



数字与模拟电子线路教学小丛书

模拟相乘器及其应用

周子文 编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书为数字与模拟电子线路教学小丛书之一,共五章。本书概述模拟相乘技术的基本原理,着重讨论线性化可变互导型模拟相乘器的电路原理、调整方法、参数测试及在模拟运算和通信电路中的应用。在论述上,力求避免繁琐的数学分析,加强物理概念的阐述,以利实用。

本书可供高等学校无线电技术、电子学、自动化等类专业师生及有关专业工程技术人员参考。

本书经高等学校工科电工教材编委会电子线路编审小组委托董在望同志主审,同意作为高等学校教学参考书出版。

数字与模拟电子线路教学小丛书

模拟相乘器及其应用

周子文 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

上海中华印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.25 字数 87,000

1983年3月第1版 1983年8月第1次印刷

印数 00,001—7,500

书号 15010·0489 定价 0.55 元

前 言

相乘器有模拟相乘器和数字相乘器两大类。这里，我们仅讨论模拟相乘器。

模拟相乘器是完成两个模拟量(电压或电流)相乘作用的电子器件。最初，模拟相乘器主要应用于模拟运算方面。近十年来，随着集成技术的发展，由于模拟相乘器性能，特别是其中工作频率的提高，使其应用日益扩展到无线电通信、电视、测量仪表等许多电子学领域，进行模拟信号处理。实质上，通信电路中的振幅调制、混频、倍频、同步检波、鉴相、鉴频、可控增益放大等，均可归结为两个信号相乘或包含相乘的过程。理论和实践证明，利用相乘器来完成这些电路功能，将比采用普通器件(半导体二极管和三极管等)所完成的同样功能更为有效，而且还有助于单元电路功能设计的灵活性和调整的方便性。正因为如此，模拟相乘器的研制，一直得到普遍重视。

实现相乘作用的方法很多，主要有：霍尔(Hall)效应相乘法、对数-反对数相乘法、四分之一平方相乘法、三角波平均相乘法、时间分割相乘法和可变互导相乘法等。其中，尤以吉尔伯特(Gilbert)在1967年首先提出的晶体管可变互导相乘原理^[1]最引人注目。自从可变互导相乘电路以单片集成微型组件形式问世以来，由于其成效卓著，已被公认为一种优良的通用型相乘器。国内这类相乘器的典型产品有BG314和FZ4等型号。这类可变互导型相乘器也正是本书的主要讨论对象。

为了进一步促进模拟相乘器的研究与应用,编者根据收集到的部分资料,结合工作中的初步体会,撰写成本书,供有关工程技术人员以及高校有关专业的师生参考。本书的叙述以基本原理、调整、测试及具体应用为主,讲究实用。由于篇幅的限制、对于较专门的一些理论分析和工艺设计问题,均未作讨论。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者予以指正。

在本书编写过程中,陈子敏讲师提供了许多有关资料,并对原稿提出了具体修改意见和建议,谢嘉奎副教授给予了很大鼓励与支持,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

编 者

1982年6月于南京工学院

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 模拟相乘器的基本概念	1
§ 1-2 理想相乘器的基本性质	5
1-2-1 静态特性	5
1-2-2 线性和非线性性质	8
§ 1-3 实际相乘器的误差	10
1-3-1 静态(直流)误差	11
1-3-2 动态(交流)误差	14
§ 1-4 模拟相乘技术的基本原理	15
1-4-1 霍尔效应相乘法	15
1-4-2 对数-反对数相乘法	16
1-4-3 四分之一平方相乘法	19
1-4-4 三角波平均相乘法	21
1-4-5 时间分割相乘法	24
1-4-6 可变互导相乘法	24
第二章 晶体管可变互导型模拟相乘器	29
§ 2-1 双平衡模拟相乘器	30
§ 2-2 线性化可变互导型模拟相乘器	33
2-2-1 线性化的基本原理	33
2-2-2 线性化双平衡可变互导型相乘器	37
第三章 集成模拟相乘器的技术参数及其测试	50
§ 3-1 静态参数	51
3-1-1 输出不平衡电流 $ I_{oo} $	51
3-1-2 输入失调电流 $ I_{ioX} $ 、 $ I_{ioY} $	52

