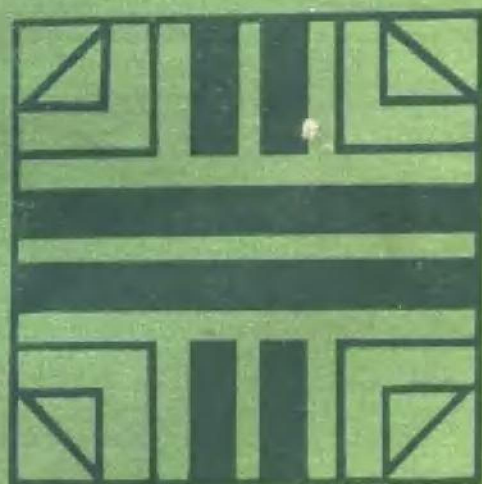


张凤言 编著



# 模拟乘(除)法器

分析、参数与应用



1.1

科学出版社

# 前 言

近几年来,作者参加“全国集成电路标准化技术委员会模拟分会非线性电路组”编制我国非线性电路国家标准化草案的工作,并受委托编写了模拟乘(除)法器产品系列品种标准化草案(讨论稿)和参数测试原理标准化草案(讨论稿)。因此阅读了较多的国内外参考资料,从中了解到模拟乘(除)法器的发展、主要电路制式和技术特点,及其应用的广泛性。调查研究表明我国目前模拟乘(除)法器在品种、数量、质量上都远落后世界先进水平。例如,仅美国的 Burr-Brown Research Corporation, Intronic Inc., Analog Devices Inc. 等三家公司,以模块和单片集成两种方式,就生产通用、低成本、低漂移、高精度、高速、宽频带等各种制式各种性能的乘(除)法器产品达五十多种。而我国只有少数几个厂家分别生产两种单片乘法器,一个是仿 MC 1595 L,另一个是仿 MC 1596,这两个产品都是美国 Motorola Semiconductor Inc. 六十年代末期的产品。MC 1595 L 是变跨导式第一代乘法器,实现四象限相乘时,必须外接单端化输出运算放大器和偏置电路等很多元件,而且精度低(2~1%),调整使用不便。随着电路设计和工艺技术的突破,高精度(0.5~0.25%)、多功能(相乘、相除、平方、平方根)变跨导式第三代单片集成乘法器,例如 AD 534、AD 632、BB 4213 和 BB 4214 等都早已问世。由此想到,尽快开发我国模拟乘(除)法器的产品系列品种,增加产品数量,提高产品性能,对我国电子技术的发展和四化建设是一项积极有益的工作。近年来,陆续研制了几种制式的模拟乘(除)法器功能块,其性能指标还是比较好的,有些模块已经移交给生产厂家试生产。本书的第二、三、四、五章正是在研制和测试模拟乘(除)法器的基础上编写的。

一九八四年十二月,教育部电工教材编审委员会电子线路编审小组在厦门大学召开全国工科高等学校电子线路教学讨论会,多数与会代表认为:应当更新电子线路教学内容;应当增加模

拟乘法器、MOS 电路、开关电容电路、锁相环等内容。这些观点被反映在会议纪要里,按照纪要精神,大连海运学院受教委会高教二司和电子线路编审小组委托,于一九八五年八月三日至八月十六日,举办了“全国工科高等学校电子线路主讲教师讨论班”。本书的原稿由大连海运学院印刷,首先被用作该次讨论班的讲义(也被大连海运学院和北京航空学院用作教材);而后又于一九八五年九月份被北京市电子学会教育专业委员会举办的“北京市高校电子线路教师讨论班”用作讲义。本书是在上述两次讨论班讲授的讲稿基础上修改定稿的。

模拟乘(除)法器是模拟电路的一个重要分支,是功能电路和三端对非线性有源电子器件。象集成运放一样,其通用性很强。它广泛应用于通讯工程、自动控制系统、电子测量设备、生态研究、化学分析等许多科学技术领域。作者认为,凡是在处理两个以上变量的函数关系时,它都具有电路功能设计的灵活性及技术上的有效性;如果说,集成运算放大器的广泛应用已经发挥了巨大作用,推动了电子技术的重大变革的话,那么,模拟乘(除)法器的大量非线性应用,也一定会促进电子技术的变革;模拟乘(除)法器作为功能器件,不仅自身具有相当长的生命力,而且它也是日益蓬勃发展的模拟集成系统的重要组成单元。作者编写本书的目的在于抛砖引玉,期望更多的人来关注和致力于模拟乘(除)法器的发展与推广应用。

