

# 电流模式信号处理电路技术的进展

孟相如, 魏伟

(空军工程大学 电讯工程学院数据通信系, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 电流模式信号处理电路技术是近年来模拟 VLSI 技术取得重要进展的领域之一,也是当今国际上的前沿课题。它的诞生和发展向传统的电压模式信号处理电路技术提出了强有力的挑战。综述了这一学科前沿的进展,指出了有关的研究课题,并展望了其应用前景。

**关键词:** 电流模式;信号处理;滤波器;神经网络;集成电路;电路理论与设计

**分类号:** TN710;TP18 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)01-0090-05

近年来,随着通信、计算机特别是超大规模集成电路(VLSI)技术的飞速发展,电流模式电路技术作为一种重要的,具有很大发展潜力的模拟信号处理技术<sup>[1~3]</sup>,引起了国际学术界的极大关注,并迅速成为国际电路与系统、微电子学、计算机科学和信息科学等领域的前沿课题和研究热点之一。

与通常的电压模式电路相区别,所谓电流模式电路是指电路的主要变量是以电流而不是以电压形式来表述。电流模式电路作为一种重要的模拟电路在许多年以前就已出现,但是长期以来,人们似乎总是喜欢从电压而不是从电流的角度来考虑问题。微电子技术的发展,使得象电压运放等压控 IC 基本积木块及其电路得到广泛地研究和应用,从而加强了人们头脑中电压主宰世界的认识。然而在实际问题中,却常常要求模拟电路系统具有良好的电流信号处理能力,许多宽带电路即是把电流而不是电压作为有源参量。此外,在长期的实践中,人们发现对于某些电路问题,以电流模式技术进行处理比用传统的电压模式技术具有更多的优点。另外,近年来随着 VLSI 技术的突飞猛进,整个电子系统的数模混合集成已成必然。随着 VLSI 工艺尺寸进入(深)亚微米区,高集成度导致高功耗,小尺寸将使得器件内电场强度增加,影响 MOSFET 工作,为适应这一变化和绿色环保工程的发展趋势,工业界提出了将电源标准从 5V 降到 3.3V 甚至更低。这样一来,VLSI 系统模拟电路中的电压动态范围、电压运放等都将受到影响。而电流模式电路,由于工作在电流量,因此 VLSI 电源标准的降低对其信号动态范围影响不大。此外,电流模式电路还具有电路结构简单、频带宽和寄生电容影响小等特点,从而为高速度、高密度和低功耗数模混合集成电路系统的 VLSI 实现提供了一条新的途径。

目前,模拟集成电路的设计由于电流模式电路技术的发展和应用而获得了新的生长点,VLSI 的最新进展也使得开发和实现电流模式信号处理技术成为可能。电流模式技术和方法对于诸如放大器、变换器、A/D 和 D/A、采样数据和连续时间滤波器、自校正和编程系统、过采样技术、人工神经网络和神经计算机等许多问题提供了颇具吸引力的途径<sup>[1~5]</sup>,并将对微电子学与信息科学、计算机科学与人工智能、控制与机器人等领域的发展产生重要的影响。电流模式信号处理可分为连续时间和模拟采样数据两大类。这其中,电流传输器(CC)、电流反馈运算放大器(CFA)等作为连续时间电流模式信号处理电路中的基本积木块有着广泛的应用,它们的使用使得 VLSI 信号处理面貌为之一新,并显示出很大的潜力。近年来诞生的开关电流(SI)技术是一种新的模拟采样数据信号处理技术,它克服了现有开关电容(SC)电路需要线性浮地电容而无法适用于标准 VLSI 工艺的困难,从而改变了开关电容技术主宰模拟信号处理的局面,成为人们努力的前沿课题,具有强劲的发展势头。此外,BiCMOS 技术、GaAs 技术等为低噪声、高速度、高频率电流模式信号处理技术的

