



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

广东工业大学

通信电路与系统

信息工程学院

李志忠



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

广东工业大学

第六章 振幅调制与解调电路

信息工程学院

李志忠

目录

6.1 概论

6.2 低电平调幅电路

6.3 高电平调幅电路

6.4 单边带信号的产生

6.5 包络检波器

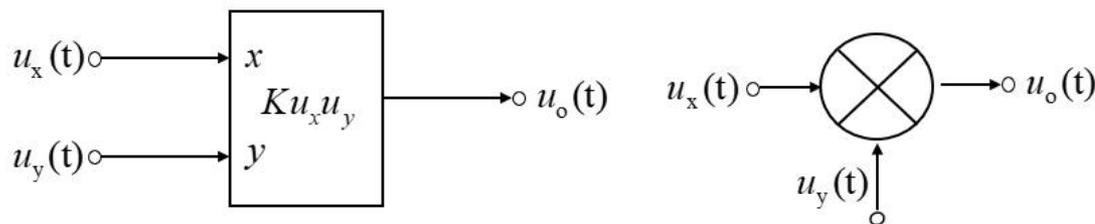
◆ 6.2 低电平调幅电路

一、模拟乘法器调幅电路

1、模拟乘法器

① 模拟乘法器是完成两个模拟信号（电压或电流）相乘作用的电子器件。

② 模拟乘法器符号

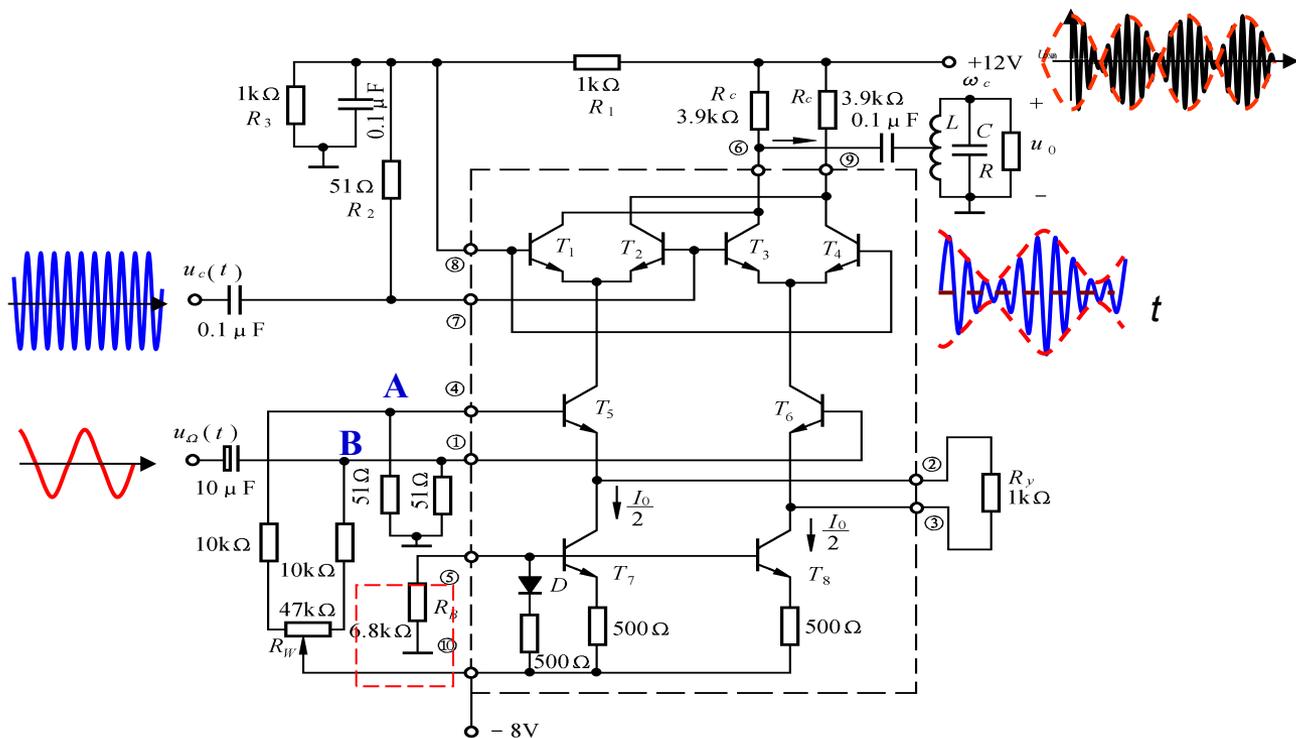


➤ 模拟乘法器是有两个输入端对(即 X 和 Y 输入端对)和一个输出端对的非线性有源器件。

③ 模拟乘法器的传输特性方程 $u_o(t) = Ku_x(t)u_y(t)$ ，式中， K 乘法器的增益系数单位为 $1/V$ 。

◆ 6.2 低电平调幅电路

2、MC1596调幅电路



①、④管脚直流电位差

R_W 是调节MC1596的4和1端的直流电位差为零，确保输出为抑制载波的双边带调幅波。如果4和1端直流电位差不为零，则有载波分量输出，相当于是普通调幅波。

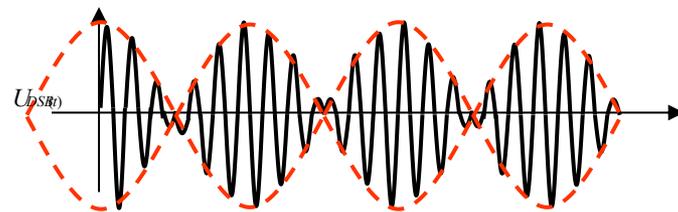
◆ 6.2 低电平调幅电路

一、模拟乘法器调幅电路

2、模拟乘法器的振幅调制原理

由 $u_o(t) = Ku_x(t)u_y(t)$

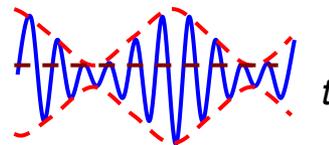
① 当 $\begin{cases} u_x(t) = U_{xm} \cos \omega_c t & \text{——载波} \\ u_y(t) = U_{ym} \cos \Omega t & \text{——调制信号} \end{cases}$



$u_o(t) = KU_{xm} \cos \omega_c t \cdot U_{ym} \cos \Omega t$ ——实现双边带调幅

$$= \frac{KU_{xm}U_{ym}}{2} [\cos(\omega_c + \Omega)t + \cos(\omega_c - \Omega)t]$$

