

对称三值电流型 CMOS 电路设计¹

沈继忠 陈偕雄 姚茂群

(杭州大学电子工程系 杭州 310028)

摘 要 本文应用开关信号理论,建立了采用对称三值逻辑的传输电流开关理论,该理论能指导从开关级设计对称三值电流型 CMOS 电路。应用该理论设计的对称三值电流型 CMOS 电路不仅具有简单的电路结构和正确的逻辑功能,而且能处理具有双向特性的信号。

关键词 对称三值逻辑, 电流型 CMOS 电路, 传输电流开关理论, 开关信号理论

中图分类号 TN791

1 引 言

对称三值逻辑是指变量取值为 $\{-1, 0, 1\}$ 的三值逻辑(通常将 -1 记作 $\bar{1}$)^[1]。由于它在取值上带有符号位,使其具有独特的优点:如采用对称三进制的加、减法不需设置符号位,可用同一硬件实现;乘法仍保持 2 进制乘法的简单特点;数元与一个 n 位数的相乘不会产生进位等^[2,3]。因此,国际上有学者认为对称三进制对计算机来说是一种最好的数制^[4]。

由于多值电流型 CMOS 电路在增加逻辑级时,不导致逻辑级差的减小,不增加电源设备,并能用现有二值 CMOS 工艺制作,克服了电压型 CMOS 电路的诸多困难。因此,对电流型 CMOS 电路的研究受到了国际上广泛的重视^[5-10]。由于电流信号有大小和方向,这与对称三值逻辑的取值刚好吻合。因此,采用对称电流型 CMOS 电路将能处理具有双向特性的信号。而至今国际上对于对称电流型 CMOS 电路设计尚缺乏研究,本文将在适用于电流型 CMOS 电路的传输电流开关理论^[9]的基础上,建立采用对称三值逻辑的传输电流开关理论,然后设计相应的电路。

2 采用对称三值逻辑的传输电流开关理论

2.1 开关变量和开关代数

开关变量用 $\alpha, \beta, \gamma \dots$ 表示,它们取值为 T, F , 分别表示电路中传输开关 MOS 管的两种开关状态——通和断。开关变量之间的基本运算为“与”,“或”,“非”,它们分别为 $\alpha \cdot \beta, \alpha + \beta, \bar{\alpha}$, 前两种运算可用 MOS 管的串联和并联实现,而后一种运算则可用 MOS 管反相器实现。开关变量之间的运算遵循传统开关代数的法则。

2.2 对称三值信号和 Post 代数

¹ 1996-06-07 收到, 1996-11-13 定稿
国家自然科学基金资助项目, 浙江省自然科学基金资助项目

对称三值信号变量用 $x, y, z \dots$ 表示, 它们取值 $\{\bar{1}, 0, 1\}$, 分别表示电路中三种不同的电流信号。对称三值信号变量的基本运算为

$$\text{文字运算} \quad {}^i x^i \triangleq \begin{cases} 1, & x = i; \\ \bar{1}, & x \neq i; \end{cases} \quad (i = \bar{1}, 0, 1). \quad (1)$$

$$\text{补运算} \quad \bar{x} = -x. \quad (2)$$

$$\text{取小运算} \quad x \cap y = \min(x, y). \quad (3)$$

$$\text{取大运算} \quad x \cup y = \max(x, y). \quad (4)$$

$$\text{求和运算} \quad x \& y \triangleq x \text{ plus } y. \quad (5)$$

2.3 信号变量到开关变量的联结运算

为了反映电流型 CMOS 电路中电流信号控制 MOS 传输开关管开关状态的过程, 需引入信号变量到开关变量的联结运算。由于 MOS 传输开关管的开关状态总是由电流比较器通过比较复制信号和阈值的输出结果来控制, 因此可引入:

$$\text{低阈比较运算} \quad x^t \triangleq \begin{cases} T, & x < t; \\ F, & x > t. \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{高阈比较运算} \quad {}^t x \triangleq \begin{cases} T, & x > t; \\ F, & x < t. \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{双阈比较运算} \quad {}^{t_1} x^{t_2} \triangleq \begin{cases} T, & t_1 < x < t_2; \\ F, & \text{其它}. \end{cases} \quad (8)$$

