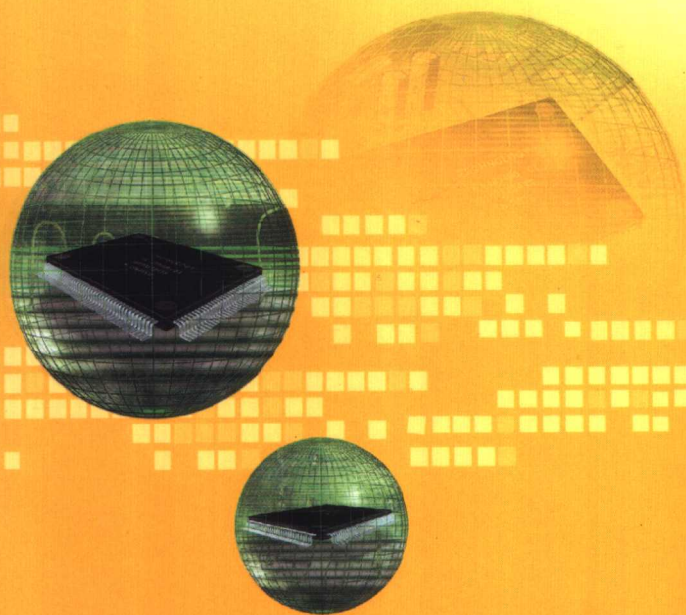


FEIXIANXING JICHENGDIANLU YUANLI JI YINGYONG

李洪义 主编

非线性集成电路 原理及应用



 第四军医大学出版社

非线性集成电路原理及应用

主 编 李洪义
编 者 李洪义 王健琪 王海滨 朱新亚
王 华 张 杨 曾越胜 李海涛

第四军医大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

非线性集成电路原理及应用/李洪义主编. —西安:第四军医大学出版社, 2003. 5

ISBN 7-81086-051-8

I. 非… II. 李… III. 非线性集成电路 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 039734 号

第四军医大学出版社出版发行

(西安市长乐西路 17 号 邮政编码:710032)

电话:029-3376765(发行部) 029-3376763(总编室)

传真:029-3376764 E-mail: fmmup03@fmmu.edu.cn

西安交通大学印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:6 字数:160千字

2003年5月第1版 2003年5月第1次印刷

印数:1~1000册 定价:12.00元

ISBN 7-81086-051-8/TN·1

内 容 提 要

本书主要包括模拟乘法器、电压比较器、数-模与模-数转换、集成相位锁定电路、模拟开关与多路选择开关、调制解调器和集成 DC-DC 变换器等。书中对上述各类集成电路原理和应用进行了系统的论述,并结合具体集成电路芯片列举了大量典型应用电路。本书可作为大专院校电子、通信和自动控制等专业教材或教学参考书,也可供相关专业人员阅读参考。

前 言

非线性集成电路是 20 世纪 60 年代发展起来的一类新型集成电路，随着微电子技术的发展，其新产品和新品种与日俱增，应用范围迅速扩大，在电子技术的各个领域得到广泛应用。集成电路的使用，不仅使电路设计得以简化，而且使系统及设备的性能指标发生飞跃。因此，掌握有关集成电路常用芯片的主要性能以及外围应用电路的正确设计对于从事电子技术工作的人员是十分必要的。

本书共分为 7 章。第一章介绍了模拟乘法器基本原理；第二章介绍了电压比较器工作原理及典型产品与应用；第三章详细介绍了数-模、模-数转换原理，对典型芯片进行了剖析；第四章介绍了锁相环工作原理；第五章介绍了模拟开关和多路选择开关；第六章介绍了数字信号载波传输原理以及单片调制解调器工作原理；第七章介绍了 DC-DC 变换器典型产品及应用。其中，每一章节都结合具体集成电路芯片列举了大量典型应用电路。

