

# 6.5 调频波的解调

一、鉴频器的质量指标

二、斜率鉴频器

三、相位鉴频器

四、比例鉴频器

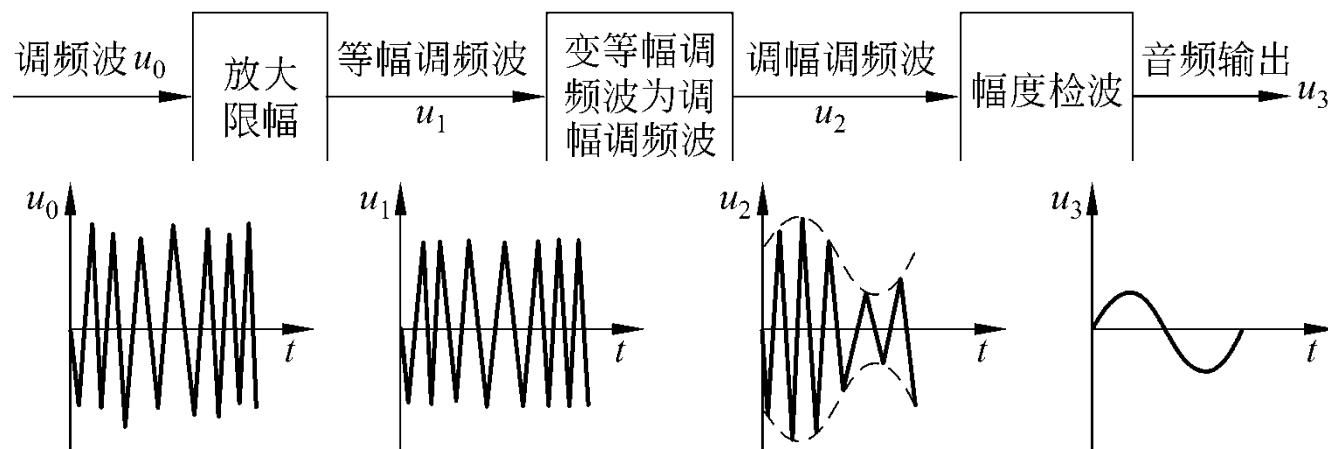
## 6.5 调频波的解调

从调频波中取出原来的调制信号，称为频率检波，又称鉴频。完成鉴频功能的电路，称为鉴频器。

在调频波中，调制信息包含在高频振荡频率的变化量中，所以调频波的解调任务就是要求鉴频器输出信号与输入调频波的瞬时频移成线性关系。

- 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。

为此，在输入到鉴频器前的信号要经过限幅、使其幅度恒定。因此，调频波的检波，主要是**限幅器**和**鉴频器**两个环节。

有的鉴频器（比例鉴频器），本身具有限幅作用，则可以省掉限幅器。

鉴频器的类型很多，根据它们的工作原理，可分为**斜率鉴频器**，**相位鉴频器**和**比例鉴频器**。

## 思路——鉴频器实际上包含两个部分

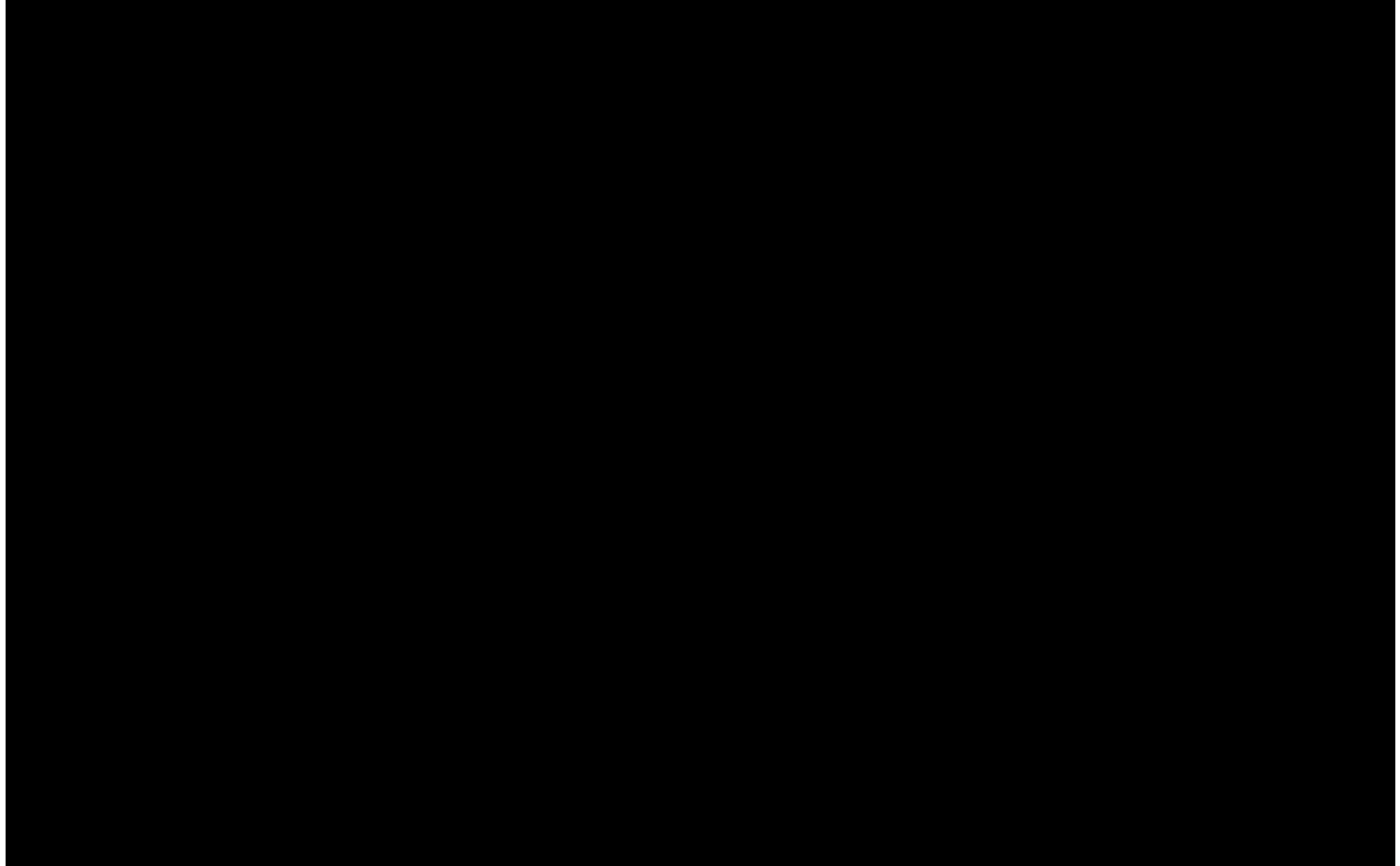
1. 线性变换电路——借助于谐振电路将等幅的调频波转换成幅度随瞬时频率变化的调幅调频波。
2. 幅度检波电路——用二极管检波器进行幅度检波，以还原出调制信号。

# 一. 鉴频器的质量指标

## 1. 鉴频跨导 $g_d$

鉴频器的输出电压  $U_{\Omega}$  与输入调频信号瞬时频偏  $\Delta f$  的关系，可用鉴频特性曲线表示。所谓鉴频跨导  $g_d$ ，是指曲线的中心频率（图6-25的  $\Delta f = 0$  处）附近输出电压与频偏的比值又叫鉴频灵敏度。

它表示单位频偏所产生输出电压的大小。鉴频曲线越陡，鉴频灵敏度越高，说明在较小的频偏下就能得到一定电压的输出。因此鉴频跨导大些好。



## 2. 鉴频频带宽度 $B$

这指的鉴频特性近于直线的频率范围。在图中就是两弯曲点之间的范围，我们称为频带宽度 $B$ 。一般要求 $B$ 大于输入调频波频偏的两倍。

## 3. 非线性失真

在频带内鉴频特性只是近似线性，也存在着非线性失真，我们希望非线性失真尽量小。

## 4. 对寄生调幅应有一定的抑制能力



## 二、斜率鉴频器

### 1. 单失谐回路斜率鉴频器

1) 电路

2) 工作原理

3) 优缺点

### 2. 参差调谐鉴频器

# 1. 电路——斜率鉴频器由失谐单谐振回路和二极管包络检波器组成。

其谐振电路不是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。

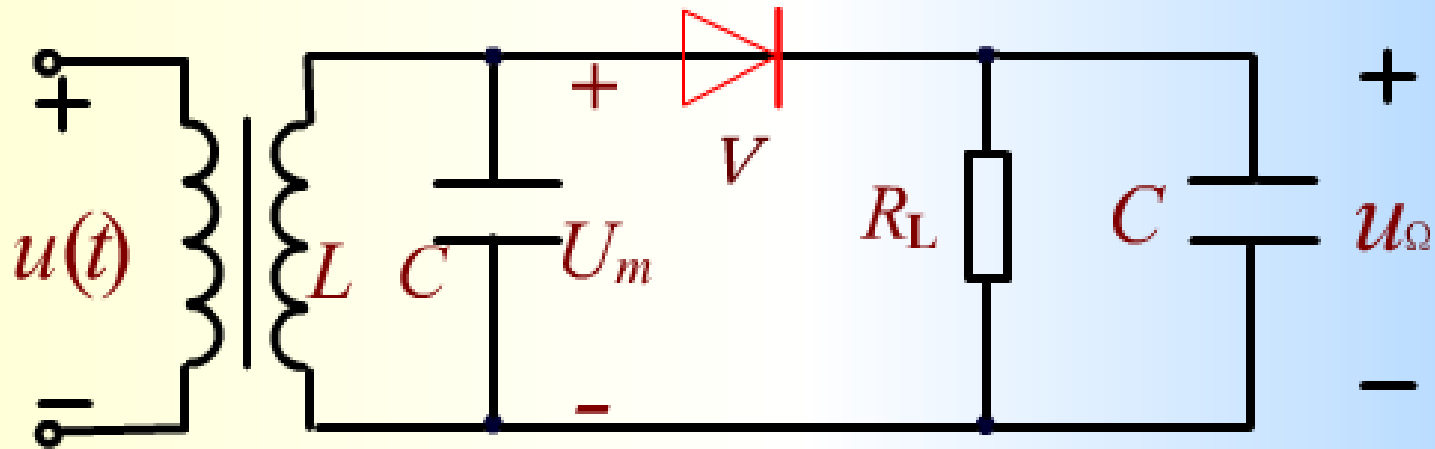


图6-26 斜率鉴频器电路图

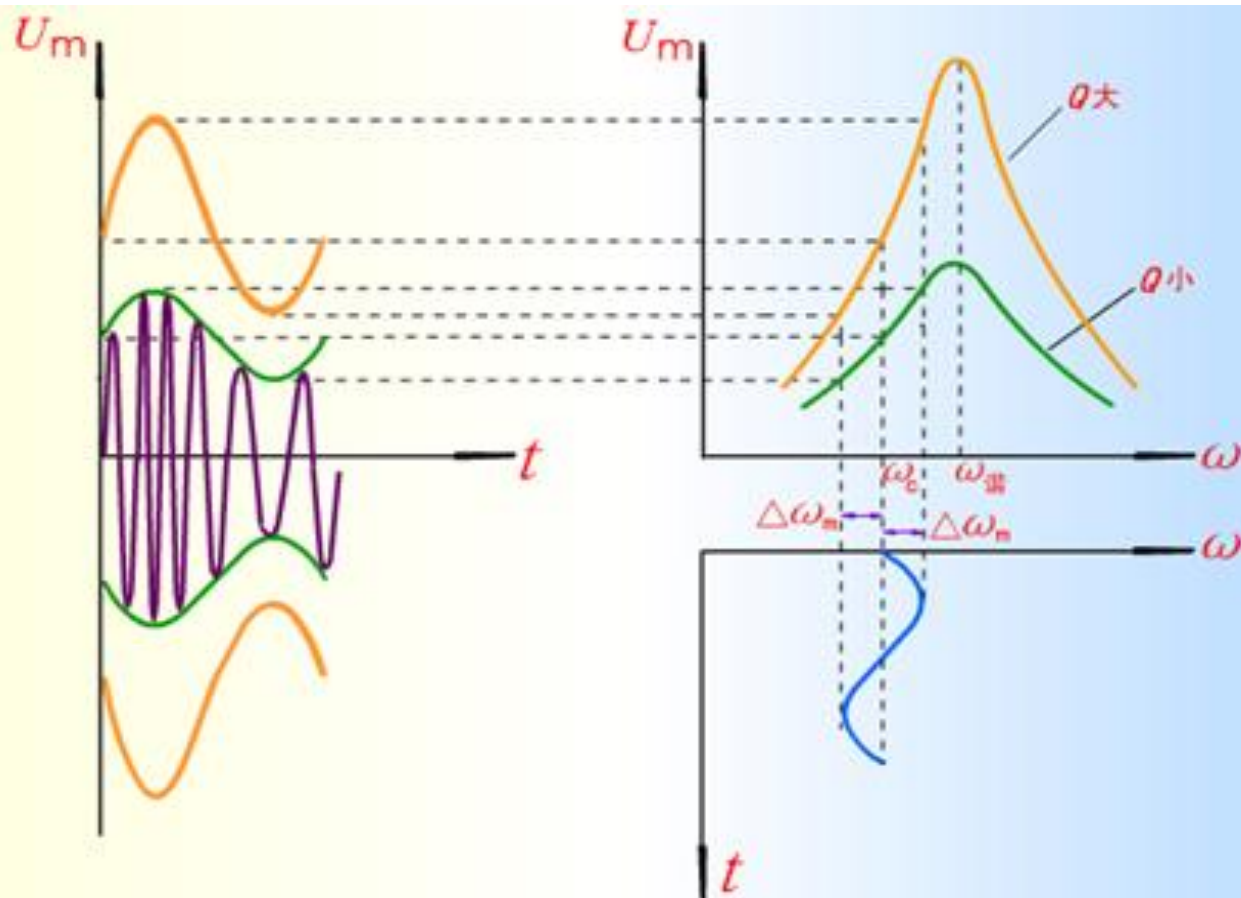
## 2.工作原理

利用并联LC回路幅频特性的倾斜部分将等幅FM波  AM-FM波；

再通过二极管对调幅波检波，便可得到调制信号。

这种鉴频器是利用并联回路幅频特性的倾斜部分将调频波变换成调幅调频波，故称为斜率鉴频器。

在实际调整时，为了获得线性的鉴频特性曲线，总是使输入调频波的中心频率处于谐振特性曲线中接近直线段的中点，如图6-27所示M（或  $M'$ ）点。这样，谐振电路电压幅度的变化将与频率成线性关系，就可将调频波转换成调幅调频波。再通过二极管对调幅波检波，便可得到调制信号。



