

文章编号: 0529-6579 (1999) 06-0029-05

# 基于最优神经网络的电路测试方法研究<sup>\*</sup>

潘中良, 张光昭

(中山大学无线电电子学系, 广州 510275)

**摘要:** 在数字电路最优神经网络模型的基础上, 研究基于该模型的电路测试生成方法. 首先获得了多输入基本门电路的最优神经网络能量函数的一般表达式, 然后对这种测试方法的原理、实现步骤、以及加速测试的措施等进行了详细研究. 结果表明以最优神经网络模型为基础的电路测试方法在测试生成的速度方面快于其它类似方法, 如基于 Hopfield 神经网络的电路测试生成, 具有较好的应用潜力.

**关键词:** 数字电路; 测试生成; 最优神经网络; 能量函数

**中图分类号:** TP 306 **文献标识码:** A

电路的测试生成就是为被测电路 (CUT) 寻找能够彻底检查该电路全部故障的一组输入矢量, 随着 VLSI 技术的发展, 电路复杂性和集成度在不断地提高, 这使得对电路的测试十分困难. 目前在组合电路的测试生成算法中比较有代表性的方法如 PODEM、FAN 算法等<sup>[1]</sup>, 它们几乎都是算法式测试方法. 本文在电路的最优神经网络模型的基础上, 研究基于该模型的电路测试生成方法. 与电路的与其它神经网络模型比较<sup>[2~4]</sup>, 由于最优神经网络模型在网络的规模方面是最小的, 因此在电路的测试中使用, 能降低问题的搜索空间, 从而提高方法的效率.

## 1 电路的最优神经网络模型及建立方法

### 1.1 电路的最优神经网络模型

对一个给定的组合逻辑电路, 与之对应的最优神经网络定义为: 对有  $m$  个初级输入和  $n$  个初级输出节点的逻辑电路, 如果一个由  $m+n$  个神经元组成的神经网络能表征该电路的逻辑功能, 则把这个神经网络称为能表征电路逻辑功能的最优神经网络. 定义电路的最优网络模型的意义主要在于: 它能把电路的逻辑功能用简洁的函数形式 (即能量函数) 表达, 在电路的测试生成方面能避免复杂的对被测电路的操作过程, 有助于提高测试生成的速度.

把对应于电路的初级输入和初级输出节点的神经元激活值分别记为  $V_1, V_2, \dots, V_{m+n}$ ,

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省博士后基金资助项目

收稿日期: 1999-04-21 作者简介: 潘中良, 男, 1966 年生, 博士后.

它们组成的向量记为  $V, V = (V_1, V_2, \dots, V_{m+n})$ . 可把最优神经网络的能量函数  $E$  表示为  $E = E(V, T, I, K)$ , 其中,  $T$  为神经元间的权矩阵,  $I$  为神经元的阈值,  $I = (I_1, I_2, \dots, I_{m+n})$ ,  $K$  为一个常数. 当神经元的激活值  $V$  满足电路的真值表时使神经网络的能量函数  $E$  的值为 0, 不满足时使  $E$  的值为 1, 这样就能用神经网络的能量函数来表征电路的逻辑功能.

选取能量函数  $E$  的形式为

$$E = K - \sum_{i=1}^N I_i V_i - \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} V_i V_j - \frac{1}{3!} \sum_{i,j,k} T_{ijk} V_i V_j V_k - \dots - \frac{1}{N!} \sum_{i,j,k,\dots,l} T_{ijkl\dots l} V_i V_j V_k \dots V_l$$

把对  $E$  的约束条件代入它的表达式中, 可以得到关于  $T, I, K$  的一个方程组:  $AX=B$ , 这里,  $A$  为一常数矩阵,  $B$  为一常向量,  $X$  是一个向量, 它是由权矩阵  $T$  的元素、阈值  $I$  的分量和  $K$  组成. 可以证明这种网络一定存在, 且通过求解方程组  $AX=B$  就可以获得电路对应的最优神经网络结构.