本书由第四军医大学、空军工程大学、空军指挥学院的有关教师联合编写。限于编者水平，书中错漏或不妥之处难免，敬请读者批评和指正。

编 者

2003 年 5 月

目 录

第一章 模拟乘法器	(1)
第一节 模拟乘法器的特性及工作原理	(1)
第二节 模拟乘法器的工作原理及其运算误差和性能指标	(5)
第三节 模拟乘法器的应用	(12)
第二章 电压比较器	(23)
第一节 常用的电压比较器	(23)
第二节 集成电压比较器	(29)
第三节 电压比较器的应用	(33)
第三章 集成数-模与模-数转换器	(37)
第一节 数-模转换器原理及其特性	(37)
第二节 12/14 位串行输入、电压输出 DAC—AD5530/AD5531	(41)
第三节 双电流输出、串行输入 16 位/14 位 DAC—AD5545 /AD5555	(52)
第四节 模-数转换器原理及其特性	(61)
第五节 12 位高速低能耗 ADC—AD7888	(64)
第六节 高速四通道同时采样 14 位 ADC—AD7865	(85)
第四章 相位锁定电路	(110)
第一节 锁相环组成部件	(111)

第二节	锁相环工作原理·····	(114)
第三节	锁相环典型产品介绍·····	(116)
第四节	锁相环应用电路·····	(120)
第五章	模拟开关与多路选择开关·····	(126)
第一节	模拟开关典型产品·····	(126)
第二节	多路选择开关典型产品·····	(129)
第三节	模拟开关与多路选择开关应用电路·····	(132)
第六章	单片调制解调器原理及应用·····	(136)
第一节	数字信号载波传输原理·····	(136)
第二节	单片调制解调器 MC145444 ·····	(143)
第三节	V.21/V.23 遥测调制解调器 MC145745 ·····	(154)
第七章	DC - DC 变换器 ·····	(168)
第一节	ICL7660 通用型 DC - DC 变换器 ·····	(168)
第二节	XC6375 系列 DC - DC 变换器 ·····	(176)
第三节	XC6385 系列 DC - DC 变换器 ·····	(179)
参考文献 ·····		(183)

第一章 模拟乘法器

模拟乘法器是能够实现两个模拟信号相乘的非线性器件。它不仅可以很方便地实现乘、除、乘方和开方运算,而且广泛地应用于广播电视、通信、医疗仪器、仪表和自动控制系统之中,进行模拟信号的变换和处理。由于模拟乘法器有广泛的用途,因此发展较快,已成为模拟集成电路的一个重要分支。

本章先阐述模拟乘法器的特性以及工作原理,然后以几种典型的模拟集成乘法器为例介绍模拟乘法器的应用。

第一节 模拟乘法器的特性及工作原理

模拟乘法器有两个输入端,一个输出端。图 1-1(a)为模拟乘法器的符号。

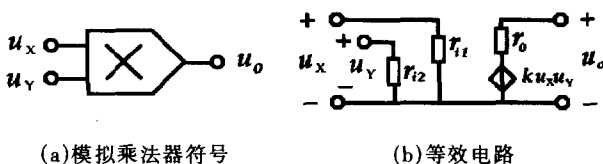


图 1-1 模拟乘法器符号及等效电路

理想模拟乘法器输入的两个模拟信号 u_x 和 u_y 是互不相关的,输出电压 u_o 仅与它们的乘积成正比,即

$$u_o = K u_x u_y \quad (1-1)$$

式中 K 为乘积系数,也称乘积增益或标尺因子。

模拟乘法器的等效电路如图 1-1(b)所示, r_{i1} 、 r_{i2} 分别为两个输入端的输入电阻, r_o 是输出电阻。

在理想状态下,模拟乘法器的输入电阻 r_{i1} 、 r_{i2} 为无穷大,输出电阻 r_o 为零, K 值不随信号的幅值和频率变化;当 u_x 或 u_y 为零时 u_o 为零,电路没有失调电压、失调电流和噪声。

