



# 第 6 章 振幅调制、解调及混频

➤ 6.1 振幅调制

➤ 6.2 调幅信号的解调

➤ 6.3 混频

➤ 6.4 混频器的干扰



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

由上节分析可知，AM，DSB，SSB信号都是将调制信号的频谱搬移到载频上去，搬移过程中频谱结构不发生变化，属于频谱的线性搬移，故他们都是线性调制。

又因为三种调制信号都有  $\Omega$   $u_c$  和 的乘积项，因此这些调制的实现以**乘法器**为基础。

调制  $\left\{ \begin{array}{l} \text{高电平调制} \\ \text{低电平调制} \end{array} \right.$

**高电平调制**：将功放和调制合二为一，调制后**不需放大**，即可发射

**低电平调制**：将功放和调制分开，调制后**需要放大**方可发射。

调制方法：用非线性器件  $\rightarrow$  组合频率分量  $\rightarrow$  滤波取出有用分



## 6.1 振幅调制

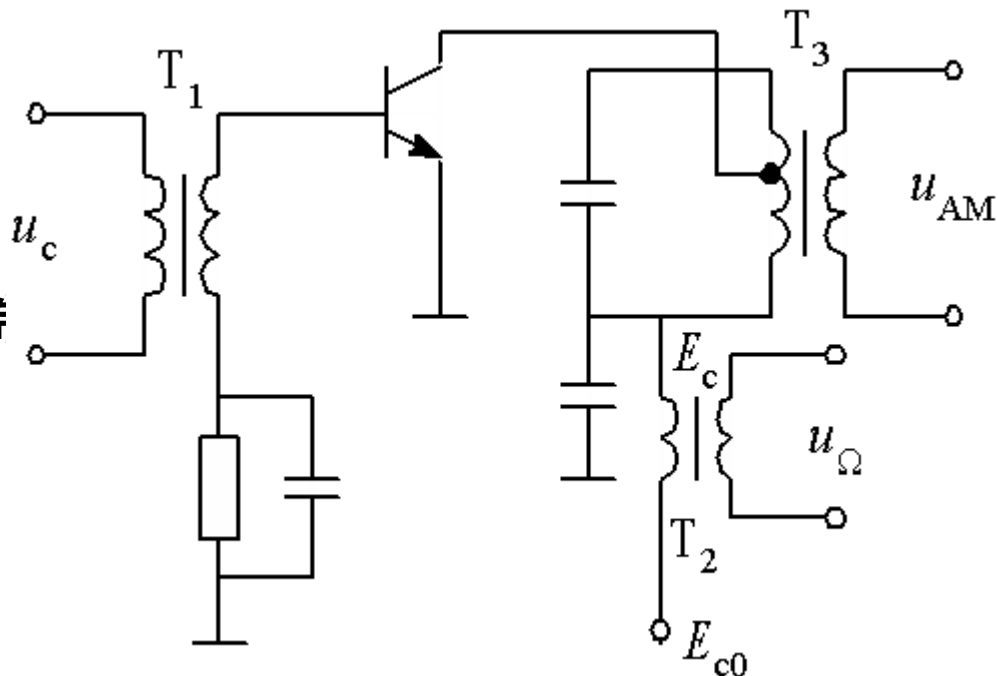
### 二、振幅调制电路

#### ① AM 调制电路

##### (1) 高电平调制

利用功放的调制特性来完成调制

- 基极调制 —— 欠压
- 集电极调制 —— 过压
- 基极集电极组合调制



集电极调幅电路

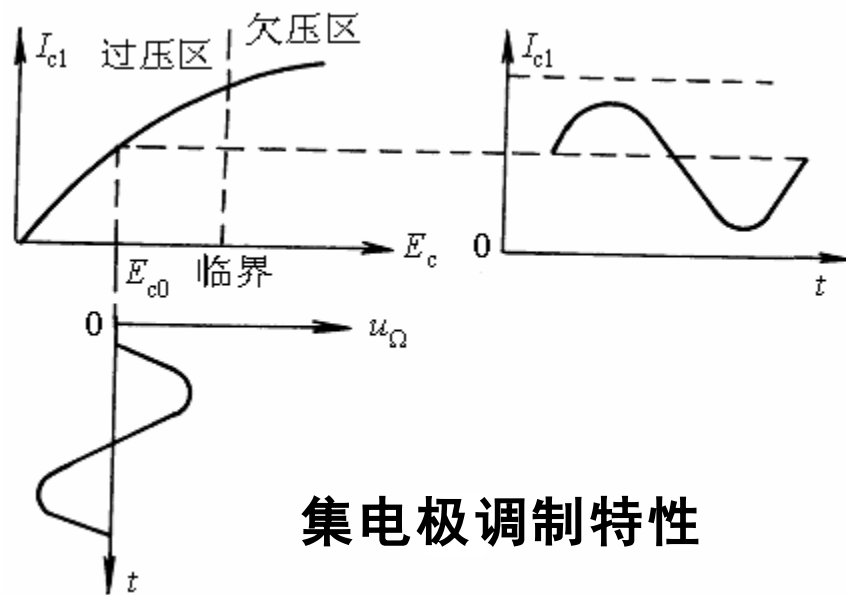
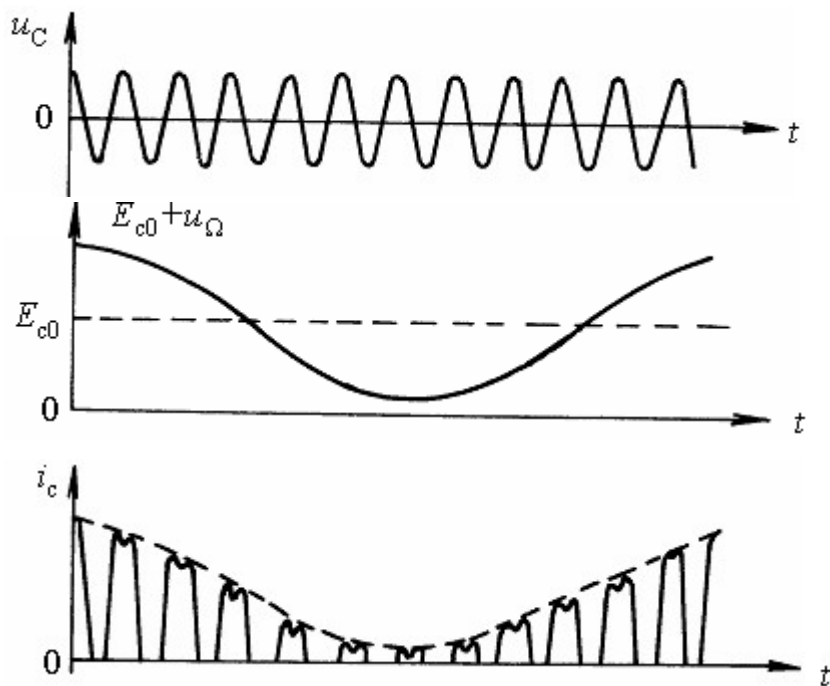