收稿日期:2000-01-12

基金项目:“空军拔尖人才攀高计划”专项基金资助项目

作者简介:孟相如(1963-),男,教授(博士)

发展开辟了新途径。人们预计电流模式模拟信号处理与IC设计技术的发展将会改变目前电压模式模拟信号处理统治VLSI的局面,形成与其共同发展、互为补充、互相兼容的新格局。

本文旨在对这一学科前沿——电流模式信号处理电路技术的发展现状作一评述,讨论电流模式信号处理与集成电路设计的基本方法与特点,展望其发展前景并指出有关前沿研究课题。

## 1 滤波电路

### 1.1 连续时间滤波器

应该指出,电流模式信号处理是与滤波电路技术的发展密切相关的。在过去的几十年中,滤波器的小型化微型化社会急需、滤波器的电路实现及其工艺技术的改革与进步极大地促进了滤波电路技术的发展。其间,有源RC滤波器、数字滤波器和开关电容滤波器的发展起着重要作用。后二者虽为集成滤波器,但是随着滤波器的广泛使用,它们的一些弱点逐渐显露出来,尤其是其固有特性限制了它们在高频段的应用。因此,在80年代初期,全集成连续时间滤波器诞生并得以迅速发展,这方面的代表有Banu和Tsvividis于1983年提出的以电压运放为基块的全集成连续时间MOSFET-C滤波器<sup>[6]</sup>和Khorramabadi与Gray于1984年提出的以跨导运放为基块并采用CMOS工艺的全集成连续时间OTA-C滤波器<sup>[7]</sup>。近年来,随着VLSI的发展和电流模式技术的崛起,全集成连续时间电流模式滤波器由于具有过去电流模式分立元件综合的基础,因此后来居上,已成为国际学术界所关注的前沿课题。全集成连续时间电流模式滤波器具有如下特点:(1)工作频率高;(2)为流控或压控系统,调节方便;(3)电路设计简单,集成度高;(4)可与现有VLSI技术兼容。

双二次滤波器节可作为单个滤波器使用,又可级联设计高阶滤波器,因此是滤波器设计的一个重要方面。早期的基于第二代电流传输器(CCI)的滤波器研究即是从双二次节开始的,近年来的通用双二次节设计更注重减少器件数目和使用接地电容。全集成方面的工作主要体现在以工作在线性区的MOSFET取代一般电阻,并致力于消除MOS器件的非线性,如采用四管MOS电阻电路等,以设计实现适于VLSI工艺的各种滤波电路新结构,如基于CC和CFA等的滤波电路<sup>[8,9]</sup>,电子调谐是其特色之一。此外,平衡和非平衡结构也是感兴趣的内容之一。

电流模式连续时间高阶滤波器的实现方法与一般有源RC滤波器相类同,主要有级联法、无源RLC梯形网络的有源模拟、多环反馈法和转移函数的直接综合法。级联法实现电路结构简单,级与级之间影响较小,每个二次节可单独调谐,缺点是灵敏度较高。无源LC模拟和多环反馈拓扑法的最大特点是灵敏度低,有利于减小调谐误差。实际上,对于LC梯形网络,可用各种阻抗变换器对L、FDNR等直接进行模拟,所得滤波器与跳蛙实现结果相类同。如Senani<sup>[10]</sup>采用新的阻抗定标法,仅用无匹配元件单CC电路模仿有损电感,得到了一四阶Butterworth低通滤波器。还有运用信号流图方法进行转移函数的直接综合和滤波器的跳耦结构设计的<sup>[11,12]</sup>。此外,Allostot<sup>[13]</sup>所提出的电流模式BiCMOS技术在低噪声、高增益方面也颇具特色;由电流镜构造电流模式积分器进行全集成连续时间滤波器实现也是近年的热点之一。

