

TL环路在电流模式电路中的分析及其应用研究

来新泉^{1,2}, 杜宇^{1,2}, 钟龙杰^{1,2}, 丁睿^{1,2}

(1.西安电子科技大学电路CAD研究所 西安 710071; 2.西安电子科技大学超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室 西安 710071)

【摘要】电流模式电路即处理电流信号的电路,相比于电压模式电路它在速度、带宽、动态范围等方面具有优良的性能,近年来得到了快速发展。跨导线性环路理论是分析电流模式电路的一种快速而有效的手段,该文首先介绍了跨导线性的基本原理,之后讲解了双极型晶体管跨导线性环路原理,并推广到MOS晶体管构成的跨导线性环路。最后给出了跨导线性环路在电流模式电路中的典型应用。

关键词 模拟集成电路; 电流模式电路; 神经网络; 跨导线性; 跨导线性环路
中图分类号 TN433 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.002

Analysis of Translinear Loop in Current Mode Circuits and Its Application

LAI Xin-quan^{1,2}, DU Yu^{1,2}, ZHONG Long-jie^{1,2}, and DING Rui^{1,2}

(1. Institute of Electronic CAD, Xidian University Xi'an 710071;

2. Key Laboratory of High-speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract Current mode circuit is a circuit which is used to process the current signal. Compared with the voltage mode, it has excellent performance in speed, bandwidth and dynamic range, so it has been developed rapidly in recent years. Translinear loop (TLL) theory is a rapid and effective means for analyzing current mode circuits. This paper first introduces the basic principle of translinear circuits. Then the bipolar transistor translinear loop principle is extended to MOS transistors. At last, the typical applications of translinear loop in current mode circuits are given.

Key words analog integrated circuit; current mode circuit; neural network; translinear; translinear loop

电流模式电路在许多年前就已出现,长期以来人们只习惯对电压信号进行处理,而忽视对电流信号的处理。近年来随着集成产业的迅速发展,在实际问题中常常要求模拟电路系统具有良好的电流信号处理能力,许多宽频带电路也需要把电流而不是电压作为有源参量^[1]。此外,与电压模式电路相比,电流模式电路具有频带宽、动态范围大、高频性能好、非线性失真小、工作电压低等优点,电流模式技术比传统的电压模式技术具有更多的优点,目前已成为学术界研究的热点^[2]。TL跨导线性环路就是电流模式电路的一个重要应用。

跨导线性(transconductance linearity, Translinear)是由文献[3-4]提出的。众所周知,双极晶体管(bipolar junction transistor, BJT)的跨导与发射极电流成正比,才诱使人们创造出“跨导线性”这个专业术语。虽然跨导线性原理是基于二极管和双极晶体管的特

性提出来的,但它可以推广到具有指数伏-安特性的其他器件,如工作于阈值区的MOS晶体管。

本文讲述了跨导线性原理,并分别用双极型晶体管和MOS晶体管构成的电流模式电路来阐述“跨导线性环路”,这类电路在现代模拟集成电路中并不少见。从线性到非线性模拟集成电路中,常被用作核心电路单元。因此,跨导线性原理是分析模拟集成电路的有力工具。跨导线性原理可以简化非线性电路的计算,它既适用于小信号,又适用于大信号。另外,跨导线性环路要求晶体管的工作温度相同,并且器件的几何结构和特性等也要严格匹配,所以只能在单片集成电路中实现。

1 跨导线性环路

跨导线性环路(translinear loop)是指那些根据跨导线性原理设计出来的电路,或者可用跨导线性原

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61106026); 中央高校基本科研业务费(JB150222)

作者简介: 来新泉(1963-),男,博士,教授,主要从事电子系统集成与数模混合专用集成电路设计方面的研究。

理进行分析的电路。因为跨导线性环路的输入输出均以电流为参量, 所以属于电流模式电路的范畴。

在实际应用中, 由TL环路构成的线性和非线性电流模式电路, 必须遵循以下两个基本原则:

1) 在TL环路中必须包含有偶数个(至少两个)正偏发射结;

