第五章　乘法器

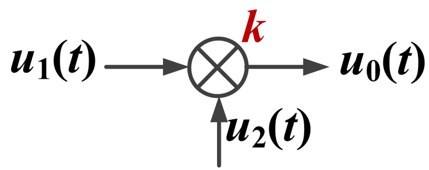
电子工程与信息科学系

内 容

为什么要讲乘法器?

线性频率变换电路都可以用乘法器实现

$$u_o = k u_1(t) u_2(t)$$



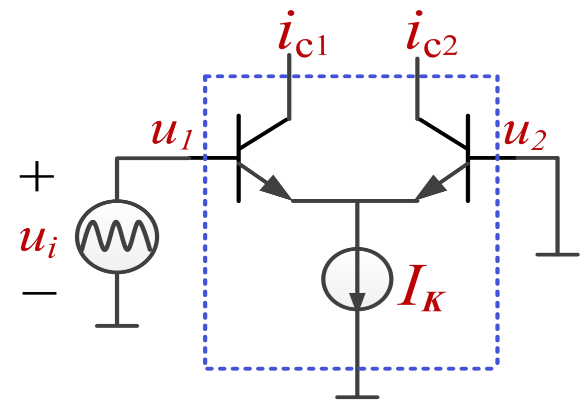
基本要求

1、线性：k 为常数，与时间 t 无关，与 u_1、u_2、u_0无关；稳定性高

2、动态范围：①幅度；②极性，两输入信号所允许的正、负极性

3、频带宽度：①工作频率；②所加滤波器的带宽

双管对称
指数律
恒流源偏置



差分放大器

可解出

$$i_{E1} = \frac{I_K}{1+e^{-Z}} = \frac{I_K}{2}\left(1+\tanh\frac{z}{2}\right) \quad , \quad i_{E2} = \frac{I_K}{1+e^{Z}} = \frac{I_K}{2}\left(1-\tanh\frac{z}{2}\right)$$

其中
$$z = \frac{u_i}{U_r} = \frac{u_1 - u_2}{U_r} = \frac{U_1\cos\omega t}{U_r} = x\cos\omega t$$

可推出
$$i_{C1} - i_{C2} = \alpha I_K \tanh\left(\frac{u_1}{2U_r}\right)$$

中国科学技术大学

乘法器可以由**多差分对**放大器组成

$$u_o = u_o^+ - u_o^-$$

$$= [V_{cc} - R_c(i_{c2} + i_{c4})] - [V_{cc} - R_c(i_{c1} + i_{c3})]$$

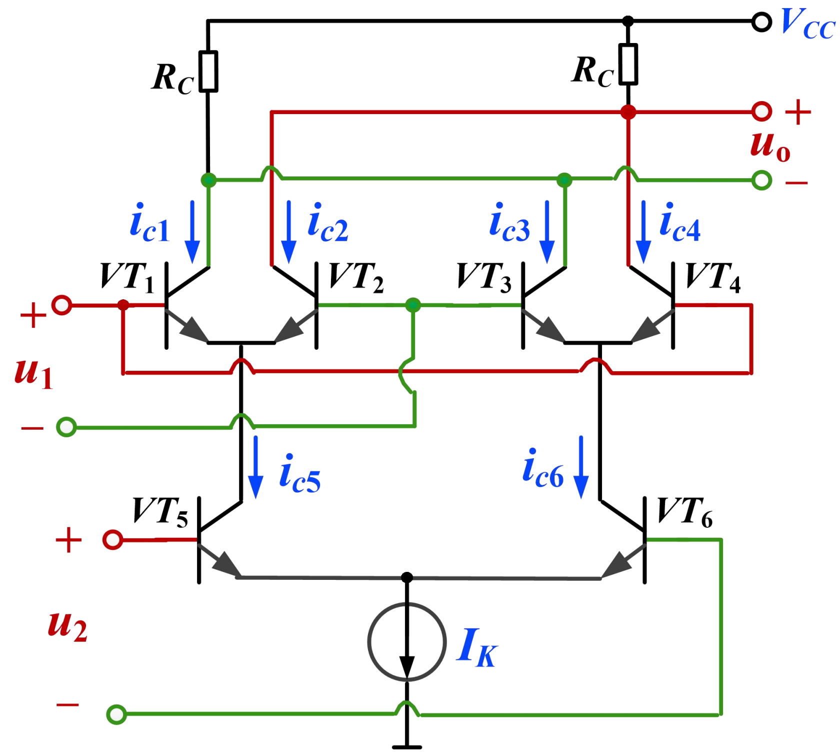
$$= R_c[(i_{c1} - i_{c2}) - (i_{c4} - i_{c3})]$$