## 6.1 振幅调制

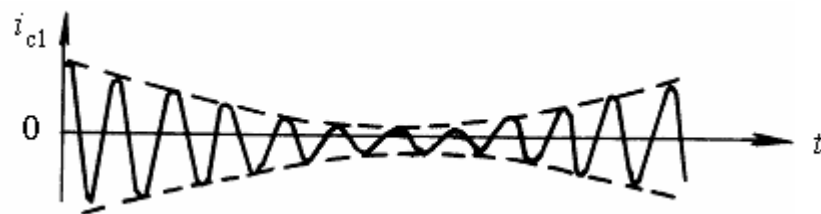
### 二、振幅调制电路

#### ① AM 调制电路

##### (1) 高电平调制



集电极调制特性





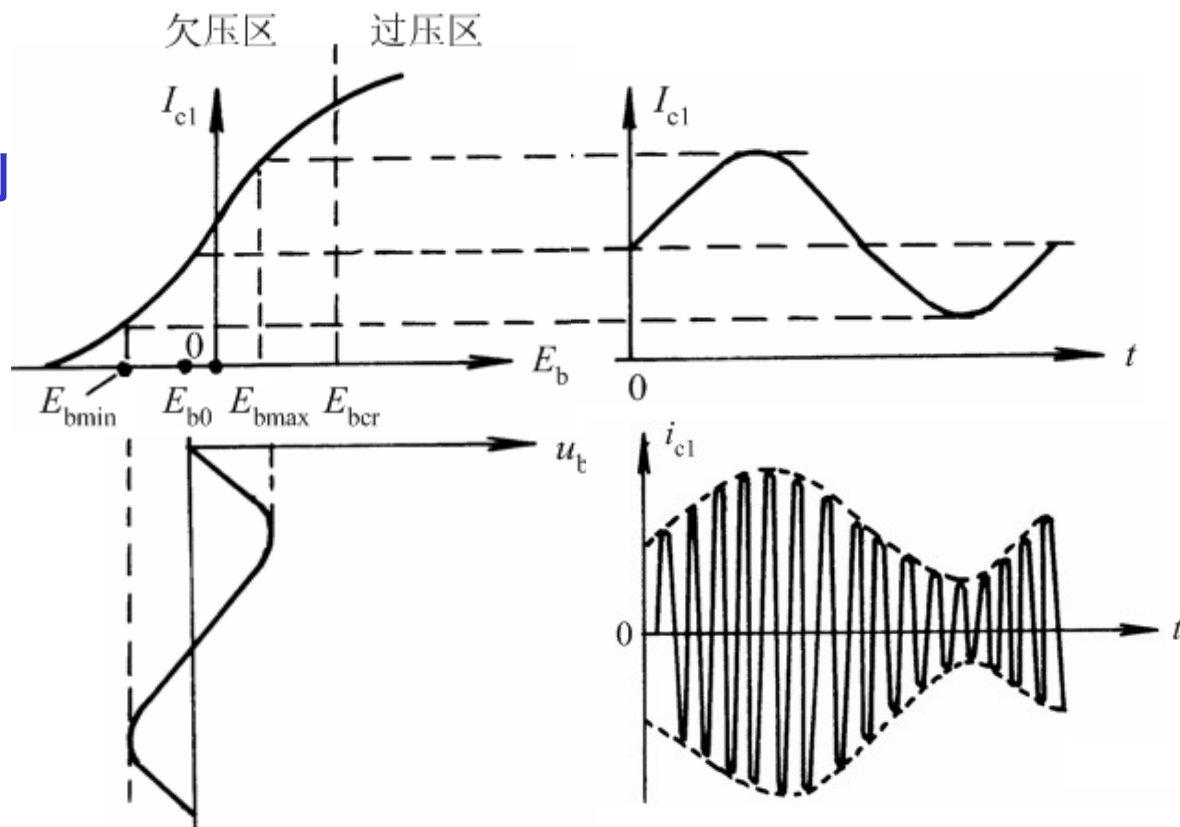
## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ① AM 调制电路

##### (1) 高电平调制

基极调制特性



## 6.1 振幅调制

## 二、振幅调制电路

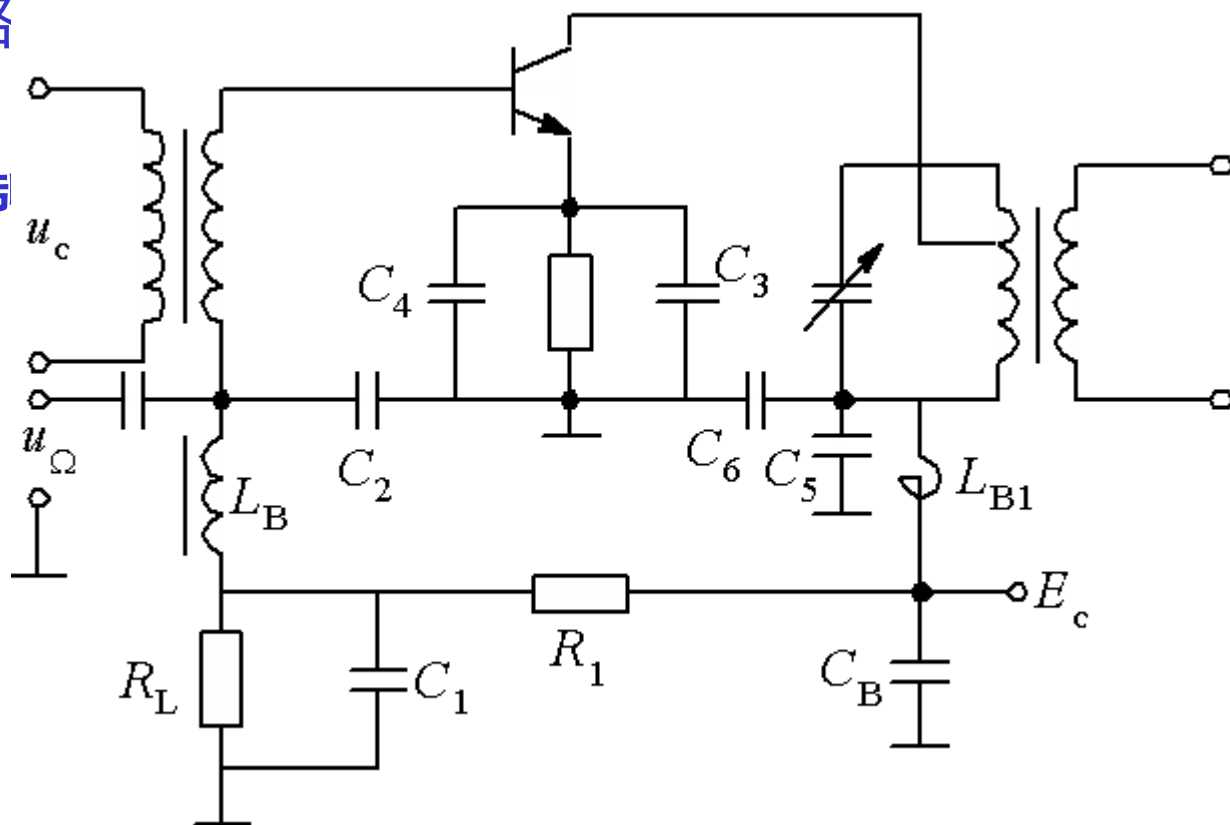
## ① AM 调制电路

### (1) 高电平调制

## C2, C4, C6 ——高频旁路电容

**L<sub>B</sub>——低频扼流圈**

**L<sub>B1</sub>——高频扼流**



## 基极调制电路



# 6.1 振幅调制

## 二、振幅调制电路

### ① AM 调制电路

#### (2) 低电平调制

要完成 AM 信号的低电平调制，可采用第五章中的频谱线性搬移电路

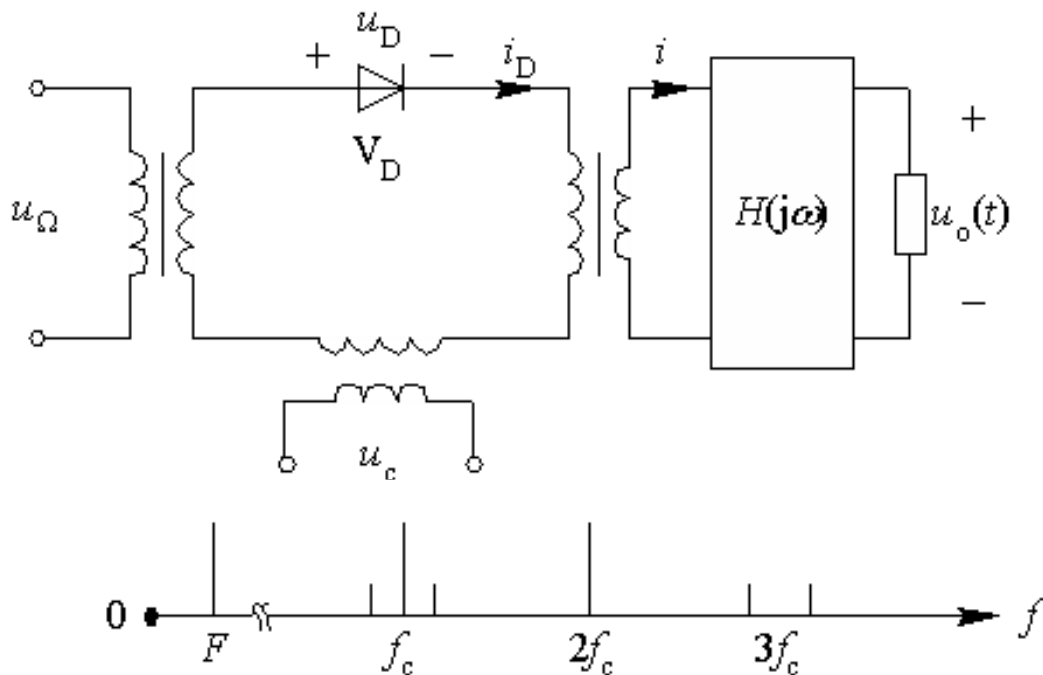
#### a) 二极管电路

当  $U_c \gg U_\Omega$  时，有

$$i_D = g_D k(\omega_c t)(u_c + u_\Omega)$$

$$= \frac{g_D}{\pi} U_c + \frac{g_D}{2} U_\Omega \cos \Omega t + \frac{g_D}{2} U_c \cos \omega_c t$$

$$+ \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t + \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c + \Omega)t + \diamondsuit$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

