基于人工免疫机制的数字系统测试方法

陆广平[1],卜迎春[2]
(1. 盐城工学院 电气工程学院,江苏 盐城 224051; 2. 盐城工学院 基建处,江苏 盐城 224051)

摘要:介绍了人工免疫系统的阴性选择算法的基本原理,把阴性选择算法应用到数字系统的故障检测和诊断中,根据部分匹配规则运用贪婪算法生成检测器。对数字系统注入故障,通过在输入端加测试序列求故障工作串和无故障工作串的海明距离,得出数字系统的故障检测率和定位率。通过典型基准电路实例,对所研究的数字系统测试方法的诊断结果进行了详细的分析讨论。实验结果表明,数据处理的方法是切实可行的,故障检测和诊断结果是正确的。

关键词:数字系统;故障检测;故障诊断;免疫机制
中图分类号:TP306 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-5322(2009)04-0032-04

近年来,人工免疫系统的研究逐渐变成研究的热点。人工免疫系统[1]已经得到广泛的应用,因此本文的主要研究内容是将人工免疫机制引入到数字系统的测试中,借助于数学优化理论和信号处理知识对数字电路进行测试。

1 人工免疫系统和免疫系统模型

人工免疫系统就是研究借鉴、利用生物免疫系统的各种原理和机制而发展的各类信息处理技术、计算技术及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称。

阴性选择算法分为两个阶段:①检测器的生成,检测器是在非我串中产生,检测器与自我串中的任何免疫系统的两种计算模型——阴性选择算法和免疫网络模型。个体不匹配,检测器的个数由匹配位、串长决定。②检测器监测被保护串,将检测器与被保护串匹配。

2 基于阴性选择算法的时序电路的状态检测

阴性选择算法工作于自我/非我识别的基础之上,自我/非我识别也是免疫系统运行的基础。由于时序电路的功能可以用有限状态机描述,因此使得自我和非我条件分别从有效状态转换和无效状态转换简单地提取出来。系统进行正确的操作仅会发生自我转换。一个故障可能导致状态机转换到一个非我状态,或一个自我状态,但不是正确的自我状态。

2.1 检测器生成过程

容忍条件[2,3]的产生需要两个用户参数:匹配长度 r 和所需的容忍条件的数目 R。贪婪算法用于为变化范围为 $1 \leqslant r \leqslant l$ 的匹配长度产生一整组容忍条件。l 为检测器字符串的长度;S 为自我串集合;r 为匹配中要求的连续匹配位数,即匹配长度;s 为匹配串,位串从左到右,共有 2^r 个;$\hat{s}$ 表示的是将最左边(最右边)的字符去掉;$\hat{s},b$ 是将 $\hat{s}$ 最右边(最左边)补上 $b(b=0、1)$。

如果两个串至少有 r 位相同,说明它们是匹配的,$t_{i,s}$ 表示模板从 i 开始到匹配串 s 结束,其余部分用符号"*"表示。例如 $l=10, s=0001$,则 $t_{2,s}=*0001*$,模板 $t_{i,s}$ 的右(左)完成是指模板 t 的所有右(左)边的空白用 0 或 1 来代替,如 *110011 是 *1100* 的一个右完成位。$C_i[s]$ 是模板 $t_{i,s}$ 右完成位不和 S 匹配的数目,如 $i=l-r+1$,$t_{i,s}$ 的右完成位就是模板本身。因此

$$C_{l-r+1}[s]=\begin{cases}0, t_{1-r+1,s} \text{ 和 } S \text{ 匹配}\\ 1, \text{其它}\end{cases}$$

对 $1 \leqslant i < l-r+1$,如果 $t_{i,s}$ 和 S 匹配,则 $C_i[s]=0$,否则模板 $t_{i,s}$ 右完成位是 $t_{i+1,s}$ 的 $i+r-1$ 位用 0 和 1 代替。因此

