



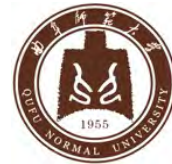
CEC

非线性电路、时变参量电路和变频器

Non-Linear Circuits, Time-Variant Parameter Circuits & Mixers

2024年4月19日

学而不厌 诲人不倦



- ➡ **§4.1 概述**
- ➡ **§4.2 非线性元件的特性**
- ➡ **§4.3 非线性电路分析法**
- ➡ **§4.4 线性时变参量电路分析法**
- ➡ **§4.5 变频器的工作原理**
- ➡ **§4.6 晶体(三极)管混频器**
- ➡ **§4.7 二极管混频器**
- ➡ **§4.8 差分对模拟乘法器混频电路**
- ➡ **§4.9 混频器中的干扰**
- ➡ **§4.10 外部干扰**

4.1 概述

折线法是学习第五章功率放大器的重要基础！

电路性质：非线性

分析方法：幂级数法、折线法

基础知识：泰勒级数、频谱的概念、三角变换

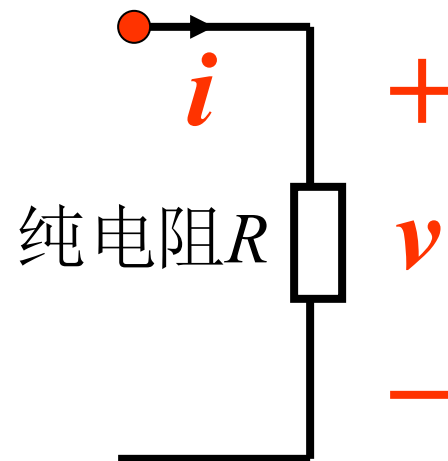
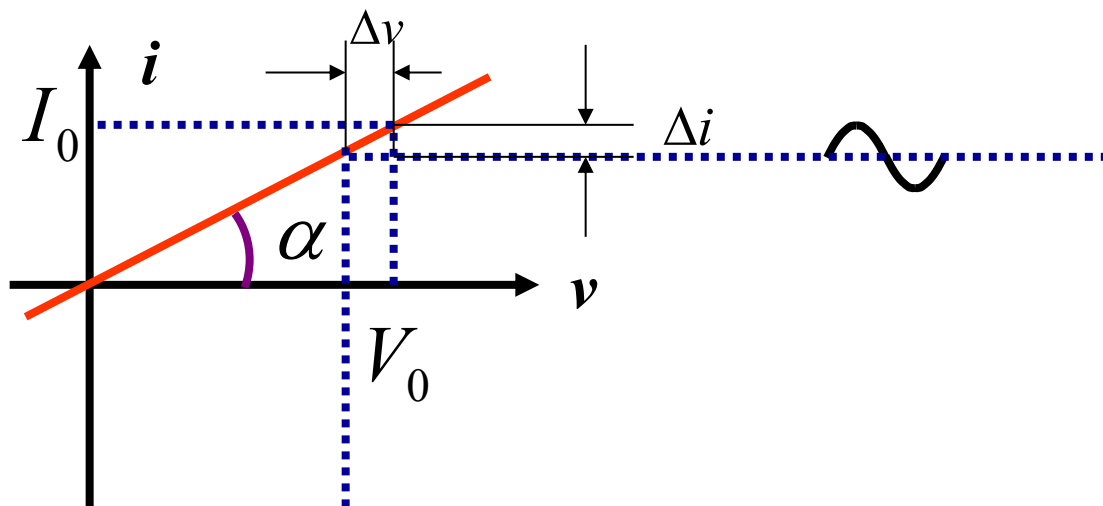
电路基础与模电中的很多结论不再适用

学习的目的：

1. 掌握非线性电路的主要特点与分析方法；
2. 掌握线性时变参量电路的分析方法；
3. 掌握混频器的原理；
4. 了解各种干扰、特别是混频器中所产生的各种干扰。

4.2 非线性元件的特性

➤ 1. 非线性元件的工作特性：输入输出关系曲线



如果 v 是一个很小的交流(动态)电压 $V_{sm} \sin \omega t$

则输出 i 是一个很小的交流(动态)电流 $I_{sm} \sin \omega t$

因此动态电阻为
$$\lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{dv}{di} = \frac{1}{\tan \alpha} = R$$

可见线性元件的静态电阻与动态电阻是一样的

4.2 非线性元件的特性

➤ 1. 非线性元件的工作特性：输入输出关系曲线

如果 v 是一个直流(静态)电压 V_0

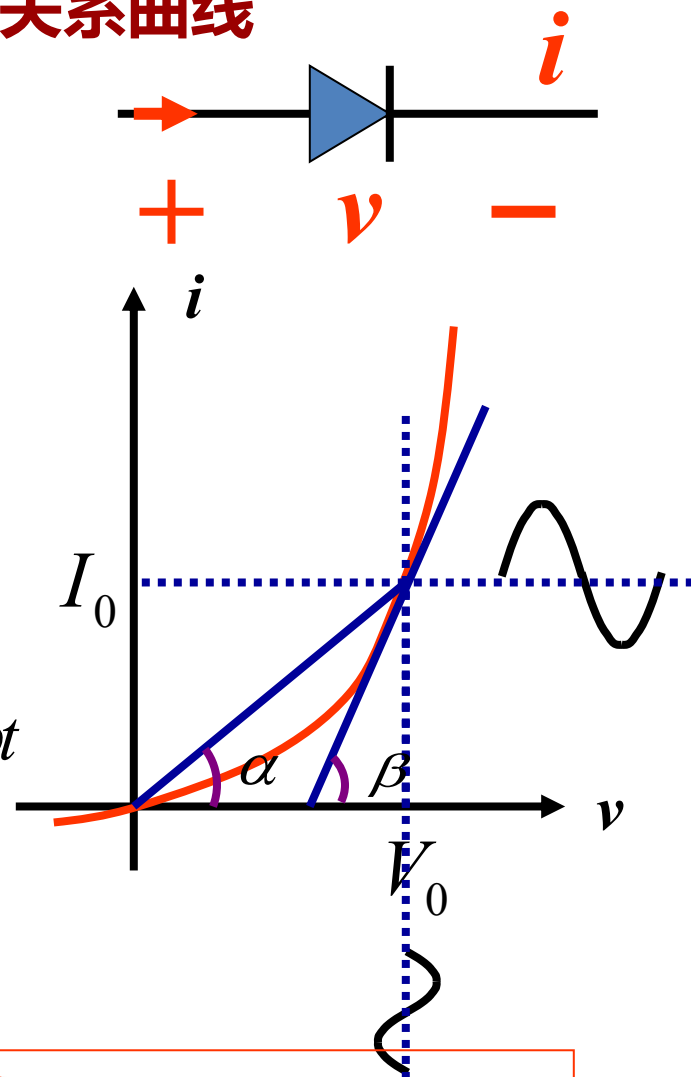
则输出 i 是一个直流(静态)电流 I_0

因此静态电阻为 $\frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{\tan \alpha}$

如果 v 是小交流(动态)电压 $V_{sm} \sin \omega t$

则输出 i 是小交流(动态)电流 $I_{sm} \sin \omega t$

动态电阻为 $\lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{dv}{di} = \frac{1}{\tan \beta}$



可见非线性元件的静态电阻与动态电阻是不一样的

4.2 非线性元件的特性

➤ 2. 非线性元件的频率变换作用

假如一个非线性元件输入量 v 与输出量 i 的关系是

$$i = k \bullet v^2 \quad (\text{CMOS器件就有这种特性})$$

当输入信号 $v = V_{sm} \cos \omega_s t$ 的标准余弦波时

注意： V_{sm} 是余弦波的振幅，是一个常数

$$\text{输出信号 } i = k(V_{sm} \cos \omega_s t)^2 = kV_{sm}^2 \cos^2 \omega_s t$$

$$= \frac{1}{2} kV_{sm}^2 (1 + \cos 2\omega_s t) = \boxed{\frac{1}{2} kV_{sm}^2} + \boxed{\frac{1}{2} kV_{sm}^2 \cos 2\omega_s t}$$

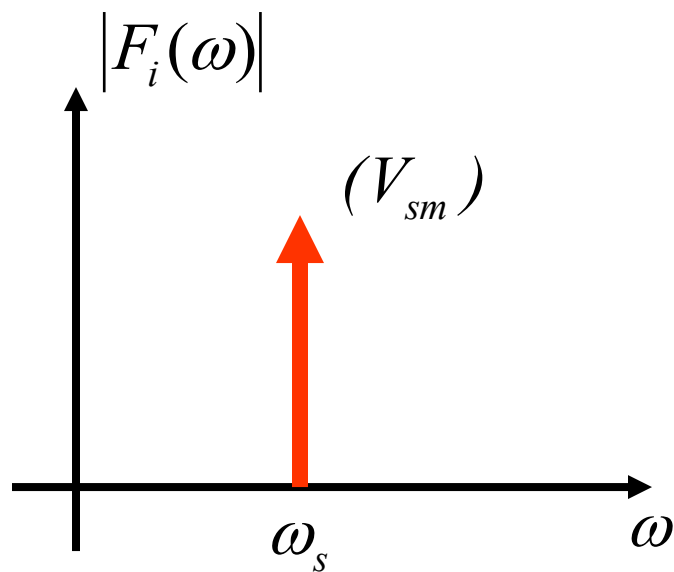
直流分量

2倍频分量

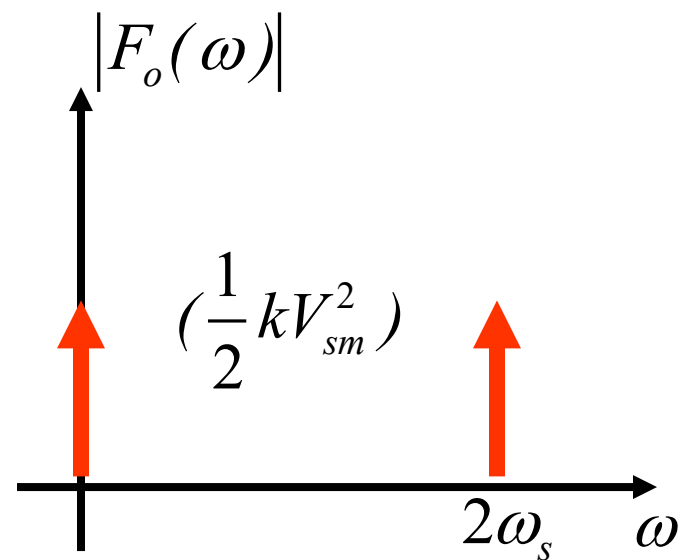
4.2 非线性元件的特性

➤ 2. 非线性元件的频率变换作用

输入信号频谱



输出信号频谱



可见信号经过非线性电路后频率发生了变换

4.2 非线性元件的特性

➤ 3. 非线性元件的不满足叠加原理

输入

输出



则称该电路满足叠加原理

4.2 非线性元件的特性

➤ 3. 非线性元件的不满足叠加原理

假如一个非线性元件输入量 v 与输出量 i 的关系是

$$i = k \bullet v^2$$

当输入信号 $v_1 = V_1 \sin \omega_1 t$ 时, 输出为 $i_1 = k(V_1 \sin \omega_1 t)^2$

当输入信号 $v_2 = V_2 \sin \omega_2 t$ 时, 输出为 $i_2 = k(V_2 \sin \omega_2 t)^2$

当输入信号为 $v_1 + v_2 = V_1 \sin \omega_1 t + V_2 \sin \omega_2 t$ 时

输出信号为 $k(V_1 \sin \omega_1 t + V_2 \sin \omega_2 t)^2$

$$\begin{aligned} &= k(V_1 \sin \omega_1 t)^2 + k(V_2 \sin \omega_2 t)^2 + 2kV_1 \sin \omega_1 t \bullet V_2 \sin \omega_2 t \\ &= \frac{k}{2}(V_{1m}^2 + V_{2m}^2) - kV_{1m}V_{2m} \cos(\omega_1 + \omega_2)t \\ &\quad + kV_{1m}V_{2m} \cos(\omega_1 - \omega_2)t - \frac{k}{2}V_{1m}^2 \cos 2\omega_1 t - \frac{k}{2}V_{2m}^2 \cos 2\omega_2 t \end{aligned}$$