受科学出版社委托,合肥电子工程学院魏志源副教授审阅了书稿,他提出了许多宝贵意见,对提高本书质量帮助很大。在此谨向他致以衷心感谢。

限于水平,本书仍可能有不少缺点和错误之处,恳请读者批评和指正。

作者

一九八五年十月

于北京

# 目 录

第一章 模拟乘(除)法器基本概念与相乘技术原理.....	1
1.1 模拟乘法器基本概念与特性 .....	1
1.2 模拟除法器基本概念与特性 .....	7
1.3 模拟相乘技术基本原理 .....	9
1.3.1 四分之一平方相乘法 .....	11
1.3.2 三角波平均相乘法 .....	13
1.3.3 脉冲宽度高度调制式相乘法 .....	15
1.3.4 对数-反对数式相乘法.....	16
1.3.5 可变跨导式相乘法 .....	17
附录 简单、经济的压控电阻型二象限乘(除)法器 .....	18
第二章 脉冲宽度高度调制(PWHM)式乘法器.....	21
2.1 概述 .....	21
2.1.1 二象限和四象限乘法器的受调方波 .....	21
2.1.2 外激励 PWHM 式模拟乘法器功能块电路 .....	23
2.2 高精度集成 PWHM 式乘法器 .....	28
2.2.1 电路方框图及其原理 .....	28
2.2.2 设计考虑 .....	31
2.2.3 单片集成 PWHM 式二象限乘法器电路 .....	32
2.3 高精度 PWHM 式乘法器的设计与实践 .....	39
2.3.1 高精度 PWHM 式四象限模拟乘法器功能块 .....	39
2.3.2 高精度 PWHM 式二象限模拟乘(除)法器功能块 .....	49
第三章 对数-反对数式乘(除)法器 .....	50
3.1 高精度一象限对数-反对数式乘(除)法器.....	50
3.1.1 一象限乘(除)法器电路及其性能 .....	50
3.1.2 对数放大器的分析 .....	54
3.2 一象限乘(除)法器转换成四象限乘法器或二象限除法器 .....	59
3.2.1 一象限乘法器转换为四象限乘法器 .....	59
3.2.2 一象限除法器转换成二象限除法器 .....	61
3.3 高精度四象限乘法器和二象限除法器 .....	62

3.3.1	四象限相乘和二象限相除原理电路 .....	63
3.3.2	误差分析与补偿 .....	66
3.3.3	高精度四象限乘法器和二象限除法器实际 电路及其性能 .....	69
3.4	对数-反对数式多功能变换器 .....	73
3.4.1	概述 .....	73
3.4.2	多功能变换器的工作原理 .....	75
3.4.3	多功能变换器实际电路及其技术特性 .....	77
第四章	变跨导式乘(除)法器 .....	84
4.1	简单的变跨导式二象限乘法器 .....	84
4.2	变跨导式二象限乘除器 .....	87
4.2.1	二象限乘法器工作原理及传输特性分析 .....	87
4.2.2	二象限乘法器的实践 .....	91
4.2.3	二象限乘法器的误差补偿 .....	95
4.2.4	二象限除法器 .....	98
4.2.5	高性能变跨导式二象限除法器 .....	99
4.3	压控吉尔伯特开关乘法器 .....	103
4.3.1	直流或低频传输特性分析 .....	103
4.3.2	开关乘法器用作相位检测器 .....	106
4.3.3	开关乘法器用作平衡调制器/解调器 .....	108
4.3.4	压控吉尔伯特电路用作线性乘法器 .....	111
4.4	第一代线性化变跨导式四象限乘法器 .....	112
4.4.1	线性化原理 .....	112
4.4.2	流控吉尔伯特乘法器单元电路的分析 .....	116
4.4.3	差模电压-电流变换器 .....	119
4.4.4	集成四象限乘法器 MC 1595 L .....	121
4.4.5	差模输出电流-单端化输出电压变换器 .....	123
4.4.6	MC 1595 L 外部电路元件参数设计 .....	127
4.5	第二代和第三代变跨导式多功能电路 .....	131
4.5.1	具有输出电流放大器的第二代乘法器 .....	132
4.5.2	具有输出电压放大器的第二代乘法器 .....	139
4.5.3	利用有源负反馈的高性能第三代乘法器 .....	145
4.6	四象限乘法器的误差分析, 补偿与调整 .....	151

4.6.1 概述 .....	151
4.6.2 四象限乘法器的误差分析 .....	155
4.6.3 四象限乘法器的误差补偿与调整方法 .....	165
4.7 除法器的误差 .....	169
第五章 模拟乘(除)法器的技术参数与测试方法 .....	174
5.1 概述 .....	174
5.1.1 模拟乘(除)法器的技术参数 .....	174
5.1.2 测试设备与辅助电路 .....	176
5.2 模拟乘法器的技术参数及测试 .....	178
5.2.1 传输功能 .....	178
5.2.2 满刻度总误差及其漂移 .....	179
5.2.3 输出失调电压及其漂移 .....	182
5.2.4 增益系数及其误差 .....	183
5.2.5 非线性度 .....	185
5.2.6 X和Y馈通误差电压及其漂移和频响特性 .....	191
5.2.7 输入特性 .....	194
5.2.8 输出特性 .....	197
5.2.9 电源要求 .....	198
5.2.10 共模特性 .....	199
5.2.11 小信号动态参数 .....	201
5.2.12 大信号动态参数 .....	205
5.3 模拟除法器的技术参数及测试 .....	208
5.3.1 传输功能 .....	209
5.3.2 分母馈通误差 .....	210
5.3.3 输出失调电压及其温漂与分母电压的关系 .....	212
5.3.4 总误差 .....	214
5.3.5 非线性度 .....	217
5.3.6 小信号动态参数 .....	219
5.3.7 大信号动态参数 .....	222
第六章 模拟乘(除)法器的应用 .....	224
6.1 模拟运算电路 .....	224
6.1.1 间接除法器 .....	224
6.1.2 乘方和开方电路 .....	231