由上图可见,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。

图6-27 斜率鉴频器工作原理

### 3. 优缺点

优点：电路简单

缺点：线性范围与灵敏度矛盾

$Q$ 大，灵敏度高，线性范围窄；

$Q$ 小，灵敏度低，但线性范围宽。

## 2. 参差调谐鉴频器——

可以改善斜率鉴频器的线性

第一个回路的谐振频率  
高于调频波的中心频  
率  $f_c$  ,  
第二个回路的谐振频率  
低于  $f_c$  , 它们相对于  $f_c$   
有一失谐量。

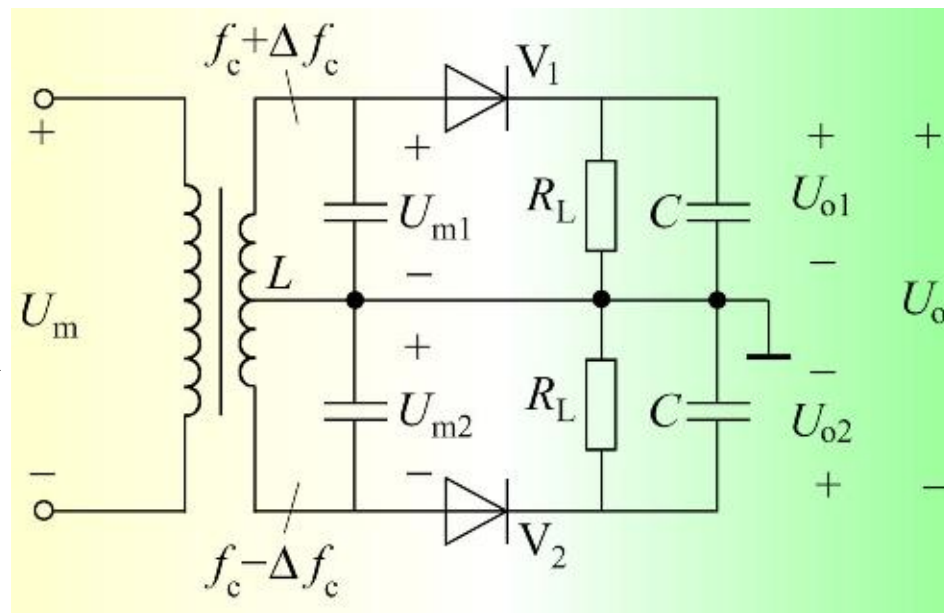
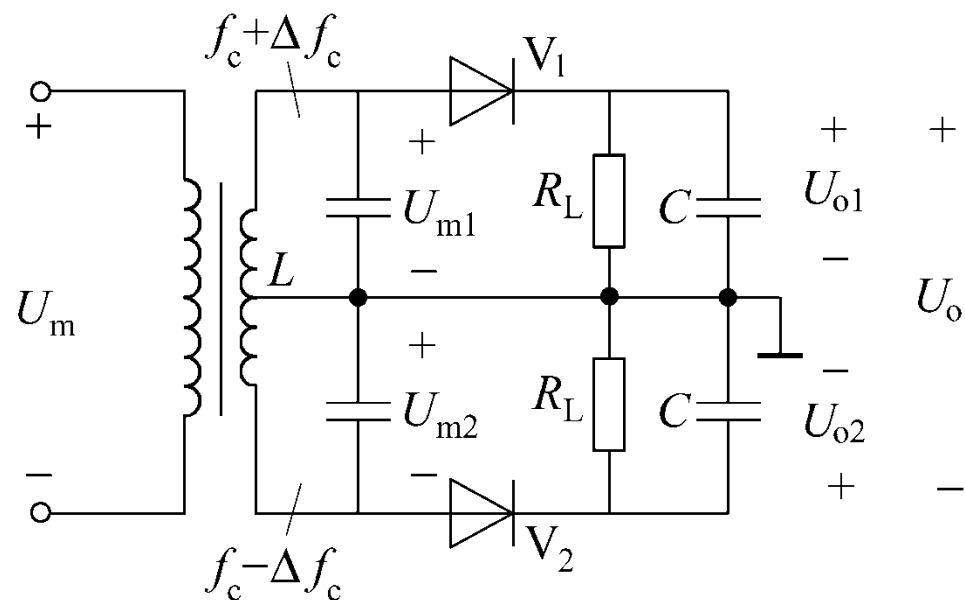


图6-28 参差调谐鉴频器

$$U_{o1} = \eta_{\text{检}} U_{m1}$$

$$U_{o2} = \eta_{\text{检}} U_{m2}$$



$$U_o = U_{o1} - U_{o2} = \eta_{\text{检}} (U_{m1} - U_{m2})$$



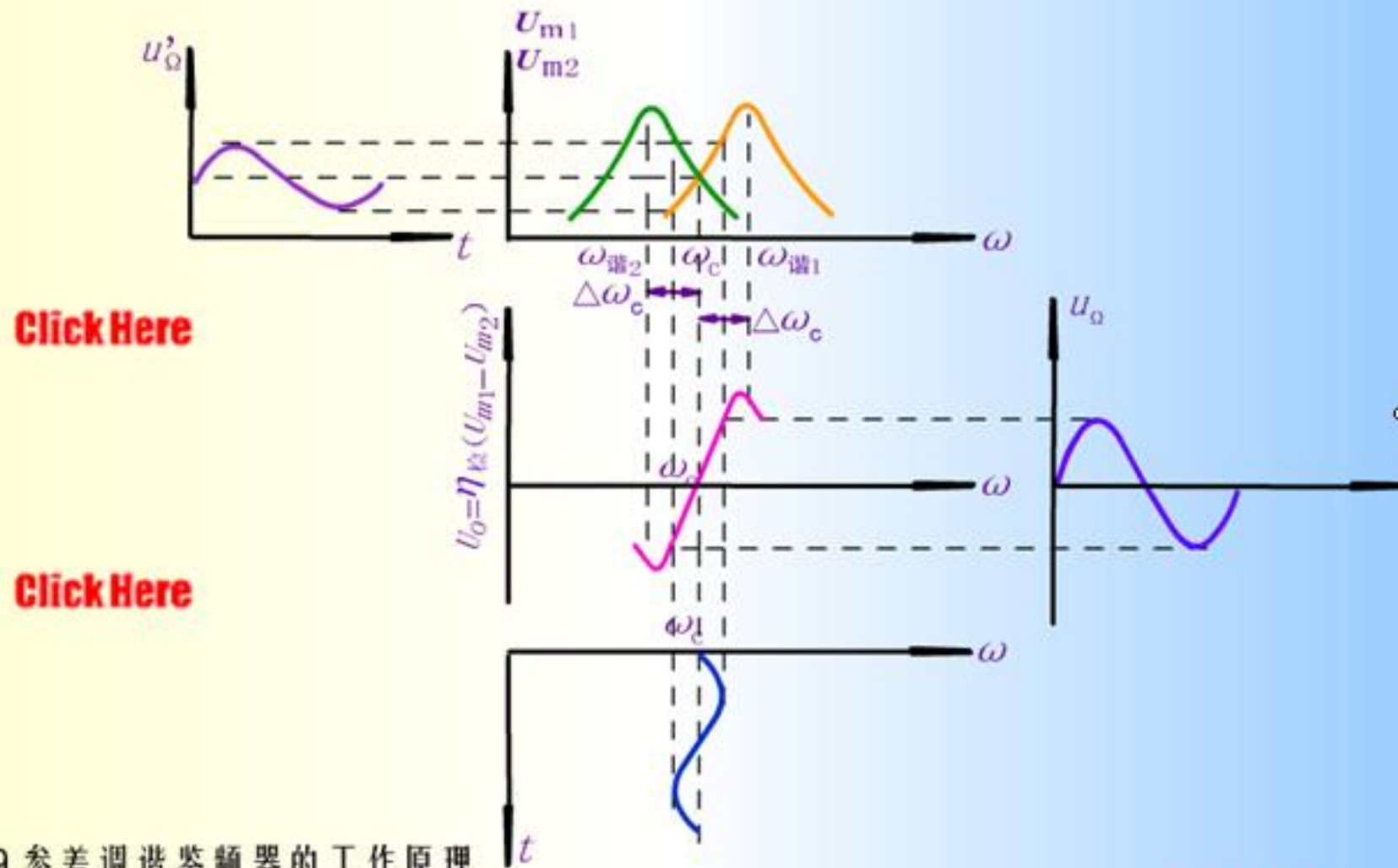


图6-29 参差调谐鉴频器的工作原理

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。

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;

缺点: 要求上下两个回路严格对称, 分别调谐到两个不同的准确频率上, 给实际调整增加了困难。

### 三. 相位鉴频器

相位鉴频器是利用回路的相位—频率特性来实现调频波变换为调幅调频波的。它是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。

常用的相位鉴频器电路有两种，即电感耦合相位鉴频器和电容耦合相位鉴频器。

# 1. 电感耦合相位鉴频器

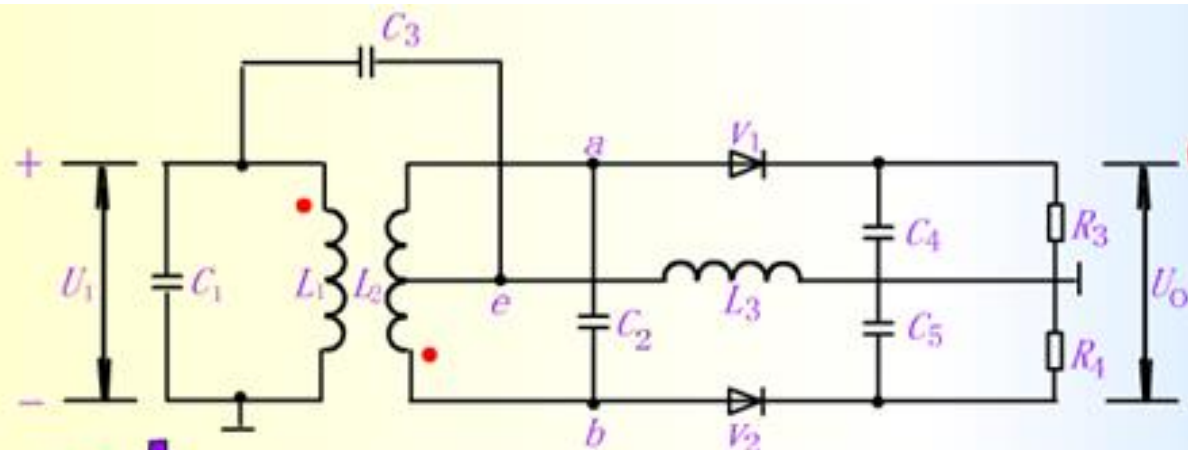
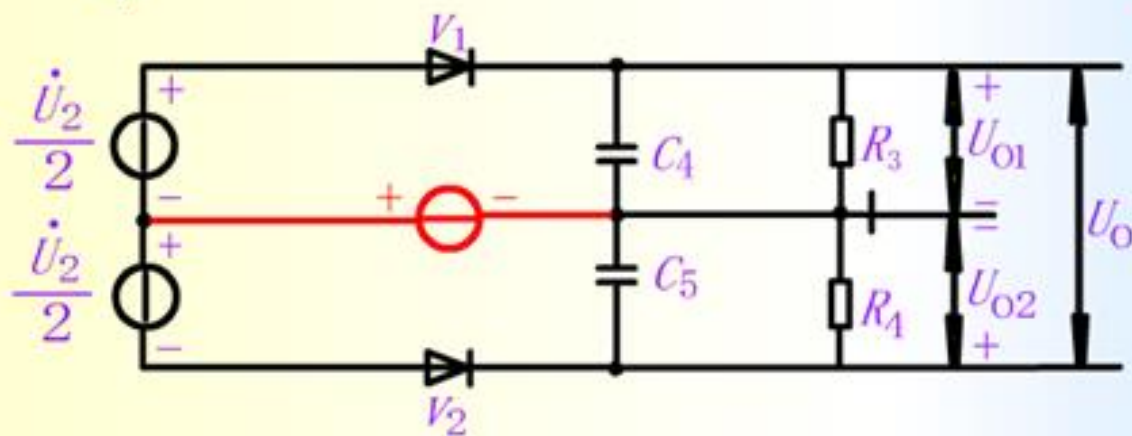