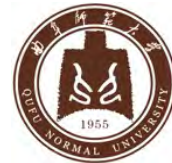
显然不等于 $i_1 + i_2$, 即不满足叠加原理

4.2 非线性元件的特性

非线性元件的主要特征（ ）。

- A** 输出量与输入量不是线性关系
- B** 具有频率变换作用
- C** 不满足叠加原理
- D** 电流与电压成正比

ABC



- ➡ §4.1 概述
- ➡ §4.2 非线性元件的特性
- ➡ **§4.3 非线性电路分析法**
- ➡ §4.4 线性时变参量电路分析法
- ➡ §4.5 变频器的工作原理
- ➡ §4.6 晶体(三极)管混频器
- ➡ §4.7 二极管混频器
- ➡ §4.8 差分对模拟乘法器混频电路
- ➡ §4.9 混频器中的干扰
- ➡ §4.10 外部干扰



4.3 非线性电路分析法

幂级数法

用泰勒级数将曲线在某一点展开成级数形式

折线法

将曲线近似看成若干首尾相接的线段连接而成的折线

4.3 非线性电路分析法

➤ 1. 幂级数分析法

非线性器件的伏安特性,可用下面的非线性函数来表示:

$$i = f(v)$$

如果 $f(v)$ 这个函数在 V_0 处各阶导数存在

则 i 可以表示成如下的泰勒级数的形式:

$$i = b_0 + b_1(v - V_0) + b_2(v - V_0)^2 + b_3(v - V_0)^3 + \dots$$

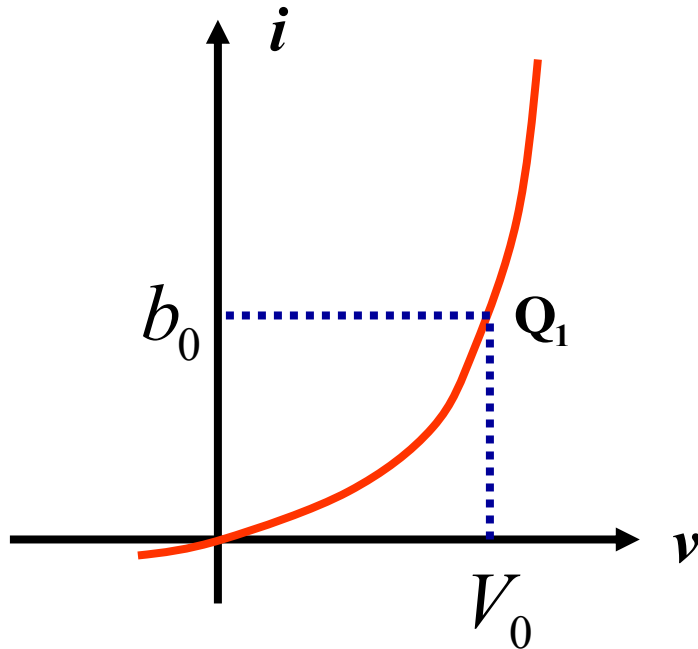
$$\text{其中 } b_0 = f(V_0), b_1 = f'(V_0), b_2 = \frac{1}{2!} f''(V_0), b_3 = \frac{1}{3!} f'''(V_0) \dots$$

注意: 这只是各系数的数学意义, 由于 $f(v)$ 的表达式在实际情况往往不知道, 所以不能直接通过这些公式求各系数

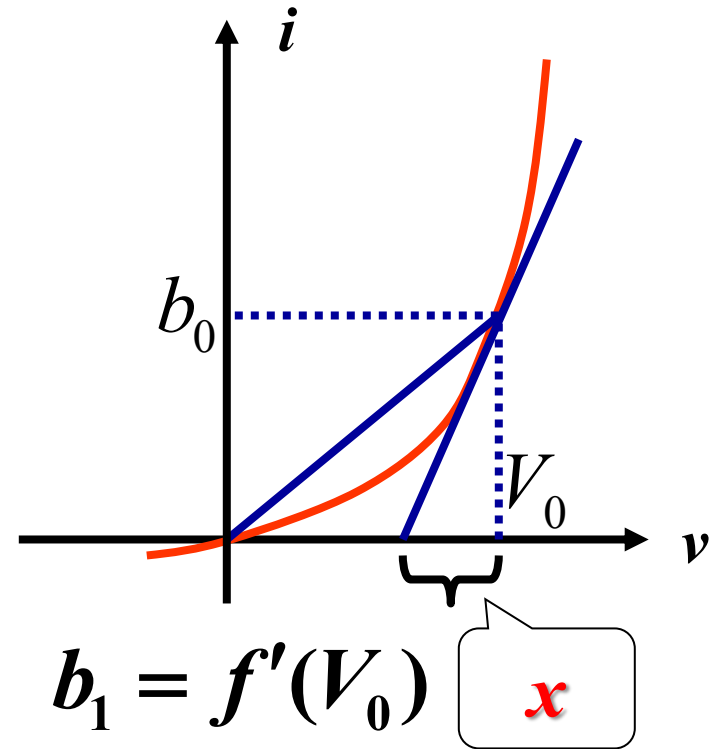
4.3 非线性电路分析法

➤ 1. 幂级数分析法

$$i \approx b_0 + b_1(v - V_0) + b_2(v - V_0)^2$$



$b_0 = I_0$ 是静态工作点电流



● 在图中任取 V_0 附近一点电压 V_B

$$i_B = b_0 + b_1(V_B - V_0) + b_2(V_B - V_0)^2$$

4.3 非线性电路分析法

➤ 1. 幂级数分析法

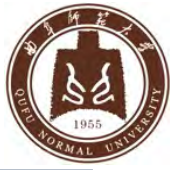
两个余弦波的叠加信号经过非线性电路

$$\text{设 } i = b_0 + b_1(v - V_0) + b_2(v - V_0)^2 + b_3(v - V_0)^3$$

$$\text{其中 : } v = V_0 + V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$$

$$\text{因此 } (v - V_0) = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$$

注意 $(v - V_0)$ 项不含直流成分



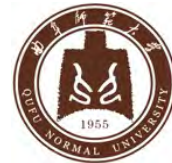
4.3 非线性电路分析法

➤ 1. 幂级数分析法 两个余弦波的叠加信号经过非线性电路

将 $(v - V_0)$ 的表达式代入 i 的表达式中

$$\begin{aligned} i &= b_0 + b_1(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t) \\ &\quad + b_2(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t)^2 + b_3(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t)^3 \\ &= b_0 + b_1(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t) \\ &\quad + b_2 V_1^2 \cos^2 \omega_1 t + b_2 V_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2b_2 V_1 \cos \omega_1 t V_2 \cos \omega_2 t \\ &\quad + b_3 V_1^3 \cos^3 \omega_1 t + 3b_3 V_1^2 \cos^2 \omega_1 t V_2 \cos \omega_2 t \\ &\quad + 3b_3 V_1 \cos \omega_1 t V_2^2 \cos^2 \omega_2 t + b_3 V_2^3 \cos^3 \omega_2 t \end{aligned}$$

对含余弦相乘的项进行积化和差，直到没有余弦相乘的项



4.3 非线性电路分析法

➤ 1. 幂级数分析法 两个余弦波的叠加信号经过非线性电路

$$i = k_0(b_0, b_2) + k_1(b_1, b_3) \cos \omega_1 t + k_2(b_1, b_3) \cos \omega_2 t$$

$$+ k_3(b_2) \cos 2\omega_1 t + k_4(b_2) \cos 2\omega_2 t$$

2倍频

和频

$$+ k_5(b_2) \cos(\omega_1 + \omega_2)t + k_6(b_2) \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

差频

$$+ k_7(b_3) \cos 3\omega_1 t + k_8(b_3) \cos 3\omega_2 t$$

3倍频

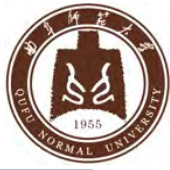
$$+ k_9(b_3) \cos(2\omega_1 + \omega_2)t + k_{10}(b_3) \cos(2\omega_1 - \omega_2)t$$

$$+ k_{11}(b_3) \cos(\omega_1 + 2\omega_2)t + k_{12}(b_3) \cos(\omega_1 - 2\omega_2)t$$

谐波: $2\omega_1, 2\omega_2, 3\omega_1, 3\omega_2,$

组合频率: $\omega_1 + \omega_2, \omega_1 - \omega_2, \omega_1 + 2\omega_2, \omega_1 - 2\omega_2, 2\omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 - \omega_2$

特性曲线最高幂次等于3, 所以最高次谐波次数不超过3, 组合系数不超过3;



4.3 非线性电路分析法

两个信号 ω_1 、 ω_2 经过非线性器件后，输出端频率成分有（ ）。

- A** ω_1 、 ω_2
- B** $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $3\omega_1$ 、 $3\omega_2$ 、
- C** $\omega_1+\omega_2$ 、 $2\omega_1+\omega_2$ 、 $\omega_1+2\omega_2$
- D** $\omega_1-\omega_2$ 、 $\omega_2-\omega_1$ 、 $2\omega_1-\omega_2$ 、 $2\omega_2-\omega_1$ 、...

ABCD



4.3 非线性电路分析法

► 例题

若一非线性电路满足：

$$i = 8 + 40(v - 0.4) + 50(v - 0.4)^2$$

当输入信号为

$$0.4 + 0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t (\text{伏特})$$

- (1) 输出信号都有哪些频率分量？
- (2) 求输出信号中，差频分量的频率及其振幅。



4.3 非线性电路分析法

► 例题

因为4.3.8式中最高次项的次数是2

根据幂级数分析法得到的规律可知

输出信号中含有的频率成分有 $p\omega_1 \pm q\omega_2$ (其中 $p+q \leq 2$)

$$p=0, q=0$$

直流成分

$$p=1, q=0$$

$\omega = 2000\pi$ 分量, 即 $f = 1000\text{Hz}$ 分量

$$p=0, q=1$$

$\omega = 3000\pi$ 分量, 即 $f = 1500\text{Hz}$ 分量

$$p=1, q=1, p+q$$

$\omega = 5000\pi$ 分量, 即 $f = 2500\text{Hz}$ 分量

$$p=1, q=1, p-q$$

$\omega = 1000\pi$ 分量, 即 $f = 500\text{Hz}$ 分量

$$p=2, q=0$$

$\omega = 4000\pi$ 分量, 即 $f = 2000\text{Hz}$ 分量

$$p=0, q=2$$

$\omega = 6000\pi$ 分量, 即 $f = 3000\text{Hz}$ 分量



4.3 非线性电路分析法

$$\because v = 0.4 + 0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t$$

$$\therefore v - V_0 = 0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t$$

$$i = 8 + 40 \times (0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t) \\ + 50 \times (0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t)^2$$

$$i = 8 + 40 \times (0.3 \cos 2000\pi t + 0.2 \cos 3000\pi t) \\ + 4.5 \times \cos^2 2000\pi t + 2 \times \cos^2 3000\pi t$$