与阈比较运算有关的性质为

$$\left. \begin{aligned} x^t &= \bar{{}^t \bar{x}}, \\ {}^t x &= \bar{x}(-t), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} x^t &= {}^t \bar{x}, \\ {}^t x &= \bar{x}^t; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} x^{t_1} \cdot x^{t_2} &= x^{\min(t_1, t_2)}, \\ x^{t_1} + x^{t_2} &= x^{\max(t_1, t_2)}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} {}^{t_1} x \cdot {}^{t_2} x &= \max(t_1, t_2) x, \\ {}^{t_1} x + {}^{t_2} x &= \min(t_1, t_2) x. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2.4 开关变量到信号变量的联结运算

为了反映电流型 CMOS 电路中 MOS 传输开关管的开关状态控制电流信号的作用过程, 尚需引入开关变量到信号变量的联结运算。由于 MOS 传输开关管对电流信号的控制是以传输电流开关的方式进行的, 因此可定义

$$\text{传输运算} \quad x \triangleright \alpha \triangleq \begin{cases} x, & \alpha = T; \\ 0, & \alpha = F. \end{cases} \quad (13)$$

上式中 α 表示传输开关管的开关状态, 与传输运算有关的性质为

$$(x \triangleright \alpha) \triangleright \beta = (x \triangleright \beta) \triangleright \alpha = x \triangleright (\alpha \cdot \beta), \quad (14)$$

$$(x \& y) \triangleright \alpha = (x \triangleright \alpha) \& (y \triangleright \alpha), \quad (15)$$

$$(x \triangleright \alpha) \& (x \triangleright \beta) = [x \triangleright (\alpha + \beta)] \& [x \triangleright (\alpha \cdot \beta)]. \quad (16)$$

2.5 函数的规范展开

根据以上诸运算的定义及其性质, 可得到对任意单变量函数 $f(x)$ 的规范展开式:

$$f(x) = [f(\bar{1}) \triangleright x^{-0.5}] \& [f(0) \triangleright^{-0.5} x^{0.5}] \& [f(1) \triangleright^{0.5} x]. \quad (17)$$

对于多变量函数, 则只要逐次对变量展开, 即可得到相应的规范展开式。如二变量函数 $f(x, y)$ 可展开为

$$\begin{aligned} f(x, y) = & [f(\bar{1}, \bar{1}) \triangleright (x^{-0.5} \cdot y^{-0.5})] \& [f(\bar{1}, 0) \triangleright (x^{-0.5} \cdot^{-0.5} y^{0.5})] \\ & \& [f(\bar{1}, 1) \triangleright (x^{-0.5} \cdot^{0.5} y)] \& [f(0, \bar{1}) \triangleright (^{-0.5} x^{0.5} \cdot y^{-0.5})] \\ & \& [f(0, 0) \triangleright (^{-0.5} x^{0.5} \cdot^{-0.5} y^{0.5})] \& [f(0, 1) \triangleright (^{-0.5} x^{0.5} \cdot^{0.5} y)] \\ & \& [f(1, \bar{1}) \triangleright (^{0.5} x \cdot y^{-0.5})] \& [f(1, 0) \triangleright (^{0.5} x \cdot^{-0.5} y^{0.5})] \\ & \& [f(1, 1) \triangleright (^{0.5} x \cdot^{0.5} y)]. \end{aligned} \quad (18)$$

3 对称三值电流型 CMOS 电路中的基本单元

3.1 电流源和电流镜

以电流作为信号的电路中, 首先必须考虑各种恒定电流源的生成和电流信号的扇出。图 1(a) 表示了用 PMOS 和 NMOS 管构成的恒定电流源。我们只要控制 T_1, T_2 管沟道的宽度 (W_p, W_n) 和长度 (L_p, L_n), 便可调节通过两管的电流, 此电流可作为基准电流 I_0 , 这样若使 T_3 管的沟道宽长之比为 T_1 的沟道宽长比的 K_p 倍, 则其漏极电流即为 $K_p I_0$ 。同样, 可使 T_4 管的漏极电流为 $K_n I_0$ 。若按常规将输入、输出电路的电流信号规定为正向, 则可通过按图 1(a) 方法并接不同 K_p 值的 PMOS 管和不同 K_n 值的 NMOS 管得到各种正值和负值恒流源。