图6-30 电感耦合相位鉴频器原理电路

① 电压  $U_1$  通过互感  $M$  在次级回路  $L_2 C_2$  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  $\frac{\dot{U}_2}{2}$ 。



电感耦合相位鉴频器等效电路

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) 电路组成

(1) 线性变换电路—— $L_1C_1$  和  $L_2C_2$  是两个松耦合的双调谐电路，都调谐于调频波的中心角频率 $\omega_0$ 。其中初级回路  $L_1C_1$  一般是限幅放大器的集电极负载。这种松耦合双调谐电路有这样一个特点——当信号角频率变化时，副边谐振电路电压  $\dot{U}_2$  对于原边电压  $\dot{U}_1$  的相位随之变化。这种鉴频器正是利用这种相位变化的特点，将频率的变化转换成幅度变化的，所以叫做相位鉴频器。

耦合电容耦合 $C_3$ 。 $L_3$ 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 $L_3$ 上电压近似等于原边电压。

$$\dot{U}_3 \approx \dot{U}_1$$

$L_3$ 又给检波电流的直流分量提供通路。

(2) 幅度检波电路—— $V_1$ 、 $R_1$ 、 $C_4$ 和 $V_2$ 、 $R_2$ 、 $C_5$  构成两个对称的幅度检波器。

## 2) 工作原理

调频波瞬时频率变化是怎样影响鉴频器输出的？  
可以概括为四句话，即：

- (1) 副边电压对于原边电压的相位差随角频率而变；
- (2) 检波器的输入电压幅度随角频率而变；
- (3) 检出的电压, 幅度随角频率而变；
- (4) 鉴频器的输出电压也随频率发生变化。

# (1) 副边电压对于原边电压的相位差 随角频率而变

- 设原边电压为  $\dot{U}_1$ ，根据互感原理， $L_1$  中电流为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2}}$$

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} \quad (\text{谐振回路的 } Q \text{ 值较高})$$

$\dot{I}_1$  的相位滞后于  $\dot{U}_1$   $90^\circ$



- $\dot{I}_1$  在次级回路中产生的感应电势

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

其相位落后于  $\dot{I}_1$   $90^\circ$ 。

$\dot{E}_2$  在次级回路中造成电流

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)} \quad (6-58)$$

由式 (6-58) 可知,  $\dot{I}_2$  相位随角频率  $\omega$  而变。

- $\dot{I}_2$  流过  $C_2$  产生的电压为  $\dot{U}_2$ ，它落后于  $\dot{I}_2$   $90^\circ$ 。它的表示式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2} = -\frac{j\omega M \dot{I}_1}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)} \cdot \frac{1}{j\omega C_2} \\ &= j \frac{1}{\omega C_2} \cdot \frac{M}{L_1} \cdot \frac{\dot{U}_1}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}\end{aligned}\quad (6-59)$$

上式表明，副边电压对于原边电压的相位差随角频率而变。

当  $\omega = \omega_c$  时,  $\dot{U}_2$  超前  $\dot{U}_1$   $90^\circ$  ;

当  $\omega > \omega_c$  时,  $\dot{U}_2$  超前  $\dot{U}_1$  小于  $90^\circ$  ;

当  $\omega < \omega_c$  时,  $\dot{U}_2$  超前  $\dot{U}_1$  大于  $90^\circ$  。

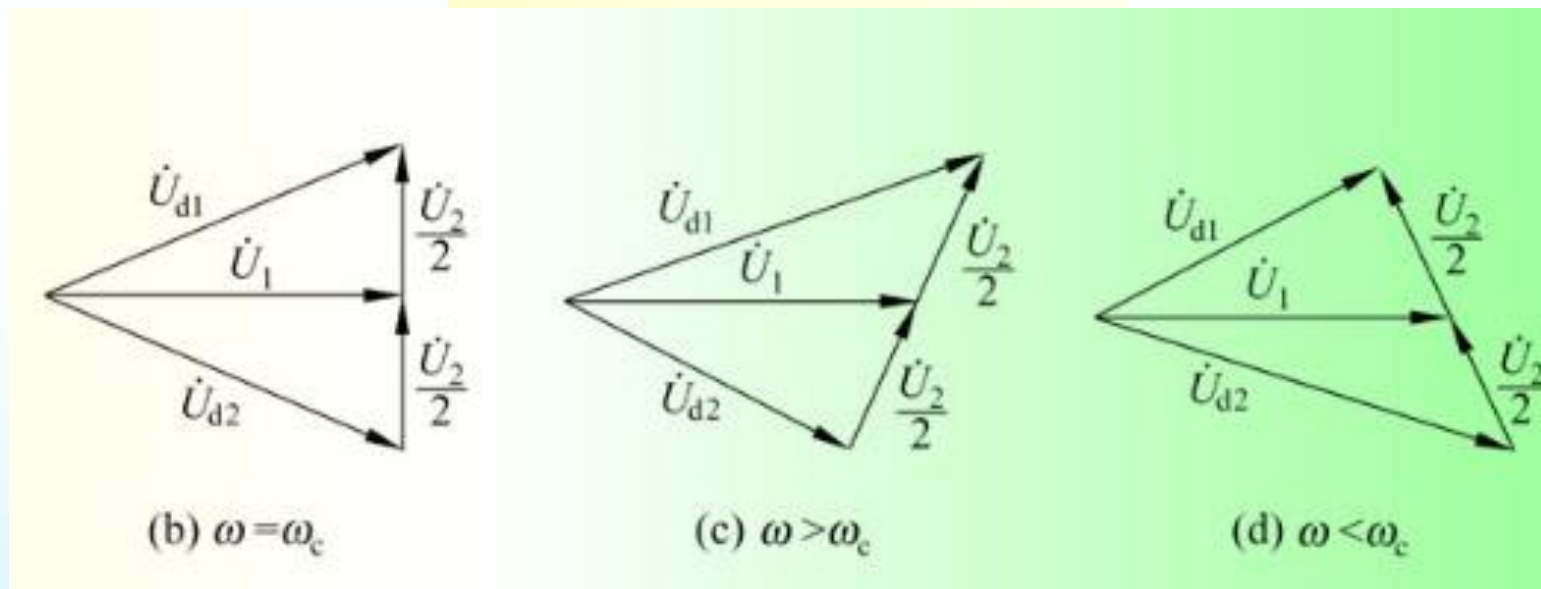
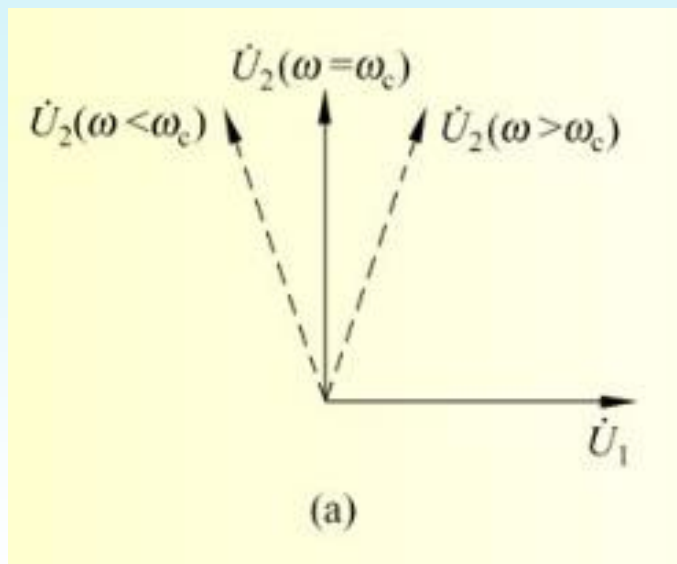
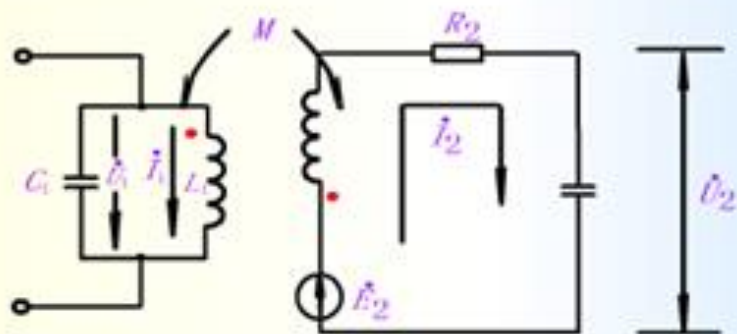


图 6-32在不同频率下的  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$

# 次级回路 等效电路

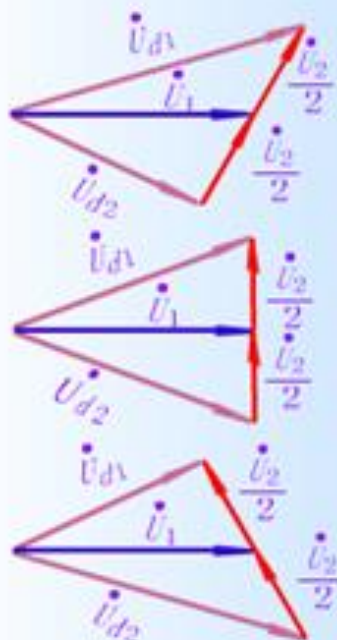
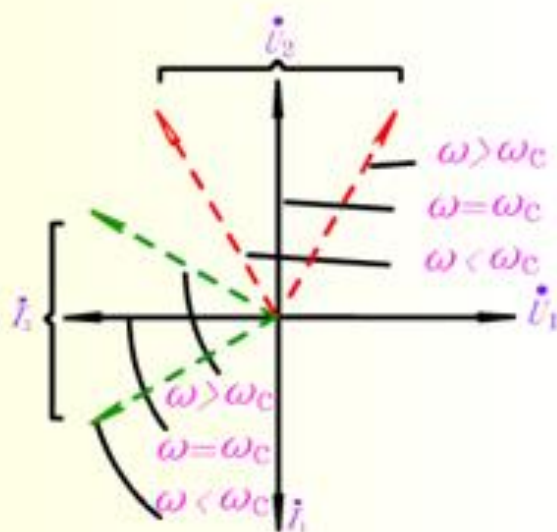


$\omega > \omega_c$

$\omega = \omega_c$

$\omega < \omega_c$

总图



$$\dot{U}_{d1} > \dot{U}_{d2} \rightarrow \dot{U}_{o1} > \dot{U}_{o2} \rightarrow \dot{U}_o > 0$$

$$\dot{U}_{d1} = \dot{U}_{d2} \rightarrow \dot{U}_{o1} = \dot{U}_{o2} \rightarrow \dot{U}_o = 0$$

$$\dot{U}_{d1} < \dot{U}_{d2} \rightarrow \dot{U}_{o1} < \dot{U}_{o2} \rightarrow \dot{U}_o < 0$$

上述关系用曲线表示出来，也呈S形，S曲线表示了鉴频特性

YHZ/WH

## (2) 检波器的输入电压幅度 $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$ 随角频率而变

- $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$  分别为  $\dot{U}_1 \pm \dot{U}_2 / 2$  的矢量和。在不同频率下，其矢量图如图6-32所示。
- 当  $\omega = \omega_c$  时， $U_{d1} = U_{d2}$  ；
- 当  $\omega > \omega_c$  时， $U_{d1}$  增大而 $U_{d2}$  减小；
- 当  $\omega < \omega_c$  时， $U_{d1}$ 减小而 $U_{d2}$ 增大 。

(3) 检出的电压 $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$ 幅度随角频率而变

$$\because U_{o1} = \eta_d U_{d1} \quad U_{o2} = \eta_d U_{d2}$$

检出的电压 $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$ 幅度  
也遵循以上规律，随角频率而变。

#### (4) 鉴频器的输出电压 $U_o$ 也随频率发生变化

$$U_o = U_{o1} - U_{o2}$$

- 从而使鉴频器的输出电压  $U_o$  随频率发生如下的变化:
- 当  $\omega = \omega_c$  时,  $U_{o1} = U_{o2}$   $U_o = 0$
- 当  $\omega > \omega_c$  时,  $U_{o1} > U_{o2}$   $U_o > 0$
- 当  $\omega < \omega_c$  时,  $U_{o1} < U_{o2}$   $U_o < 0$