一、模拟乘法器的工作象限

根据模拟乘法器两个输入信号不同极性的组合,在 u_x 和 u_y 的坐标平面上,模拟乘法器有四个工作象限,如图 1-2 所示。当 $u_x > 0$ 、 $u_y > 0$ 时,模拟乘法器工作在第 I 象限,当 $u_x > 0$ 、 $u_y < 0$ 时,模拟乘法器工作在第 IV 象限,其它象限依此类推。

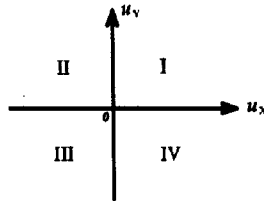


图 1-2 模拟乘法器四象限

按照输入信号允许的极性,若 u_x 和 u_y 只能取同一极性(同为正或者同为负)时模拟乘法器才能正常工作,则称之为“单象限乘法器”;若 u_x 和 u_y 中有一个极性可正也可负,而另一个只能取单一极性,则称之为“二象限乘法器”;若 u_x 和 u_y 的极性均可正可负,则称之为“四象限乘法器”。

二、模拟乘法器的传输特性

模拟乘法器的输出与输入之间的传输特性可以由式(1-1)表

示,也可以用四象限输出特性和平方律输出特性来表示。

1. 四象限输出特性

当模拟乘法器的两个输入信号中有一个为恒定的直流电压 E 时,输出则为

$$u_0 = (KE)u_x$$

或

$$u_0 = (KE)u_y$$

上述关系称为理想模拟乘法器四象限输出特性,如图 1-3 所示。

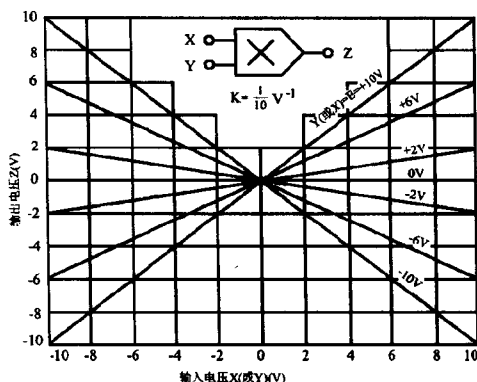


图 1-3 理想模拟乘法器四象限输出特性

2. 平方律输出特性

当模拟乘法器的两个输入信号相同时,其输出为

$$u_0 = Ku_x^2 = Ku_y^2$$

当模拟乘法器的两个输入信号幅值相同而极性相反时,其输出为

$$u_0 = -Ku_x^2 = -Ku_y^2$$

上述关系称为理想模拟乘法器平方律输出特性,如图 1-4 所示,是两条抛物线。

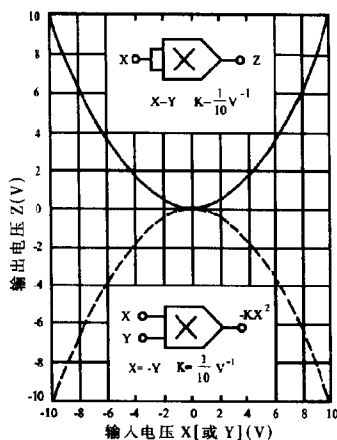


图 1-4 理想模拟乘法器平方律输出特性

三、模拟乘法器的线性与非线性性质

模拟乘法器是一种非线性器件。例如,当 $u_X = u_Y = V \cos \omega t$, 输出电压 u_0 为

$$u_0 = Ku_X u_Y = KV^2 \cos^2 \omega t = \frac{1}{2} KV^2 + \frac{1}{2} KV^2 \cos 2\omega t$$

