

基于开关信号理论的电流型 CMOS 多值施密特电路设计

杭国强

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江杭州 310027)

摘 要: 以开关信号理论为指导, 建立了描述电流型 CMOS 多值施密特电路中阈值控制电路的电流传输开关运算. 在此基础上, 提出了新的电流型 CMOS 三值和四值施密特触发器设计. 所设计的电路可提供多值电流和电压输出信号, 回差电流的大小只需通过改变 MOS 管的尺寸比来调节. 所提出的电路较之以往设计具有结构简单, 回差值调整容易以及可在较低电压下工作等特点. 采用 TSMC 0.25 μm CMOS 工艺参数和 1.5V 电压的 HSPICE 模拟结果验证了所提出设计方案的有效性和电路所具有的理想回差特性.

关键词: 开关信号理论; 电流型 CMOS 电路; 多值逻辑; 施密特电路

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 05-0924-04

Design of Current Mode CMOS Multiple-Valued Schmitt Triggers Based on Switch-Signal Theory

HANG Guo-qiang

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Guided by the switch-signal theory, the operations of current transmission switch used to describe the action of threshold-controllable switch in multiple-valued Schmitt trigger were established, and novel current-mode CMOS ternary and quaternary Schmitt triggers with output current and voltage signal were presented. The hysteresis current values of multiple-valued Schmitt triggers were controlled by only sizing the transistor aspect ratios. The main properties of the circuit are its simple structure, fully adjustable hysteresis, and suitable for low-voltage applications. The designed circuits are simulated using HSPICE program and the model parameters of a TSMC 0.25 μm CMOS process, with 1.5V power supply. From the simulation results, the effectiveness of the proposed approach and the ideal characteristic of multiple-valued Schmitt circuit are validated.

Key words switch signal theory; current-mode CMOS circuit; multiple-valued logic; Schmitt trigger

1 引言

施密特电路能有效地接收缓慢变化的输入信号, 抑制叠加在信号上的干扰, 消除信号颤动而成为模拟和数字电路中对输入信号进行整形处理, 改善开关控制的一种常用器件. 它的一个重要特性是对于正向和负向信号的直流传输特性有着不同的检测阈值, 两者之差称之为回差. 近年来已提出了多种二值和多值电流型 CMOS 施密特电路设计方案^[1-6]. 然而, 就多值电流型 CMOS 施密特电路而言, 其结构依然较为复杂. 一个只提供电流输出的三值电流型施密特反相器至少需要 28 个 MOS 管, 而且所需设置的阈值电流数目也较多^[5,6]. 本文以开关信号理论为指导, 提出一种新的多值电流型 CMOS 施密特电路设计方法, 在此

基础上设计的施密特电路在结构上得到了明显的简化. 所提出的三值和四值电流型 CMOS 施密特反相器仅提供电流信号输出时分别只需 19 个 MOS 管和 27 个 MOS 管, 而且阈值设置数目也少于以往设计. 此外, 该设计对于回差电流值的控制也十分便利, 只需通过调整 MOS 管的宽长比来实现, 该设计结构可在较低电源电压下工作.

2 传输电流开关理论

根据开关信号理论, 在多值电流型 CMOS 电路中 MOS 管的开关状态与电流信号两者应分别使用开关变量与多值信号变量来区分描写^[7]:

(1) 开关变量用 α, β, \dots 表示. 它们的取值 T, F 分别表示电路中 MOS 管的导通和截止两种状态. 与开关变量有

关的基本运算为与 (\cdot)、或 ($+$)、非 (\sim), 分别记为 $\alpha \cdot \beta$ 、 $\alpha + \beta$ 、 $\tilde{\alpha}$ 物理上分别表示 MOS 开关的串联、并联和开关状态相反三种情况

(2) 信号变量用 x, y, \dots 表示. 以四值信号为例, 它们的逻辑取值 (0 1 2 3), 在物理上分别对应四种电流信号 ($0, i_0, 2i_0, 3i_0$). 此时, 对信号的检测阈 $t \in \{0.5, 1.5, 2.5\}$, 若取 $i_0 = 20\mu\text{A}$, 则对应的阈电流源为 ($10\mu\text{A}, 30\mu\text{A}, 50\mu\text{A}$). 与信号变量有关的基本运算为取小 (\cap)、取大 (\cup)、补 ($-$) 及文字 (x^i) 运算. 考虑到电流信号易于实现相加、减及乘法运算, 则可进一步引入算术加运算 $x \& y$ 、减运算 $x - y$ 和乘法运算 αx (乘法系数 α 可以通过改变 MOS 电流镜的几何比来实现).