② 当 $\begin{cases} u_x(t) = U_{xm} \cos \omega_c t & \text{——载波} \\ u_y(t) = V_{AB} + U_{ym} \cos \Omega t & \text{——调制信号} \end{cases}$



$u_o(t) = K(V_{AB} + U_{ym} \cos \Omega t) \cdot U_{xm} \cos \omega_c t$

$$= KV_{AB}U_{xm} \left(1 + \frac{U_{ym}}{V_{AB}} \cos \Omega t\right) \cos \omega_c t = K_m (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

$K_m = KV_{AB}U_{xm}$ 载波幅值 $m_a = \frac{U_{ym}}{V_{AB}}$ 调幅指数 实现普通调幅波的调幅，且改变 V_{AB} 可改变 m_a

◆ 6.2 低电平调幅电路

一、模拟乘法器调幅电路

1、常用于频率变换的模拟乘法器的型号

国外同类产品：

MC1496 MC1596 MC1495 MC1496 LM1496 LM1596.....

AD834（宽带）、AD630（多功能）、

AD734（高精度）.....

国内同类产品：CB1595 CB1596 BG314.....

◆ 6.2 低电平调幅电路

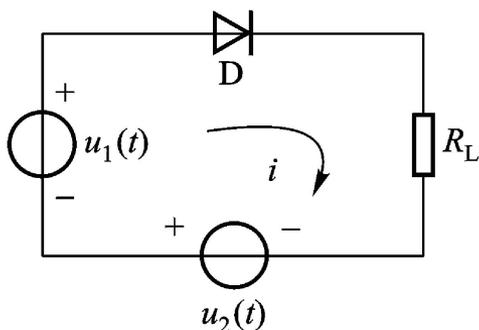
二、单二极管开关状态调幅电路

1. 开关状态

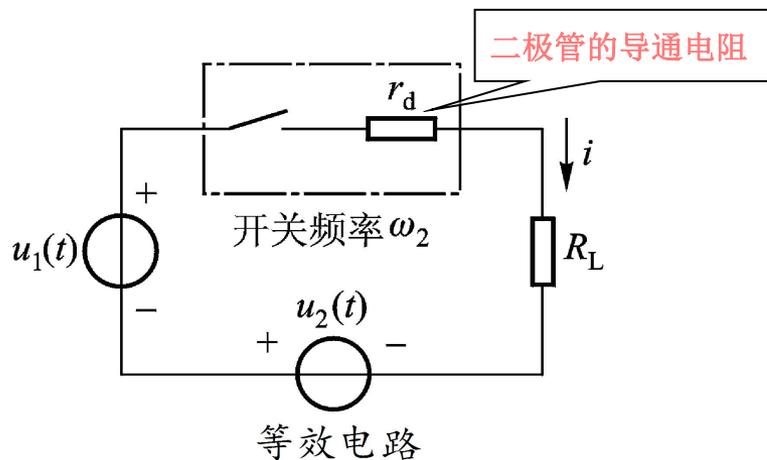
当二极管在两个不同频率电压下进行频率变换时，其中一个电压振幅足够大，另一个电压振幅较小，二极管的导通或截止将完全受大振幅电压的控制，可以近似认为二极管处于理想开关状态。

2. 电路原理

原理图如下所示，设 $u_1(t)$ 为小信号， $u_2(t)$ 为大信号，则二极管D工作在 $u_2(t)$ 控制的开关状态。



单二极管开关调幅电路



◆ 6.2 低电平调幅电路

设 $u_1 = U_{1m} \cos \omega_1 t = U_{\Omega m} \cos \Omega t$,

$u_2 = U_{2m} \cos \omega_2 t = U_{cm} \cos \omega_c t$, 且 $U_{cm} \gg U_{\Omega m}$

