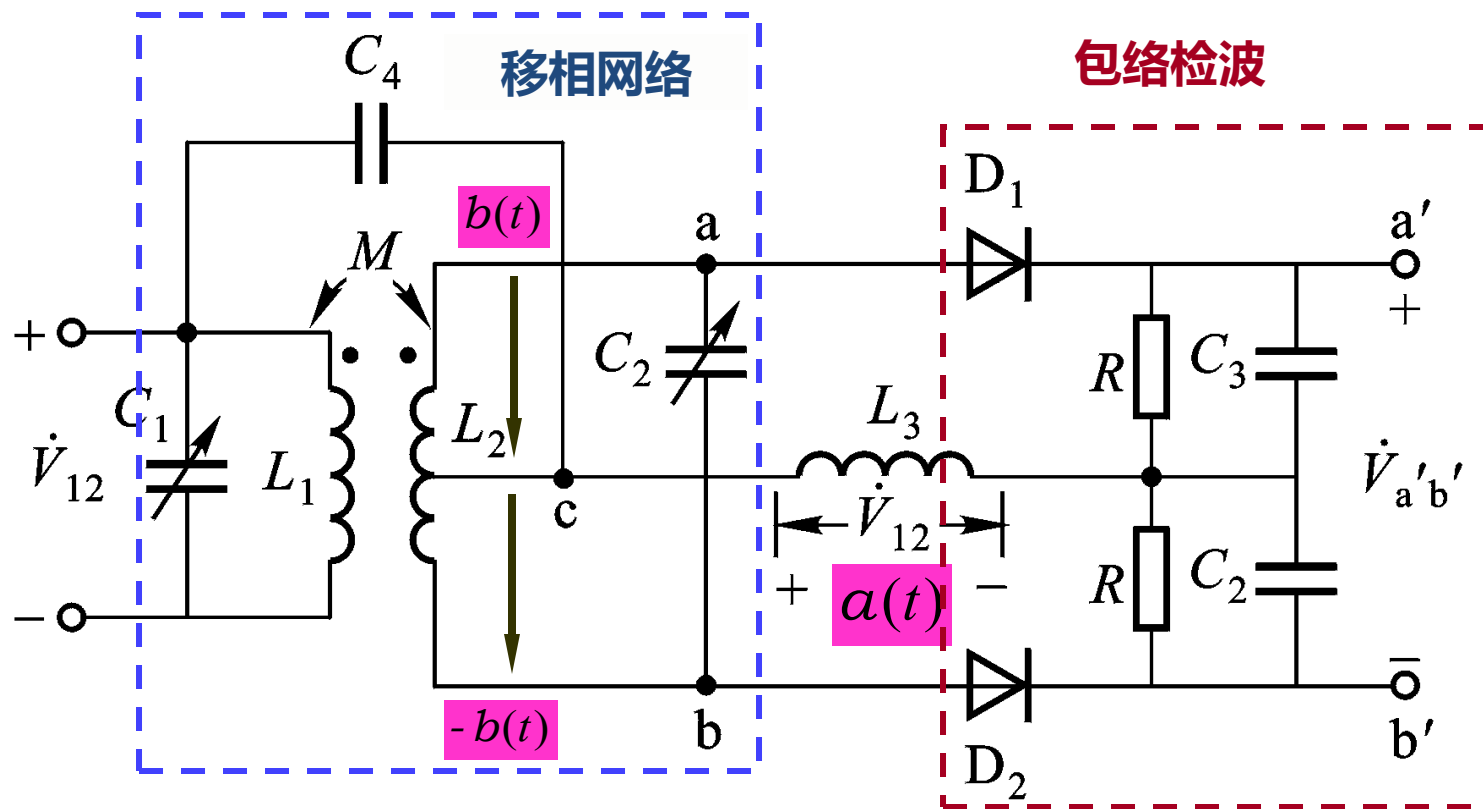


8.8 相位鉴频器

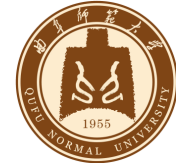


➤ 4. 实现电路