为描写 MOS 管的开关状态与信号之间的相互作用, 定义如下三种基本运算:

低阈比较运算 $x^t \triangleq \begin{cases} T, & x < t \\ F, & x > t \end{cases} \quad (1)$

高阈比较运算 ${}^t x \triangleq \begin{cases} T, & x > t \\ F, & x < t \end{cases} \quad (2)$

与上述二式相对应的电路实现如图 1(a) 所示. 两个电流信号的比较结果反映在输出端 V_0 的电平上, 从而决定了后级电路的工作状态. 图中 x 为输入信号, t 为阈值电流. 若 $x < t$ 则 V_0 为高电平, 后接的 nMOS 管导通, 因此该管的开关状态可用 x^t 表示; 若 $x > t$ 则 V_0 为低电平, pMOS 管导通, 因此可用 ${}^t x$ 表示它的开关状态.

电流传输运算 $c \triangleright \alpha \triangleq \begin{cases} c, & \alpha = T \\ Q, & \alpha = F \end{cases} \quad (3)$

式中 α 表示传输开关管 (nMOS 或 pMOS) 的开关状态, 相应的电路实现如图 1(b) 所示. 图中若 nMOS 管处于开状态 ($\alpha_n = T$), 则电流信号 c 将由该管的源极输出至后级. 若 pMOS 管处于导通状态 ($\alpha_p = T$), 则电流信号 c 将从 pMOS 管的漏极输出至后级.

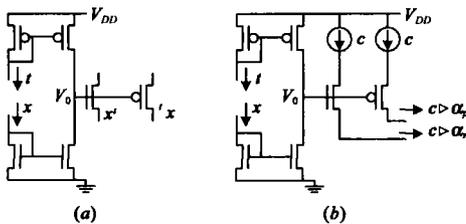


图 1 (a) 阈比较运算电路; (b) 电流传输运算电路

上述传输电流开关理论的建立为实现电流型 CMOS 施密特电路中阈值控制电路的开关级设计奠定了基础.

3 电流型 CMOS 多值施密特电路设计

3.1 三值施密特电路

在输入信号的变化过程中, 施密特电路实现阈值跳变的核心部件为阈值可控开关. 与普通三值电路具有两个固定的检测阈, 0.5 和 1.5 不同, 在三值施密特电路中检测阈

必须是可变的. 假设两个可变电流检测阈为 $i_{0.5}$ 和 $i_{1.5}$, 以三值施密特反相器为例, 其开关级函数表达式为:

$$\bar{x} = (1 \triangleright x^{i_{0.5}}) \& (1 \triangleright x^{i_{1.5}}) \quad (4)$$

式 (4) 表明, 当 $x = 0$ 时, 开关 $x^{i_{0.5}}$ 和 $x^{i_{1.5}}$ 均导通, 输出 $\bar{x} = 2$; 当 $x = 1$ 时, 开关 $x^{i_{0.5}}$ 导通, $x^{i_{1.5}}$ 截止, 输出 $\bar{x} = 1$; 当 $x = 2$ 时, 开关 $x^{i_{0.5}}$ 和 $x^{i_{1.5}}$ 均截止, 输出 $\bar{x} = 0$. 因此该式描述了一个三值反相器的逻辑功能. 根据三值施密特电路的阈值控制要求, 式中 $i_{0.5}$ 和 $i_{1.5}$ 可表示为:

$$i_{0.5} = i_{0.5+} - (\Delta i_{0.5} \triangleright x^{i_{0.5}}) = \begin{cases} i_{0.5+}, & x = 0 \\ i_{0.5-}, & x = 1, 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$i_{1.5} = i_{1.5+} - (\Delta i_{1.5} \triangleright x^{i_{1.5}}) = \begin{cases} i_{1.5+}, & x = 0, 1 \\ i_{1.5-}, & x = 2 \end{cases} \quad (6)$$