6.1.3 函数发生器 .....	236
6.1.4 坐标转换的模拟实现 .....	244
6.2. 模拟测量电路 .....	247
6.2.1 全波整流电路和振幅测量电路 .....	248
6.2.2 平方律振幅检测电路 .....	249
6.2.3 有效值检测电路 .....	249
6.2.4 时间常数测量电路 .....	251
6.2.5 单相和三相功率测量电路 .....	253
6.2.6 工业气体流量的测量 .....	255
6.3 波形产生和变换电路 .....	256
6.3.1 低失真正弦波振荡器 .....	256
6.3.2 正交振荡器 .....	258
6.3.3 压控重复频率方波和三角波发生器 .....	260
6.3.4 三角波-正弦波变换器 .....	262
6.4 信号处理和控制电路 .....	263
6.4.1 自动电平控制电路 .....	263
6.4.2 线性增益自动控制的宽带放大器 .....	266
6.4.3 压控频带有源滤波器 .....	267
6.4.4 压控指数和对数放大器 .....	270
6.5 通信系统中的应用电路 .....	273
6.5.1 平衡调制器和单边带调制器 .....	273
6.5.2 普通振幅调制器 .....	276
6.5.3 倍频器 .....	276
6.5.4 锁相环系统中的相位检测电路 .....	277
6.5.5 振幅检波器 .....	281
主要参考文献 .....	285

# 第一章 模拟乘(除)法器基本概念与相乘技术原理

## 1.1 模拟乘法器基本概念与特性

模拟乘法器是对两个(或两个以上的)互不相关的模拟信号(连续变化的电压或电流)实现相乘功能的非线性电子器件(或称组件)。它一般具有两个输入端子和一个输出端子,是一个三端对有源网络。

若输入信号分别用  $X$  和  $Y$  表示,输出信号用  $Z$  表示,则  $Z$  与  $X$  和  $Y$  的乘积成正比。理想模拟乘法器的传输特性方程可用下式表征。

$$Z = KXY \quad (1.1.1)$$

式中  $K$  称为乘法器的增益系数(亦称标尺因子或比例系数)。当两输入信号分别是电压  $v_x(t)$  和  $v_y(t)$  时,输出为电压  $v_o(t)$ ,可写成

$$v_o(t) = Kv_x(t)v_y(t) \quad (1.1.2)$$

式中  $K$  的量纲是  $V^{-1}$ 。在乘法器的大多数实际应用电路中,通常取  $K = \frac{1}{10V}$ 。若  $v_x(t)$  和  $v_y(t)$  的满刻度幅度均是  $10V$ ,则在理想情况下, $v_o(t)$  的满刻度幅度也是  $10V$ ,这种乘法器就是通用型十伏制乘法器。除此以外,还有  $K = \frac{1}{5V}$ ,  $\frac{1}{100V}$  或其他方便数值的乘法器,统称为特殊乘法器。

如果两个输入端以及输出端的信号均是电流,则理想乘法器的传输特性为

$$i_o(t) = Ki_x(t)i_y(t) \quad (1.1.3)$$

式中  $K$  的量纲是  $A^{-1}$ 。

理想乘法器的特性是输出信号仅与两输入信号之积成正比,在规定的满刻度输入和输出范围内,幅度与波形不受限制,相对于



输入信号的频率而言,小信号(-3 dB)带宽无限宽,上升速率无限大;输入信号为零时的输出噪声电平为零;输入和输出失调误差电压均为零;线性和非线性误差均为零。理想乘法器是设计者和使用者共同追求的目标。

与式(1.1.1)~(1.1.3)相对应,乘法器可用图 1.1 的符号来表示。有时,变换某些乘法器的输入端和共地端,可得到以下的传输特性方程

$$v_o(t) = -Kv_x(t)v_Y(t) \quad (1.1.4)$$

与上式相对应可用图 1.2 所示符号来表示。图 1.1 和 1.2 相比,图中仅差一个负号。因此,图 1.1 称同相乘法器,图 1.2 称反相乘法器。

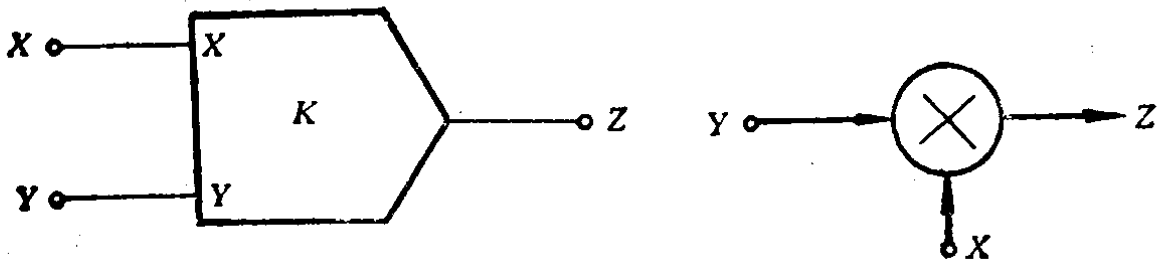


图 1.1 同相模拟乘法器的简化符号

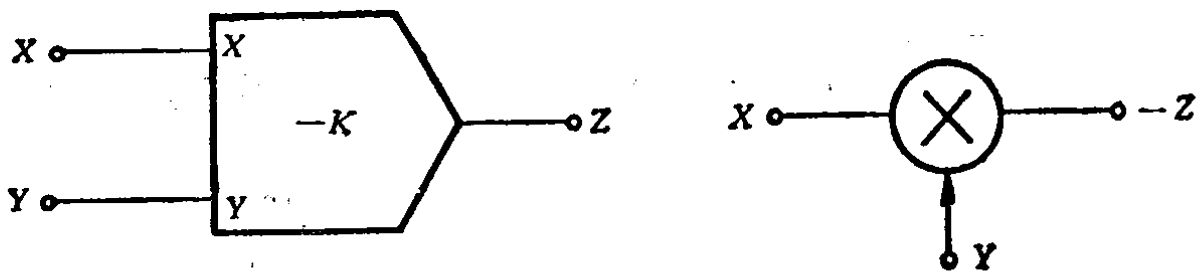


图 1.2 反相模拟乘法器的简化符号

根据乘法运算的代数性质以及两个输入信号电压的极性和幅度,就能确定乘积输出信号电压的极性及工作范围。表示在 XY 平面上,乘法器有四个可能工作的区域;可用 XY 平面中的四个象限来描述,如图 1.3 所示。若乘法器对两个输入电压的极性必须分别限定为某一种极性时才能正常工作,则称为一象限乘法器。若 X 和 Y 均限定为正极性或均负极性,一象限乘法器就工作在第 I 象