3-1-3	输入电流 I_{BX} 、 I_{BY}	54
3-1-4	x 和 y 输入端馈通电压 V_{FX} 、 V_{FY}	55
3-1-5	输出精度 ε_{RX} 、 ε_{RY}	57
3-1-6	非线性失真特性	60
3-1-7	静态电流 I_{p0}	61
§ 3-2	动态参数	61
3-2-1	3dB 小信号带宽 F_{BW}	61
3-2-2	满功率响应 F_p	63
3-2-3	上升速率 S_R	64
3-2-4	建立时间 T_s	65
3-2-5	矢量误差	66
3-2-6	输入电阻和输出电阻	69
§ 3-3	共模特性	70
3-3-1	共模抑制比 CMRR	70
3-3-2	共模电压范围 CMV	71
3-3-3	电源灵敏度 PSRR	72
第四章	相乘器在模拟运算电路中的应用	74
§ 4-1	相乘和乘方运算	74
4-1-1	相乘运算	74
4-1-2	乘方运算	75
§ 4-2	相除运算	76
§ 4-3	平方根和均方根运算	83
4-3-1	平方根运算	83
4-3-2	均方根运算	87
§ 4-4	函数发生电路	88
第五章	模拟相乘器在通信电路中的应用	93
§ 5-1	振幅调制	93
5-1-1	普通振幅调制	94
5-1-2	双边带调制	96

第一章 概 述

§ 1-1 模拟相乘器的基本概念

模拟相乘器(以下简称相乘器)是一种完成两个互不相关的模拟信号(连续变化的电压或电流)相乘作用的电子器件。它通常具有两个输入端和一个输出端,是一个三端对网络。

对于一个理想的相乘器,其输出端的瞬时电压 $V_o(t)$ 仅与两个输入端的瞬时电压 $V_x(t)$ 和 $V_y(t)$ 的乘积成正比,而不包含有任何其他分量。输入电压 $V_x(t)$ 和 $V_y(t)$ 可以是任意的,即不仅在波形上,而且在振幅的大小与频率的高低(包括直流及其极性)上都没有任何限制。理想相乘器的输出特性方程可由下式表示:

$$V_o(t) = KV_x(t)V_y(t) \quad (1-1a)$$

式中, K 为相乘器的相乘增益, 其量纲为 V^{-1} 。在模拟运算中常取 $K = \frac{1}{10} V^{-1}$ 。相乘器的符号可用图1-1a形式表示。

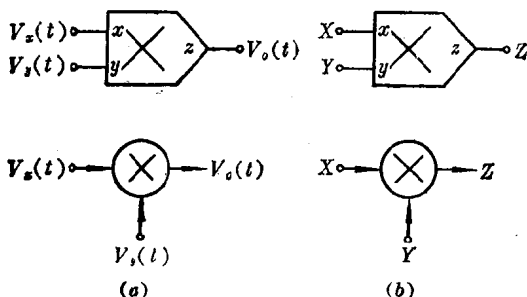


图 1-1 模拟相乘器符号图

为简便计, 将式(1-1a)简写为

$$Z = KXY \quad (1-1b)$$

于是, 相乘器的符号也可用图 1-1b 形式表示, 其中 X 、 Y 和 Z 分别表示相乘器的两个输入端(x 端和 y 端)的输入电压和输出端(z 端)的输出电压。

从相乘的代数性质出发, 相乘器有四个工作区域, 由它的两个输入电压极性来确定。根据两个输入电压的不同极性, 乘积输出的极性有四种组合。这可在图 1-2 所示的 X - Y 平