上述两式中 $\Delta i_{0.5} = i_{0.5+} - i_{0.5-}$, $\Delta i_{1.5} = i_{1.5+} - i_{1.5-}$, 用于表示三值施密特电路中的两个回差电流值. 在三值施密特电路中实际存在着四种阈电流: $i_{0.5+}$, $i_{1.5+}$, $i_{0.5-}$ 和 $i_{1.5-}$, 其中 $i_{0.5+}$, $i_{1.5+}$ 用于检测上升信号, $i_{0.5-}$, $i_{1.5-}$ 用于检测下降信号. 由上述三式可得到如图 2 所示的三值电流型 CMOS 施密特反相器设计, 其中 I_{out} 为三值电流输出信号, V_{out} 为三值电压输出信号. 图中 M_1, M_2 和 M_3 实现对输入信号的复制, 通过电流镜将输入三值电流信号 $x (I_{in})$ 与阈值电流 $i_{0.5}$ 和 $i_{1.5}$ 进行比较. 比较结果决定了二值反相器的输出 b_0 和 b_1 . 这两个二值电压信号反过来分别控制 pMOS 管 M_{11} 和 M_{12} 的开关状态, 由此构成了一个再生反馈电路. 同时, b_0 和 b_1 分别输入至传输管 M_{13} 和 M_{14} 的栅极用于控制输出电流信号的传输. 传输管 M_{13} 和 M_{14} 的漏极连接在一起实现对输出电流信号 (I_{out}) 的求和 (&) 运算. 同样, 将 b_0 和 b_1 分别接至传输开关 M_{15}, M_{16} 和 M_{17}, M_{18} 的栅极用于控制电压信号的传输, 产生三值电压输出信号 (V_{out}). 电压源 ($Q V_{DD} / 2, V_{DD}$) 分别对应于逻辑值 (0 1 2). 注意图中 b_0, b_1 的低电平和高电平分别对应于逻辑值 0 和 2.

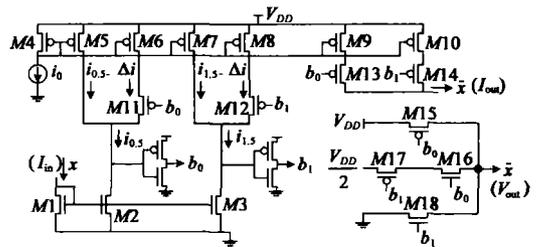


图 2 电流型 CMOS 三值施密特反相器

对图 2 所示电路的工作原理简述如下: 假设输入信号 x 小于阈电流 $i_{0.5}$, 此时, 两个二值电压反相器的输出均为低电平, 即 $b_0 = 0, b_1 = 0$. 因此 M_{11} 和 M_{12} 导通, 这使得 Δi 分别流经 M_{11} 和 M_{12} . 这样, 当输入信号 x 由零开始上升时电路的两个检测阈电流分别为 $i_{0.5} = i_{0.5+} = i_{0.5-} + \Delta i, i_{1.5} = i_{1.5+} = i_{1.5-} + \Delta i$ (图中假设 $\Delta i_{0.5} = \Delta i_{1.5} = \Delta i$). 随着 x 的上升并超过 $i_{0.5}$ 时, $b_0 = 2$. 这使得 M_{11} 截止, 导致阈值由 $i_{0.5+}$ 下跳至 $i_{0.5-}$. 此时由于 $b_1 = 0, M_{12}$ 继续保持导通状态, 阈值 $i_{1.5-}$ 不变. 当 x 继续上升并超过 $i_{1.5}$ 时, $b_1 = 2$. 这使得

M12也关闭,并导致阈值由*i_{1,5+}*下降至*i_{1,5-}*.同理可以分析,当输入信号*x*由高位开始下降并低于阈值*t_{1,5-}*时,对应的阈电流将回跳至*i_{1,5+}*.当*x*继续下降并低于阈值*i_{0,5-}*时,该阈值将回跳至*i_{0,5+}*.因此对于下降信号该电路的两个检测阈电流分别为*i_{1,5-}*和*i_{1,5+}*.这表明对阈值的控制符合三值施密特电路的设计要求.不难发现,阈值电流以及回差值的改变只需通过调整电流镜MOS管的宽长比来实现.事实上,两个回差电流值的大小可按需要分别控制,并不要求取相同的值.

