

一种基于 LUT 和二模冗余的胚胎数字电路故障检测方法

王 涛, 蔡金燕, 孟亚峰

(军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 研究了数字电路故障的基本特点, 结合电路自修复对故障信息的要求, 提出了一种基于 LUT 和二模冗余的故障检测方法, 该方法利用 LUT 来存储细胞正常工作的状态, 利用正常工作状态和实际工作状态的对比, 来实现细胞工作状态的实时监测, 从而检测细胞是否故障. 该方法能够同时对多个细胞进行检测, 增加故障覆盖率, 减少了设计的复杂程度和硬件资源的消耗, 具有很好的工程实用价值.

关键词: 胚胎数字电路; LUT; 二模冗余; 故障检测

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)07-0102-04

A New Embryonic Digital Circuit Fault Detection Method Based on LUT and Dual Modular Redundancy

WANG Tao, CAI Jin-yan, MENG Ya-feng

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In this paper, the basic characteristics of the digital circuit fault are studied, combining the demands of circuit on the fault detection, a new method based on LUT and dual modular redundancy is proposed. Using the LUT to storage the normal state of working cell, comparing the normal output of working cell and the actual output of working cell, to realize the real-time detection of the working cell, to detect whether the working cell is failure or not. This method can simultaneously test multiple cells, reducing the complexity of the circuit system and the consumption of hardware resources, which has great engineering application value.

Key words: embryonic digital circuit; LUT; dual modular redundancy; fault detection

1 引言

胚胎电子阵列是一种基于多细胞组织分化发育过程而设计的一种新的电路结构, 具有类似于生物组织的自组织、自适应和自修复等良好的特性^[1]. 基于胚胎电子阵列实现的电路具有很高的可靠性, 能够满足现代电子系统对电路可靠性的要求, 是未来电子系统设计的一大趋势.

胚胎数字电路具有自修复的特性, 而故障的检测是实现电路自修复的前提, 也是电路高可靠性的前提. 现有胚胎数字电路的故障检测方式主要有细胞内的自检和细胞间的互检两种^[2]. 细胞内的自检

主要是对逻辑块和配置存储器进行自检, 对逻辑块的自检主要通过二模/三模冗余实现故障的实时检测^[2]; 由于配置存储器占用的硬件资源较大, 所以不适合用二模/三模冗余进行故障检测, 对配置存储器的自检主要通过拓展海明码实现故障的在线检测^[3]. 细胞内的自检能够实现细胞内逻辑块和配置存储器的自检, 但存在硬件资源消耗大的缺点. 细胞间的故障检测需要增加专门的检测细胞来实现对其他细胞工作状态的检测^[2], 判断细胞是否出现故障, 但这种方法的检测效率不高.

本文研究了数字电路的特点, 将细胞间的二模冗余故障检测方法进行简化与 LUT 相结合, 简化

了检测过程,提出了一种新的故障检测方法.该方法实现了一个检测细胞能同时对多个细胞进行状态检测,降低了硬件资源消耗,具有很好的工程实用价值.

2 相关基础知识

2.1 胚胎电子阵列

胚胎电子阵列是基于生物胚胎发育过程而设计的一种新的阵列结构,如图 1 所示.该阵列是由具有相同结构的电子细胞排列形成的二维阵列,具有自组织、自修复和自适应等特性^[4].电子细胞是构成电子阵列的基本单元,其结构如图 2 所示,电子细胞主要由地址产生器、功能单元、配置存储器、控制单元、换向块和故障检测模块 BIT 组成^[5].地址产生器主要是产生细胞标识,通过该标识表达对应的基因;功能单元主要是执行细胞的逻辑功能,根据不同的基因配置执行不同的功能;配置存储器主要是存储整个电路的所有基因,不同的基因具有不同的电路功能和连接方式;控制单元主要控制细胞的自组织和自修复过程;换向块主要是实现细胞间的连接,用于实现数据和信息的传递;故障检测模块主要是在运行过程中实时检测细胞的运行状态^[6].