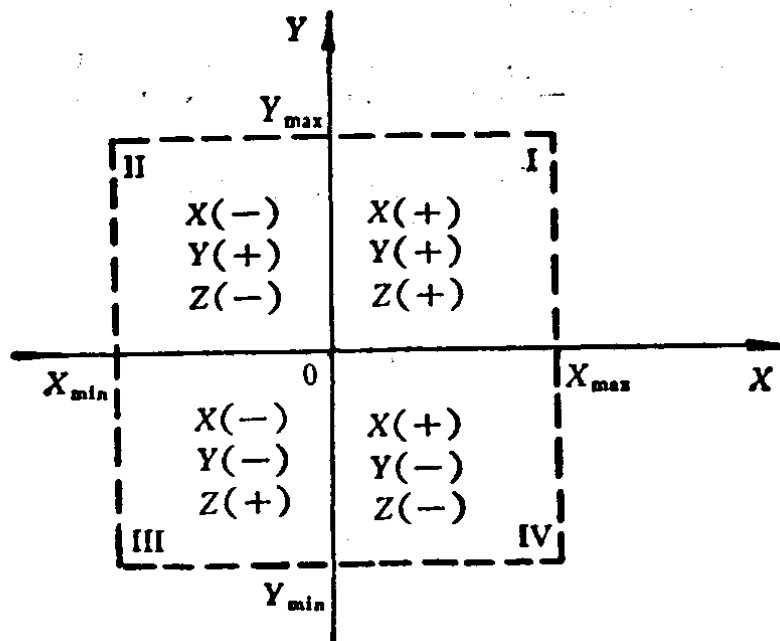


图 1.3 模拟乘法器的四个工作区域

限或第Ⅲ象限；若  $X$  和  $Y$  中，一个限定为正值，另一个限定为负值，则该一象限乘法器就只可工作在第Ⅱ象限或第Ⅳ象限。若乘法器允许一个输入电压只能为一种极性，而允许另一输入电压为可正可负两种极性，则称它为二象限乘法器。当乘法器能够允许两个输入电压分别均可为正、负两种极性，即适应于  $X$  和  $Y$  的四种组合极性时，则称它为四象限乘法器。大多数集成式或模块式通用型乘法器是四象限乘法器。

下面阐述理想乘法器的直流传输特性。

因乘法器的输出信号正比于两个输入信号的乘积，所以理想乘法器的重要特性之一，就是对零输入信号电压的响应为零，即对应于两输入电压的三种输入状态，输出电压均为零，如表 1.1 所示。但实际乘法器在三种状态下都会存在输出误差，它们分别被

表 1.1

输入状态	理想乘法器输出	实际乘法器输出误差电压
$X=0, Y=0$	$Z=0 \cdot 0=0$	$Z \neq 0$ , 存在 $V_{00}$ ——输出失调
$X=0, Y \neq 0$	$Z=0 \cdot Y=0$	$Z \neq 0$ , 存在 $Y$ 馈通误差
$X \neq 0, Y=0$	$Z=X \cdot 0=0$	$Z \neq 0$ , 存在 $X$ 馈通误差

称输出失调和  $X$ 、 $Y$  馈通误差。

对于大多数通用型乘法器来说,  $K = \frac{1}{10 \text{ V}}$ ,  $\frac{1}{K} = 10 \text{ V}$ , 即为满刻度输出电压。若固定一个输入电压, 例如  $Y = 10 \text{ V}$ , 则当  $-10 \text{ V} \leq X \leq +10 \text{ V}$  时,

$$\frac{1}{K} \geq |0.1 XY| \geq 0 \quad (1.1.5)$$

若输出信号电压幅度固定为  $10 \text{ V}$ , 则

$$\frac{1}{K} \geq |0.1 XY| \quad (1.1.6)$$

由式(1.1.5)可知, 若  $|X| \neq |Y|$ , 则输出幅度比最小的输入幅度还小; 即若  $|X| < |Y|$ , 则

$$|X| > |KXY| \quad (1.1.7)$$

这就说明两个输入信号中任一个降低到趋于零时, 理想乘法器的输出信号也将趋于零。理想乘法器对小信号具有良好的传输特性。

若乘法器一个输入电压作为参变量, 则输出电压随另一个输入电压而线性变化。令  $X = V_x$  (直流电压) 时,

$$Z = (KV_x)Y \quad (1.1.8)$$

令  $Y = V_y$  时,

$$Z = (KV_y)X \quad (1.1.9)$$

这时乘法器相当于一个放大器, 其增益  $(KV_x)$  决定于参变量  $V_x$  的数值。把式(1.1.8)或(1.1.9)表示在平面坐标上, 如图 1.4 所示, 称之为四象限直流传输特性。图中所示特性曲线族的斜率表明放大器在参变量  $V_x$  为不同数值时的电压增益。