### 1.2 开关电流滤波器

开关电流(SI)电路技术是继开关电容(SC)之后出现的又一新的模拟采样数据信号处理技术。纵观80年代,开关电容电路在模拟采样数据信号处理领域内一直占有主导地位,进入90年代,这种主导地位受到以数字CMOS工艺为基础的开关电流技术的强有力的挑战。与开关电容相比,开关电流具有许多独特的优点:(1)开关电流不需要开关电容电路那样的精确线性浮地电容,是一种完全采用标准CMOS工艺的VLSI,因而适应了当代高密度数模混合集成电路系统的发展趋势。(2)开关电流电路工作于电流模式,这样就避免了由于VLSI的电源标准降低而给电压模式电路带来的诸多不便,使得信号动态范围小等问题得以克服。(3)开关电流电路仅以简单的开关电流镜等为基本单元电路来完成所有的信号处理工作,不像SC电路那样受运放有限增益带宽乘积影响,因而可望工作于更高的频率和更宽的频带。正是由于以上特点,使得开关电流一出现就立即引起了学术界的高度重视,并迅速成为继开关电容之后模拟信号处理的又一热点。

开关电流电路中一个很重要的内容就是SI基本单元电路的研究与探讨,从最初的第一代电流跟踪与保持电路,到仅采用单管的电流复制器、动态电流镜,以及级联、共栅源和可调节的共栅源电流记忆器<sup>[2,3]</sup>,还有最近提出的S<sup>2</sup>I技术<sup>[14]</sup>等。单元电路的精度和性能不断提高,从而为SI技术的发展奠定了坚实的基础。

在开关电流技术的滤波应用方面,多数为对SI滤波器设计方法的研究与探讨,其中具有代表性的有:

(1)以 Hughes 等为代表的<sup>[15,16]</sup>,从 SC 电路出发,采用对应功能块置换的方法设计 SIF,称为间接设计法。(2)以 Allostot 和 Fiez 等为代表的<sup>[17~19]</sup>,从无源 RLC 出发,采用 S-Z 变换并模拟原型电路的方法设计 SIF,称为直接设计法。以上两种设计法各具特色,并都有近似和精确之分。间接设计法由于以 SCF 为中间环节,因而有许多现成的 SCF 可资利用,如 SC 原型电路选择得当,则可缩短设计周期。但是,SIF 与 SCF 毕竟是两种工作于不同模式的电路,制作工艺也存在一定差异,因此 SCF 的某一种优化网络结构,对 SIF 来讲就不一定那么合适,况且也并不是所有的 SIF 都有对应的 SC 原型(或反之)。直接设计法由于是以无源原型为基础(从而保证其低灵敏度),它不受 SC 电路结构的制约,并可充分发挥 SI 电路特色,因而较之间接设计法更加灵活多样。但是,它的设计周期一般较长,另外,要实现精确设计,构造合适的、功能较强的基本模块至关重要,而这恰恰又是困难所在。此外,还有参照数字滤波器实现法进行开关电流 IIR 及 FIR 滤波器、数字可编程滤波器和波模拟滤波器设计的<sup>[3]</sup>。

在非理想因素方面,Fiez 等首先作了探讨<sup>[17]</sup>,目前对器件失配和钟馈效应的研究已有一些进展<sup>[3,20~22]</sup>,从而为 SI 技术实用化开辟了道路。为进一步提高速度和频率,Toumazou 等在 GaAs 技术方面作了许多努力<sup>[2,21]</sup>。另外,开关跨导(ST)技术也是很有发展潜力的研究课题<sup>[23]</sup>。