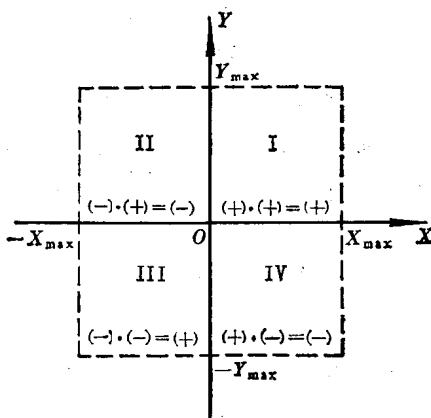


图 1-2 模拟相乘器的工作象限

面中用四个工作象限来具体说明。凡是能够适应两个输入电压的四种极性组合的相乘器, 称为四象限相乘器; 若一个输入端能够适应正、负两种极性电压, 而另一输入端只能适应单一极性电压, 则该相乘器称为二象限相乘器; 若相乘器在两个输入端分别限定为某一种极性的电压时才能正常工作, 它就是单象限相乘器。当 X 和 Y 均限定为正值, 单象限相乘器就工

作在第 I 象限。若两个输入电压中的一个限定为正值，另一个限定为负值，则该单象限相乘器只能工作在第 II 象限或第 IV 象限。

应当指出，任何一个单象限或二象限相乘器，如果适当增加一定的外接电路，就可以转换成四象限相乘器。图 1-3 是

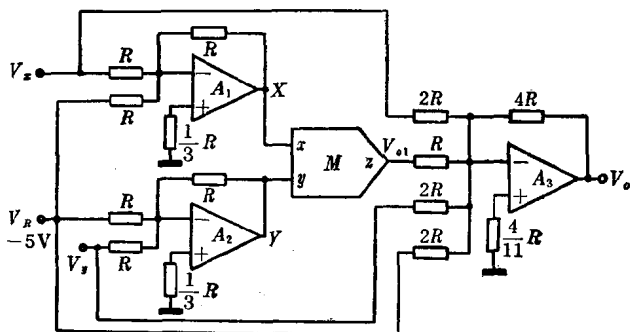


图 1-3 单象限相乘器转换为四象限工作原理图

一个单象限相乘器通过附加三个外接运算放大器转换成四象限相乘器的电路^[2]。图中， M 为工作在第 I 象限的单象限相乘器，其相乘增益 $K = \frac{1}{10} V^{-1}$ ，运算放大器 A_1 、 A_2 和 A_3 分别组成三个相加器， V_R 为参考电压。由图 1-3 不难看出，加到单象限相乘器两个输入端的电压分别为

$$X = -(V_R + V_x), Y = -(V_R + V_y) \quad (1-2)$$

式中， X 及 Y 均为正值，由合理选择 V_R 来保证。单象限相乘器 M 的输出电压为

$$V_{o1} = KXY = \frac{1}{10} [V_R^2 + (V_x + V_y)V_R + V_x V_y] \quad (1-3)$$

输出相加器 A_3 的输入电压为 V_{o1} 、 V_x 、 V_y 和 V_R 。根据图中所

标阻值,其输出电压为

$$\begin{aligned} V_o &= -(4V_{o1} + 2V_x + 2V_y + 2V_R) \\ &= -\frac{2}{5}[(V_R + 5)(V_R + V_x + V_y) + V_x V_y] \end{aligned}$$

显然,当选择参考电压 $V_R = -5\text{V}$ 时,电路的输出为

$$V_o = -\frac{2}{5}V_x V_y \quad (1-4)$$

根据式(1-2),为保证单象限相乘器 M 正常工作在第 I 象限,这时, X 和 Y 均为正值,其变化范围在 $0 \sim +10\text{V}$ 之间。当 $V_R = -5\text{V}$ 时,输入电压 V_x 和 V_y 的变化范围应限制在 $-5 \sim +5\text{V}$ 之间。根据式(1-4),当 V_x 和 V_y 在 $+5 \sim -5\text{V}$ 之间变化时,整个电路输出电压的相应变化范围为 $-10 \sim +10\text{V}$ 。(见 § 4-1)。因此,在一定条件下,图 1-3 所示电路为一四象限相乘电路。

图 1-4 示出了利用两个二象限相乘器组成一个四象限相乘器的方框图。图中, M_1 和 M_2 都是二象限相乘器,并假定它们的 y 端适应正、负两种极性的输入电压,而 x 端只适应正极性输入电压,且两个相乘器的相乘增益均为 K 。