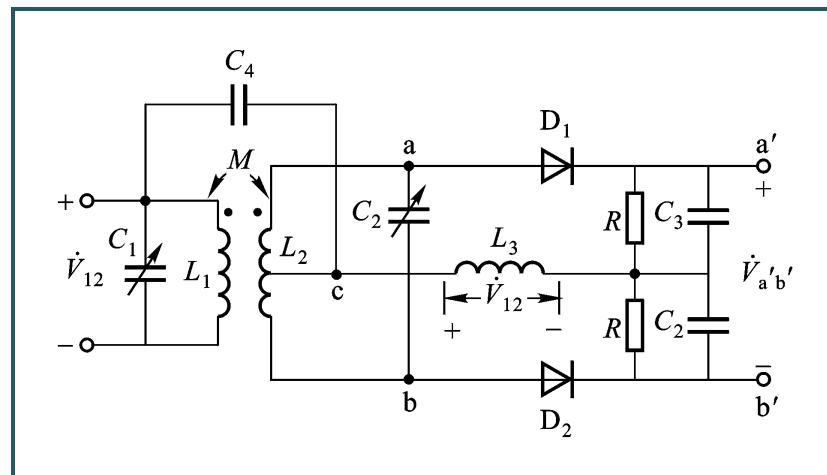
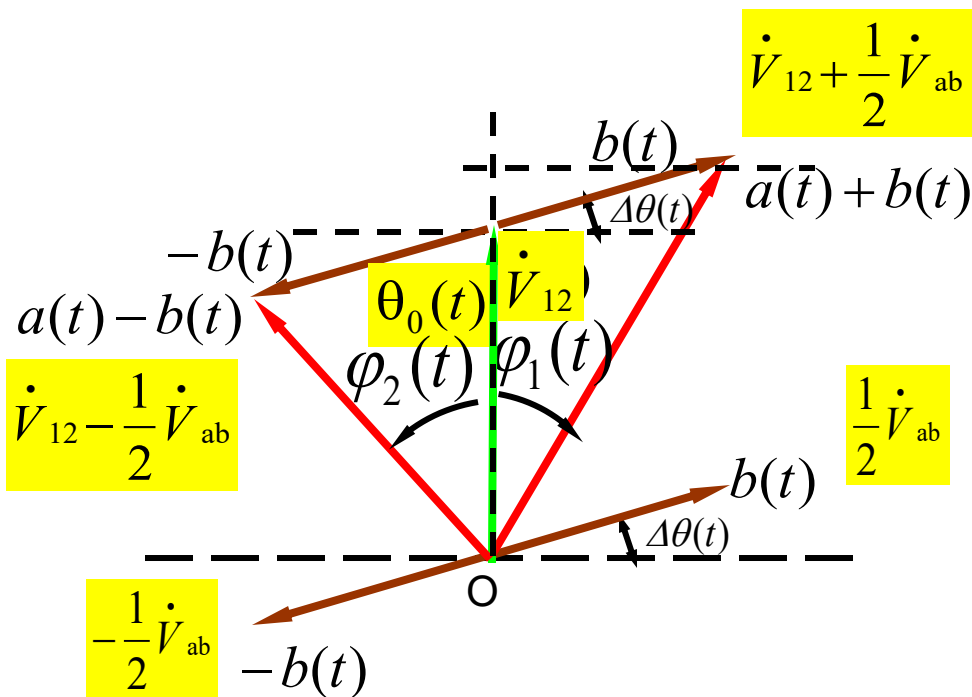
— 利用回路的相位-频率特性实现调频-调幅波变换，再进行包络检波