D的正极与大信号 $u_2(t)$ 的正端相连,

说明D在 $u_2(t)$ 的正半周导通。

故当 $u_2(t) > 0$ 时, 二极管导通,

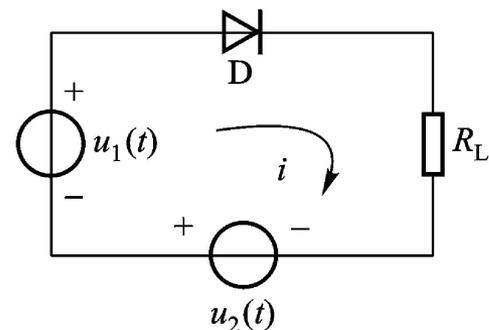
二极管等效为导通电阻 r_d ;

当 $u_2(t) < 0$ 时, 二极管截止。即有:

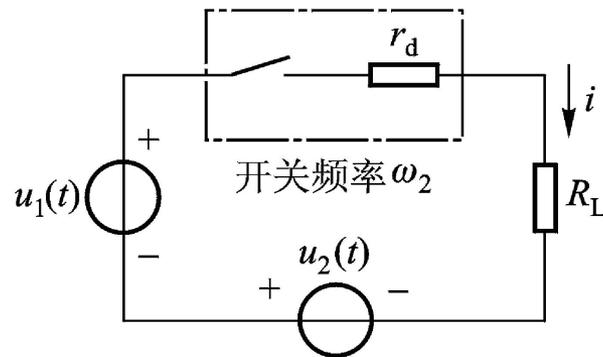
$$i = \begin{cases} \frac{1}{r_d + R_L} [u_1(t) + u_2(t)], & u_2(t) > 0 \\ 0, & u_2(t) < 0 \end{cases}$$

二极管相当于一个开关, 开关函数表达式可表示为:

$$K(\omega_c t) \begin{cases} 1 & u_2(t) > 0 \\ 0 & u_2(t) < 0 \end{cases}$$



单二极管开关调幅电路



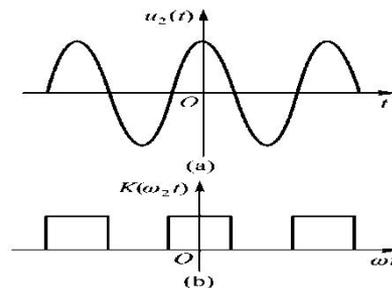
等效电路

◆ 6.2 低电平调幅电路

$$\text{则有 } i = \frac{1}{r_d + R_L} K(\omega_c t) [u_1(t) + u_2(t)]$$

$\because K(\omega_c t)$ 为角频率为 ω_c 的周期性函数, 可用傅立叶级数展开

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



频率包含: 直流分量, ω_c 、 ω_c 的奇次谐波分量。

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{(r_d + R_L)} \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots \right) \times (U_{cm} \cos \omega_c t + U_{\Omega m} \cos \Omega t) \\ &= \frac{1}{2(r_d + R_L)} U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2(r_d + R_L)} U_{\Omega m} \cos \Omega t + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_{cm}}{(r_d + R_L)} \\ &+ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{(r_d + R_L)} U_{cm} \cos 2\omega_c t + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_{cm}}{(r_d + R_L)} \cos(\omega_c + \Omega)t \\ &+ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_{cm}}{(r_d + R_L)} \cos(\omega_c - \Omega)t - \frac{1}{3\pi} \cdot \frac{U_{cm}}{(r_d + R_L)} \cos 4\omega_c t - \frac{1}{3\pi} \cdot \frac{U_{cm}}{(r_d + R_L)} \cos 2\omega_c t + \dots \end{aligned}$$

◆ 6.2 低电平调幅电路

可以看出，电流中包含以下频谱成分：

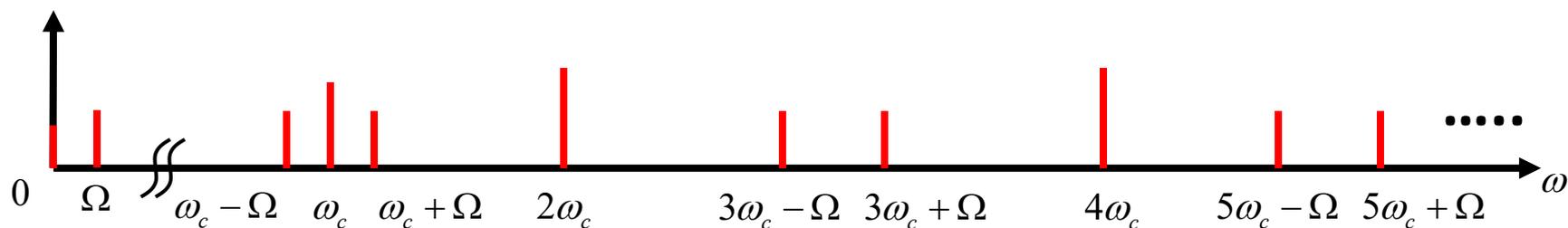
(1) $\Omega, \omega_c \pm \Omega, 3\omega_c \pm \Omega, 5\omega_c \pm \Omega, \dots, (2n-1)\omega_c \pm \Omega,$