$$= R_c\left[\alpha i_{c5}\, tanh\frac{U_1}{2U_r} - \alpha i_{c6}\, tanh\frac{U_1}{2U_r}\right]$$

$$= \alpha R_c\, tanh\frac{U_1}{2U_r}(i_{c5} - i_{c6})$$

$$= \alpha^2 R_c I_k\, tanh\frac{U_1}{2U_r} tanh\frac{U_2}{2U_r}$$

小信号近似 $\approx \alpha^2 R_c I_k \frac{U_1 U_2}{4U_r U_r}$



如何扩展为三个电压的乘法器？

再次利用复合电路

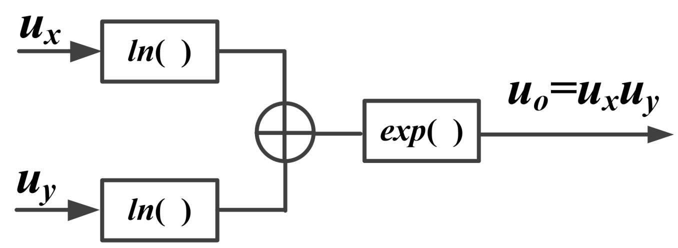
如何实现四个电压的乘法器？

5.3 指数式、对数式乘法器

5.3.1 对数放大器

5.3.2 指数放大器

5.3.3 指数对数乘法器



$$u_x \cdot u_y = \exp\left(\ln u_x + \ln u_y\right)$$

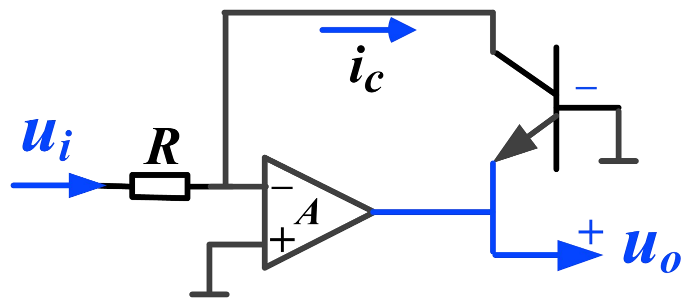
1、原型电路

利用晶体管 *i-v* 指数关系的逆变换，*v-i* 对数关系

晶体管 $i_C = \alpha I_{ES} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_r}\right)$