2) 顺时针方向(clock wise, CW)排列的正偏发射结数目, 与逆时针方向(counter clock wise, CCW)排列的正偏发射结数目必须相等。

1.1 双极型TL环路

跨导线性原理最初是基于二极管和双极晶体管提出的。图1为一种基于双极互补集成工艺的CC I实现电路, 其中VT₁~VT₄可看作TL环路, 利用它可推导出跨导线性环路中各晶体管电流间的约束关系。

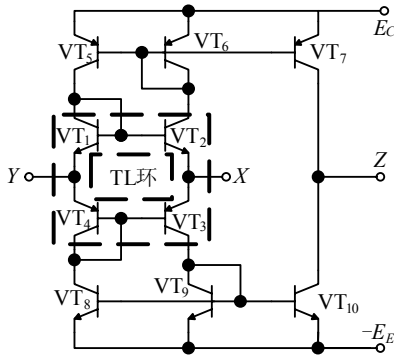


图1 基于双极互补集成工艺的CC I实现电路

跨导线性环中的各BJT管偏置在正偏放大区, 所以环中第*i*个晶体管集电极电流可表示为:

$$I_{Ci} = I_{Si} \exp\left(\frac{U_{BEi}}{U_T}\right) \tag{1}$$

式中, $U_T = kT/q$ 为热电压; I_{Si} 为反向饱和电流; U_{BEi} 为基射结电压。上式经变形可得到:

$$U_{BE} = U_T \ln\left(\frac{I_{Ci}}{I_{Si}}\right) \tag{2}$$

这是环中第*i*个晶体管正偏发射结的电压表达式。在环路内, CW的正偏结数必须等于CCW的正偏结数, 根据KVL有:

$$\sum_{CW} U_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} = \sum_{CCW} U_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \tag{3}$$

利用对数性质, 上式可表示为:

$$\prod_{CW} \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} = \prod_{CCW} \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \tag{4}$$

在相同的工艺条件下, 反向饱和电流 I_{Si} 与发射结的面积成正比, 即:

$$I_{Si} = A_i J_{Si} \tag{5}$$

式中, A_i 为第*i*个结的发射区面积; J_{Si} 为由几何尺寸决定的发射结反向饱和电流密度。一般认为 J_{Si} 是相等的, 由式(5)可导出:

$$\prod_{CW} \frac{I_{Ci}}{A_i} = \prod_{CCW} \frac{I_{Ci}}{A_i} \tag{6}$$

式中, I_{Ci}/A_i 恰好是发射极的电流密度, 以另一种形式表达TL环路原理:

$$\prod_{CW} J_{Ci} = \prod_{CCW} J_{Ci} \tag{7}$$

当考虑到TL环路中各晶体管发射区的面积比时, 式(6)又可分别表示为:

$$\left(\prod_{CW} \frac{1}{A_i} \prod I_{Ci}\right) = \left(\prod_{CCW} \frac{1}{A_i} \prod I_{Ci}\right) \tag{8}$$

$$\prod_{CW} I_{Ci} = \lambda \prod_{CCW} I_{Ci} \tag{9}$$

式中, TL环路各发射结发射区面积的比例系数 $\lambda = \prod_{CW} A_i / \prod_{CCW} A_i$, 为发射结面积因子。

在TL环路中, 多采用“匹配”技术, 在电路结构上尽量对称, 器件之间发射区面积比是很重要的参数。应用发射区面积比, 可得到预期的电路性能和效果, 能降低或消除由于结电阻所产生的误差, 当电流密度相等时, 发射区面积比即为输出电流比。

另外, 在TL环路的设计和制造工艺中, 发射结面积因子 λ 应尽可能接近1, 但并不要求所有发射结面积都相等。实际上, 各管的发射结面积可以为不同的数值, 但必须尽可能保证 λ 为1, 这样能减小因结电阻而引起的误差, 提高精度和温度的稳定性能。

在设计和制造TL环路中的BJT时, 若不能保证 λ 为1, 则发射区面积比的误差就会等效为结电压 U_{BE} 的失调。这会引入集成电路芯片内的热梯度, 导致 U_{BE} 的温度失调。分析指出, 在TL环路中, 只有使 λ 精确为1时, 才能使设计的电路具有高精度和高温度稳定性^[5]。

