

18
时滞测试能量模型的研究和改进305-309 王勇* 陈光福
(电子科技大学 CAT室 成都 610054)TP18
TP 206.1

【摘要】 针对文献[1]提出的时滞测试能量函数,指出了该时滞测试能量函数在测试生成时可能产生无效测试,且其表达式较复杂。在此基础上构造了新的时滞测试能量函数,克服了文献[1]的时滞测试能量函数的不足。

关键词 测试生成; 时滞故障; 时滞测试; 能量函数; 冒险

中图分类号 TN407; TP11

神经网络

由于神经网络具有大规模的并行处理和分布式的信息存储特征,因此利用神经网络技术来进行集成电路的测试生成引起研究者的广泛兴趣,文献[1]将 Hopfield 神经网络能量函数的思想溶入时滞故障的测试,提出了用于时滞测试的能量函数,利用该能量函数和时滞测试的路径敏化条件,可以将时滞测试生成问题转化为能量函数极小化问题。由于该方法能够并行处理,因此具有积极的意义。但是该能量函数存在两点不足:

- 1) 按照此时滞测试能量函数求出的测试有时可能是无效的测试;
- 2) 时滞测试能量函数表达式较复杂。

针对这种情况,本文推导出了新的能量函数表达式,克服了文献[1]中能量函数的不足。为讨论方便,我们先对时滞测试的故障模型和测试的基本思想作一简介。

目前对时滞故障的描述采用以下故障模型:门时滞故障模型和路径时滞故障模型^[2,3]。在模拟实际的故障缺陷时,路径时滞故障模型更准确,因此本文主要讨论路径时滞故障。对于路径时滞故障的测试需要一对测试矢量 (V_1, V_2) ,测试时,首先在 t_0 时刻施加 V_1 矢量,在被测电路内信号稳定之后,在 t_1 时刻施加 V_2 矢量,这样主输入端的上升或下降沿沿着被测路径向主输出端传播,在 t_2 时刻($t_2 - t_1$ 为希望的传播时滞)观察主输出端就能判定是否存在时滞故障。对于一个时滞故障,理想的测试矢量不考虑任意一个门的时滞,这个测试被称为强健测试。实验表明许多 Benchmark 电路和工业电路中的一部分路径时滞故障并不存在强健测试^[4,5],故我们采用非强健测试,所谓非强健测试是指测试时与被测路径相邻的所有输入线上不存在时滞故障的测试。

与时滞故障紧密相关的是电路的竞争和冒险。由竞争和冒险产生出来的假信号可以乱真,造成测试过程的错误判断。如图1所示,对于路径 $b-d-f$ 的下降沿,如果测试矢量

$$(a_1b_1, a_2b_2) = (11, 10)$$

则可能在 e 线出现静态冒险从而在 f 线产生动态上升冒险,这样就使测试变得无效。因此测试矢量不能使电路中产生竞争和冒险。

下面对文献[1]的时滞测试的能量函数和测试生成方法进行讨论,然后推出新的时滞测试能量函数。

1 时滞测试能量函数

对于一个数字电路,当分别在 t_0 和 t_1 时刻输入一对矢量 (V_1, V_2) 后,电路内信号线有 8 种可能的波形^[6]。文献[1]将这 8 种波形分为 S_0, S_1, U_0, U_1 四组,然后推出了与门输入一对矢量时的真值表。用组合 x_1, x_2 表示信号 x 分别对第一个矢量 V_1 取 x_1 值,对第二个矢量 V_2 取 x_2 值。文献[1]

