

文章编号: 2095-4980(2020)03-0545-05

## 基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器设计

周 旋<sup>a</sup>, 姚茂群<sup>\*b</sup>, 周传鑫<sup>b</sup>

(杭州师范大学 a.钱江学院 浙江 杭州 310018; b.信息科学与工程学院, 浙江 杭州 311121)

**摘 要:** 基于阈算术代数系统理论, 以和图为指导, 分析施密特反相器的阈值可控开关, 对三值电流型 CMOS 施密特反相器进行设计。Hspice 仿真结果表明, 该电路具有正确的逻辑功能和良好的瞬态特性, 阈算术代数系统设计得到进一步的完善, 三值施密特反相器设计更加简单直观。

**关键词:** 和图; 电流型 CMOS 电路; 三值反相器; 三值施密特反相器

**中图分类号:** TN433

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018236

## Design of ternary current-mode CMOS Schmitt inverter based on HE map

ZHOU Xuan<sup>a</sup>, YAO Maoqun<sup>\*b</sup>, ZHOU Chuanxin<sup>b</sup>

(a.Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

b.School of Information Science and Engineering, Hangzhou Zhejiang 311121, China)

**Abstract:** Based on the threshold-arithmetic algebra system and guided by HE map, the threshold controllable switch of Schmitt inverter is analyzed, and the ternary current-mode CMOS Schmitt inverter is designed. The simulation results of Hspice show that the designed circuit has correct logic function and good transient characteristics. This circuit design not only makes the design of the threshold-arithmetic algebraic system further improved, but also makes the design of the ternary Schmitt inverter more simple and intuitive.

**Keywords:** HE map; current-mode CMOS circuit; ternary inverter; ternary Schmitt inverter

互补金属氧化物半导体(CMOS)施密特触发器可以将不规则的波形如正弦波或三角波转换成完美形状的方波或脉冲, 来解决噪声问题<sup>[1-3]</sup>。由于 CMOS 施密特触发器具备快速切换、功耗低、供电电压低等优点<sup>[4-5]</sup>, 它还是构建如超低电压放大器<sup>[6]</sup>、低功耗 SRAM 单元<sup>[7]</sup>、图像传感器<sup>[8]</sup>、脉宽调制<sup>[9]</sup>等电子电路的重要组成部分。在数字电路中, 研究 CMOS 施密特触发器具有重要的实际意义。CMOS 电路具有功耗低、速度快、抗干扰性能强、集成度高等优点, 而电流型 CMOS 电路相较于电压型 CMOS 电路, 其电流信号不仅易于实现加、减等算术运算, 而且在多值逻辑领域具有优越性, 使得电流型 CMOS 电路的研究受到国内外广泛的重视。

设计电流型电路的方法有布尔代数系统<sup>[10]</sup>、模代数系统<sup>[11]</sup>、开关—信号代数系统<sup>[12]</sup>。在此基础上, 文献[13]提出阈算术代数系统及和图, 该代数系统使得设计电流型电路的过程较之前的方法更加方便直观。本文以阈算术代数系统为依据, 和图为指导, 提出三值电流型 CMOS 施密特电路设计方法。

### 1 阈算术函数及其图形表示

#### 1.1 阈算术代数运算

阈算术代数运算包括阈算术运算、算术运算和非负运算<sup>[12-13]</sup>。对于阈算术运算定义如下:

**定义 1** 高阈算术运算

$$\langle x \rangle_t = \begin{cases} 1, & x > t \\ 0, & x < t \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771179; 61271124); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15F010011)

作者简介: 周 旋(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为低功耗数字集成电路设计、物联网和信息技术。email:zhouxuan8210@sina.com

\*通信作者: 姚茂群 email:yaomaqun@163.com

定义 2 低阈算术运算

$$\langle x \rangle^t = \begin{cases} 1, & x < t \\ 0, & x > t \end{cases} \quad (2)$$

定义 3 双阈算术运算

$$\langle x \rangle_{t_1}^{t_2} = \begin{cases} 1, & t_1 < x < t_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中:  $x \in [0, 1, \dots, m]$ ; 阈值  $t, t_1, t_2 \in [0.5, 1.5, \dots, m - 0.5]$ ,  $m$  为正整数。

另外, 定义非负运算

$$\lceil F(x) \rceil = \begin{cases} F(x), & \text{如 } F(x) > 0 \\ 0, & \text{如 } F(x) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: 变量  $x \in [0, 1, 2, \dots, m - 1]$ ;  $F(x)$  为由算术运算和阈算术运算组成的函数。