$$+ 6 \times \cos 2000\pi t \times \cos 3000\pi t$$

只有该项产生差频

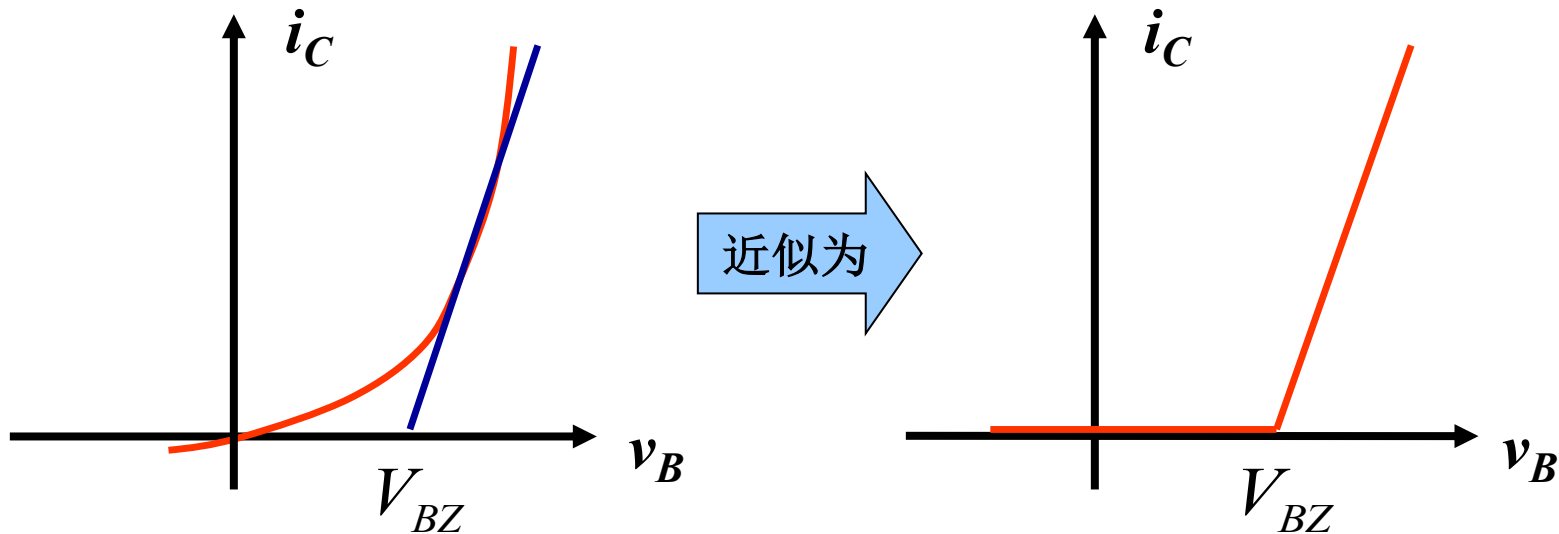
$$\text{这一项积化和差后} = 3 \cos 1000\pi t + 3 \cos 5000\pi t$$

差频分量

4.3 非线性电路分析法

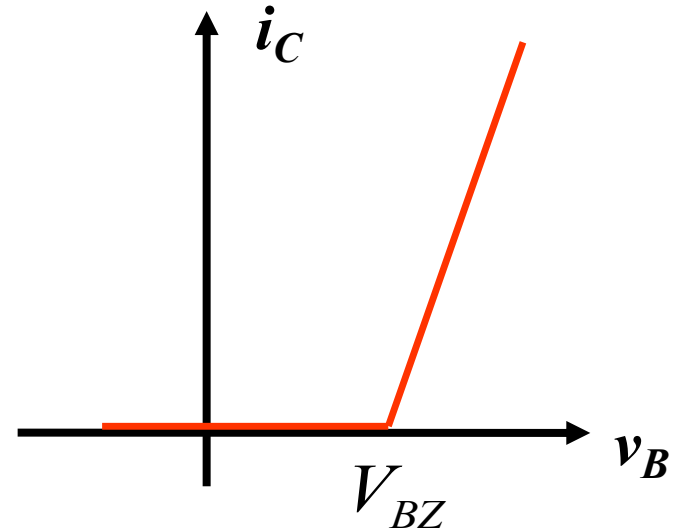
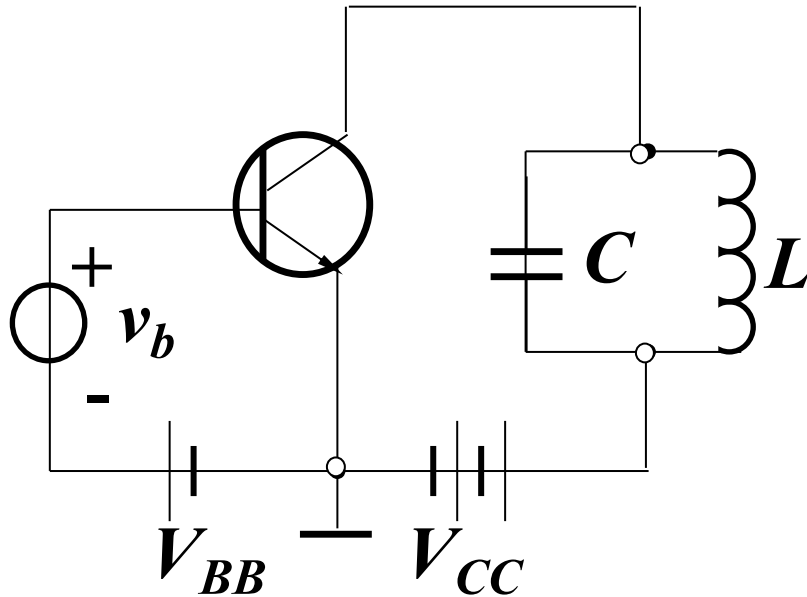
➤ 2. 折线分析法

- 幂级数法适用于中等大小的信号，当信号振幅更大时，幂级数取的项数必须增多，分析难度加大，此时应采用折线分析法。



4.3 非线性电路分析法

➤ 2. 折线分析法



i_c 的近似表达式:

[即级数法中的 $f(v)$]

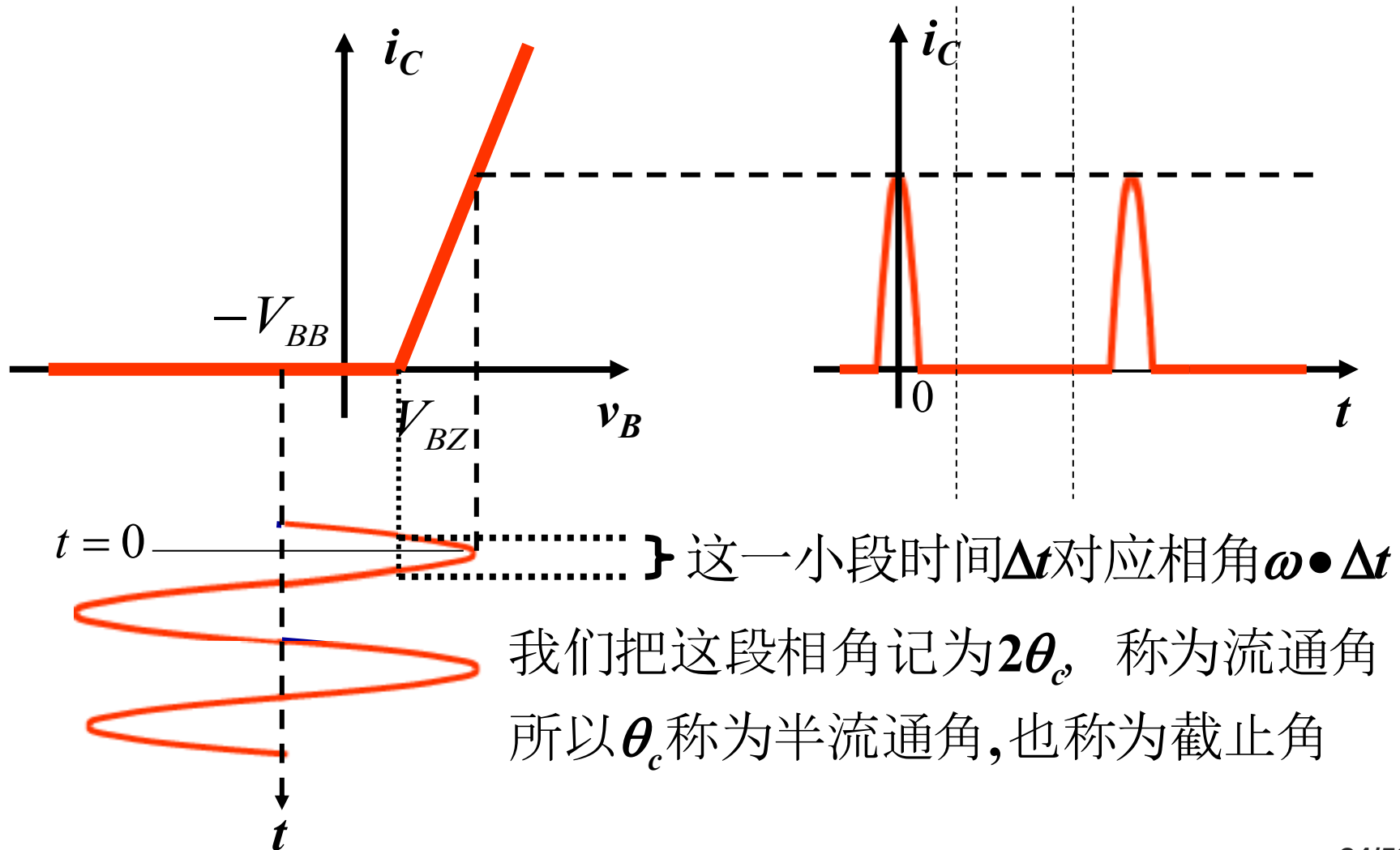
$$i_c = \begin{cases} 0 & (\text{当 } v_B \leq V_{BZ}) \\ g_c (v_B - V_{BZ}) & (\text{当 } v_B > V_{BZ}) \end{cases}$$

g_c 是跨导 (即第2段折线的斜率)

4.3 非线性电路分析法

➤ 2. 折线分析法

用折线分析法分析大输入信号



4.3 非线性电路分析法

➤ 2. 折线分析法

电流余弦脉冲 i_c 的表达式

考虑在流通角内

$$i_c = g_c (v_B - V_{BZ})$$

设输入信号 v_B 的交流部分振幅为 V_{bm}

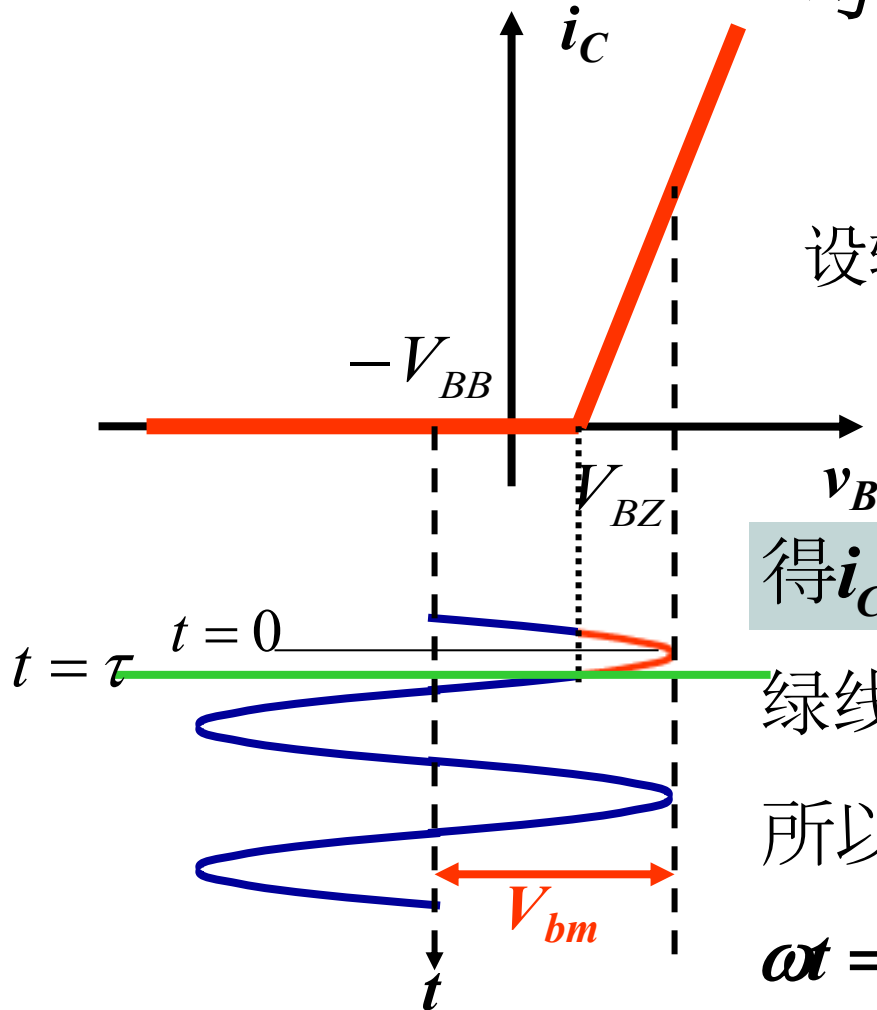
$$\text{则 } v_B = -V_{BB} + V_{bm} \cos \omega t$$