如果将图 1(a) 中 T_3 和 T_4 管的 D 极接在一起, 作为输出, 将 T_1, T_2 管的 D 极连接点作为输入, 接信号源, 并取 $K_p = K_n = 1$, 就构成了能复制正、负电流的适用于对称三值电路的电流型 CMOS 电流镜, 如图 2 所示。通过此电流镜复制出的电流与信号源 x 大小相等、方向相反, 成镜象关系, 即 $f = \bar{x}$ 。若要复制 n 个信号源 x , 只要接 n 对像图 2(a) 中 T_3, T_4 管一样接法的 MOS 管即可, 从而解决了对称电流信号的扇出问题。

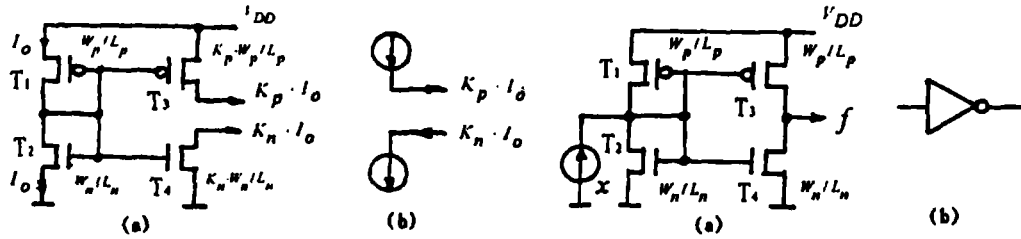


图 1 恒流源的构成
(a) 电路 (b) 符号

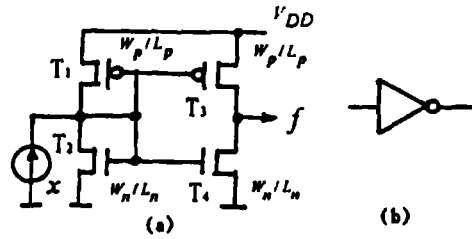


图 2 电流镜的构成
(a) 电路 (b) 符号

上述电流源和电流镜, 我们用 $2\mu\text{m}$ 工艺的参数, 用 PSPICE 电路模拟程序进行了模拟, 结果表明, 这两个电路具有良好的性能, 电流镜复制精确, 且延迟很小, 约为 2.28ns 。

3.2 阈比较电路和传输运算电路

阈比较电路是通过比较信号源复制的电流和阈值电流的大小来控制 MOS 管开关状态的电路。如图 3 所示, 图中的 -0.5 、 0.5 恒流源为阈值电流, MOS 管即为信号传输开关管。本来恒流源方向已代表了电流的正负性, 但为了阅读上的方便, 我们仍在图中将恒流源冠以符号。图中的信号源 x 是通过电流镜复制得到的, 它的方向对应于电流镜的输入信号的正方向, 故就电流镜的输入电流方向而言, 图 3(a) 为 $x^{0.5}$ 阈比较电路, 其中的 NMOS 开关管在 $x=0, \bar{1}$ 时通, $x=1$ 时断。而图 3(b) 为 $x^{-0.5}$ 阈比较电路, 其中的 NMOS 开关管在 $x=\bar{1}$ 时通, $x=0, 1$ 时断。同样分析知图 3(c), 3(d) 分别为 $0.5x$ 和 $-0.5x$ 阈比较电路。可见, NMOS 和 PMOS 传输开关管分别实现低阈比较运算和高阈比较运算。

