

基于 Hopfield 神经网络数字系统测试技术研究*

陆广平, 王友仁

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:介绍了用离散 Hopfield 神经网络模型把组合电路约束网络转化为能量函数,用数学优化求能量函数的最小值,即为给定固定型故障的测试矢量。经检测故障覆盖率达到 100% 并通过试探法进一步优化测试矢量集,然后将测试矢量集的响应序列移入本原多项式求得特征序列,建立故障字典,实验证明该方法切实有效。

关键词:神经网络模型;能量函数;数学优化算法;测试集优化;特征提取

中图分类号:TP306 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2005)03-0029-04

测试通常是将被测电路或芯片放在测试仪上,测试仪根据需要产生一系列测试输入信号,施加到电路上,在电路输出端得到输出信号,测试设备自动将电路实际输出与预期输出相比较,如果一致表示测试通过,否则不能通过。因此测试生成是数字系统测试的最重要问题之一,传统的确定性数字系统测试生成的方法(如 D 算法、FAN 算法、PODEM 算法)使用电路的拓扑结构信息,在搜索过程中不可避免地要进行反向回溯,影响了算法的效率。1988 年 Chakradhar 等人,首先提出组合电路的神经网络模型,将组合电路转化为神经网络能量函数^[1]。运用神经网络模型,使数学优化方法在测试生成中得到应用。

1 基本门转化为 Hopfield 神经网络模型

任何确定性的测试产生算法,对于一个给定故障模型下电路的每个故障,必须解决两个问题:

(1)激励故障。即在故障点产生一个与故障值相反的值。

(2)传播故障。即将故障点的值传播到电路的原始输出。

由于数字电路中的每条信号线只取 0、1 两种情况,因此可用一个神经元来表示,从而可对基本

门构造 Hopfield 神经网络模型,以或非门为例,输入信号线 1、2,输出信号线 3,则用神经网络表示为:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -4 \\ -2 & 0 & -4 \\ -4 & -4 & 0 \end{bmatrix}, I = [2 \quad 2 \quad 2], k = 2$$

其中 T 为神经元的权值, I 为神经元的阈值, k 为常数, $T_{ii} = 0$, $T_{ij} = T_{ji}$ 。其它基本门的权值 T 、阈值 I 、常数 k 如表 1 所示,对于两输入的异或门必须要加隐含神经元。

则对应的能量函数值表示为式(1):

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} V_i V_j - \sum_{i=1}^N I_i V_i \quad (1)$$

其中 N 为网络中神经元的个数,信号线的值是神经元的激活值(V_i 取 0 或 1),其中能量函数具有如下特点:变量的值满足门的真值时为零,否则大于零,即满足条件为相容状态,否则为非相容状态。用神经网络进行测试时,需构造被测电路的约束电路。约束电路由无故障电路、故障电路(已注入故障)和接口电路构成。接口电路用于确保当约束电路的输入矢量为故障电路的测试矢量时,被测电路的故障电路和无故障电路的输出不同^[2]。如果 C17 电路信号线 2 出现了固定型故