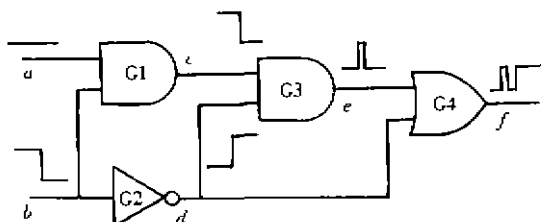


图 1 冒险使测试失效

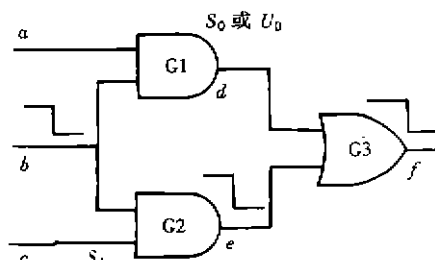


图 2 例 1 的电路

通过对真值表的解析和编码导出了与门时滞测试的能量函数为

$$E_{AND} = \bar{c}_1(a_1b_1 + a_1\bar{a}_2b_2 + a_2b_1\bar{b}_2) + c_1(\bar{a}_1\bar{a}_2 + \bar{b}_1\bar{a}_1b_2 + a_2\bar{b}_1) + \bar{c}_2a_2b_2 + c_2(\bar{a}_2 + \bar{b}_2) \quad (1)$$

按照文献[1],对于任意一对输入矢量,与门的输入值与输出值的关系可以通过该函数表示,使该函数取最小值 0 的矢量对 $(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ 满足与门的逻辑关系,且该能量函数隐式地包含冒险信息,相应地可导出其他基本门的能量函数。

文献[1]还推出了路径时滞测试的路径敏化条件,将能量函数与路径敏化条件结合起来就构成了如下的时滞测试生成算法如下:

- 1) 将每个门用其能量函数表示;
- 2) 构成电路的能量函数,它是每个门能量函数的和;
- 3) 用路径敏化条件简化步骤 2) 所得的能量函数;
- 4) 求能量函数极小值,如果极小值为 0,则得到时滞测试矢量,否则不存在测试矢量。

文献[1]提出的能量函数构思新颖,但是根据该能量函数求出的测试矢量有时可能是无效的,以下举例说明。

例 1 求图 2 所示电路中路径 $b-e-f$ 的下降沿的强健测试。

按照上面介绍的算法,该电路的能量函数为

$$E = E_{G1} + E_{G2} + E_{G3} = \bar{d}_1(a_1b_1 + a_1\bar{a}_2b_2 + a_2b_1\bar{b}_2) + d_1(\bar{a}_1\bar{a}_2 + \bar{b}_1\bar{b}_2 + \bar{a}_1b_2 + a_2\bar{b}_1) + \bar{d}_2a_2b_2 + d_2(\bar{a}_2 + \bar{b}_2) + \bar{e}_1(b_1c_1 + b_1\bar{b}_2c_2 + b_2c_1\bar{c}_2) + e_1(\bar{b}_1\bar{b}_2 + \bar{c}_1\bar{c}_2 + \bar{b}_1c_2 + b_2\bar{c}_1) + \bar{e}_2b_2c_2 + e_2(\bar{b}_2 + \bar{c}_2) + f_1(\bar{d}_1\bar{e}_1 + \bar{d}_1d_2\bar{e}_2 + \bar{d}_2\bar{e}_1e_2) + \bar{f}_1(d_1d_2 + e_1e_2 + d_1\bar{e}_2 + \bar{d}_2e_1) + f_2\bar{d}_2\bar{e}_2 + \bar{f}_2(d_2 + e_2)$$

由于路径 $b-e-f$ 上是下降沿,则 $b_1 = e_1 = f_1 = 1, b_2 = e_2 = f_2 = 0$ 。对于强健测试,由文献[1]Table II 可得 $c = S_1, d = S_0$ 或 U_0 ,因此 $d_2 = 0$ 且 $c_1 = c_2 = 1$ 。将这些值代如上式则得到简化的能量函数为

$$E = (1 - d_1)(a_1 + a_2) + d_1(1 - a_1)(1 - a_2)$$

当且仅当 a 和 d 取下列值时, $E_{\min} = 0$,有:

- 1) $a_1 = 0, a_2 = 1, d_1 = 1$;
- 2) $a_1 = 1, a_2 = 0, d_1 = 1$;

3) $a_1 = 1, a_2 = 1, d_1 = 1$;

4) $a_1 = 0, a_2 = 0, d_1 = 0$ 。

因此,可以得到如下四个强健测试:

$$(V_1, V_2) = (a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (011, 101)$$

$$(V_1, V_2) = (a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (111, 001)$$

$$(V_1, V_2) = (a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (111, 101)$$

$$(V_1, V_2) = (a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (011, 001)$$

在这四个测试中,只有后面三个是真正的测试,而第一个测试(011, 101)可能使电路出现冒险,如图 3 所示,如果信号线 a 和 b 的传播时滞不同,则信号线 d 将出现静态冒险,静态冒险继续传播则将使信号线 f 出现动态冒险,因此(011, 101)不能测试路径 $b-e-f$ 上下沿的时滞故障。

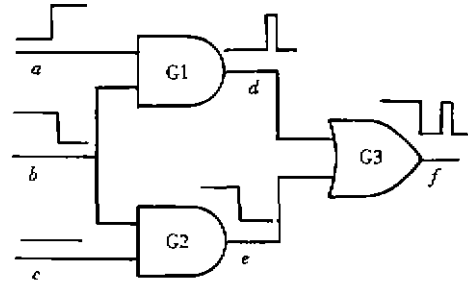


图 3 例 1 电路测试无效的说明

造成这种情况的原因是文献[1]中不正确的编码所致,在该文 Table 1 的编码中, U_0 意味着 x_1 取 1、 x_2 取 0, 编码为 $x_1 \bar{x}_2$, 而按照该文对波形的分类, U_0 蕴含着三种波形, 这样编码就忽略了另两种波形; U_1 的编码也有类似的情形。由此构成的能量

函数就会出现变量组合虽然使量函数为 0, 但该变量组合并不符合实际逻辑关系的情形。以与门为例, 其能量函数有 6 个变量, 每个变量可以取 0 或 1, 则总共有 $2^6 = 64$ 种变量组合, 可以验证在这 64 种变量组合中有 16 种组合使 $E_{AND} = 0$, 而其余的组合使 $E_{AND} > 0$, 如表 1 所示。对于可能出现冒险的变量组合 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (010, 100)$ 和 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (100, 010)$, 它们使能量函数 $E_{AND} > 0$, 即文献[1]所说的能量函数隐式地包含冒险信息; 但是对变量组合 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (011, 100)$ 和 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (101, 010)$, 虽然其 $E_{AND} = 0$, 但这两种变量组合在 $t_0 - t_1$ 时段电路内信号处于稳定值时并不符合与门的逻辑关系(实际上稳定的 c_1 为 0), 这可能使求出的部分测试矢量是无效的, 例 1 正是这种情形(符合电路能量函数最小值为 0 的 G1 门的四组输入与输出中有一组正是(011, 100), 因此使相应求出的测试无效)。

表 1 使 $E_{AND} = 0$ 的变量组合 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2)$

(000,000)	(010,000)	(100,000)	(111,000)
(000,010)	(010,010)	(100,100)	(111,010)
(000,100)	(010,111)	(100,111)	(111,100)
(000,111)	(011,100)	(101,010)	(111,111)

在将文献[1]提出的时滞测试能量函数用于自动测试生成时, 不论是用模拟退火法、遗传算法或传递闭包法求最小值点, 一般都不会求出全部的最小值点, 尤其是电路规模较大时, 这样求出的测试矢量就可能是无效的测试矢量。另一方面, 文献[1]提出的能量函数表达式较复杂, 以与门的能量函数为例, 该能量函数在计算时需进行 14 次乘法, 9 次加法, 12 次逻辑运算, 计算量较大, 其他基本门也存在类似的情况。针对上面的讨论, 我们从另一角度推导出了新的能量函数。