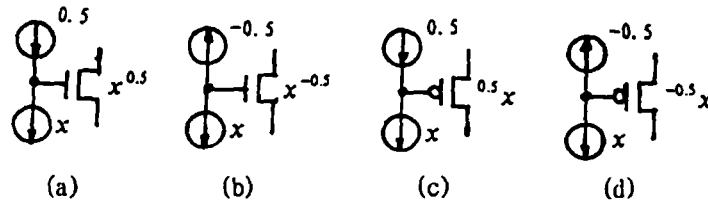


图 3 阈比较电路

传输运算电路是指 MOS 传输开关管的开关状态控制电流信号传输的电路。对 NMOS 管, 按规定的电流方向, 若 D 极接传输源, 则 S 极输出正信号; 若 S 极接传输源, 则 D 极输出负信号。对 PMOS 管, 情况刚好相反。以图 3(a), 3(c) 为例, 对应的传输运算电路分别如图 4(a), 4(b) 和图 5(a), 5(b) 所示。由于实际电路的输出有负载, 故需分析传输运算电路接上实际负载 (电流镜的一对输入 MOS 管) 时的工作情况。分析结果表明, 由 NMOS 管作开关管的传输运算电路, 无论 S 极或 D 极作为输出, 即无论传输正信号还是负信号, 电路均能正常工作, 而由增强型 PMOS 管作开关管的传输运算电路, 只能在 S 极接传输源, 即只能传输正信号, 而不能传输负信号。因此图 5(a) 电路能正常工作, 而图 5(b) 电路不能正常工作。解决这一问题可有二条途径: 一种是当 PMOS 管传输负信号时, 将其改用耗尽型 PMOS 管, 这样电路即能正常工作。制作耗尽型 PMOS 管只要在原来增强型工艺基础上, 增加光刻和注入两道工序即可; 另一种方

法是, 根据 (9) 式, 高低阈比较运算可相互转换, 只要将阈值和信号均取反. 阈值取反只要换用另一方向的恒流源即可, 信号源取反可由在原来的电流镜后再接一级电流镜来实现, 这样可由 NMOS 管代替 PMOS 管实现传输负信号. 由于电流镜的延迟很小, 因此增加一级电流镜对电路产生的影响很小. 本文将采用后一种方案, 以减少集成电路制造工序.

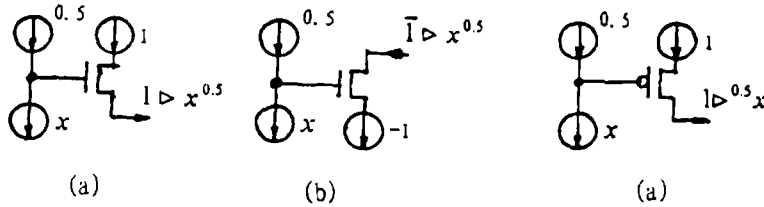


图 4 $x^{0.5}$ 对应的传输运算电路

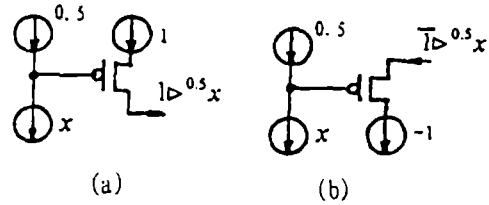


图 5 $0.5x$ 对应的传输运算电路

上述所有对传输运算电路的分析以及解决增强型 PMOS 传输管不能传输负信号的两方案均已由 PSPICE 模拟予以证实, 并且模拟结果还表明各传输运算电路具有非常理想的 DC 特性和瞬态特性, 且工作速度快, 延迟仅为 10ns~15ns.

4 电路设计实例

函数总是根据它的函数值进行综合的, 对任意对称三值函数 f 均可有

$$f = (\bar{1} \triangleright f^{-0.5}) \& (1 \triangleright 0.5 f). \quad (19)$$

利用 $0 = \bar{1} \& 1$ 和有关性质可得

$$\begin{aligned} f &= (\bar{1} \triangleright f^{-0.5}) \& (1 \triangleright 0.5 f) \& [(\bar{1} \& 1) \triangleright^{-0.5} f^{0.5}] \\ &= (\bar{1} \triangleright f^{-0.5}) \& (1 \triangleright 0.5 f) \& (\bar{1} \triangleright^{-0.5} f^{0.5}) \& (1 \triangleright^{-0.5} f^{0.5}) \\ &= [\bar{1} \triangleright (f^{-0.5} + {}^{-0.5} f^{0.5})] \& [1 \triangleright (0.5 f + {}^{-0.5} f^{0.5})] = (\bar{1} \triangleright f^{0.5}) \& (1 \triangleright^{-0.5} f). \end{aligned} \quad (20)$$