8.8 相位鉴频器



4. 实现电路



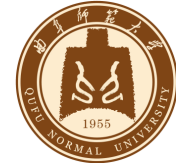
$$\dot{V}_{D1} = \dot{V}_{ac} + \dot{V}_{12} = \frac{1}{2}\dot{V}_{ab} + \dot{V}_{12}$$

$$\dot{V}_{D2} = \dot{V}_{bc} + \dot{V}_{12} = -\frac{1}{2}\dot{V}_{ab} + \dot{V}_{12}$$

$$V_1(t) - V_2(t) = \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \left(\sqrt{1 + \frac{2V_0 \cdot V_{bm}}{V_0^2 + V_{bm}^2} \sin \Delta\theta(t)} - \sqrt{1 - \frac{2V_0 \cdot V_{bm}}{V_0^2 + V_{bm}^2} \sin \Delta\theta(t)} \right)$$

$$V_1(t) - V_2(t) = \sqrt{V_0^2 + V_{bm}^2} \left[M \sin \Delta\theta(t) + \frac{1}{8} M^3 \sin^3 \Delta\theta(t) + \dots \right]$$

8.8 相位鉴频器



➤ 5. 鉴频特性曲线

由该曲线可以看出，耦合很弱（即 η 很小）时，线性范围小，鉴频跨导高。

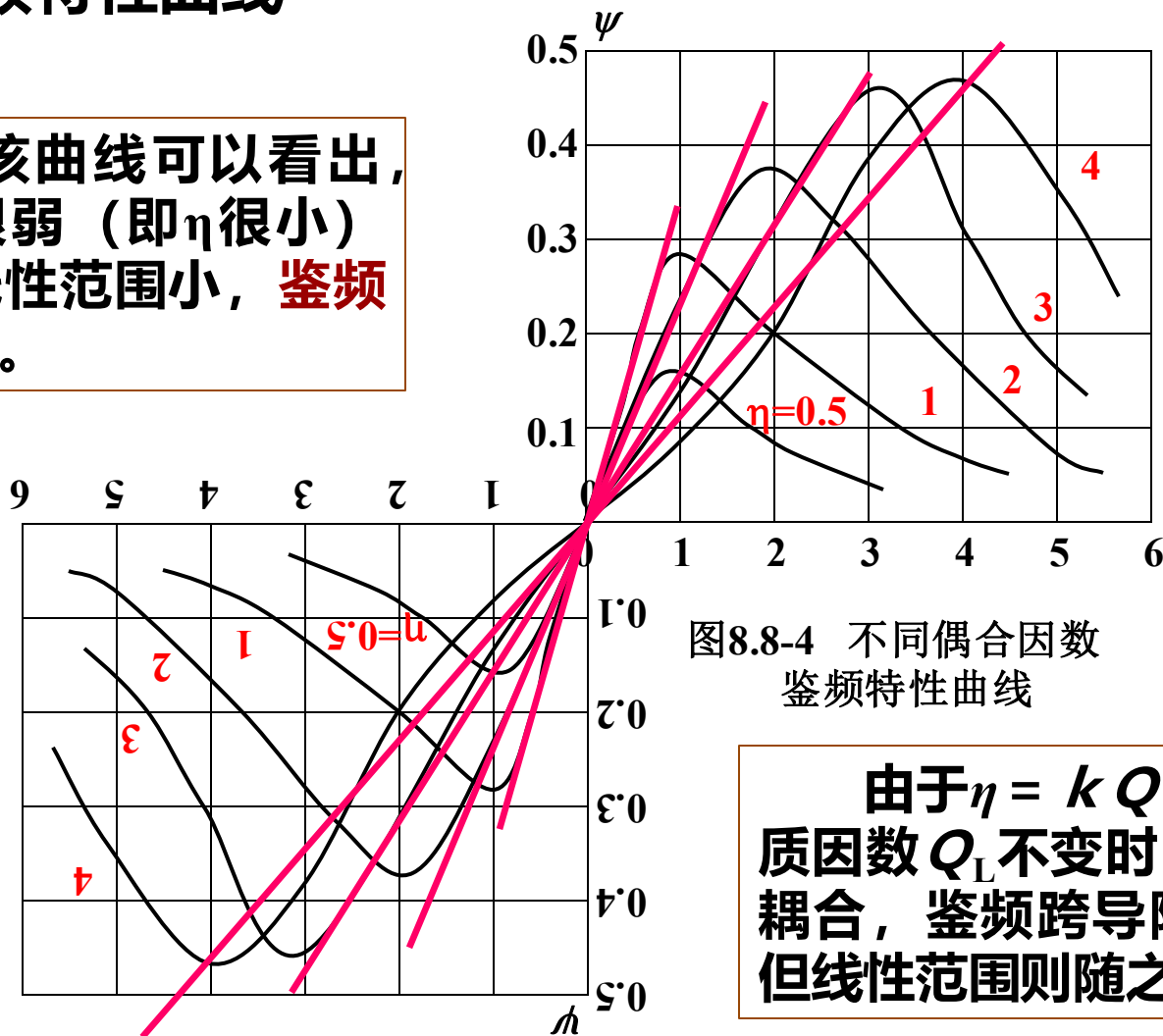


图8.8-4 不同耦合因数
鉴频特性曲线

由于 $\eta = k Q$ ，当回路品质因数 Q_L 不变时，逐渐加强耦合，鉴频跨导随之下降，但线性范围则随之加宽。



Chapter 8 角度调制与解调

- ➡ §8.1 概述
- ➡ §8.2 调角波的性质
- ➡ §8.3 调频方法概述
- ➡ §8.4 变容二极管调频
- ➡ §8.5 晶体振荡器直接调频
- ➡ §8.6 间接调频:由调相实现调频
- ➡ §8.7 可变延时调频
- ➡ §8.8 相位鉴频器
- ➡ §8.9 比例鉴频器
- ➡ §8.10 其他形式的鉴频器

