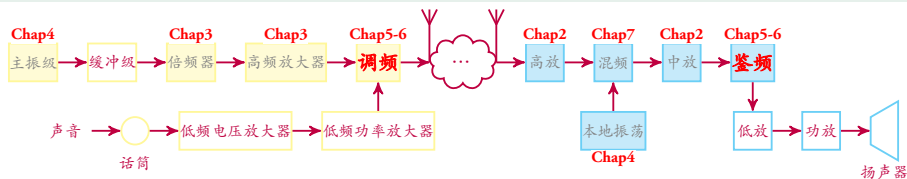


课程主要内容



- ① Chap2 谐振回路 高频电路基础
- ② Chap2 小信号调谐放大器 放大选频
- ③ Chap3 调谐功率放大器 功率效率谐波抑制制度
- ④ Chap3 倍频器
- ⑤ Chap4 正弦波振荡器
- ⑥ Chap5 振幅调制与解调
- ⑦ **Chap6 角度调制与解调**
- ⑧ Chap7 变频器
- ⑨ Chap8 锁相环

- ① 电阻、电容、电感等无源线性元件
- ② 二极管、三极管等有源非线性器件
- ③ LC 谐振回路、基本放大电路、振荡器电路等

着重讨论发送设备和接收设备各单元的工作原理和组成，以及构成发送、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型电路和分析方法。

基本概念、基本原理、基本电路、基本分析方法

通信电子电路

郑海永

zhenghaiyong@gmail.com

课程：<http://vision.ouc.edu.cn/~zhenghaiyong/courses/>

Piazza：<https://piazza.com/ouc.edu.cn/>

中国海洋大学 信息科学与工程学院 电子工程系



本章主要内容¹

- ① 角度调制与解调
- ② 调角波的性质
- ③ 调频信号的产生
- ④ 调频电路
 - ▶ 变容二极管调频电路
 - ▶ 电抗管调频电路
 - ▶ 晶体振荡器调频电路
 - ▶ 调相和间接调频电路
- ⑤ 调频波的解调
 - ▶ 斜率鉴频器
 - ▶ 相位鉴频器
 - ▶ 比例鉴频器
- ⑥ 限幅器
- ⑦ 比较调幅 AM、调频 FM、调相 PM

¹本幻灯片中大部分图来源于中国矿业大学《通信电子电路》精品课程：

<http://jpkc.cumt.edu.cn/txdzdl/>，特此致谢！

目录 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器

目录 II

- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

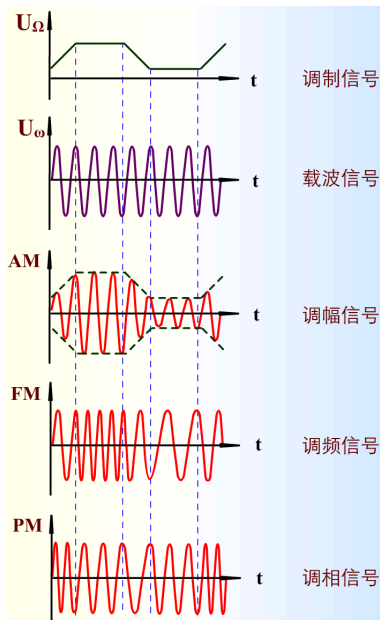
4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较



角度调制

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

- 用调制信号去控制载波信号角度（频率或相位）变化的一种信号变换方式。
- 如果受控的是载波信号频率，则称频率调制（Frequency Modulation, FM）；
- 如果受控的是载波信号相位，则称相位调制（Phase Modulation, PM）。
- 无论 FM 或 PM，载波信号的幅度都不受调制信号影响。

瞬时频率与瞬时相位

- 余弦信号 $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi) = U_m \cos[\theta(t)]$ 可用长度为 U_m 、与横轴夹角为 $\theta(t)$ 的矢量来表示。
- 设矢量作逆时针方向旋转，旋转角速度为 $\omega(t)$ 。

瞬时相位

瞬时相位 $\theta(t) = \int \omega(t)dt + \varphi$

瞬时相位是瞬时频率的积分

瞬时频率

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

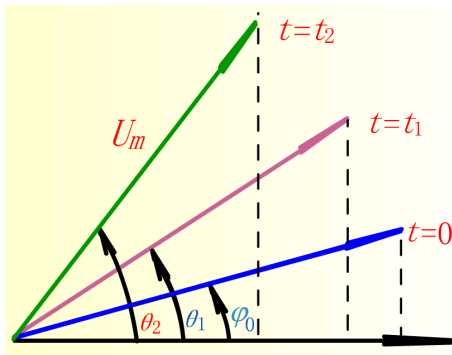
瞬时频率是瞬时相位的导数

$$u(t) = U_m \cos[\theta(t)] =$$

$$U_m \cos \left[\int \omega(t) dt + \varphi \right]$$

无论角频率的变化或相角的变化都可以归结为载波角度 $\theta(t)$ 的变化

⇒ 角度调制



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

① 调频及其数学表达式

单频调制

设调制信号为单一频率的余弦波： $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$

载波信号为： $u_c(t) = U_m \cos \omega_c t$

调频时，载波高频振荡的**瞬时频率**随调制信号 $u_{\Omega}(t)$ 呈线性变化：

$$\omega(t) = \omega_c + K_f u_{\Omega}(t) = \omega_c + \Delta\omega(t) = \omega_c + \Delta\omega \cos \Omega t$$

载波高频振荡的**瞬时相位**：

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t = \omega_c t + m_f \sin \Omega t$$

调频信号： $u_{FM}(t) = U_m \cos \theta(t) = U_m \cos (\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$

- 频偏/频移 $\Delta\omega(t) = K_f u_{\Omega}(t) = K_f U_{\Omega m} \cos \Omega t$
- **最大频偏** $\Delta\omega = |\Delta\omega(t)|_{\max} = K_f U_{\Omega m}$
- **调频指数** (**最大相移**) $m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ 可以大于 1

② 调相及其数学表达式

单频调制

设调制信号为单一频率的余弦波： $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$

载波信号为： $u_c(t) = U_m \cos \omega_c t$

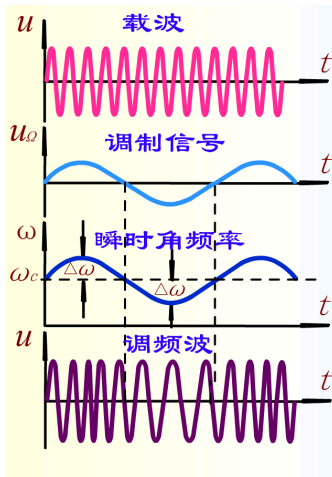
调相时，载波高频振荡的**瞬时相位**随调制信号呈线性变化：

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \omega_c t + K_p u_{\Omega t} = \omega_c t + \Delta\theta(t) \\ &= \omega_c t + K_p U_{\Omega m} \cos \Omega t = \omega_c t + m_p \cos \Omega t\end{aligned}$$

调相信号： $u_{PM}(t) = U_m \cos \theta(t) = U_m \cos (\omega_c t + m_p \cos \Omega t)$

- 相偏/相移 $\Delta\theta(t) = K_p u_{\Omega}(t) = K_p U_{\Omega m} \cos \Omega t$
- **调相指数** (**最大相移**) $m_p = K_p U_{\Omega m}$
- **最大频偏** $\Delta\omega = K_p \left| \frac{du_{\Omega}(t)}{dt} \right|_{\max} = m_p \Omega = K_p U_{\Omega m} \Omega$

调频与调相波形



$$u = U_m \cos \omega_c t$$

$$u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$$

$$\omega = \omega_c + K_f U_\Omega \cos \Omega t$$

$$= \omega_c + \Delta\omega \cos \Omega t$$

$$u = U_m \cos \left(\omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right)$$

$$= U_m \cos (\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$$

调频与调相波形

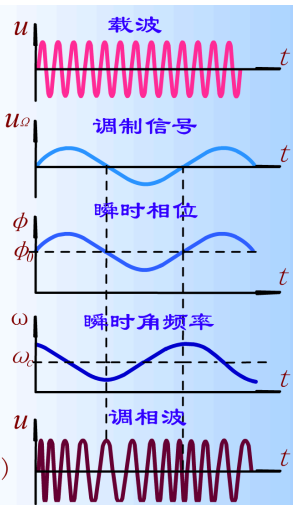
$$u = U_m \cos \omega_c t$$

$$u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$$

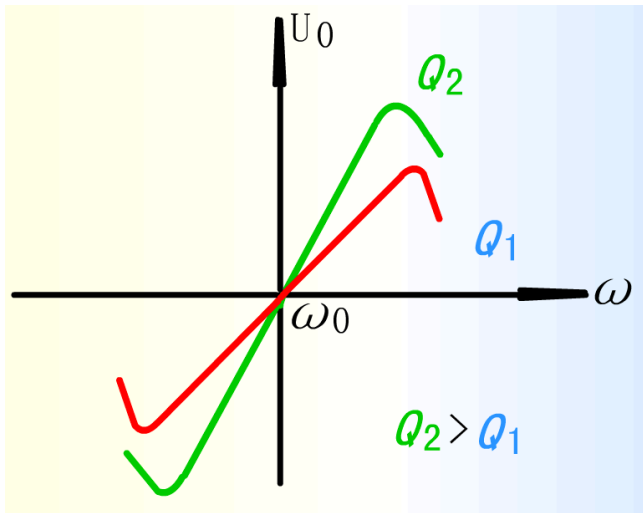
$$\begin{aligned} \phi(t) &= \omega_c t + K_p U_\Omega \cos \Omega t \\ &= \omega_c t + m_p \cos \Omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \omega_c - m_p \Omega \sin \Omega t \\ &= \omega_c - \Delta \omega_p \sin \Omega t \end{aligned}$$

$$u = U_m \cos(\omega_c t + m_p \cos \Omega t)$$



调频与调相波形



	调频信号	调相信号
瞬时频率	$\omega(t) = \omega_c + K_f u_{\Omega}(t) = \omega_c + \Delta\omega(t)$	$\omega(t) = \omega_c + K_p \frac{du_{\Omega}(t)}{dt}$
瞬时相位	$\theta(t) = \omega_c t + K_f \int u_{\Omega}(t) dt$	$\theta(t) = \omega_c t + K_p u_{\Omega}(t) = \omega_c t + \Delta\theta(t)$
最大频偏	$\Delta\omega = K_f u_{\Omega}(t) _{\max} = K_f U_{\Omega m}$	$\Delta\omega = K_p \left \frac{du_{\Omega}(t)}{dt} \right _{\max}$
最大相移	$m_f = K_f \left \int u_{\Omega}(t) dt \right _{\max} = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$	$m_p = K_p u_{\Omega}(t) _{\max} = K_p U_{\Omega m}$
调制指数	调频指数 m_f	调相指数 m_p
表达式	$u_{FM}(t) = U_m \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$	$u_{PM}(t) = U_m \cos(\omega_c t + m_p \cos \Omega t)$