* 收稿日期:2005-05-27

作者简介:陆广平(1974-),女,江苏盐城人,盐城工学院讲师,南京航空航天大学在读硕士研究生,主要从事数字系统测试技术研究。

障,则图 1 是其对应的约束网络。

表 1 基本门的 T, I, K
Table 1 T, I, K for logic gates

基本门	信号线			基本门对应的 Hopfield 的神经网络模型		
	输入	隐含	输出	权值 T	阈值 I	K
与门	1, 2		3	$[0 \ -2 \ 4; -2 \ 0 \ 4; 4 \ 4 \ 0]$	$[0 \ 0 \ -6]$	0
或门	1, 2		3	$[0 \ -2 \ 4; -2 \ 0 \ 4; 4 \ 4 \ 0]$	$[-2 \ -2 \ -2]$	0
非门	1		2	$[0 \ -4; -4 \ 0]$	$[2 \ 2]$	2
缓冲器	1		2	$[0 \ 4; 4 \ 0]$	$[-2 \ -2]$	0
与非门	1, 2		3	$[0 \ -2 \ -4; -2 \ 0 \ -4; -4 \ -4 \ 0]$	$[4 \ 4 \ 6]$	6
或非门	1, 2		3	$[0 \ -2 \ -4; -2 \ 0 \ -4; -4 \ -4 \ 0]$	$[2 \ 2 \ 2]$	2
异或门	1, 2	3	4	$[0 \ -2 \ 5 \ 2; -2 \ 0 \ 5 \ 2; 5 \ 5 \ 0 \ -4; 2 \ 2 \ -4 \ 0]$	$[-1 \ -1 \ -6 \ -1]$	0

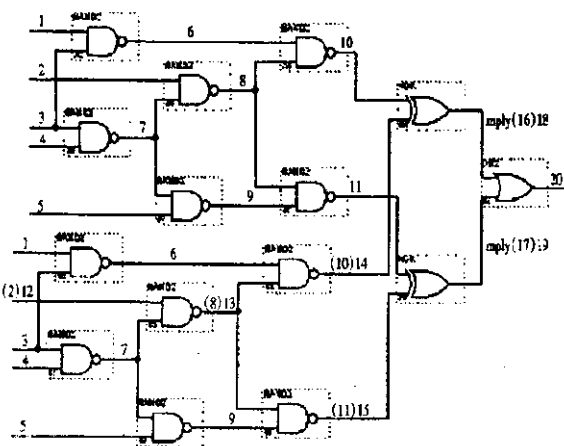


图 1 C17 电路信号线 2 故障的约束网络

Fig. 1 Resrtic network for signal 2 fault of C17 circuit

根据基本门的 T, I, k , 可以很容易求出图 1 电路总的 T, I, k , 然后根据式(1)求出使能量函数 $E=0$ 所对应的神经网络激活值 V , 即得出给定故障电路一个测试矢量。

2 优化算法实现

将数字电路用 Hopfield 神经网络模型转化为能量函数后, 能量值等于零所对应的解即为一个测试矢量, 由于能量函数值大于等于零, 所以相当于求能量函数的极小值, 从而很容易用数学优化算法来求极小值。

遗传算法: 一般的遗传算法都包含 3 个基本步骤: 选择、交叉、变异。选择是从旧种群中选出生命力强的个体。交叉是把两个父个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的过程。变异是以很小的概率随机的改变个体某个位置的值, 在二进制编码中, 根据变异率决定把某个位置的“1”变成“0”, 或者把“0”变成“1”。适应度函数取式(2):

万方数据

$$f(x) = \frac{1}{1 + E(x)} \tag{2}$$

其中 $E(x)$ 为网络能量函数。 $f(x)$ 的取值范围在 0 与 1 之间, 个体的适应值 $f(x)$ 越大, 说明个体的性能越好, 当 E 为最小值时, 适应值为 1 所对应的个体为给定故障的一个测试矢量。以信号线 1 出现 $s-a-0$ 和 $s-a-1$ 固定故障为例, 基于遗传算法的实现步骤如下:

- (1) count=0;
- (2) 运行初始化函数, 随机产生初始群体 pop;
- (3) 计算 pop 对应的能量函数值 E ;
- (4) 计算个体的适应值, 求出群体中最大的适应值及其对应的个体;
- (5) 若最大的适应值不等于 1, 用轮盘赌方法选择新的个体, 交叉率取 0.8, 变异率取 0.2 进行变异;
- (6) 得到新的群体, 返回到(3), 直至适应值为 1;
- (7) 若 count=0, 则把 $a = \text{pop}(1, 1)$;
- (8) 若 count=0, 若 $\text{pop}(1, 1) = 1$, 检测的是 $s-a-0$ 故障, 否则是 $s-a-1$ 故障;
- (9) 若 a 不等于 $\text{pop}(1, 1)$, 检测另一个故障, 如果检测成功跳出循环体;
- (10) count=count+1; 返回到(2)。
- 算法如果到 1000 代还没有找到最小的能量值, 则认为此故障不可测。