同样尚可将 f 写成

$$f = \bar{1} \& (1 \triangleright^{-0.5} f^{0.5}) \& (2 \triangleright 0.5 f) = \bar{1} \& (1 \triangleright^{-0.5} f) \& (1 \triangleright 0.5 f). \quad (21)$$

或

$$f = 1 \& (\bar{1} \triangleright^{-0.5} f^{0.5}) \& (-2 \triangleright f^{-0.5}) = 1 \& (\bar{1} \triangleright f^{-0.5}) \& (\bar{1} \triangleright f^{0.5}). \quad (22)$$

利用 (20)~(22) 式可在函数综合时进行函数形式的变换.

4.1 单变量函数电路

表 1 给出了四个单变量函数, 其中 \oplus 表示模 3 加. 由表 1 可得如下函数形式

$$x_{id} = (\bar{1} \triangleright x^{-0.5}) \& (1 \triangleright 0.5 x). \quad (23)$$

$$\bar{x} = (1 \triangleright x^{-0.5}) \& (\bar{1} \triangleright 0.5 x) = (1 \triangleright x^{-0.5}) \& [\bar{1} \triangleright (\bar{x})^{-0.5}]. \quad (24)$$

$$x \oplus \bar{1} = (1 \triangleright x^{-0.5}) \& (\bar{1} \triangleright^{-0.5} x^{0.5}) = (\bar{1} \triangleright x^{0.5}) \& (2 \triangleright x^{-0.5}). \quad (25)$$

$${}^1 x^1 = (1 \triangleright 0.5 x) \& (\bar{1} \triangleright x^{0.5}). \quad (26)$$

根据上节有关运算和电路相对应的讨论, 可得到相应于 (23)~(25) 式的对称三值电流型 CMOS 电路, 如图 6 所示. 图 4(b) 和图 5(a) 输出接在一起就构成与 (26) 式对应的电路.

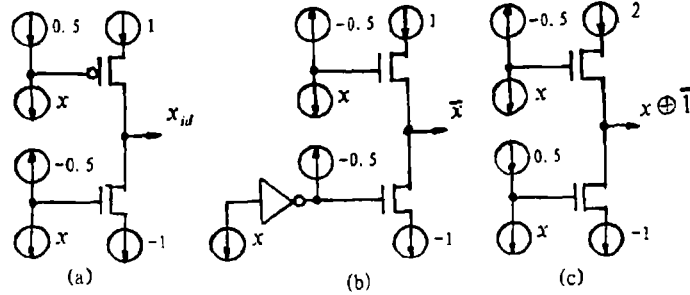


图 6 $x_{id}, \bar{x}, x \oplus \bar{1}$ 的对称三值电流型 CMOS 电路
(a) 电路 x_{id} 电路 (b) \bar{x} 电路 (c) $x \oplus \bar{1}$ 电路

表 1

x	x_{id}	\bar{x}	$x \oplus \bar{1}$	\bar{x}^1
1	1	1	1	1
0	0	0	1	1
1	1	1	0	1

4.2 $x \cap y$ 和 $x \cup y$ 电路

图 7(a),7(b) 给出了 (3),(4) 式所定义的 $x \cap y$ 和 $x \cup y$ 的 K 图表示. 由图 7 得

$$x \cap y = [\bar{1} \triangleright (x^{-0.5} + y^{-0.5})] \& (1 \triangleright {}^{0.5}x \cdot {}^{0.5}y), \quad (27)$$

$$x \cup y = [1 \triangleright ({}^{0.5}x + {}^{0.5}y)] \& [\bar{1} \triangleright x^{-0.5} \cdot y^{-0.5}]. \quad (28)$$

由上述两式可得取小、取大运算的对称三值电流型 CMOS 电路如图 7(c), 7(d) 所示.

