



第 7 章 角度调制与解调

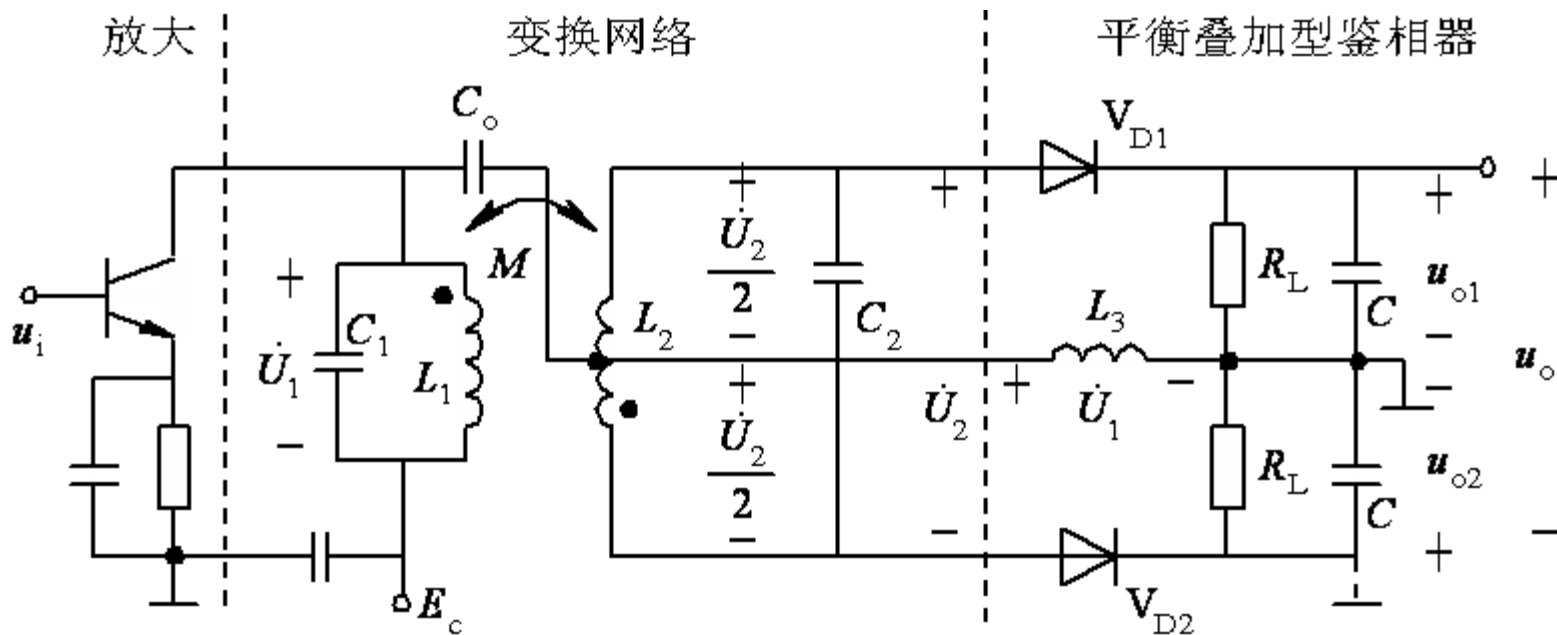
- 7.1 调频信号分析
- 7.2 调频器与调频方法
- 7.3 调频电路
- 7.4 鉴频器与鉴频方法
- 7.5 鉴频电路



7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器



图中 $C_1 = C_2 = C$ $L_1 = L_2 = L$ $r_1 = r_2 = r$

$k = M / L$ 中心频率均为 $f_0 = f_c$ f_c 为调频信号的载波频率

U_1 是经过限幅放大后的调频信号，一方面经隔直电容 C 加在后面的两个包络检波器上，另一方面经互感耦合 M 在次级回路两端产生电压 U_2



7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

互感耦合相位鉴频器的工作原理可分为：移相网络的频率相位变换，加法器的相位幅度变换，以及包络检波器的差动检波三部分

(1) 频率—相位变换

频率—相位变换是由互感耦合回路完成

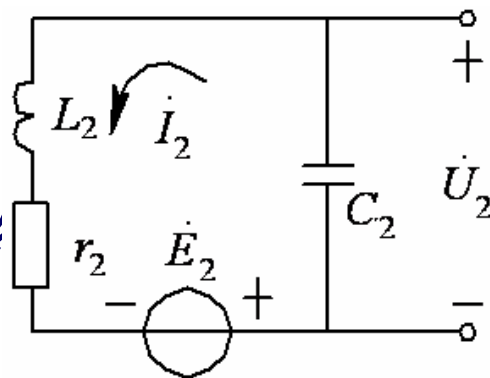
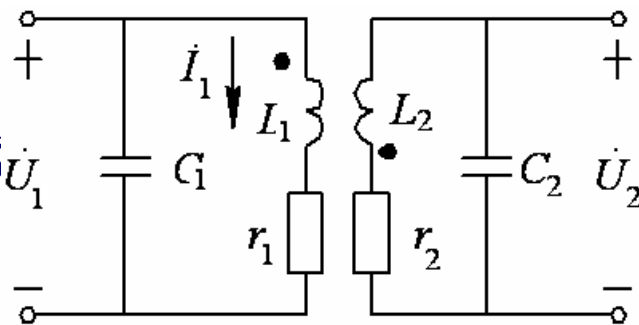
初级回路电感 L_1 中的电流为

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

其中 Z_f 为次级回路对初级回路的反射阻抗

M 较小时，可忽略，对于高 Q 回路， r_1 也可忽略

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1}$$





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(1) 频率—相位变换

初级电流在次级回路产生的感应电动势为

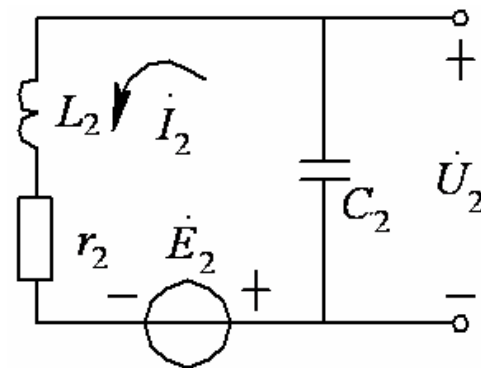
$$\dot{E}_2 = j\omega M \dot{I}_1 = \frac{M}{L_1} \dot{U}_1 = k \dot{U}_1 \quad k = \frac{M}{L_1}$$

感应电动势 \dot{E}_2 在次级回路形成的电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} = \frac{M}{L_1} \frac{\dot{U}_1}{r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}$$

\dot{I}_2 在 C_2 上形成的电压 \dot{U}_2 为

$$\dot{U}_2 = -\frac{1}{j\omega C_2} \dot{I}_2 = j \frac{1}{\omega C_2} \frac{M}{L_1} \frac{\dot{U}_1}{r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}$$