2 改进的时滞测试能量函数

当电路输入一对矢量 (V_1, V_2) 时,为了保证测试的有效性,须设法避免出现冒险现象。对与门而言,如果输入矢量对为 $(01, 10)$ 或 $(10, 01)$,则可能使输出产生静态冒险,在电路中静态冒险继续传播则可能产生动态冒险,因此测试时与门必须避免出现 $(10, 01)$ 或 $(01, 10)$ 的输入矢量。

在测试时,当 t_0 时刻施加 V_1 矢量后, V_2 矢量是在电路处于稳定之后的 t_1 时刻输入,因此在 $t_0 - t_1$ 时段内,对与门而言,其输入 a_1, b_1 与输出 c_1 满足与门的真值表,如图4所示;而在 $t_1 - t_2$ 时段内,当电路内不出现冒险现象时,如果与门的输入线或输出线上不存在时滞缺陷,则稳定后的与

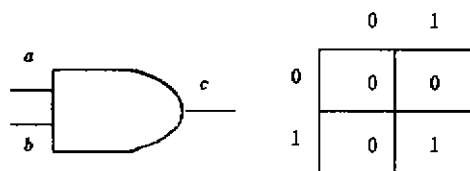


图4 与门的真值表

门输入 a_1, b_2 与输出 c_2 满足与门的真值表(见图4),而存在时滞缺陷时, a_2, b_2, c_2 不满足真值表。因此,我们可以构造与门的能量函数为

$$E'_{AND} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (2)$$

其中 E_1 是 $t_0 - t_1$ 时段的能量函数,当 $t_0 - t_1$ 时段内输入与输出符合真值表时 $E_1 = 0$,否则 $E_1 > 0$;

E_2 是对出现冒险的约束条件,当不出现 $(01, 10)$ 或 $(10, 01)$ 矢量对时 $E_2 = 0$,否则 $E_2 > 0$;

E_3 是 $t_1 - t_2$ 时段内的能量函数,当与门的输入线或输出线上不存在时滞缺陷时,稳定后的输入与输出满足真值表,这时 $E_3 = 0$,否则 $E_3 > 0$ 。

用下面的表达式构造 E_1, E_2, E_3

$$E_1 = a_1 b_1 + c_1 - 2a_1 b_1 c_1 \quad (3)$$

$$E_2 = a_1 \bar{b}_1 \bar{a}_2 b_2 + a_2 \bar{b}_2 \bar{a}_1 b_1 \quad (4)$$

$$E_3 = a_2 b_2 + c_2 - 2a_2 b_2 c_2 \quad (5)$$

可以验证 E_1, E_2, E_3 满足上面的讨论,因此与门新的时滞测试能量函数可表示为

$$E'_{AND} = a_1 b_1 + c_1 - 2a_1 b_1 c_1 + a_2 b_2 + c_2 - 2a_2 b_2 c_2 + a_1 \bar{b}_1 \bar{a}_2 b_2 + a_2 \bar{b}_2 \bar{a}_1 b_1 \quad (6)$$

该能量函数共有64种变量组合,经验证有14种变量组合使 $E'_{AND} = 0$ (见表2),而其余的变量组合使 $E'_{AND} > 0$ 。比较表1和表2可以看出使 $E'_{AND} = 0$ 的14种变量组合同样使 $E_{AND} = 0$,而 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (011, 100)$ 和 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2) = (101, 010)$ 使 $E'_{AND} > 0$,这样新导出的与门时滞测试能量函数避免了在旧的与门时滞能量函数中出现的情形,因此测试生成时就不会出现无效测试。

表2 使 $E'_{AND} = 0$ 的变量组合 $(a_1 b_1 c_1, a_2 b_2 c_2)$

(000,000)	(010,000)	(100,000)	(111,000)
(000,010)	(010,010)	(100,100)	(111,010)
(000,100)	(010,111)	(100,111)	(111,100)
(000,111)	—	—	(111,111)