运放 $i_C = \frac{U_i}{R}$

输出 $u_o = -u_{BE} = -U_r \ln \frac{U_i}{\alpha I_{ES} R}$



输入内阻很大，电流很小

存在问题：

1、温度稳定性差，用配对做温补改进；

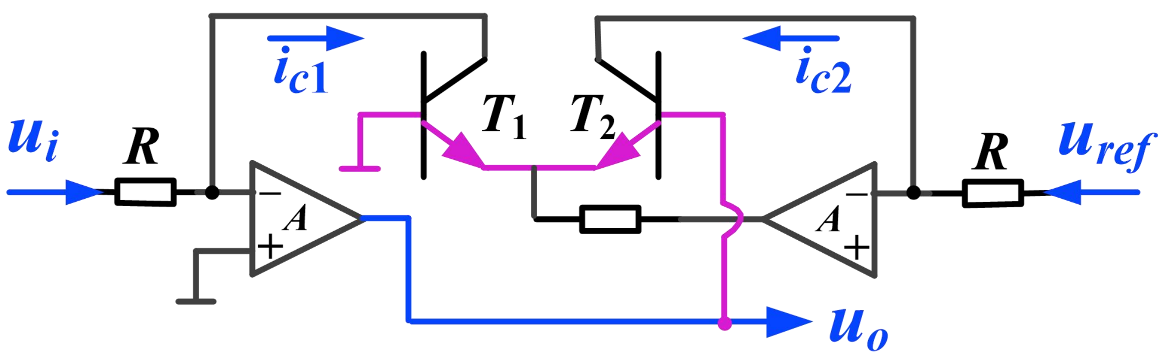
2、动态范围窄

2、温补改进电路（对称结构）

对消温度敏感的参数

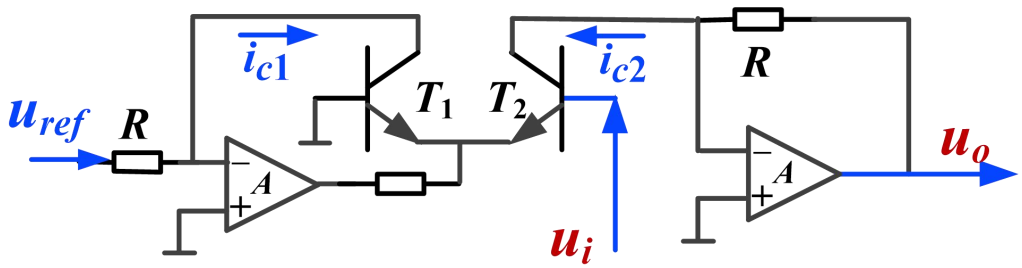
两个放大器完全对称

$$u_o = u_{BE2} - u_{BE1} = U_r \ln \frac{U_{ref}}{\alpha I_{ES} R} - U_r \ln \frac{U_i}{\alpha I_{ES} R} = U_r \ln \frac{U_{ref}}{U_i} = -U_r \ln \frac{U_i}{U_{ref}}$$



原理上将对数放大器的 u_i、u_o互换就是指数放大器了

电路上与前面相比有些变化



$$i_C = \alpha I_{ES} \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_r}\right)$$

$$\begin{cases} \dfrac{i_{C2}}{i_{C1}} = \exp\left(\dfrac{U_{BE2} - U_{BE1}}{U_r}\right) = \exp\dfrac{U_i}{U_r} \\ \dfrac{i_{C2}}{i_{C1}} = \dfrac{U_o / R}{U_{ref} / R} \end{cases}$$