③ 调频与调相的关系

相位比较

- 调频与调相在相同调制信号作用下在相位上相差 90°

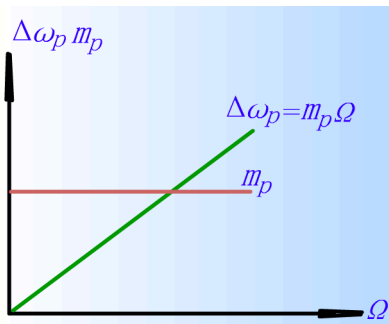
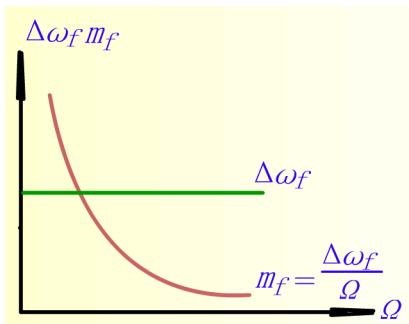
调制指数

- 调频指数 $m_f = \frac{\Delta\omega_f}{\Omega} = \frac{K_f U_{\Omega m}}{\Omega}$ 与调制信号振幅成正比、与调制角频率成反比
- 调相指数 $m_p = K_p U_{\Omega m}$ 与调制信号的振幅成正比、而与调制频率无关

最大频偏

- 调频最大频偏 $\Delta\omega_f = K_f U_{\Omega m}$ 与调制信号的振幅成正比、与调制频率无关
- 调相最大频偏 $\Delta\omega_p = m_p \Omega = K_p U_{\Omega m} \Omega$ 与调制信号振幅成正比、还与调制角频率成正比

③ 调频与调相的关系



④ 调角波的频谱与有效频带宽度

调频波与调相波形式类似因此频谱也类似（以调频波为例）

$$\begin{aligned}
 u(t) &= U_m \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t) \\
 &= U_m [\cos \omega_c t \cos(m_f \sin \Omega t) - \sin \omega_c t \sin(m_f \sin \Omega t)] \\
 &= U_m [J_0(m_f) \cos \omega_c t \\
 &\quad + J_1(m_f) \cos(\omega_c + \Omega)t - J_1(m_f) \cos(\omega_c - \Omega)t \\
 &\quad + J_2(m_f) \cos(\omega_c + 2\Omega)t - J_2(m_f) \cos(\omega_c - 2\Omega)t \\
 &\quad + \cdots]
 \end{aligned}$$

$$\cos(m_f \sin \Omega t) = J_0(m_f) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m_f) \cos 2n\Omega t$$

$$\sin(m_f \sin \Omega t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(m_f) \sin(2n+1)\Omega t$$

$J_n(m_f)$ 是以 m_f 为参量的 n 阶第一类贝塞尔函数

④ 调角波的频谱与有效频带宽度

调频波与调相波形式类似因此频谱也类似（以调频波为例）

$$u(t) = U_m [J_0(m_f) \cos \omega_c t + J_1(m_f) \cos (\omega_c + \Omega)t - J_1(m_f) \cos (\omega_c - \Omega)t + J_2(m_f) \cos (\omega_c + 2\Omega)t - J_2(m_f) \cos (\omega_c - 2\Omega)t + \cdots]$$

$J_n(m_f)$ 是以 m_f 为参量的 n 阶第一类贝塞尔函数

- 一个调频波除了载波频率 ω_c 外，还包含无穷多的边频，相邻边频之间的频率间隔仍是 Ω 。
- 每一个分量的幅度等于 $U_m J_n(m_f)$ 。
- 理论上调角信号的边频分量无限多 $\Rightarrow$ 频谱无限宽
- 工程上将振幅小于载波振幅 10% 的边频分量忽略不计 $\Rightarrow$ 有效频带宽度 $B \approx 2(m+1)F$ ($m > 1$)

④ 调角波的频谱与有效频带宽度

- 调频波有效频带宽度 $B_f \approx 2(m_f + 1)F = 2(\Delta f + F)$ ($m_f > 1$)
- 调相波有效频带宽度 $B_p \approx 2(m_p + 1)F$ ($m_p > 1$)
- 当 $m < 1$ 时, 调角波有效频带宽度 $B \approx 2F$ 。

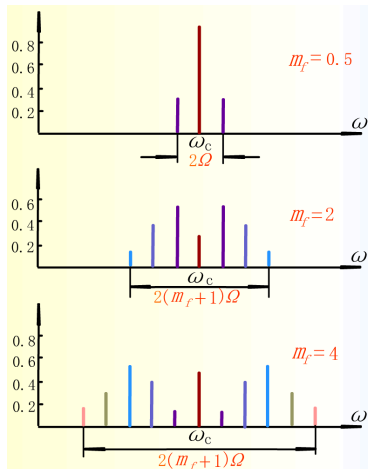
⑤ 调角信号频谱与调制信号的关系

调频信号

$$B_f \approx 2(m_f + 1)F = 2(\Delta f + F) \quad (m_f > 1)$$

如果保持 Ω 固定, 改变 m_f 时, 调频信号频谱如右图所示。

- 当 m_f 增大时 (即调制信号加强时), 边频数目增多, 频带加宽。
- 当 $m_f < 1$ 时, 调频波频谱成分与调幅波相同 $B_f \approx 2F$ 。

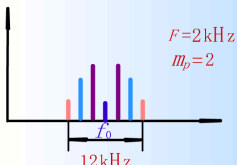
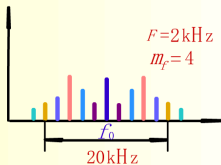
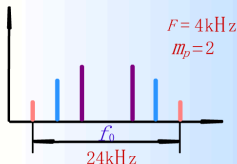
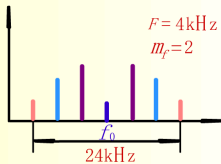


⑤ 调角信号频谱与调制信号的关系

调频信号

$$B_f \approx 2(m_f + 1)F = 2(\Delta f + F) \quad (m_f > 1)$$

$m_f = \frac{\Delta \omega_f}{\Omega}$
 调制信号强度固定而信号频率改变相当于最大频移 $\Delta \omega_f$ 固定而 Ω 改变随 Ω 的增大 m_f 减小, 边数减少, $B_f = 2(m_f + 1) \frac{\Omega}{2\pi}$ 稍有加宽。



$$m_p = K_p U_\Omega$$

调制信号强度固定, 只改变 Ω 相当于 m_p 不变, 调相波的边频数不变, 而频带宽度 $B_p = 2(m_p + 1) \frac{\Omega}{2\pi}$ 随调制信号频率成比例的改变。

⑤ 调角信号频谱与调制信号的关系

调相信号

$$B_p \approx 2(m_p + 1)F \quad (m_p > 1)$$

- 调相指数 $m_p = K_p U_{\Omega m}$ 只与调制信号强度成正比、而与调制角频率无关。
- 调制信号强度不变，只改变 Ω 时，相当于 m_p 不变，则调相波边频数不变，而有效频带宽度 B_p 随调制信号频率成比例加宽。

⑤ 调角信号频谱与调制信号的关系

为什么收音机中只有 FM 而没有 PM？

- 从所占频带的利用率来讲，调相波不如调频波好。
- 因为实际的调制信号包含有许多频率成分，所以调相波所占的频带变化就很大。
- 载频的选取对发射机、接收机通频带要求等都是根据频带最宽的情况而定，这对于调制频率低的情况显然很不经济。
- 因此，调相不如调频应用广，一般只作为产生调频波的一种间接手段来应用。
- 在最大频偏不变的情况下，当调制信号的频率变化时，调频信号的带宽基本不变，而调相信号的带宽变化比较明显。调频可认为是**恒定带宽的调制**。

⑥ 调角波的功率

$$\begin{aligned}
 P_{av} &= \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R_L} [J_0^2(m) + 2J_1^2(m) + 2J_2^2(m) + \cdots + 2J_n^2(m) + \cdots] \\
 &= \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R_L}
 \end{aligned}$$

- 调频波和调相波的平均功率与调幅波一样，也为载波功率和各边频功率之和。
- 由于调频和调相的幅度不变，所以调角波在调制后总的功率不变，只是将原来载波功率中的一部分转入边频中去。
- 所以载波成分的系数 $J_0(m)$ 小于 1，表示载波功率减少了。
- 调制过程并不需要外界供给边频功率，只是高频信号本身载频功率与边频功率的重新分配。

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

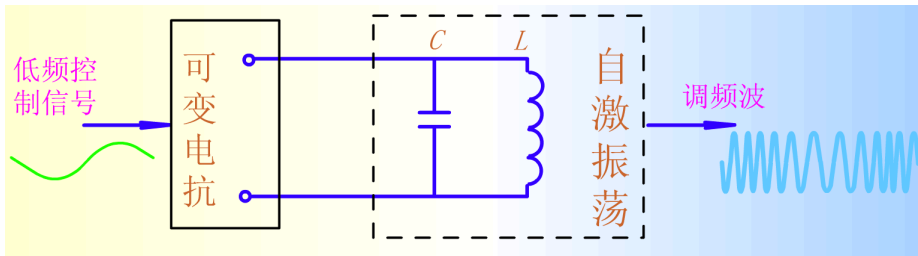
5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

