

Boole 过程论*

闵应骅 李忠诚 赵著行

(中国科学院计算技术研究所 CAD 开放实验室, 北京 100080)

摘要 定义 Boole 过程为与时间参数 t 有关的 Boole 变量族. Boole 过程的一个实值样本是波形, 波形函数可以用数学工具形式地加以处理. 定义了波形多项式的差分、距离和极限, 给出了极限存在的充分必要条件. 在此基础上, 严格地重新定义了通路敏化概念, 以期说明 Boole 过程论的应用前景.

关键词 Boole 过程 波形函数 波形极限 通路敏化

近几十年来, 布尔(Boole)代数由于它成功地描述了数字电路的逻辑行为, 而在数字电路的设计与测试中得到了广泛的应用, 不失为一个有力的数学工具. 但是, 随着电子电路的高速化和大规模集成化, 在处理高性能计算的时候, 这一工具显现其明显的不足.

在计算机硬件和软件中大量碰到异步性的问题. 并行的多进程计算在进程间通讯时表现出异步性. 一个同步时序电路当它的时钟周期短到和电路时滞可以相比拟时就表现出它的异步性, 甚至一个组合电路当运行在极高时钟频率下时实际上成了一个异步时序电路. 而高性能计算和电路设计恰恰要把提高电路的速度和计算速度作为一个主要的目标. 为达到此目的, 许多技术途径已经提了出来, 有的已付诸实践. 作为基础, 研究时间特性的描述是和逻辑特性的描述一样重要的. 应该说, 这是一个重要的基础研究课题.

用 Boole 代数无法处理定时问题. 时态逻辑用数理逻辑的方法规定一些算子来处理离散时间参数^[1]. Amblard 等曾用一类泛函来描述和解释电路的时间特性^[2], 但此后未见报道. 传统上, 人们是用波形图对电路进行直观的分析与综合. 但是, 这对于大型电路显然是不适宜的. 本文提出一种数学分析途径精确地描述逻辑电路的定时特性, 以利于设计中的定时验证和时滞测试.

Boole 过程的概念由本文作者之一在 IEEE 第三届亚洲测试会议上提出¹⁾, 此后又发表了一系列的文章^{2), 3)}, 论及它在时滞故障模型和测试方面的应用. 1994 年, Lam 和 Brayton 发表了时变 Boole 函数论^[3]一书, 不约而同的以同样的目的, 处理相同的问题, 但采用的方法不同.

1995-12-11 收稿, 1996-07-02 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

1) Min Y. Boolean process—An analytical approach to circuit representation. Proc IEEE Third Asian Test Symposium, Japan, 1994. 249~254

2) Min Y, Zhao Z, Li Z. Boolean process—An analytical approach to circuit representation (II). Proc IEEE Fourth Asian Test Symposium, India, 1995. 26~32

3) Min Y, Zhao Z, Li Z. Analytical delay models for delay testing. Proc VLSI Design Conf. 96, India, 1996

时变 Boole 函数取 Boole 值, 用二值判决图(BDD)作工具来分别描写各状态的逻辑行为. 但实际上, 更重要的是描写局部稳定状态, 即电路中某些点已达到稳定状态, 而其他一些却仍处于不稳定状态, 例如某一个与门, 它的全部输入都是 1, 但其输出还在 0 状态. 这种局部稳定状态用 BDD 无法描写. 而 Boole 过程用实值的加、减、乘运算, 为异步性描述提供了比较形式的理论基础. McCluskey 曾提出过这种解析表示^[4], 但限于当时技术的发展情况, 极限概念未能引入, 致使敏化、冒险等问题未能精确地用解析表示来处理. 限于篇幅, 本文着重 Boole 过程的理论基础, 并提及 Boole 过程潜在的应用前景.

1 Boole 过程

Boole 代数可以用集合、逻辑命题或开关变量来解释. 这里给出一个实值变量的解释. 考虑由两个实数组成的集合 $\mathcal{B} = \{0, 1\}$, 并且定义

$$a \vee b = \max\{a, b\}, a \wedge b = \min\{a, b\}, \\ \bar{a} = 1 - a$$

不难验证, $\langle \{0, 1\}, \vee, \wedge, \bar{} \rangle$ 是一个 Boole 代数.