(2) 直流分量, $\omega_c, 2\omega_c, 4\omega_c, \dots, 2n\omega_c$

即输出电流中包含：

直流分量, $\Omega, \omega_c, \omega_c \pm \Omega, 2\omega_c, 3\omega_c \pm \Omega, 4\omega_c, 5\omega_c \pm \Omega, \dots$

频谱图为：



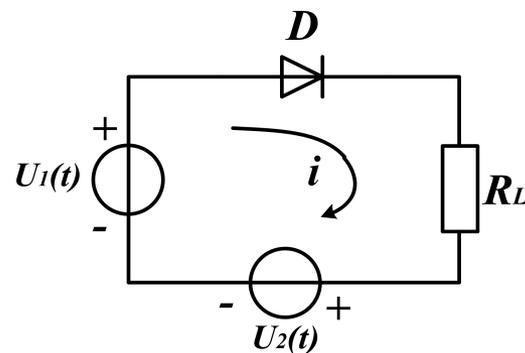
若在输出端加一个中心频率为 ω_c ，通带宽为 2Ω 的带通滤波器，

可取出 ω_c 、 $\omega_c \pm \Omega$ 分量，实现普通调幅波的调制。

结论：单二极管开关状态调幅电路只能实现普通调幅波 (AM)

◆ 6.2 低电平调幅电路

例： 已知载波电压 $u_2(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$ ，调制电压 $u_1(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$ ，且有 $U_{cm} \gg U_{\Omega m}$ ，二极管工作在 $u_2(t)$ 控制的开关工作状态，导通电阻为 r_d 。试分析输出电流的频谱，此电路能否实现普通波调幅。



解： D的正极与大信号 $u_2(t)$ 的负端相连，所以D 在 $u_2(t)$ 的负半周导通，开关函数为 $K(\omega_c t - \pi)$

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

$$i = \frac{1}{r_d + R_L} K(\omega_c t - \pi) [u_1(t) - u_2(t)]$$

◆ 6.2 低电平调幅电路

$$i = \frac{1}{r_d + R_L} K(\omega_c t - \pi) [u_1(t) - u_2(t)]$$
$$= \frac{1}{r_d + R_L} \left[\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t - \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_c t + \dots \right] \times$$
$$[U_{\Omega m} \cos \Omega t - U_{cm} \cos \omega_c t]$$

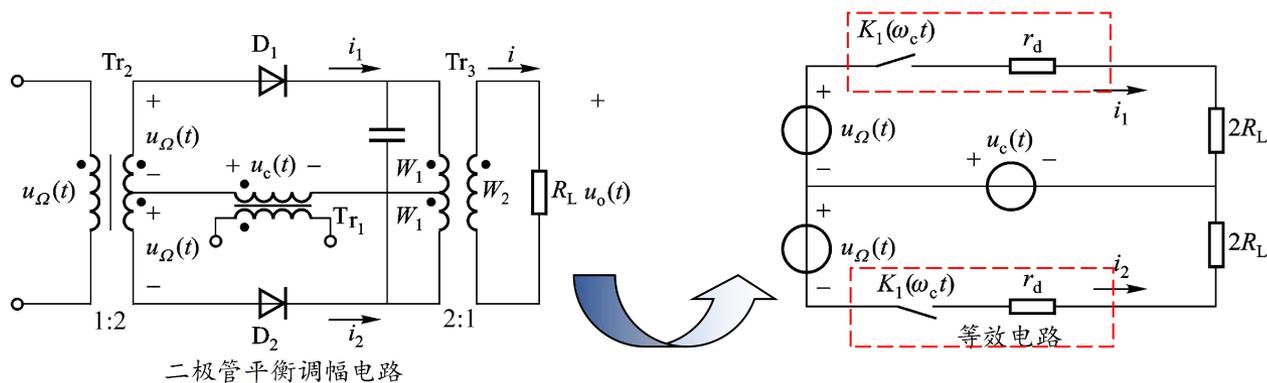
可见输出电流的频谱中包含：

直流分量, Ω , ω_c , $\omega_c \pm \Omega$, $2\omega_c$, $3\omega_c \pm \Omega$, $4\omega_c$, $5\omega_c \pm \Omega$, ...