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(1) 频率—相位变换

$$\dot{U}_2 = j \frac{1}{\omega C_2 r_2} \frac{M}{L_1} \frac{\dot{U}_1}{1 + j \left(\frac{\omega_0 L_2}{r_2} \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 C_2 r_2} \frac{\omega_0}{\omega} \right)} = j \frac{1}{\omega C_2 r_2} \frac{M}{L_1} \frac{\dot{U}_1}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$\square jQk \frac{\dot{U}_1}{1 + jQ \frac{(\omega + \omega_0)(\omega - \omega_0)}{\omega_0 \omega}} \quad \square jQk \frac{\dot{U}_1}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}}$$

令 $\xi = 2Q\Delta f / f_0$, $A = Qk$ 则上式变为

$$Q = \frac{1}{\omega_0 C_2 r_2} = \omega_0 L_2 r_2$$

$$\dot{U}_2 = \frac{jA}{1 + j\xi} \dot{U}_1 = \frac{A\dot{U}_1}{\sqrt{1 + \xi^2}} e^{\frac{\pi}{2} - \varphi}$$



7.5 鉴频电路

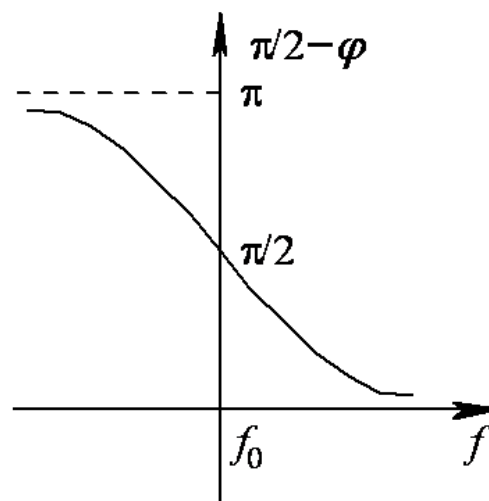
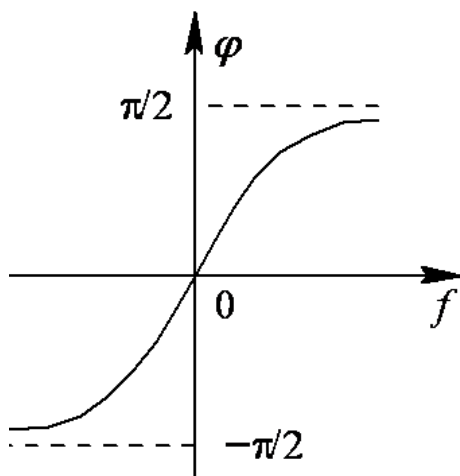
一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(1) 频率—相位变换

其中 $\varphi = \arctan \xi$ 为次级回路的阻抗角; Qk 为耦合因子

\dot{U}_2 与 \dot{U}_1 之间的幅值和相位关系都将随输入信号的频率变化。



频率—相位变换电路的相频特性



7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

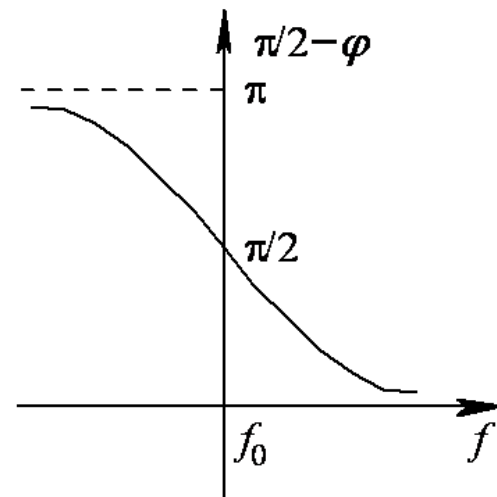
① 互感耦合相位鉴频器

(1) 频率—相位变换

当 $f = f_0 = f_c$ 时，次级回路谐振， \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 之间的相位差

当 $f > f_0 = f_c$ 时，次级回路呈感性， \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 之间的相位差

当 $f < f_0 = f_c$ 时，次级回路呈容性， \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 之间的相位差



在一定的频率范围内 \dot{U}_2 与 \dot{U}_1 之间的相位差与频率之间具有线性关系。



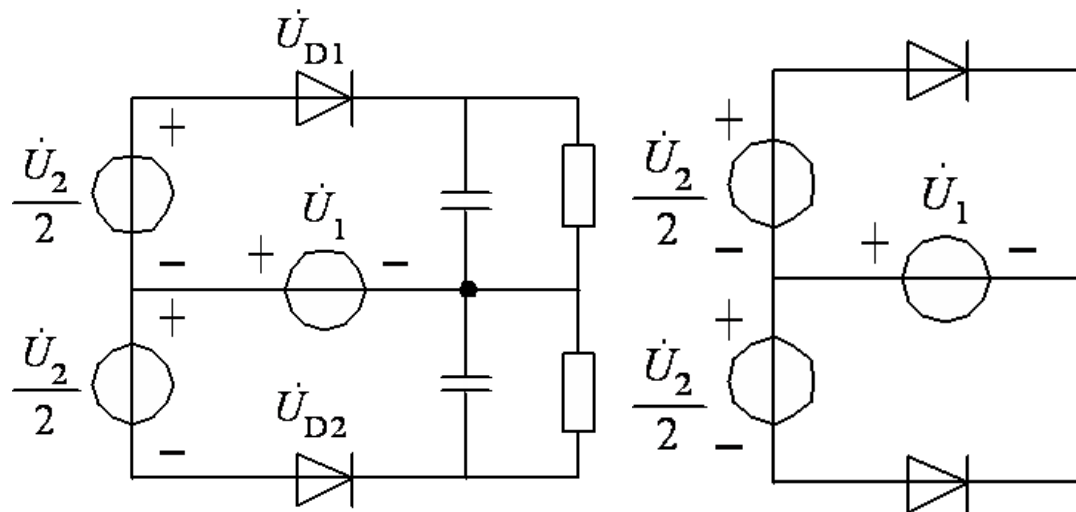
7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(2) 相位—幅度变换

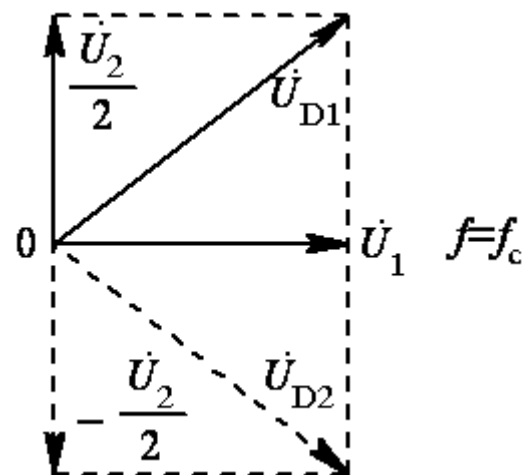
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{D1} &= \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_2}{2} \\ \dot{U}_{D2} &= \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_2}{2} \end{aligned} \right\}$$