定义 1 Boole 过程 $\{X(t) | t \in T\}$ 是与参数 t 有关的 Boole 变量族, 其中 t 在一个参数集 $T \subset (-\infty, +\infty)$ 内变化.

考虑某些特殊情形. 若 T 是一个时钟周期, 则 $X(t)$ 描述在此周期内任意时刻 t 的逻辑值. 若 $T = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, 则 $X(t)$ 描写同步时序电路离散时间的逻辑行为. 若 $T = (-\infty, +\infty)$, $X(t)$ 将是电路异步性的完全的描述, 不论它是异步电路、同步电路或组合电路, 也不论采用哪一种时滞模型.

定义 2 实值函数 $X(t)$ 称为一个波形, 如果对任何 t , $X(t) = 0$ 或 1 ; 而且, $X(t)$ 是最多具有可数多个不连续点

$$-\infty < t_1 < t_2 < \dots < t_i < \dots < +\infty \quad (1)$$

的左连续函数, 并且对任何整数 $i > 0$, 及最小容许脉宽 ϵ , 有 $t_{i+1} - t_i > \epsilon$. $0 \rightarrow 1$ 的转换称为波形的上升沿, 而 $1 \rightarrow 0$ 称为下降沿.

显然, Boole 过程的一个样本 $X(t)$ 就是波形, 而在任意给定时刻, 它是一个 Boole 变量. 如不引起混淆, 就简记为 X .

定义 3 实值函数

$$\omega_0(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

称为基本波形, 可简记为 ω_0 . 它表示只在 $t = 0$ 有一个上升沿的波形. 类似地, 以下用 ω_τ 表示只在 $t = \tau$ 有一个上升沿的波形. 显然

$$\omega_\tau(t) = \omega_0(t - \tau)$$

同时, 只在 $t = \tau$ 有一个下降沿的波形可表示为 $1 - \omega_\tau$; 在 $t = \tau$ 上升、脉宽 δ 的正脉冲可表示为 $\omega_\tau - \omega_{\tau+\delta}$, 而相应的负脉冲则为 $1 - \omega_\tau + \omega_{\tau+\delta}$.

定理 1 设 A, B, C 是波形, 则

$$\left. \begin{aligned} \min(A, B) &= A \times B, \\ \max(A, B) &= A + B - AB, \\ \max(A, B, C) &= A + B + C - AB - AC - BC + ABC, \\ \omega_x \times \omega_y &= \omega_{\max|x, y|}, \\ \omega_x \times \omega_{x+\delta} &= \omega_{x+\delta} \text{ 如 } \delta > 0, \\ \text{若 } x \leq y, \text{ 则 } \omega_x &\geq \omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, x, y, δ 是实数, $+, -, \times$ 指实数运算, 式中的 $\times$ 可以省略.

推论 1

$$\begin{aligned} \max(\omega_x, \omega_y) &= \omega_{\min}(x, y), \\ \min(\omega_x, \omega_y) &= \omega_{\max}(x, y), \\ \max(1 - \omega_x, 1 - \omega_y) &= 1 - \omega_{\max}(x, y), \\ \min(1 - \omega_x, 1 - \omega_y) &= 1 - \omega_{\min}(x, y), \\ (1 - \omega_x) \times (1 - \omega_y) &= 1 - \omega_{\min|x, y|}. \end{aligned} \quad (3)$$

定理 1 和推论 1 的证明都很简单, 此处从略.