① **AM 调制电路**  $i_D = \frac{g_D}{\pi} U_C + \frac{g_D}{2} U_\Omega \cos \Omega t + \frac{g_D}{2} U_C \cos \omega_c t$

#### (2) 低电平调制

a) **二极管电路**  $+ \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t + \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c + \Omega)t + \blacklozenge ?$

通过滤波器滤出  $\omega_c, \omega_c \pm \Omega$

频率分量，则输出  $u_o$

$$\begin{aligned} u_o &= R_L \left[ \frac{g_D}{2} U_C \cos \omega_c t + \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t + \frac{g_D}{\pi} U_\Omega \cos(\omega_c + \Omega)t \right] \\ &= \frac{1}{2} R_L g_D U_C \left( \cos \omega_c t + \frac{4}{\pi} \frac{U_\Omega}{U_C} \cos \omega_c t \cos \Omega t \right) \\ &= U_o (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t \end{aligned}$$

$$U_o = \frac{1}{2} R_L g_D U_C \quad m = \frac{4}{\pi} \frac{U_\Omega}{U_C}$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ① AM 调制电路

##### (2) 低电平调制

##### b) 差分对电路

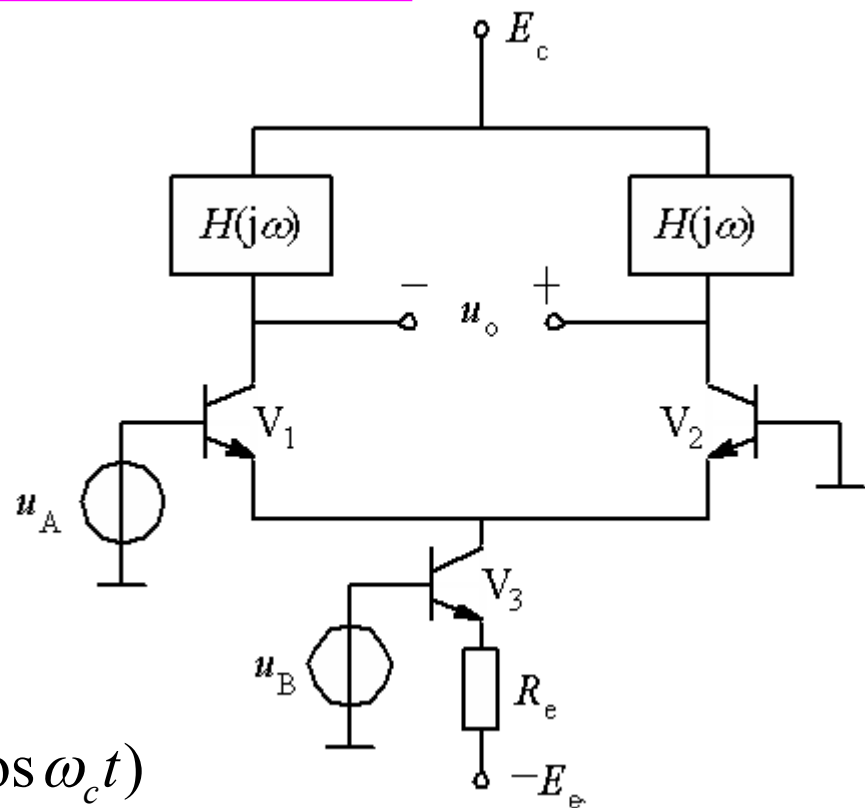
$$i_o = I_0 \left(1 + \frac{u_B}{E_e}\right) \tanh\left(\frac{u_A}{2V_T}\right)$$

令  $u_c = u_A, u_\Omega = u_B$  则：

$$i_o = I_0 \left(1 + \frac{U_\Omega \cos \Omega t}{E_e}\right) \tanh\left(\frac{U_c \cos \omega_c t}{2V_T}\right)$$

$$= I_0 (1 + m \cos \Omega t) [\beta_1(x) \cos \omega_c t + \beta_3(x) \cos 3\omega_c t + \text{?}] \text{? ?}$$

$$m = \frac{U_\Omega}{E_e} \quad x = \frac{U_C}{V_T}$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ① AM 调制电路

#### (2) 低电平调制

##### b) 差分对电路

$$i_o = I_0(1 + m \cos \Omega t)[\beta_1(x) \cos \omega_c t + \beta_3(x) \cos 3\omega_c t + \text{?}] \text{? ?}$$

用中心频率为  $f_c$ ，带宽为  $2F$  滤波器滤波后，有：

$$u_o = I_0 R_L \beta_1(x)(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

——AM 信号（双端输出）

用单端输出，以及双差分对电路也能实现 AM 信号



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

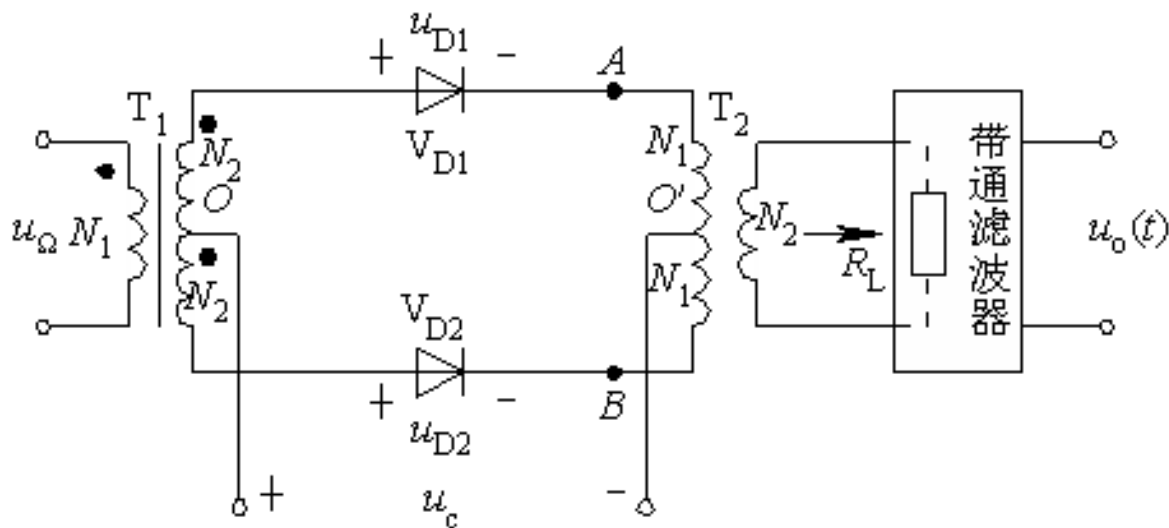
#### ② DSB 调制电路

DSB 信号的产生大都采用低电平调制，关键是乘积项

##### (1) 二极管调制电路

单二极管电路只能产生 AM 信号，不能产生 DSB 信号。二极管平衡电路和二极管环形电路可以产生 DSB 信号。

##### ■ 二极管平衡电路





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管平衡电路

当  $U_C \gg U_\Omega$  时

$$\begin{aligned} i_L &= 2g_D K(\omega_c t) u_\Omega \\ &= g_D U_\Omega \cos \Omega t + \frac{2}{\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{2}{\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t \\ &\quad - \frac{2}{3\pi} g_D U_\Omega \cos(3\omega_c + \Omega)t + \frac{2}{3\pi} g_D U_\Omega \cos(3\omega_c - \Omega)t + \dots \end{aligned}$$

滤波器的中心频率为  $f_c$ , 带宽为  $2F$ , 谐振阻抗为  $R_L$ , 则输出电压为

$$\begin{aligned} u_o &= R_L \frac{2}{\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c + \Omega)t + R_L \frac{2}{\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t \\ &= 4U_\Omega \frac{R_L g_D}{\pi} \cos \Omega t \cos \omega_c t \end{aligned}$$