调频方法

调频就是用调制电压去控制载波的频率：直接调频和间接调频

直接调频



- 用调制电压直接去控制载频振荡器的频率以产生调频信号。
- 被控电路是LC振荡器，在振荡回路中加入可变电抗并用低频调制信号去控制可变电抗的参数即可产生振荡频率随调制信号变化的调频波。
- 可变电抗元件的类型很多：变容二极管、电抗管、晶体振荡器等。

调频方法

调频就是用调制电压去控制载波的频率：直接调频和间接调频

间接调频

- 保持振荡器的频率不变，而用调制电压去改变载波输出的相位（调相）。
- 间接调频，就是先进行调相，再由调相变为调频。

调频电路的性能指标

调制特性

$$\frac{\Delta f}{f_c} = f(u_\Omega)$$

理想的调频电路应使 Δf 随 u_Ω 成正比改变（线性调频），应避免非线性失真。

调制灵敏度

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta u}$$

S 越大，调制信号的控制作用越强，越容易产生大频偏的调频信号。

最大频偏

$$\Delta f_m$$

通常要求 Δf_m 的数值在整个波段内保持不变。

载波频率稳定度

$$\text{载波频率稳定度} = \frac{\Delta f}{f_c} / \text{时间间隔}$$

调频电路不仅要满足一定的频偏要求，振荡中心频率必须保持足够高的频率稳定度。

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

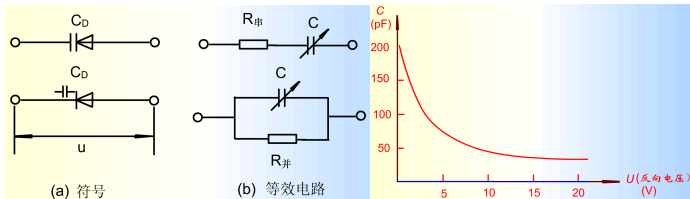
- 概述

- 5 调幅调频调相

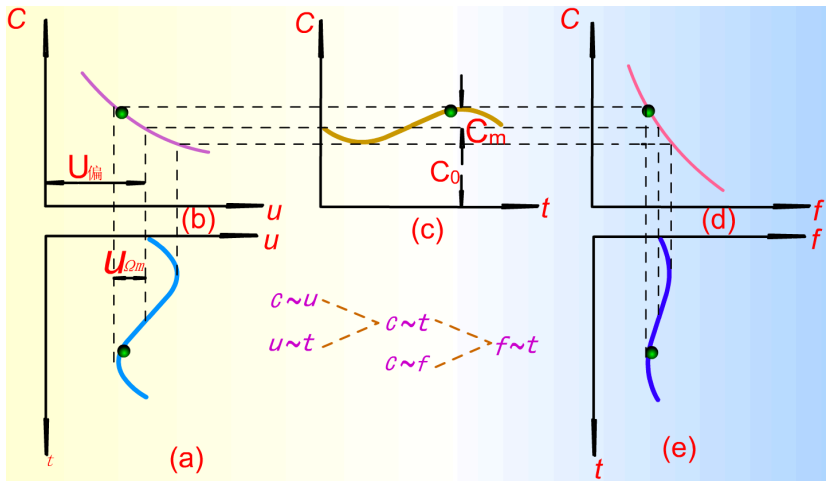
- 调制方式的比较

① 变容二极管

- 利用半导体 PN 结的结电容随外加反向电压而变化的特性所制成的一种半导体二极管。
- 电压控制可变电抗元件 (C_D 代表二极管的电容, $R_{串}$ 或 $R_{并}$ 代表串联或并联的等效损耗电阻且由于二极管正常工作于反向状态则 $R_{并}$ 很大而 $R_{串}$ 很小。)
- 变容二极管的变容特性: $C = A(U - U')^{-n}$ (A 决定于变容二极管所用半导体的介电常数、杂质浓度和结的类型; U' 为 PN 结的势垒电压 (0.7V 左右); U 为外加反偏压; n 为电容变化系数。)



② 变容二极管调频原理



② 变容二极管调频原理

- 变容二极管上加一固定反向直流偏压 $U_{\text{偏}}$ 和调制电压 u_{Ω} ；
- 变容二极管电容量 C 将随 u_{Ω} 改变，通过二极管的变容特性可以找出电容 C 随时间的变化曲线；
- 电容 C 由两部分组成（固定值和变化值）： $C = C_0 + C_m \cos \Omega t$
- 则 LC 谐振电路的谐振频率：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_m \cos \Omega t)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0\left(1 + \frac{C_m}{C_0} \cos \Omega t\right)}}$$

- 当 $\frac{C_m}{C_0} \ll 1$ 时：

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \left(1 - \frac{1}{2} \times \frac{C_m}{C_0} \cos \Omega t\right) = f_c - \frac{1}{2}f_c \frac{C_m}{C_0} \cos \Omega t = f_c + \Delta f$$

- 中心频率（载频） $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$ 是 $C_m = 0$ 时由 L 和固定电容 C_0 所决定的谐振频率；
- $\Delta f = -\frac{1}{2}f_c \frac{C_m}{C_0} \cos \Omega t$ 是频率的变化部分（频偏 $\frac{1}{2}f_c \frac{C_m}{C_0}$ ）；
- 频率 f 在随调制电压 u_{Ω} 而变从而实现调频。

② 变容二极管调频原理

- ① 当调制电压 u_{Ω} 加在谐振回路两端的变容二极管上,
- ② 使加在变容二极管上的反向偏压受 u_{Ω} 所控制,
- ③ 从而使得变容二极管的结电容 C_d 受 u_{Ω} 控制,
- ④ 则回路总电容 C 也要受 u_{Ω} 控制,
- ⑤ 最后使得振荡器振荡频率受 u_{Ω} 控制,
- ⑥ 即瞬时频率 f 随 u_{Ω} 的变化而变化。

② 变容二极管调频原理

调制失真

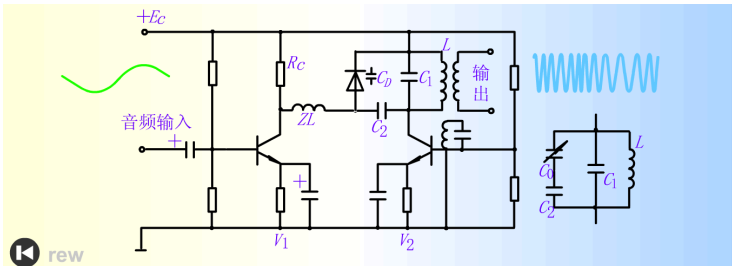
- $C-u$ 和 $C-f$ 两条曲线并不是成正比 $\Rightarrow f-t$ 曲线形状将不与 $u_{\Omega}-t$ 曲线完全一致 (调制失真)
- 失真的程度不仅与变容二极管的变容特性有关而且还决定于调制电压的大小
- 调制电压愈大则失真愈大
- 为减少失真调制电压不宜过大
- 但也不宜太小因为太小则频移太小
- 一般取调制电压比偏压小一半多： $\frac{U_{\Omega m}}{U_{\text{偏}}} \leq 0.5$

叠加在变容二极管两端的高频电压不仅影响振荡频率随调制电压的变化规律而且还影响振荡幅度和频率稳定度等性能

③ 小频偏变容二极管调频器的分析

- 变容二极管作为振荡回路总电容调频最大优点是调制信号对振荡频率的**调变能力强**（即**调频灵敏度高**：较小的 m 值就能产生较大的相对频偏）。
- 但同时因温度等外界因素变化引起反偏压变化时造成**载波频率不稳定**也必然相对增大；
- 而且振荡回路上的高频电压又全部加到变容二极管上。
- **小频偏调制**（变容二极管部分接入振荡回路）

③ 小频偏变容二极管调频器的分析

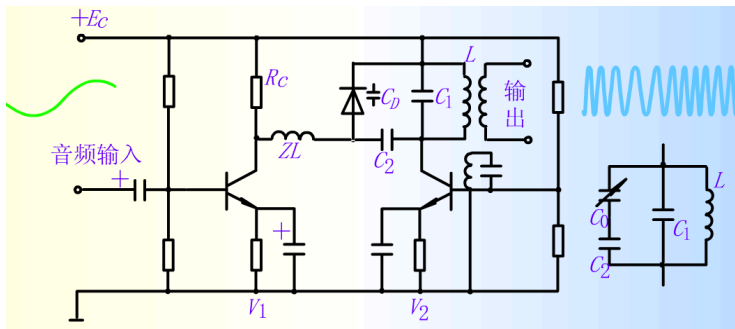


V_1 是音频放大器， V_2 是高频振荡器 $LC_1C_2C_D$ 组成振荡槽。

对高频而言， C_2 和 C_D 串起来作为槽路的一部分，其振荡的槽路实际上如右上图所示。

R_C 是音频放大器的集电极负载电阻， Z_L 是高频扼流圈。

③ 小频偏变容二极管调频器的分析



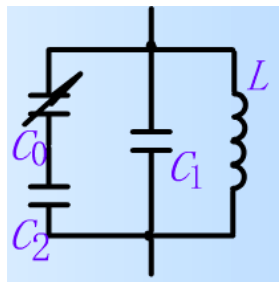
③ 小频偏变容二极管调频器的分析

C_2

- 使变容二极管部分接入振荡回路提高中心频率稳定性
- 分压使加到变容二极管上的高频振荡电压也相应减少

C_1

- 高频电路中存在分布电容加大 C_1 提高稳定性但频偏减小



③ 小频偏变容二极管调频器的分析

$$\text{变容管上反向偏压 } U = U_0 + U_{\Omega m} \cos \Omega t = U_0 \left(1 + \frac{U_{\Omega m}}{U_0} \cos \Omega t \right) = U_0 (1 + m \cos \Omega t)$$

$$\text{变容管结电容 } C_d = AU^{-n} = A[U_0(1 + m \cos \Omega t)]^{-n} = C_{d0}(1 + m \cos \Omega t)^{-n} | C_{d0} = AU_0^{-n}$$

$$\frac{C_2}{C_d} = \frac{C_2}{C_{d0}} (1 + m \cos \Omega t)^n = \frac{C_2}{C_{d0}} + \frac{C_2}{C_{d0}} F(n, m)$$