若在输出端加一个中心频率为 ω_c ，通带宽为 2Ω 的带通滤波器，可取出 $\omega_c \pm \Omega$ 分量，可实现普通调幅波的调制。

◆ 6.2 低电平调幅电路

三、二极管平衡调幅电路



1. 电路特点

图中变压器为理想变压器: Tr_1 为 $N_1/N_2=1:1$; Tr_2 为 $N_1/N_2=1:2$;
 Tr_3 为 $N_1/N_2=2:1$ 。

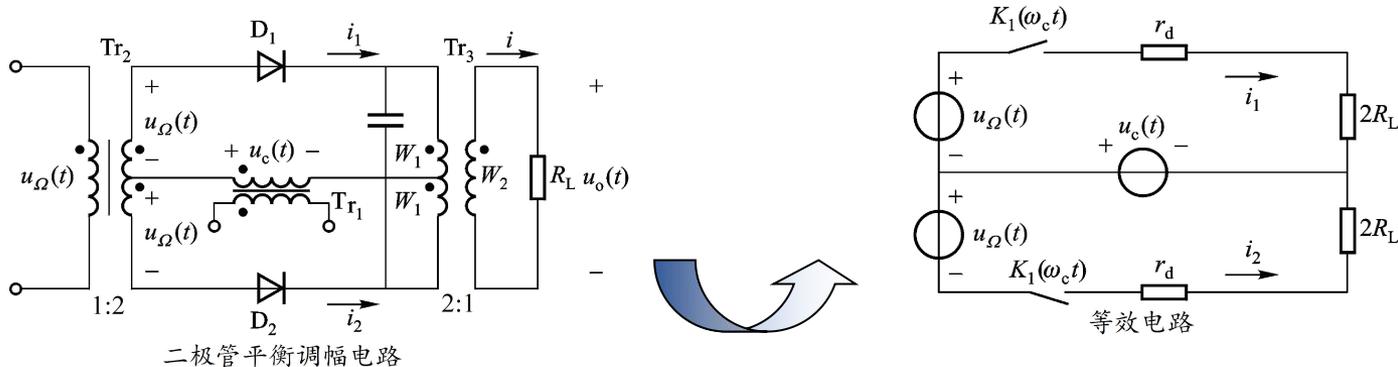
载波信号 $u_c(t)=U_{cm}\cos\omega_c t$ 是大信号,

调制信号 $u_\Omega(t)=U_{\Omega m}\cos\omega_\Omega t$ 是小信号,

二极管 D_1 、 D_2 均工作于受 $u_c(t)$ 控制的开关状态。

◆ 6.2 低电平调幅电路

2、在无带通滤波器的条件下，流过二极管D1、D2的电流



此电路由上下两组单二极管调幅电路组成。其中LC并联谐振回路起带通滤波器的作用，中心频率为 ω_c ，带宽为 2Ω 。

D_1 和 D_2 的正极均与大信号的 $u_c(t)$ 正端相连，都是正半周导通，开关函数均为 $K(\omega_c t)$

B_3 的一、二次绕组匝数比为2:1，进行阻抗等效变换有：

$$p = \frac{1}{n} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{2}, R_L' = \frac{R_L}{p^2} = 4R_L$$

由原边中心抽头，故等效电路下图所示。

◆ 6.2 低电平调幅电路

则流过二极管 D_1 的电流为

$$i_1 = \frac{1}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t) [u_c(t) + u_\Omega(t)]$$

流过二极管 D_2 的电流为

$$i_2 = \frac{1}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t) [u_c(t) - u_\Omega(t)]$$

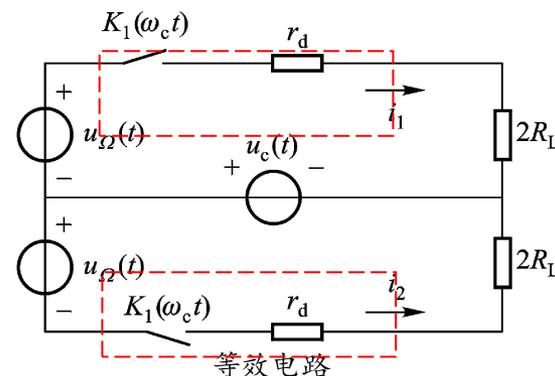
流过负载 R_L 的电流为

$$i = i_1 - i_2 = \frac{2}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t) u_\Omega(t)$$

$$= \frac{2}{r_d + 2R_L} U_{\Omega m} \cos \Omega t \times \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots \right]$$

$$= \frac{U_{\Omega m}}{r_d + 2R_L} \left[\cos \Omega t + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_c - \Omega)t - \frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_c + \Omega)t \right]$$

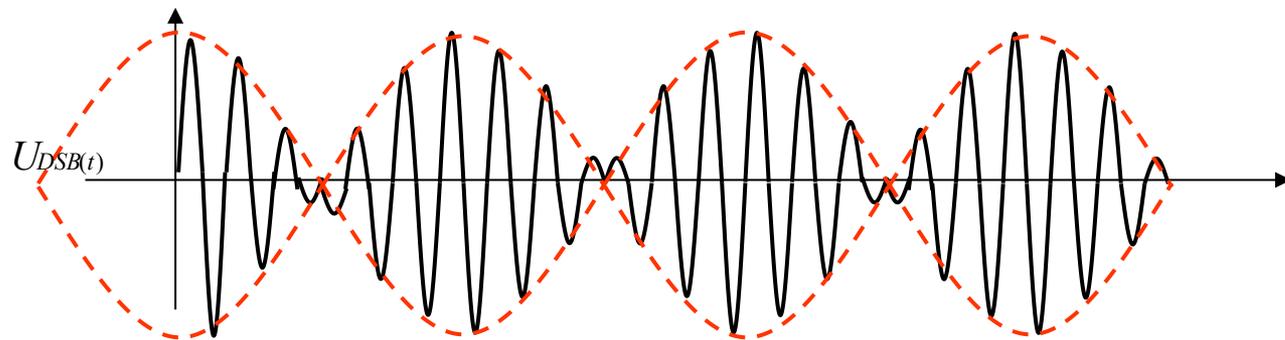
$$\left[-\frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_c - \Omega)t \dots \right]$$