1.2 多输入基本门电路的一种最优神经网络结构

把二输入门的输入节点和输出节点对应的神经元激活值记为  $V_1, V_2$  和  $V_3$ , 当  $(V_1, V_2, V_3)$  的取值满足门的真值时, 最优神经网络的能量函数  $E$  的值为 0, 不满足时  $E$  的值为 1. 二输入门的一种最优神经网络能量函数的形式如下

$$E = k - I_1 V_1 - I_2 V_2 - I_3 V_3 - (T_{12} V_1 V_2 + T_{13} V_1 V_3 + T_{23} V_2 V_3)/2 - (T_{123} V_1 V_2 V_3)/6$$

(1) 对与门 (AND), 按上节求解方程组  $AX=B$  的方法, 可得  $k, I_1, I_2, T_{13}, T_{23}$  都为 0,  $I_3=-1, T_{12}=-2, T_{123}=12$ , 即  $E=V_1 V_2 + V_3 - 2 V_1 V_2 V_3$ .

(2) 对或门 (OR), 同样求得  $k=0, I_1=I_2=I_3=-1, T_{12}=2, T_{13}=T_{23}=4, T_{123}=-12$ , 因此  $E=V_1 + V_2 + V_3 - V_1 V_2 - 2 V_1 V_3 - 2 V_2 V_3 + 2 V_1 V_2 V_3$ , 对  $E$  进行整理, 把它写成  $E=(1-V_1)(1-V_2) + (1-V_3)(1-2(1-V_1)(1-V_2))$  的形式.

由如上 AND、OR 电路能量函数的特点, 及对给定的一个向量  $B$ , 方程组  $AX=B$  只有唯一解的事实, 可以获得多输入门的网络能量函数, 其表达式见表 1. 表 1 给出了异或门 (XOR) 和非门 (NOT) 的能量函数, 它们的获得是用类似于求 AND 门能量函数的方法.

表 1 多输入门的最优神经网络的能量函数

Tab 1 The energy functions of optimal networks for the basic gate circuits

| 名称   | 输入                     | 输出        | 能量函数                                                                                                                                    |
|------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AND  | $V_1, V_2, \dots, V_n$ | $V_{n+1}$ | $V_1 V_2 \dots V_n + V_{n+1} - 2 V_1 V_2 \dots V_n V_{n+1}$                                                                             |
| NAND | $V_1, V_2, \dots, V_n$ | $V_{n+1}$ | $1 + 2 V_1 V_2 \dots V_n V_{n+1} - V_1 V_2 \dots V_n - V_{n+1}$                                                                         |
| OR   | $V_1, V_2, \dots, V_n$ | $V_{n+1}$ | $(1 - V_1) \cdot (1 - V_2) \cdot \dots \cdot (1 - V_n) + (1 - V_{n+1})(1 - 2(1 - V_1) \cdot (1 - V_2) \cdot \dots \cdot (1 - V_n))$     |
| NOR  | $V_1, V_2, \dots, V_n$ | $V_{n+1}$ | $1 - (1 - V_1) \cdot (1 - V_2) \cdot \dots \cdot (1 - V_n) + (1 - V_{n+1})(2(1 - V_1) \cdot (1 - V_2) \cdot \dots \cdot (1 - V_n) - 1)$ |
| XOR  | $V_1, V_2$             | $V_3$     | $V_1 + V_2 + V_3 - 2(V_1 + 2 V_1 V_3 + V_2 V_3) + 4 V_1 V_2 V_3$                                                                        |
| NOT  | $V_1$                  | $V_2$     | $1 - V_1 - V_2 + 2 V_1 V_2$                                                                                                             |

有了表 1 的结果, 在建立多输入门的最优神经网络的能量函数时就可以直接用它的表

达式, 而不必每次通过解方程组而求得.

## 2 基于最优神经网络的电路测试生成

### 2.1 测试生成模型

由对电路最优神经网络模型的构造方法可知, 任意的组合电路都存在一种与之相对应的最优神经网络, 而且电路的逻辑特性可以由能量函数  $E$  来描述. 使  $E$  的值为 0 的一组神经元激活值就是电路的一个相容状态. 在一定条件下这个相容状态中的所有主输入神经元的激活值就可以成为电路中一个给定故障的测试矢量 (这一点我们将在下面作说明).