$$\text{得 } i_c = g_c (-V_{BB} + V_{bm} \cos \omega t - V_{BZ})$$

绿线对应的相角正好是 θ_c , 即 $\omega\tau = \theta_c$

所以当我们在上式中取 $t = \tau$ 时

$\omega t = \omega\tau = \theta_c$ 此时 i_c 刚好降到0



4.3 非线性电路分析法

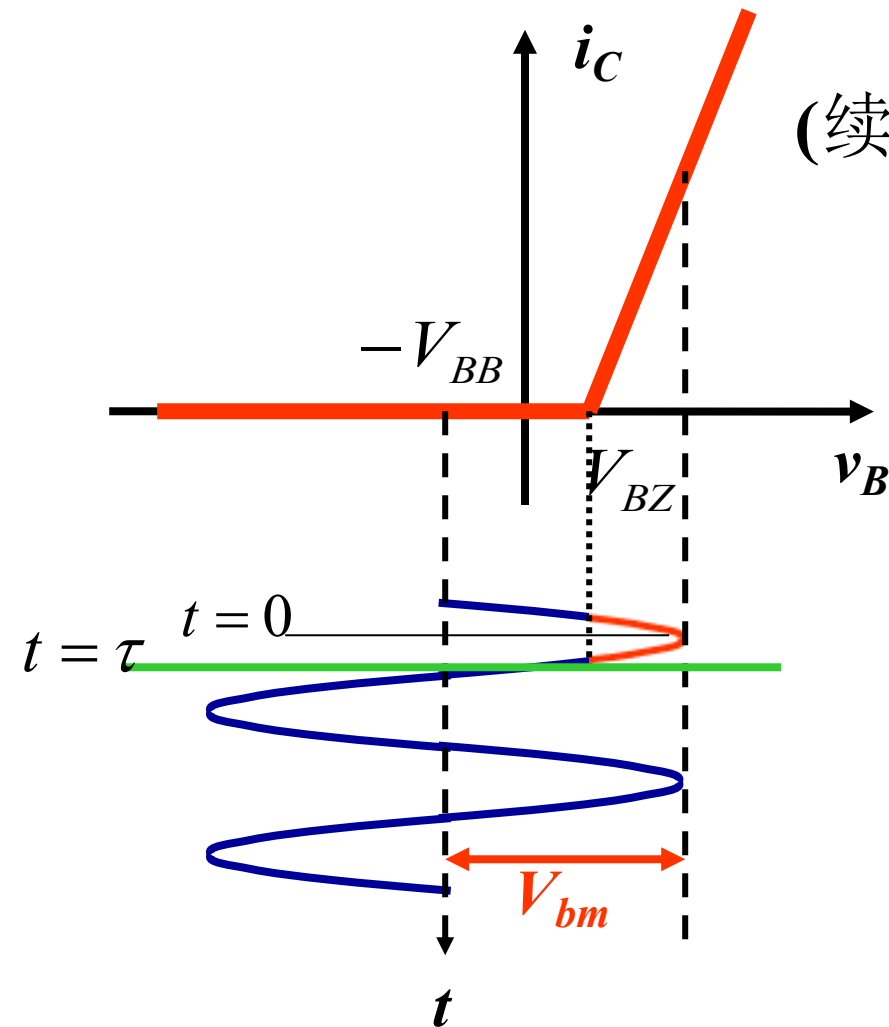
➤ 2. 折线分析法

$\cos\theta_c$ 的表达式

(续上页)得

$$0 = g_c (-V_{BB} + V_{bm} \cos\theta_c - V_{BZ})$$

得 $\cos\theta_c = \frac{V_{BZ} + V_{BB}}{V_{bm}}$

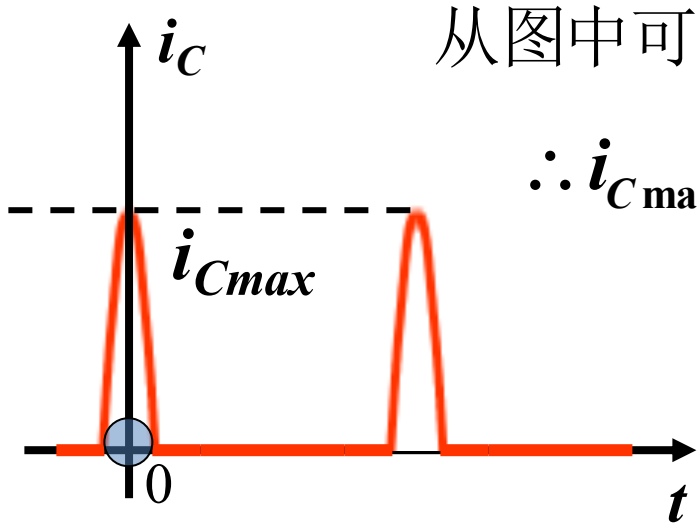


我们在后面学习第5章，功率放大器时，主要应用折线法，所以这个公式相当重要！

4.3 非线性电路分析法

➤ 2. 折线分析法

电流最大值 i_{Cmax} 的表达式

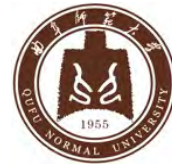


从图中可以看出,当 $t = 0$ 时, i_C 恰好取到最大值

$$\begin{aligned} \therefore i_{Cmax} &= g_c (-V_{BB} + V_{bm} \cos \omega t - V_{BZ}) \Big|_{t=0} \\ &= g_c (-V_{BB} + V_{bm} \cos 0 - V_{BZ}) \\ &= g_c (-V_{BB} + V_{bm} - V_{BZ}) \end{aligned}$$

$$= g_c V_{bm} \left(1 - \frac{V_{BB} + V_{BZ}}{V_{bm}} \right) = g_c V_{bm} (1 - \cos \theta_c)$$

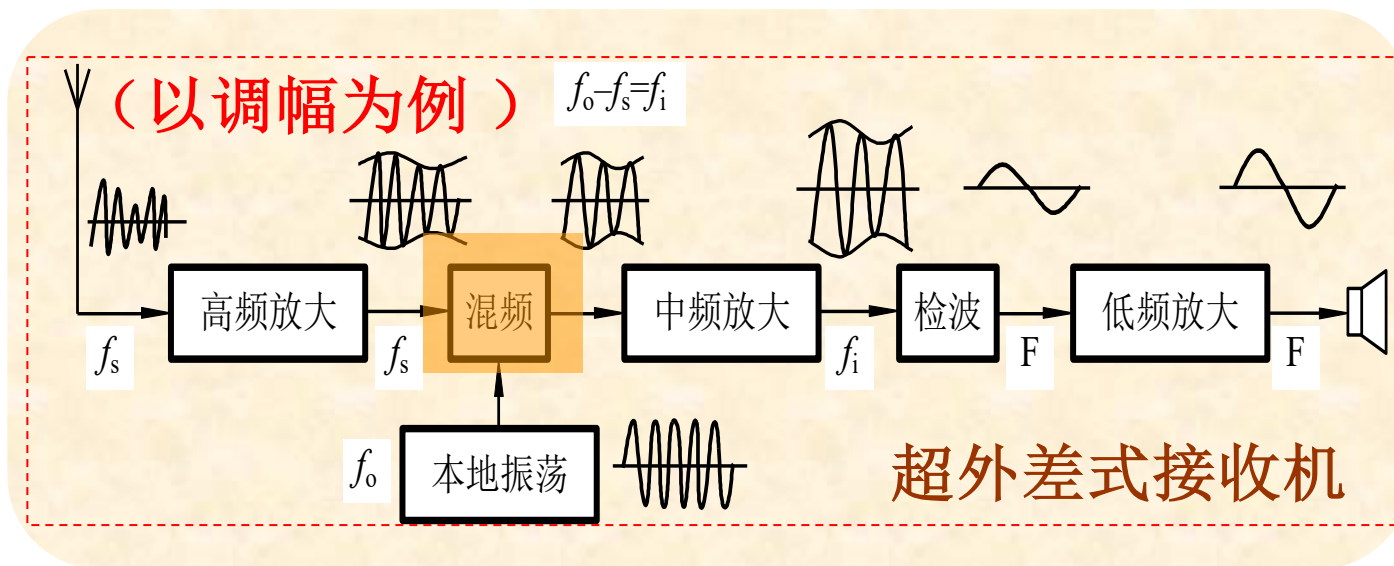
上式可以说明：脉动电流 i_c 可以用 i_{cmax} 和 θ_c 两个参数表示。



- ➡ §4.1 概述
- ➡ §4.2 非线性元件的特性
- ➡ §4.3 非线性电路分析法
- ➡ §4.4 线性时变参量电路分析法
- ➡ **§4.5 变频器的工作原理**
- ➡ §4.6 晶体(三极)管混频器
- ➡ §4.7 二极管混频器
- ➡ §4.8 差分对模拟乘法器混频电路
- ➡ §4.9 混频器中的干扰
- ➡ §4.10 外部干扰

4.5 变频器的工作原理

➤ 1. 变频器的定义



在保持相同调制规律的前提下，将输入已调信号的载波频率从 f_s 变换为固定 f_i 的过程称为**变频**或**混频**。

在接收机中， f_i 称为中频。一般其值为

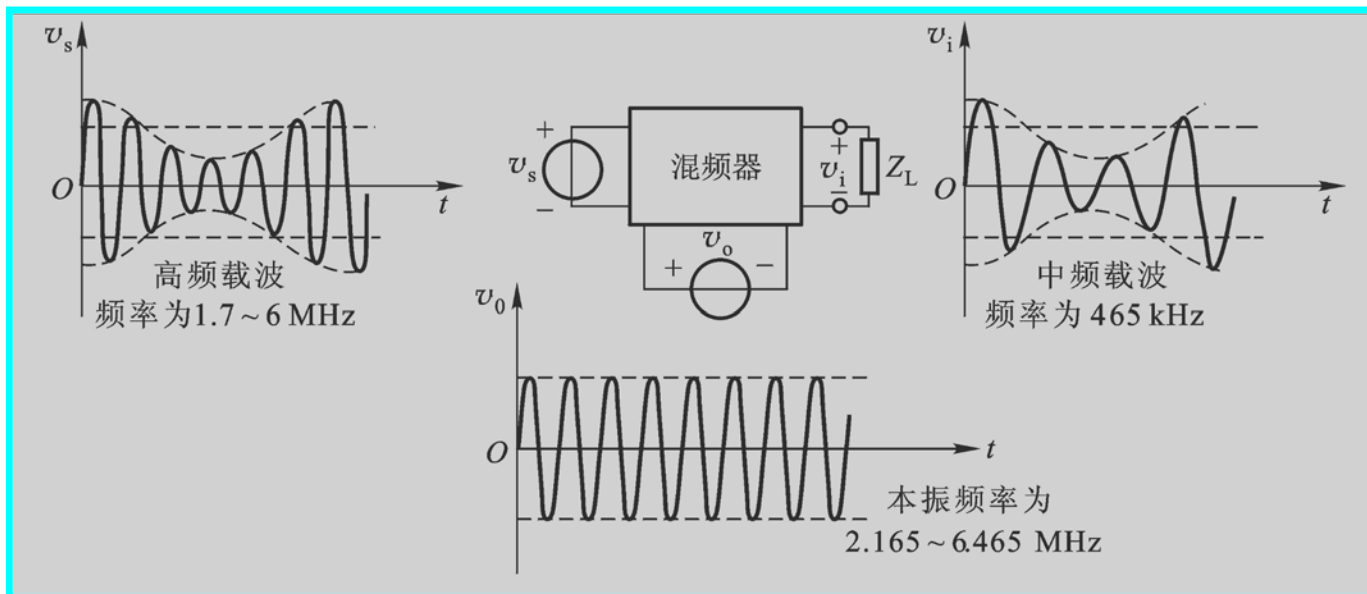
$$f_i = f_o \pm f_s \quad \text{其中 } f_o \text{ 是本地振荡频率。}$$