当 $\lambda=1$ 时, 跨导线性环路原路可以描述为: 在含有偶数个正偏发射结的闭合环路中, 如果顺时针方向与逆时针方向正偏结的数目相等, 那么顺时针方向正偏发射结的电流密度之积等于逆时针方向正偏发射结电流密度之积。

1.2 MOS型TL环路

跨导线性原理同样适用于MOS晶体管构成的环路。图2为MOS型TL环路图, 其中 $M_1 \sim M_4$ 可看作TL环路。在MTL^[6](MOS translinear)环路中, 栅源串联在一起, 并且顺时针与逆时针方向的晶体管数目必须相等。

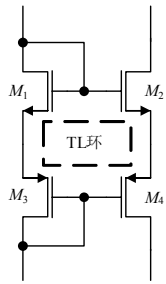


图2 MOS型TL环路

通常MOS管工作在饱和区和强反型区,但随着工作电压的越来越低, MOS管也可以工作于弱反型或线性区。到目前为止,在一个TL环中没有同时出现过工作在弱反型区和强反型区的晶体管,因此要分析的是工作于弱反型区的MTL环或者工作于强反型区的MTL环。由于非线性、低增益、漏极电压不仅和栅源电压有关,而且还和漏源电压有关等不利因素,因此除了TL环工作在线性区的晶体管很少被用到。所以只用考虑两种MTL电路:弱反型区的饱和MOS管跨导线性环电路和强反型区的饱和MOS管跨导线性环电路。

在MTL环路中,根据KVL可得:

$$\sum_{\text{CW}} V_{\text{gs}} = \sum_{\text{CCW}} V_{\text{gs}} \quad (10)$$

工作于弱反型区的MTL环路原理如下:

$$\sum_{\text{CW}} K \ln(I_d / I_{\text{DO}}) = \sum_{\text{CCW}} K \ln(I_d / I_{\text{DO}}) \quad (11)$$

式中, $K=nU_T$, n 为与衬底调制效应有关的指数因子,典型的 $n \approx 1 \sim 3$, $U_T=kT/q$; I_d 和 I_{DO} 分别是漏极电流和特征电流。利用对数性质,式(11)可以变形为:

$$\prod_{\text{CW}} I_d = \prod_{\text{CCW}} I_d \quad (12)$$

工作于强反型区的MTL环路原理如下:

$$\sum_{\text{CW}} \left(V_{\text{TH}} + \sqrt{\frac{I_d}{\beta}} \right) = \sum_{\text{CCW}} \left(V_{\text{TH}} + \sqrt{\frac{I_d}{\beta}} \right) \quad (13)$$

式中, V_{TH} 为阈值电压; $\beta = \mu_n C_{\text{ox}} W/L$ 。由于顺时针与逆时针方向的MOS管个数相等,假设MOS管完全匹配(单片结构与温度相同),并且忽略因体效应而引起的 V_{TH} 改变,则等式两边的 V_{TH} 可抵消。另外,参数 μ 和 C_{ox} 也相等,因此可得:

$$\sum_{\text{CW}} \sqrt{\frac{I_d}{W/L}} = \sum_{\text{CCW}} \sqrt{\frac{I_d}{W/L}} \quad (14)$$

式中, W/L 不受温度和工艺的影响,只取决于设计者所设计的尺寸。

然而,工作于强反型区的MOS管电流-电压特性曲线不是单纯的平方关系:

$$I_d = 0.5\beta(V_{\text{gs}} - V_{\text{TH}})^n \quad (15)$$

所以强反型区MTL电路的原理变形为:

$$\sum_{\text{CW}} (I_d)^{\frac{1}{n}} = \sum_{\text{CCW}} (I_d)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