定理 2 对任何波形 $X(t)$, 如果

(1) $X(0) = 0$,

(2) 存在一系列上升沿 r_i 及下降沿 $f_i (i=1, 2, \dots)$, 使得

$$r_1 < f_1 < r_2 < f_2 < \dots < r_i < f_i < \dots$$

则它可以表示为

$$X(t) = \sum_{i=1}^{+\infty} (\omega_{r_i} - \omega_{f_i}). \quad (4)$$

证 注意(4)式可以看作是表示此无穷脉冲序列的函数级数. 今对 i 用数学归纳法证明它的收敛性及(4)式. 若 $i=1$, 如前所述, $X_1(t) = \omega_{r_1} - \omega_{f_1}$. 若

$$X_n(t) = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - \omega_{f_i})$$

表示 n 个脉冲 $(r_1, f_1), (r_2, f_2), \dots, (r_n, f_n)$. 对第 $n+1$ 个脉冲 (r_{n+1}, f_{n+1}) , 由于 $r_{n+1} > f_n$,

$$X_n(t - r_{n+1}) = 0, \text{ 当 } t \geq r_{n+1}.$$

注意

$$Y_{n+1}(t) = \omega_{r_{n+1}} - \omega_{f_{n+1}}$$

表示脉冲 (r_{n+1}, f_{n+1}) . 在此区间外, $Y_{n+1}(t) = 0$. 因此, 把 $Y_{n+1}(t)$ 加到 $X_n(t)$, 当 $t \in (-\infty, f_n)$ 时对 $X_n(t)$ 毫无影响. 另一方面, 当 $Y_{n+1}(t) = 1$ 时恰有 $X_n(t) = 0$. 因此,

$$X_{n+1}(t) = X_n(t) + Y_{n+1}(t)$$

是表示 $n+1$ 个脉冲的序列的波形函数. 事实上, 对任何 t , 最多存在一个 i , 使得 $Y_i(t) = 1$. 所以, 该级数是收敛的, 并收敛到 $X(t)$.

定理 3 任何波形 $X(t)$ 都可以表示为它的范式如下:

$$X = c + (-1)^c \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} \omega_{t_i}, \quad (5)$$

其中 $c=0$ 或 1 , t_i 满足(1)式.

证 根据定理 2, 对于跳变序列(1)式, 一个正脉冲序列可以表示为

$$X = \omega_{t_1} - \omega_{t_2} + \omega_{t_3} - \omega_{t_4} + \cdots = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} \omega_{t_i},$$

如果跳变序列(1)只有 n 个跳变, 则上式 i 从 1 到 n 求和. 类似地, 对负脉冲序列

$$X = 1 - \omega_{t_1} + \omega_{t_2} - \omega_{t_3} + \cdots = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} \omega_{t_i},$$

总之, (5)式成立. $c=0$ 或 1 表明第 1 个跳变是正跳变还是负跳变.

定义 4 波形 $X(t)$ 的时滞 τ 运算定义为

$$X_{\tau}(t) = X(t - \tau).$$

显然, $X_{\tau}(t)$ 不过是将 $X(t)$ 延迟 τ 时刻的波形. 而且, 对任何实数 r, s , 有

$$X_r(t) = X_0(t - r), X_r(t) = X_{r-s}(t - s).$$

2 波形多项式

任何一个电路无非是实现波形的一种变换, 它把输入波形变换为输出波形. 本节将定义一类特殊的变换——波形多项式.

定义 5 用实数运算的加、减、乘连接起来的一个包含时滞运算的波形的表达式称为波形多项式.

波形多项式一般的形式是

$$Y = F(a_{i_1}, a_{i_2}, \cdots; b_{j_1}, b_{j_2}, \cdots; c_{k_1}, c_{k_2}, \cdots), \quad (6)$$

其中 $a, b, c, \cdots$ 是原始输入波形, a_{i_1} 是 a 延迟 i_1 时间后的波形, 如此等等, Y 是关于 a_{i_1} 等波形变量的多项式.

注意, 如果 x_u 是一个波形, $x_u^2 = x_u$ 仍然是一个波形. 但波形多项式未必是一个波形. 例如 $\omega_0 + \omega_0 = 2\omega_0$ 是一个波形多项式, 但不是波形.

定义 6 对任何波形多项式 $X(t)$, X 在 t 处的差分定义为

$$\Delta X(t) = X(t+) - X(t),$$

其中

$$X(t+) = \lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \delta > 0}} X(t + \delta)$$

表示 X 在 t 的右极限.

根据定义 2 和 6, $X(t+)$ 是一定存在的.