其中， f_i 大于 f_s 的混频称为上混频， f_i 小于 f_s 的混频称为下混频。

4.5 变频器的的工作原理

➤ 1. 变频器的定义

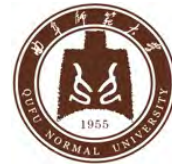
举例



经过混频器变频后，输出频率为

$$f_i = f_o - f_s = (2.165 \sim 6.465) \text{ MHz} - (1.7 \sim 6) \text{ MHz} \\ = 0.465 \text{ MHz}$$

混频的结果：较高的不同的载波频率变为固定的较低的载波频率，而振幅包络形状不变。



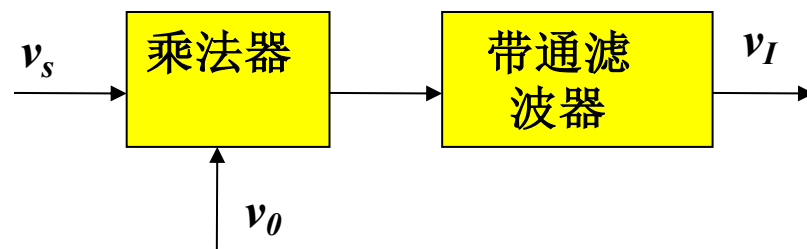
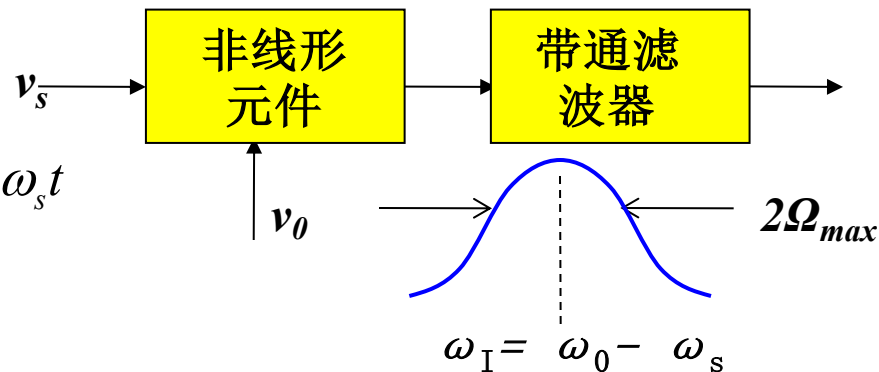
4.5 变频器的的工作原理

➤ 1. 变频器的定义

混频器的一般结构框图

设输入已调波信号： $v_s = [V_{sm} \cos \Omega t] \cos \omega_s t$

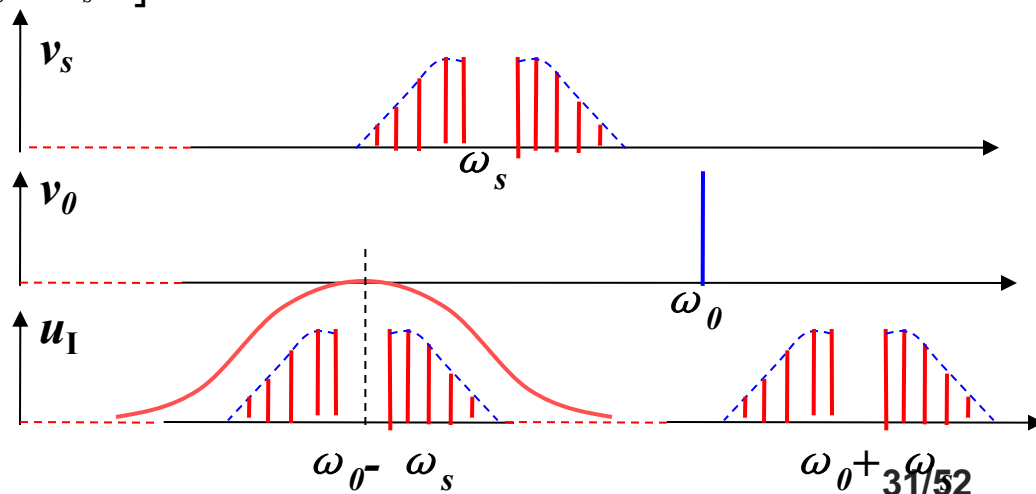
本振信号： $v_0 = V_{0m} \cos \omega_0 t$



那么两信号的乘积项为：

$$\begin{aligned} v_I &= V_{0m} V_{sm} \cos \Omega t [\cos \omega_s t \cos \omega_0 t] \\ &= \frac{1}{2} V_{0m} V_{sm} \cos \Omega t [\cos(\omega_s + \omega_0)t + \cos(\omega_0 - \omega_s)t] \end{aligned}$$

如果带通滤波器的中心频率为 $\omega_I = (\omega_0 - \omega_s)$ ，带宽 $B = 2\Omega_{\max}$



4.5 变频器的的工作原理

➤ 2. 变频的实质 线性频率变换

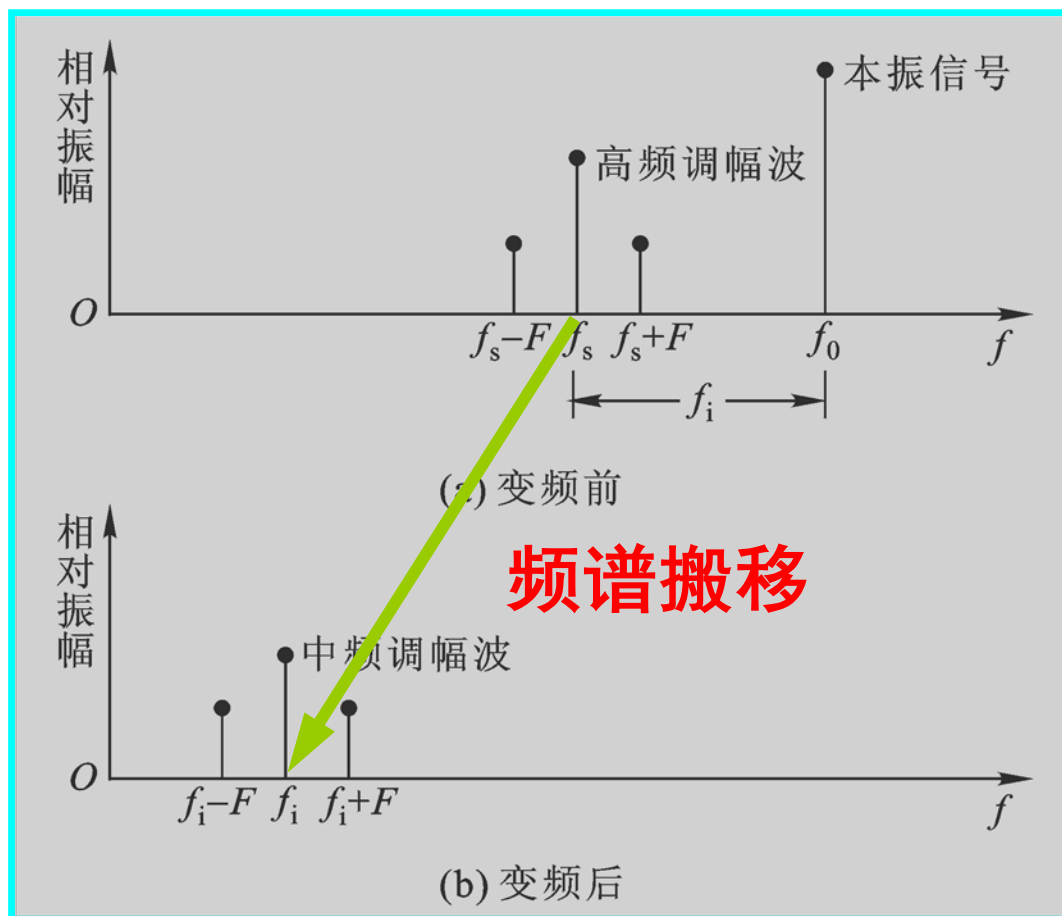


图 4.5.2 变频前后的频谱图

4.5 变频器的工作原理

➤ 3. 变频器的分类与质量指标

分类:

按所用器件分类:

二极管混频器:
晶体管混频器:
场效应管混频器:
差分对混频器。

根据结构: { 单管:
平衡;
环形。

变频器的主要质量指标:

1) 变频增益

电压增益

$$A_{vo} = \frac{V_{im}}{V_{sm}} = \frac{\text{中频输出电压振幅}}{\text{高频输入电压振幅}}$$

功率增益

$$P_{vo} = \frac{P_{im}}{P_{sm}} = \frac{\text{中频输出信号功率}}{\text{高频输入信号功率}}$$

2) 选择性

为了抑制不需要的干扰, 就要求中频输出回路有良好的选择性, 即回路应有理想的谐振曲线(矩形系数为1)。

4.5 变频器的工作原理

➤ 3. 变频器的分类与质量指标

3) 失真与干扰

变频器失真 { 频率失真
非线性失真

各种干扰

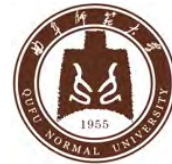
{ 组合频率
交叉频率
互相调制

要求使变频器既能完成频率变换，又能抑制各种干扰。

4) 噪声系数

$$F_n = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{\text{输入端高频信号噪声比}}{\text{输出端中频信号噪声比}}$$

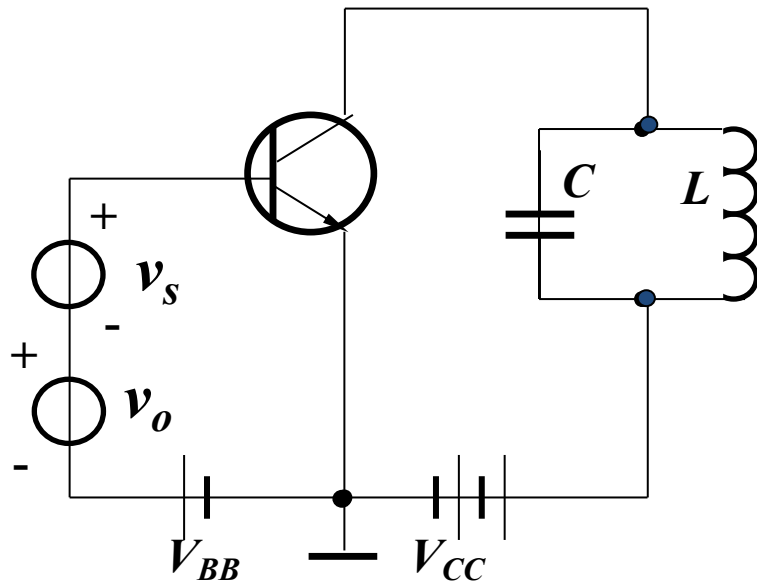
5) 工作稳定性



- ➡ §4.1 概述
- ➡ §4.2 非线性元件的特性
- ➡ §4.3 非线性电路分析法
- ➡ §4.4 线性时变参量电路分析法
- ➡ §4.5 变频器的工作原理
- ➡ **§4.6 晶体(三极)管混频器**
- ➡ §4.7 二极管混频器
- ➡ §4.8 差分对模拟乘法器混频电路
- ➡ §4.9 混频器中的干扰
- ➡ §4.10 外部干扰