$$\therefore\ U_o = U_{ref} \exp\frac{U_i}{U_r}$$

P98，图5.3.4，先对数、后指数

对数 $$u_{o1}=U_r\ln\frac{U_1}{U_{ref1}}$$

在后一个指数电路里，将U_{ref2}用u_2代替：

$$U_o=\frac{U_2}{10}\exp\frac{U_{o1}}{U_r}=\frac{U_2U_1}{10U_{ref}}$$

其中的10是由$\dfrac{100k\Omega}{10k\Omega}=10$得到的

$$\frac{i_{C4}}{i_{C3}}=\frac{U_o}{10k}\cdot\frac{100k}{U_2}=\frac{10U_o}{U_2}$$

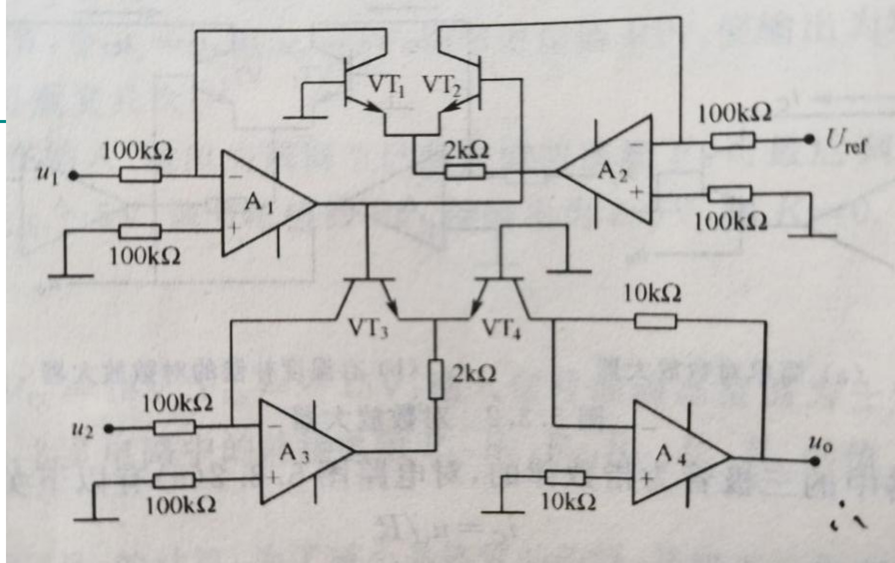


图 5.3.4 指数对数式模拟乘法器

5.3.4 准模拟乘法器

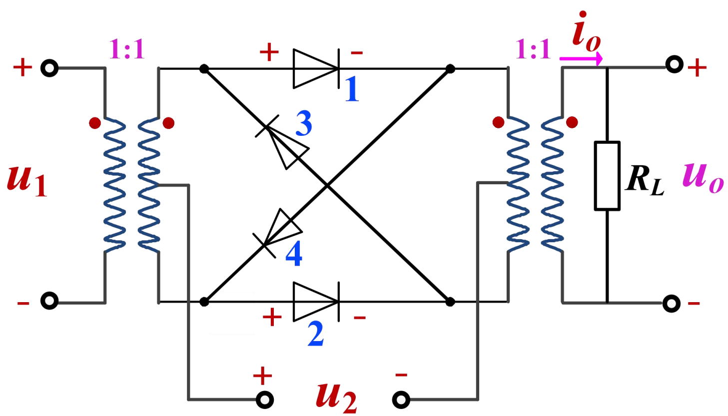
定义：$u_o = kU_2\cos\omega_2 t\cdot u_1(t)$ $U_2 \gg U_1$

当u_o与幅度U_2无关，而只与ω_2有关时，则为准模拟乘法器

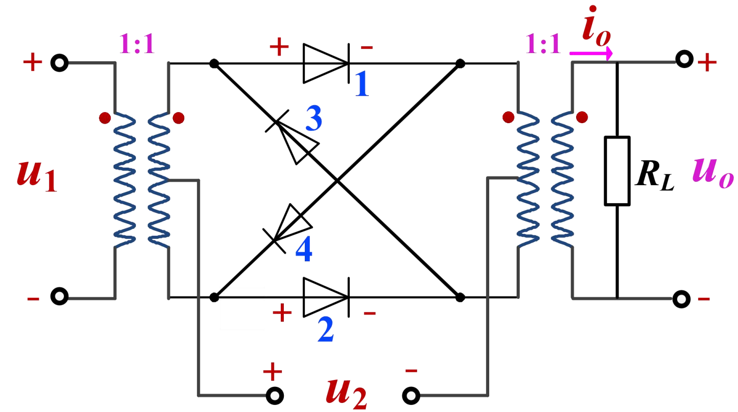
假设U_2足够大，用 $U_2\cos\omega_2 t$ 的正、负半周控制4个二极管通断

1） U_2正半周：D_1、D_2导通（另两个截止）

2） U_2负半周：D_3、D_4导通（另两个截止）



5.3.4 准模拟乘法器



注意，U_2正半周时，施加到D_1、D_2的极性相同而U_2负半周时，施加到D_3、D_4的极性相同，分别取差值，可以消去，故下列式子未显示。

1） U_2正半周：D_1、D_2导通（另两个截止）

二极管上电压
$$\begin{cases} U_{D1} = u_1 - u_o \\ U_{D2} = -(u_1 - u_o) \end{cases}$$

二极管上电流
$$\begin{cases} i_1 = i_{D1} = g(u_1 - u_o) \\ i_2 = i_{D2} = -g(u_1 - u_o) \end{cases}$$