——DSB 信号



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管平衡电路

如果  $u_c$ 、 $u_\Omega$  的位置交换，则该电路不能得到 DSB 信号。

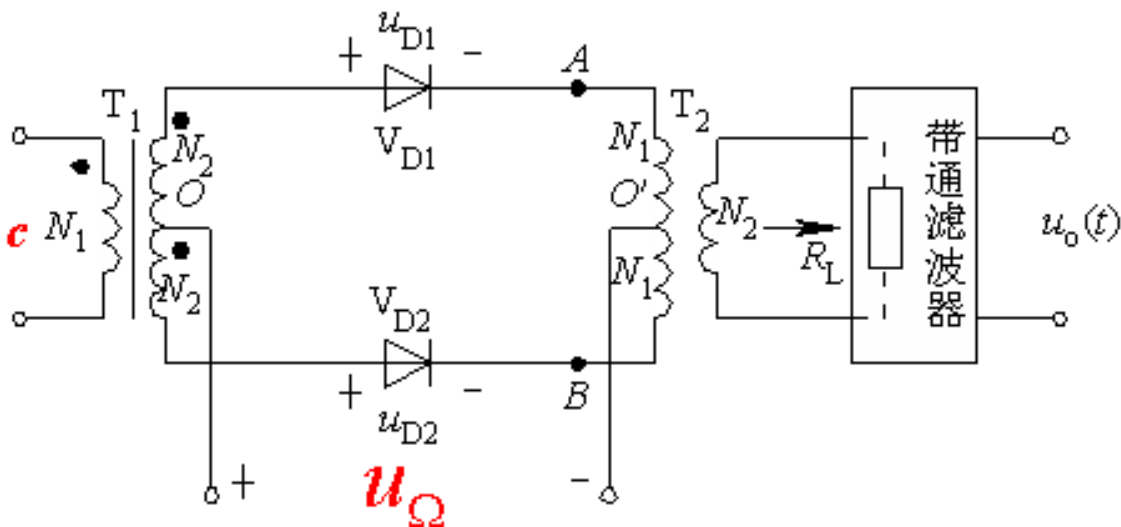
$$U_\Omega \gg U_C$$

$$i_L = 2g_D K(\Omega t) u_C$$

$$= g_D U_C \cos \omega_C t + \frac{2}{\pi} g_D U_C \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{2}{\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c - \Omega)t$$

$$- \frac{2}{3\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c + 3\Omega)t + \frac{2}{3\pi} g_D U_\Omega \cos(\omega_c - 3\Omega)t + \text{???}$$

故无论怎么设计滤波器，都不可能得到 DSB 信号，因为载波没有抑制掉





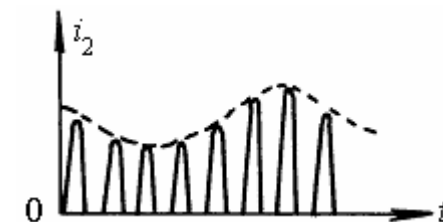
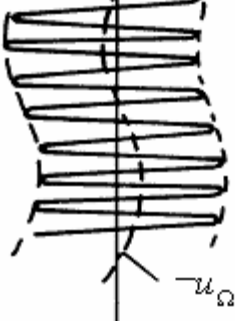
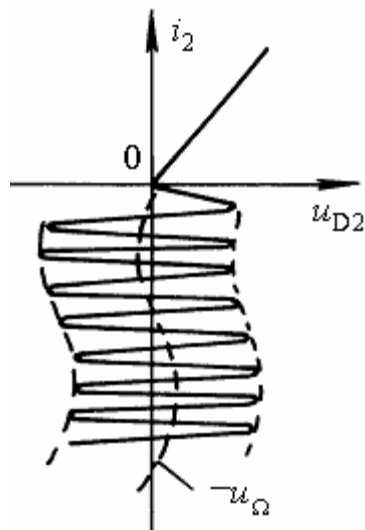
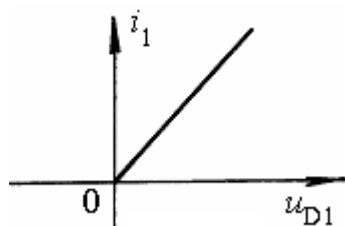
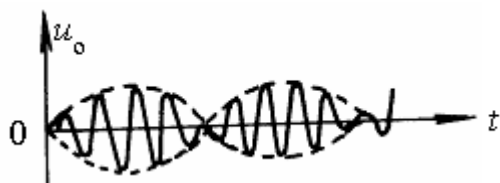
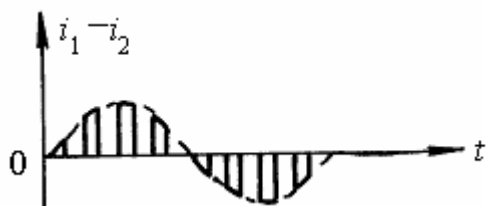
## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管平衡电路





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

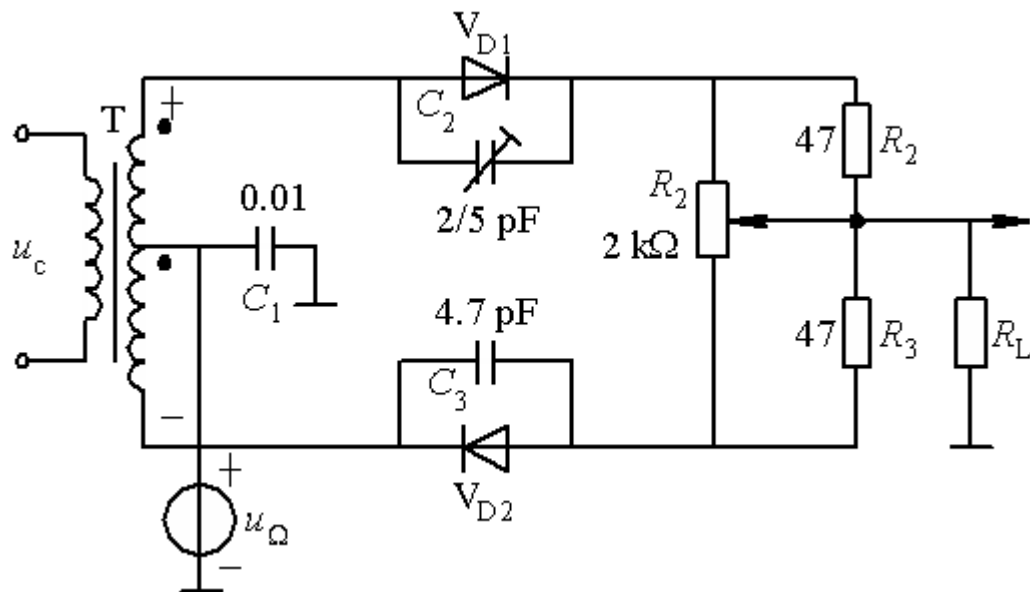
##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管平衡电路

两个二极管反向，故载波电压同相加在两管上，而调制电压反向加在两管上。流经负载  $R_L$  上的电流仍是两管电流之差，故其原理与基本平衡电路相同。

$C_1$  对高频短路，低频开路；

$C_2$ 、 $C_3$  用于平衡反向工作时两管的结电容。



平衡调制器的一种实际线路



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管环形电路（双平衡调制器）

双平衡调制器可以进一步减少频率分量。

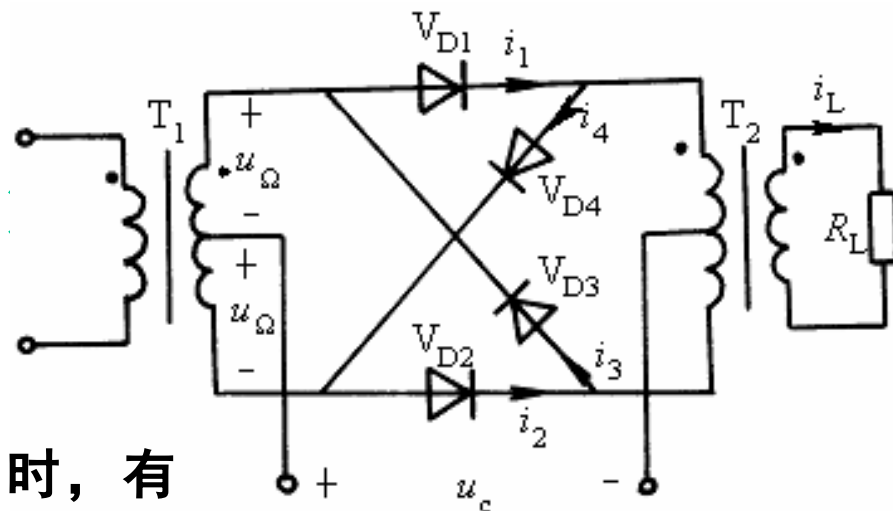
当  $U_C \gg U_\Omega$

时，有

$$i_L = 2g_D K_{\square}(\omega_c t) u_\Omega = 2g_D \left[ \frac{4}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \text{?} \text{?} \text{?} \cos \Omega t \right]$$