定理 4 若 X 和 Y 是波形多项式, 则

(i) 在 t 处若有上升沿, 则 $\Delta X(t) > 0$; 若为下降沿, 则 $\Delta X(t) < 0$; 否则, $\Delta X(t) = 0$;

(ii) $\Delta(X + Y) = \Delta X + \Delta Y$; (7)

(iii) $(XY) = X^+ \Delta Y + Y \Delta X = X \Delta Y + Y^+ \Delta X$; (8)

其中 X^+ 表示 $X(t+)$, Y^+ 表示 $Y(t+)$.

证明从略.

定义 7 若在区间 $T = (T_1, T_2)$ 内, 波形 X 有 n 个跳变点, $T_1 < u_1 < u_2 < \dots < u_n < T_2$, 波形 Y 有 m 个跳变点, $T_1 < v_1 < v_2 < \dots < v_m < T_2$. 则 X, Y 关于区间 T 的距离定义为

$$d_T(X, Y) = \begin{cases} +\infty, & \text{若 } n \neq m, \\ \int_{T_1}^{T_2} |X - Y| dt, & \text{若 } n = m. \end{cases} \quad (9)$$

定理 5 对任何波形 X, Y, Z , 有

$$d_T(X, Y) \leq d_T(X, Z) + d_T(Z, Y). \quad (10)$$

证明从略.

设 $A(x, t)$ 是一族波形, 它与某一波形的跳变点 x 有关. 例如, 在电路中, 若 A 点为原始输入, 则 $A(x, t)$ 就表示 1 个在 x 点有跳变的原始输入波形. 若 A 点是某一内部点, 或原始输出, 则 $A(x, t)$ 表示当某一原始输入波形在 x 处有跳变时, A 点的波形.

定义 8 对于波形族 $A(x, t)$, 若存在区间 $T = (x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$, 使得

$$0 < d_T(A(x, t), A(x_0, t)) \rightarrow 0 \quad \text{当 } x \rightarrow x_0 \text{ 且 } x > x_0$$

则, 当 $x \rightarrow x_0$ 时, $A(x, t)$ 右极限存在, 且

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} A(x, t) = A(x_0, t)$$

类似地, 可以定义左极限 $\lim_{x \rightarrow x_0^-} A(x, t)$. 若 $x \rightarrow x_0$ 时, $A(x, t)$ 左极限, 右极限均存在且相等,

则称为 $A(x, t)$ 的极限, 记为 $\lim_{x \rightarrow x_0} A(x, t)$.

定理 6 假设波形多项式 (6) 是一个波形, 各原始输入波形中在 x_0 处仅有 $\Delta a_i \neq 0$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} Y$ 存在且存在某一个 i_c , 使得

$$\lim_{x \rightarrow x_0} F(\dots, a_{i_c}(x, t), \dots) = F(\dots, a(x_0, t - i_c), \dots)$$

成立的充分必要条件是: 设

$$F(\dots, a_{i_c}, \dots) = f + a_{i_c} g, \quad (11)$$

其中 f, g 中均不含因子 a_{i_c} . 若存在区间 $T = (x_0 + i_c - \Delta i, x_0 + i_c + \Delta i)$, $\Delta i > 0$, 使得在此区间内,

$$\begin{cases} \Delta f = 0, \\ \Delta g = 0, \\ g = 1, f = 0, \text{ 或 } g = -1, f = 1. \end{cases} \quad (12)$$