◆ 6.2 低电平调幅电路

3. 通过带通滤波器取出双边带调幅波

由于 i 中包含 $\Omega, \omega_c \pm \Omega, 3\omega_c \pm \Omega, 5\omega_c \pm \Omega, \dots, (2n-1)\omega_c \pm \Omega$, 等频率成分, 经中心频率为 ω_c , 带宽略大于 2Ω 的带通滤波器取出 $\omega_c \pm \Omega$ 的频率成分 电流在负载 R_L 上建立双边带调幅电压输出。



结论: 双二极管开关状态调幅电路能实现平衡调幅 (DSB)

◆ 6.2 低电平调幅电路

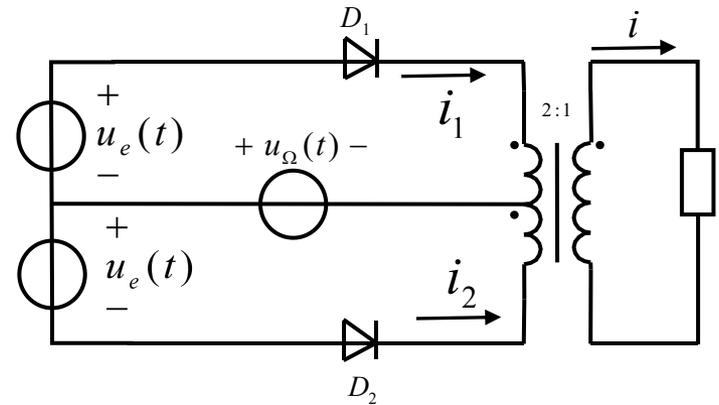
例2:

已知载波电压 $u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$,

调制电压 $u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$,

且有 $U_{cm} \gg U_{\Omega m}$, 二极管工作在 $u_c(t)$ 控制的开关工作状态。

试分析输出电流的频谱, 并说明此电路能否实现双边带调幅。



分析: 本题目是要区分开关函数是 $K(\omega_c t)$ 还是 $K(\omega_c t - \pi)$, 同时要掌握在选定电流方向的参考方向后, 输出电流 i 与 i_1 和 i_2 的关系。

解: 开关函数的确定方法是根据大信号 $u_c(t)$ 的**正**端与二极管 D_1 的正极相连, 说明 D_1 **正**半周导通, 开关函数为 $K(\omega_c t)$ 。相反, $u_c(t)$ 的**负**端与二极管 D_2 的正极相连, 说明 D_2 **负**半周导通, 开关函数为 $K(\omega_c t - \pi)$ 。

◆ 6.2 低电平调幅电路

则流过二极管 D_1 的电流为

$$i_1 = \frac{1}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t) [u_c(t) + u_\Omega(t)]$$

流过二极管 D_2 的电流为

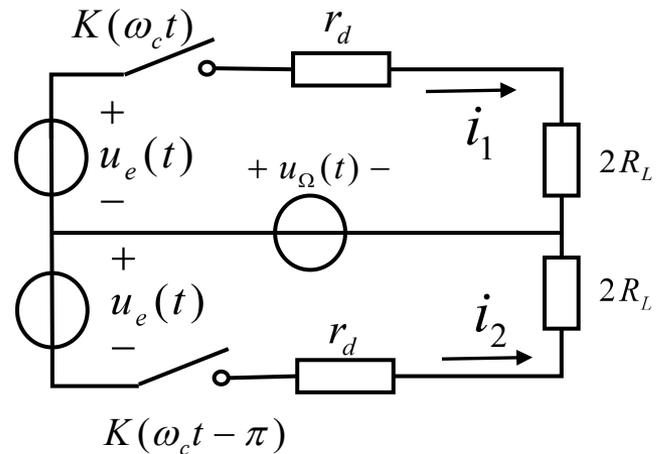
$$i_2 = \frac{1}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t - \pi) [-u_c(t) + u_\Omega(t)]$$

流过负载 R_L 的电流为

$$\begin{aligned} i &= i_1 - i_2 \\ &= \frac{u_c(t)}{r_d + 2R_L} [K(\omega_c t) + K(\omega_c t - \pi)] + \frac{u_\Omega(t)}{r_d + 2R_L} [K(\omega_c t) - K(\omega_c t - \pi)] \end{aligned}$$

$$\text{其中: } K(\omega_c t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_c t - \dots$$

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



◆ 6.2 低电平调幅电路

$$K(\omega_c t) + K(\omega_c t - \pi) = 1$$

$$K(\omega_c t) - K(\omega_c t - \pi) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots$$