2 TL环路在电流模式电路中的应用

TL环路构成的电流模式电路在现代模拟集成电路中并不少见,从线性到非线性模拟集成电路中,常被用作核心电路单元。目前已被广泛应用于诸多领域。

2.1 电流模式标准有源器件

电流模式标准有源器件因电流反馈带来的速度高、频带宽、非线性失真小等优良性能,将它与其他电子元件组合,可以十分简便地构成各种特定的电路结构,实现多种模拟信号处理能力。目前,几种常用电流模式标准器件包括:电流传输器(second generation current conveyor, CCII)、跨导运算放大器(operational transconductance amplifier, OTA)、电流模乘法/除法器、电流反馈运算放大器(current feedback amplifier, CFA)、混频器以及电压电流转换器等^[7-12]。特别地, OTA、CFA和CCII都是近年来研究和发展的主流。

电流传输器是通用性很强的标准器件,将它和其他电子元件组合,可以构成多种应用电路,大致可分为两大类:1)有源网络元件模拟电路;2)模拟信号处理电路,即实现比例、求和、微分、积分等模拟信号运算等功能。图3为一种基于双极互补集成电路的CCII实现电路,由CCII经过不断演变便出现了CCII₊。外阻抗 Z 跨接在CCII₊的 X 端之间,输入端电压 $u_i = u_{Y1} - u_{Y2} = -i_x Z$ ($i_x = i_{x1} = i_{x2} = i_i$),所以,从两个 Y 输入端输入的输入阻抗为浮地的复阻抗 $Z_{\text{in}} = -Z$ 。

另外,电流反馈运算放大器也是通用性很强的标准器件,它是20世纪90年代初期迅速发展的新型超高速运放。与传统的电压反馈运算放大器(voltage feedback amplifier, VFA)相比,它具有完全不同的拓扑结构和工作原理。基于日趋成熟的双极互补集成电路及电流模式电路设计技术,CFA具有极佳的动态特性,它以线性处理大幅度、高频率信号的能力远优于传统的VFA,其电压转换速率达1 000~3 500 V/ μ s;阶跃输出0.1%过冲精度的建立时间为10~100 ns; -3 dB带宽达60~100 MHz。典型产品有OP-160、OP-260、AD811、AD844等。电流反馈运放在高性能视频系统、高速通信系统、高速精密A/D及D/A转换器领域中有较高的应用价值。

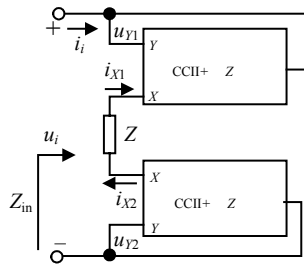
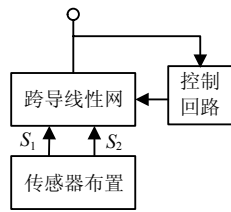


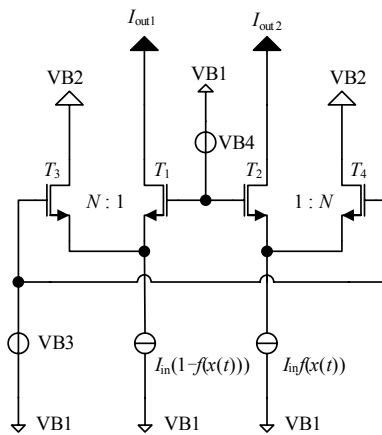
图3 浮地式复阻抗变换器

2.2 电流模式运算电路

电流模式电路就是能够有效地传送、放大和处理电流信号的电路。电流模式电路技术的发展和应用于模拟集成电路产业的发展注入了新的活力，同时VLSL的快速发展也使电流模式信号处理技术成为可能。目前，TL环路已成功地应用于电流/电压放大器、V/I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、MES技术、传感器信号处理以及计算机实时监测系统等诸多研究领域。



a. 传感器信号处理示意图



b. 跨导线性网电路图

图4 基于跨导线性网的传感器信号处理

传感器就像人类的五官一样，能感受到被检测物体的信息，并能将这些感受到的信息按一定规律转换为电信号，因而被广泛的应用到生活的方方面面。例如传感器可以检测旋转或线性移动物体。由此类传感器输出的电信号的强度依赖于测量期间的各种情况，从而使信号幅度等可能会发生变化。文献[13]提出了一种基于跨导线性网的传感器信号处理装置，如图4a所示。