则输出为
$$u_{o正} = i_o R_L = R_L(i_1 - i_2) = 2gR_L(u_1 - u_o)\cdot K^+(\omega_2 t)$$

2） U_2负半周：D_3、D_4导通（另两个截止）

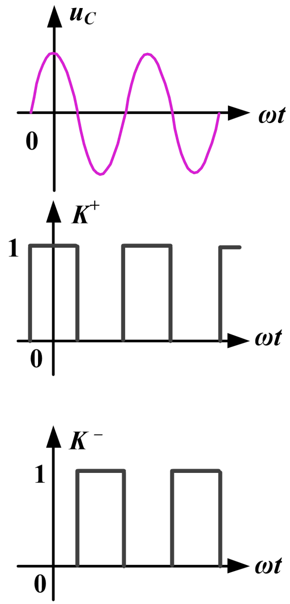
$$\begin{cases} i_3 = i_{D3} = g(-u_1 - u_o) \\ i_4 = i_{D4} = g(u_1 + u_o) \end{cases}$$

则输出为
$$u_{o负} = R_L(i_3 - i_4) = -2gR_L(u_1 + u_o)\cdot K^-(\omega_2 t)$$

5.3.4 准模拟乘法器

开关函数说明

K^+、K^- 为开关函数，如右图所示



$$\begin{cases} K^+(\omega_2 t) = \dfrac{1}{2} + \dfrac{2}{\pi}\cos\omega_2 t - \dfrac{2}{3\pi}\cos 3\omega_2 t + \cdots + (-1)^{n-1}\dfrac{2}{(2n-1)\pi}\cos(2n-1)\omega_2 t \\ K^-(\omega_2 t) = \dfrac{1}{2} - \dfrac{2}{\pi}\cos\omega_2 t + \dfrac{2}{3\pi}\cos 3\omega_2 t - \cdots + (-1)^{n}\dfrac{2}{(2n-1)\pi}\cos(2n-1)\omega_2 t \end{cases}$$

$$\begin{cases} K^+ + K^- = 1 \\ K^+\text{、}K^- \text{ 皆是直流+奇数次谐波} \end{cases}$$

$$K^+(\omega_2 t) - K^-(\omega_2 t) = \frac{4}{\pi}\cos\omega_2 t - \frac{4}{3\pi}\cos 3\omega_2 t + \cdots$$ **奇数次谐波加强，直流对消**

用低通，仅留ω_2分量，滤除高次谐波

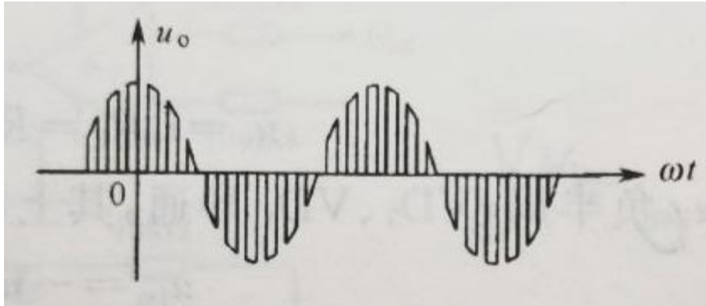
5.3.4 准模拟乘法器

$$\therefore\ u_o = u_{o正} + u_{o负} = 2gR_L\left(u_1 - u_o\right)\cdot K^+\left(\omega_2 t\right) - 2gR_L\left(u_1 + u_o\right)\cdot K^-\left(\omega_2 t\right)$$

$$= 2gR_L u_1\cdot\left(K^+ - K^-\right) - 2gR_L u_2\cdot\left(K^+ + K^-\right)$$

则 $u_o = \dfrac{2gR_L u_1}{1+2gR_L}\cdot\dfrac{4}{\pi}\cos\omega_2 t = \dfrac{8gR_L}{\pi\left(1+2gR_L\right)}u_1\cos\omega_2 t$

与U_2无关，U_2只起开关作用，幅度必须足够大



本章结束