4.6 晶体（三极）管混频器

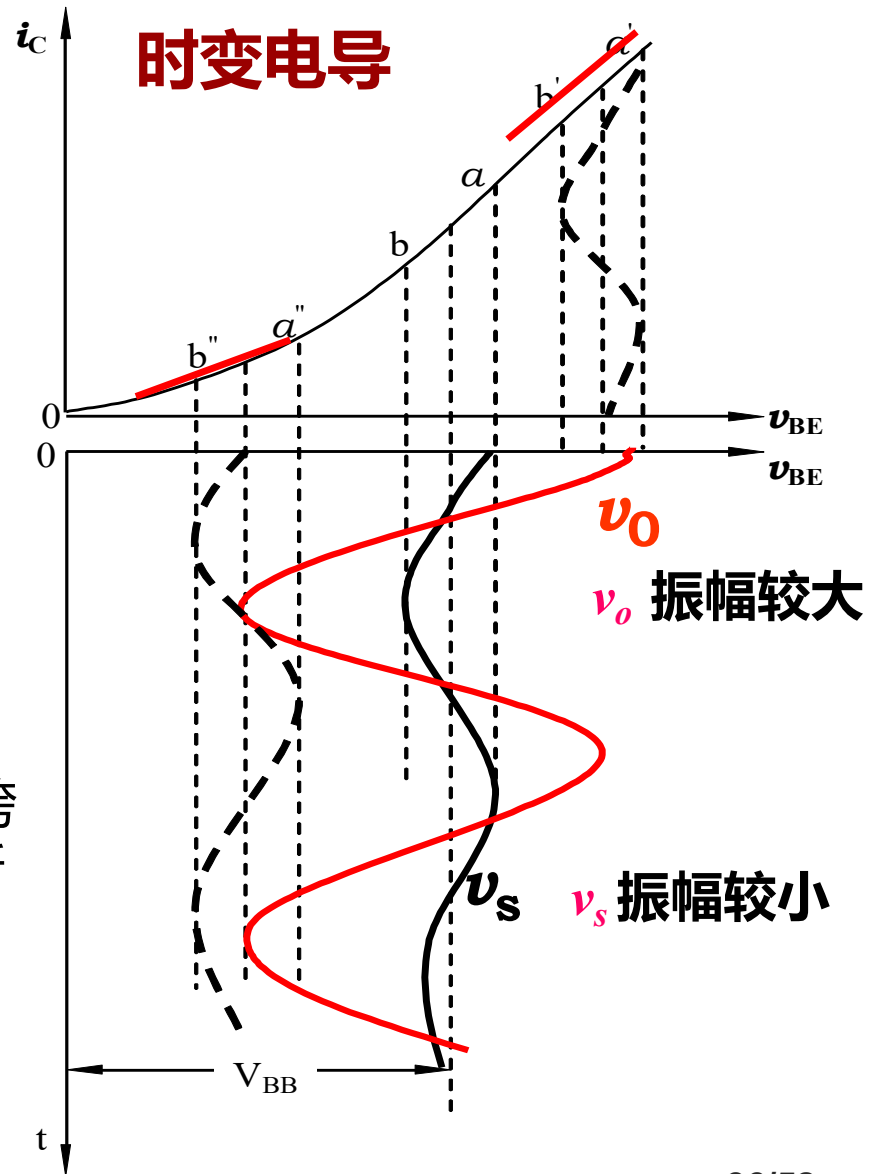
➤ 1. 工作原理



信号电压作用的同时，器件参量（跨导）随简谐振荡电压 v_0 周期性改变，所以称该电路为**线性时变参量电路**。

非线性电子器件工作于线性时变状态

要求： $V_{0m} \gg V_{sm}$ 。



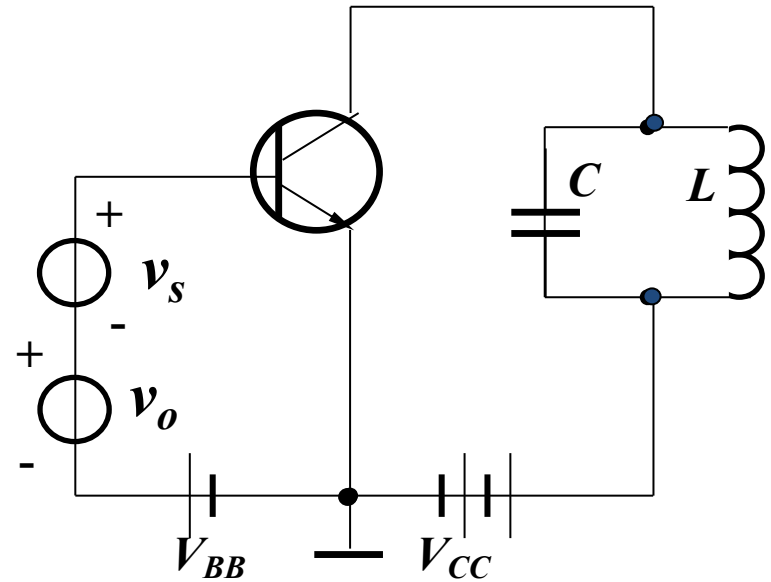
4.6 晶体（三极）管混频器

➤ 1. 工作原理

忽略三极管内部反馈和集电极电压反作用，可得

$$i_c = f(v_{BE})$$

$$v_{BE} = v_B + v_s \quad v_B = V_{BB} + V_{om} \cos \omega_o t$$



将上式用泰勒级数在 v_B 点展开，得：

$$i_c = f(v_B) + f'(v_B)v_s + f''(v_B)v_s^2 + \dots$$

式中 $f(v_B)$ 是 $v_{BE} = v_B$ 时的集电极电流（即 $v_s = 0$ ）

$$f(v_B) = I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega_o t + I_{cm2} \cos 2\omega_o t + \dots$$

式中 $f'(v_B)$ 是 $v_{BE} = v_B$ 时的晶体管的跨导

$$f'(v_B) = g_0 + g_1 \cos \omega_o t + g_2 \cos 2\omega_o t + \dots$$

4.6 晶体（三极）管混频器

➤ 1. 工作原理

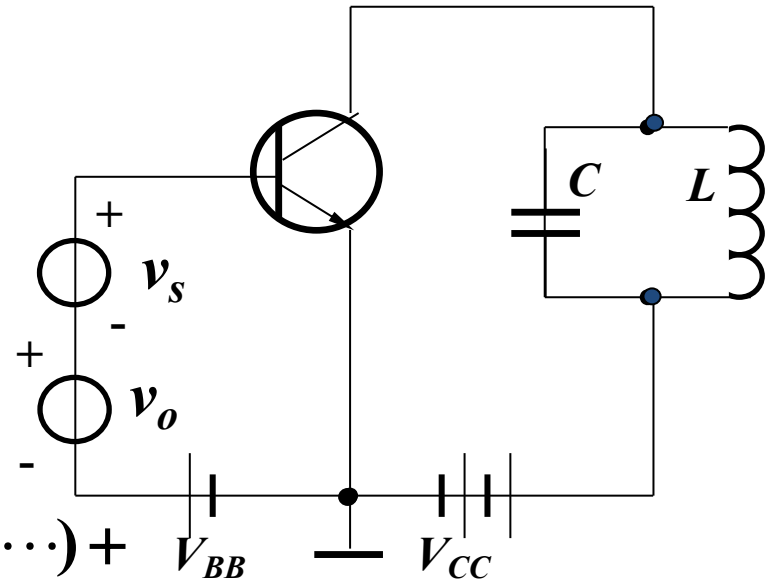
由于 v_s 值很小，可以忽略二次及以上各项，得近似方程：

$$i_c \approx f(v_B) + f'(v_B)v_s$$

$$i_c = (I_{c0} + I_{cm1} \cos \omega_o t + I_{cm2} \cos 2\omega_o t + \cdots) + (g_0 + g_1 \cos \omega_o t + g_2 \cos 2\omega_o t + \cdots)V_{sm} \cos \omega_s t$$

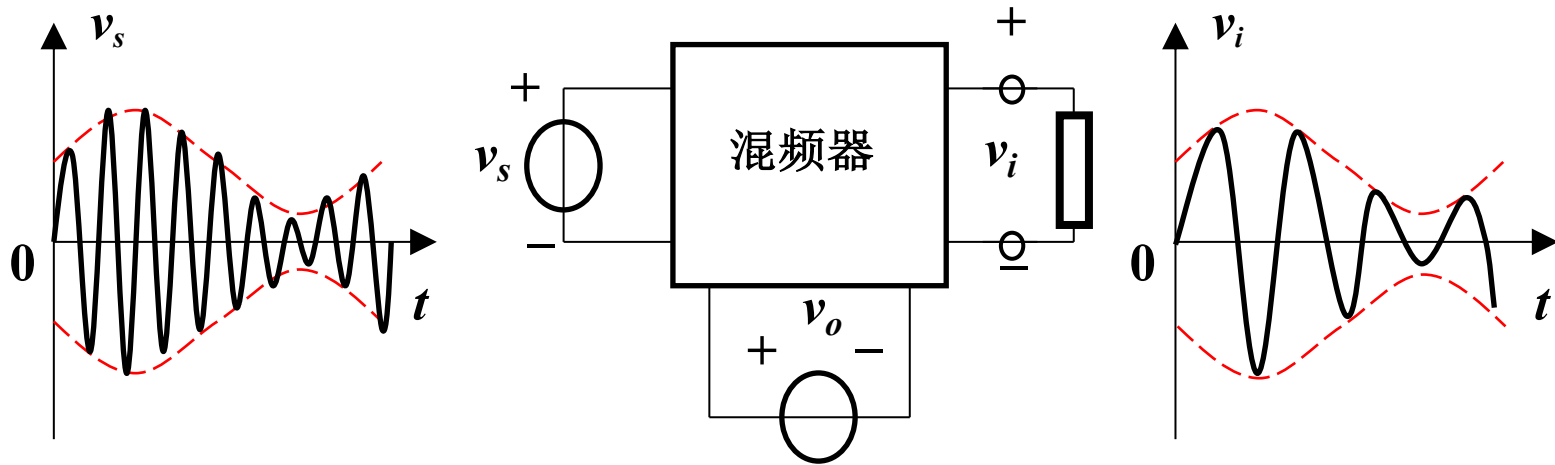
由此可看出，受 v_o 控制的晶体管跨导的基波分量和谐波分量与信号电压 $V_{sm} \cos \omega_s t$ 的乘积将产生和频分量与差频分量组成的信号的频率分量，存在频率变换的可能性。

$$g_k \cos k\omega_o t \cdot V_{sm} \cos \omega_s t = \frac{1}{2} g_k V_{sm} [\cos(k\omega_o - \omega_s)t + \cos(k\omega_o + \omega_s)t]$$



4.6 晶体（三极）管混频器

➤ 2. 混频器改变调幅波中心频率



若中频取差频 $\omega_i = \omega_o - \omega_s$ 则混频后输出的中频电流为：

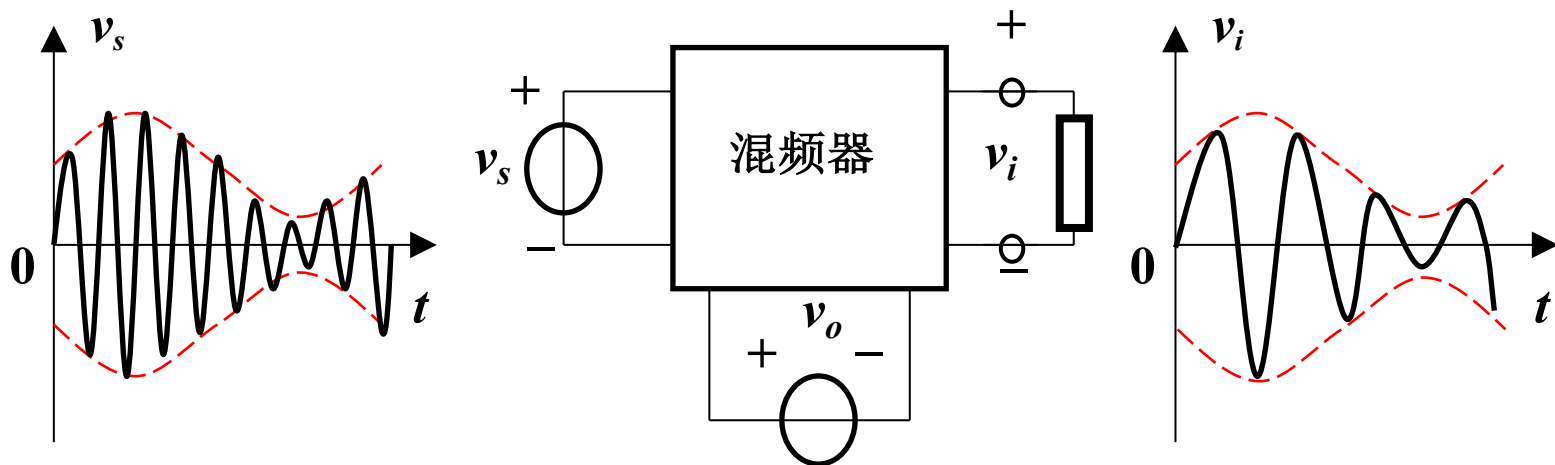
$$i_i = V_{sm} \frac{g_1}{2} \cos(\omega_o - \omega_s)t = I_{im} \cos \omega_i t \quad \text{其中} \quad I_{im} = \frac{V_{sm} g_1}{2}$$