图4b为基于跨导的线性原理图，由4个NMOS构成的跨导线性网。晶体管 T_1 相对于 T_3 被放大 N 倍，并且晶体管 T_4 以相似的方式相对于 T_2 被放大 N 倍。 $VB_1 \sim VB_4$ 表示偏置电压，由传感器布置输入的电流信号分别为 $I_{in}f(x(t))$ 、 $I_{in}(1-f(x(t)))$ 。

通过调节 VB_3 和 VB_4 的电压，使各晶体管工作在弱反型区以得到期望的输入电压范围。从而保证输出电流 I_{out1} 、 I_{out2} 之和始终是一个常数，这样可以大大简化对传感器信号的处理。

另外，在巡回检测数据采集系统和计算机实时测控系统中，必须把来自各种传感器的低电平信号放大到A/D转换器所需的电平，并要求放大器具有低漂移、低噪声、高输入阻抗、高增益稳定性和高增益线性等优良性能。实现这种功能的电路就是数据放大器，而应用电流模式技术可使数据放大器的直流和交流性能都得到改善，全面提升各项性指标。

2.3 电流模式神经网络的实现

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是现代神经科学研究成果的基础上提出的，是以人的大脑工作模式为基础，模拟生物神经网络的人工智能系统。它既可以用软件实现，又可以用硬件实现。就目前技术水平而言，与光学、分子实现相比较，电子神经网络的硬件实现是最现实和实用的途径，已显示出新的生命力。与电压模式电路实现相比，用电流模式技术实现神经网络是较新颖的。

在硬件实现的神经网络中，为了解决神经元导致的电路结构复杂、参数不可调、与突触电路不匹配等一系列问题，文献[14]基于跨导线性原理，提出了一种双极型sigmoid激活函数及其导数发生器，可应用于各种电流模式与电压模式神经网络中。图5为由 $M_1 \sim M_{10}$ 构成的神经元双极型sigmoid激活函数及其导数发生器的输入 $I-V$ 线性变换电路。

在神经网络中，为了方便突触电路的加权求和，激活函数的输入信号一般为电流。其中， $M_1 \sim M_4$ 的栅源电压构成了一个电压跨导线性环且全部工作于饱和区， M_5 、 M_6 和 M_7 、 M_8 分别构成电流镜，为跨导线性环提供偏置电流， I_{in} 为输入电流， V_x 为 $I-V$ 变换电路输出电压。利用MOS跨导线性原理可推导出：

$$V_x = -\frac{I_{in}}{4\sqrt{kI_0}} \quad (17)$$

从式(17)可以看出，在输入节点 x 处，节点电压与输入电流成线性关系且比例系数可以通过调节偏置电流 I_0 控制，从而得到较大的线性输入范围。该电流结构简单、易于调节。图6为神经元双极型sigmoid

激活函数及其导数发生器的示意图。

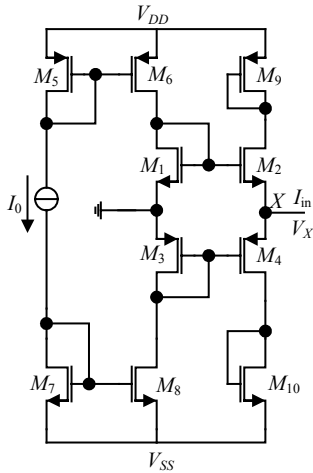


图5 基于TL原理构成的I-V线性转换电路

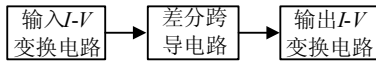


图6 双极型sigmoid激活函数及其导数发生器的示意图

该电路采用跨导线性环实现输入I-V线性变换，结合基本差分跨导电路实现输入电流到输出电流的非线性变换。在大多数神经网络的应用中，神经元的输出采用电压输出，这样有利于将其分散到下层各个突触节点实现加权运算。输出端采用I-V转换电路，要求输出电压对输出电流有很好的跟随性。