将上两式代入电流 i

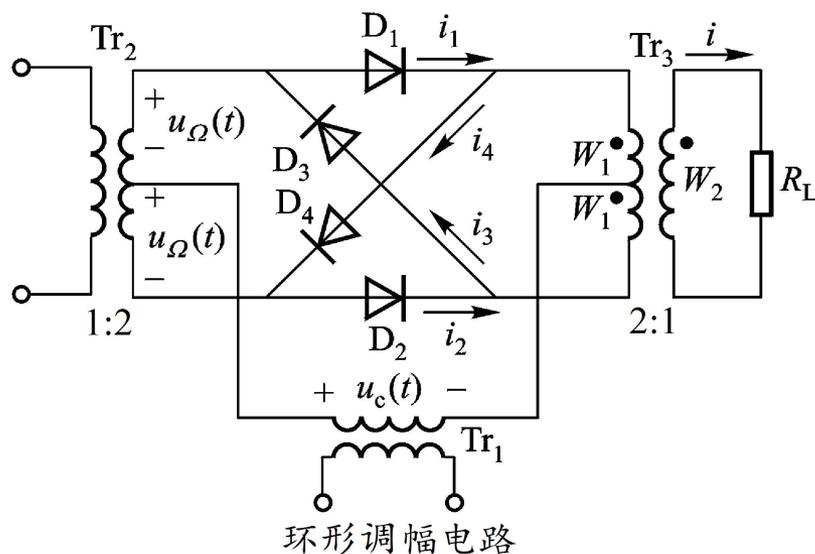
$$\begin{aligned} i &= \frac{u_c(t)}{r_d + 2R_L} + \frac{u_\Omega(t)}{r_d + 2R_L} \left[\frac{4}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots \right] \\ &= \frac{U_{cm}}{r_d + 2R_L} \cos \omega_c t + \frac{U_{\Omega m} \cos \Omega t}{r_d + 2R_L} \left[\frac{4}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots \right] \end{aligned}$$

输出电流中含有： $\omega_c, \omega_c \pm \Omega, 3\omega_c \pm \Omega, 5\omega_c \pm \Omega, \dots, (2n-1)\omega_c \pm \Omega,$

若在输出端加一个中心频率为 ω_c ，通带宽为 2Ω 的带通滤波器可实现普通波调幅。但不能实现双边带调幅。

◆ 6.2 低电平调幅电路

四、二极管环形调幅电路

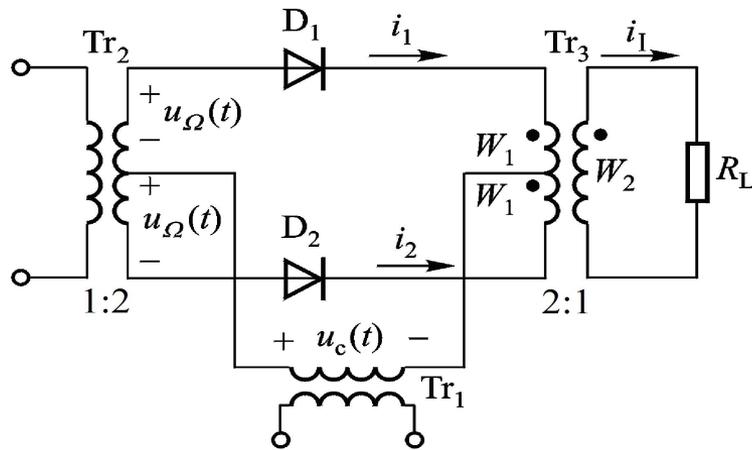


当 $u_c(t) > 0$ 时, D_1D_2 导通, 开关函数为 $K(\omega_c t) = \begin{cases} 1 & u_c(t) > 0 \\ 0 & u_c(t) < 0 \end{cases}$

当 $u_c(t) < 0$ 时, D_3D_4 导通, 开关函数为 $K(\omega_c t - \pi) = \begin{cases} 1 & u_c(t) < 0 \\ 0 & u_c(t) > 0 \end{cases}$

◆ 6.2 低电平调幅电路

1、在 $u_c(t)$ 的正半周， D_1 和 D_2 导通， D_3 和 D_4 截止。



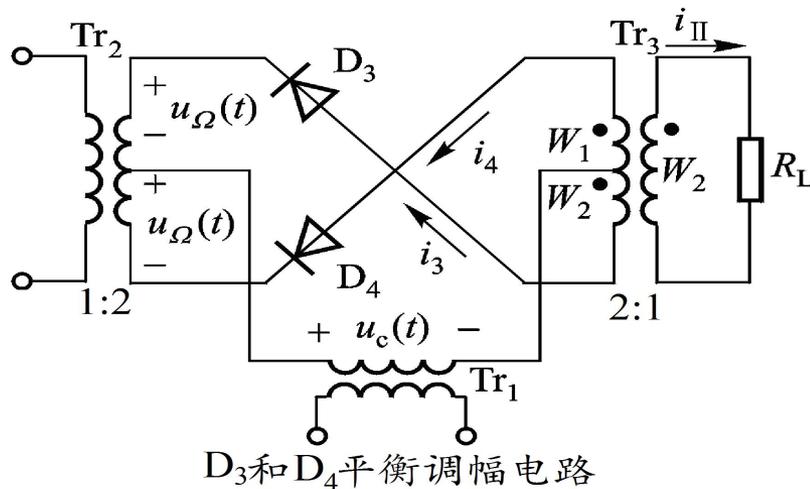
D₁和D₂平衡调幅电路

$$D_1 \text{ 和 } D_2 \text{ 的开关函数为 } K(\omega_c t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots$$

$$\text{在无带通滤波器的条件下, 流过负载的总电流: } i_I = i_1 - i_2 = \frac{2u_\Omega(t)}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t)$$