由上式可以看出,输出电压信号中含有新产生的频率分量。在此模拟乘法器体现出它的非线性特性。

然而,在一定条件下模拟乘法器可以体现出线性的特性。例如, $u_X = E$ (恒定直流电压), $u_Y = u_1 + u_2$, 则输出电压 u_0 为

$$u_0 = Ku_X u_Y = KE(u_1 + u_2) = KEu_1 + KEu_2$$

可见,输出电压信号中不含新的频率成分,而且符合线性叠加定理。此时模拟乘法器体现出线性特性。

第二节 模拟乘法器的工作原理及其运算误差和性能指标

一、模拟乘法器的工作原理

模拟乘法器电路基本分为两类：一类是对数反对数电路，另一类是变跨导电路。变跨导电路采用差分电路为基本电路，其交流馈通效应小、温度稳定性好、运算精度高、速度快，而且成本低，便于集成化，因此得到广泛应用。

变跨导电路的核心是 1968 年吉尔伯特 (Gilbert) 提出的四象限乘法器电路，基本有两种形式。一种是“双差分”电路，这种电路特点是电路简单，工作频率较高，但是其“ X ”路信号动态范围窄，需外加偏置电压。另一种是在双差分的基础上加了“反对数处理”单元，“ X ”路信号动态范围大大拓宽，无需外加偏置电压，但电路复杂，工作频率较低。

1. 双平衡模拟乘法器

图 1-5 所示为双平衡模拟乘法器，又称 Gilbert 乘法器单元电路，是一种四象限乘法器。六个双极性三极管分别组成三个差分电路。

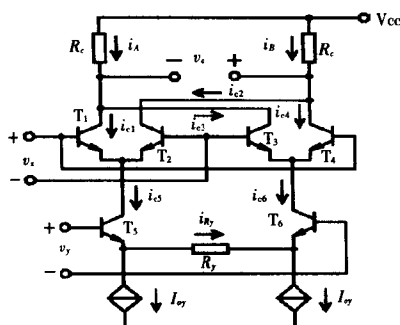


图 1-5 双平衡模拟乘法器

根据差分电路的转移特性可知

$$i_{C1} - i_{C2} = i_{E5} \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right)$$

$$i_{C4} - i_{C3} = i_{E6} \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right)$$

$$i_{E5} - i_{E6} = 2i_{R_y}$$

差分输出电流 i_{od} 为

$$\begin{aligned} i_{od} &= i_1 - i_2 = (i_{C1} + i_{C3}) - (i_{C2} + i_{C4}) \\ &= (i_{C1} - i_{C2}) - (i_{C4} - i_{C3}) \\ &= (i_{E5} + i_{E6}) \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right) \\ &= 2i_{R_y} \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right) \end{aligned}$$

由图可知,若选 $R_y \gg r_{e5}, r_{e6}$ ($r_{e5} \approx V_T/i_{E5}, r_{e6} \approx V_T/i_{E6}$), 则

$$i_{R_y} = \frac{v_y}{R_y}$$

故
$$i_{od} = 2 \frac{v_y}{R_y} \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right)$$

$$v_o = i_{od} R_C = 2 \frac{R_C}{R_y} v_y \operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right) \quad (1-1)$$

若 $v_x \ll 2V_T$, $\operatorname{th}\left(\frac{v_x}{2V_T}\right) \approx \frac{v_x}{2V_T}$, 则

$$v_o \approx \frac{R_C}{R_y V_T} v_x v_y = K v_x v_y$$

其中,相乘增益 $K = R_C/(R_y V_T)$ 。

根据上述分析可知, v_x, v_y 的极性均可正、可负, 实现四象限相乘; 控制信号 v_y 的线性范围很大, 温度对 T_5, T_6 差分电路的影响小, 并可通过改变 R_y 来控制相乘增益 K 。然而, 输入信号 v_x 的线

性范围很小($v_x \ll 2V_T$),而且 K 与温度有关。

双平衡模拟乘法器的频率特性较好,且使用灵活,广泛的应用于集成乘法器中,如美国产品 MC1496/1596、 $\mu A796$ 、LM1496/1596;国内产品 CF1496/1596、XFC-1596 等。