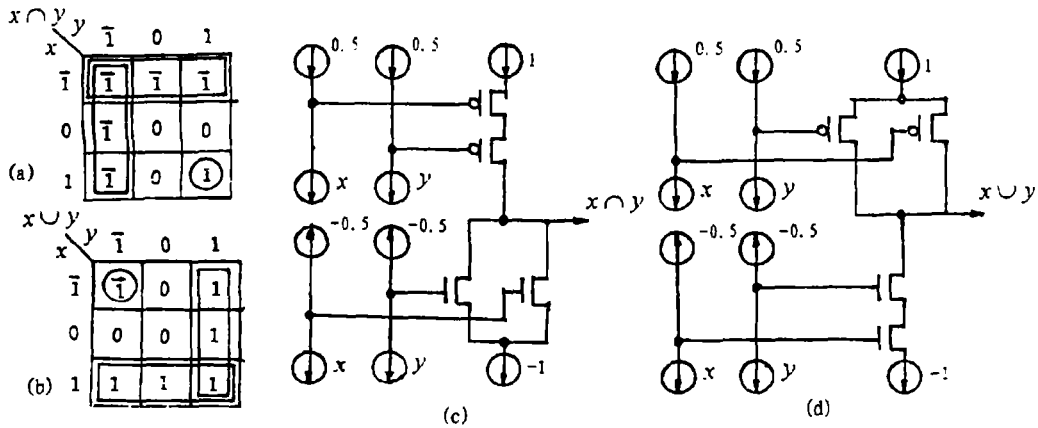


图 7 $x \cap y$ 和 $x \cup y$ 的对称三值电流型 CMOS 电路
(a) $x \cap y$ K 图 (b) $x \cup y$ K 图 (c) $x \cap y$ 电路 (d) $x \cup y$ 电路

4.3 对称三值模加电路

对称三值变量 x, y 的模 3 加 K 图如图 8(a) 所示。由 K 图可知 $x \oplus y$ 仅与 $\Sigma = x \& y$ 的结果有关, 故可将 Σ 作为输入变量。由此可得 $x \oplus y$ 的函数表达式为

$$\begin{aligned}
 x \oplus y &= (\bar{1} \triangleright \Sigma^{-0.5}) \& (1 \triangleright^{0.5} \Sigma) \& (2 \triangleright \Sigma^{-1.5}) \& (-2 \triangleright^{1.5} \Sigma) \\
 &= (\bar{1} \triangleright \Sigma^{-0.5}) \& (1 \triangleright^{0.5} \Sigma) \& (2 \triangleright \Sigma^{-1.5}) \& (-2 \triangleright (\bar{\Sigma})^{-1.5}).
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

由上式可画出对称三值模 3 加的电流型 CMOS 电路如图 8(b) 所示。

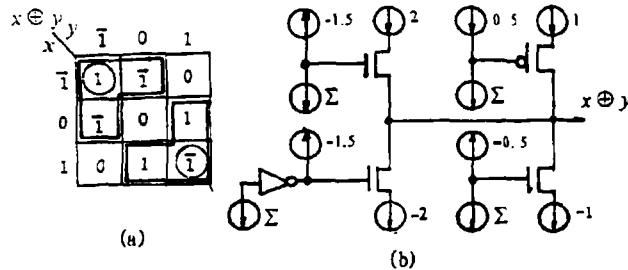


图 8 $x \oplus y$ 的对称三值电流型 CMOS 电路
(a) K 图 (b) 电路

以上设计的电路均已用 PSPICE 进行了模拟, 结果表明, 它们不仅具有正确的逻辑功能和理想的 DC 特性和瞬态特性, 且具有较高的工作速度。以图 6(a) 所示的 x_{id} 电路为例, 图 9(a), 9(b) 分别为其直流和瞬态特性, 它的平均传输延迟为 18.55ns。这表明, 应用开关信号理论建立的采用对称三值逻辑的传输电流开关理论可成功地指导对称三值电流型 CMOS 电路设计。