① 当 $f = f_c$ 时 $\Delta f = 0$ \square $\xi = 2Q\Delta f / f_0 = 0$

\square $\varphi = \arctan \xi = 0$ \square $\pi/2 - \varphi = \pi/2$

$$U_{D1} = U_{D2}$$





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(2) 相位—幅度变换

② 当 $f > f_0 = f_c$ 时 $\Delta f > 0 \square \xi = 2Q\Delta f / f_0 > 0$

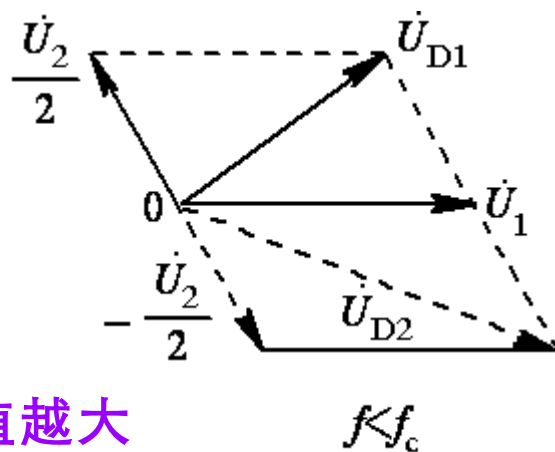
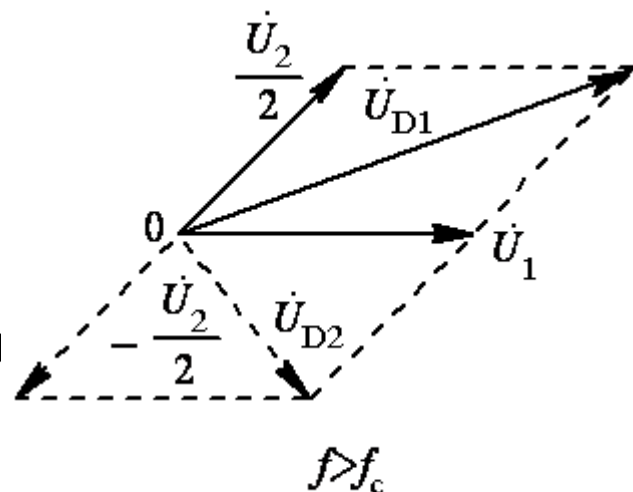
$$\square \varphi = \arctan \xi > 0 \quad \square \pi/2 - \varphi < \pi/2$$

$U_{D1} > U_{D2}$ 且 f 越大，二者差值越大

③ 当 $f < f_0 = f_c$ 时 $\Delta f < 0 \square \xi = 2Q\Delta f / f_0 < 0$

$$\square \varphi = \arctan \xi < 0 \quad \square \pi/2 - \varphi > \pi/2$$

$U_{D1} < U_{D2}$ 且 f 越大，二者差值越大





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

(3) 检波输出

设两个包络检波器的检波系数分别为 K_{d1}, K_{d2} (通常 $K_{d1} = K_{d2} = K_d$)，则两个包络检波器的输出分别为 $u_{o1} = K_{d1} U_{D1}$, $u_{o2} = K_{d2} U_{D2}$ 。鉴频器的输出电压为

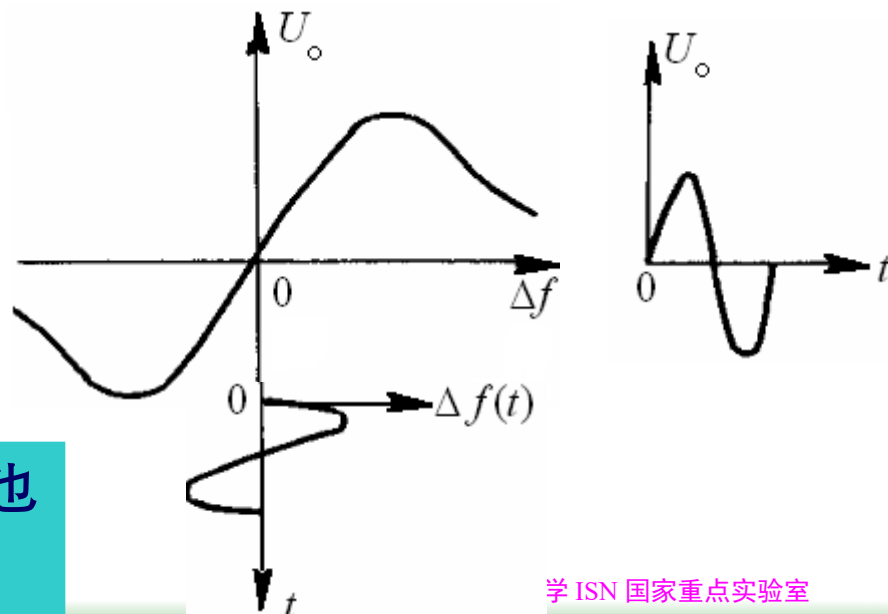
$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = K_d (U_{D1} - U_{D2})$$

有前面的分析可知：

☐ 当时, $f_0 = f_c$ $u_o = 0$

☐ 当时, $f_0 = f_c$ $u_o > 0$

☐ 当时, $f_0 = f_c$ $u_o < 0$



注：在瞬时频偏为 0 时，输出也为 0，这是靠固定相移²及平衡差动输出来保证的。



7.5 检频电路

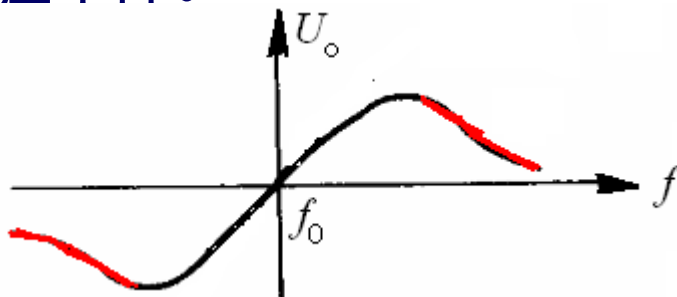
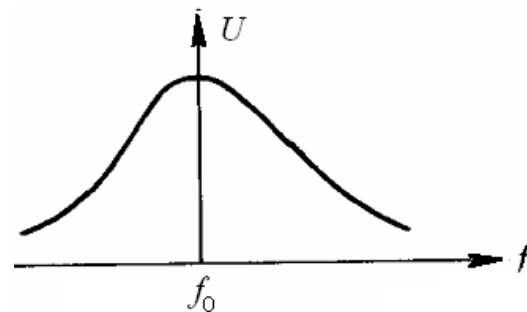
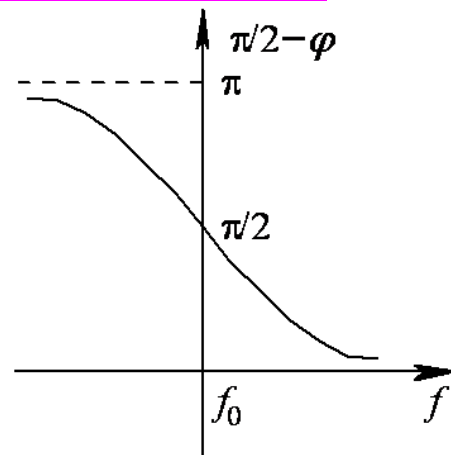
一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

$$\dot{U}_2 = \frac{jA}{1+j\xi} \dot{U}_1 = \frac{A\dot{U}_1}{\sqrt{1+\xi^2}} e^{\frac{\pi}{2}-\varphi}$$