证 只要稍加整理, 任何波形多项式总可以表示为 (11) 式的形式. 根据定理 4,

$$\Delta y = \Delta f + a_{i_c}^+ \Delta g + g \Delta a_{i_c}, \quad (13)$$

若在区间 T 内, (12) 式成立. 则

$$\Delta y = \Delta a_{i_c} \quad \text{或} \quad -\Delta a_{i_c},$$

相应地,

$$y = a_{i_c} \quad \text{或} \quad 1 - a_{i_c}.$$

已知 $\Delta a|_{x_0} \neq 0$, 则 $\Delta y|_{x_0+i_c} = \pm \Delta a|_{x_0+i_c} = \pm \Delta a|_{x_0} \neq 0$. 注意, 在 T 内, $\Delta f = 0, \Delta g = 0$, 故 $f(x, t) = f(x_0, t), g(x, t) = g(x_0, t)$. 而 $a_{i_c}(x, t) = a(x, t - i_c)$. 对(11)式令 $x \rightarrow x_0$, 可得 $\lim_{x \rightarrow x_0} F(\cdots, a_{i_c}(x, t), \cdots) = f(x_0, t) + a(x_0, t - i_c)g(x_0, t) = F(\cdots, a(x_0, t - i_c), \cdots)$; 反过来, 既然 $\lim_{x \rightarrow x_0} Y$ 存在, 则当 $x \in T, x \neq x_0$ 时,

$$Y(x, t) = f(x, t) + a_{i_c}(x, t)g(x, t) \neq f(x_0, t) + a_{i_c}(x_0, t)g(x_0, t).$$

但当 $x \rightarrow x_0$ 时, 左端趋于右端. 令 $\Delta a|_{x_0} \neq 0$, 即 $\Delta a_{i_c}|_{x_0+i_c} \neq 0$, 则 Y 在 T 平移 i_c 的区间上也会有唯一的一个跳变, 而且该跳变点为 $x_0 + i_c$. 于是 $\Delta y = \pm \Delta a_{i_c}$. 注意, 在各原始输入波形中, 在 x_0 处仅有 a 有跳变, 因而在 $x_0 + i_c$ 附近, $\Delta f = 0, \Delta g = 0$. 根据(13), $\Delta y = g \Delta a_{i_c}$, 可见 $g = \pm 1$. 根据(11)式, 若 $g = 1$, 则 $f = 0$; 若 $g = -1$, 则 $f = 1$, 因为 $F(\cdots, a_{i_c}, \cdots)$ 是一个波形.

3 Boole 过程的应用

本节说明Boole过程在组合逻辑电路的设计与测试中的某些应用. 虽然, 这些应用还是初步的, 但已经说明, 由它推出的结论比传统的处理要丰富得多, 而又更接近实际.

定理 7 设 A, B 是波形, $\text{AND}_\tau, \text{NAND}_\tau, \text{OR}_\tau, \text{NOR}_\tau, \text{NOT}_\tau$ 分别表示时滞为 $\tau \geq 0$ 的基本门. 则

$$\left. \begin{aligned} \text{AND}_\tau(A, B) &= A_\tau B_\tau, \\ \text{NAND}_\tau(A, B) &= 1 - A_\tau B_\tau, \\ \text{OR}_\tau(A, B) &= A_\tau + B_\tau - A_\tau B_\tau, \\ \text{NOR}_\tau(A, B) &= 1 - A_\tau - B_\tau + A_\tau B_\tau, \\ \text{NOT}_\tau(A) &= 1 - A_\tau. \end{aligned} \right\}$$

其中 A_τ 表示波形 A 表达式中的所有文字的下标都加 τ , 对 B_τ 也类似.

从 A, B 的范式出发, 运用定理 1, 不难证明本定理.

对于一个组合电路 F , 若它的原始输入为 $a, b, c, \cdots$, 原始输出为 Y , 组成它的各基本门的时滞也已给定, 则它的原始输出波形可以根据定理 7, 用如(6)式所示的波形多项式来表示, 其中 a_{i_c} 对应于由 a 到 Y , 时滞为 i_c 的所有通路.

定义 9 设组合电路 F 的一个原始输入 a 在 x_0 处有跳变, 即 $\Delta a|_{x_0} \neq 0$, 它的原始输出 Y 在 y_0 处有跳变, 即 $\Delta Y|_{y_0} \neq 0$. 若 $\lim_{x \rightarrow x_0} y(x, t)$ 存在, 且

$$\begin{aligned} Y(x, t) &\neq Y(x_0, t) \quad \text{当 } x \in x_0 \text{ 的邻域且 } x \neq x_0, \\ \lim_{x \rightarrow x_0} Y(x, t) &= F(\cdots, a_{y_0-x_0}(x_0, t), \cdots), \end{aligned}$$

则称 $a|_{x_0}$ 引起输出跳变 $Y|_{y_0}$, 通路 $a_{y_0-x_0}$ 称为可单敏化的真通路, $a|_{x_0}$ 沿着通路 $a_{y_0-x_0}$ 传播, $y_0 - x_0$ 称为跳变 $a|_{x_0}$ 的时滞. 假如上式只对单边极限成立, 则称 $a|_{x_0}$ 导致(而不是引起) $Y|_{y_0}$. 通常所说的竞态和冒险就属于这种情况.