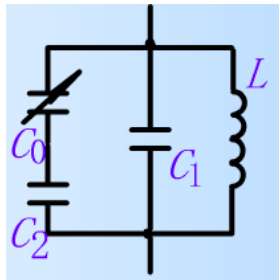
$$\text{未调制: } C_0 \Rightarrow \omega_c \quad C_0 + \Delta C_0 \Rightarrow \omega_c + \Delta \omega : \text{调制}$$

$$\omega_c + \Delta \omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_0 + \Delta C_0)}} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta C_0}{C_0}}} = \omega_c \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta C_0}{C_0}}}$$

$$\text{小频偏时 } \omega_c \gg \Delta \omega \text{ 则 } \frac{\Delta \omega}{\omega_c} \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C_0}{C_0} \text{ 电容变化引起频率变化}$$

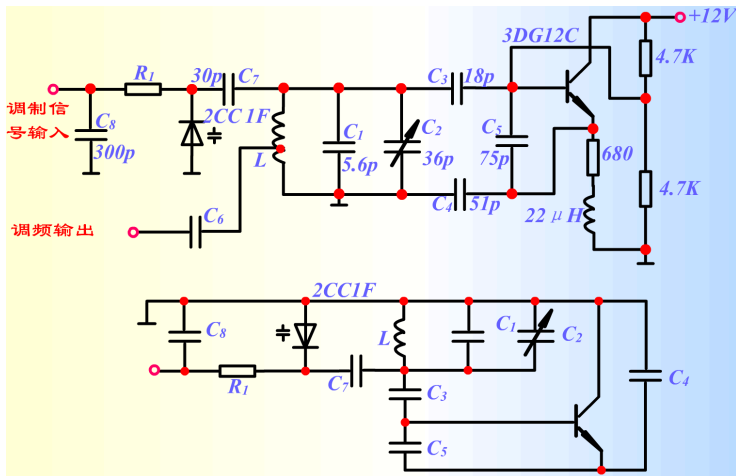
$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{\Delta \omega}{\omega_c} \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C_0}{C_0} = KF(n, m)_n \text{ 电容变化系数 } |m| \text{ 调制指数}$$

$$\Delta f = Kf_c (A_0 + A_1 \cos \Omega t + A_2 \cos 2\Omega t + A_3 \cos 3\Omega t + \dots)$$



- ① 在瞬时频率的变化中含有与调制信号成线性关系的成分，其最大偏移为 $\Delta f_1 = KA_1 f_c = \frac{1}{8} nm [8 + n(n-1)(n-2)m^2] Kf_c$ ；
- ② 此外还含有与调制信号的二次、三次等谐波成分成线性关系的成分所引起的偏移 Δf_2 、 Δf_3 和中心频率相对于未调制时的载波频率产生的偏移 Δf_c ；
- ③ Δf_1 是调频时所需要的频偏， Δf_c 是引起中心频率不稳定的因素， Δf_2 和 Δf_3 是频率调制的非线性失真。
- ④ 为了使调制线性良好，应尽可能减小 Δf_2 和 Δf_3 以及 Δf_c 并增大 Δf_1 。
- ⑤ 为了兼顾频偏 Δf_1 和减小非线性失真的要求， m 值多取在 0.5 或 0.5 以下。

④ 变容二极管调频电路举例



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

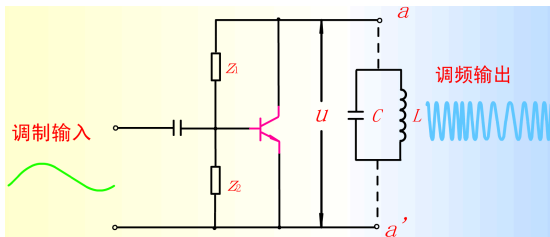
① 电抗管及其调频原理

- 由一只晶体管或场效应管加上由电抗和电阻元件构成的移相网络组成。
- 等效于一个电抗元件（电感或电容）且其参量可以随调制信号而变化。

① 电抗管及其调频原理

调频原理

- 将电抗管接入振荡器谐振回路，在低频调制信号控制下，电抗管的等效电抗就发生变化，从而使振荡器的瞬时振荡频率随调制电压而变，获得调频。
- 利用晶体管（或场效应管）的放大作用，使集射电压与集电极电流之间（或漏源电压与漏极电流之间）相位相差 90° ，类似一个电抗元件的电流电压间的相位关系。



② 晶体管电抗管的等效电抗（电容）

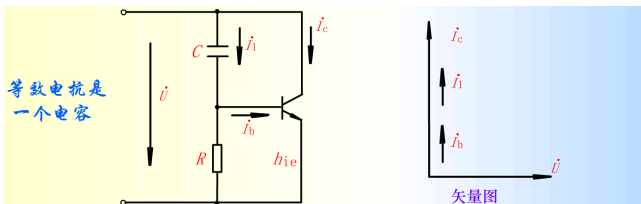


图6-16 电容性电抗管的电路和矢量图

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C} \quad (\omega \text{ 是高频角频率})$$

$$Z_2 = R$$

若 $\frac{1}{\omega C} \gg R$ 则 $\dot{I}_1 \approx j\omega C \dot{U}$, $\dot{I}_1$ 超前于 $\dot{U}$ 90° 。又 $\dot{I}_1$ 到基极分成两部分，一部分流入 R ，一部分流入基极。则流入基极的部分 $\dot{I}_b$ 为 $\dot{I}_b = \frac{R}{R+h_{ie}} \dot{I}_1 = \frac{R}{R+h_{ie}} j\omega C \dot{U}$ 则 $\dot{I}_b$ 也超前于 $\dot{U}$ 90° 。

$\dot{I}_c = \beta \dot{I}_b = \frac{\beta R}{R+h_{ie}} j\omega C \dot{U}$, $\dot{I}_c$ 与 $\dot{I}_1$ 同相位，也超前于 $\dot{U}$ 90° ，故晶体管集电极间等效于一个电容，其

$$\text{大小为 } C_{\text{eq}} = \frac{C\beta R}{R+h_{ie}} = \frac{C\beta}{1+\frac{h_{ie}}{R}} \quad \text{又 } h_{ie} = r_{bb'} + r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta_0) \frac{26}{I_e} = r_{bb'} + \beta_0 \frac{26}{I_c}$$

所以 $U \text{ 变} \rightarrow I_b \text{ 变} \rightarrow I_c \text{ 变} \rightarrow h_{ie} \text{ 变} \rightarrow C_{\text{eq}} \text{ 变} \rightarrow f \text{ 变}$ 从而实现调频。

③ 晶体管电抗管的等效电抗（电感）

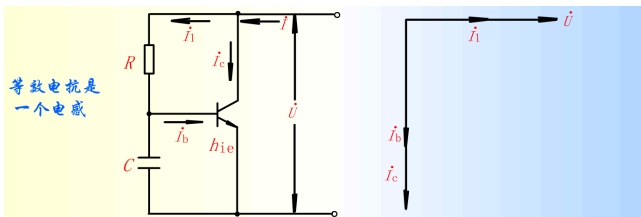


图6-17 电感性电抗管的电路和矢量图

$$Z_1 = R$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C} \quad \text{若 } R \gg \frac{1}{\omega C}; i \gg i_b \quad \text{因为 } i_b = \frac{\dot{U}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\dot{U}}{R} \quad \text{所以 } i_b \text{ 与 } \dot{U} \text{ 同相。}$$

$$\text{又有 } i_b = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + h_{ie}} i_c, \text{ 若 } h_{ie} \gg \frac{1}{\omega C}, \text{ 则 } i_b = \frac{1}{j\omega C h_{ie}} i_c = \frac{\dot{U}}{j\omega C R h_{ie}} \quad \text{则 } i_b \text{ 滞后 } \dot{U} 90^\circ$$

$$i_c = \beta i_b, \text{ 所以 } i_c \text{ 也滞后 } \dot{U} 90^\circ. \text{ 则等效电抗为一电感, } L_{\text{等}} = \frac{C R h_{ie}}{\beta}.$$

$$h_{ie} = r_{bb'} + \beta_0 \frac{26}{I_c}$$

所以 $U \text{ 变} \rightarrow I_b \text{ 变} \rightarrow I_c \text{ 变} \rightarrow h_{ie} \text{ 变} \rightarrow C_{\text{等}} \text{ 变} \rightarrow f \text{ 变}$ 从而实现调频。

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

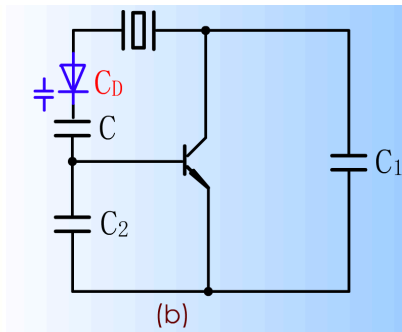
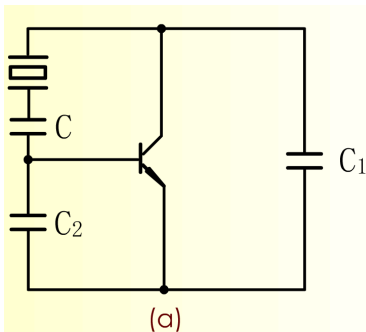
- 5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

① 晶体振荡器

- 变容二极管和电抗管调频都是在 LC 振荡器上直接进行所以中心频率稳定度低；
- 而且变容管和电抗管各参数又引进新的不稳定因素使得频率稳定性更差（低于 1×10^{-4} ）。
- 为了提高调频器的频率稳定度可对晶体振荡器进行调频（晶体振荡器频率稳定度很高可达 1×10^{-6} ）；
- 要求频率稳定度较高、频偏不太大的场合，用石英晶体振荡器调频较合适。