## 2 非线性信号处理与非滤波应用

随着科学技术的发展,非线性信号处理的重要性日益增加,近年来得以迅速发展的耗散结构理论,突变理论、协同学、混沌动力学与奇怪吸引子、人工神经网络等就是非线性处理系统的范例,尽管近年来线性模拟 VLSI 的设计已取了巨大的进展,非线性模拟 VLSI 的设计却受到相当少的注意,唯一的例外就是 A/D 和 D/A,将模拟 VLSI 的工作扩展到非线性领域,不仅大大增强了信号的处理能力,而且提供了信号处理的新途径。Toumazou 等提出了用电流传输器实现的通用检波放大器<sup>[2]</sup>,传统的检波器设计由于多反馈电路中电压运放的有限摆率、电阻的紧匹配等,因而存在严重的非线性失真问题,而电流传输器检波器则具有较大的动态范围和较高的工作频率。基于电流传输器的非线性综合方法,可用于实现非线性函数等,基本积木块包括乘法器、除法器、指数器和对数器等,为非线性信号处理器的实用化提供了新的手段。基于电流镜和开关电流技术的 A/D 与 D/A 变换器、调制器等的电流模式实现也是近年来的热点课题之一<sup>[24,25]</sup>。此外,还有基于单 CC 和 CFA 的电流及电压模式振荡器、开关电流振荡器等实现技术<sup>[26,27]</sup>,从而为振荡器的单片集成提供了新的途径。

## 3 电流模式神经网络

人工神经网络(ANN)理论是近几年来飞速发展的一个科学领域,由于 ANN 具有连续时间非线性动力学、大规模并行分布处理、网络的全局作用与集体计算、高度的容错性和学习联想能力等特征,人们普遍认为它将对信息科学、计算机与 AI、控制与机器人、微电子学与 VLSI 技术等产生革命性的影响,而 ANN 的实现则是其应用的基础。就目前的技术水平而言,与光学、分子实现相比较,电子神经网络的 VLSI 实现是最现实和最实用的途径,已显示出旺盛的生命力。这其中,与电压模式电路实现相区别,用电流模式技术进行神经网络的 VLSI 实现是较新颖的一种,并且 ANN 很关键的也是计算工作量最大的加权求和运算亦非常适宜于用电流模式技术实现。采用这种技术就无需用到 VLSI 技术中较难实现的电阻,使得单个神经元的电路复杂度大大降低,从而为高速度、高密度和低功耗 ANN 芯片的实现开辟了一条新的有效途径<sup>[28~36]</sup>。

基于电流模式技术的神经网络实现方法主要有:(1)用一般电流模式技术实现突触权矩阵的学习;(2)用模拟乘法器实现突触连接;(3)用电流镜技术实现突触连接和 CMOS 神经振荡器;(4)ANN 的 IC 基本积木块实现,包括编程突触、阀处理单元、电流模式神经元等。总之,通过电流控制器件可实现权值的学习与突触编程,它比一般的电压模式技术具有独特的吸引力,有关这方面的研究还都刚刚开始。电流模式神经网络结构级联方便,能够组成大规模神经矩阵,很适合于集成。由 Borgstrom 等<sup>[28]</sup>提出的采用可编程阀压和浮栅工艺的可编程电流模式 ANN,可方便的实现前向型和反馈型网络。此外,也可用电流模式模拟乘法器实现 ANN、CMOS 神经振荡器和混沌神经网络等<sup>[30~31]</sup>。

值得特别关注的是,由 UC Berkeley 的 L. O. Chua 教授等提出的点格神经网络(CNN),由于是一种局

部联接的阵列系统,因而从硬件实现的角度来讲比其它全连接 ANN 更具特色,非常适合于 VLSI 实现,近年来得到了迅速的发展。用电流模式技术实现 CNN 具有电路结构简单、功耗低、集成度高、速度快等优点。采用连续和离散技术,以及将原电压域模型直接映射到电流量域来进行 CNN 的电流模式 VLSI 设计<sup>[32~34]</sup>,单元电路所用 MOSFET 数比电压模式要少得多。CNN 的电流模式芯片已有报道<sup>[35]</sup>,并且随着新的硬件实现技术的不断涌现,CNN 通用模逻辑计算机将会有有一个大的发展<sup>[36]</sup>。