在 Δf 频偏不大时，随着频率的变化， \dot{U}_2 与 \dot{U}_1 的幅度变化不大，而相位变化明显。鉴频特性近似线性。

在 Δf 频偏较大时，随着频率的变化， \dot{U}_2 与 \dot{U}_1 的幅度明显下降，而相位变化趋于缓慢。从而引起合成电压下降。





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

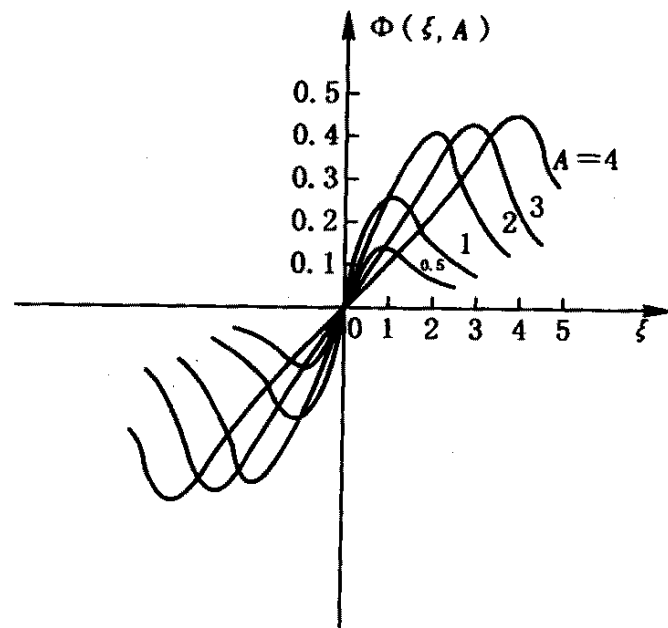
① 互感耦合相位鉴频器

定量分析鉴频特性，得到输出电压为：

$$u_o = K_d I_{c1} R_e \frac{\sqrt{4 + (2\xi + A)^2} - \sqrt{4 + (2\xi - A)^2}}{2\sqrt{(1 + A^2 + \xi^2)^2 + 4\xi^2}}$$
$$= K_d I_{c1} R_e \Phi(\xi, A)$$

根据鉴频跨导的定义

$$S_D = \left. \frac{du_o}{d\Delta f} \right|_{\Delta f=0} = K_d I_{c1} R_e \frac{4QA}{f_0(1 + A^2)\sqrt{4 + A^2}}$$





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

① 互感耦合相位鉴频器

总结：

■只有当输入的调频信号的频偏在鉴频特性的线性区内，才能不失真地得到原调制信号。

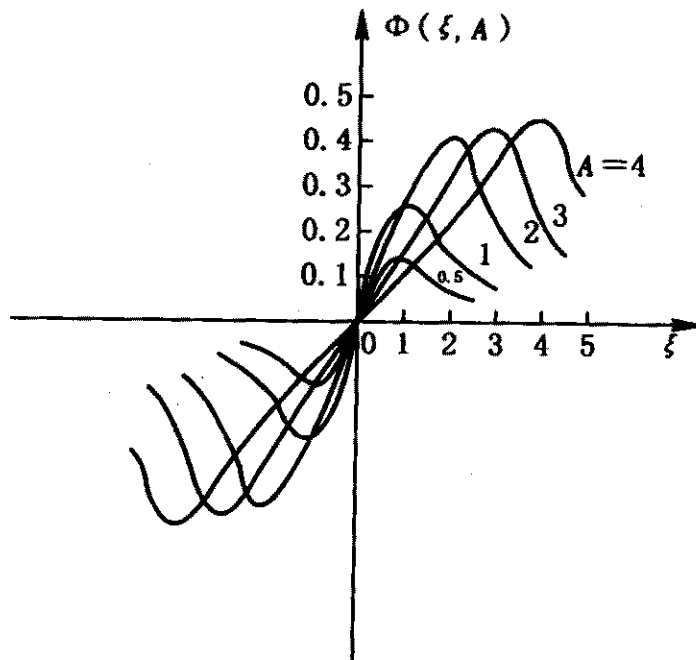
■鉴频器的鉴频特性与参数 A 有密切的关系

■鉴频输出的最大值及其所对应的频偏值于 A 有关。

当 $A \ll 1$ 时，鉴频器输出的最大值出现于广义失谐 $\xi = A$ 处，此时

$$\xi = 2Q\Delta f / f = A \quad \diamond 2\Delta f = Af / Q = kf_0$$

即对应的峰值带宽 $B_m = kf_0$ ，所以 k 一定，则 B_m 一定。



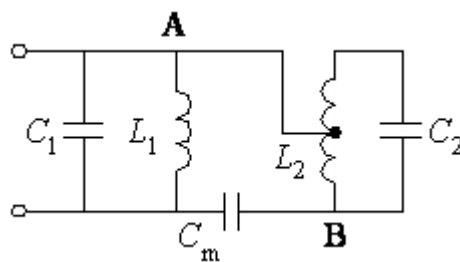
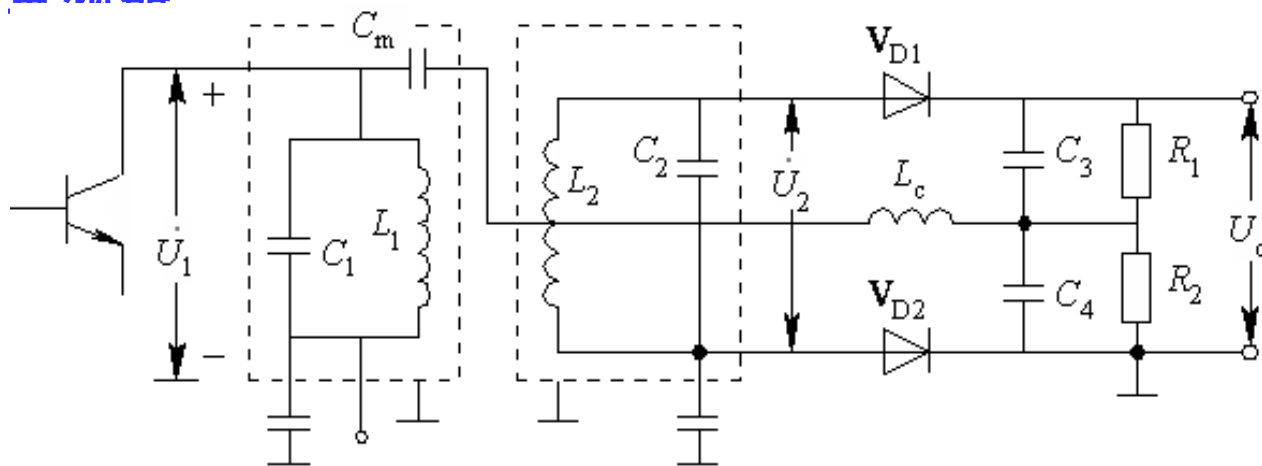