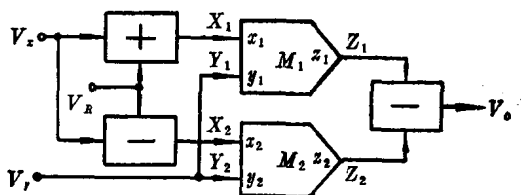


图 1-4 二象限相乘器转换成四象限相乘器方框图

在输入电压 V_x 为任意极性的情况下,为保证两个相乘器的 x 输入端电压恒为正值,图中引入了一个正的参考电压

V_R , 使 $V_R \pm V_x$ 恒为正值。这时, 两个二象限相乘器的输入电压分别为

$$Y_1 = Y_2 = V_y$$

$$X_1 = K_+(V_R + V_x)$$

$$X_2 = K_-(V_R - V_x)$$

上式中, K_+ 及 K_- 分别为相加器及相减器增益, 取 $K_+ = K_- = \frac{1}{2}$, 则

$$X_1 = \frac{1}{2}(V_R + V_x)$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(V_R - V_x)$$

两个相乘器的输出电压分别为

$$Z_1 = \frac{K}{2}(V_R + V_x)V_y, \quad Z_2 = \frac{K}{2}(V_R - V_x)V_y$$

经相减器相减, 若相减器增益为 1, 则输出电压为

$$V_o = \frac{K}{2}(V_R + V_x)V_y - \frac{K}{2}(V_R - V_x)V_y = KV_xV_y \quad (1-5)$$

式(1-5)指出, 只要引入的正参考电压 V_R 满足 $V_R > |V_x|$, 且 $V_R + |V_x|$ 在二象限相乘器容许的输入电压范围内, 则图 1-4 所示电路是一个四象限相乘器。

§ 1-2 理想相乘器的基本性质

1-2-1 静态特性

相乘器具有 x 及 y 两个独立的输入端, 不同于一般的放大器件, 因而它的静态特性表示法也就不同。根据理想相乘

器的输出特性方程式(1-1),其静态特性有两种表示。若以一个输入电压作为参变量,则相乘器输出电压与另一个输入电压的关系曲线,称之为四象限输出特性;若两输入电压相等或是极性相反但幅度相等,则相乘器输出电压与输入电压的关系曲线,称之为平方律输出特性。现分述如下:

1) 四象限输出特性

若相乘器两个输入信号中,有一个为恒定的直流电压 E ,根据式(1-1)得到

$$Z = (KE)X \quad \text{或} \quad Z = (KE)Y$$

上述关系曲线如图 1-5 所示。由图可知:

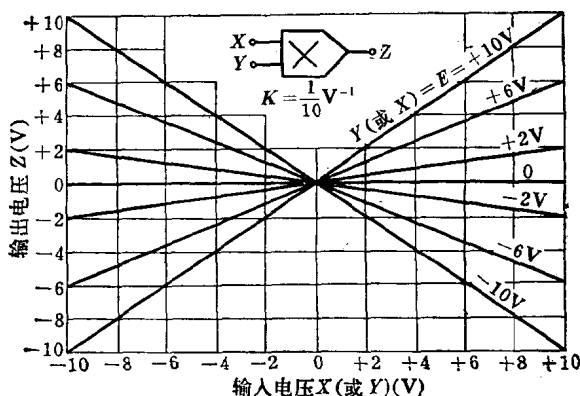


图 1-5 理想相乘器四象限输出特性

① 相乘器输入、输出电压对应的极性满足数学符号运算规则;

② 输入信号中有一个为零电压时,相乘器输出电压恒为零;

③ 输入信号中有一个为非零直流电压 E 时, 相乘器相当于一个放大器。放大器的增益与直流电压 E 有关。图 1-5 所示特性曲线族的斜率反映了放大器在不同 E 时的增益。