若乘法器的两个输入电压幅度相等极性相同, 则输出电压与输入电压的平方成正比,

$$Z = KX^2 \text{ 或 } Z = KY^2 \quad (1.1.10)$$

若乘法器两个输入电压幅度相等而极性相反 ( $X = -Y$ ), 则输出电压为

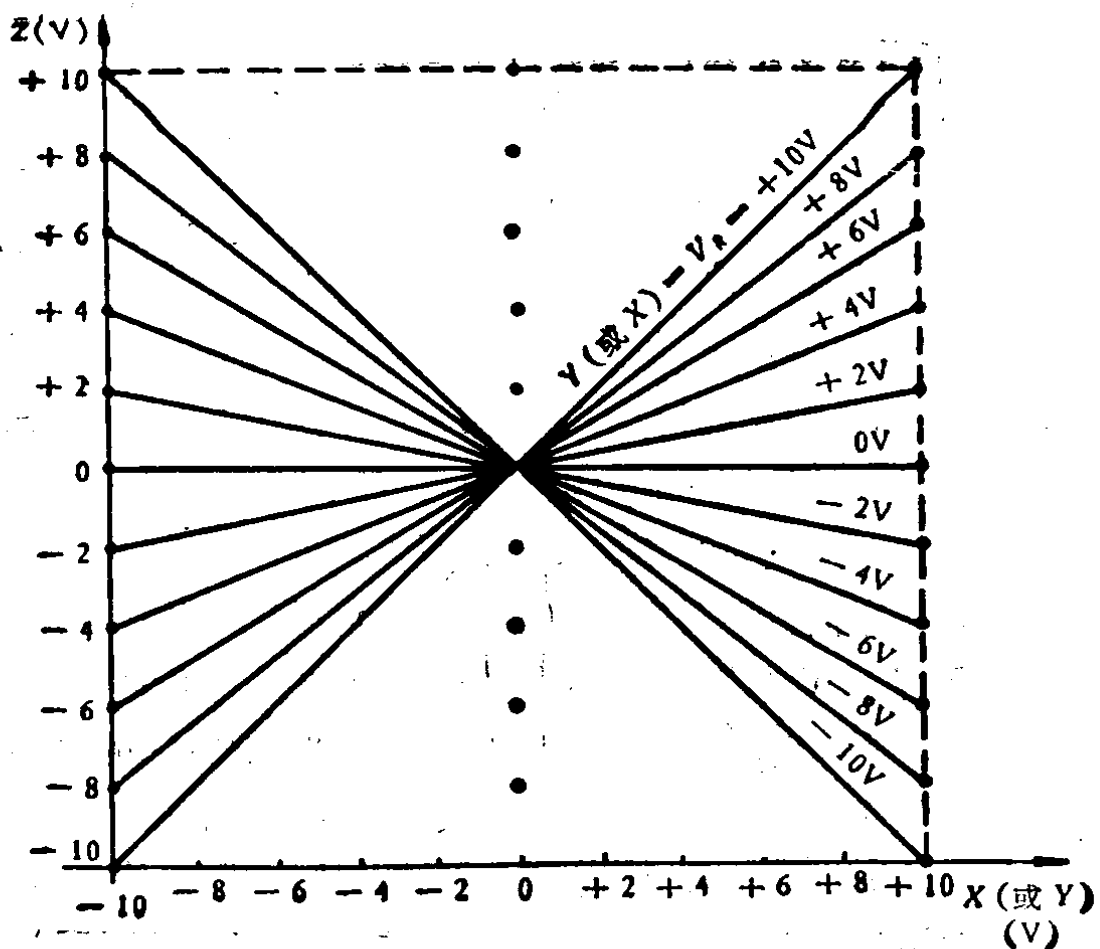


图 1.4 理想乘法器四象限直流传输特性

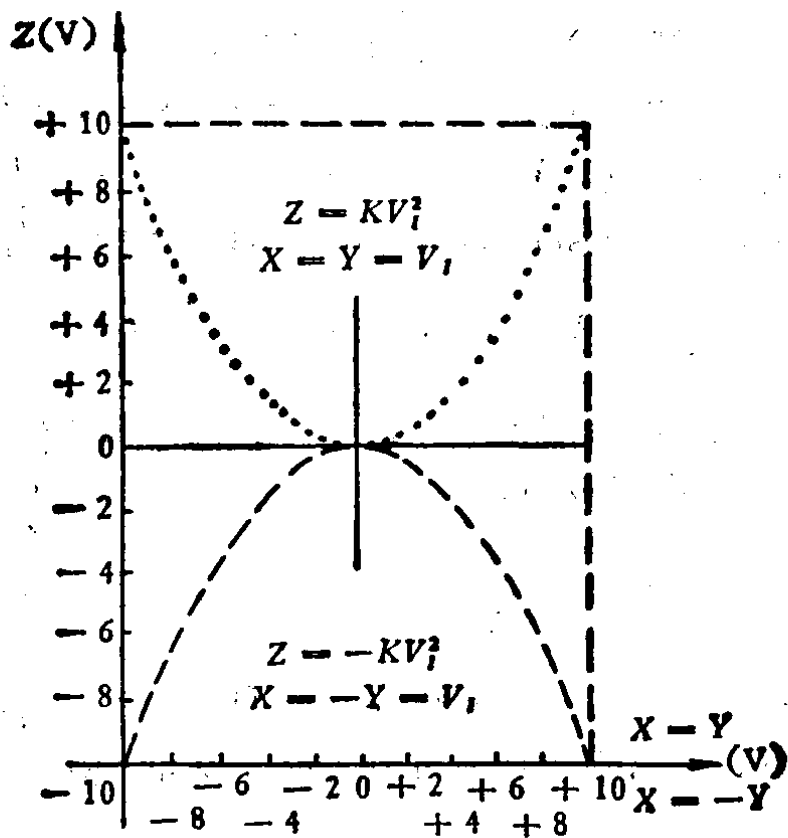


图 1.5 理想乘法器的平方律传输特性

$$Z = -KX^2 \text{ 或 } Z = -KY^2 \quad (1.1.11)$$

将式(1.1.10)和(1.1.11)表示在平面坐标上,便可得到输出电压与输入电压的平方律关系曲线,称为平方律传输特性,如图1.5所示。分别与上面二式相对应的两条曲线是张口方向相反,相切于坐标原点的两条抛物线。