7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

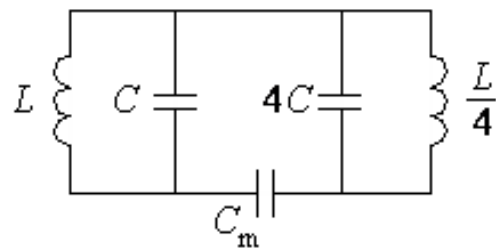
② 电容耦合相位鉴频器

图中 C_m 为两回路间的耦合电容，其值很小，一般只有几个皮法至十几个皮法。



$$C_1 = C_2 = C$$

$$L_1 = L_2 = L$$





7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

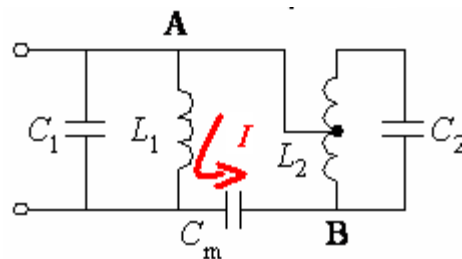
① 电容耦合相位鉴频器

根据耦合电路理论可求出此电路的耦合系数为

$$k = \frac{C_m}{\sqrt{(C_m + C)(C_m + 4C)}} \approx \frac{C_m}{2C}$$

• 设次级回路的并联阻抗 Z_2 为

$$Z_2 = \frac{R_e}{1 + j\xi}$$



由于 C_m 很小，满足 $1/(\omega C_m) \gg p^2 Z_2$, $p = 1/2$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1}{1/(j\omega C_m) + p^2 Z_2} \approx j\dot{U}_1 \omega C_m$$



7.5 鉴频电路

一、叠加型相位鉴频电路

② 电容耦合相位鉴频器

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1}{1/(j\omega C_m) + p^2 Z_2} \square j\dot{U}_1 \omega C_m$$

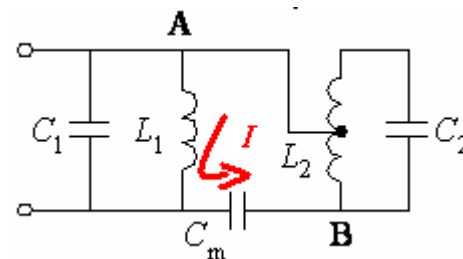
AB 间的电压为

$$U_{AB} = \frac{1}{2} U_2 = \dot{I} \diamond p^2 Z_2 = j \frac{1}{4} Z_2 \dot{U}_1 \omega C_m$$

$$\text{则: } \dot{U}_2 = j \frac{1}{2} \omega C_m \frac{R_e}{1 + j\xi} \dot{U}_1 = j \frac{1}{2} \omega C_m \frac{\omega_0 C}{1 + j\xi} \dot{U}_1$$

$$k = C_m / (2C)$$

$$\square jkQ \dot{U}_1 \frac{1}{1 + j\xi} = j \frac{A \dot{U}_1}{1 + j\xi}$$



该式与互感耦合电路完全相同，因此其鉴频特性与互感耦合相位鉴频器相同。



7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

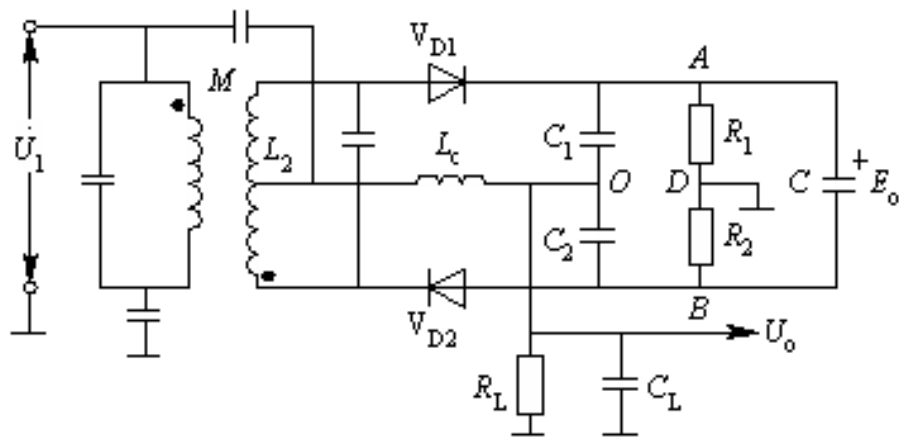
由前面的互感耦合相位鉴频器的分析可知，相位鉴频器的输出随接收信号的大小而变化，为抑制寄生调幅的影响，相位鉴频器前必须使用限幅器，但限幅器要求较大的输入信号，这将导致鉴频器前中放限幅级数的增加，比例鉴频器具有自动限幅的作用，不仅可以减少前面放大器的级数，而且可以避免使用硬限幅器。

1. 电路

它与互感耦合相位鉴频器电路的区别在于

(1) 两个二极管顺接；

(2) 在电阻 (R_1+R_2) 两端并接一个大电容 C ，容量约在 $10\mu\text{F}$ 数量级。时间常数 $(R_1+R_2)C$ 很大，约 $0.1 \sim 0.25\text{s}$ ，远大于低频信号的周期。故在调制信号周期内，可认为 C 上电压基本不变，近似为一恒定值 E_0 。



(3) 接地点和输出点改变。

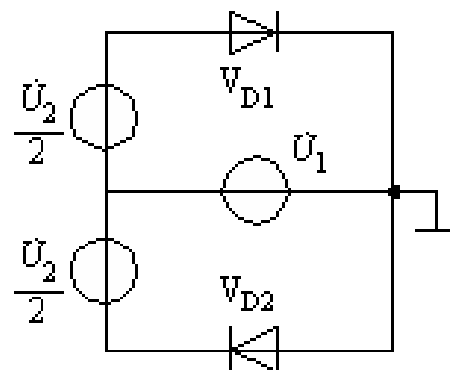
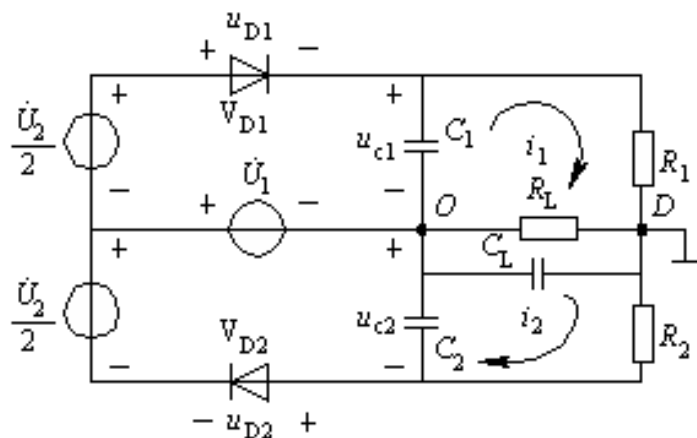