上述关系用曲线表示出来，与图6-29相似，也呈S形，**S**曲线表示了鉴频特性。

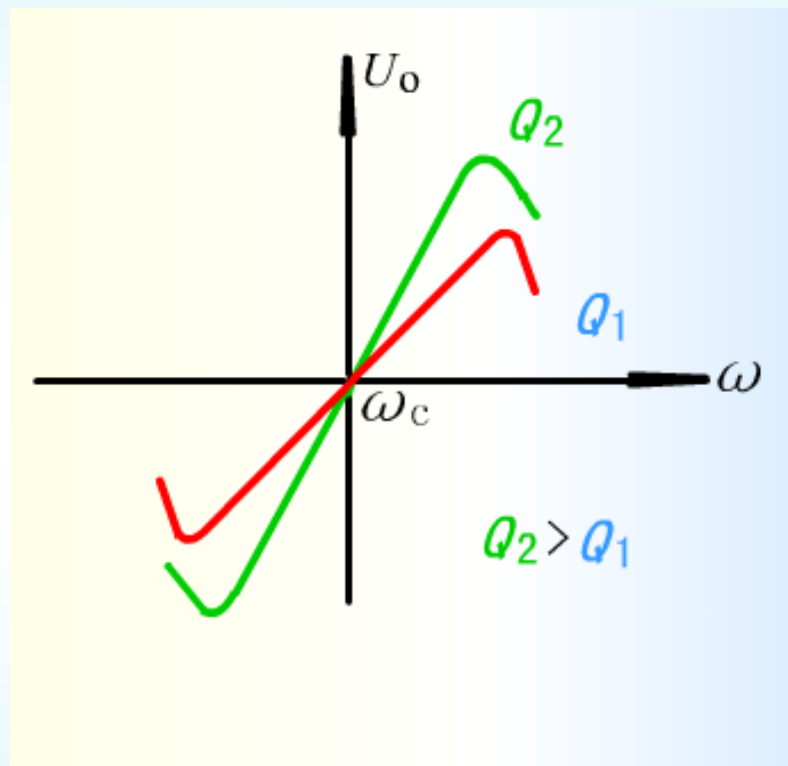
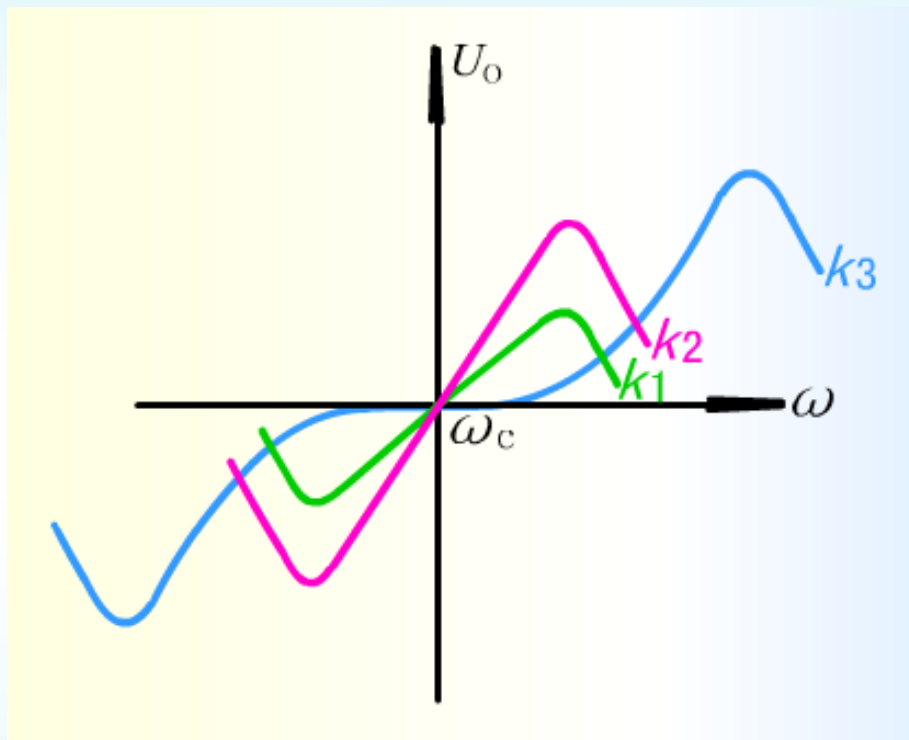


图6-33 耦合系数 $K$ 对 $S$ 曲线的影响

图6-34品质因数 $Q$ 对 $S$ 曲线的影响

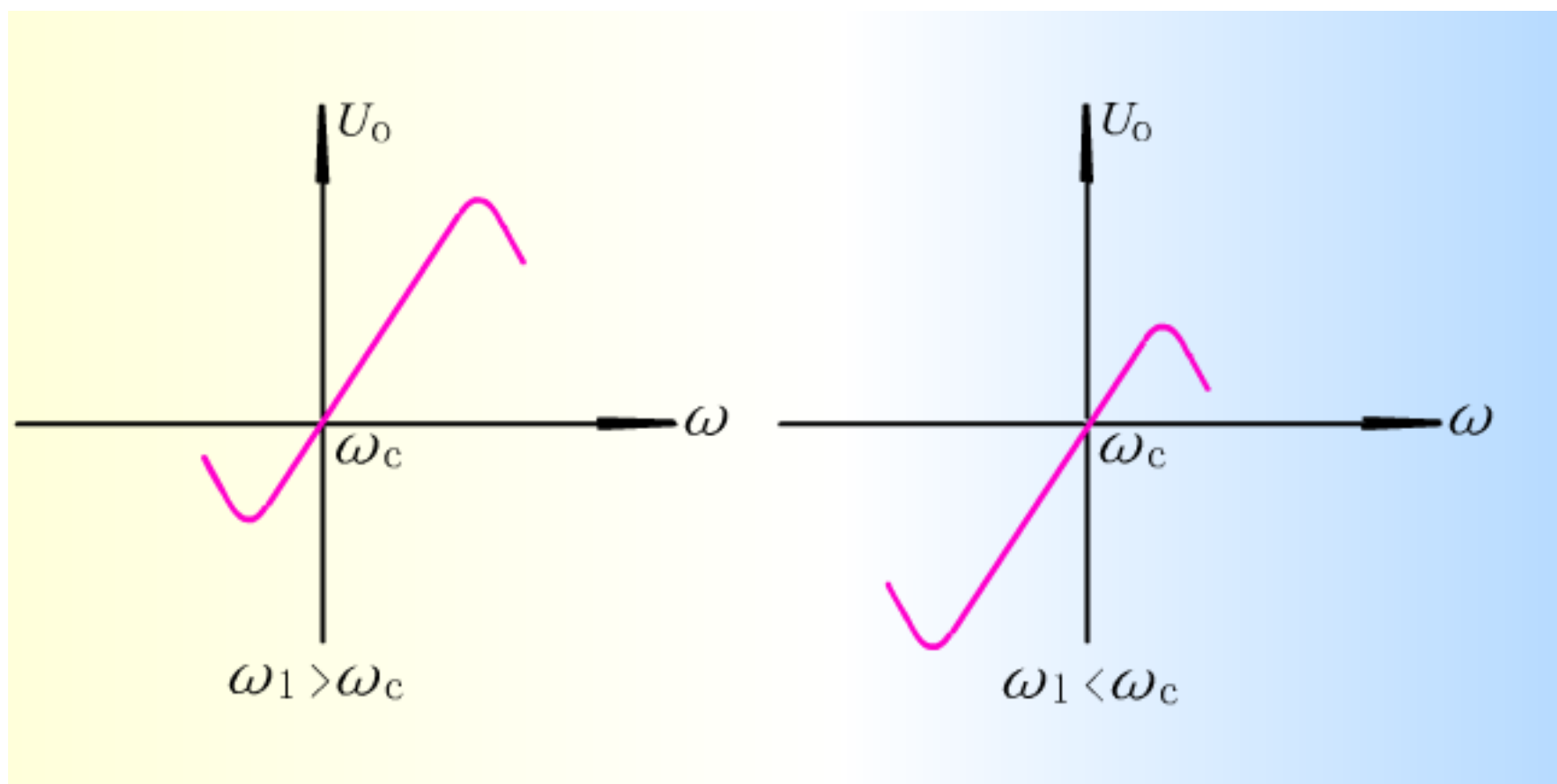


图6-35 原边谐振角频率对S曲线的影响

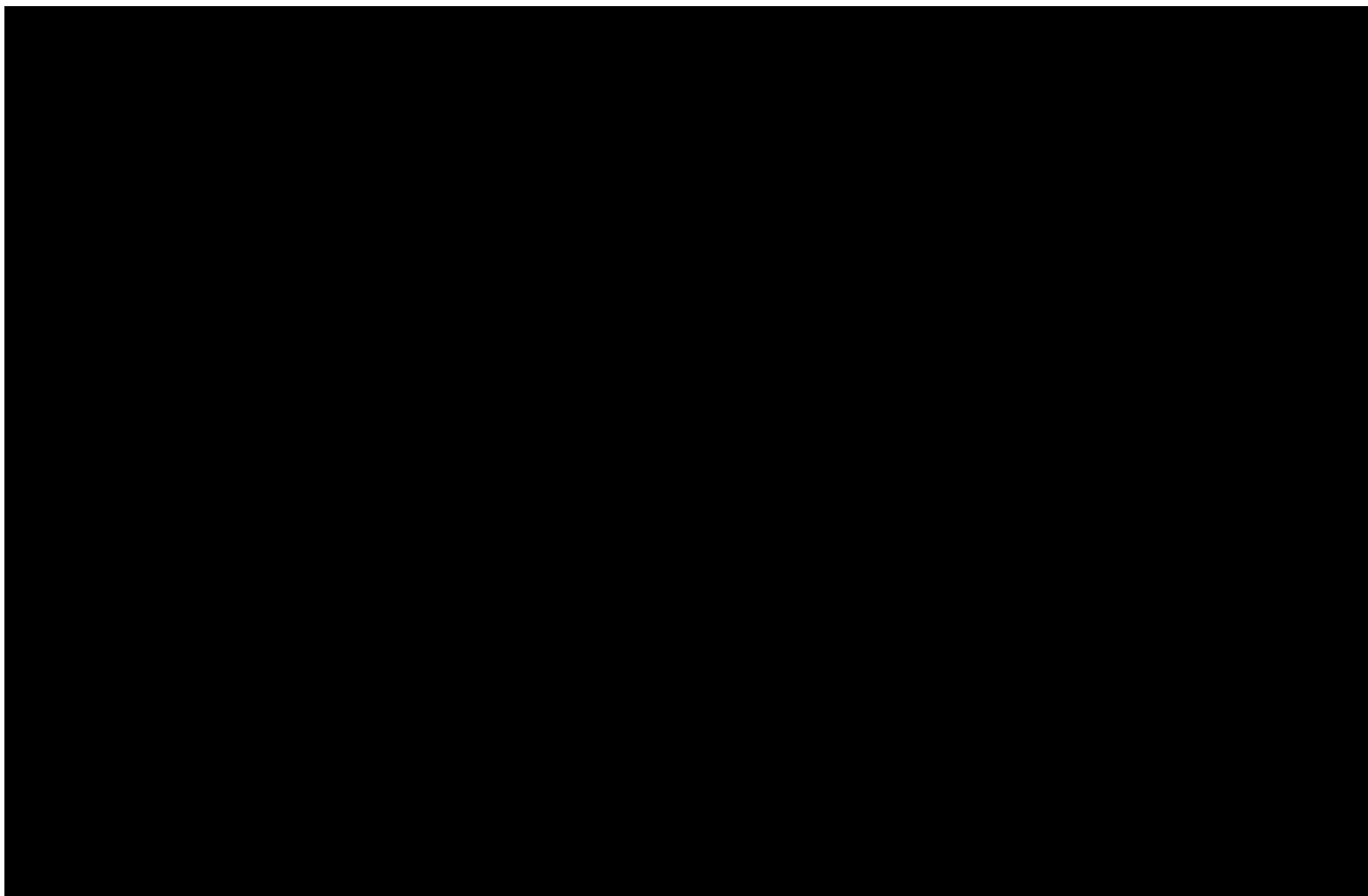


图6-36 副边谐振角频率对 $S$ 曲线的影响

## 2. 电容耦合相位鉴频器

由于这种电路的结构和调整比较简单，故用得较多。目前在移动通信机中广泛地应用这种电路。它与电感耦合相位鉴频器主要有以下三个不同点：

- 1) 耦合回路改用电容耦合的形式。初次级线圈 $L_1$ 和 $L_2$ 分别屏蔽。
- 2) 将两个检波电路的两个负载电阻和旁路电容合成一个，并将中心接地改为单端接地。
- 3) 取消了作为直流通路的电感 $L_3$ ，而加了与检波管并联的电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 。这两个电阻可作为泄放 $C_3$ 上电荷的直流路。