在此我们首先构造被测电路的约束电路, 约束电路由故障电路 (已注入故障)、无故障电路和一个接口电路构成. 对单输出电路接口由一个 NOT 门组成; 对有  $m$  个主输出端的电路, 接口由  $m$  个二输入的 XOR 门和一个具有  $m$  个输入的 OR 门组成, 并且这个 OR 门的输出为 1, 这样的限制是保证当约束电路的输入矢量为故障的测试时, 被测电路的故障输出与无故障输出不同. 图 1 示出了有 2 个主输出端的被测电路对应的约束电路结构.

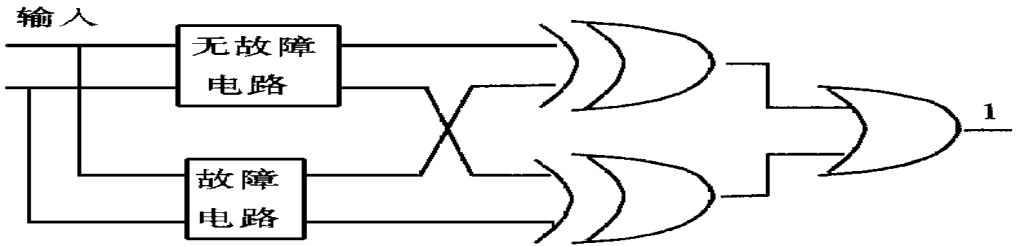


图 1 约束电路的结构

Fig 1 The structure of constraint circuits

由于电路对应的网络能量函数只有在神经元的状态满足电路的真值时才为 0, 根据约束电路的构造可得, 电路中的一个故障 ( $s \rightarrow a=0$  或  $s \rightarrow a=1$ ) 存在测试的条件如下:

**定理 1** 设被测电路中一个故障  $f$  对应的约束电路能量函数为  $F(x)$ ,  $F(x)$  由无故障电路 (被测电路)、故障电路和接口电路对应的最优网络能量函数三部分组成. 对方程  $F(x)=0$ , 如果  $F(x)=0$  存在一个解  $z$ , 则  $z$  中与电路主输入节点对应的值构成的向量  $z_1$  就是故障  $f$  的测试.

**证明** 设  $z$  为方程  $F(x)=0$  的一个解,  $z$  为  $n$  维向量,  $z_1$  为  $m$  维向量,  $m < n$ . 这里函数  $F(x)$  中变量  $x$  的各分量分别是约束网络中相关节点的取值, 因此  $z$  就对应于网络在  $z_1$  作用下的状态. 由接口电路的结构可得: 在  $z_1$  作用下无故障电路和故障电路的输出不同, 否则接口电路中每个 XOR 门的输出为 0, 此时接口电路中或门的变量取值不满足它的真值, 从而接口电路的网络能量函数值应为 1. 又由于组成约束电路的每个子电路的能量函数值大于或等于 0, 因此  $F(z) > 0$ , 从而与  $F(z) = 0$  矛盾. 这样  $z_1$  使无故障电路和故障电路的输出不相同,  $z_1$  就为给定故障的一个测试. 至此定理 1 证毕.

### 2.2 测试生成的步骤

电路测试生成由如下两个主要部分组成: 建立被测电路对应约束电路的神经网络模型, 计算网络能量函数  $E$  的最小值点. 下面对每一部分做详细说明.

(1) 建立约束电路的神经网络模型，得到网络能量函数  $E$  的表达式.  $E$  可以表示为  $E = E_C + E_{Cf} + E_I$ . 这里， $E_C$ 、 $E_{Cf}$ 和  $E_I$  分别为无故障电路（被测电路）、故障电路和接口电路对应最优网络的能量函数. 由接口电路的构成方法易于获得它的真值表，因此可以直接求出接口电路的最优神经网络模型，而得到它的能量函数  $E_I$ .