7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

2. 工作原理

由电路理论可得



$$\left. \begin{aligned} i_1(R_1 + R_L) - i_2 R_L &= u_{c1} \\ i_2(R_2 + R_L) - i_1 R_L &= u_{c2} \\ u_o &= (i_2 - i_1)R_L \end{aligned} \right\} \begin{aligned} R_1 &= R_2 = R \\ u_o &= \frac{u_{c2} - u_{c1}}{2R_L + R} R_L \end{aligned}$$

如果 $R_L \gg R$, 则 $u_o = \frac{1}{2}(u_{c2} - u_{c1}) = \frac{1}{2}K_d(U_{D2} - U_{D1})$

在电路参数相同的条件下，输入调频信号幅度相等，比例鉴频器的输出电压与互感耦合或电容耦合相位鉴频器相比要小一半，即灵敏度减半。



7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

2. 工作原理

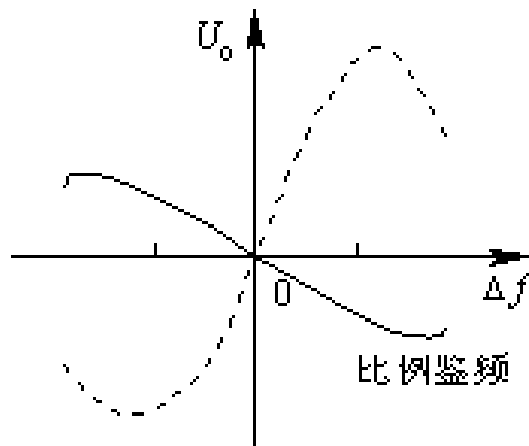
$$u_o = \frac{1}{2}(u_{c2} - u_{c1}) = \frac{1}{2}K_d(U_{D2} - U_{D1})$$

当 $f=f_c$ 时, $U_{D1}=U_{D2}$, $u_o=0$

当 $f>f_c$ 时, $U_{D1}>U_{D2}$, $u_o<0$

当 $f<f_c$ 时, $U_{D1}<U_{D2}$, $u_o>0$

鉴频特性如图所示:



比例鉴频器的鉴频特性与互感耦合相位鉴频器的极性相反;

改变两个二极管连接的方向或耦合线圈的绕向（同名端）可以使鉴频特性相反



7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

2. 工作原理

$$u_o = \frac{1}{2}(u_{c2} - u_{c1}) = \frac{1}{2}E_0 \frac{(u_{c2} - u_{c1})}{E_0}$$

$$= \frac{1}{2}E_0 \frac{u_{c2} - u_{c1}}{u_{c2} + u_{c1}} = \frac{1}{2}E_0 \frac{1 - u_{c1}/u_{c2}}{1 + u_{c1}/u_{c2}}$$

比例鉴频器输出电压取决于两检波电容上电压的比值，故称比例鉴频器。

当输入调频信号的频率变化时， u_{c1} 、 u_{c2} 中一个增大，另一个减少，变化方向相反，输出电压可按调制信号的规律变化；若输出信号的幅度改变，例如增大，将以相同的方向变化，这样可保持比值基本不变，使得输出电压不变，这就是限幅作用。

注： u_o 只与 u_{c1} 、 u_{c2} 的比值有关，其条件是 E_0 恒定， R_1, R_2 上的电压等于 $E_0/2$ ，因此 C 必须足够大



7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

3. 自限幅原理

比例鉴频器具有有限幅作用的原因就在于电阻 R_2 两端并接了一个大电容 C ，当输入幅度发生瞬时变化时，利用大电容得储能作用，保持 E_0 不变，来抑制输入幅度的变化。

另外，比例鉴频器的限幅作用还可解释为鉴频器高 Q 回路的负载变化产生。因为 E_0 对检波管 V_{D1}, V_{D2} 是个反向偏压，当输入幅度瞬时增大时，二极管导通角增加，电流基波分量 I_1 加大，使得基波能量消耗增加，检波器输入电阻 I_1 下降，这将导致回路的谐振电阻及有效 Q_e 值下降。

一方面将导致回路两端电压下降，使检波器输入幅度下降，同时，还将引起回路相位的减小，其结果都使输出电压不随输入信号幅度的增大而增大，起到自动限幅的作用。



7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

3. 自限幅原理

为使比例鉴频器有较好的限幅作用，须做到：

(1) 回路的无载 Q_0 值要大，以便当检波器输入电阻随输入幅度变化时，能引起 Q 的明显变化。

(2) 要保证时常数 $(R_1 + R_2)C$ 大于寄生调幅干扰的几个周期

比例鉴频器存在过抑制和阻塞现象。

过抑制——输入信号幅度加大时，输入电压反而下降的现象。

阻塞——当输入信号幅值瞬时大幅度下降时，因 U_c 的反作用，使

二极管截止，造成在一段时间内收不到信号。

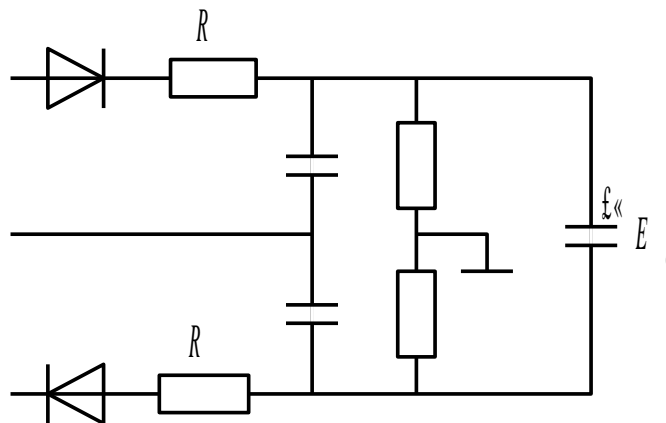


7.5 鉴频电路

二、比例鉴频器

解决过抑制和阻塞问题的措施：使部分偏压随输入信号变化

二极管反偏压可由两部分组成，一部分是固定的，由 E_0 提供，另一部分由与二极管串联的电阻产生，他随输入信号而变



图中总偏压为 $E_0 / 2 + I_{av} R$

减小过抑制及阻塞的措施



7.5 鉴频电路

三、乘积型相位鉴频器

乘积型相位鉴频器由移相网络、乘法器和低通滤波器三部分组成。

调频信号一路直接加至乘法器，另一路经相移网络移相后（参考信号）加至乘法器。由于调频信号和参考信号同频正交，因此，也称之为正交鉴频器。

当输入信号瞬时频率 $f = f_c$ 时，产生的相移为 90° ，此时相移网络输出与输入电压正交，两者相乘的结果为 0。（相乘后低通）

当 $f = f_c \pm \Delta f$ 时，产生的相移为 $\pm \Delta\varphi$ 其中 $\Delta\varphi = \arctan(2Q\Delta f / f_0)$