2) 平方律输出特性

若相乘器的两个输入电压相等, 则其输出电压为

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

若相乘器的两个输入电压幅度相等而极性相反, 则相乘器的输出电压为

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

上述关系曲线示于图 1-6。由图可见, 这是开口方向相反并相互切于坐标原点的两条抛物线。

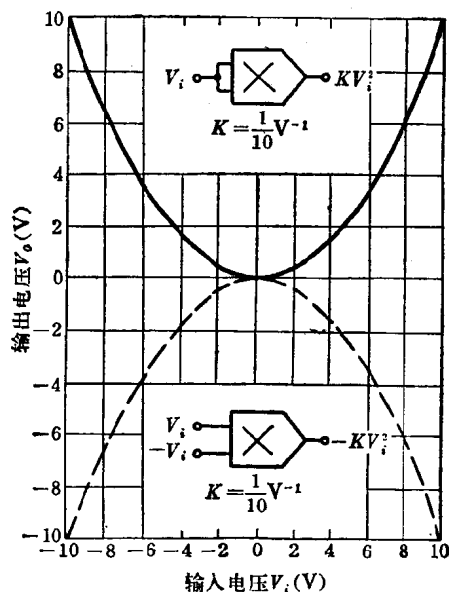


图 1-6 理想相乘器平方律输出特性

1-2-2 线性和非线性性质

所谓线性是指在增量输入电压激励下, 输出增量电压与输入激励的关系保持某一恒定比值的特性。众所周知, 任何一个线性系统(或一个线性元件)必定符合如下两个原理:

① 比例原理: 如果 Y 是激励 X 的响应; 则 kY 是激励 kX 的响应。其中, k 为常数。

② 叠加原理: 如果 Y_1 是激励 X_1 的响应, Y_2 是激励 X_2 的响应, 则 $(Y_1 + Y_2)$ 是激励 $(X_1 + X_2)$ 的响应。

根据上述原理, 区别一个系统(或元件)是线性的还是非线性的, 其重要标志是: 当几个不同频率的信号作用在系统(或元件)的输入端时, 其输出信号是否含有不同于输入信号频率的新频率分量。如果不包含新的频率分量, 则该系统(或元件)是线性的; 反之, 如果包含有任何新频率分量(例如, 它们各自的谐波或相互组合的组合频率分量), 则该系统是非线性的。其中, 新产生的频率分量的幅度不仅与系统(或元件)本身的非线性程度有关, 而且还与输入信号的幅度有关。

设作用于相乘器的两个输入信号电压分别为

$$X = V_x \cos \omega_x t, \quad Y = V_y \cos \omega_y t$$

根据输出特性方程式(1-1), 相乘器输出电压为

$$Z = KXY = \frac{1}{2}KV_xV_y[\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t]$$

显然, 相乘器输出电压中既无 X 信号的频率 ω_x 分量, 又无 Y 信号的频率 ω_y 分量, 只有它们的和频分量和差频分量。这些都是不同于输入信号的新频率分量。若 $\omega_x = \omega_y = \omega$, 则

$Z = \frac{1}{2}KV_xV_y[1 + \cos 2\omega t]$ 。相乘器输出电压中所包含的是

直流分量和输入信号频率的二次谐波分量。它们也都是不同于输入信号的新频率分量。可见,在一般情况下,相乘器是一个典型的非线性器件。

另外,即使输入信号为直流电压 E (即 $\omega=0$), 相乘器输出电压 $V_o=KE^2$ 不是比例于输入电压,而是比例于输入电压的平方。若输入电压 $V_i=E_1$, 则相乘器输出电压 $V_o=KE_1^2$; 若 $V_i=E_2$, 则 $V_o=KE_2^2$ 。但是, 当 $V_i=(E_1+E_2)$ 时, $V_o \neq K(E_1^2+E_2^2)$ 。也就是说,相乘器的响应特性,既不符合线性系统中的比例原理,也不符合叠加原理。

但是,在特定情况下,例如,当相乘器的一个输入电压为某一恒定值(譬如 $X=E$), 另一输入端加一交变电压(Y)时,则其输出电压为 $Z=(KE)Y$ 。如前所述,这相当于一个增益为 KE 的线性交流放大器。若 y 输入端电压为两个信号电压之和 $Y=Y_1+Y_2$, 则相乘器输出特性满足如下的叠加原理:

$$Z=KXY=KE(Y_1+Y_2)=KEY_1+KEY_2=Z_1+Z_2$$

式中, $Z_1=KEY_1$, $Z_2=KEY_2$ 。这说明在这种特定情况下,即只要两个输入中有一个是直流信号时,理想相乘器表现为一个线性器件。当然,其“线性”的含义,实质上仅是相乘器非线性本质的特殊情况。