经滤波后，有

$$u_o = \frac{8}{\pi} R_L g_D U_\Omega \cos \Omega t \square \cos \omega_c t$$







## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 二极管环形电路（双平衡调制器）

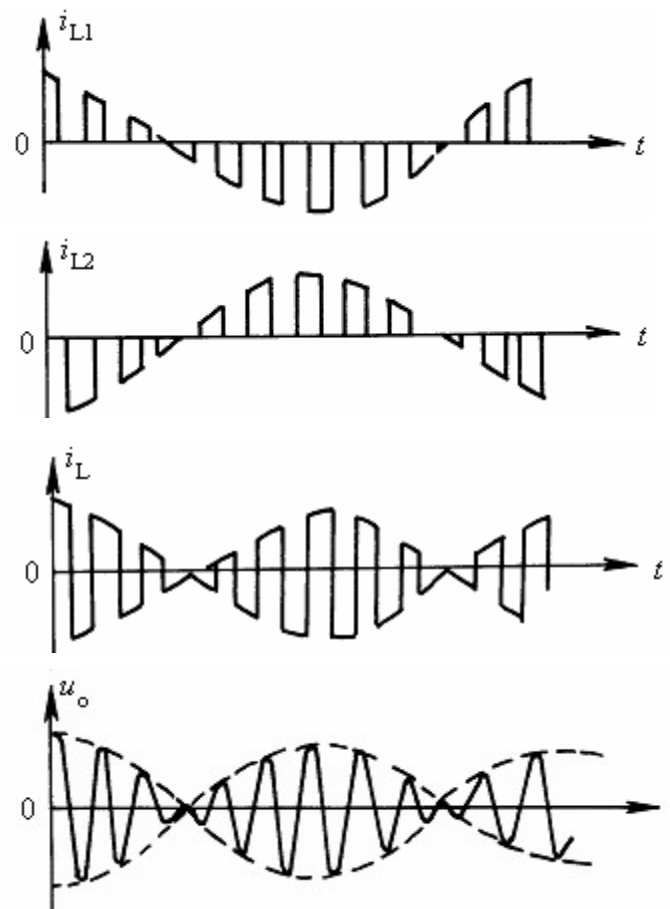
当  $u_c > 0$  时电流为  $i_{L1}$  :

$$i_{L1} = 2g_D K(\omega_c t) u_{\Omega}$$

当  $u_c < 0$  时电流为  $i_{L2}$  :

$$i_{L2} = -2g_D K(\omega_c t - \pi) u_{\Omega}$$

$$i_L = i_{L1} + i_{L2}$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

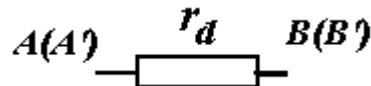
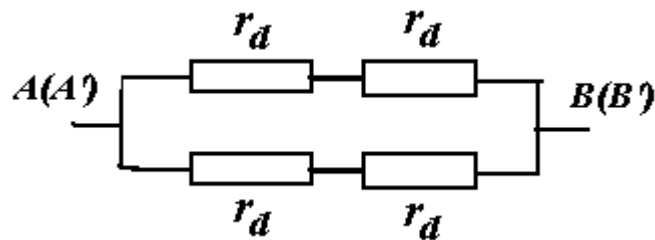
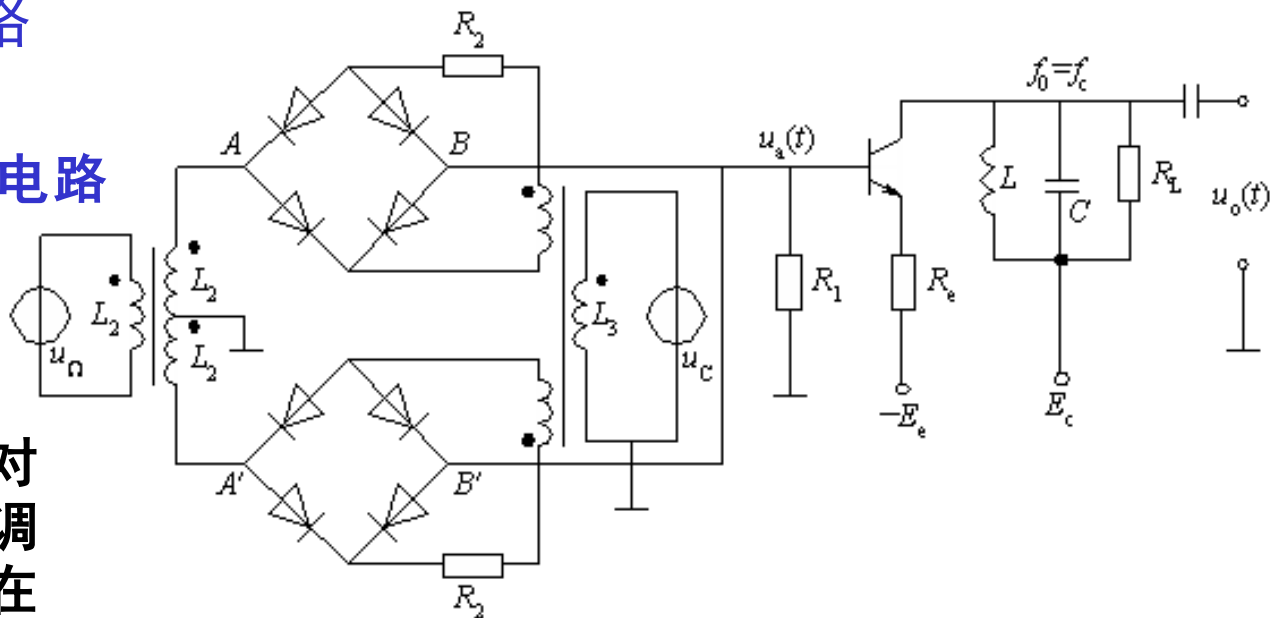
##### ■ 双桥构成的环形调制器

分析：载波电压对两个桥路反向；调制电压反向地接在两桥的另一对角线

$u_c > 0$  时，上桥路导通，下桥路截至  
 $u_c < 0$  时，下桥路导通，上桥路截至

假设二极管导通时的电阻为  $r_d$ ，则上桥路或下桥路导通时：

A、B 或 A'、B' 两端的电阻为  $r_d$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 双桥构成的环形调制器

忽略晶体管输入电阻的影响

当  $u_c > 0$  时

$$u_{a1}(t) = \frac{R_1}{R_1 + r_d} u_\Omega K(\omega_c t)$$

当  $u_c < 0$  时

$$u_{a2}(t) = -\frac{R_1}{R_1 + r_d} u_\Omega K(\omega_c t - \pi)$$

总的电压：

$$u_a(t) = \frac{R_1}{R_1 + r_d} u_\Omega K(\omega_c t)$$

晶体管交流电流

$$i_c \approx i_e = \frac{u_a(t) + E_e}{R_e}$$



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

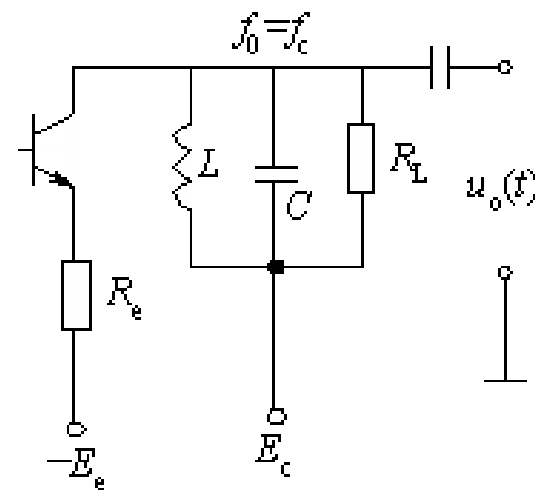
#### ② DSB 调制电路

##### (1) 二极管调制电路

##### ■ 双桥构成的环形调制器

$$\left. \begin{aligned} u_a(t) &= \frac{R_1}{R_1 + r_d} u_\Omega K'(\omega_c t) \\ i_c \approx i_e &= \frac{u_a(t) + E_e}{R_e} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{R_1 U_\Omega}{(R_1 + r_d) R_e} \cos(\Omega t) K'(\omega_c t) + \frac{E_e}{R_e} \\ &= \frac{R_1 U_\Omega}{(R_1 + r_d) R_e} \cos(\Omega t) \left[ \frac{4}{\pi} \cos(\omega_c t) - \right. \\ &\quad \left. \frac{4}{3\pi} \cos(3\omega_c t) + \dots \right] + \frac{E_e}{R_e} \end{aligned}$$