设： $u_1 = U_1 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$

则： $u_0 = U_0 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \frac{\pi}{2} \pm \Delta\varphi)$

则二者相乘并经低通滤波后，有：

$$u_o = u \cos(\frac{\pi}{2} \pm \Delta\varphi)$$



7.5 鉴频电路

三、乘积型相位鉴频器

$$u_o = U \cos\left(\frac{\pi}{2} \Delta\varphi\right)$$

当 $\Delta f / f_0 \ll 1$ 时, $\Delta\varphi = \arctan(2Q\Delta f / f_0) \approx 2Q\Delta f / f_0$

$$u_o = U \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{2Q\Delta f}{f_0}\right) \approx U \sin \frac{2Q\Delta f}{f_0} \approx U \frac{2Q\Delta f}{f_0}$$

因为 $\Delta f = k f(t)$ 所以 $u_o \propto f(t)$

即输出电压与原调制信号成正比



7.5 鉴频电路

四、其它鉴频电路

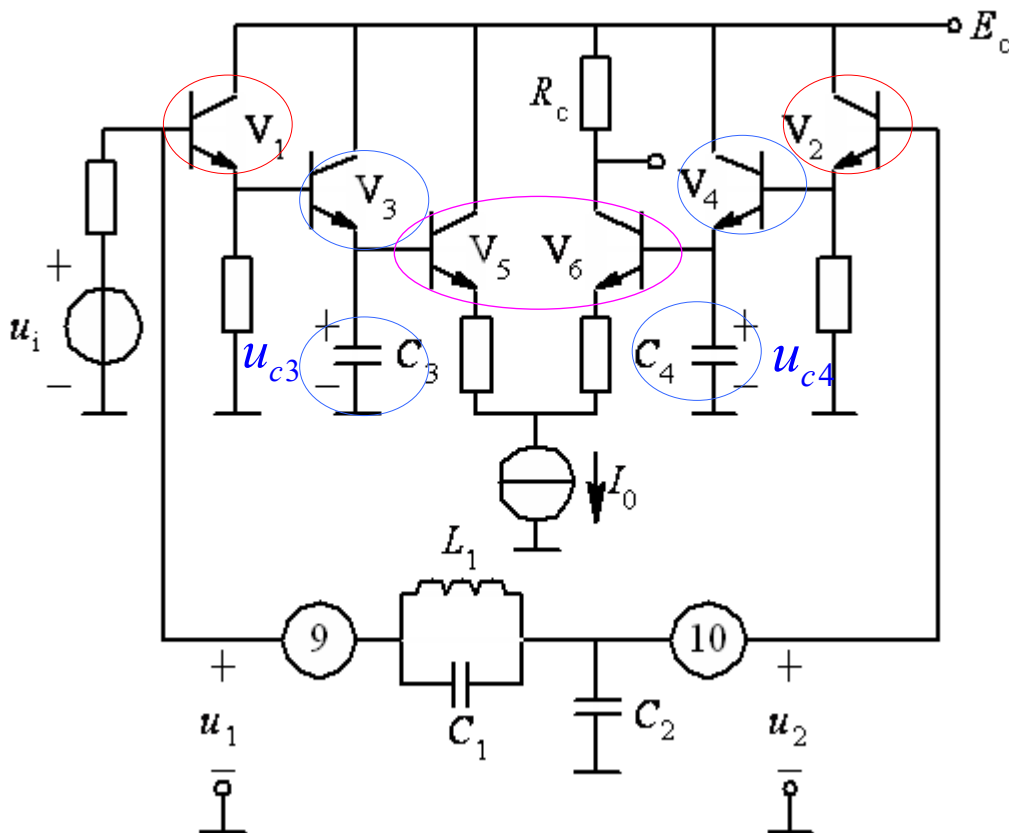
① 差分峰值斜率鉴频器

V_1, V_2 ——射极跟随器

V_3, V_4, C_3, C_4 ——峰值包络检波器

V_5, V_6 ——差分对放大器

设 u_1, u_2 的峰值包络电压为 U_1, U_2 , 检波器检波系数为 k_{d1}, k_{d2} , 则

$$u_{c3} = k_{d1} U_1 \quad u_{c4} = k_{d2} U_2$$


一般 $k_{d1} = k_{d2}$ 则经差分放大后, 输出电压 $u_o \propto U_1 - U_2$



7.5 鉴频电路

四、其它鉴频电路

① 差分峰值斜率鉴频器

f_{01} 是由 u_1 向右看的谐振频率

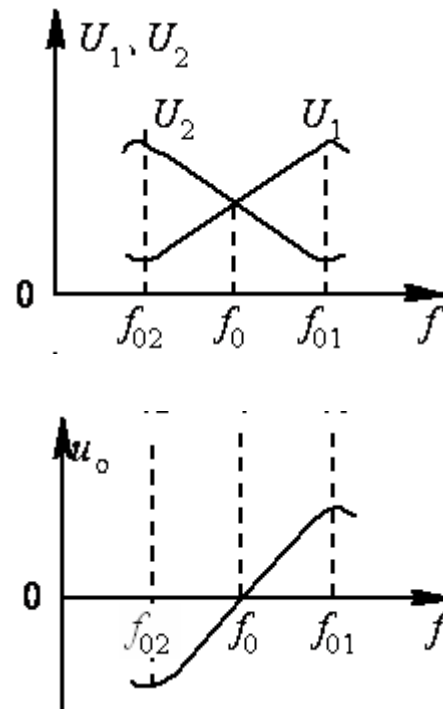
$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