3 测试矢量集的故障仿真和特征分析法

3.1 并行故障仿真

并行故障仿真^[3] 基本思想是用同一个字的不同位来表示一根引线在电路无故障时的逻辑值和有不同故障时的逻辑值, 采用的是编译驱动仿真器。在进行故障仿真时, 逻辑故障的作用要注入

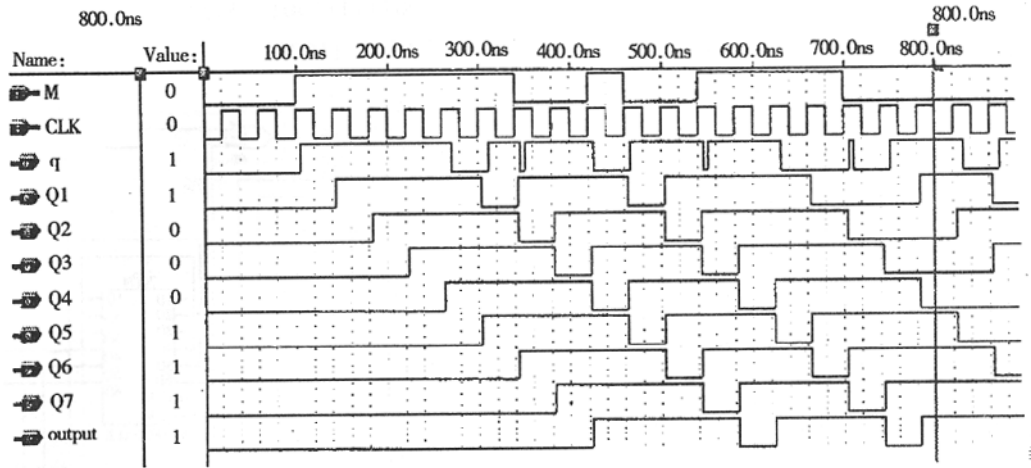


图 3 特征分析器的仿真结果

Fig. 3 Simulate result of character analysis

表 2 实验结果

Table 2 Experiment results

电路名称	遗传算法		单故障检测时间(s)	
	矢量生成	故障覆盖率	响应序列	特征提取
C17	1.87s	100%	0.054	0.035
Schneider	2.79	100%	0.063	
SN5483A	15.68s	100%	0.178	0.097

应用到数字系统测试矢量生成中,利用数学优化算法求能量函数的极小值,不需要进行反向回溯就可生成测试矢量,通过试探法进一步优化测试矢量,用特征分析法提取响应序列的特征,进一步提高故障检测定位的时间,实验证明该方法是切实有效的。

5 结论

本文介绍了将离散 Hopfield 神经网络模型

参考文献:

[1] Srimat T Chakradhar, Michael L Bushnell, Vishwani D Agrawal. Toward massively parallel automatic test generation [J]. IEEE Transaction on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,1990, 9(9):981—994.

[2] 潘中良,张光昭. 电路测试神经网络方法中求多个测试矢量[J]. 微电子学与计算机,2000,(3):25—28.

[3] 束礼宝,宋克柱,王视方. 伪随机数发生器的 FPGA 实现与研究[J]. 电路与系统学报,2003,8(3):121—124.

[4] 杨士元. 数字系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版,2000.

Study of Digital System Testing Technology Based on Hopfield Neural Network Models

LU Guang-ping , WANG You-ren

(College of Automation Engineering,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Jiangsu Nanjing 210016,China)

Abstract:In the present research,the authors converted restricted networks of combinational circuits into energy functions with discrete Hopfield neural network models, used ptimization algorithm to obtain minimum of energy functions,the test vectors of stuck faults and found fault coverage is 100 percent. They optimized test vectors with putting out feelers, obtained character sequences of test vectors through shifting response sequences to fountain multinomial, and buildued up a fault dictionary , whose validity stood up to experimental results.

Keywords:neural network models;energy functions;optimization algorithm; test vector optimization; character distill