滤波后：  $u_o(t) = -\frac{4}{\pi} \frac{R_L}{R_e} \frac{R_1}{R_1 + r_d} U_\Omega \cos \Omega t \cos \omega_c t$  ——DSB 信号



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (2) 差分对调制器

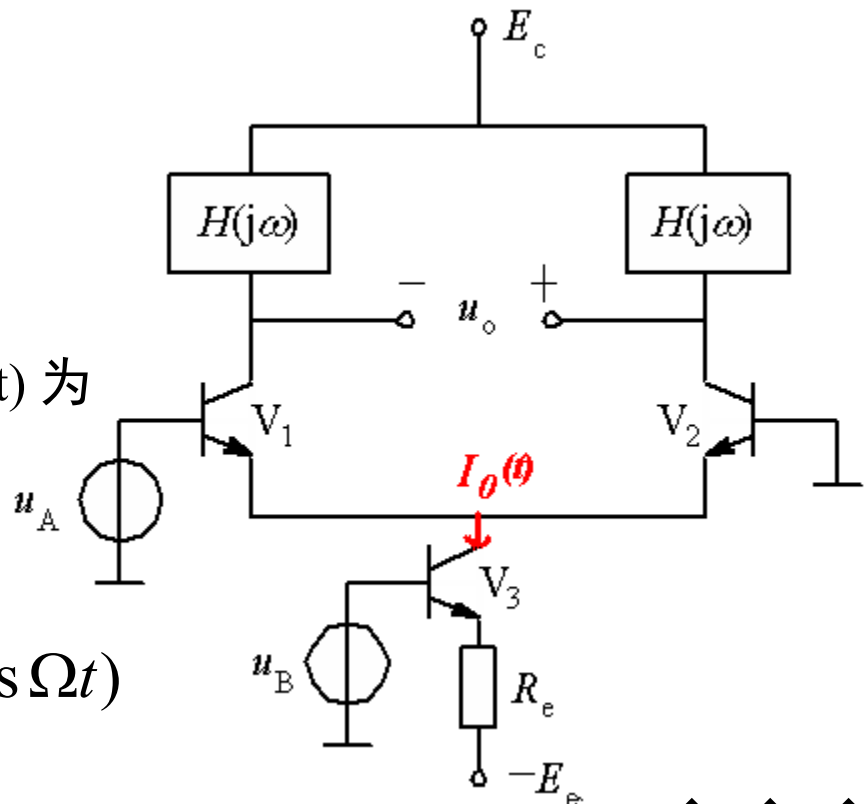
设  $u_B = u_C$ ,  $u_A = u_\Omega$ , 则双端输出电流  $i_o(t)$  为

$$i_o(t) = I_o \left( 1 + \frac{u_B}{E_e} \right) \tanh\left(\frac{u_A}{2V_T}\right)$$

$$i_o(t) = I_o \left( 1 + \frac{U_C}{E_e} \cos \omega_c t \right) \tanh\left(\frac{U_\Omega}{2V_T} \cos \Omega t\right)$$

$$= I_o (1 + m \cos \omega_c t) [\beta_1(x) \cos \Omega t + \beta_3(x) \cos 3\Omega t + \text{?}] \text{?} \text{?}$$

$$I_o = E_e / R_e, \quad m = U_C / E_e, \quad x = U_\Omega / V_T$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (2) 差分对调制器

$$i_o(t) = I_o(1 + m \cos \omega_c t)[\beta_1(x) \cos \Omega t + \beta_3(x) \cos 3\Omega t + \text{?}] \text{? ?}$$

经滤波后的输出电压  $u_o(t)$  为

$$u_o(t) \approx I_o R_L m \beta_1(x) \cos \Omega t \cos \omega_c t = U_o \cos \Omega t \cos \omega_c t$$

——DSB 信号

注意：这里有频率分量  $\omega_c \pm n\Omega$ , ( $n = 3, 5, \dots$ )  
，他们不易滤除,  $\beta_3(x) \ll \beta_1(x)$

即会产生失真，只有当 较小时，使  
才能得到理想的 DSB 信号。



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (2) 差分对调制器

信号分量可知，DSB 信号的产生可将  $u_C$  与  $u_\Omega$  相乘即可。单差分调制器虽然可以得到 DSB 信号，具有相乘的功能，但它并不是一个理想的乘法器。

首先：信号的注入方式必须是  $u_B = u_C$ ， $u_A = u_\Omega$ ，且对  $u_\Omega$  的幅度提出了要求，限制了输入信号的动态范围。

其次：要得到 DSB 信号，必须加接滤波器，以滤除不必要的分量。  
必须是双端差动输出，单端输出只能得 AM 信号

最后：当输入信号为 0 时，输出并不为 0。

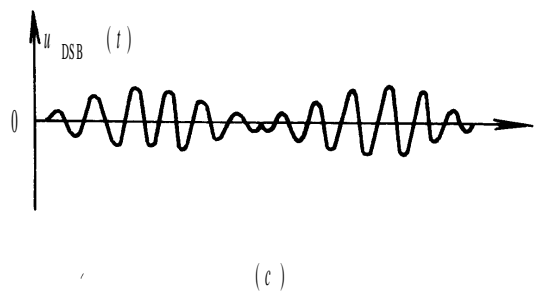
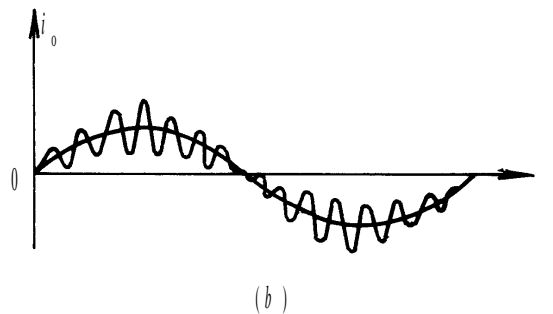
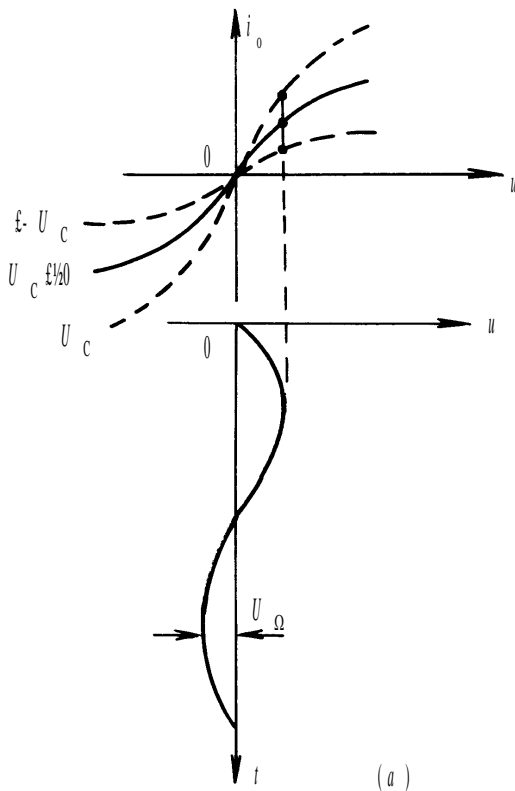


## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

② **DSB 调制电路**  $i_o(t) = I_o \left(1 + \frac{U_C}{E_e} \cos \omega_c t\right) \tanh\left(\frac{U_\Omega}{2V_T} \cos \Omega t\right)$

(2) 差分对调制器







## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ② DSB 调制电路

##### (1) 双差分对调制器

$$i_o(t) = I_0 \tanh\left(\frac{u_B}{2V_T}\right) \tanh\left(\frac{u_A}{2V_T}\right)$$