收稿日期:2009-09-29
作者简介:陆广平(1974-),女,江苏盐城人,讲师,硕士,主要研究方向为数字系统测试技术。

$$C_i[s] = \begin{cases} 0, t_{i,s} \text{ 和 } S \text{ 匹配} \\ C_{i+1}[\hat{s} \cdot 0] + C_{i+1}[\hat{s} \cdot 1], \text{其它} \end{cases}$$

从 $C_{l-r+1}[s]$ 到 $C_1[s]$ 是循环过程，右完成位的空白是逐步补上的，生成检测器数量为 $\sum C_1[s]$。

$C'_i[s]$ 是模板 $t_{i,s}$ 左完成位不和 S 匹配的数目，从左到右构造 C' 矩阵，方法同构造模板矩阵 C，$D_i[s] = C_i[s] \times C'_i[s]$ 表示不和这个模板匹配的数目，生成检测器数量 $\sum D_i[s]$。

用 greedy 算法来生成检测器的字符串，greedy 算法用两个不同的 D 矩阵，D_S 和 D_R。D_S 表示 S 和模板不匹配的数目，D_R 矩阵表示每个模板和已生成的检测器还有多少没有匹配。

在 D_S 中随机选择 D_{is} 不为零的模板，然后根据 C_s 和 C'_s 把模板的左右位用 0、1 完成，得到的串是检测器集合中的串，通过将新生成的检测器串加入到 R 中，来改变 C_R 和 C'_R，将和检测器匹配的模板 C_R 和 C'_R 设为 0，其它的重新用左完成和右完成的方法计算 C_R 和 C'_R，重复上述过程直至所有有效的 D_R 全为 0。

2.2　检测电路的方法

根据匹配位和对应的检测器的个数，将故障串（非我串）注入到自我串中，如果与检测器匹配就说明能检测出这个异常情况，最终求出匹配位和检测器不同情况下的检测概率。

根据系统的要求，综合考虑生成的检测器个数、匹配位和检测概率，来选定最佳的检测器个数和匹配位。循环采集电路的工作串，根据贪婪算法求得的检测器 R 和匹配位 r，如果正常工作的自我串和检测器串匹配就说明检测到异常情况，否则继续检测电路。基于人工免疫机制的时序电路故障检测流程图如图 1 所示。

2.3　应用实例分析

将阴性选择算法应用于十进制计数器的检测，十进制计数器的状态转换如表 1 所示。自我串是由技术使能端、复位端、现态和次态构成。

表 1　十进制计数器功能描述

Table 1　Functional description of Decimal count

功能	0 到 9 循环计数
状态	10 个
输入	使能端 en，复位端 rst
操作	计数(en = 1，rst = 1)，保持(en = 0，rst = 1)，复位(en = x，rst = 0)

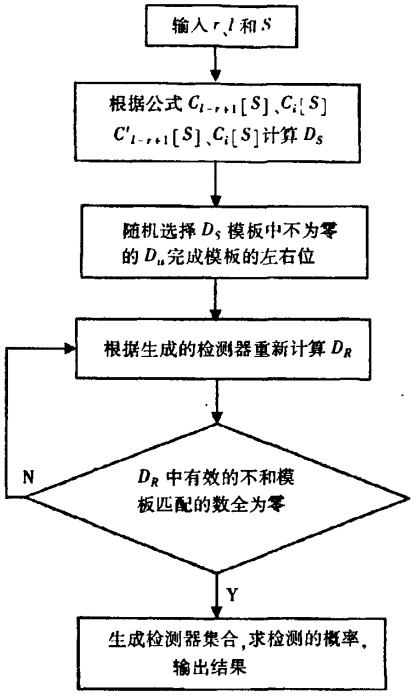

图 1　人工免疫机制的时序电路故障检测流程图

Fig. 1　Fault detector diagram of sequence circuit based on Artificial Immune Mechanism

基于阴性选择算法的十进制计数器的检测步骤如下：(1) 建立自我串；(2) 生成检测器个数；(3) 生成检测器；(4) 对非我串进行故障检测。

容忍条件的产生需要两个用户参数：匹配长度 r 和所需的容忍条件的数目 R。如果将故障注入到自我串中，如果检测器串和自我串中的故障匹配就说明能检测这个非我串，然后求出故障检测的概率。随着匹配位的改变，984 个非我串能识别的结果如表 2 所示。匹配长度 $r \leqslant 3$ 时，不