基于这一定义, 定理 6 可以直接用来寻找最长可敏化通路; 及敏化各通路的输入波形. 下面一个例子说明, 传统上说不可敏化的通路实际上可能是可敏化的, 不过输入波形要复杂一些. 而传统的方法处理不了这种输入波形的复杂性.

例 考虑图 1 所示的电路, 其中门时滞标记在门符号内. 这一看起来很奇怪的电路可以看作是对某一复杂电路简化的考虑.

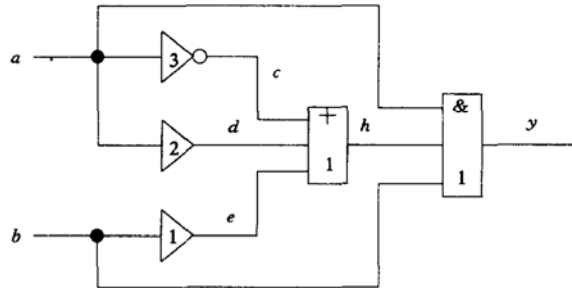


图 1 电路举例

设原始输入波形为 a, b , 则根据定理 7, 有

$$\left. \begin{aligned} c &= 1 - a_3, \\ d &= a_2, \\ e &= b_1, \\ h &= 1 - a_4 + a_3a_4 + a_4b_2 - a_3a_4b_2, \\ y &= a_1b_1 - a_1b_1a_5 + a_1b_1a_4a_5 + a_1b_1a_5b_3 - a_1b_1a_4a_5b_3. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

让我们来考虑最长通路 a_5 是否可敏化. 重写(14)式为(11)式的形式, 得

$$y = a_1b_1 - a_5(a_1b_1 - a_1b_1a_4 - a_1b_1b_3 + a_1b_1a_4b_3).$$

运用定理 6 来解方程组(12)式. 当 t 在 5 附近时

$$\begin{aligned} f &= a_1b_1, \\ g &= -a_1b_1(1 - a_4 - b_3 + a_4b_3); \\ f &= a(4)b(4), \\ g &= -a(4)b(4)(1 - a(1) - b(2) + a(1)b(2)). \end{aligned}$$

注意, $\Delta f = 0$ 要求 a, b 在 $t = 4$ 附近连续. $\Delta g = 0$ 进一步要求 $t = 1$ 和 $t = 2$ 附近连续. 从 g 的表示式可见, $g \neq 1$. 而 $g = -1$ 要求 $f = 1$, 即 $a(4) = 1, b(4) = 1$. 而且, $g = -1$ 要求 $1 - a(1) - b(2) + a(1)b(2) = 1$, 即 $a(1) = 0, b(2) = 0$. 任何波形只要满足上述条件都可以作为 a, b 来敏化 a_5 . 显然, 我们可以取

$$\begin{aligned} a &= 1 - \omega_0 + \omega_2, \\ b &= \omega_3. \end{aligned}$$

其波形示如图 2. 然而, 对文献[3]中所谓“2-向量时滞”, 输入波形只许在 $t = 0$ 处有跳变. 于是, $a(1) = 0$ 与 $a(4) = 1$ 就是一个矛盾. 它使得 a_5 在此限制下不可敏化. 为了验证, 我们开发了一个符号模拟的工具. 对不同的输入波形, 相应的输出波形列如表 1. 从输入 #1~3 可见, 当 a 的跳变点从 0 变到 $0+$ 或 $0-$, 在时刻 5 的输出跳变将分别变到 $5+$ 或 $5-$. 因此, $a|_0$ 引起 $y|_5$, 时滞为 $5 - 0 = 5$. 而当跳变点 $a|_2$ 或 $b|_3$ 变化时, 它对跳变点 $y|_5$ 没有影响, 可见 $y|_5$ 不是由 $a|_2$ 或 $b|_3$ 引起的. 电路中各点的波形图如图 2 所示.