理想乘法器的传输特性也可用三维坐标中的曲面来表示,如图1.6所示。它是“马鞍形”的双曲抛物面。两个抛物面张口方向相反,一个抛物面通过 I-III 象限对角线;另一个通过 II-IV 象限对角线。两抛物面成直角地相切于坐标原点。曲面的四个角分别标 1, 2, 3, 4, 它们分别对应在各个象限的输出电压的最大值。在曲面上沿 X 轴和 Y 轴均是  $Z = 0$ 。传输特性曲面的顶视图就是图 1.4 中的两条对角线。通过 I-III 象限和 II-IV 象限对角线的垂直平面与曲面的交线就是图 1.5 所示的平方律特性曲线。

模拟乘法器是非线性功能组件,具有非线性的传输特性。设 X 和 Y 是相互独立的且均随时间  $t$  缓慢变化的直流信号,输出信号是比例于输入信号的乘积( $XY$ ),而不是比例于 X 或 Y,即输出量不是随 X(或随 Y)线性变化的。图 1.6 的曲面最完整地描述了直流传输关系的非线性。至于当  $X = Y = V_I$ (或  $X = -Y = V_I$ )时,图 1.5 的抛物线说明  $V_o$  是正比于  $V_I^2$ 。若进一步假设 X 和 Y 是交流信号,  $X = V_x \cos \omega_x t$ ,  $Y = V_y \cos \omega_y t$ , 乘法器输出电压为

$$v_o(t) = \frac{1}{2}KV_x V_y [\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t] \quad (1.1.12)$$

可见输出电压中出现了新的频率分量  $(\omega_x + \omega_y)$  和  $(\omega_x - \omega_y)$ 。当  $\omega_x = \omega_y = \omega$  时,