该式说明： $I_{im} \propto V_{sm}$, **振幅 I_{im} 与 V_{sm} 按同样规律变化。**

即混频后，频率改变，包络线不变。

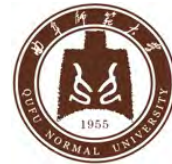
4.6 晶体（三极）管混频器

➤ 2. 混频器改变调幅波中心频率



若输入的是调幅波，则混频输出的中频电流为

$$\begin{aligned}
 i_i &= \frac{g_1}{2} V_{sm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega_o - \omega_s) t \\
 &= \frac{1}{2} V_{sm} g_1 (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_i t = g_c V_{sm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_i t
 \end{aligned}$$



- ➡ §4.1 概述
- ➡ §4.2 非线性元件的特性
- ➡ §4.3 非线性电路分析法
- ➡ §4.4 线性时变参量电路分析法
- ➡ §4.5 变频器的工作原理
- ➡ §4.6 晶体(三极)管混频器
- ➡ **§4.7 二极管混频器**
- ➡ **§4.8 差分对模拟乘法器混频电路**
- ➡ §4.9 混频器中的干扰
- ➡ §4.10 外部干扰

4.7 二极管混频器

➤ 1. 基本原理与开关函数分析法

在某些情况下，非线性元件受一个大信号控制，轮流地导通或截止，实际上起到一个开关的作用。

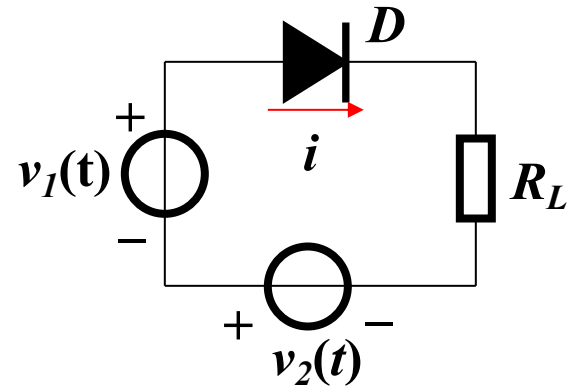
右图是等效开关函数原理电路。

该图中 $v_1(t)$ 是个振幅较小的信号，

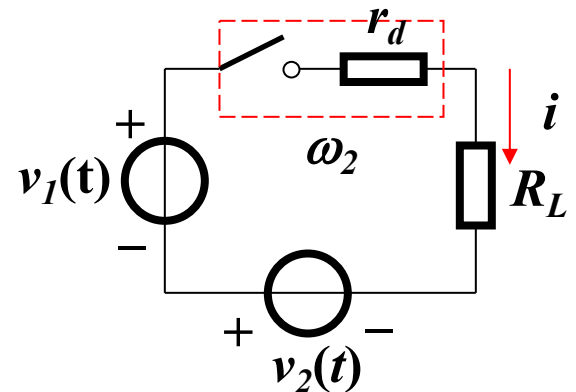
$v_2(t)$ 是个振幅足够大的信号

设 $v_1(t) = V_{1m} \cos \omega_1 t$ $v_2(t) = V_{2m} \cos \omega_2 t$

$$i = \begin{cases} \frac{1}{r_d + R_L} (v_1 + v_2) & v_2 > 0 \\ 0 & v_2 < 0 \end{cases}$$



(a) 原理电路



(b) 等效电路

4.7 二极管混频器

➤ 1. 基本原理与开关函数分析法

将二极管的开关用 $S(t)$ 开关函数表示：

$$S(t) = \begin{cases} 1 & v_2 > 0 \\ 0 & v_2 < 0 \end{cases}$$

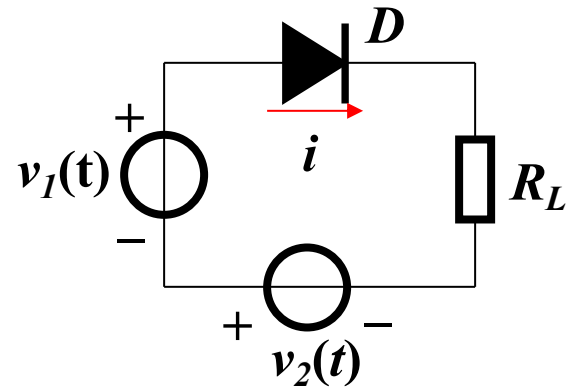
则电流
$$i = \frac{S(t)}{r_d + R_L} (v_1 + v_2)$$

$$= g(t)(v_1 + v_2)$$

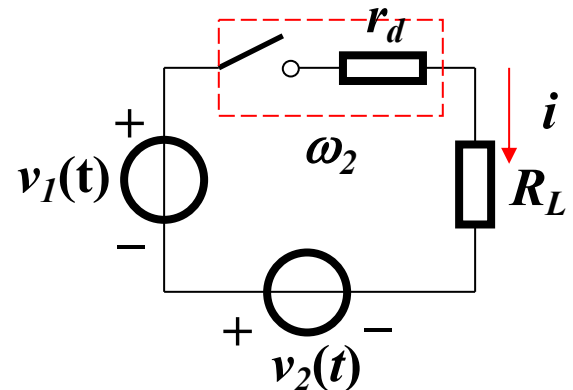
$g(t)$ 为电导，是一个时变参量。

当 $S(t)=1$ 时，
$$g(t) = \frac{1}{r_d + R_L}$$

当 $S(t)=0$ 时，
$$g(t) = 0$$



(a) 原理电路



(b) 等效电路



该电路称时变电路。

4.7 二极管混频器

➤ 1. 基本原理与开关函数分析法

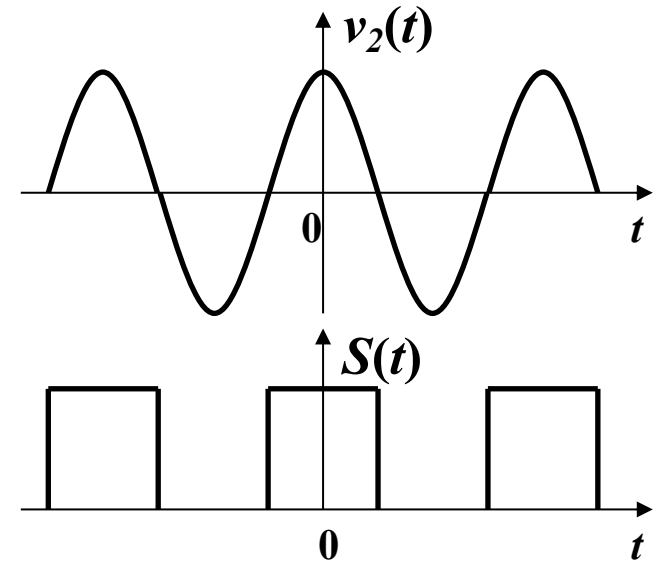
将 $S(t)$ 展开为傅立叶级数

$$S(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t \right]$$

将 $S(t)$ 代入 $i = \frac{S(t)}{r_d + R_L} (v_1 + v_2)$ 中得

$$i = \frac{1}{2(r_d + R_L)} \left[v_1 + v_2 + v_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t + v_2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t \right]$$

其中: $v_1(t) = V_{1m} \cos \omega_1 t$ $v_2(t) = V_{2m} \cos \omega_2 t$



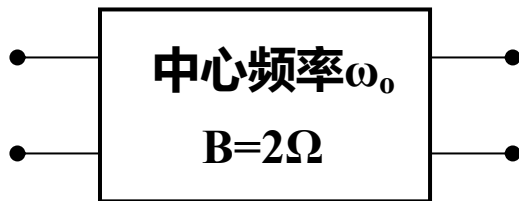
4.7 二极管混频器

➤ 1. 基本原理与开关函数分析法

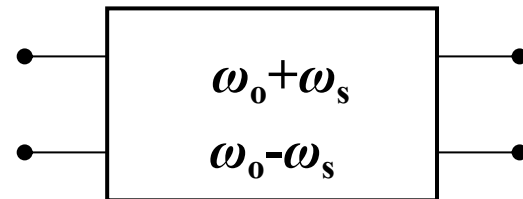
$$i = \frac{1}{2(r_d + R_L)} [v_1 + v_2 + v_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t + v_2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t]$$

如 $\omega_2 = \omega_o$ (高频) $\omega_1 = \Omega$ (低频)

如 $\omega_2 = \omega_o$ (本地频率) $\omega_1 = \omega_s$ (信号频率)



调制



变频

4.7 二极管混频器

➤ 2. 二极管(单管)开关混频原理

晶体管混频器

优点：有变频增益；

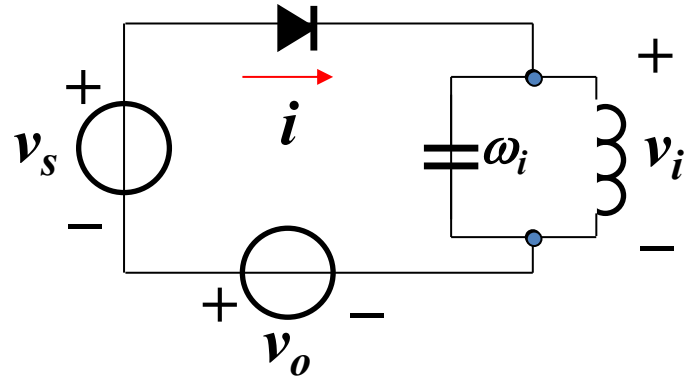
缺点：①动态范围小；②组合频率干扰严重；③噪声系数大(与二极管比较)；
④存在本振辐射问题。

前面定义开关函数 $S(t)$ 为：

$$S(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_o t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_o t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_o t + \dots$$

通过二极管的电流为：

$$i = g_d S(t) \cdot (v_s + v_o - v_i)$$



4.7 二极管混频器

➤ 2. 二极管(单管)开关混频原理

$$i = g_d [V_{sm} \cos(\omega_s t + \varphi_s) + V_{om} \cos(\omega_o t + \varphi_o) + V_{im} \cos(\omega_i t + \varphi_i)] \cdot$$

$$\left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_o t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_o t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_o t + \dots \right]$$

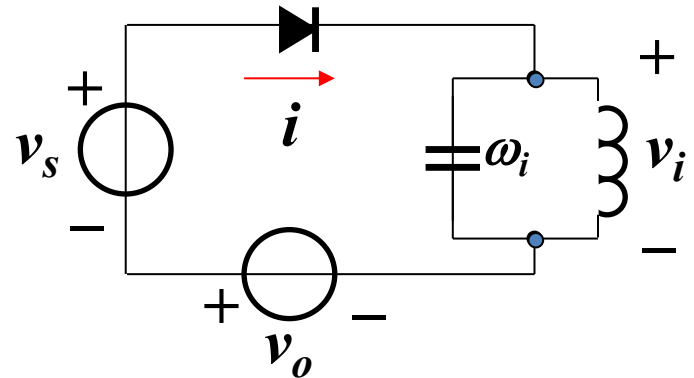
从上式可得 $\omega_o + \omega_s$ $\omega_o - \omega_s$ 分量

还有 $2\omega_o$ $4\omega_o$ $6\omega_o$

组合频率分量 $3\omega_o \pm \omega_s$ $5\omega_o \pm \omega_s$ $3\omega_o \pm \omega_i$ $5\omega_o \pm \omega_i$...