必须强调,相乘器作为非线性器件,就其静态特性而言,仍具有一定的线性工作范围。但这里所谓的“线性”是指在这个工作范围内,相乘器能够实现理想相乘。具体地说,相乘器的静态输出特性 $Z=(KY)X$ [或 $Z=(KX)Y$], 在 X (或 Y) 变化时呈现为一条斜率为 KY 或 KX 的直线,如图 1-5 所示。在工程上往往引用静态四象限输出特性的线性工作范围这一指

标,对相乘器进行调试和测量(参看第三章)。

由于相乘器的非线性特性,正如第五章中将指出的那样,使它在通信电路中完成各种非线性电路功能方面获得了广泛的应用。

§ 1-3 实际相乘器的误差

实现相乘的方法多种多样,下节将对几种主要的相乘方法作扼要介绍。但是不论采用哪种相乘方法构成的相乘器,实际上都不可能是理想的。其主要问题是:

① 由于元件本身的非线性和不可避免地存在着噪声,使相乘器输入信号线性动态范围受到限制。

② 相乘器的带宽受到元件特性和工艺技术的限制。其输出电压与输入电压之间总是存在着相位差,并且它的数值随工作频率而变化,以致使相乘器不能对快速变化的信号进行相乘。

③ 对共模信号的抑制作用有限,不能适应足够宽的温度和电源电压的变化范围。

④ 相乘器的相乘精度受到内部电路的元件特性和工艺技术的限制。

上述这些问题,归根结蒂,主要是由于各种运用条件(如温度和电源电压变化、工作频率和输入电压的大小等)以及工艺技术、元件特性的不完善,引起了相乘器的乘积误差。这些误差可分为两大类:静态(直流)误差和动态(交流)误差。而且这些误差包括线性的和非线性的两部分。下面对乘积误差作一些说明。

1-3-1 静态(直流)误差

考虑到实际相乘器中的误差, 其输出静态特性方程通常可由下式表示:

$$Z = KXY \pm e(X, Y) \quad (1-6)$$

式中, $e(X, Y)$ 为总静态误差, 通常是两个输入电压 X 和 Y 的函数。它与非线性误差和增益误差等有关, 对于下面要讨论的可变互导型相乘器, 还与由于电路不对称引起的失调误差有关。计及各种误差源, 上式可进一步表示为

$$Z = (K \pm \Delta K) [(X \pm X_{os})(Y \pm Y_{os})] \pm Z_{os} \pm N(X, Y) \quad (1-7)$$

式中, ΔK 为相乘增益误差;

X_{os} 为 x 输入端的失调电压;

Y_{os} 为 y 输入端的失调电压;

Z_{os} 为相乘器输出端固有失调电压;

$N(X, Y)$ 为非线性失真引起的输出误差电压。

若假定相乘器的相乘增益误差 ΔK 由外电路校至最小值, 上式展开后, 忽略小量 $\Delta K X_{os}$ 、 $\Delta K Y_{os}$ 等, 可简化为

$$Z = KXY \pm \Delta KXY \pm KXY_{os} \pm KYX_{os} \pm KX_{os}Y_{os} \pm Z_{os} \pm N(X, Y) \quad (1-8)$$

上式右边第一项 KXY 是相乘器的理想输出电压。其余各项组成了实际相乘器输出电压的总误差值 $e(X, Y)$ 。为了对各误差项有较深入的理解, 下面对它们作一些讨论。

输出失调误差电压 $V_{oo} = \pm KX_{os}Y_{os} \pm Z_{os}$: 相乘器 x 和 y 两输入端与地短接后, 其输出电压即为输出失调误差电压 V_{oo} 。它由两部分组成, 其中 Z_{os} 是相乘器输出固有失调电压, $KX_{os}Y_{os}$ 是由 x 和 y 两输入端分别存在的失调电压 X_{os} 与