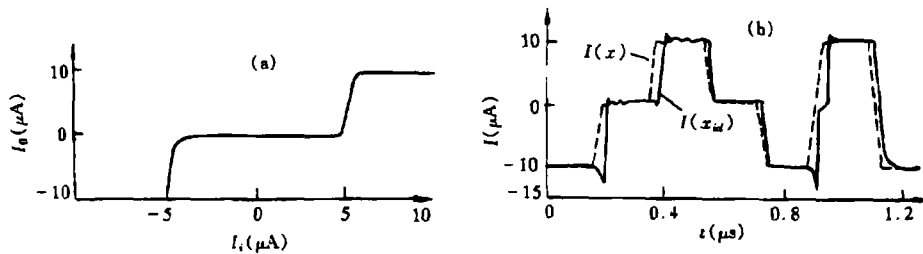


图 9 x_{id} 的 DC 和瞬态特性
(a) 直流特性 (b) 瞬态特性

5 结 论

本文将开关信号理论应用于采用对称三值逻辑的电流型 CMOS 电路设计, 建立了采用对称三值逻辑的传输电流开关理论。设计实例表明, 它能成功地指导对称三值电流型 CMOS 电路

的设计, 且设计的电路具有简单的电路结构和良好的特性。由于对称三值逻辑的取值性质刚好吻合电流信号的双向特性, 因此, 按本文方法设计的对称三值电流型 CMOS 电路可以处理具有双向特性的信号。最后需要指出, 尽管本文设计的是对称三值电流型 CMOS 电路, 但本文的设计方法可以推广到其他取值为奇数的多值对称电流型 CMOS 电路的设计。

参 考 文 献

- [1] 陈其翔. $\bar{1}01$ 三进制制. 数学通报, 1958, 3(102): 4-7.
- [2] 陈信雄, 吴训威. 对称三值逻辑及对称三值 CMOS 电路. 计算机学报, 1991, 14(5): 389-394.
- [3] 吴训威. 多值逻辑电路设计原理. 杭州: 杭州大学出版社, 1994, 315-342.
- [4] Frieder G. A Balanced ternary computer. Proc. of 3th ISMVL, Toronto: 1973, 68-75.
- [5] Freitas D A, Current K W. A CMOS current comparator circuit. Electron. Lett., 1983, 19(17): 695-697.
- [6] Chen X, Moraga C. An Algebra for current-mode CMOS multivalued circuits. Proc. of 23th ISMVL, Sacramento: 1993, 239-244.
- [7] Navi K, Kazeminejad A, Etiemble D. Performance of CMOS current mode full adder. Proc. of 24th ISMVL, Boston: 1994, 27-34.
- [8] Onneweer S P, Kerkhof H G. Current-mode CMOS high-radix circuits. Proc. of 16th ISMVL, Blacksburg: 1986, 60-69.
- [9] 吴训威, 邓小卫, 应时彦. 基于开关信号理论的三值电流型 CMOS 电路设计. 电子科学学刊, 1993, 15(2): 113-120.
- [10] 杨洪利, 靳东明, 李志坚. 电流型 CMOS 多值乘法器分析与设计. 电子学报, 1995, 3(2): 78-81.

DESIGN OF SYMMETRIC TERNARY CURRENT-MODE CMOS CIRCUITS

Shen Jizhong Chen Xiexiong Yao Maoqun

(Dept. Electronic Engineering, Hangzhou University, Hangzhou 310028)

Abstract By applying switch-signal theory, the theory of transmission current-switches based on symmetric ternary logic is proposed, this theory is suitable to design symmetric ternary current-mode CMOS circuits. The symmetric ternary current-mode CMOS circuits designed by using this theory not only have simpler circuit structures and correct logic functions, but also can process two-way signal.

Key words Symmetric ternary logic, Current-mode CMOS circuits, Theory of transmission current-switches, Switch-signal theory

沈继忠: 男, 1965 年生, 副教授, 中国电子学会高级会员, 从事数字电子学专业。
 陈信雄: 男, 1941 年生, 教授, 中国电子学会会士, 从事数字电子学专业。
 姚茂群: 女, 1967 年生, 讲师, 从事数字电子学专业。