### 1.2 阈算术函数

阈算术代数运算可构成完备运算集, 并且其逻辑关系的解析表示称为阈算术函数。由此, 可得任意单变量三值阈算术函数  $F(x)$  的规范展开式为:

$$F(x) = F(0) \cdot \langle x \rangle^{0.5} + F(1) \cdot \langle x \rangle_{0.5}^{1.5} + F(2) \cdot \langle x \rangle_{1.5} \quad (5)$$

### 1.3 阈算术函数

阈算术函数的图形表示称为和图<sup>[12]</sup>。在和图内填入的值为所对应的阈算术函数的函数值。如图 1 为任意二变量三值阈算术函数  $F(x, y)$  的和图。

		y		
	x	0	1	2
0		$F(0,0)$	$F(0,1)$	$F(0,2)$
1		$F(1,0)$	$F(1,1)$	$F(1,2)$
2		$F(2,0)$	$F(2,1)$	$F(2,2)$

Fig.1 HE map of two variates ternary threshold-arithmetic function  $F(x)$   
图 1 二变量三值阈算术函数  $F(x,y)$  的和图

## 2 基于和图的三值电流型 CMOS 电路设计

电流型 CMOS 电路不仅可通过电流镜实现自身电流的拷贝, 而且其基本阈算术单元电路与阈算术代数系统中的阈算术运算表达式相对应, 这也成为和图在电流型 CMOS 电路设计中的理论依据。

### 2.1 基于电流型 CMOS 的基本阈算术单元电路

与阈算术运算  $\langle x \rangle, \langle x \rangle^t, \langle x \rangle_{t_1}^{t_2}$  相对应的电流型 CMOS 的基本阈算术单元电路<sup>[12-13]</sup>, 如图 2(a)、图 2(b)所示。

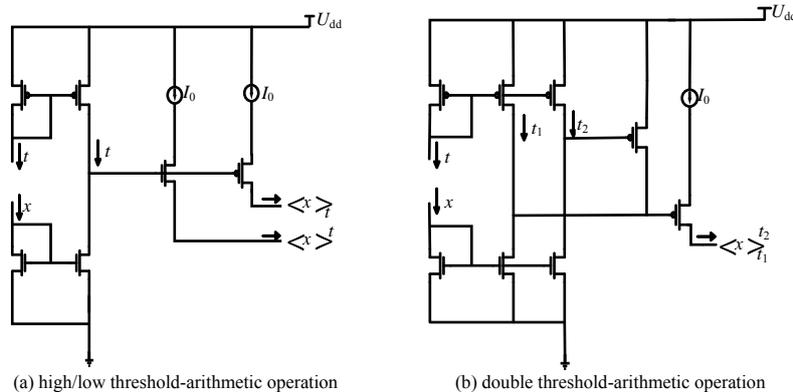


Fig.2 Basic threshold-arithmetic unit circuit based on the current-mode CMOS  
图 2 基于电流型 CMOS 的基本阈算术单元电路

### 2.2 基于和图的三值电流型 CMOS 电路设计方法

基于和图和电流型 CMOS 基本阈算术单元电路提出三值电流型 CMOS 电路设计, 步骤如下<sup>[13]</sup>:

- 1) 根据所要设计的电路的逻辑函数, 画出其目标和图;
- 2) 根据目标和图的特点, 构造一个相对简单的阈算术函数, 使其和图与目标和图尽可能接近;

3) 根据步骤 2) 所得和图, 再构造若干个和图, 做进一步的阈算术代数运算, 使最终的结果与目标和图相同;  
 4) 根据步骤 3) 的和图运算过程, 得到相应的阈算术函数表达式。最后结合图 2 的电流型 CMOS 的基本阈算术单元电路, 设计出相应的三值电流型 CMOS 电路。

2.3 基于和图的三值电流型 CMOS 反相器设计

三值电流型 CMOS 反相器的目标和图如图 3(a) 所示, 根据目标和图, 构造以下 2 个阈算术函数:

$$F_1(x) = \langle x \rangle^{0.5} \quad (6)$$

$$F_2(x) = \langle x \rangle^{1.5} \quad (7)$$

$F_1(x)$ ,  $F_2(x)$  所对应的和图如图 3(b)、图 3(c) 所示。将图 3(b)、图 3(c) 的和图相加, 便可得到目标和图。三值电流型 CMOS 反相器的阈算术函数形式表示为:

$$F_3(x) = \langle x \rangle^{0.5} + \langle x \rangle^{1.5} \quad (8)$$

故可直接设计出三值电流型 CMOS 反相器电路, 如图 4(a) 所示。

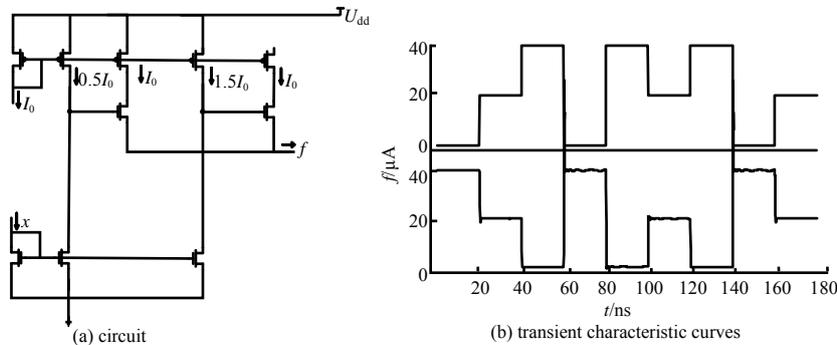
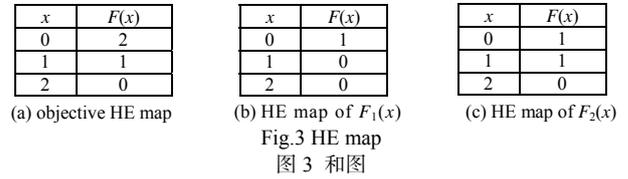


Fig.4 Ternary current-mode CMOS inverter based on HE map  
图 4 基于和图的三值电流型 CMOS 反相器

采用 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  标准工艺参数, 对图 4(a) 所示的三值电流型 CMOS 反相器进行 Hspice 模拟, 模拟时选取输入信号  $x$  的逻辑值 (0, 1, 2) 所对应的电流分别为 (0  $\mu\text{A}$ , 20  $\mu\text{A}$ , 40  $\mu\text{A}$ ), 选取  $U_{\text{dd}}$  为 1.5 V, 输出信号  $f$  的逻辑值 (0, 1, 2) 所对应的电流值分别为 (0  $\mu\text{A}$ , 20  $\mu\text{A}$ , 40  $\mu\text{A}$ )。模拟得到的电路的瞬态特性如图 4(b) 所示, 结果表明所设计电路具有正确的逻辑功能。

2.4 基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器设计

在施密特反相器电路中, 检测阈值的回差  $\Delta t$  定义为:

$$\Delta t = t_+ - t_- \quad (9)$$

式中:  $t_+$ ,  $t_-$  分别表示较高和较低 2 种阈值。

在三值施密特电路中, 存在 0.5 和 1.5 两个固定的检测阈值, 对应的回差分别为  $\Delta t_{(0.5)}$ ,  $\Delta t_{(1.5)}$ , 则:

$$\Delta t_{(0.5)} = t_{(0.5)+} - t_{(0.5)-} \quad (10)$$

$$\Delta t_{(1.5)} = t_{(1.5)+} - t_{(1.5)-} \quad (11)$$

假设三值施密特电路的 2 个回差数值相等, 则

$$\Delta t_{(0.5)} = \Delta t_{(1.5)} = \Delta t \quad (12)$$

并且检测阈值在原固定的基础上做对称变化, 则有:

$$\begin{cases} t_{(0.5)-} = 0.5 - \Delta t / 2 \\ t_{(0.5)+} = 0.5 + \Delta t / 2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} t_{(1.5)-} = 1.5 - \Delta t / 2 \\ t_{(1.5)+} = 1.5 + \Delta t / 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $t_{(0.5)+}$  和  $t_{(1.5)+}$  用于检测上升信号;  $t_{(0.5)-}$  和  $t_{(1.5)-}$  用于检测下降信号。具体的工作过程如下: 当输入信号  $x$  由

逻辑值 0 上升超过  $t_{(0.5)+}$  时, 输出信号  $\bar{x}$  由逻辑值 2 往下降, 检测阈值由  $t_{(0.5)+}$  下降至  $t_{(0.5)-}$ ; 当输入信号  $x$  由逻辑值 1 超过  $t_{(1.5)+}$  时, 输出信号  $\bar{x}$  由逻辑值 1 往下降为 0, 检测阈值由  $t_{(1.5)+}$  下降至  $t_{(1.5)-}$ , 由此可得到阈值控制表达式<sup>[14-15]</sup>如下:

$$t_{(0.5)} = 0.5 + \Delta t / 2 - \Delta t \cdot \langle \bar{x} \rangle^{1.5} \tag{15}$$

$$t_{(1.5)} = 1.5 + \Delta t / 2 - \Delta t \cdot \langle \bar{x} \rangle^{0.5} \tag{16}$$