$$v_o(t) = \frac{1}{2}KV_x V_y [1 + \cos 2\omega t] \quad (1.1.13)$$

在输出电压中出现了新的频率分量 (0 和  $2\omega$ )。因此,在乘法器输入交变信号时,乘法器是可以实现许多非线性功能的频率变换器。

但是,在特殊条件下,理想乘法器具有比例放大功能,又可能

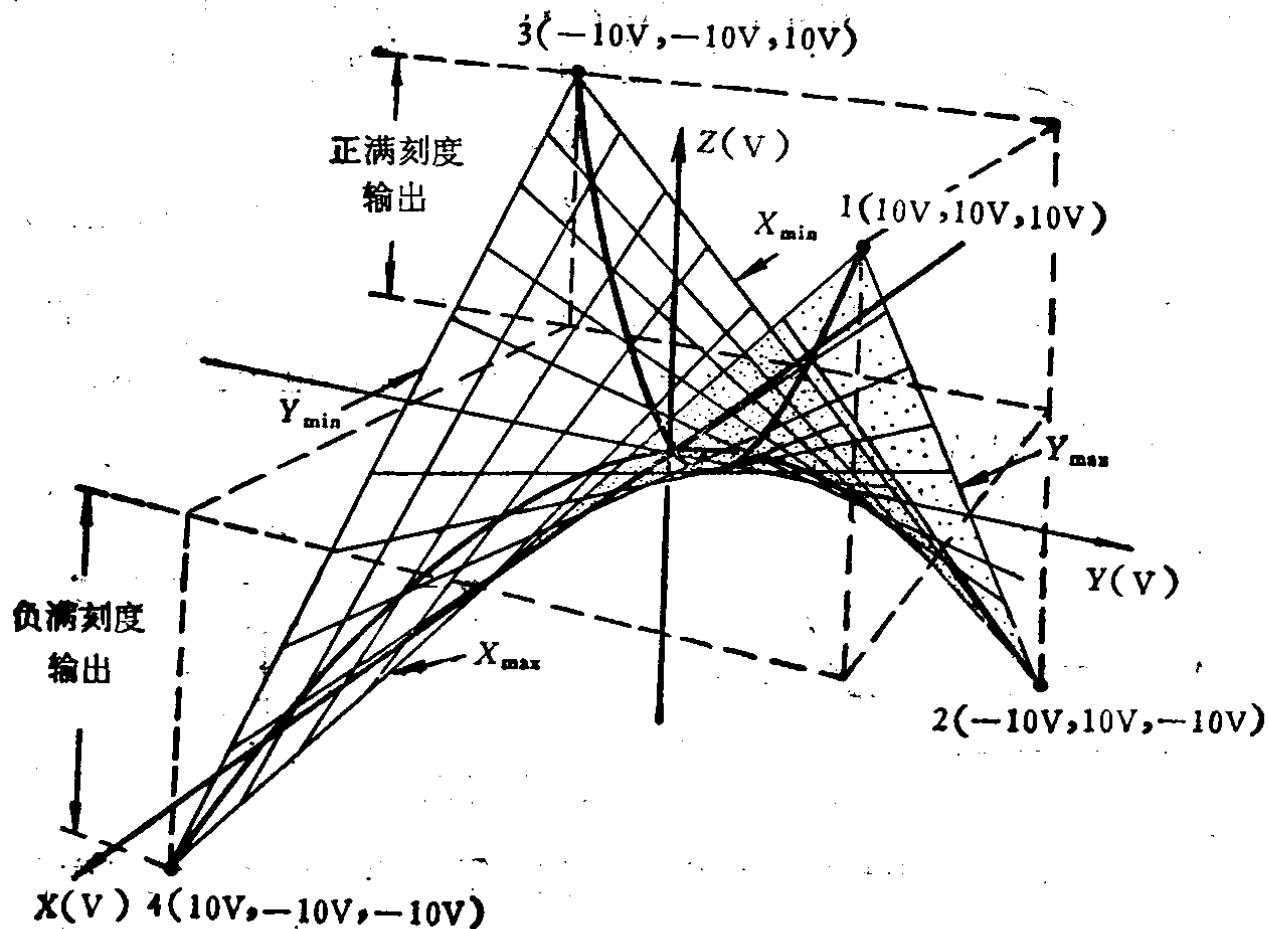


图 1.6 四象限乘法器的传输曲面

有线性传输特性。当  $X$  或  $Y$  输入端是恒定电压  $V_{DC}$  时，理想乘法器就是电压增益为  $(KV_{DC})$  的比例放大器。在此特定条件下，理想乘法器表现为线性组件。

在实际模拟乘法器中，由于电路元、器件特性不理想，或它们的对称性不理想，即使在  $X = V_{DC}$  (或  $Y = V_{DC}$ ) 这种特定条件下，输出特性并不象图 1.4 表示的那样是一条直线，实际上是一条曲线。这条曲线相对于它的最佳拟合直线<sup>1)</sup>，又呈现了非线性。在第五章将深入讨论这种非线性。

## 1.2 模拟除法器基本概念与特性

模拟除法器是对两个互不相关的模拟信号电压实现相除功能

1) 关于最佳拟合直线的概念，详见第五章。

的非线性电子组件,也是一个三端对有源网络。设输入电压  $v_D$  表示分母电压,  $v_N$  表示分子电压,输出电压  $v_o$  与两个输入电压之比成比例。理想除法器的传输特性方程为

$$v_o = K \frac{v_N}{v_D} \quad (1.2.1)$$

通用型模拟除法器也是十伏制。因此上式中的  $K = 10 \text{ V}$  (量纲是  $\text{V}$ )。如果分子电压与分母电压之比为 1,则输出电压就是  $K$ 。除法器可用图 1.7 的符号表示。

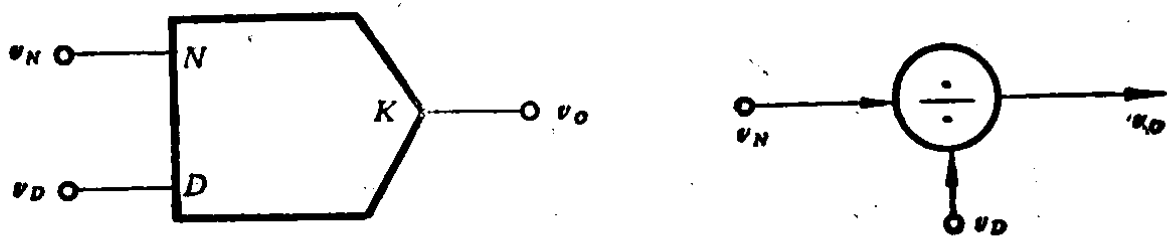


图 1.7 模拟除法器的简化符号

除法运算的代数性质决定了任何模拟除法器最多只能工作在两个象限的有限区域内。由式(1.2.1)可知,对于十伏制除法器,当  $v_D$  固定为  $10 \text{ V}$  时,  $v_N$  可在  $-10 \sim +10 \text{ V}$  内变化,  $v_{o \max} = 10 \text{ V}$ 。但反之,若令  $v_N = +10 \text{ V}$ ,若  $v_D$  在  $-10 \sim +10 \text{ V}$  内变化,当  $v_D$  趋于零或等于零时,  $v_{o \max}$  即可趋于或等于无限大。可见分母电压  $v_D$  只能是某一种极性,不允许由正(或负)极性过零而变到负(或正)极性。  $v_D$  也不能接近于零(除非分子电压  $v_N$  也同时趋于零)。因此,任何除法器都有一个最小限定分母电压  $v_{D \min}$ 。当  $v_D$  只允许正极性时,若  $v_N$  极性可正又可负,则除法器工作在  $v_N-v_D$  坐标平面的 I-II 象限;若  $v_D$  只允许为负极性,就工作在 III-IV 象限。当  $v_D$  和  $v_N$  分别被限定为某一种极性时,这种除法器叫做一象限除法器。

除法器的传输特性可表示在平面坐标中。由式(1.2.1)可知,最大可允许的分子电压的幅度  $v_{N \max}$  决定于分母电压  $v_D$  的幅度、输出电压范围和增益系数  $K$ ,