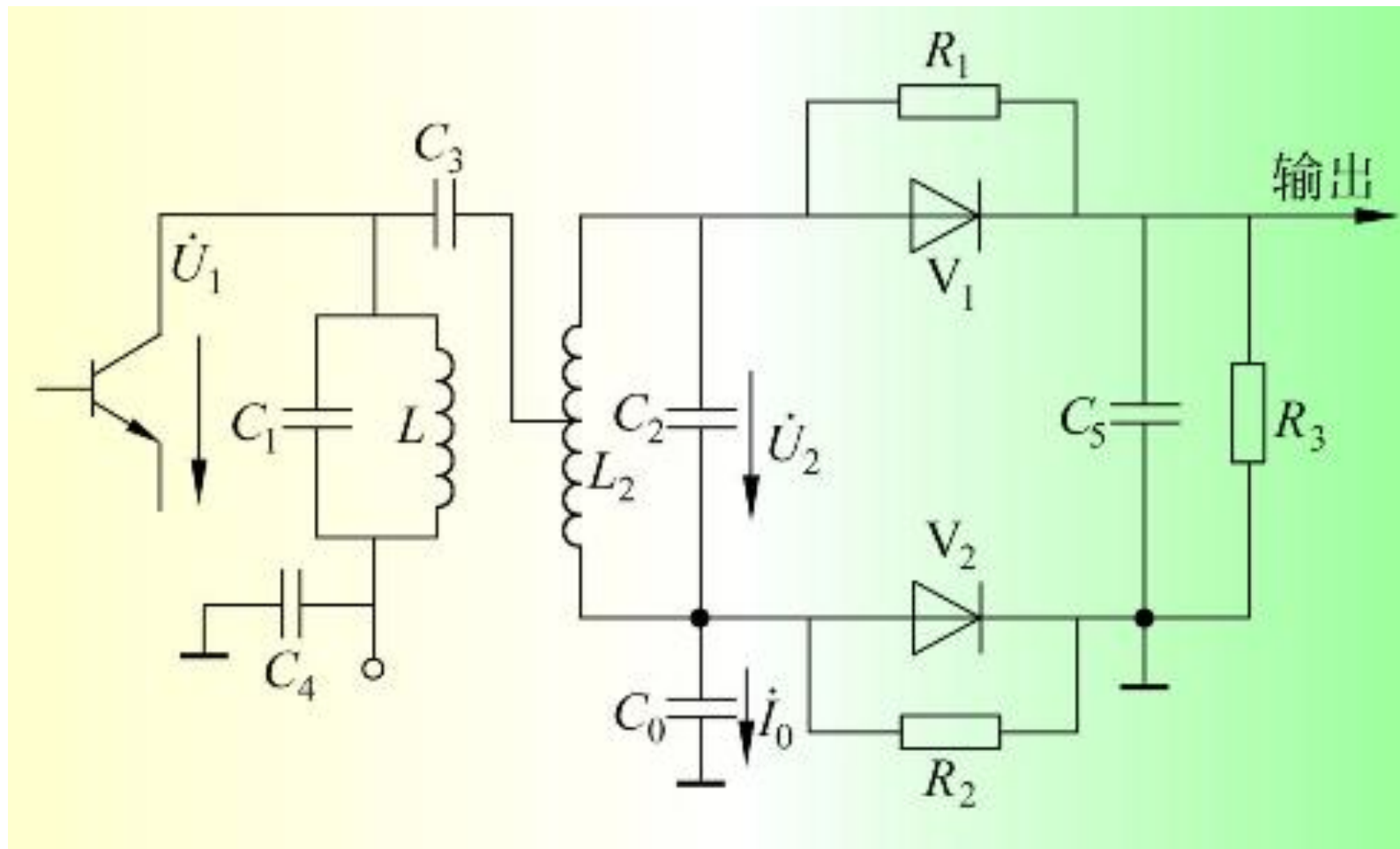


图6-37 电容耦合相位鉴频器

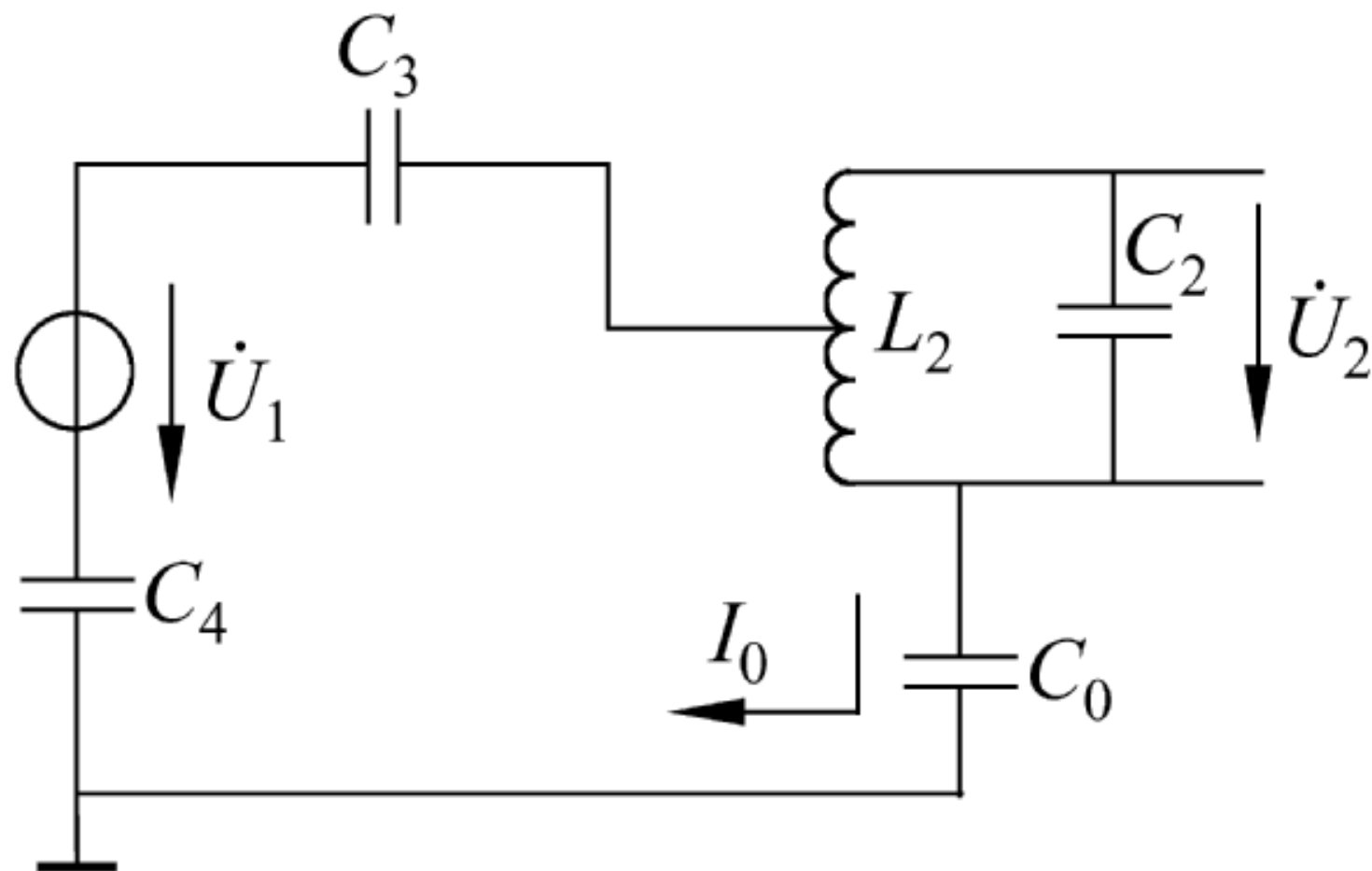


图6-38 电容耦合部分

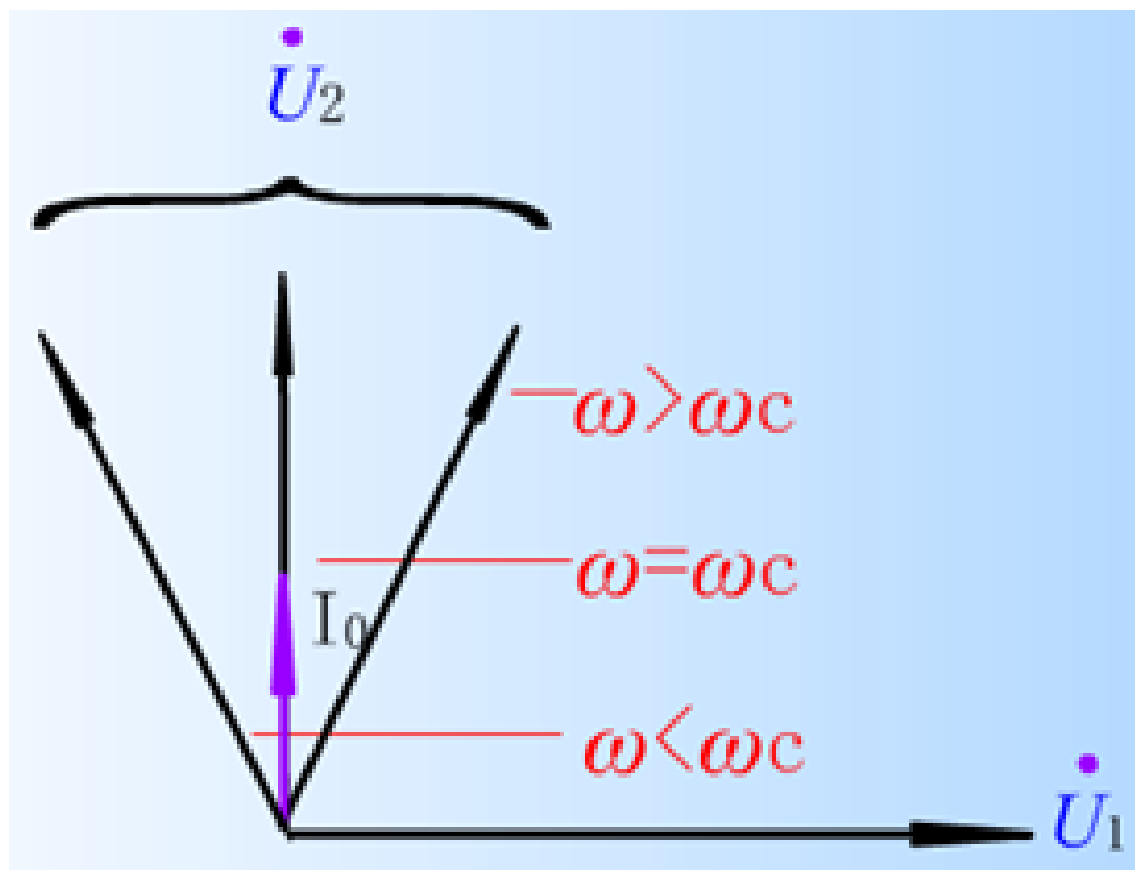


图6-39 在不同频率下  $\dot{U}_1$  、  $\dot{U}_2$  的相位关系

## 四、比例鉴频器

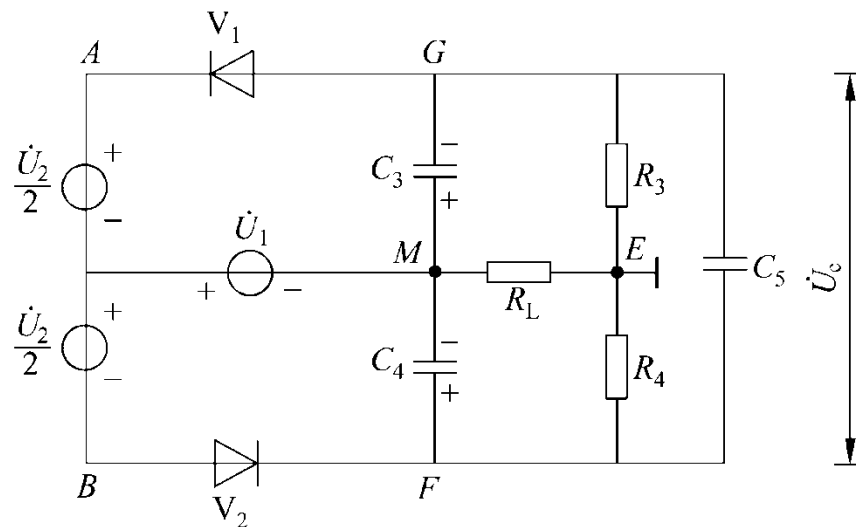
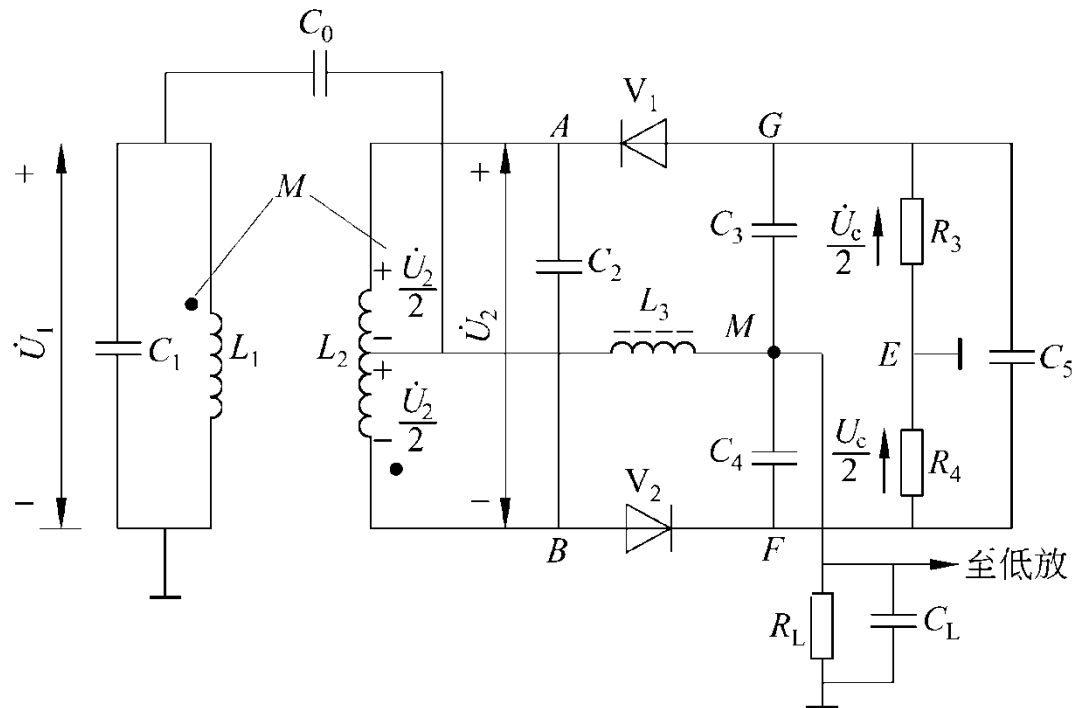
使用相位鉴频器时，在它的前级必须加限幅器，以去掉调频波的寄生调幅。

能否对相位鉴频器电路作一些改进来获得一定的限幅作用呢？

比例鉴频器就是这种鉴频和限幅功能的电路，如图6-40（a）所示。图6-40（b）为其等效电路。



# 1. 电路



## 2. 电路特点

- 1) 一个二极管  $V_1$  反接;
- 2) 有一个大电容量  $C$  (一般取  $10\ \mu\text{F}$ ) 跨接在电阻  $(R_3 + R_4)$  两端;
- 3) 输出电压取自  $M$ 、 $E$  两端, 而不是取自  $F$ 、 $G$  两端。

### 3. 工作原理

在比例鉴频器中，加于两个二极管的高频电压仍然是副边电压和 $L_3$ 上电压的矢量和，所以从频率变化转换成幅度变化过程与相位鉴频器相同。

着重分析两个问题：

- 1) 为什么检波器输出，可反映频率的变化；
- 2) 为什么这种电路具有限幅作用。

## 1) 为什么检波器输出，可反映频率的变化

$$U_c = U_{o1} + U_{o2}$$

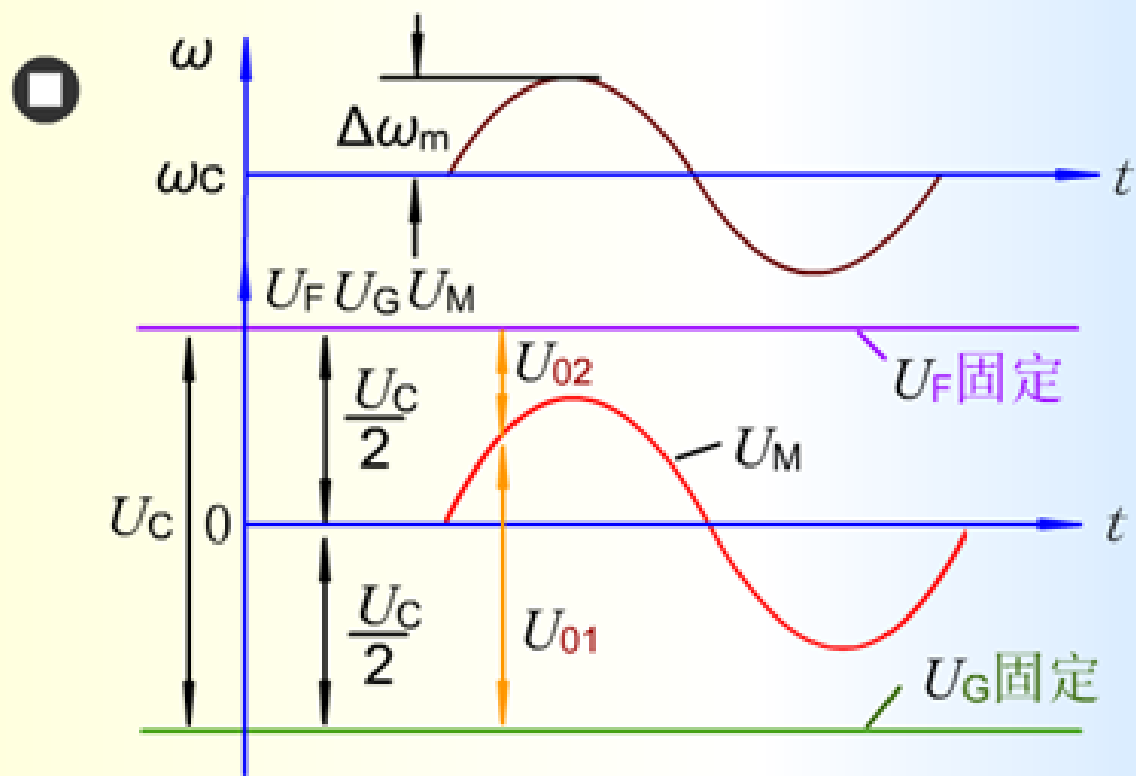
由于 $C_5$ 很大，其放电时间常数 $C_5(R_3 + R_4)$ 很大（约0.1~0.2s）。在音频一周内， $C_5$ 上电压可以认为是恒定的，并且不会因输入信号幅度瞬时的变化而变化。

$$U_F = +\frac{U_c}{2} \quad U_G = -\frac{U_c}{2}$$

它们都是固定不变的。

当信号频率 $\omega$ 变化时， $C_3, C_4$ 上的电压 $U_{01}$ 和 $U_{02}$ 将发生变化。但由于F,G两点电位固定，所以M点电位 $U_M$ 要变化