3.2 四值施密特电路

四值施密特反相器的电流传输运算表示为:

$$\bar{x} = (1 \triangleright x^{\dot{0},5}) \& (1 \triangleright x^{\dot{1},5}) \& (1 \triangleright x^{\dot{2},5}) \quad (7)$$

根据四值施密特电路对阈值的控制要求,可得:

$$i_{0,5} = i_{0,5+} - (\Delta i_{0,5} \triangleright x^{\dot{2},5}) = \begin{cases} i_{0,5+}, & x = 0 \\ i_{0,5-}, & x = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (8)$$

$$i_{1,5} = i_{1,5+} - (\Delta i_{1,5} \triangleright x^{\dot{1},5}) = \begin{cases} i_{1,5+}, & x = 0, 1 \\ i_{1,5-}, & x = 2, 3 \end{cases} \quad (9)$$

$$i_{2,5} = i_{2,5+} - (\Delta i_{2,5} \triangleright x^{\dot{0},5}) = \begin{cases} i_{2,5+}, & x = 0, 1, 2 \\ i_{2,5-}, & x = 3 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\Delta i_{0,5} = i_{0,5+} - i_{0,5-}$, $\Delta i_{1,5} = i_{1,5+} - i_{1,5-}$, $\Delta i_{2,5} = i_{2,5+} - i_{2,5-}$, 它们分别代表了四值施密特电路中的三个回差电流值.在四值施密特电路存在着六种阈电流,其中*i_{0,5+}*, *i_{1,5+}*和*i_{2,5+}*用于检测上升信号, *i_{0,5-}*, *i_{1,5-}*和*i_{2,5-}*用于检测下降信号.式(8)表明,当输入信号由零上升时,检测阈*i_{0,5}* = *i_{0,5+}*;当输入信号*x*超过阈值*i_{0,5+}*时,该检测阈必须下跳至*i_{0,5-}*.这一阈值控制可以通过关闭传输电流 $\Delta i_{0,5}$ 的开关来实现.同理,式(9)表明,当输入信号*x*上升并超过*i_{1,5+}*时,控制传输电流 $\Delta i_{1,5}$ 的开关被关闭;式(10)表明,当输入信号*x*上升至超过*i_{2,5+}*时,控制传输电流 $\Delta i_{2,5}$ 的开关被关闭.由此实现的四值施密特电路如图3所示,其中*I_{out}*和*V_{out}*分别为四值电流输出信号和四值电压输出信号.为简单计,图中假设三个回差

表1 电路真值表

电流 $\Delta i_{0,5} = \Delta i_{1,5} = \Delta i_{2,5} =$	<i>x</i>	<i>b₂</i>	<i>b₁</i>	<i>b₀</i>	<i>I_{out}</i>	<i>V_{out}</i>
Δi 电压源 ($0, V_{DD}/3$)	0	0	0	0	3	3
$2V_{DD}/3, V_{DD}$)	1	0	0	3	2	2
逻辑值 (0 1 2 3).	2	0	3	3	1	1
该电路的真值表如表1所示.	3	3	3	3	0	0

上述设计方法可推广至任意逻辑值的电流型 CMOS 施密特电路的设计.对于一个*m*值电流型 CMOS施密特反相器可建立如下通用的实现阈值控制电路的电流传输开关运算表达式:

$$i_t = i_{t+} - (\Delta i_t \triangleright x^{\dot{t},5}) = \begin{cases} i_{t+}, & x = 0 \dots, t - 0.5 \\ i_{t-}, & x = t + 0.5 \dots, m - 1 \end{cases} \quad (11)$$

$t \in \{0.5, \dots, m - 1.5\}$

式中 *t*代表电路的阈值, *i_{t+}*和*i_{t-}*分别用于检测上升信号和下降信号.

对所设计电路均已通过计算机模拟.以图3所示电路为例,采用 TSMC 0.25μm CMOS工艺参数并取 *V_{DD}* = 1.5V,经 HSPICE模拟得到其 DC传输特性和瞬态特性曲

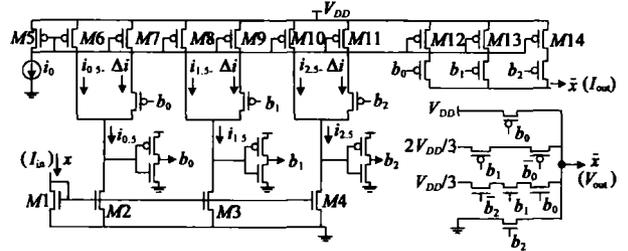


图3 电流型 CMOS 四值施密特反相器

线分别如图4(a),

表2 MOS管尺寸

(b)所示.模拟时各主要MOS管的尺寸如表2所示.参考电流*i₀*取20μA,和逻辑值(0,1,2,3)相对应的电流值分别为

MOS管	W/μm	L/μm
M1, M2, M3, M4	3	0.25
M5, M12, M13, M14	8	0.5
M7, M9, M11	4	0.5
M6	2	0.5
M8	10	0.5
M10	18	0.5