式(15)、式(16)中的  $\bar{x}$  为三值施密特反相器的输出信号, 通过它反馈控制反相器电路中的 2 个检测阈值, 以对输入信号由低电平上升至高电平和由高电平下降至低电平时实现所需的阈值控制要求。

$\bar{x}$  的阈算术表达式为:

$$\bar{x} = \langle x \rangle^{t_{(0.5)}} + \langle x \rangle^{t_{(1.5)}} \tag{17}$$

根据式(15)~式(17)和三值电流型 CMOS 反相器的设计电路, 便可设计出相应的三值电流型 CMOS 施密特反相器电路, 如图 5(a)所示。

采用 TSMC0.18  $\mu\text{m}$  标准工艺参数, 对图 5(a)所示的三值电流型 CMOS 施密特反相器电路进行 Hspice 模拟, 模拟时选取输入信号  $x$  的逻辑值(0,1,2)所对应的电流分别为(0  $\mu\text{A}$ , 20  $\mu\text{A}$ , 40  $\mu\text{A}$ ), 选取  $U_{\text{dd}}$  为 1.5 V, 并取  $t_{(0.5)} = 10 \text{ ns}$ ,  $t_{(1.5)} = 30 \text{ ns}$ , 回差电流  $\Delta t = 10 \text{ ns}$ 。

图 5(b)、图 5(c)分别为所设计的三值电流型 CMOS 施密特反相器的瞬态特性曲线和直流传输特性, 其模拟结果表明所设计的三值电流型 CMOS 施密特反相器具有正确的逻辑功能, 并达到了预期的控阈要求。

文献[14]以开关—信号理论为指导, 提出了一种三值电流型 CMOS 施密特反相器 1 的设计。文献[15]在文献[14]的基础上, 以开关—信号理论为指导, 建立了实现三值电流型 CMOS 施密特电路中阈值控制电路的电流传输开关运算, 并设计了一种新型的三值电流型 CMOS 施密特反相器 2。

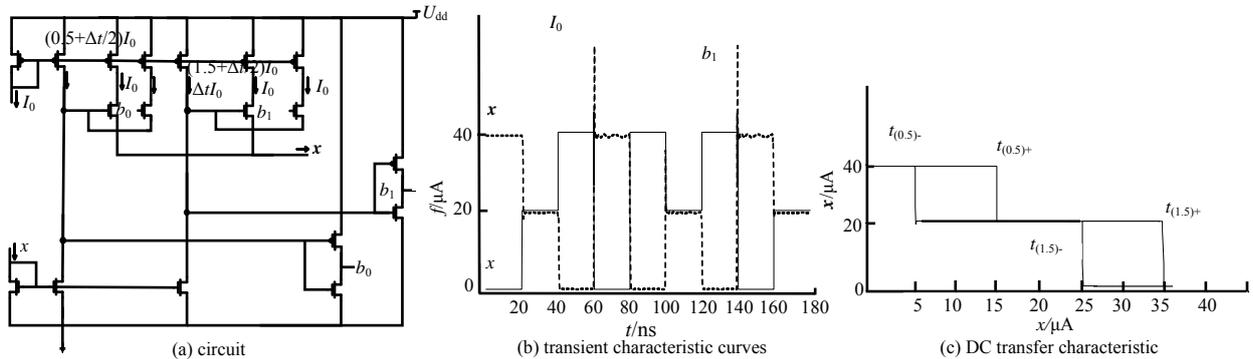


Fig.5 Ternary current-mode CMOS Schmitt inverter based on HE map  
图 5 基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器

对比先前的 2 种利用开关—信号理论所设计出的三值电流型 CMOS 施密特反相器, 本文所提出的基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器设计, 不仅在结构上得到了简化, 而且在性能上也得到了优化。表 1 为所设计的 3 种三值电流型 CMOS 施密特反相器的器件数和平均功耗比较。

可见, 基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器的器件数少于基于开关—信号理论所设计出的 2 种三值电流型 CMOS 施密特反相器。另外, 在  $U_{\text{dd}}$  同为 1.5 V 下, 测得基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器为 97.6  $\mu\text{W}$ , 比基于开关—信号理论的三值电流型 CMOS 施密特反相器 2 的平均功耗 104.7  $\mu\text{W}$  低, 并且电路结构更优, 工作电压更低, 因此证明所设计的电路性能更优。