f_{02} 是由 u_2 向左看的谐振频率

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1 + C_2)}}$$

当 $f = f_{01}$ 时, L_1, C_1 谐振, U_1 最大而 U_2 最小 $u_o \propto U_1 - U_2$

当 $f = f_{02}$ 时, L_2, C_2 谐振, U_1 最小而 U_2 最大



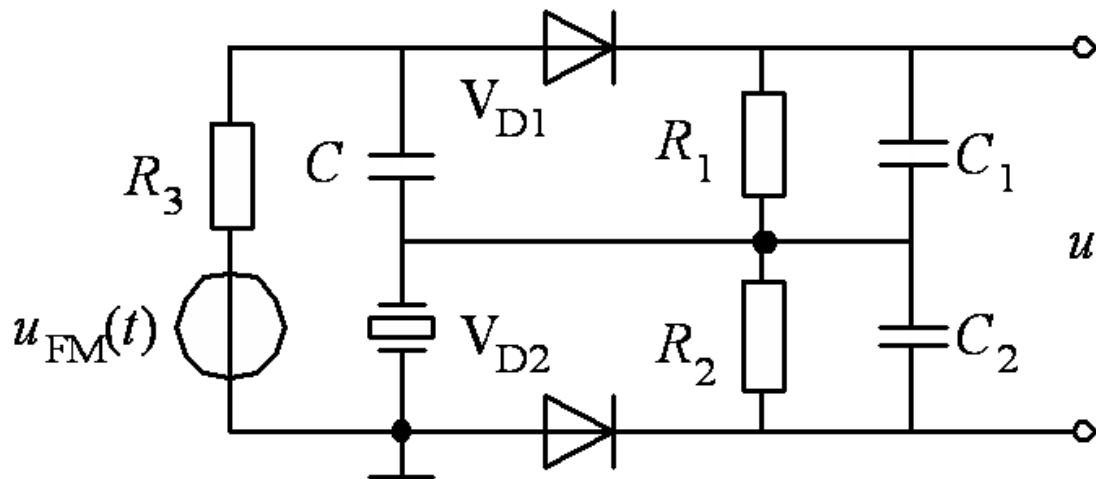


7.5 鉴频电路

四、其它鉴频电路

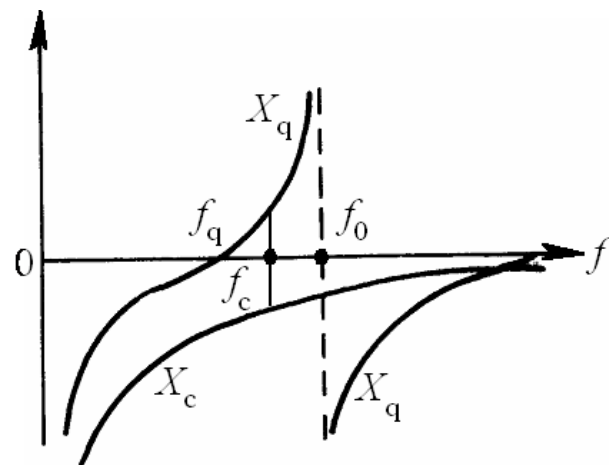
② 晶体鉴频器

V_{D1} 、 R_1 、 C_1 和
 V_{D2} 、 R_2 、 C_2 为
两个二极管包络
检波器。



为了保证电路平衡，通常 V_{D1} 与 V_{D2} 性能相同， $R_1=R_2$ ， $C_1=C_2$ 。

电容 C 与晶体组成分压器，其分压比
取决于两者的电抗比，设 C 的电抗为
 X_C ，晶体的电抗为 X_q ，电抗曲线如图：





7.5 鉴频电路

四、其它鉴频电路

② 晶体鉴频器

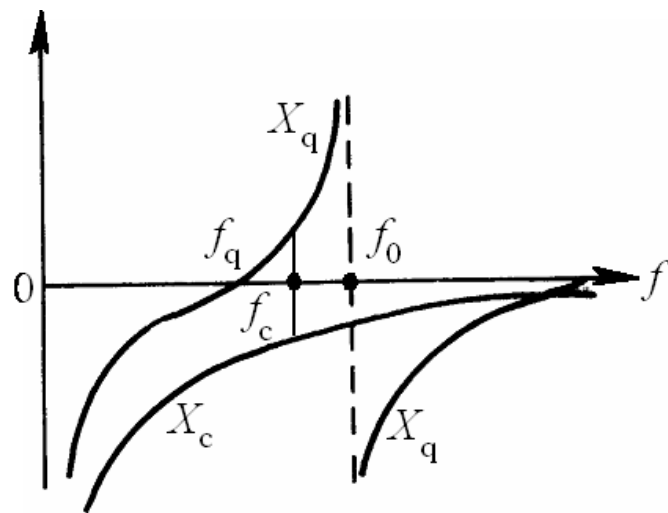
晶体串、并联谐振频率 f_q, f_0 相隔很近，电抗在此范围内变化很快，并呈感性，而在此范围内，电容容抗可近似认为不变，故当信号频率变化时，分压比的改变主要是由晶体电抗变化引起的。

当 $f = f_q$ 时， $X_q = 0$ ，电压全部降在电容器 C 上

当 $f = f_0$ 时， $X_q \rightarrow \infty$ ，电压几乎全部降在晶体上

当 $X_q = X_c$ 时，如图 7.5.1 中 f_c 处， $u_c = u_q$

在 $f_q \sim f_0$ 之间， $f < f_c$ 时， $u_q > u_c$ ； $f > f_c$ 时， $u_q < u_c$



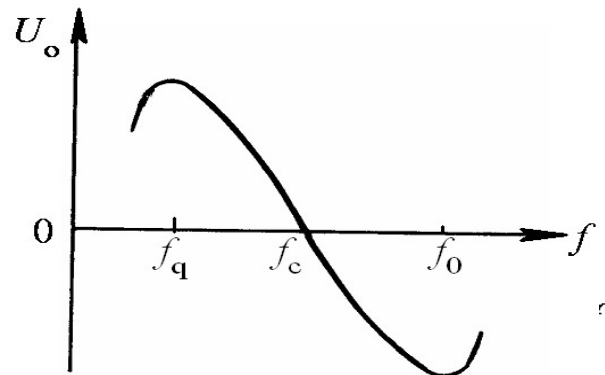


7.5 鉴频电路

四、其它鉴频电路

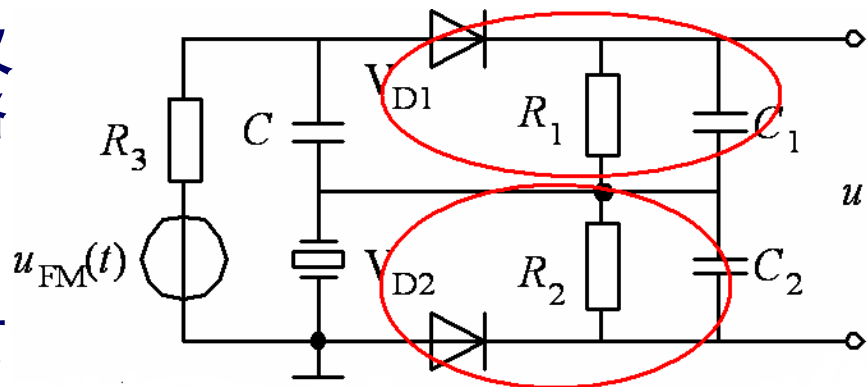
② 晶体鉴频器

在 $f_q \sim f_0$ 之间, $f \square \square u_q \square, u_c \square$



故 C 与晶体上的电压是既调频又调幅的，利用电容——晶体支路将调频波进行了波形变换。

接包络检波器后可解调出调制信



晶体鉴频器的优点是：结构简单，调整容易，鉴频灵敏度高。