2. 线性化双平衡模拟乘法器

图 1-6 所示为线性化双平衡模拟乘法器。它由 $T_1 \sim T_6$ 及恒流源 I_{OY} 构成的双平衡模拟乘法器和 T_7 、 T_8 及恒流源 I_{OX} 构成的线性补偿网络两部分组成。

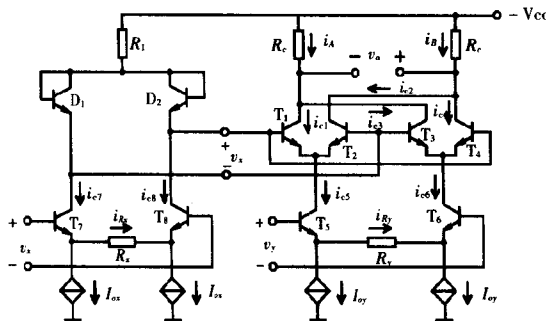


图 1-6 线性化双平衡模拟乘法器

图中 D_1 、 D_2 的电压降为

$$v_{D1} = V_T \ln \frac{i_{D1}}{I_{S1}} \quad v_{D2} = V_T \ln \frac{i_{D2}}{I_{S2}}$$

电流 i_{D1} 、 i_{D2} 为

$$i_{D1} = i_{E7} = I_{OX} + i_{R_x} \quad i_{D2} = i_{E8} = I_{OX} - i_{R_x}$$

若选 $R_x \gg r_{e7}$ 、 r_{e8} 时, i_{R_x} 为

$$i_{R_x} = \frac{v_x}{R_x}$$

故 i_{D1} 、 i_{D2} 又可写成

$$i_{D1} = I_{OX} + \frac{v_x}{R_x} = I_{OX} \left(1 + \frac{v_x}{I_{OX} R_x} \right)$$

$$i_{D2} = I_{OX} - \frac{v_x}{R_x} = I_{OX} \left(1 - \frac{v_x}{I_{OX} R_x} \right)$$

线性补偿网络输出端电压 v'_x 为

$$v'_x = v_{D1} - v_{D2} = V_T \ln \frac{i_{D1}}{i_{D2}} = V_T \ln \left(\frac{1 + \frac{v_x}{I_{OX} R_x}}{1 - \frac{v_x}{I_{OX} R_x}} \right)$$

利用双曲正切反函数与对数的关系 $\ln \frac{1+x}{1-x} = 2 \operatorname{arctanh} x$, v'_x 又可写成

$$v'_x = 2 V_T \operatorname{arctanh} \left(\frac{v_x}{I_{OX} R_x} \right)$$

以 v'_x 代替(1-1)式中 v_x 的,可得线性化双平衡模拟乘法器的输出电压 v_o 为

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{2R_C}{R_y} v_y \operatorname{th} \left(\frac{v'_x}{2V_T} \right) \\ &= \frac{2R_C}{R_y} v_y \operatorname{th} \left\{ \frac{1}{2V_T} \left[2V_T \operatorname{arctanh} \left(\frac{v_x}{I_{OX} R_x} \right) \right] \right\} \\ &= \frac{2R_C}{R_y} v_y \operatorname{th} \left[\operatorname{arctanh} \left(\frac{v_x}{I_{OX} R_x} \right) \right] \\ &= \frac{2R_C}{I_{OX} R_x R_y} v_x v_y \\ &= K v_x v_y \end{aligned}$$

其中,相乘增益 $K = \frac{2R_C}{I_{OX} R_x R_y}$ 。

差分输出电流 $i_{od} = i_A - i_B = \frac{v_o}{R_C} = \frac{2}{I_{OX} R_x R_y} v_x v_y$ 。

由上述分析可知:

(1) 当反馈电阻 $R_x, R_y \gg r_e$ 时, $v_o \propto v_x \cdot v_y$, 接近理想相乘特性。

(2) 相乘增益 K 由电路参数确定, 一般可通过调节 I_{OX} 来调整 K 的数值, 而且 K 与温度无关, 电路的温度稳定性好。

(3) 输入信号的线性范围得到扩大, 其极限值为 $v_{xm} < I_{OX} R_x$, 否则双曲正切反函数无意义。

二、模拟乘法器的运算误差

上述模拟乘法器工作原理分析中, 是把乘法器当作一个理想器件。实际上, 由于电路中各种因素的影响, 模拟乘法器会产生静态(直流)误差和动态(交流)误差。

1. 静态误差

设乘法器的直流输入电压为 X 和 Y , 考虑各种因素引入的输出误差后, 乘法器输出电压 Z 的特性方程可表示为

$$\begin{aligned} Z &= (K \pm \Delta K) [(X \pm X_{os})(Y \pm Y_{os})] \pm Z_{os} \pm N(X \cdot Y) \\ &\approx KXY \pm \Delta KXY \pm KXY_{os} \pm KX_{os}Y \pm Z_{os} \pm N(X \cdot Y) \end{aligned}$$

式中, ΔK 为相乘增益 K 的误差; X_{os} 为 x 通道输入失调电压; Y_{os} 为 y 通道输入失调电压; Z_{os} 为乘法器固有输出失调电压; $N(X \cdot Y)$ 为乘法器的非线性引起的输出误差电压。

从上式(已忽略二阶小量项 $\Delta K \cdot X_{os}$ 、 $\Delta K \cdot Y_{os}$ 等)可知, 乘法器除输出线性的输出电压 KXY 项外, 还包含六项乘积误差输出电压分量。

(1) 输出失调误差电压 Z_{os}

当 $X = Y = 0$ 时, 由 X_{os} 、 Y_{os} 、 Z_{os} 产生的输出误差电压, 称为输出失调误差电压 Z_{os} , 即

$$Z_{os} \Big|_{\substack{X=0 \\ Y=0}} = \pm KX_{os}Y_{os} \pm Z_{os}$$

输出失调电压一般可通过调节 x 通道、 y 通道输入端和乘法器电

路输出端的外设补偿网络进行调零。

(2)线性馈通误差电压 Z_{ox} 和 Z_{oy}

x 通道线性馈通误差电压 Z_{ox} 为

$$Z_{ox} \Big|_{\substack{X \neq 0 \\ Y = 0}} = \pm KXY_{os}$$

y 通道线性馈通误差电压 Z_{oy} 为

$$Z_{oy} \Big|_{\substack{X = 0 \\ Y \neq 0}} = \pm KX_{os}Y$$

线性馈通电压可通过通道输入端的外设补偿网络进行调零。

(3)增益误差电压 Z_{ok}

相乘增益误差引起的输出误差电压称为增益误差电压 Z_{ok} , 即

$$Z_{ok} = \pm \Delta KXY$$

一般通过调整恒流源 I_{ox} 的偏置电阻, 使增益误差达到最小值, 以减小增益误差电压。

(4)非线性误差电压 Z_{on}

非线性误差电压 Z_{on} 是指上述各种误差电压经调整后, 乘法器实际输出与理想输出之间的偏差值, 表示为

$$Z_{on} = \pm (X \cdot Y)$$

非线性误差电压的调整比较困难。

2. 动态误差

动态误差是乘法器交流特性参数之一。它主要包括交流馈通误差、小信号动态误差、大信号动态误差和幅频、相频响应误差等几项。为了简化动态误差的分析, 工程上规定在乘法器的一个输入端加上固定的直流电压, 另一输入端加上正弦交流电压, 使乘法器对输入的交流电压起线性放大作用, 因而可按线性放大器的一般处理方法来分析乘法器的各种交流误差电压。