$$U_M = \frac{U_C}{2} - U_{02}$$



比例鉴频器 F, G, M 点的电位变化情况



图6—41 比例鉴频器 F, G, M 点的电位变化

## 2) 为什么这种电路具有限幅作用

在于接入大电容 $C$ ，当接有 $C$ 时，前已分析， $C_3$ ， $C_4$ 上电压之和，等于一个常数 $U_c$ ，其值决定于信号的平均强度。

今设高频信号瞬时增大，本来 $U_{o1}$ 和 $U_{o2}$ ，要相应地增大，但由于跨接了大电容，额外的充电电荷几乎都被吸去，使的电压总和升不上去。这就造成在高频一周期中，充电时间要加长，充电电流要加大。

这意味着，检波电路此时要吸收更多的高频功率。而这部分功率是由谐振电路供给的，故将造成谐振电路有效值  $Q$  的下降。这将使谐振电路电压随之降低，这就对原来信号幅度的增大，起着抵消的作用。



## 6.6 限幅器

### 一、概述

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。这种带有寄生调幅的调频信号通过鉴频器（比例鉴频器除外），使输出电压产生了不需要的幅度变化，因而造成失真，使通信质量降低。为了消除寄生调幅的影响，在鉴频器（比例鉴频器除外）前可加一级限幅器。对限幅器的要求是在消除寄生调幅时，不改变调频信号的频率变化规律，如图6-46所示。



图6-46 限幅器的作用

由于限幅过程是一个非线性过程，在输出信号中必然产生许多新的频率成分。所以需要用谐振回路或其他形式的带通滤波器将不需要的频率成分滤掉，以得到恒定振幅的调频正弦波。

因此，限幅器通常由非线性元件和谐振回路所组成，当带有寄生限幅的调频信号通过非线性元件后，便削去了幅度变化部分；但此时波形产生了失真，即有新的频率成分出现，需要靠谐振回路来滤除。

限幅的特性曲线表示输出电压与输入电压关系。在OA段，输出电压随输入电压增加而增加；A点以后，输入电压增加，输出电压保持一个恒定值。A点称为限幅门限，相应的输入电压称门限电压。显然，只有输入电压超过门限电压时，才会产生限幅作用。

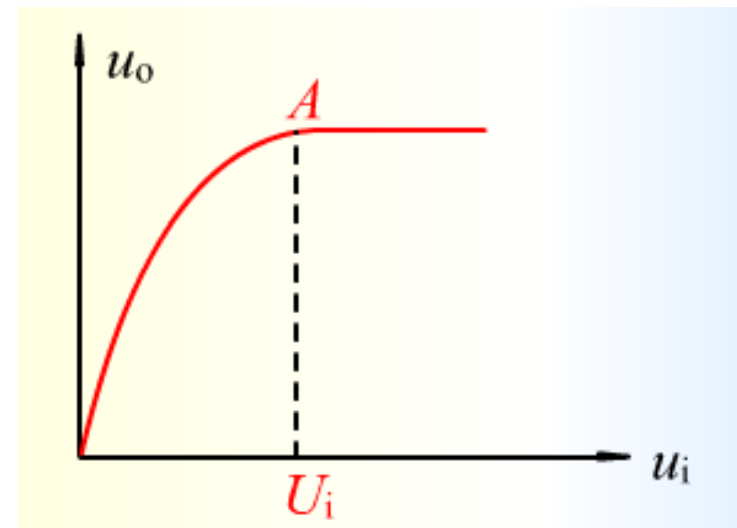
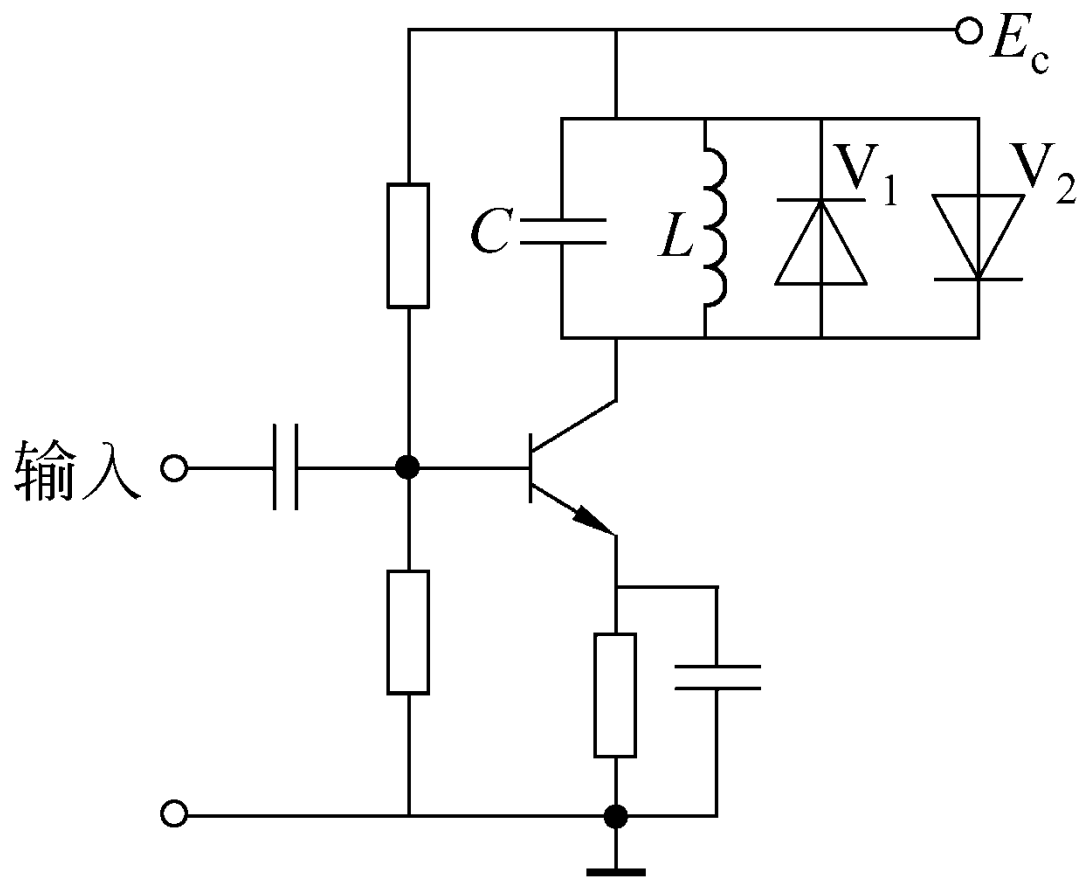