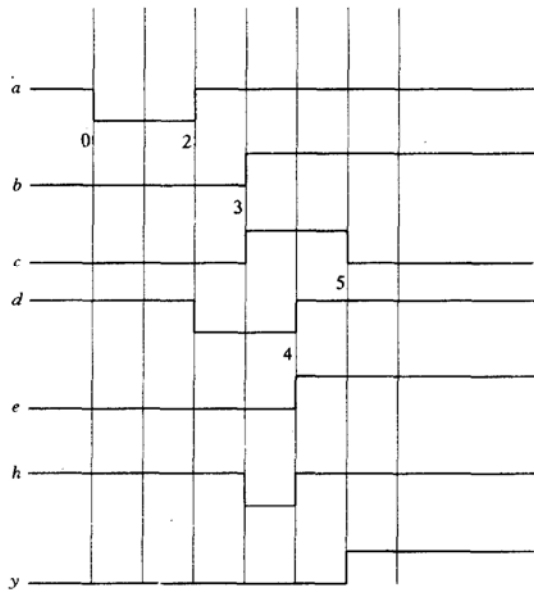


图 2 波形图

表 1 图 1 电路的模拟结果

#	a	b	y
1	$1 - \omega_0 + \omega_2$	ω_3	ω_5
2	$1 - \omega_{0,1} + \omega_2$	ω_3	$\omega_{4,0} - \omega_{4,1} + \omega_{5,1}$
3	$1 - \omega_{-0,1} + \omega_2$	ω_3	$\omega_{4,9}$
4	$1 - \omega_0 + \omega_{2,1}$	ω_3	ω_5
5	$1 - \omega_0 + \omega_{1,9}$	ω_3	ω_5
6	$1 - \omega_0 + \omega_2$	$\omega_{3,1}$	ω_5
7	$1 - \omega_0 + \omega_2$	$\omega_{2,9}$	$\omega_{3,9} - \omega_4 + \omega_5$
8	$1 - \omega_{0,1} + \omega_2$	$\omega_{2,9}$	$\omega_{3,9} - \omega_{4,1} + \omega_{5,1}$

4 结论

本文定义了Boole过程,以形式地处理计算机硬件和软件中的异步性。Boole过程的样本是波形。波形函数可以用数学工具形式地加以处理。本文定义了波形的距离、差分 and 极限,并给出了极限存在的充分必要条件。波形的极限概念精确地反映了电路中的通路敏化,表明了它潜在的广泛应用的可能性。有趣的是,电路的原始输出可以用关于输入波形多项式来表示,从而提供了电路表示的一条解析途径。一个输入跳变沿一条敏化通路传播到输出跳变,当且仅当该输入跳变引起该输出跳变,即输入跳变点的少许改变驱动输出跳变点也有少许移动。这一重新定义的敏化概念与传统的敏化概念是相容的,但更接近实际,而且是对输入波形可以任意的电路敏化的推广。它对确定最长和最短可敏化通路、假通路有重要影响,因而对高性能电路的设计与测试很重要。Boole过程将可能应用于高性能IC和计算机设计的许多实际问题。它的软件实现及各种应用正在开发和研究中。

参 考 文 献

- 1 Moszkowski B. A temporal logic for multilevel reasoning about hardware. Computer, 1985, 18(2): 10~19
- 2 Amblard P, Caspi P, Halbwachs N. Use of time functions to describe and explain circuit behavior. IEE Proceedings, Pt E, 1986, 122(5): 271~274
- 3 Lam W K C, Brayton R K. Timed Boolean Functions. USA: Kluwer Academic Publisher, 1994. 273
- 4 McCluskey E J. Transients in combinational logic circuits. In: Redundancy Techniques for Computing Systems. Washington D C: Spartan Book, 1962. 9~46