② 石英晶振变容管调频电路



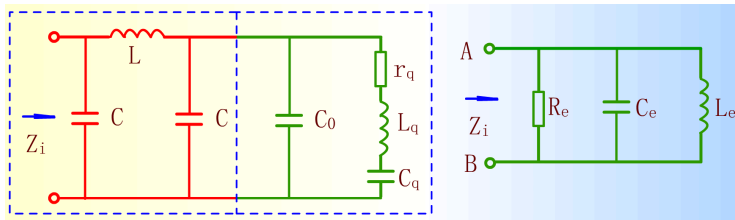
- 电容反馈型三点线路，晶体等效为电感。
- 当调制信号控制 C_d 电容量变化时，振荡频率同样可以发生微小的变动，实现调频。
- 频率的变动只能限制在晶体并联谐振频率 f_p 和串联谐振频率 f_s 之间，**频偏很小**。

② 扩展频偏

- 利用倍频和混频器分别扩展绝对频偏和相对频偏。
- 在晶体支路中串联一个小电感，使晶体的串联谐振频率从 f_s 下降到 f_{s1} ，扩展 f_s 到 f_p 之间的范围。
- 用Ⅱ型网络变换来获得较大频偏。

③ 用 Π 型网络变换来获得较大频偏

- 因晶体串联等效电容 C_q 很小，并联电容 C_0 较大，使变容管与振荡回路的耦合非常弱，频率可调范围很小。
- 采用 Π 型网络进行阻抗变换，抵消并联电容 C_0 作用，使频偏加大。
- 经过 Π 型网络变换并不改变石英晶体的谐振频率，从而保证了调频时振荡频率的稳定性。
- 只要工作在比 f_q 低的频率上，等效并联回路总是呈感性的（呈感性的频率范围大大展宽）。



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

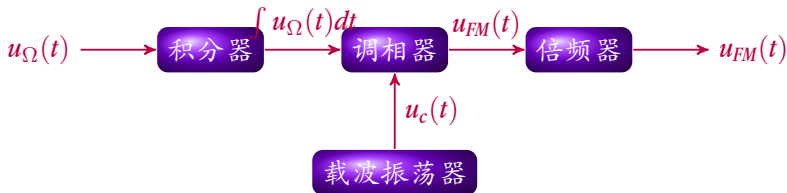
4 限幅器

内容提要 II

- 概述

- 5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

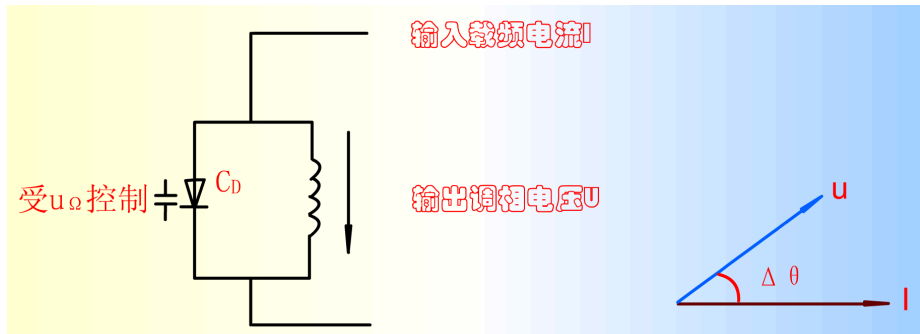


$$u_{PM}(t) = U_{cm} \cos[\omega_c t + K_p u_{\Omega}(t)]$$

$$u_{FM}(t) = U_{cm} \cos[\omega_c t + K_f \int u_{\Omega}(t) dt]$$

- 间接调频是指由调相波变为调频波。
- 调制不是在振荡器上直接进行，而是在振荡器后边的调相器中进行。

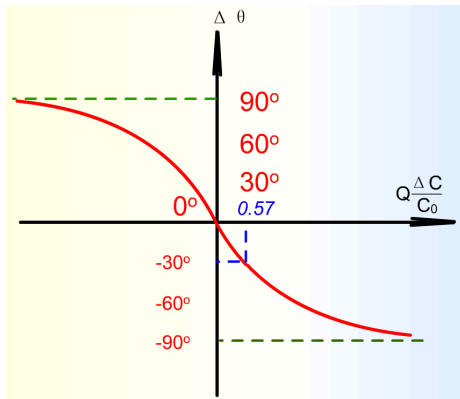
失谐法调相



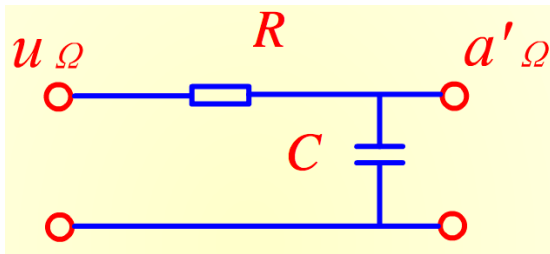
- 将载频信号电流 I （通常来自晶体稳频的振荡器）引到谐振电路上；
- 谐振电路含有变容元件，其电容量 C_d 受调制信号的控制。
- 不调制时为 C_0 ，电路处于谐振状态，输出电压 $\dot{U}$ 与输入的 $\dot{I}$ 同相位；
- 调制时，电容变为 $C_d = C_0 + \Delta C$ ，其中 ΔC 随调制电压变化造成电路失谐，使 $\dot{U}$ 相对于 $\dot{I}$ 有相位差 $\Delta \theta$ 。

失谐法调相

- 并联谐振回路： $\tan \Delta\theta = -Q \frac{\Delta C}{C_0}$
- 在 $|\Delta\theta| < 3^\circ$ (大约 $|Q \frac{\Delta C}{C_0}| \leq 0.57$) 范围内 $\Delta\theta \sim \Delta C$ 关系基本线性
- 假如 $\Delta C \sim u_\Omega$ 也为线性则 $\Delta\theta$ 随 u_Ω 线性变化 (线性调相)
- 为了达到一定的 $\Delta\theta$, $Q \frac{\Delta C}{C_0}$ 也要一定。