图6-47 限幅特性曲线

## 二、二极管限幅器

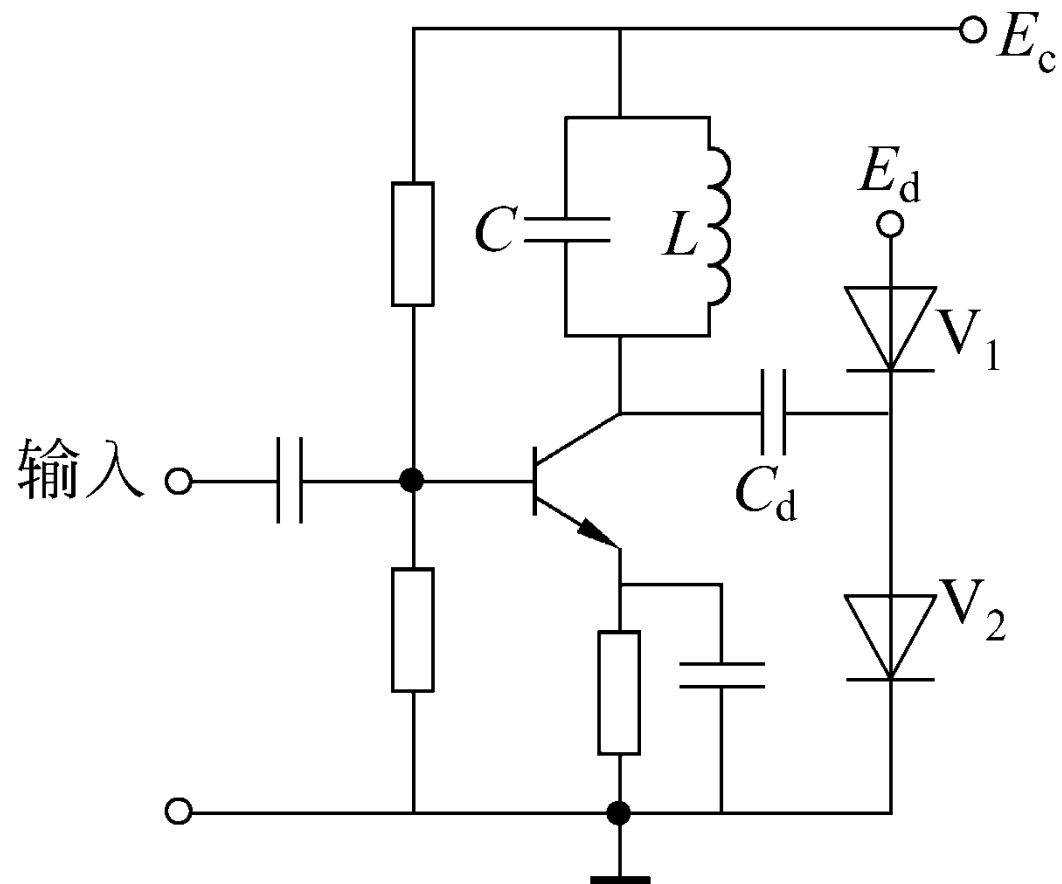
图6-48是两个利用二极管限幅的电路。它是在调频放大器的基础上，加两个二极管构成的。在图6-48（a）中， $V_1$ 、 $V_2$ 一正一反的并接在谐振电路两端。当输入信号小时，谐振电路电压低，如果其幅值小于二极管的正向导通电压，则二极管相当于开路，对放大输出不影响。

如果信号有足够大，谐振电路电压高，则两个二极管在正负半周的部分时间内交替导通。因为二极管的正向电阻随所加的电压而变，电压越大则正向电阻越小，故信号越大，二极管内阻越小，使谐振电路 $Q$ 值下降，从而起到阻止输出增大的作用。谐振电路电压增幅将限制在二极管正向电压范围内。例如若是硅管，则谐振电路的电压幅值约为0.7V。



(a)

图6-48 二极管限幅电路



(b)

图6-48 二极管限幅电路



### 三、晶体管限幅器

利用三极管作削波元件组成的限幅电路，如图6-49所示。从形式上看，它与一般的调谐放大器没有什么区别，但其工作状态却有别于调谐放大器。在输入信号较小时，限幅器处于放大状态，起普通中频放大器的作用；当输入信号加大时，工作到截止和饱和区域，并且让截止和饱和时间基本相同，即可起到限幅的作用。

实际上，一般的限幅电路，只能在一定程度上限制输出电压的幅度，不可能绝对保持不变。特别是当信号弱时，便失去限幅作用。因此要得到好的限幅效果，在限幅级前要求有高的信号增益，并且不止一级上加以限幅。

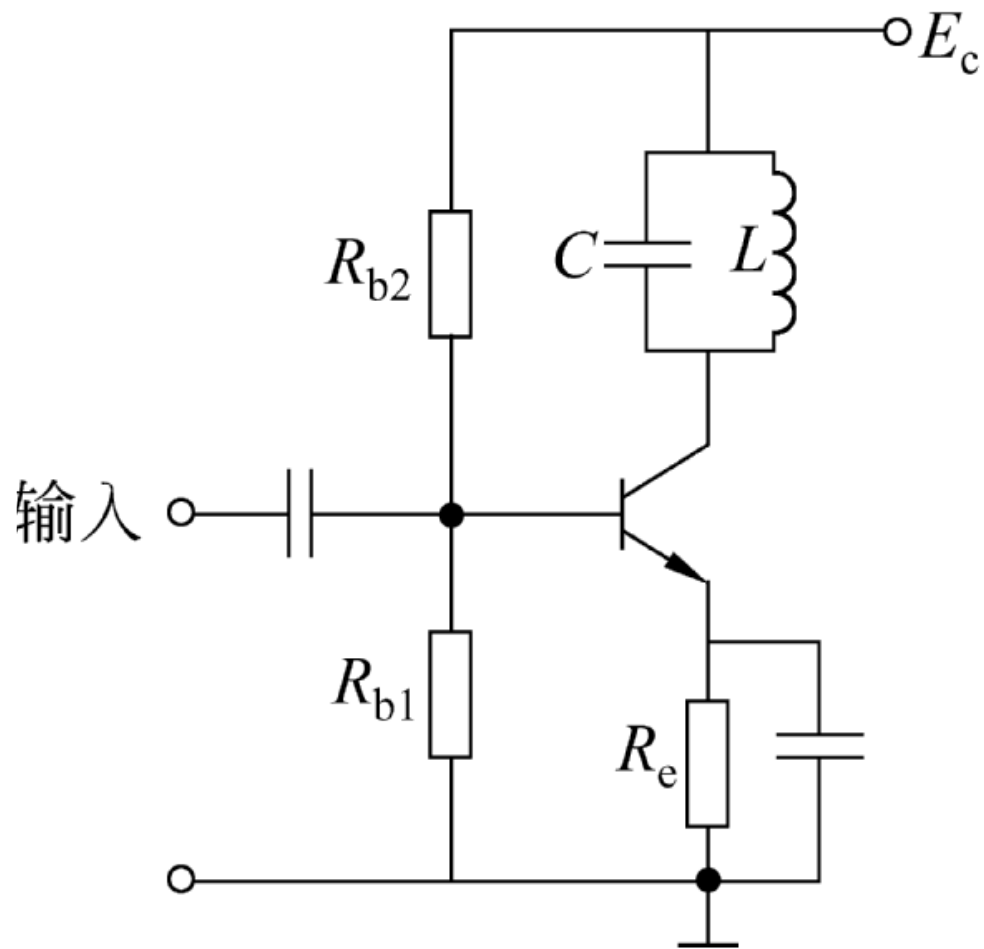


图6-49 晶体管限幅放大器



## 6.7 调制方式的比较

调幅、调频和调相这三种调制方式，它们各有特点，在实际工作中，应当根据具体条件，确定适当的调制方式，下面仅就用得较多的两种主要方式——调频和调幅，作一比较。

# 1. 抗干扰性能

通信的距离和可靠性，在相当大的程度上取决于抗干扰性能的好坏。

一般的说，调频系统的抗干扰能力比调幅系统强。但这是有条件的。当收到的信号干扰强度比小于某一临界值时，调频甚至比调幅系统还要差些。

图6-50表示在不同的输入信号干扰强度比的情况下调频接收机输出信号干扰强度比的变化情况。

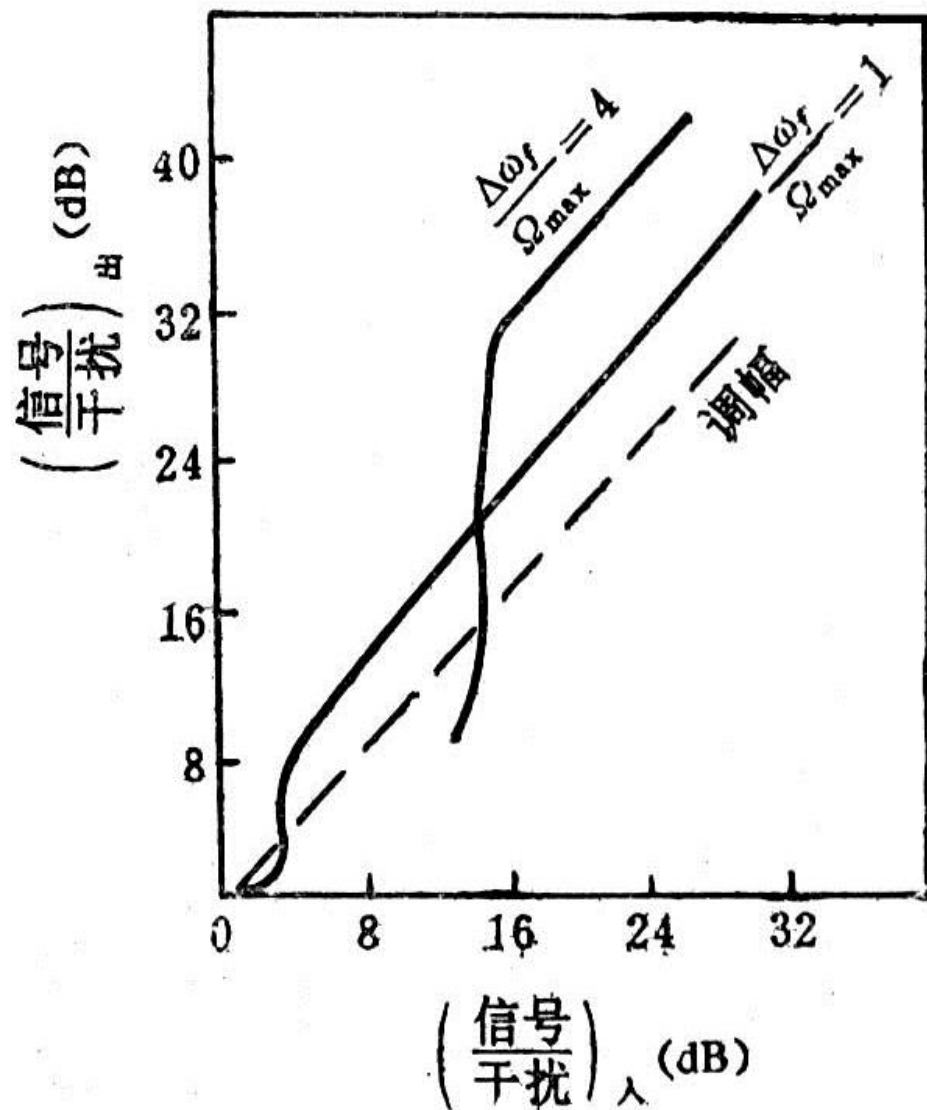


图6-50 不同信号干扰对调频接收的影响

## 2. 占用频带的宽度

调频信号所占据的频带宽度大于调幅信号，即调幅制比较经济。但发射机所能传送的音频频带越宽，声音越逼真，即音质越好，从这个角度看，调频信号比调幅信号好。

### 3. 发射机所需的功率和耗电量

由于调频发射机发射的是等幅波，所以调频波的功率不因调制而增大，而调幅波的功率随着调制的深度而加大。当 $m=1$ 时，调幅波的平均功率则达到载波功率的1.5倍，最大工作点的峰值功率则达载波功率的4倍。故调频发射机的功率和耗电量要比相同载波功率的调幅发射机小。



## 4. 强信号堵塞现象

在移动通信中，由于传输距离差别悬殊，接收到的信号强度也差别悬殊。

在强信号情况下，接收机的载频放大级常工作于限幅状态，使调幅波严重失真，甚至失去调幅的特点，造成接收机在强信号情况下反而接收不好甚至完全不能接收的情况，这种情况称为强信号堵塞现象。假如采用调频系统，则由于调频接收不受限幅的影响，可以在一定程度上得到改善。



## 6.8 集成调频、鉴频电路芯片

### 一、MC2833调频电路

#### 1. 内部结构及主要技术指标

MC2833的内部结构如图6-51所示。它包括一个话筒放大器、射频电压控制振荡器、缓冲器和两个辅助的晶体管放大器等几个主要部分。使用时需要外接晶体、 $LC$ 选频网络以及少量电阻、电容和电感。