## 4 展望

VLSI 的突飞猛进、电压模式技术的局限性和现实问题的需要使得电流模式 VLSI 技术得以迅速发展,并在许多领域获得广泛应用。但总的来讲,这一技术还问世不久,还有待人们去努力探索和研究。目前,有关前沿课题包括:

- (1) 电流模式技术的基本理论与方法体系的研究和建立;
- (2) 电流模式 VLSI 基本积木块包括集成传输器、电流反馈放大器、电流模式运算放大器等的设计与研制;
- (3) 电流模式 VLSI 技术在连续时间滤波器、采样数据滤波器、非线性模拟信号处理与非滤波应用,如 A/D、D/A、自校正系统、过采样技术、编程系统、集成传感器等中的应用;
- (4) 电流模式神经网络及神经计算机的设计与实现;
- (5) 电流模式技术与电压模式技术兼容性及其基于标准数字 CMOS 工艺、GaAs 技术、BiCMOS 技术等电流模式 VLSI 的设计、布线与制造。

总之,电流模式信号处理电路技术为各种模拟 VLSI 积木块的建立开辟了新的途径,为连续时间和采样数据模拟信号的处理提供了新的方法,从而更宜于使数/模混合电路系统集成于同一芯片上并获得良好的兼容性与性能/价格比,同时将对未来 VLSI 技术的发展和應用产生重要的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Toumazou C, Lidgey F J, Wilson B, et al. Special issues on current-mode analogue signal processing[J]. IEE Proc. -G, 1990, 137(2): 61~184.
- [2] Toumazou C, Lidgey F J, Haigh D G, et al. Analogue IC design: The current-mode approach[M]. London: Peter Peregrinus Ltd. 1990.
- [3] Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C, et al. Switched-currents: an analogue technique for digital technology[M]. London: Peter Peregrinus Ltd. 1993.
- [4] Ng A E J, Sewell J I. N-path and pseudo-N-path cells for switched-current signal processing[J]. IEEE Trans, 1999, 46(9): 1148~1160.
- [5] Shana'a O, Schaumann R. Low-voltage high-speed current-mode continuous time IC filters with orthogonal  $\omega_0$ -Q tuning[J]. IEEE Trans, 1999, 46(4): 390~400.
- [6] Banu M, Tsvividis Y. Fully-integrated active-RC filters in MOS technology[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 1983, 18(6): 644~651.
- [7] Khorramabadi H, Gray P R. High frequency CMOS continuous-time filters[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 1984, 19(6): 939~948.
- [8] 何怡刚, 江金光, 吴杰, 等. 通用有源电流模式滤波器[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 21~23.
- [9] 孟相如, 虞厥邦, 于志红. 基于电流反馈放大器的全集成连续时间双二次滤波器. 系统工程与电子技术, 1997, (7): 52~56.
- [10] Senani R. Novel higher-order active filter design using current conveyor[J]. Electron. Lett, 1985, 21(22): 1055~1057.
- [11] Gunes E O, Anday F. Realisation of nth-order voltage transfer function using CCI+ [J]. Electron. Lett, 1995, 31(13): 1022~1023.
- [12] 韩庆全, 郭静波. 电流模式全极点跳耦结构滤波器[J]. 电子科学学刊, 1994, 16(5): 505~512.
- [13] Allstot D J, Fiez T S, Eahman J. BiCMOS circuits for analog signal processing applications[A]. In: Proc. IEEE ISCAS[C]. 1992: 2687~2690.