其他基本门的能量函数可由与门的能量函数导出。比如与非门可由与门倒相得到,因此用 \bar{c}_1, \bar{c}_2 分别替换式(6)中的 c_1, c_2 则得与非门的能量函数为

$$E'_{NAND} = a_1 b_1 + \bar{c}_1 - 2a_1 b_1 \bar{c}_1 + a_2 b_2 + \bar{c}_2 - 2a_2 b_2 \bar{c}_2 + a_1 \bar{b}_1 \bar{a}_2 b_2 + a_2 \bar{b}_2 \bar{a}_1 b_1 \quad (7)$$

类似可推导出其余的基本门的能量函数如下

$$E'_{OR} = \bar{a}_1\bar{b}_1 + \bar{c}_1 - 2\bar{a}_1\bar{b}_1\bar{c}_1 + \bar{a}_2\bar{b}_2 + \bar{c}_2 - 2\bar{a}_2\bar{b}_2\bar{c}_2 + a_1\bar{b}_1\bar{a}_2b_2 + a_2\bar{b}_2\bar{a}_1b_1 \quad (8)$$

$$E'_{NOR} = \bar{a}_1\bar{b}_1 + c_1 - 2\bar{a}_1\bar{b}_1c_1 + \bar{a}_2\bar{b}_2 + c_2 - 2\bar{a}_2\bar{b}_2c_2 + a_1\bar{b}_1\bar{a}_2b_2 + a_2\bar{b}_2\bar{a}_1b_1 \quad (9)$$

$$E'_{BUFFER} = a_1 + c_1 - 2a_1c_1 + a_2 + c_2 - 2a_2c_2 \quad (10)$$

$$E'_{NOT} = a_1 + \bar{c}_1 - 2a_1\bar{c}_1 + a_2 + \bar{c}_2 - 2a_2\bar{c}_2 \quad (11)$$

从式(6)可以看出,与门新导出的能量函数计算时需7次加(减)法,14乘法,4次逻辑运算,显然计算的复杂性比式(1)小,其他基本门也存在类似的情况,这有助于提高测试生成效率。

3 结束语

本文针对文献[1]提出的时滞测试能量函数,从另一角度推导出了新的时滞测试能量函数,它能避免在自动测试生成中产生无效测试的情形,且其表达式的计算复杂性比文献[1]提出的能量函数小,这有助于提高测试生成效率。

参 考 文 献

- 1 Chakradhar S T, Iyer Mahesh A, Agrawal V D. Energy models for delay testing. IEEE Trans on CAD, 1995, 14(6): 728 ~ 739
- 2 Wagner K D. The error latency of delay faults in combinational and sequential circuits. Proc International Test Conference, Washington: IEEE Computer Society Press, 1985: 334 ~ 341
- 3 Smith G L. Model for delay faults based upon paths. Proc International Test Conference, Washington: IEEE Computer Society Press, 1985: 342 ~ 349
- 4 Lin C J, Reddy S M. On delay fault testing in logic circuits. IEEE Trans on CAD, 1987: 694 ~ 703
- 5 Fink Fuchs, Schulz M H. DYNAMITE: an efficient automatic test pattern generation system for path delay faults. IEEE Trans on CAD, 1993, 10(10): 1 323 ~ 1 335
- 6 Glover C T, Merover H R. A method for delay fault test generation. Proc 25th DAC, 1980: 90 ~ 95

A Study and Improvement on Energy Functions for Delay Testing

Wang Yong Chen Guangju

(CAT Lab, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the shortcomings of the energy functions for delay testing in Ref. [1] are discussed. That is the test patterns generated by using the energy functions may be invalid and the expressions of the energy functions are rather complex. On the basis of the discussion, new energy functions for delay testing are presented, which overcome the shortcomings of the energy functions for delay testing in the Ref. [1].

Key words test pattern generation; delay fault; delay testing; energy functions; hazard
编辑 徐培红