◆ 6.2 低电平调幅电路

2、在 $u_c(t)$ 的负半周， D_1 和 D_2 截止， D_3 和 D_4 导通。



而 D_3 和 D_4 的开关函数为：
$$K(\omega_c t - \pi) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \omega_c t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_c t - \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_c t + \dots$$

在无带通滤波器的条件下，流过负载的总电流：
$$i_{\text{II}} = i_4 - i_3 = \frac{2u_{\Omega}(t)}{r_d + 2R_L} K(\omega_c t - \pi)$$

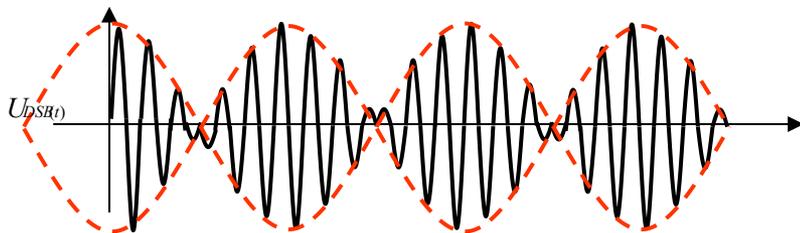
◆ 6.2 低电平调幅电路

3. 负载 R_L 中的电流

$$i = i_I - i_{II} = \frac{2u_{\Omega}(t)}{r_d + 2R_L} [K(\omega_c t) - K(\omega_c t - \pi)]$$
$$= \frac{2U_{\Omega m} \cos \Omega t}{2R_L + r_d} \left(\frac{4}{\pi} \cos \omega_c t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_c t + \dots \right)$$

4. 通过带通滤波器取出双边带调幅波

流过负载 R_L 的总电流 i 中含有 $\omega_c \pm \Omega$ 、 $3\omega_c \pm \Omega$ 、... 等频率分量。经过中心频率为 ω_c ，通带略大于 2Ω 的带通滤波器，则在 R_L 上只取 $\omega_c \pm \Omega$ 的双边带调幅电压。

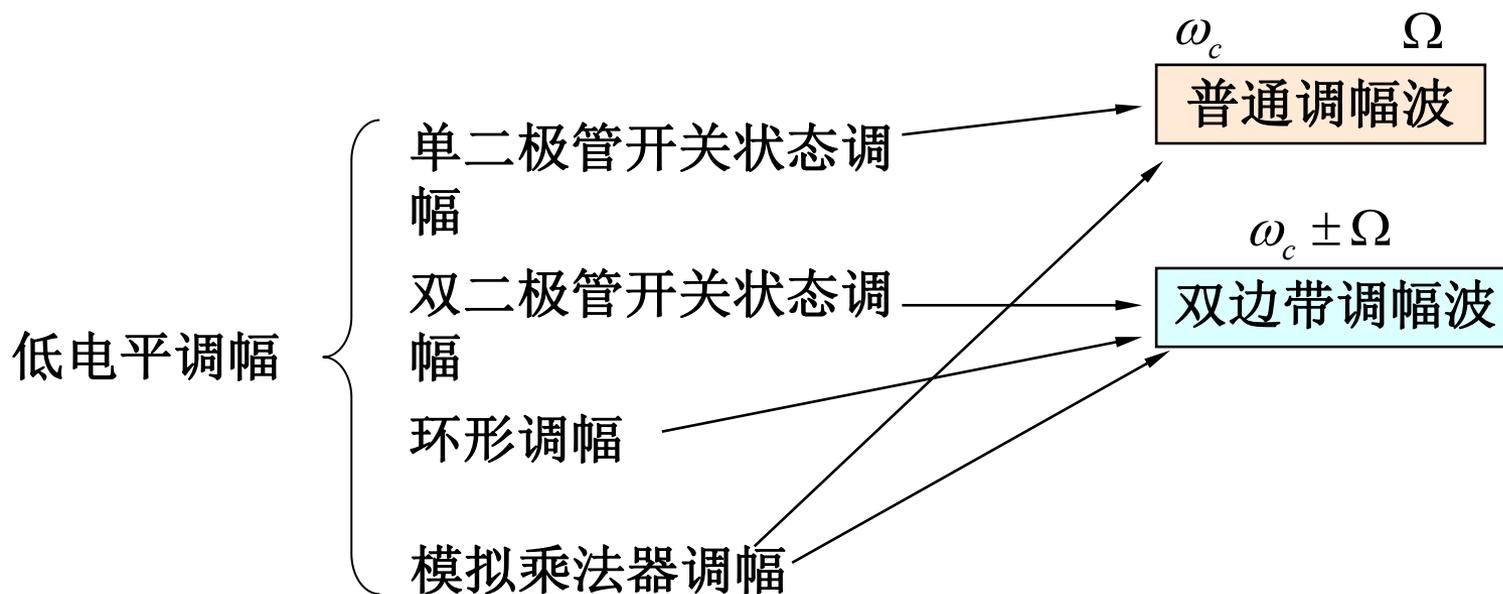


结论：① 二极管环形调幅电路能实现平衡调幅 (DSB)

② 与双二极管调幅电路相比输出信号的频谱少了 Ω 的成份，且幅度为其二倍。环形调幅器抵消了 Ω 分量。即干扰频率减小。

◆ 6.2 低电平调幅电路

低电平调幅电路总结



谢谢!