表 2　匹配位为 r 时，检测概率

Table 2　Detection probability of match bit r

匹配位 r	检测器个数 R	能识别的非我串	检测概率
$r \leqslant 3$	0	0	0
$r = 4$	6	584	59.35%
$r = 5$	17	664	67.48%
$r = 6$	42	784	79.67%
$r = 7$	103	913	92.78%
$r = 8$	226	932	94.72%
$r = 9$	472	954	96.95%
$r = 10$	984	984	100%

可能产生任何与非我匹配同时不与自我匹配的容忍条件。匹配长度 $r=4$ 时仅需 6 个独立容忍条件来检测所有可检测非我串 584 个(984 中的 584)。对于匹配长度 $r=7$ 时,103 个独立容忍条件可检测出 984 个自我串中的 913 个。匹配长度为 10,提供了 100% 的覆盖面,因为非我串和容忍条件一一对应(该组容忍条件就等于那组非我串)。

3 数字系统的故障诊断方法

由上所知免疫方法用于时序电路的状态检测,能够检测出异常状况,但不能定位故障,要将免疫方法用于数字电路的故障定位,需要解决几个关键问题:测试序列生成、编码方法、数据处理。

3.1 关键技术问题

(1)测试序列生成。首先根据时序电路的功能描述,列出电路正常工作的自我串,其中自我串由输入、现态、状态、输出构成。然后加入测试矢量,提取它的工作串,再加入下一个测试矢量直至所有的正常串全部采集到。

(2)编码方法。工作串的编码方法全部采用二进制编码,对故障信号线定位时,需要将信号线标号,如信号线 17 出现了 $s-a-1(s-a-0)$ 故障,编码时用 171(170)表示。

(3)数据处理。由于采集到的工作串有许多是重复的,因此会占用太多的空间,需要加以压缩去除相等的工作串,然后测量检测器与无故障和故障串的海明距离。

3.2 诊断方法

由于时序电路的输出不仅决定于当前的输入信号,而且决定于当前状态,因此自我串要考虑到输入、状态转换和输出。具体诊断方法如下:

(1)用贪婪算法求出当匹配位数为 r 时,检测器的个数;

(2)在输入端加入测试序列,采集电路无故障时的自我串,直至所有的工作串全部采集到,去除相同的串;

(3)依次注入故障,在电路的输入端加上述测试序列,通过故障电路仿真得出每个故障电路的工作串,去除每个故障相同的串;

(4)将故障串与检测器匹配,看能否检测出故障;

(5)求检测器和无故障时的自我串、故障电路串的海明距离;

(6)求故障检测率和诊断率。

3.3 应用实例分析

系统选用的是基准电路 itc99 b02,电路的结构见基准电路描述,进行结构测试时,将电路的故障数进行压缩,等效故障只需测量其中的任一个。基准电路 b02 的故障诊断过程如下:

(1)检测过程

自我串(输入、现态、次态、输出)总共 28 种正常状态,非我串为 484 种($2^9-28=484$),用贪婪算法求得匹配位为 r 时,检测概率和对应的检测器的个数如表 3 所示。

表 3 匹配位为 r 时,检测概率

Table 3 Detection probability of match bit r

匹配位 r	检测器个数	能识别的非我串	检测概率
$r\leqslant 4$	0	0	0
$r=5$	9	184	38.02%
$r=6$	40	391	80.79%
$r=7$	103	445	91.94%
$r=8$	228	482	99.59%
$r=9$	484	484	100%

(2)求测试序列

根据 b02 电路的状态转换图,电路清零,电路处于 a 态,采集到自我状态 16 种,由于电路设计了清零端,所以 1xxxx0000 总能实现,采集到的自我串已满足条件,加测试序列,得出无故障电路的响应和状态转换仿真图的一部分,如图 2 所示。