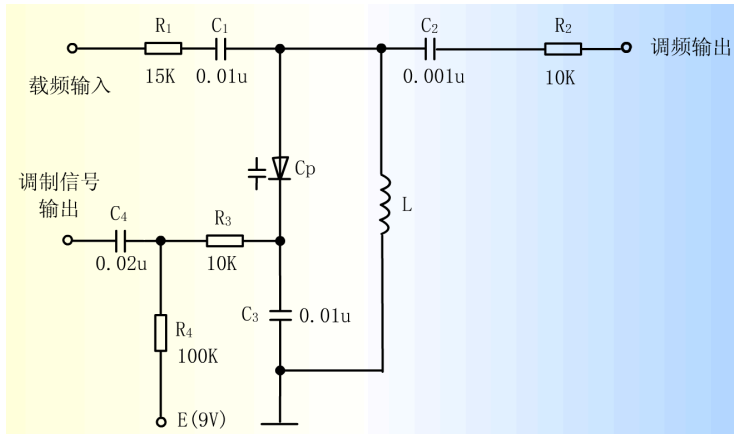


失谐法调相-调频电路



调相-调频转换网络

失谐法调相-调频电路



调相-调频电路

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5

调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

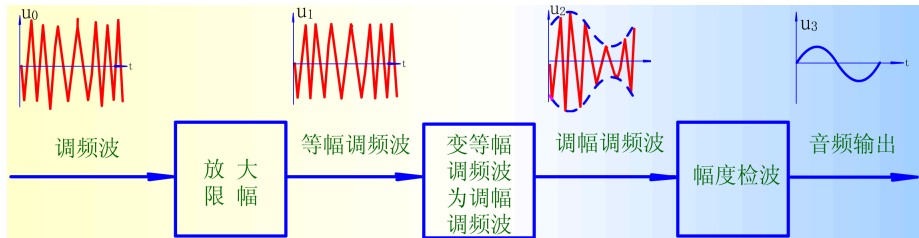
5

调幅调频调相

- 调制方式的比较

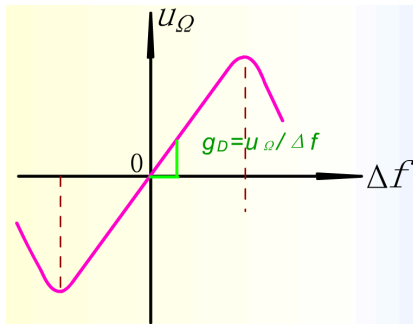
鉴频原理

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



鉴频器的质量指标

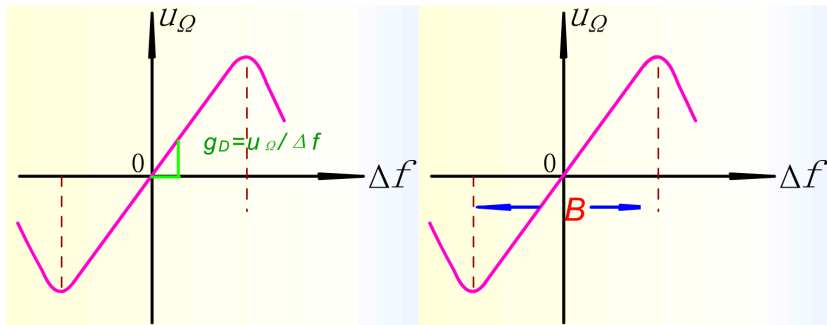
鉴频跨导 g_d



鉴频器的质量指标

鉴频跨导 g_d

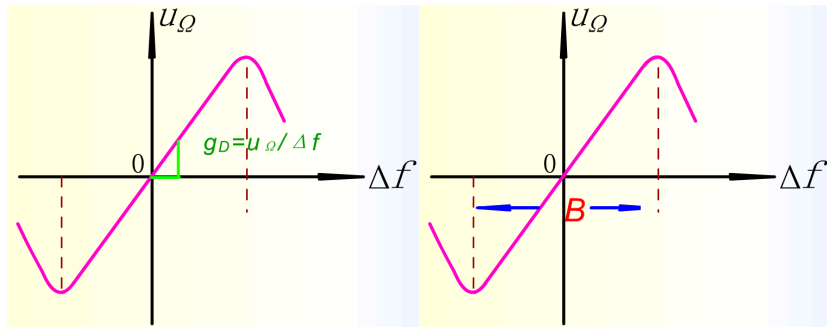
鉴频频带宽度 B



鉴频器的质量指标

鉴频跨导 g_d

鉴频频带宽度 B

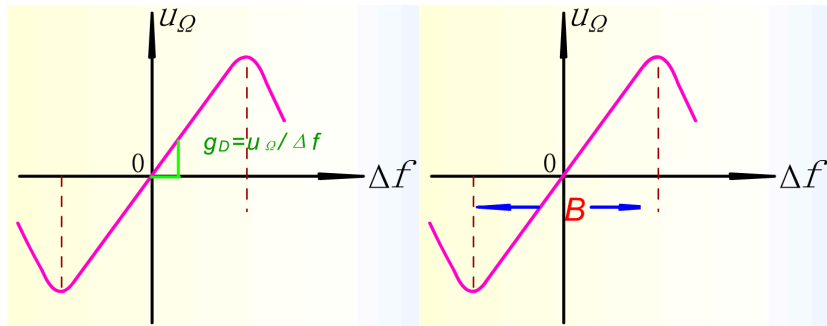


非线性失真尽量小

鉴频器的质量指标

鉴频跨导 g_d

鉴频频带宽度 B



非线性失真尽量小

对寄生调幅应有一定的抑制能力

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

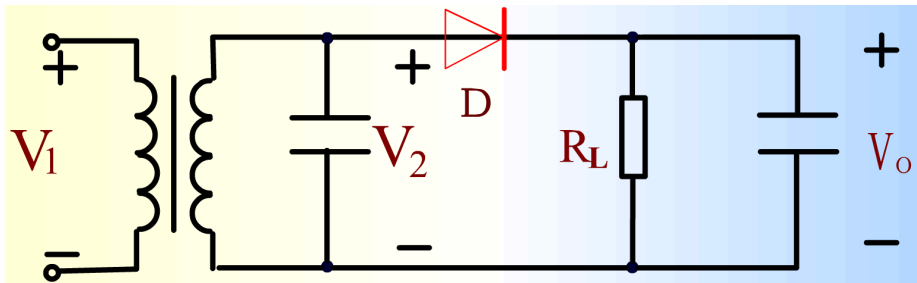
4 限幅器

内容提要 II

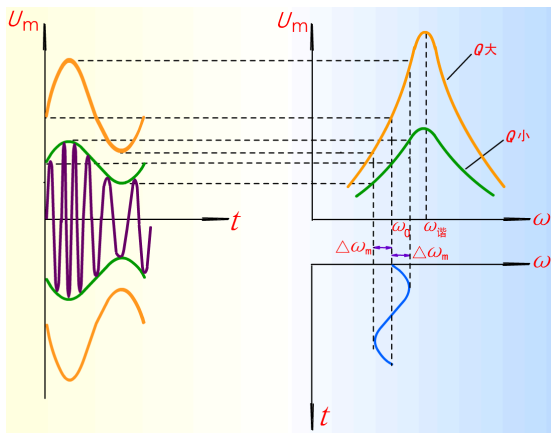
- 概述

5 调幅调频调相

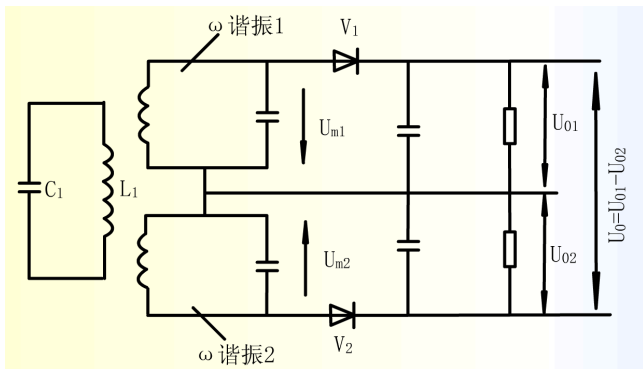
- 调制方式的比较



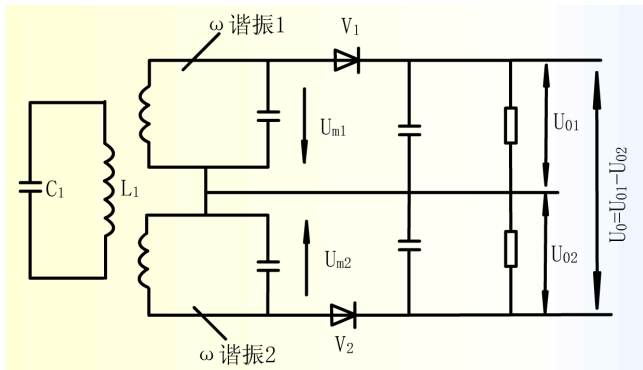
- 斜率鉴频器由失谐单谐振回路和晶体二极管包络检波器组成。
- 谐振电路不调谐于调频波的载波频率而是比它高或低一些形成一定的失谐。
- 利用并联 LC 回路幅频特性的倾斜部分将调频波变换成调幅调频波。



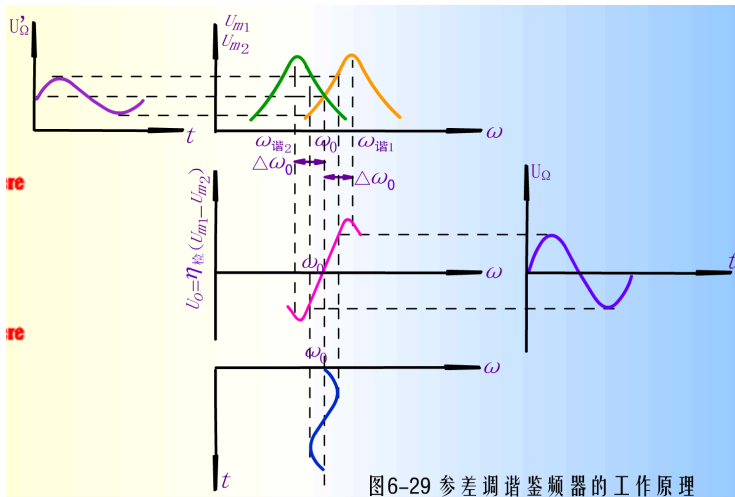
- 如果 Q 低则谐振曲线倾斜部分的线性较好，在调频转换为调幅调频过程中失真小，但鉴频灵敏度低。
- 如果 Q 高则鉴频灵敏度可提高，但谐振曲线的线性范围变窄。
- 当调频波的频移大时，失真较大。



- 单失谐回路斜率鉴频器的线性范围与灵敏度都是不理想的一般用于质量要求不高的简易接收机中。
- 参差调谐鉴频器由两个单失谐回路斜率鉴频器构成。



- **优点**：鉴频灵敏度较高，其输出电压比单失谐回路鉴频器输出大一倍。
- **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，实际调制困难。



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

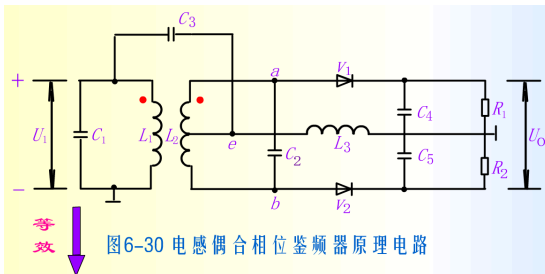
- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

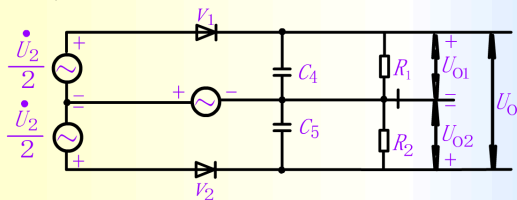
- 利用回路的相位-频率特性来实现调频波变换为调幅调频波变换为调幅调频波。
- 将调频信号的频率变化转换为两个电压之间的相位变化；
- 再将这相位变化转换为对应的幅度变化；
- 然后利用幅度检波器检出幅度的变化。
- 将调频信号的瞬时频率变化变换到附加相移上的频相转换网络。
- 检出附加相移变化的相位检波器（鉴相器）。

① 电感耦合相位鉴频器

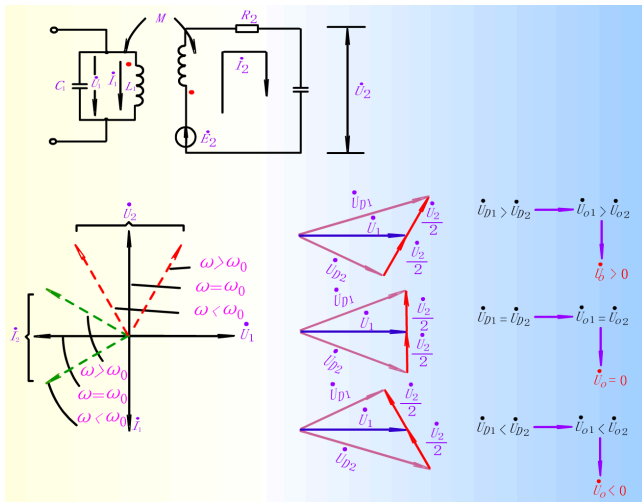


① 电压 U_1 通过互感 M 在次级回路 L_2C_2 两端产生电压 $\dot{U}_2$ ， e 是电感 L_2 的中点， ae 及 be 上的电压各为 $\frac{\dot{U}_2}{2}$ 。

② 通过耦合电容 C_3 耦合， L_3 是高频扼流圈。对高频而言， C_3 的阻抗远小于 L_3 的阻抗，故 L_3 上的电压 $\dot{U}_3$ 近似等于原边电压 $\dot{U}_1$ 。