在被测电路的逻辑功能即真值表已知的情况下，建立它的最优神经网络模型只需按照如上讨论的方法进行. 若只获得了电路的形式描述，而其逻辑功能没有明显给出，则可选择① 用电路模拟技术计算出电路的真值表，然后建立其最优网络模型；② 对电路进行分块，求出每一子电路的真值表及其最优网络模型，将所有子电路的网络合并而成为整个电路对应的神经网络，从而得到能量函数的表达式.

(2) 计算约束电路的网络能量函数  $E$  的最小值点，这里可采用应用数学中效率较高的优化方法，如梯度法、模拟退火法等. 若求得的最小值点  $x_{min}$ 使  $E$  的值为 0，则在  $x_{min}$ 中与电路主输入节点对应的神经元激活值就是给定故障的测试矢量.

2.3 实验结果

我们用如上方法对 ISCAS'85 中 C17 电路和 Schneider 电路<sup>[1]</sup>进行了测试生成. 对 C17 电路建立网络模型时，对无故障电路首先采用模拟方法计算其真值表，然后建立其最优神经网络模型. 对故障电路进行分块，仅分为两部分，一个子电路中包含有给定的故障，另一子电路中不含故障，并建立每一子电路的最优网络模型. 对 Schneider 电路在生成测试时，对无故障电路和故障电路都计算其最优网络模型. 求约束电路能量函数的最小值点采用模拟退火方法 (SA)<sup>[5]</sup>，SA 算法的主要参数有：初始温度  $T_0$ 、温度  $T$  的更新方式，即算法每进行一步之后将当前温度  $T$  调整为  $\lambda T$ ，这里， $\lambda$  为一常数， $0 < \lambda < 1$ . 表 2 是部分实验结果，表 2 中的测试生成时间是指产生电路的一个完备测试集的时间，单位是 s，表中的结果是每一算法重复运行 10 次之后的平均值，是在 586 计算机上完成的.

表 2 实验结果  
Tah 2 Experimental results

| 电路名       | 最优网络测试生成时间 | Hopfield 网络测试生成时间 | 故障覆盖率/% | $T_0$ | $\lambda$ | 电路分块数 |
|-----------|------------|-------------------|---------|-------|-----------|-------|
| C17       | 0.23       | 0.47              | 100     | 500   | 0.30      | 2     |
| Schneider | 0.21       | 0.54              | 100     | 500   | 0.35      | 1     |

实验结果表明基于最优神经网络的电路测试方法的测试生成时间快于 Hopfield 网络方法<sup>[4]</sup>，其主要原因在于约束电路中神经元数目的大量减少. 虽然基于最优网络的测试方法在算法的初期求整个电路或子电路的最优网络时要花费一定的计算量，但由于求能量函数的最小值点是十分费时的过程，特别是网络中神经元数目的多少对这一过程影响极大，随着神经元数目的增加，计算时间将会成倍增长，因此从总体上看，基于最优网络模型的测试方法有较好性能.

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈光禹, 张世箕. 数据域测试及仪器 [ M ] . 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [ 2 ] CHAKRADHAR S T. Toward massively parallel automatic test generation [ J ] . IEEE Trans on CAD, 1990, 9 (9): 981~994.
- [ 3 ] CHAKRADHAR S T. Energy minimization and design for testability [ J ] . J Elec Testing: Theory and Application, 1994, 5 (1): 57~66.
- [ 4 ] 潘中良. 数字电路测试的神经网络方法的研究与实现 [ D ] . 成都: 电子科技大学, 1997.
- [ 5 ] 焦李成. 神经网络系统理论 [ M ] . 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.

## The Circuits Test Generation Method Based on Optimal Neural Network Model

PAN Zhong-liang<sup>\*</sup>, ZHANG Guang-zhao

**Abstract:** An optimal neural network model for digital circuits is studied. The circuit is characterized by the energy function of optimal network. A new method based on the optimal network model for digital circuit test generation is presented. The test generation method consists of the following two steps: building a network model for circuit under test, and finding the minimum of energy function which accords with the circuit. It is illustrated that the model presented enhances the computing efficiency of the test method based on Hopfield neural network.

**Keywords:** digital circuits; test generation; optimal neural network; energy function

---

<sup>\*</sup> Department of Radio and Electronics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China