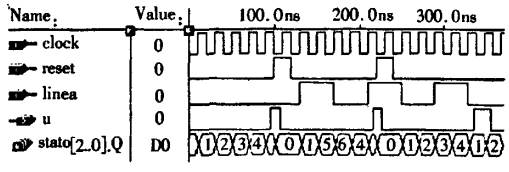

图 2 b02 无故障电路的仿真结果

Fig. 2 Simulation reslut of fault - free circuit b02

(3)注入故障,经故障仿真后,得出每个故障的输出和状态转换,由于故障太多,itc99 电路的结构描述可到 itc99 网站查阅,仅列出 $U37$ 和 $U45$ 的仿真结果如表 4 所示,可发现仿真结果与无故障电路的仿真结果有明显区别。

(4)处理仿真数据和实验结果讨论

将数据转化为二进制工作串,压缩无故障和故障串中相同的串,然后根据匹配位和检测器的个数来测量它们的海明距离。b02 电路的实验结果如表 5 所示。

表4　*U37* 和 *U45* 出现故障的仿真结果

Table 4　Simulation results of *U37* and *U45* in fault

故障		输出序列和状态转换
U37(s-a-0)	u	00000000000000000000000
	stato	01234000012601260123400 0
U45(s-a-1)	u	00001000100000000010101
	stato	01234101412201222341414 1

表5　b02 电路故障在 *r* 不同情况下检测概率

Table 5　Detection probability of match bit *r* about b02 circuit

匹配位 *r*	检测器个数	异常故障	检测概率	定位的故障	诊断概率
$r\leqslant 4$	0	0	0	0	0
$r=5$	9	14	41.18%	33	97.06%
$r=6$	40	29	85.29%	32	94.12%
$r=7$	103	30	88.24%	33	97.06%
$r=8$	228	34	100%	33	97.06%
$r=9$	484	34	100%	33	97.06%

表5中分别列出 b02 电路的34个故障在匹配位不同的情况下，根据贪婪算法求得的检测器个数能够检测异常故障数和定位的故障数。由结果可知，如果仅需要检测异常情况，检测器个数为40个时，检测概率就达到了85.29%。如果需要定位，首先将测试序列加到故障电路上，然后提取电路的状态和输出，经过上述的数据处理后测量检测器与故障串的海明距离，最后通过查找法定位，当 $r=5$ 时，仅需9个检测器诊断概率就达到了97.06%。因此需要故障定位时，当匹配位数为5，仅需9个检测器，故障定位的效果最好。

4　结论

用人工免疫系统中的阴性选择算法对 itc99 中的基准电路进行故障检测和诊断，检测器的生成过程用的是贪婪算法，诊断过程是通过求检测器和故障串的海明距离来定位是何处信号线出现了固定型故障。实验证明该方法简单、切实可行。

参考文献：

[1] Bradley D W, Tyrrell A M. The Architecture for a Hardware Immune System[A]. Proc. The Third NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware. 2001, 193-200.

[2] Bradley D W, Tyrrell A M. Immunotronics - Novel Finite - State - Machine Architectures With Built - In - Self - Test Using Self - Nonself Differentiation[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 227-238.

[3] Bradley D W, Tyrrell A M. A hardware immune system for benchmark state machine error detection[A]. Proc. of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. 2002: 813-818.

Testing Methods of Digital System Based on Artificial Immune Mechanism

LU Guang-ping[1], BU Ying-chun[2]

(1. School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China;
2. Department of Infrastructure Construction, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: The principle of negative selection algorithm of artificial immune system is introduced. The algorithm which is based on negative selection algorithm is applied to fault detecting and fault diagnosis of digital system, and detectors were generated through part match rules. Haiming distances are obtained through counting strings of fault free and fault, and the rate of detecting and diagnosis of digital system are achieved. Finally, these methods are used to diagnose the typical benchmark circuits and the performances and characteristics of them are analyzed. The results are discussed in details. Experimental results confirm the feasibility and validity of these methods.

Keywords: digital system; fault detecting; fault diagnosis; Immune Mechanism

（责任编辑：沈建新；校对：张英健）