(0, 20μA, 40μA, 60μA).三个回差电流值均设计为10μA(即 $\Delta i = 10\mu A$).从图4(a)的DC传输特性曲线可以看出,所设计的电路具有理想的回差特性.模拟测得的三个回差电流值与理论值之间的误差非常小.图4(b)中*I_{in}*为四值电流输入信号,该信号已考虑了所有的跳变情况,*I_{out}*和*V_{out}*分别为模拟所得的四值电流输出信号和四值电压输出信号.

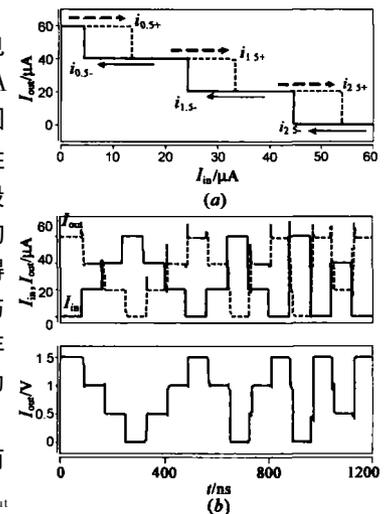


图4 (a) DC传输特性;(b)瞬态特性

4 结论

由于开关信号理论描写了信号、阈值及元件开关状态之间的关系,因此,该理论能很有效地指导对施密特电路的设计.本文在设计方法上主要有两个特点:首先建立了实现电流型 CMOS多值施密特电路中阈值控制电路的电流传输开关运算,用于指导对电路的开关级设计.其次是在所提出的电路设计中采用了混合设计方法,利用两个二值反相器输出的二值电压信号作为再生反馈控制信号,同时又用它们去控制多值电流输出信号和电压输出信号的传输,因此是多值电流信号与二值电压信号的混合利用.

采用二值反相器的输出作为控制信号, 加强了控制信号的驱动能力, 这有助于提高电路的性能. 同时, 用它们去控制输出信号的传输, 这无论对于多值电流信号还是多值电压信号的传输都是十分便利的. 因此本文所提出的设计即使同时提供多值电流信号及多值电压信号输出, 也保持了简单的结构. 此外, 电路的回差电流值只需通过调整 MOS 管的宽长比来控制, 十分方便. HSPICE 模拟结果验证了所提出设计方法的有效性, 并证明了该电路可在较低的电压下工作. 式 (11) 表明, 本文提出的设计方法可适用于二值和基数更高的多值电流型 CMOS 施密特电路的设计.

参考文献:

- [1] Liao T S, Chang C M, Chung W Y. MOS transistors for current-mode schmitt trigger [J]. EDN, 1998, 43(25): 126
- [2] Wang Z, Guggenbuhl W. CMOS current Schmitt trigger with fully adjustable hysteresis [J]. Electronics Letters, 1989, 25(6): 397-398
- [3] Palmbo G. A novel fully adjustable CMOS current Schmitt trigger with a 1.5V power supply [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 1998, 26(3): 323-327
- [4] Hang G, Wu X. Current-mode CMOS circuits design based on current threshold-controllable technique [A]. Proceedings

of IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems [C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2000: 529-532.

- [5] Hang G, Wu X. Current threshold-controllable technique and ternary current-mode CMOS Schmitt circuits [J]. An International Journal: Multiple-Valued Logic, 2001, 7(3-4): 283-294
- [6] Shen J, Tougaw P D. Design of symmetric ternary current-mode CMOS Schmitt inverter [J]. International Journal of Electronics, 1998, 85(4): 477-482
- [7] Wu X. Theory of transmission switches and its application to design of CMOS digital circuits [J]. International Journal of Circuit Theory and Application, 1992, 20(4): 349-356

作者简介:



杭国强 男, 1968 年 8 月生于浙江桐乡, 2000 年 7 月获浙江大学工学博士学位, 现为浙江大学信息与电子工程学系副教授, 中国电子学会高级会员, 已发表学术论文 50 余篇, 曾获教育部科技进步二等奖 1 项, 浙江省科学技术奖二等奖 1 项, 目前主要从事多值逻辑及低功耗集成电路设计方面的研究工作.

E-mail: hanggq@mail.hz.zj.cn