$$v_{N \max} = \frac{v_{o \max}}{K} v_D \quad (1.2.2)$$

由上式可见,当  $v_{o \max} = K = 10 \text{ V}$  时,输入分子电压被限定  $45^\circ$  的

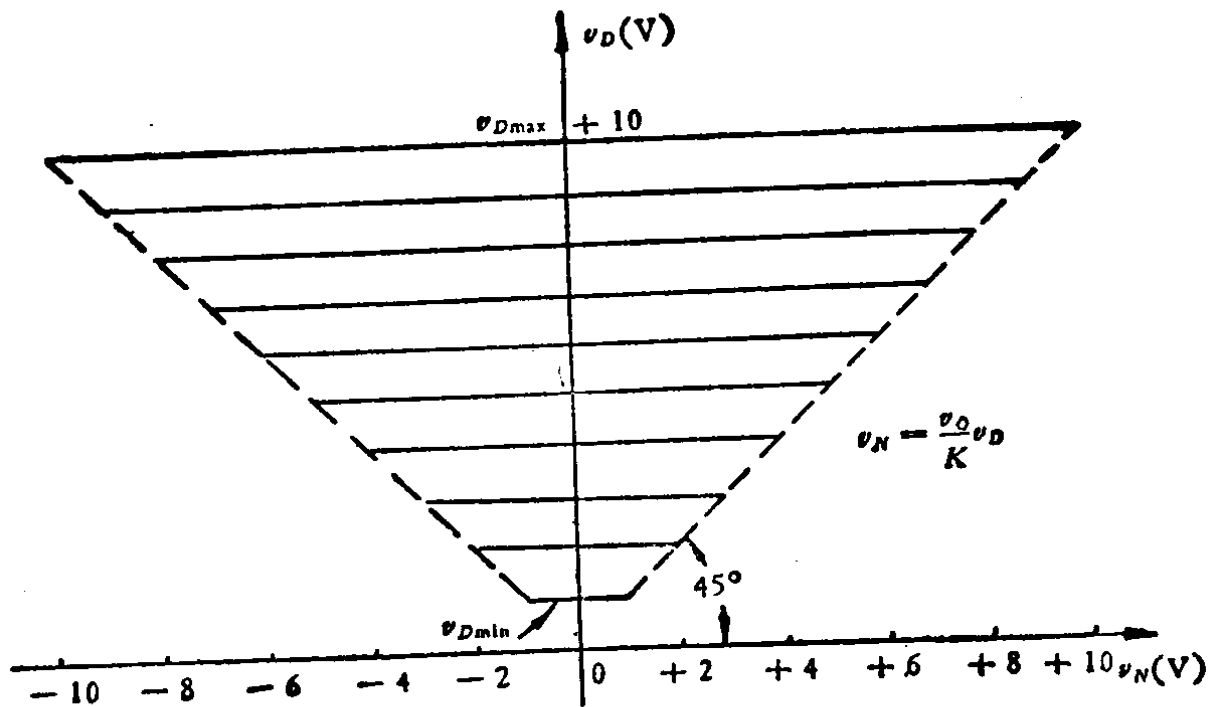


图 1.8 二象限除法器的传输关系

直线区域内,如图 1.8 所示,在此情况下,始终是  $v_N \leq v_D$ 。图 1.8 说明,除法器合理的技术指标不仅限定了  $v_{Dmin}$  和  $v_{Dmax}$ ,而且也限定了分子电压  $v_N$  不能在 I、II 象限内任意取值。

模拟除法器主要是用来实现对两个模拟电压相除的功能,因而它是非线性器件。但是在特定条件下,理想除法器也会表现出线性性质。当  $v_D$  固定为某一恒定电压  $V_{DC}$  时,输出电压就会随分子电压  $v_N(t)$  而线性变化

$$v_o(t) = \frac{K}{V_{DC}} v_N(t) \quad (1.2.3)$$

这时除法器就是线性放大器,其电压增益为  $\frac{K}{V_{DC}}$   $v_N(t)$  可以是振幅  $v_{Nm} \leq V_{DC}$  的正弦交流信号。

### 1.3 模拟相乘技术基本原理

模块式的、混合集成式的及单片集成式的模拟乘法器都早已投入工业生产和实际应用,因而相继发展了好几种有成效的模拟相乘技术。其中有四分之一平方相乘法,三角波平均相乘法,脉冲



表 1.2 五种模拟相乘技术主要性能的比较

相乘技术类型	四分之一平方相乘	三角波平均相乘	脉冲调制式相乘	对数-反对数式相乘	可变跨导式相乘	
主要性能特点						
满刻度总精度(%)	0.25~0.5	0.1~0.5	0.01~0.1	0.1~0.5	0.25~2	
满刻度精度的温漂	0.03%/°C	0.03%/°C	0.01%/°C	0.02%/°C	0.02%/°C	
小信号(-3dB)频带	2 MHz	1 kHz	(0.1~1) kHz	300 kHz	(0.5~10) MHz	
上升速率	3 V/μs	5 V/ms	1 V/ms	V/μs	200 V/μs	
主要特点	精度	高	高	最高	高	较高
	频带	宽	窄	最窄	中等	可最宽
	动态特性	较好	较差	最差	中等	可最好
	成本	较高	高	较低	最低	较低

宽度高度调制式相乘法,对数-反对数式相乘法,可变跨导式相乘法。为便于比较,上述五种模拟相乘技术的主要技术性能列于表 1.2<sup>[11,12]</sup>。

从表 1.2 可以看出,四分之一平方相乘法精度高,频带宽,所以它是早期模块式乘法器采用的电路制式。本节将稍详细地介绍这种电路的工作原理。但是四分之一平方相乘法的技术参数,变跨式乘法器基本上都能达到,因而就逐渐被便于集成、成本较低的变跨导式乘法器取代了。三角波平均相乘也是早期的模块电路制式,其优点是精度高,因而本节也将讨论它的工作原理,但它的缺点是动态特性不好,而且成本高,所以已被性能优于它的对数-反对数式乘法器所取代。与上述两种模块电路制式比较,脉冲宽度高度调制式,对数-反对数式和变跨导式等三种电路具有明显的特点,除表 1.2 中所列出的以外,它们都可以实现单片集成。因此,在第二、三、四章,将分别对后三种相乘制式的电路进行深入的论述与分析。在本节,为了便于比较,只极其简要介绍它们的相乘原理。