3 跨导线性环路的应用举例

应用TL环路原理，将器件经过不同方式的组合，并加以不同的输入输出信号，可构成许多不同功能的电流模式基本电路单元，包括：甲乙类互补推挽输出级电路、电流增益单元、模拟乘法器单元、平方电路及各种较为复杂的多元函数。本文提出两个比较简单的基本单元电路，用来实现较为复杂的非线性函数。

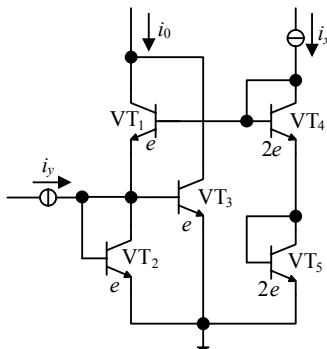


图7 非对称式TL矢量模电路

图7为一种简单的二输入非对称式TL矢量模电路，它由5个晶体管组成，有两个TL环路。VT₂、VT₃组成TL内环，VT₁、VT₂、VT₄、VT₅组成TL外环，

VT₄、VT₅发射区面积是VT₁、VT₂发射区面积的2倍。*i_x*是单极性输入电流，*i_y*是双极性输入电流，*i_o*是输出电流。

根据KCL，可推导出电路中VT₁、VT₂、VT₃的电流有如下关系：

$$i_{c2} = 0.5(i_0 + i_y) \quad (18)$$

$$i_{c1} = 0.5(i_0 - i_y) \quad (19)$$

对于外环，有：

$$i_{c1}i_{c2} = \frac{i_{c4}}{2} \frac{i_{c5}}{2} \quad (20)$$

$$\frac{1}{4}(i_0 - i_y)(i_0 + i_y) = \frac{1}{4}i_x^2 \quad (21)$$

由此可得：

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} \quad (22)$$

结果表明，输出电流*i_o*等于两个输入电流分量*i_x*、*i_y*的矢量模。采用相同的电路结构，把双极型晶体管用MOS管代替，对输入电流稍作调整，便得到用来实现调和平均值函数的非对称式MTL电路，如图8所示。

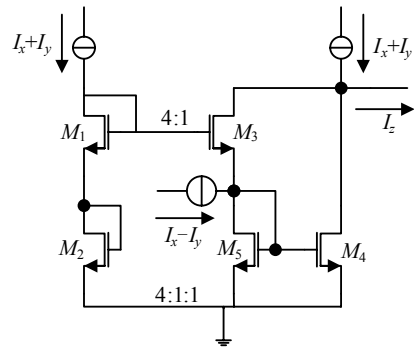


图8 非对称式MTL实现调和平均值函数电路

由MOS型TL环路定义可知，M₁~M₄构成MOS跨导线性环，利用式(16)可得漏电流之间的关系：

$$\sqrt{\frac{I_1}{4}} + \sqrt{\frac{I_2}{4}} = \sqrt{I_3} + \sqrt{I_4} \quad (23)$$

根据KCL方程可得：

$$I_1 = I_2 = I_x + I_y$$

$$I_3 = I_y - 0.5I_z$$

$$I_4 = I_x - 0.5I_z \quad (24)$$

重新整理可得：

$$I_z = \frac{2I_x I_y}{I_x + I_y} \quad (25)$$

它可以用来调和平均值函数。

由于MOS晶体管的直流栅源电流为零，因此由MOS晶体管构成的TL环路比Bipolar晶体管所构成的TL环路精度要高。但Bipolar电路匹配性更好，误

差较小, 这一点对误差放大器的静态电流微小改变尤为关键。因此, HTL(hybrid translinear)具有较高精度的同时可以更方便的控制静态电流。分析方法可以利用本文上面介绍的TL环路原理, 对双极晶体管和MOS管分开处理。

4 结束语

跨导线性原理是分析模拟集成电路的有效工具, 可以简化非线性电路的计算, 它既适用于小信号, 又适用于大信号。另外, 跨导线性环路要求晶体管的工作温度必须相同, 并且器件的几何结构和特性等也要严格匹配, 所以只能在单片集成系统中实现。跨导线性原理已被应用于许多电流模式中, 本文针对BJT管和MOS管的区别, 详细地推导了跨导线性原理, 介绍了它们之间的优缺点。最后介绍了典型的跨导线性环路应用实例, 可以通过使用BJT管和MOS管或两者够成各种功能的电流模电路。