表 1 基于和图的三值电流型 CMOS 施密特反相器  
Table1 Ternary current-mode CMOS Schmitt inverter based on HE map

type	number of CMOS devices	average power consumption/ $\mu\text{W}$
three-value current CMOS Schmitt inverter based on switch-signal algebra system-1	27	/
three-value current CMOS Schmitt inverter based on switch-signal algebra system-2	19	104.7
three-value current CMOS Schmitt inverter based on HE map	18	97.6

### 3 结论

本文基于阈算术代数系统理论, 将和图作为指导, 运用于三值电流型 CMOS 施密特反相器的设计中, 简化了阈算术函数的运算过程。此外, 本文通过先设计三值电流型 CMOS 反相器, 再设计三值电流型 CMOS 施密特反相器, 使得设计过程简单直观。同时, 通过与利用开关—信号理论所设计出的 2 种三值电流型 CMOS 施密特反相器的对比, 证明了本文设计的电路的优越性。

#### 参考文献:

- [1] CHEN Z, CHEN S. A high-speed low voltage CMOS Schmitt Trigger with adjustable hysteresis[C]// 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science(ICIS). Wuhan, China: IEEE, 2017:293–297.
- [2] SURESH A. A low power Schmitt trigger design using SBT technique in 180 nm CMOS technology[C]// 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. [S.l.]: IEEE, 2014:533–536.
- [3] NEJATI A, BASTAN Y, AMIRI P. 0.4 V ultra-low voltage differential CMOS Schmitt trigger[C]// 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE). [S.l.]: IEEE, 2017:532–536.
- [4] KADU A W, KALBANDE M. Design of low power Schmitt trigger logic gates using VTCMOS[C]// 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies(IC-GET). [S.l.]: IEEE, 2016:1–5.
- [5] TAMNUPAN W, KASEMSUWAN V. A low-voltage low-power current-mode differential adjustable Schmitt trigger[C]// 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. [S.l.]: IEEE, 2012:1–4.
- [6] MELEK L A P, SCHNEIDER M C, GALUP-MONTORO C. Operation of the classical CMOS Schmitt trigger as an ultra-low-voltage amplifier[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(9):1239–1243.
- [7] AHMAD S, GUPTA M K, ALAM N, et al. Single-ended Schmitt-trigger-based robust low-power SRAM cell[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems, 2016, 24(8):2634–2642.
- [8] SASAGAWA K, YAMAGUCHI T, HARUTA M, et al. An implantable CMOS image sensor with self-reset pixels for functional brain imaging[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(1):215–222.
- [9] KUMAR A, CHATURVEDI B, MAHESHWARI S. A fully electronically controllable schmitt trigger and duty cycle-modulated waveform generator[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2017, 45(12):2157–2180.
- [10] 陈偕雄, 沈继忠. 近代数字理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001. (CHEN Xiexiong, SHEN Jizhong. Modern digital theory[M]. Hangzhou, China: Zhejiang University Press, 2001.)
- [11] 吴训威. 多值逻辑电路设计原理[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1994. (WU Xunwei. Design principles of multivalued logic circuits[M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994.)
- [12] 张官志, 姚茂群, 施锦河, 等. 阈算术代数系统及电流型 CMOS 电路设计[J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(1):51–55. (ZHANG Guanzhi, YAO Maoqun, SHI Jinhe, et al. Threshold-arithmetic algebraic system and design of current-mode CMOS circuits[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2013, 40(1):51–55.)
- [13] 姚茂群, 张官志, 施锦河. 阈算术代数系统及多值电流型 CMOS 电路设计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7):1773–1778. (YAO Maoqun, ZHANG Guanzhi, SHI Jinhe. Threshold-arithmetic algebraic system and design of multiple-valued CMOS circuits[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(7):1773–1778.)
- [14] 杭国强, 吴训威. 电流控阈技术及三值电流型 CMOS 施密特电路[J]. 浙江大学学报(理学版), 2000, 27(2):230–234. (HANG Guoqiang, WU Xunwei. Current threshold-controllable technique and ternary current-mode CMOS Schmitt circuits[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2000, 27(2):230–234.)
- [15] 杭国强, 陆慧娟. 新型电流型 CMOS 三值施密特电路设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7):1141–1145. (HANG Guoqiang, LU Huijuan. Novel current-mode CMOS ternary Schmitt trigger[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(7):1141–1145.)