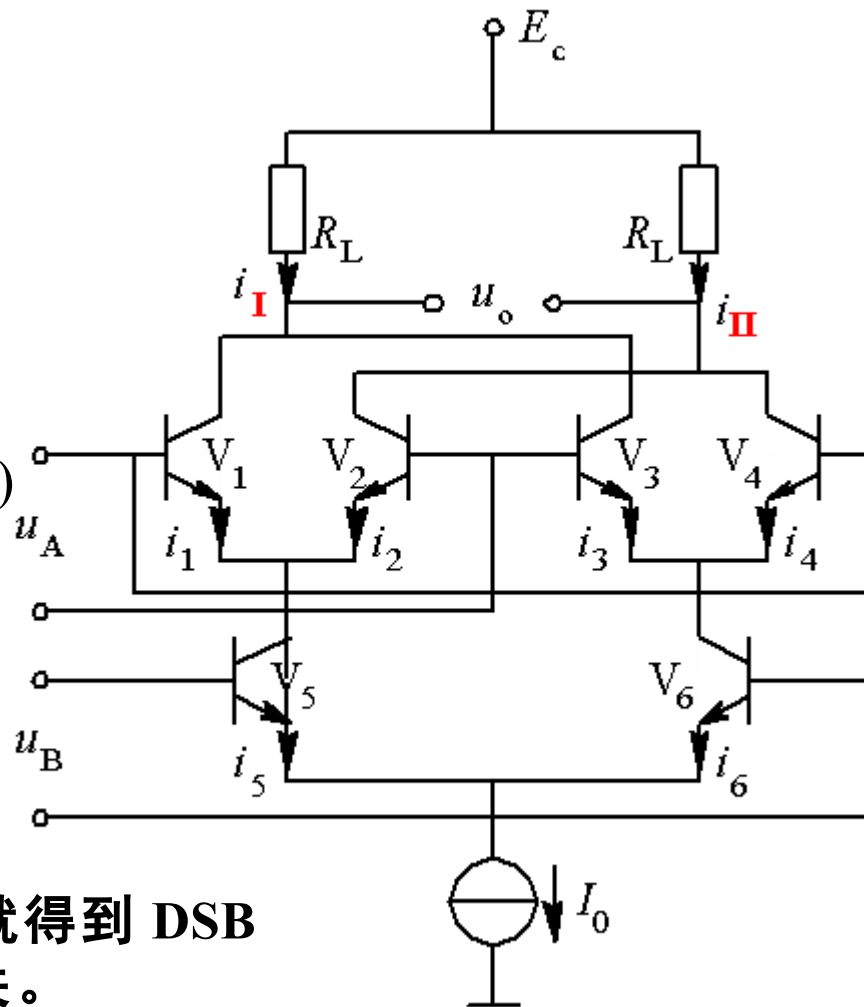
$$= I_0 \tanh\left(\frac{U_\Omega}{2V_T} \cos \Omega t\right) \tanh\left(\frac{U_c}{2V_T} \cos \omega_c t\right)$$