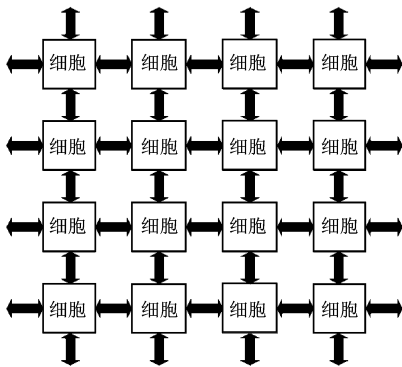


图 1 二维胚胎细胞阵列结构

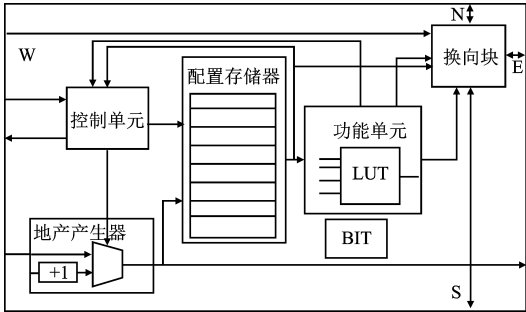


图 2 胚胎电子细胞结构

通过阵列的功能分化,得到目标电路的全部配

置基因,阵列中的细胞根据自己在阵列中所处的位置表达特定的基因,确定不同的连接方式和逻辑功能,阵列中所有的细胞共同配合完成目标电路功能.阵列实现自修复的实质是细胞的替换,在阵列运行过程中,细胞中的故障模块实时检测细胞的运行状态,当检测到细胞故障时,将“故障”信号传递给控制单元,启动阵列的自修复功能.对阵列重新计算地址信息,将故障细胞的配置信息传递空闲细胞,由空闲细胞代替其完成对应功能,保证阵列处于正常工作状态,实现电路的自修复^[6].

2.2 故障检测原理^[7]

根据数字电路的特点,对于一个功能确定的数字电路,当电路的输入信号确定后,那么其对应的输出信号也就相应的确定了.实际工作中,对数字电路的故障检测常采取二模冗余来实现,二模冗余的主要思想如图 3 所示.

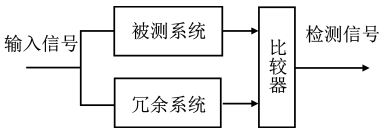


图 3 二模冗余

二模冗余故障检测方法的主要思想是:在被检测的工作系统基础上增加一个与工作系统完全相同的工作系统,将输入信号同时输入两个系统中,同时将系统的输出信号引入到一个比较器,如果两路输出信号相同则代表被检测的系统工作正常,如果被检测的工作系统与冗余系统的输出不一致则代表系统出现了故障(假设冗余的系统可靠度很高).

3 检测细胞的设计

基于胚胎电子阵列实现的数字电路具有自修复能力,这种自修复的本质是将故障细胞利用冗余的正常细胞来代替,保证电路的功能保持不变.这种自修复的一个前提是及时发现故障细胞,这个过程中对于细胞内的故障位置并不关注,更多的关注是细胞是否出现故障,如果细胞出现故障就开始自修复过程.

根据数字电路的输入输出信号特点,胚胎数字电路一旦实现那么每一个细胞的功能也就确定了,这样就可以得到输入输出信号之间的关系,将细胞输入和输出的对应关系表示出来,借鉴查找表的思想,根据输入信号得到理论输出信号,再借鉴二模冗余的思想将实际输出信号进行与或运算,得到细胞

的实时工作状态,完成对细胞的故障检测.因为在数字逻辑中存在一个重要的公式:

$$\begin{cases} a \oplus a = 0 \\ a \oplus b = 1 \end{cases} \tag{1}$$

式(1)可以解释两个相同的逻辑异或结果都是 0,两个不同的逻辑异或结果都是 1.所以在故障检测过程中,如果输出的检测信号为 1,则表示该细胞出现故障,如果输出的检测信号为 0,则表示该细胞工作正常.故障检测原理如图 4 所示.

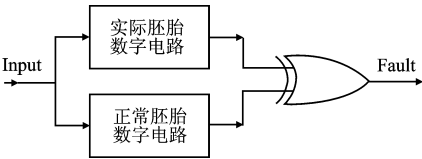


图 4 故障检测原理

将二模冗余和查找表的思想运用到检测细胞的设计中,设计的检测细胞如图 5 所示.

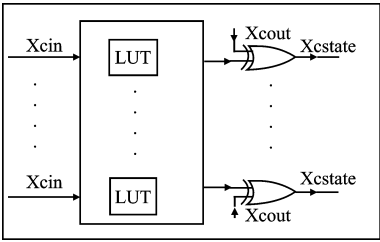


图 5 故障检测细胞结构

图 5 中 LUT 用来存储对应检测细胞的正常输出结果,根据不同的输入输出不同的信号; Xcin 表示相邻 8 个被检测细胞的输入信号; Xcout 表示相邻 8 个被检测细胞的实际输出信号; Xcstate 表示相邻 8 个被检测细胞的检测输出结果.检测细胞在阵列中的连接如图 6 所示.

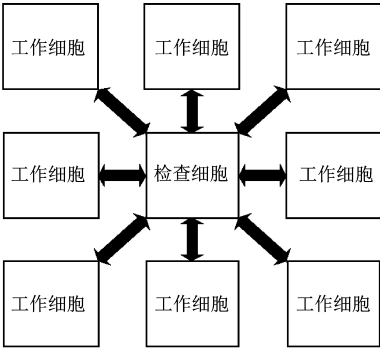


图 6 检测细胞的连接

该结构中检测细胞可以对周围 8 个细胞同时进行状态检测,工作过程中检测细胞只对工作细胞进

行检测,工作过程只判断细胞是否存在故障,不判断故障类型和故障部位,节约了硬件资源和简化了检测流程,提高了检测的工作效率.