没有 ω_s 和 ω_i 组成的组合谐波分量

没有高次谐波分量 $2\omega_s$, $3\omega_s$, ...

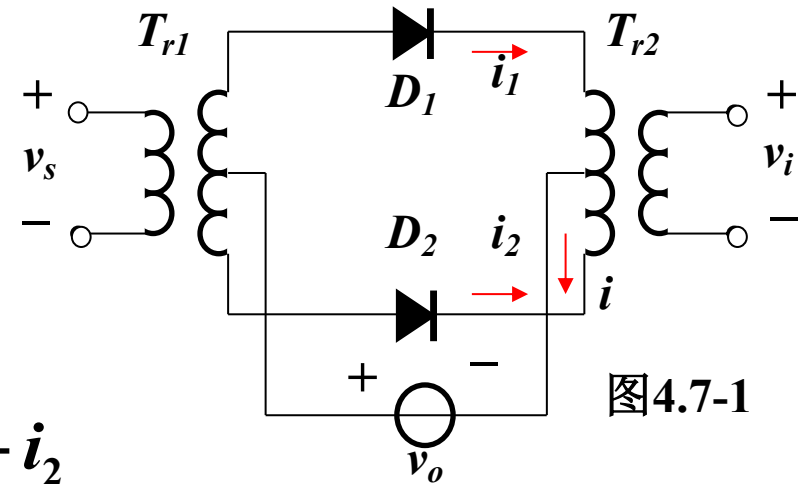


4.7 二极管混频器

➤ 3. 二极管平衡混频器

$$i_1 = \frac{1}{2} g_d S(t) (v_s + 2v_o - v_i)$$

$$i_2 = \frac{1}{2} g_d S(t) (v_i + 2v_o - v_s)$$



平衡混频器中的总电流 $i = i_1 - i_2$

$$i = \frac{1}{2} g_d S(t) (v_s + 2v_o - v_i) - \frac{1}{2} g_d S(t) (v_i + 2v_o - v_s)$$

$$= g_d S(t) (v_s - v_i)$$

与单管情况 $i = g_d S(t) (v_s + v_o - v_i)$ 比较

二者基本相同，由于工作平衡状态，两个二极管电流反向，所以不包含 $2\omega_0$, $4\omega_0$, ... 项，可减少组合频率干扰。

4.8 差分对模拟乘法器混频电路

➤ 1. 模拟乘法器

差分放大器输出

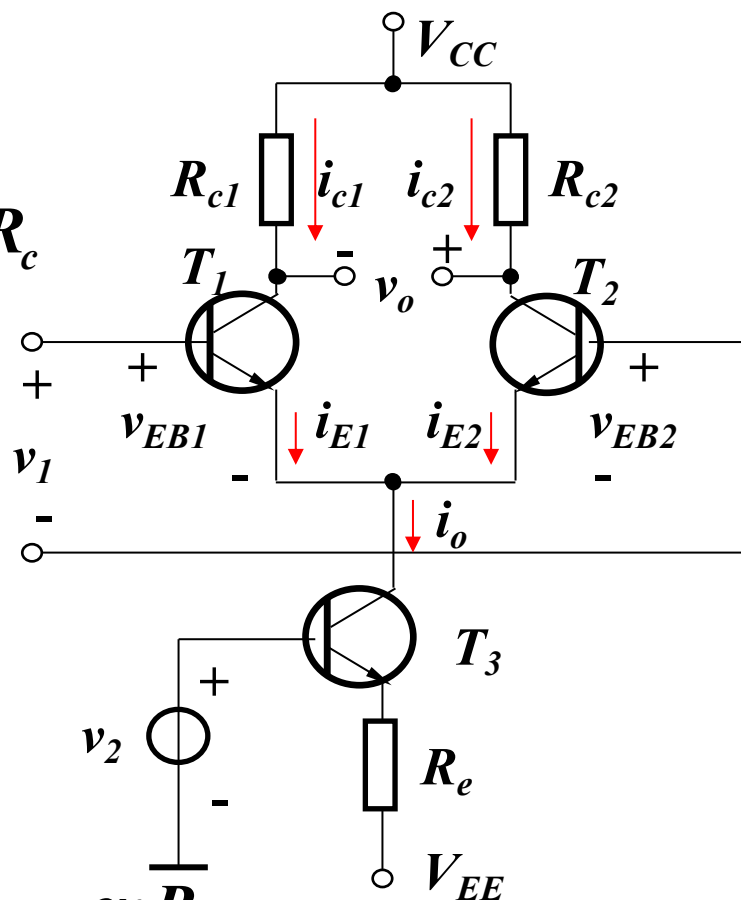
$$\begin{aligned} v_o &= i_{c1}R_{c1} - i_{c2}R_{c2} = g_{mo}v_1R_c - (-g_{mo}v_1)R_c \\ &= 2g_{mo}v_1R_c = \frac{\alpha q}{2kT} R_c i_o v_1 \end{aligned}$$

由于 i_o 是受信号 v_2 控制的，可写为：

$$i_o = I_o + \Delta i_o = I_o + gv_2$$

代入上式得：

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{\alpha q}{2kT} R_c (I_o + gv_2)v_1 = \frac{\alpha q R_c I_o}{2kT} v_1 + \frac{\alpha q R_c}{2kT} gv_2 v_1 \\ &= K_o v_1 + K v_2 v_1 \end{aligned}$$



4.8 差分对模拟乘法器混频电路

➤ 2. 模拟乘法器混频

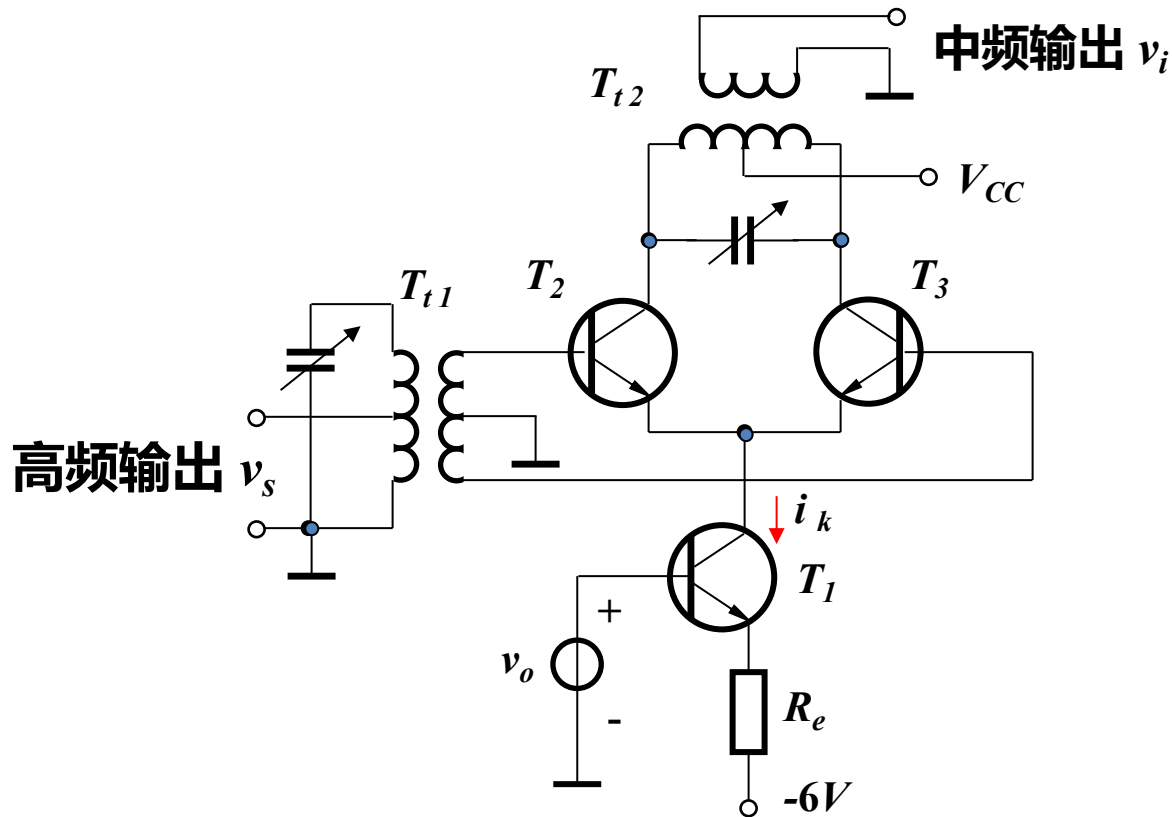
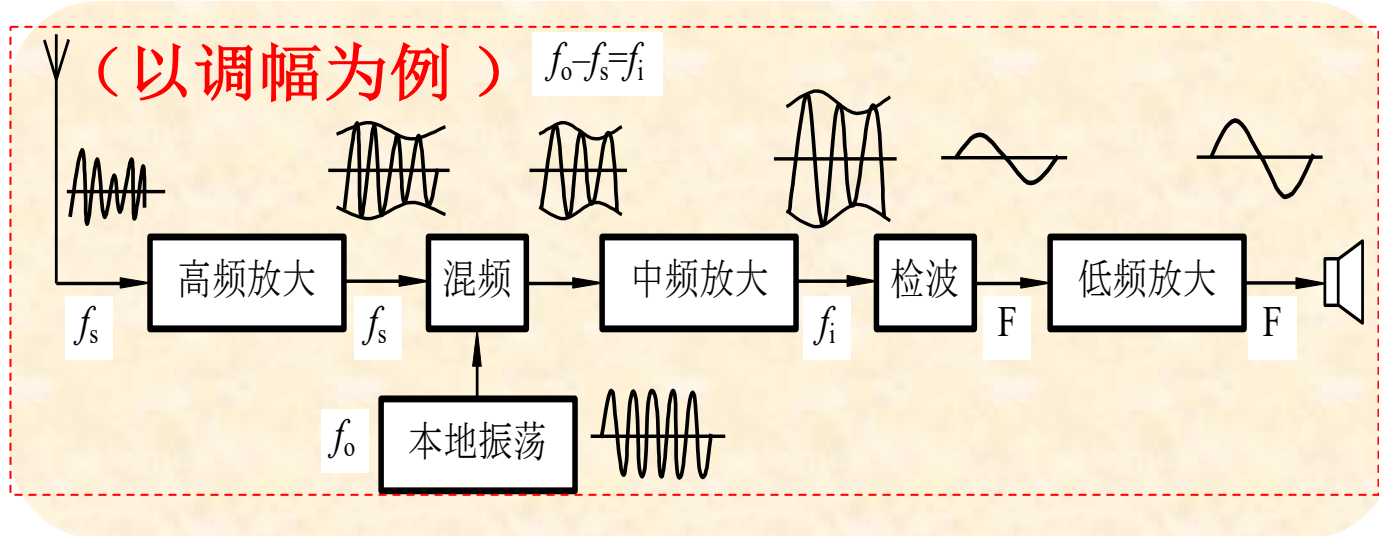


图4.8-1 差分对混频器

4.9 混频器的干扰

➤ 混频器的干扰



1. 有用信号和本振产生的组合频率干扰——哨叫干扰

检波器除了输出有用信号的解调信号外，还伴有一个频率为 F 的音频信号，这就形成了哨叫干扰。

2. 干扰信号和本振产生的副波道干扰

当混频器前级的天线和高频放大电路的选频特性不理想时，在通频带以外的电台信号也有可能进入混频器的输入端而形成干扰。

3. 干扰信号对有用信号调制产生的交叉调制干扰

4. 两干扰信号和本振信号产生的互相调制干扰

本章小结

1. 理解并掌握**非线性元件**的基本特性
2. 掌握非线性电路分析的**幂级数法**和**折线近似法**
3. 掌握**混频器（变频器）**的**基本工作原理**
4. 理解**晶体管混频器**的基本原理和分析方法
5. 理解**二极管混频器**的基本原理和分析方法
6. 了解混频器中的**干扰**



Thank You !

Q & A