当  $U_c$ 、 $U_\Omega < 26\text{mV}$

$$i_o = I_0 \frac{1}{4V_T^2} u_\Omega u_c$$

此时为模拟乘法器，不加滤波器就得到 DSB  
 $U_c$ 、 $U_\Omega$  所加位置无关。

单端输出也是 DSB 信号。





## 6.1 振幅调制

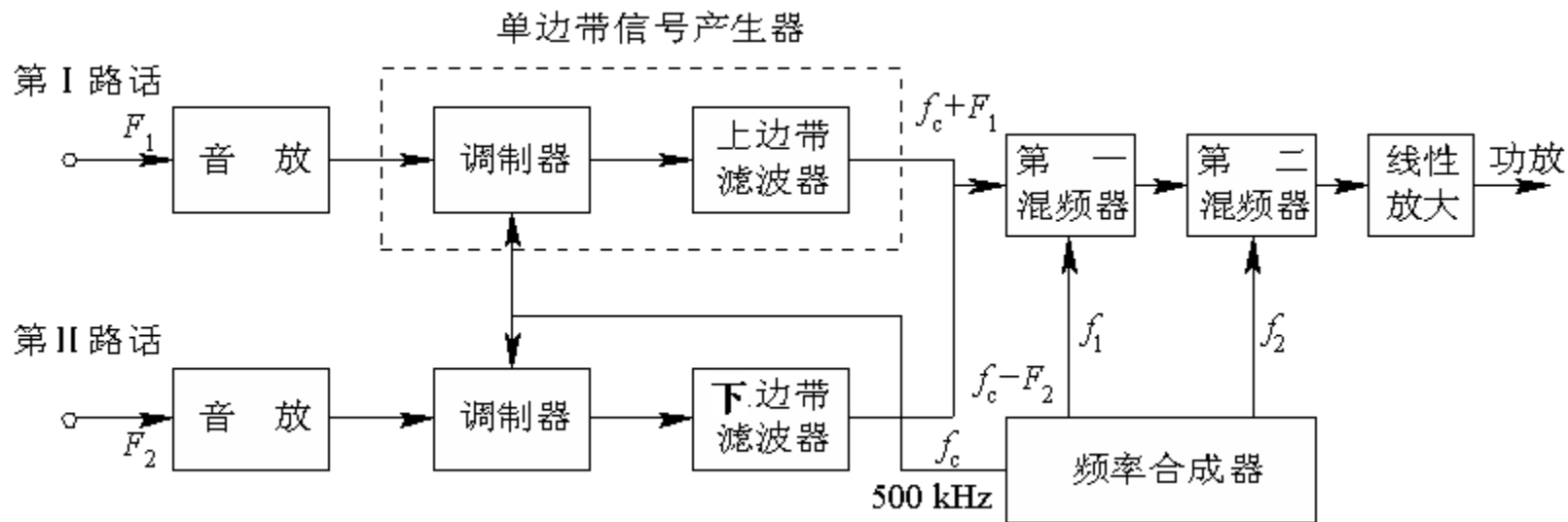
### 二、振幅调制电路

#### ③ SSB 调制电路

SSB 信号是将双边带信号滤除一个边带形成的。

根据滤除方法的不同,SSB 信号产生方法有: **滤波法和移相法**

##### 1) 滤波法



用滤波法产生 SSB 的发射机框图



## 6.1 振幅调制

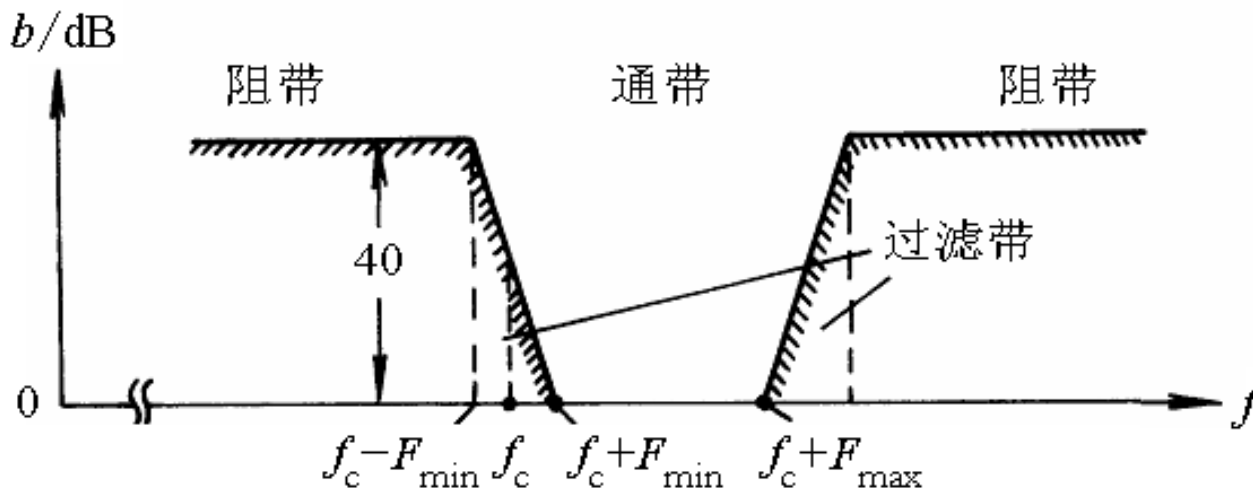
### 二、振幅调制电路

#### ③ SSB 调制电路

##### 1) 滤波法

滤波法的关键是边带滤波器的制作。

要产生满足要求的 SSB 信号，对边带滤波器的要求很高。主要要求边带滤波器的通带阻带间有陡峭的过渡衰减特性，同时要求通带内衰减要小，衰减变化小。



理想边带滤波器的衰减特性



## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ③ SSB 调制电路

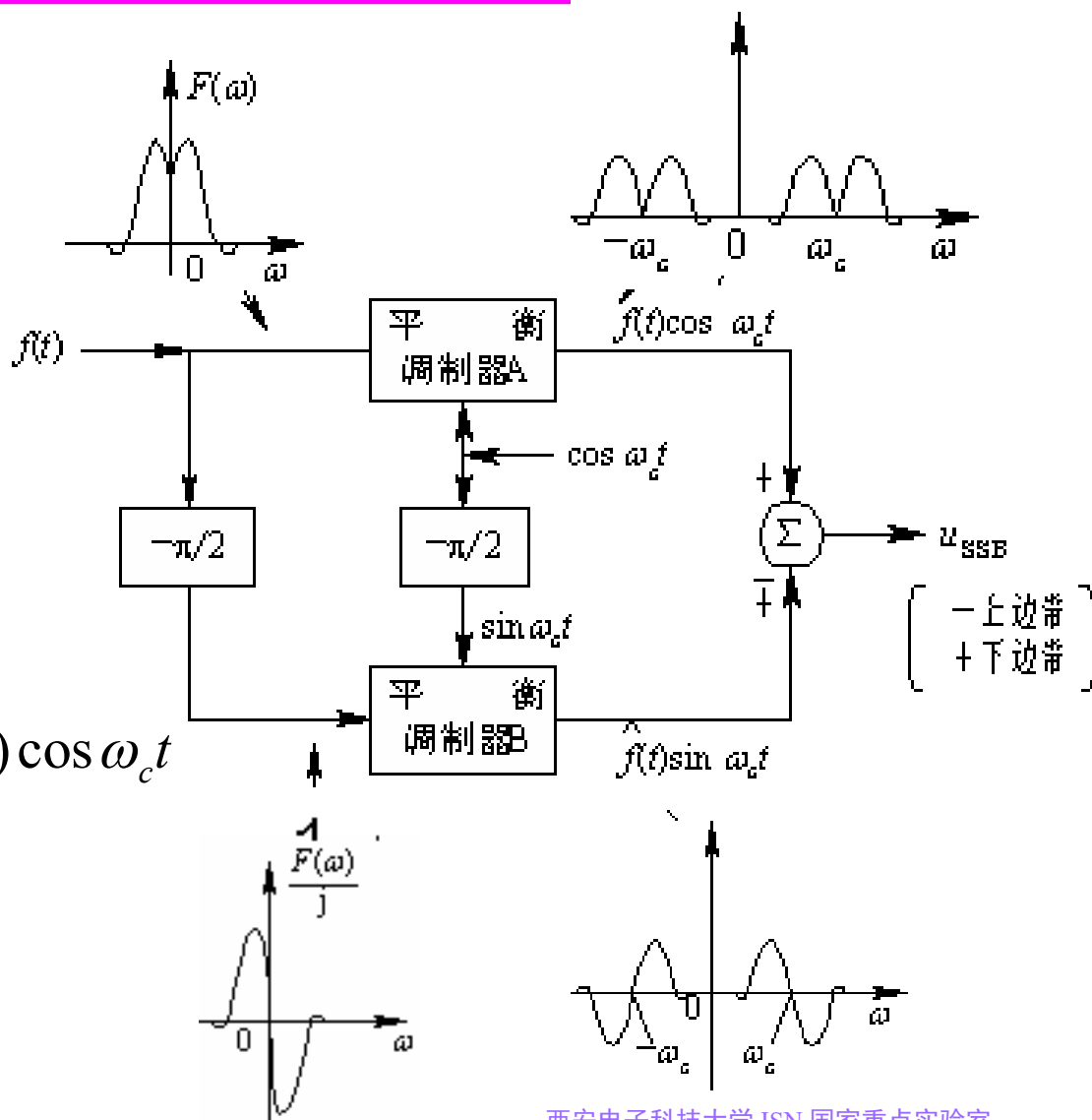
##### 2) 移相法

移相法是利用移相网络,对载波和调制信号进行适当的相移,以便在相加过程中将其中的一个边带抵消而获得SSB信号。

$$u_{SSB}(t) = f(t) \cos \omega_c t \pm \hat{f}(t) \cos \omega_c t$$

$$\hat{F}(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) F(\omega)$$

$$\diamond \frac{\hat{F}(\omega)}{j} = \operatorname{sgn}(\omega) F(\omega)$$





## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ③ SSB 调制电路

##### 2) 移相法

移相法的优点是省去了边带滤波器，但要把无用边带完全抑制掉，必须满足下列两个条件：

(1) 两个调制器输出的振幅应完全相同



(2) 移相网络必须对载频及调制信号均保证精确的  $\pi / 2$  相移。

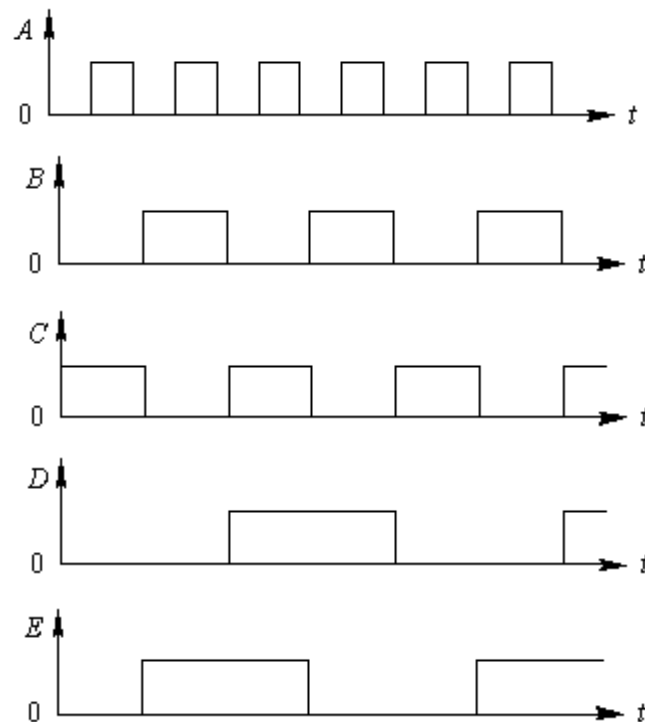
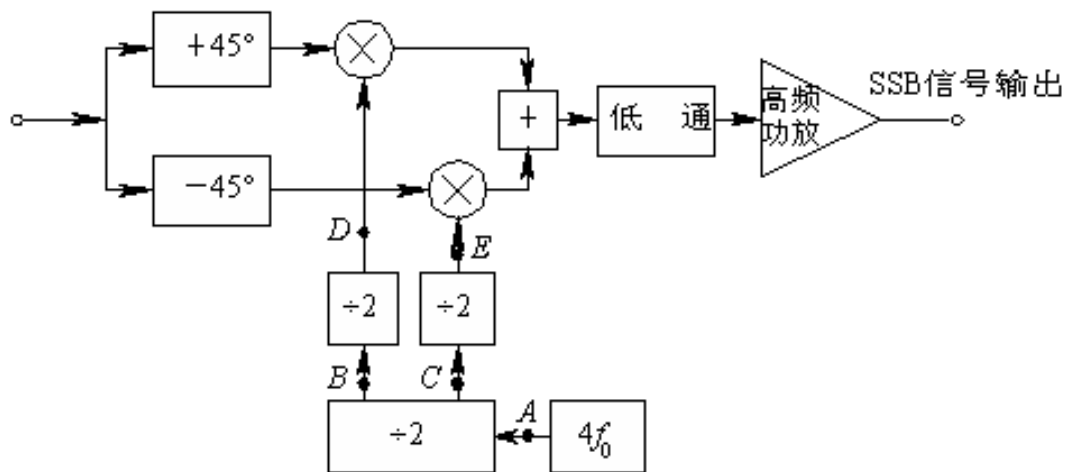


## 6.1 振幅调制

### 二、振幅调制电路

#### ③ SSB 调制电路

##### 2) 移相法



移相法 SSB 调制器的原理框图

两路输入信号经  $45^\circ$  相移后相位相差  $90^\circ$  而载波的  $90^\circ$  相移由分频器来保证。