8.9 比例鉴频器



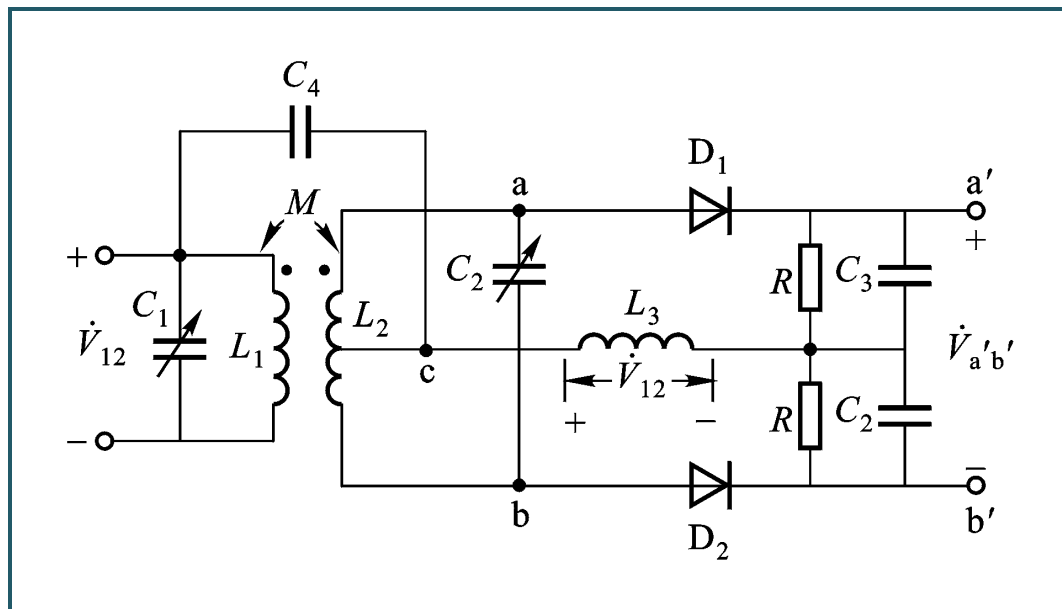
➤ 1. 相位鉴频存在的问题

$$\dot{V}_{D1} = \frac{1}{2} \dot{V}_{ab} + \dot{V}_{12}$$

$$\dot{V}_{D2} = -\frac{1}{2} \dot{V}_{ab} + \dot{V}_{12}$$

$$\dot{V}_o = k_d(\dot{V}_{D1} - \dot{V}_{D2})$$

$$\dot{V}_{D1} + \dot{V}_{D2} = 2\dot{V}_{12}$$



叠加性相位鉴频器

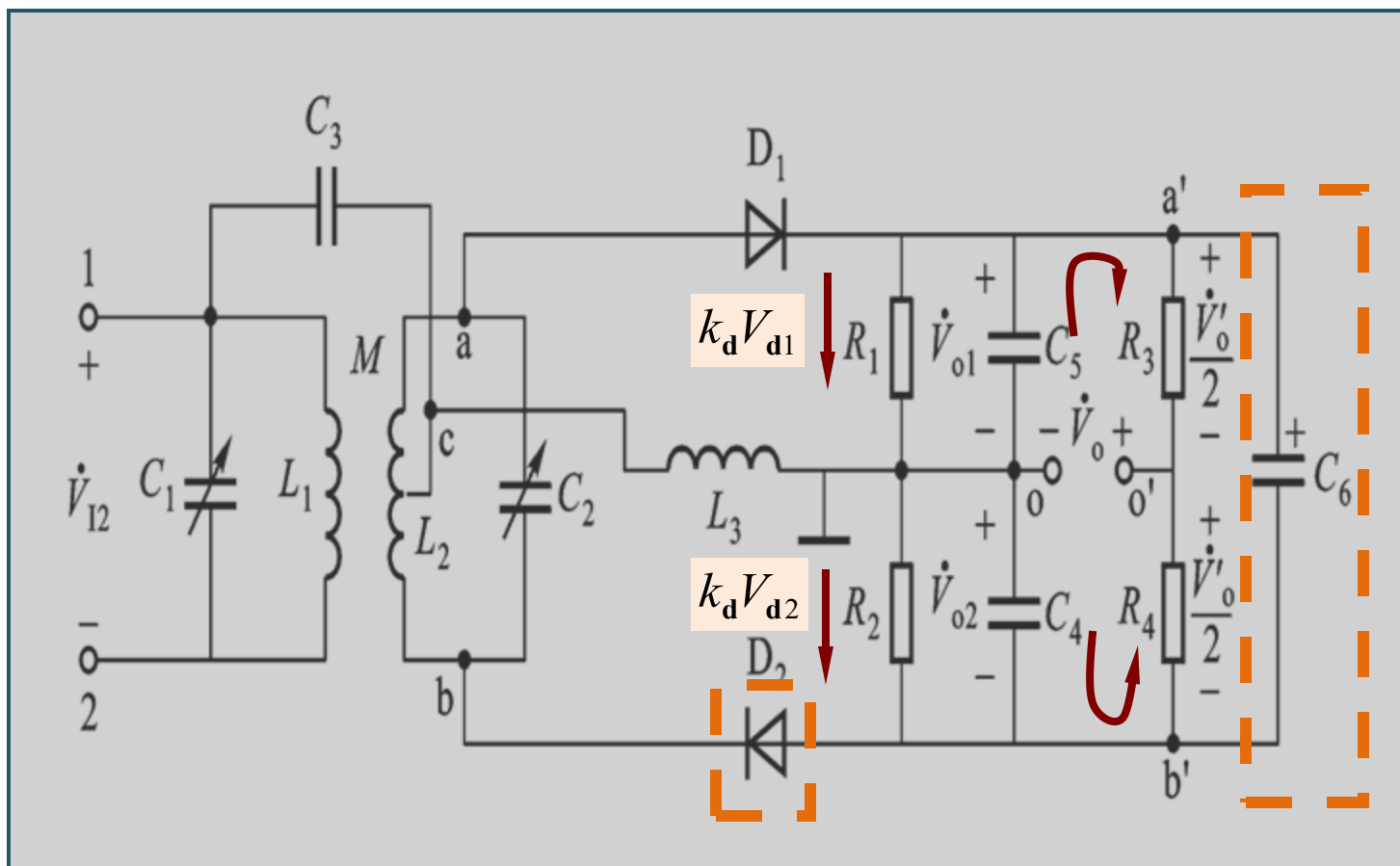