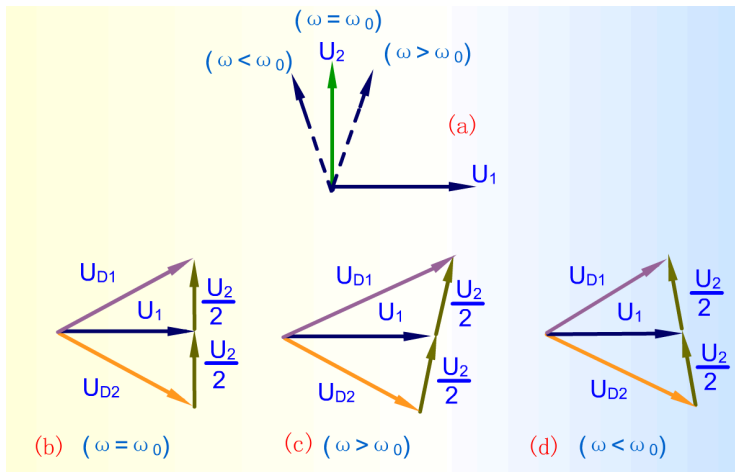


① 电感耦合相位鉴频器



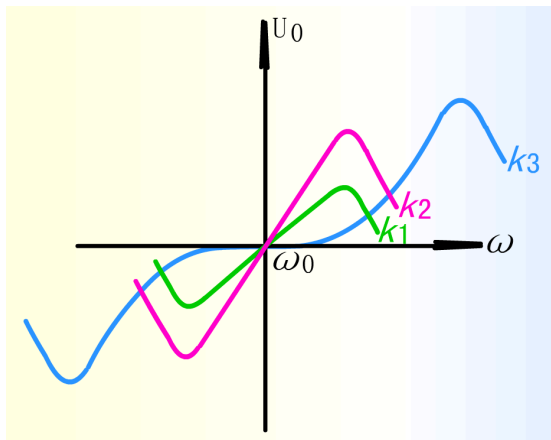
在不同频率下 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{U}_2$ 的相位变化情况

① 电感耦合相位鉴频器



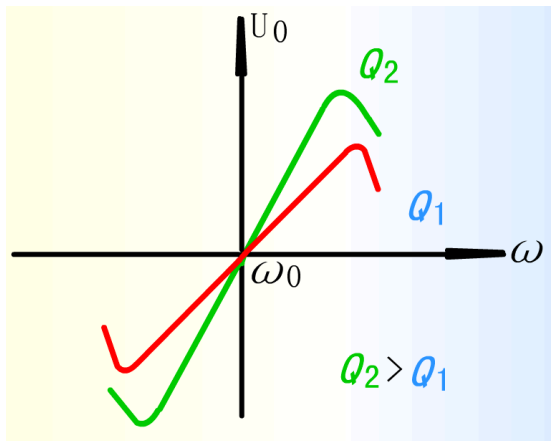
在不同频率下的 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$