MC2833的电源电压范围较宽，为2.8V~9.0V。

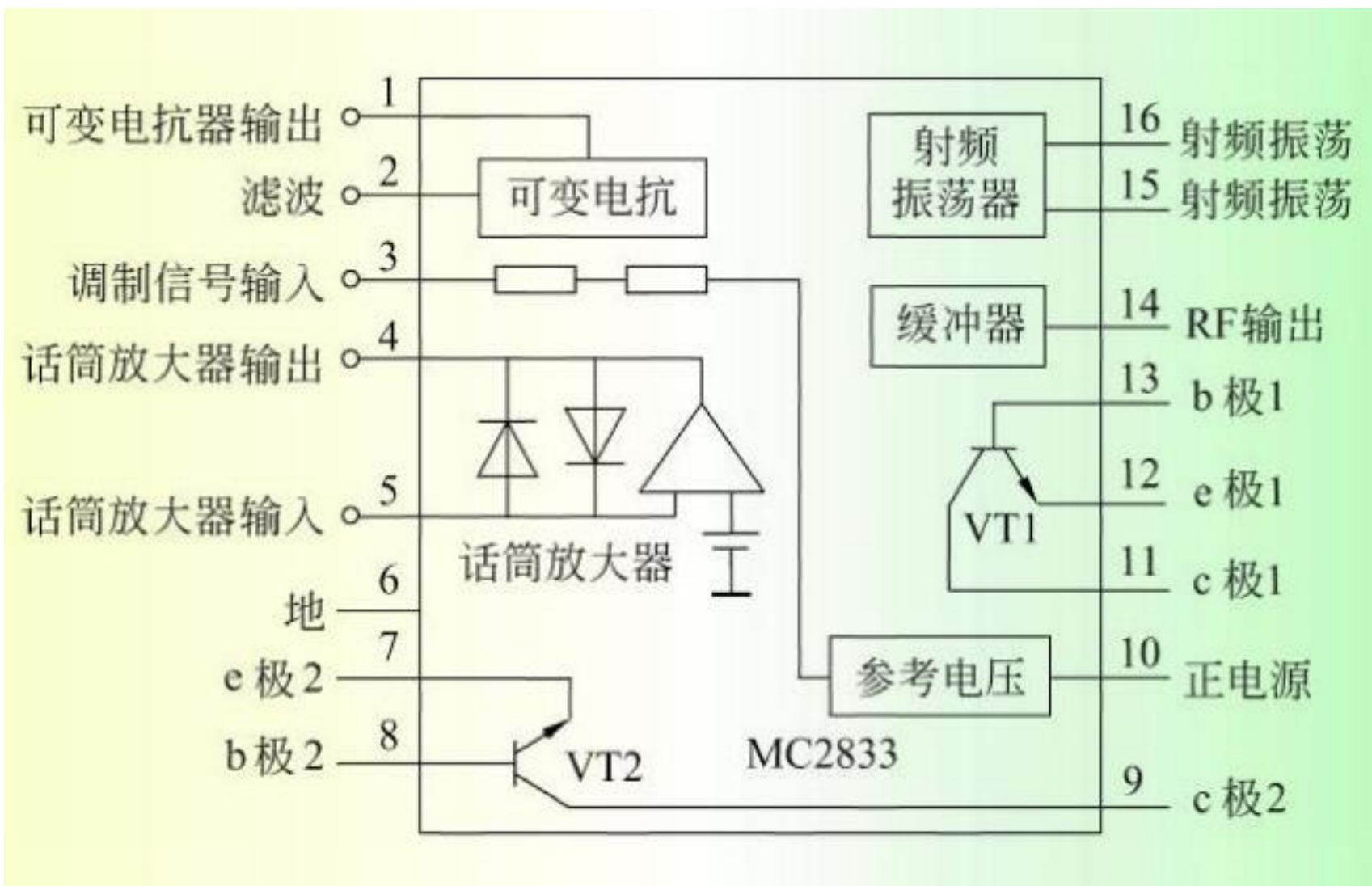


图6-51 MC2833内部结构

## 2. MC2833组成的调频发射机电路

话筒产生的音频信号从⑤脚输入，经放大后去控制可变电抗元件。可变电抗元件的直流偏压由片内参考电压经电阻分压后提供。由片内振荡电路、可变电抗元件、外接晶体和15、16 脚两个外接电容组成的晶振直接调频电路(皮尔斯电路)产生载频为16.5667MHz的调频信号。

与晶体串联的 $33\ \mu\text{H}$ 电感用于扩展最大线性频偏。缓冲器通过14脚外接三倍频网络将调频信号载频提高到49.7 MHz，同时也将最大线性频偏扩展为原来的三倍，然后从13脚返回片内，经两级放大后从⑨脚输出。

MC2833输出的调频信号可以直接用天线发射，也可以接其他集成功放电路后再发射出去。

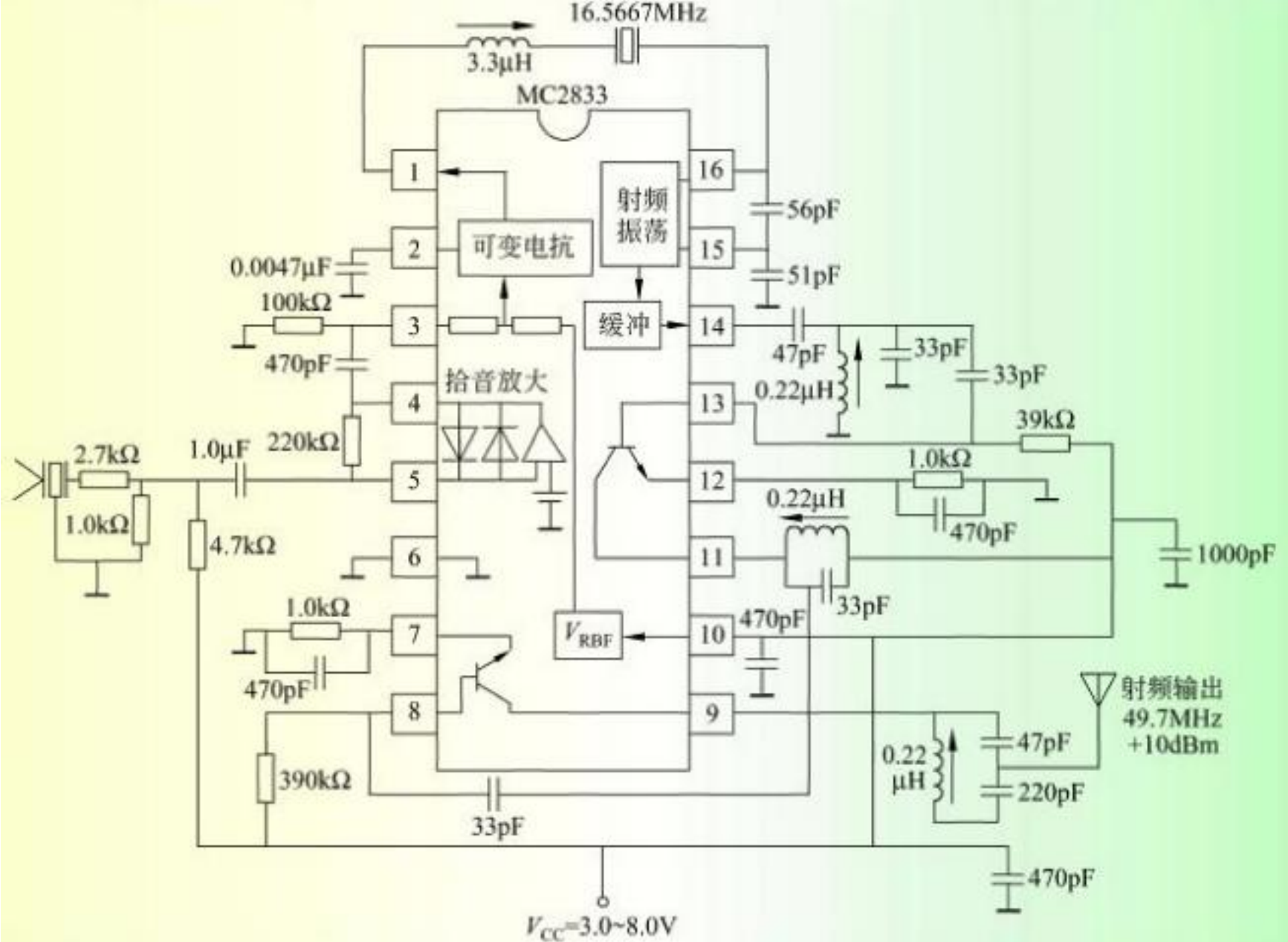


图6-52 MC2833组成的调频发射机电路

## 二、MC3361B解调电路

### MC3361B内部功能框图

图6-53 (a) 是MC3361B内部功能框图，(b) 是典型应用电路。

从16脚输入第一中频为10.7 MHz的调频信号与10.245MHz的晶振进行第二次混频，产生的455kHz调频信号从③脚外接的带通滤波器FL1取出，然后由⑤脚进入限幅放大器。⑧脚外接的LC并联网络和片内的10 pF小电容组成90° 频相转换网络。相位鉴频器输出低频分量由片内放大器放大后，由⑨脚外接RC低通滤波器取出。

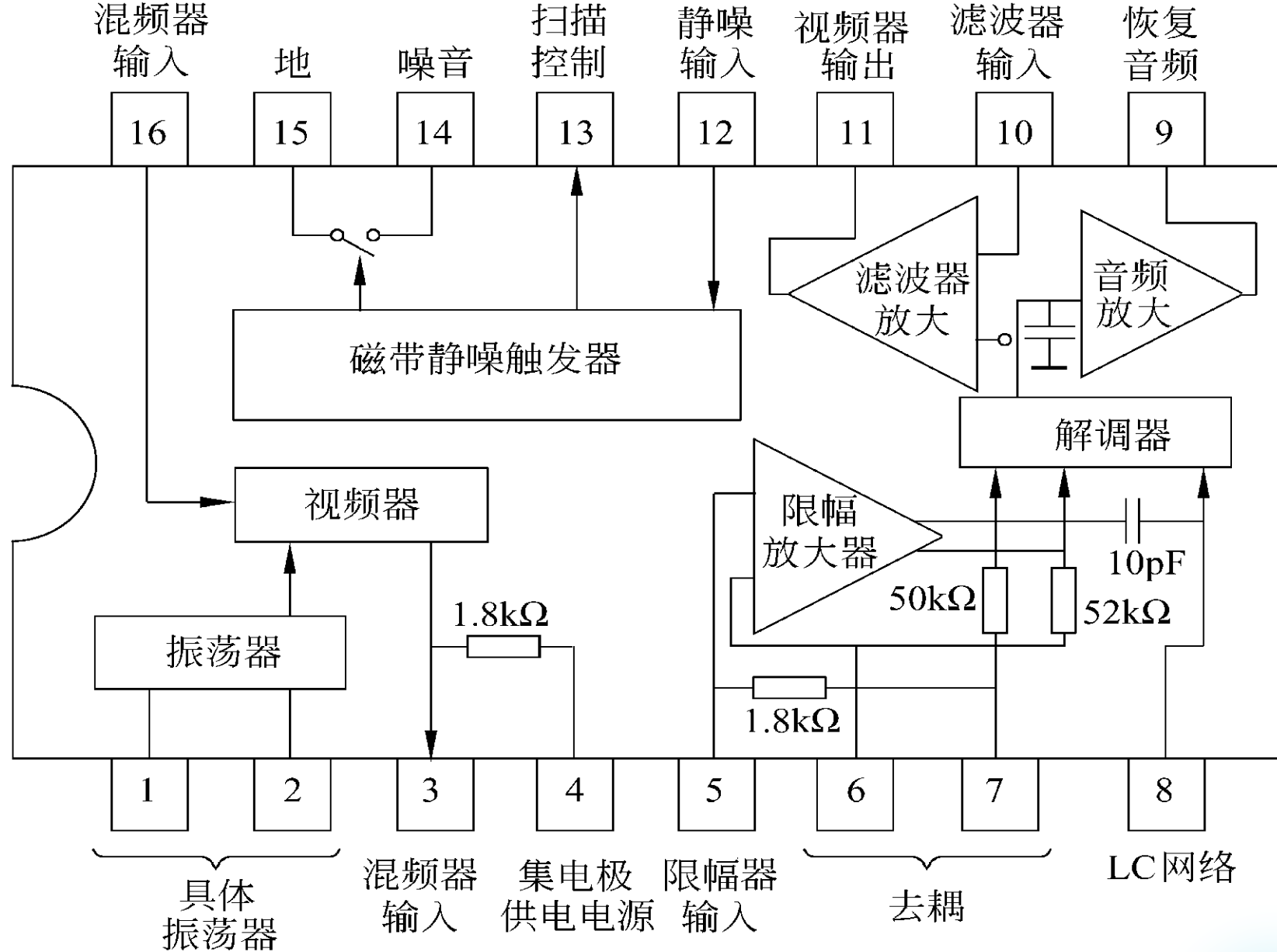


图6-53 (a) MC3361B内部功能框图