- [14] Hughes J B, Moulding K W. S<sup>2</sup>I: A two-step approach to switched-currents[A]. In: Proc. IEEE ISCAS[C]. 1993:1235~1238.
- [15] Hughes J B, Machbeth IC, Pattullo D M. Switched-current filters[J]. IEEE Proc. G, 1990, 137(2):156~162.
- [16] 吴杰, 洪毅. 级联开关电流滤波器设计[J]. 电子科学学报, 1992, 14(6):625~630.
- [17] Fize T S, Liang G J, Allstot D J. Switched-current design issues[J]. IEEE J., 1991, 26(3):192~202.
- [18] 孟相如, 邱关源. 开关电流梯形滤波器的双线性变换设计[J]. 电子学报, 1994, 22(10):85~88.
- [19] 孟相如, 邱关源. 耦合二次节型开关电流带通滤波器的改进双线性设计[J]. 通信学报, 1995, 16(6):33~39.
- [20] 孟相如, 于志红. 开关电流电路中电流馈入效应的研究[J]. 空军电讯工程学院学报, 1999, 8(1):43~47.
- [21] Xiao S, Toumazou C. Second generation single and two-step GaAs switched-current cells[J]. Electron. Lett., 1994, 30(9):681~683.
- [22] Helfenstein M, Moschytz G S. Clockfeedthrough compensation technique for switched-current circuits[J]. IEEE Trans, 1995, 42(3):229~231.
- [23] Toumazou C, Battersby N C. Switched-transconductance techniques[J]. Electron. Lett., 1993, 29(1):1816~1818.
- [24] Tan N, Jonsson B, Eriksson S. 3.3V 11bit delta-sigma modulator using first-generation-SI circuits[J]. Electron. Lett., 1994, 90(22):1819~1821.
- [25] 凌雯亭, 秦巍, 胡波. CMOS 电流控制电流转换器及其应用[J]. 电子学报, 1999, 27(8):34~37.
- [26] Wu D S, Liu S I, Hwang Y S, et al. Multiphase sinusoidal oscillator using CFOA pole[J]. IEE Proc. -Circuits Devices Syst, 1995, 142(1):37~40.
- [27] Kobayashi A. State variable sinusoidal switched-current oscillator[J]. Electron. Lett., 1991, 27(6):489~491.
- [28] Borgstrom T H, Ismail M, Bibyk S B. Programmable current-mode network for implementation in analogue MOS VLSI[J]. IEE Proc. G, 1990, 137(2):175~184.
- [29] 栗国星, 石秉学. 两种改进的电流型 WTA 电路[J]. 电子学报, 1999, 27(11):37~40.
- [30] Linares-barranco B. A novel CMOS analog neural oscillator cell[A]. In: Proc. IEEE ISCAS[C]. 1989:794~797.
- [31] Delgado-Restituto M, Rodriguez-Vazquez A. CMOS current-mode chaotic neurons[A]. In: Proc. IEEE ISCAS[C]. 1994:499~502.
- [32] Varrientos J E. A current-mode cellular neural network implementation[J]. IEEE Trans, 1993, 40(3):147~155.
- [33] 孟相如, 虞厥邦. 连续时间点格神经网络的电流模式 VLSI 实现[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(6):635~638.
- [34] 孟相如, 曹磊, 虞厥邦. 离散时间点格神经网络的开关电流电路实现[J]. 电路与系统学报, 1997, 2(1):36~39.
- [35] Sarbeni F, Bonauto V. A fully digitally programmable CNN chip[J]. IEEE Trans, 1995, 42(11):741~745.
- [36] Roska T, Chua L O. The CNN universal machine. An analogic array computer[J]. IEEE Trans, 1993, 40(3):163~173.

## Advances on Current-Mode Signal Processing Circuit Technology

MENG Xiang-ru, WEI Wei

(Dept. of Data Communication of the Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Current-mode signal processing circuit technology is one of important progressive fields in analogue VLSI technologies in recent years, and it is also an international frontier subject. The generation and development of the current-mode technology has led to an exciting challenge to the traditional voltage-mode counterpart. This paper reviews some advances on the current-mode signal processing techniques. Comments for further research efforts and application prospects of the field are presented.

**Key words:** Current-mode; Signal processing; Filters; Neural networks; Integrated circuits; Circuit theory and design