① 电感耦合相位鉴频器



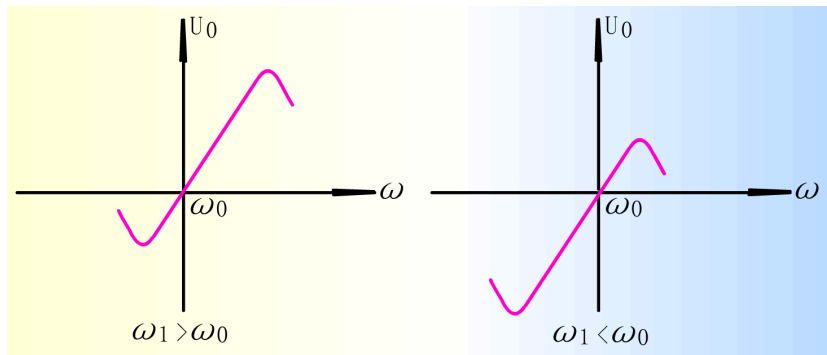
耦合系数 k 对 S 曲线的影响

① 电感耦合相位鉴频器



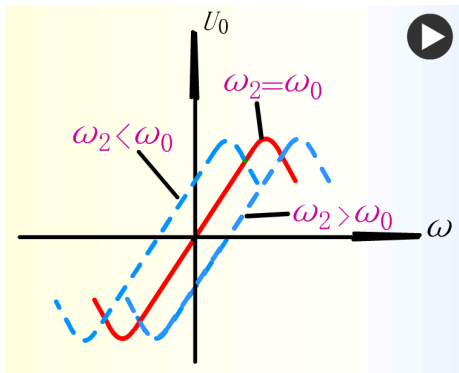
品质因数 Q 对 S 曲线的影响

① 电感耦合相位鉴频器



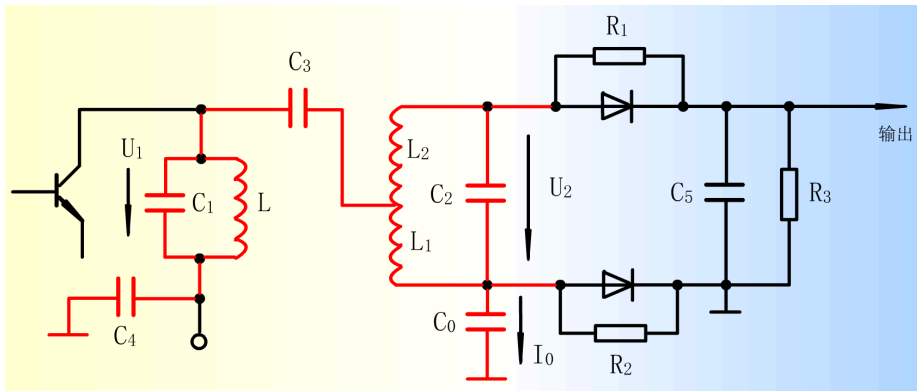
原边谐振角频率对S曲线的影响

① 电感耦合相位鉴频器



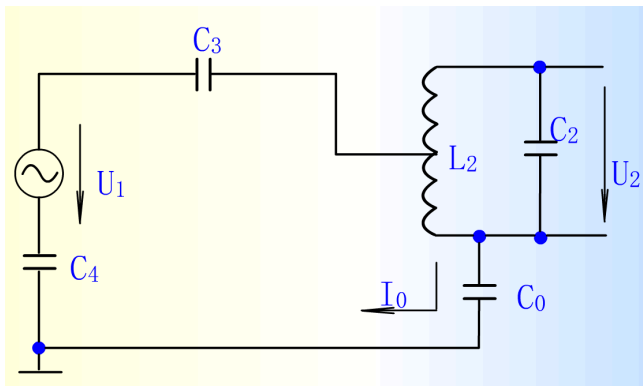
副边谐振角频率对S曲线的影响

② 电容耦合相位鉴频器



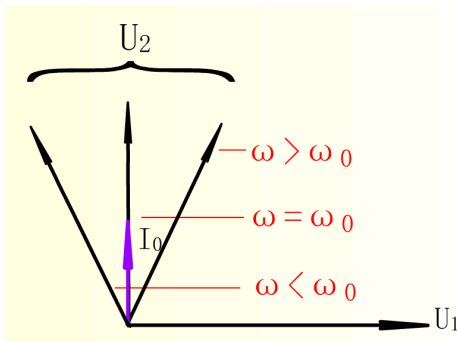
电容耦合相位鉴频器

② 电容耦合相位鉴频器



电容耦合部分

② 电容耦合相位鉴频器



在不同频率下的 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 的相位关系

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

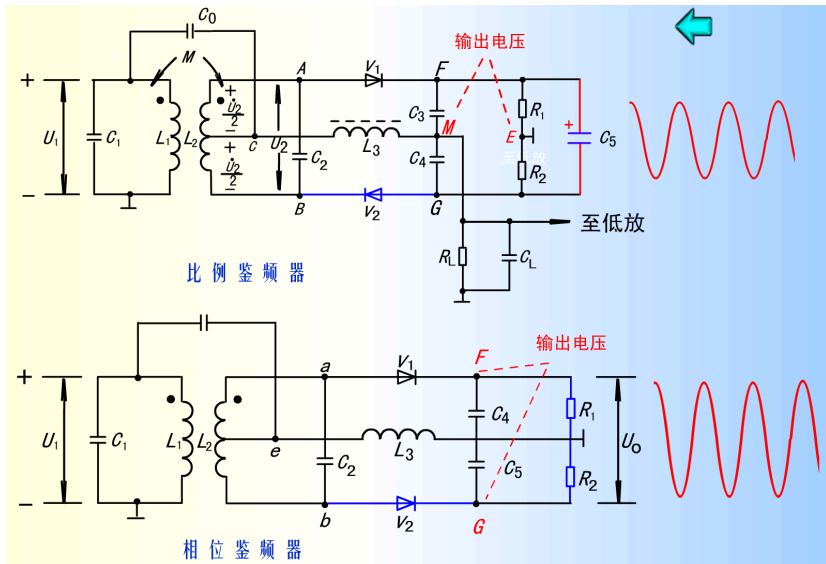
4 限幅器

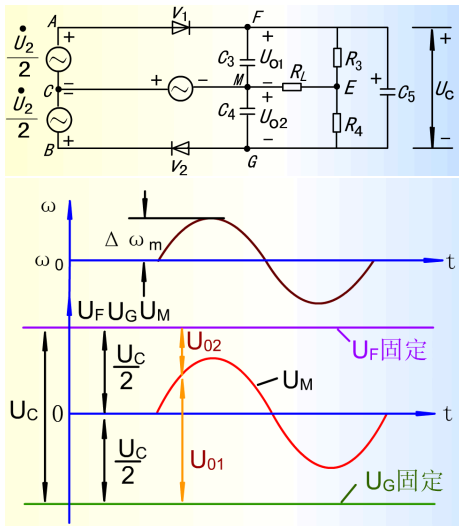
内容提要 II

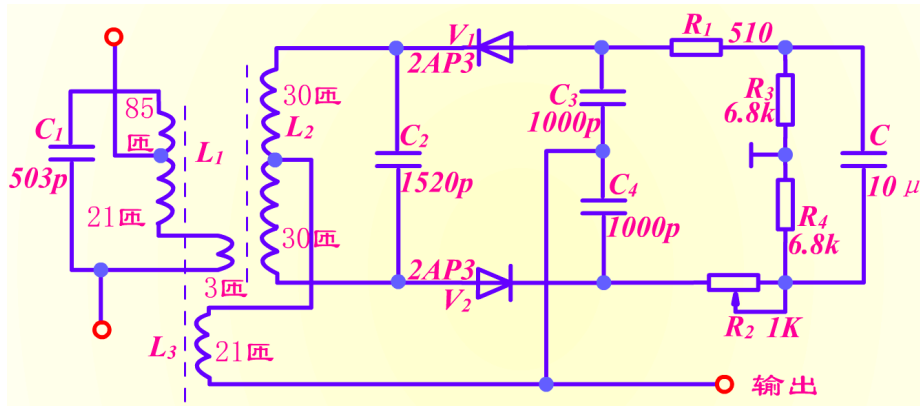
- 概述

5 调幅调频调相

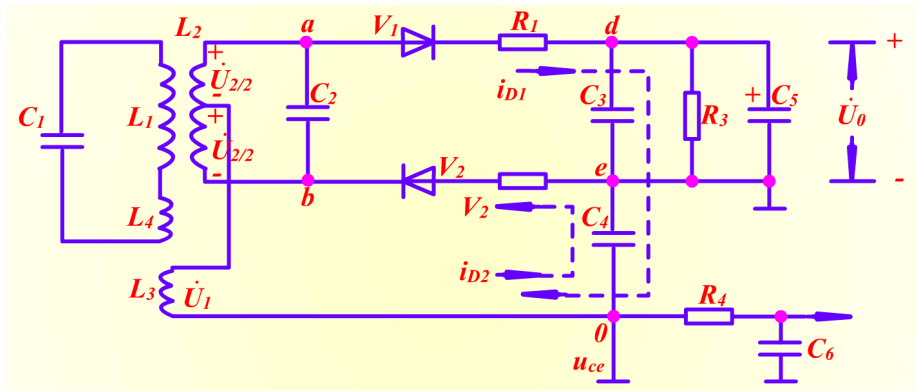
- 调制方式的比较



比例鉴频器 F, G, M 点的电位变化



比例鉴频器实际电路图



不对称比例鉴频器

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

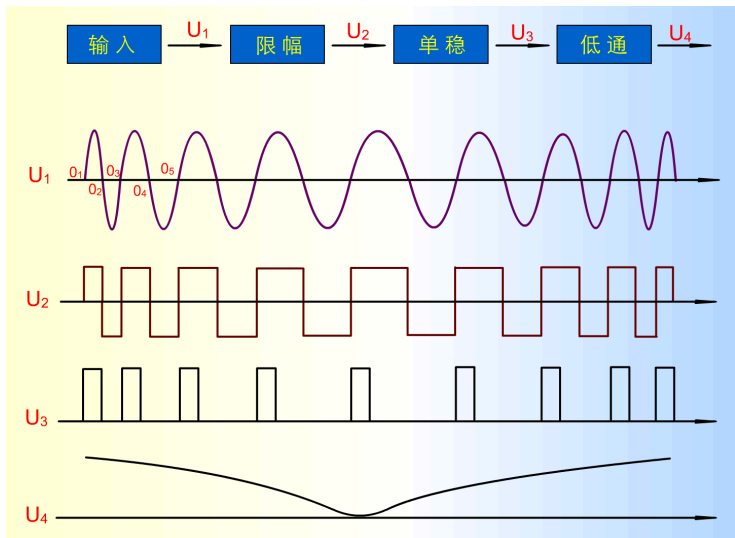
4 限幅器

内容提要 II

- 概述

- 5 调幅调频调相

- 调制方式的比较



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5

调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

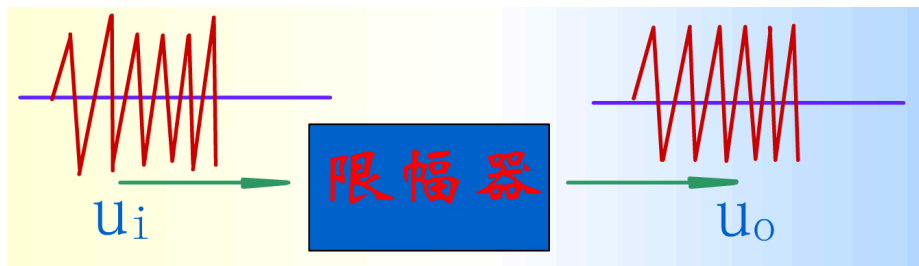
4 限幅器

内容提要 II

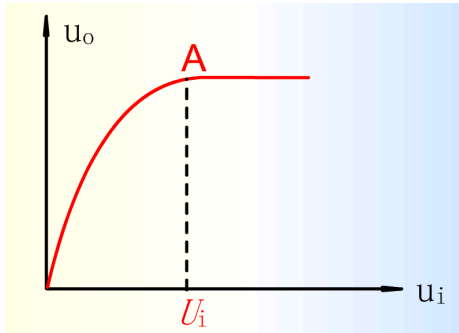
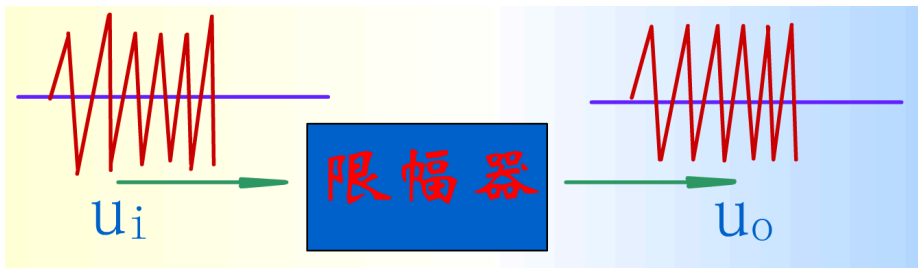
- 概述

5 调幅调频调相

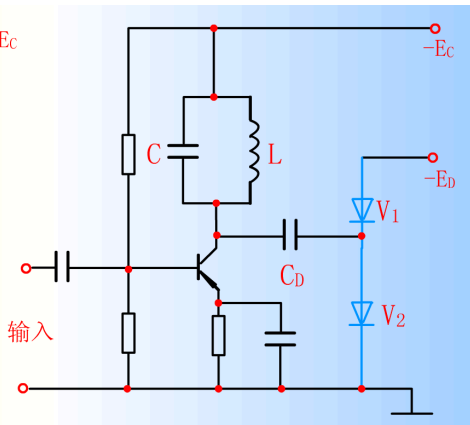
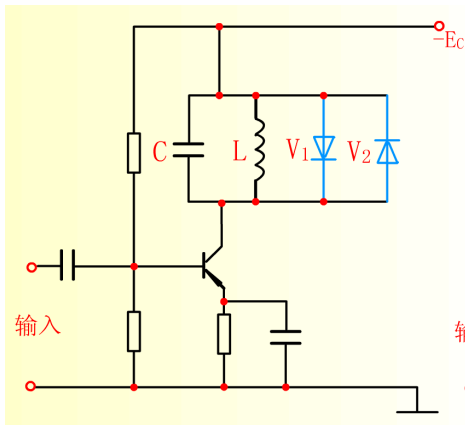
- 调制方式的比较



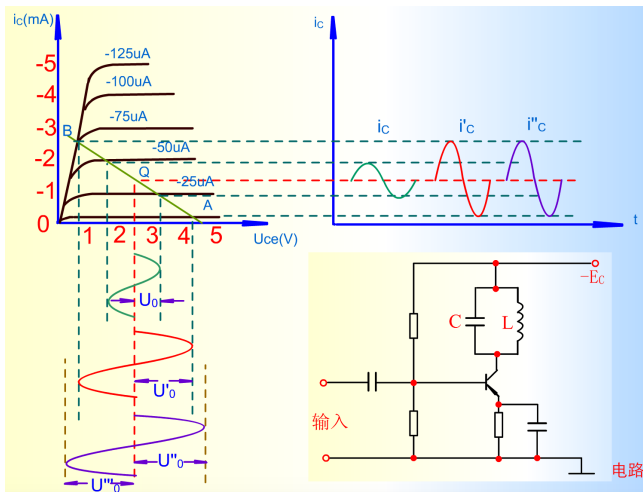
- 要求消除寄生调幅时不改变调频信号的频率变化规律。
- 限幅过程是一个非线性过程必然产生许多新的频率成分需要带通滤波器去掉不需要的频率成分。
- 限幅器 = 非线性元件 + 谐振回路



① 二极管限幅器



② 三极管限幅器



内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

内容提要 I

1 角度调制与解调

- 概述
- 调角波的性质
- 调频信号的产生

2 调频电路

- 变容二极管调频电路
- 电抗管调频电路
- 晶体振荡器调频电路
- 调相和间接调频电路

3 鉴频电路

- 调频波的解调
- 斜率鉴频器
- 相位鉴频器
- 比例鉴频器
- 脉冲计数式鉴频器

4 限幅器

内容提要 II

- 概述

5 调幅调频调相

- 调制方式的比较

调频和调幅

抗干扰性能

- 一般地说调频系统地抗干扰能力比调幅系统强。
- 调频地抗干扰能力必须在所收到地信号比干扰强一定倍数地情况下才表现出来。

占用频带的宽度

- 调频信号所占据频带宽度大于调幅信号（调幅制比较经济）。
- 发射机所能传送的音频频带越宽声音越逼真（调频信号比调幅信号好）。

发射机所需的功率和耗电量

- 调频波的功率不因调制而增大，而调幅波功率随调制深度而加大。
- 调频发射机的功率和耗电量比相同载波功率的调幅发射机小。

强信号堵塞现象 调幅信号易出现强信号堵塞现象。