以上分析时假定理想调频波，即输入信号 V_{12} 振幅恒定。

实际中，当噪声、各种干扰以及电路频率特性的不均匀性所引起的输入信号的寄生调幅，都可能直接在相位鉴频器的输出信号中反映出来。

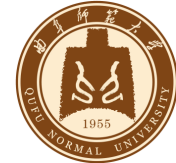
8.9 比例鉴频器



➤ 2. 比例鉴频器



8.9 比例鉴频器



➤ 3. 比例鉴频器工作原理

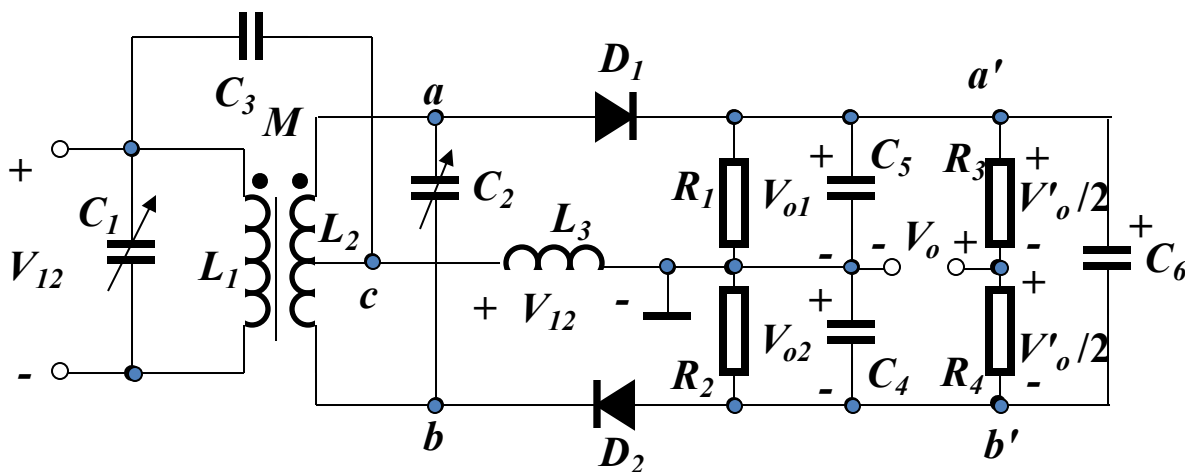


图8.9-1 比例鉴频器原理电路

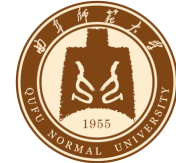
① D_2 二极管反接, $a'b'$ 两端电压不再是差电压, 而是和电压:

$$\dot{V}'_o = \dot{V}_{a'b'} = \dot{V}_{a'o} + \dot{V}_{ob'}$$

② 为了使和电压维持恒定, 在 $a'b'$ 两端接入一个大电容。

③ 鉴频器的输出应该是差电压, 输出 V_o 从 $a'o$ 端输出。

8.9 比例鉴频器



➤ 3. 比例鉴频器工作原理

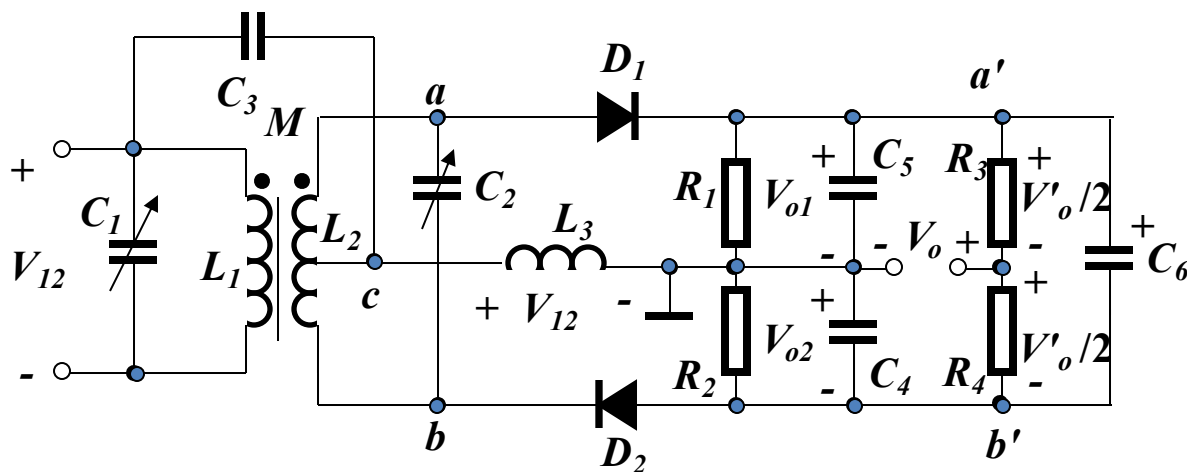


图8.9-1 比例鉴频器原理电路

输出为: $\dot{V}_o = \dot{V}_{o1} - \frac{1}{2}\dot{V}'_o$ 或 $\dot{V}_o = -\dot{V}_{o2} + \frac{1}{2}\dot{V}'_o$

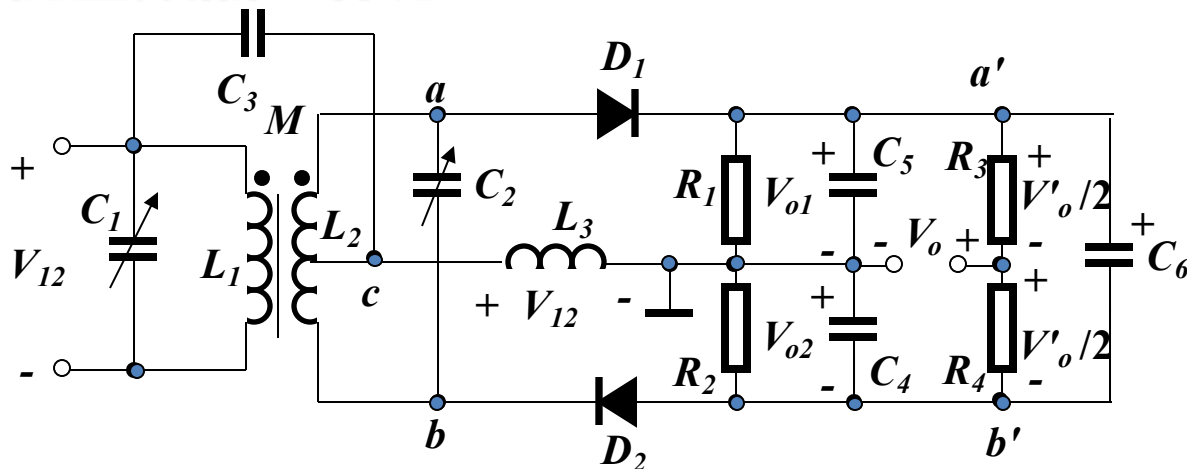
由上两式相加得: $\dot{V}_o = \frac{1}{2}(\dot{V}_{o1} - \dot{V}_{o2})$ 或 $V_{om} = \frac{1}{2}k_d(V_{D1} - V_{D2})$

比例鉴频器的输出恰好等于相位鉴频器输出的一半。

8.9 比例鉴频器



➤ 3. 比例鉴频器工作原理



$$V_{om} = \frac{1}{2} \left[V_{a'b'} - \frac{2V_{a'b'}}{1 + \frac{V_{D1}}{V_{D2}}} \right]$$

$$V_{a'b'} = V_{o1m} + V_{o2m} = \text{常数}$$

$$\frac{V_{o1m}}{V_{o2m}} = \frac{k_{d1}V_{D1}}{k_{d2}V_{D2}} = \frac{V_{D1}}{V_{D2}}$$

鉴频器输出 V_o 不取决于 V_{D1} 和 V_{D2} ，而取决于 V_{D1}/V_{D2} 比值，比例鉴频器这一名称正是由此而来，并有限幅作用。

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**。
3. 了解频率解调的几种方法：**直接微分、频域微分（失谐）、相位鉴频**。
4. **掌握相位鉴频器原理：乘积型、叠加型**。理解相位鉴频器电路工作原理和分析方法；
5. 理解**鉴频/鉴相特性曲线、鉴频跨导、线性范围**的含义。
6. 理解比例鉴频器原理及特点。



Thank You !

Q & A