参 考 文 献

- [1] 孟相如, 魏伟. 电流模式信号处理电路技术的进展[J]. 空军工程大学学报, 2000, 1(1): 94-98.
MENG Xiang-ru, WEI Wei. Advances on current-mode signal processing circuit technology[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2000, 1(1): 94-98.
- [2] MINAEI S, SAYIN O K, KUNTMAN H. A new CMOS electronically tunable current conveyor and its application to current mode filters[J]. IEEE Trans Circ and Syst I, Reg Rap, 2006, 53(7): 1448-1457.
- [3] 赵玉山. 电流模式电子线路[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
ZHAO Yu-shan. Electronic circuit of current mode[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.
- [4] GILBERT B. Translinear circuits: a proposed classification [J]. Electronic Letters, 1975, 11(1): 14-16.
- [5] 王卫东. 现代模拟集成电路基础及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
WANG Wei-dong. Foundation and application of modern analog integrated circuit[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2014.
- [6] WIEGERINK R J. Analysis and synthesis of MOS translinear circuits[M]. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [7] 胡许光, 王卫东, 陈培腾, 等. 基于电流补偿电流镜的改进型电流控制电流传输器[J]. 微型机与应用, 2015, 34(3): 41-43.
HU Xu-guang, WANG Wei-dong, CHEN Pei-teng, et al. An improved CCCII based on current compensated current mirror[J]. Microcomputer and its Applications, 2015, 34(3): 41-43.
- [8] 罗秀龙, 王春平, 谢莉, 等. 新型CMOS电流控制电流差分缓冲放大器(CCCDBA)[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 106-110.
LUO Xiu-long, WANG Chun-ping, XIE Li, et al. Novel CMOS current controlled current differencing buffered amplifier[J]. Microelectronics and Computer, 2010, 27(5): 106-110.
- [9] 初秀琴, 丁睿, 来新泉, 等. 高精度电流求和型分段曲率补偿的基准电流源[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(4): 616-620.
CHU Xiu-qin, DING-rui, LAI Xin-quan, et al. Precision curvature-compensated current reference based on current summing mode[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(4): 616-620.
- [10] 吴湘锋, 李志军, 张黎黎. 高精度电流模式四象限乘法器的设计与应用[J]. 微电子学, 2015, 45(4): 488-491.
WU Xiang-feng, LI Zhi-jun, ZHANG Li-li. Design and application of a high precision current-mode four-quadrant multiplier[J]. Microelectronics, 2015, 45(4): 488-491.
- [11] 崔宇平, 王志刚. 采用ADS的CMOS双平衡混频器设计[J]. 电子元器件应用, 2011(8): 18-20.
CUI Yu-ping, WANG Zhi-gang. Design of the CMOS dual-balance mixer with ADS[J]. Electronic Components Application, 2011(8): 18-20.
- [12] 陈富吉, 来新泉, 李玉山. 一种自适应斜坡补偿电路的设计与实现[J]. 半导体学报, 2008, 29(3): 593-597.
CHEN Fu-ji, LAI Xin-quan, LI Yu-shan. Design and implementation of an adaptive slope compensation circuit[J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(3): 593-597.
- [13] 德拉克塞尔迈尔·D, 发布罗·S. 使用跨导线性网的传感器信号处理[P]. 德国专利: CN103822647A, 2014-05-28.
DRASELMEIER D, HAIR BROCK S. Sensor signal processing using tranwire network[P]. German Patent: CN103822647A, 2014-05-28.
- [14] 吴湘锋, 李志军, 向林波. 可编程双极性sigmoid函数及其导数发生器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(8): 1137-1143.
WU Xiang-feng, LI Zhi-jun, XIANG Lin-bo. Programmable generator of ambipolar Sigmoid function and its derivative [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015(8): 1137-1143.

编辑 叶芳