4 仿真实验

4.1 检测性能分析

为对所提理论进行验证,选取多细胞的固定 1 故障作为验证模型.为检验检测细胞能否检测出周围细胞的工作状态,假设检测细胞的东南西北四个相邻细胞为工作细胞,假设细胞的输出信号都为 1,正常状况下细胞的输出为 0,四个细胞的状态检测信号均为 0,表示细胞正常工作,如图 7 所示.当对南侧和北侧细胞注入固定 1 故障时,则其输出信号由 0 变为 1,此时南侧细胞的检测状态有 0 变为 1,表明南侧细胞出现故障,而其他三个状态检测信号认为 0,表明细胞正常工作,如图 8 所示.

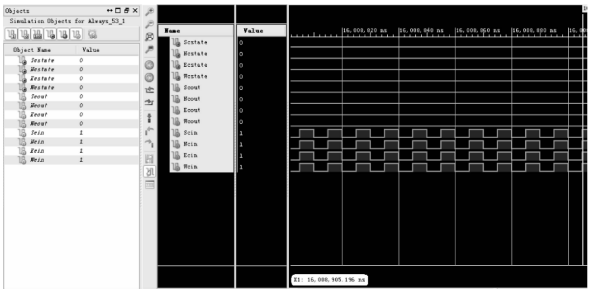


图 7 正常状态下仿真结果

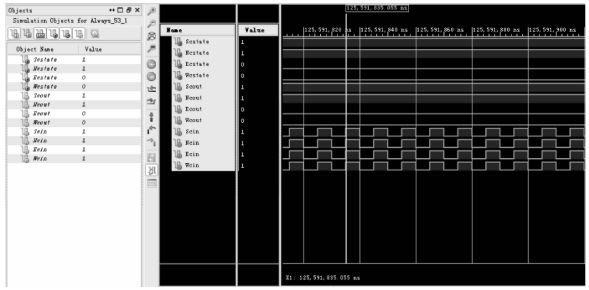


图 8 两个细胞故障仿真结果

4.2 资源消耗分析

对于一 $M \times N$ 的细胞阵列,常规的细胞内自检主要针对功能模块和配置存储模块,对于功能块的检测主要是采用冗余的方式检测,对于配置存储快的检测主要是奇偶校验或扩展海明码进行检测,对于控制模块和输入输出模块等故障无法完成检测,同时对于细胞内的连线出现短路、短路及桥接等故障也无法进行检测.本文提出的检测方法是一种基于功能的检测方法,不再对细胞内的各个单元进行检测,只要是细胞内发生故障使细胞的功能不能正

常完成,从而理论输出和实际输出不一致,就将产生故障信号,控制细胞的自修复,保证电路功能的正常,所以本文提出的基于功能的检测方法相对于传统的细胞自检故障覆盖率更高。

设细胞中的对功能块冗余消耗为 s ,配置存储模块消耗为 t ,则阵列细胞自检所涉及到的资源消耗为 $MN(s+t)$,按照本文提出的功能检测方法完成检测功能的资源消耗为 MN_s 。

对于小规模电路而言,阵列的资源消耗不会有较大的差别,但对于大规模或超大规模胚胎细胞电路而言, MN 将很大,则 MN_t 将会很大。

通过仿真实验,当阵列中的细胞出现故障时,故障检测细胞能够及时检测到细胞的故障,将细胞的故障信号传递给控制模块,启动电子系统的自修复功能,保证电子系统正常工作。同时对于大规模或超大规模电路而言,基于功能的故障检测方式能够在增加故障覆盖率的前提下,减少阵列的资源消耗。

5 结束语

本文提出了一种将细胞间互检和细胞内自检相结合的方式,提出基于细胞的功能进行检测的新的检测方法,基于查找表和二模冗余的思想设计了一种新的故障检测方式,利用阵列功能分化得到每个细胞的功能,根据细胞的不同输入得到理论输出结果,并利用 LUT 存储起来,通过不同的输入获得正常情况下的输出,与实际输出对比得到细胞的工作状态,完成对细胞工作状态的实时检测。本文给出了故障检测的基本原理和检测细胞的设计,并通过仿真实验验证,仿真结果表明该设计能够完成对细胞故障的实时检测,能够及时的发现细胞的故障,能够为电路的自修复提供支持。同时通过分析,该故障检测方式能够在增加故障覆盖率的前提下,减少阵列

的资源消耗,对于大规模或超大规模阵列电路效果明显,具有很好的工程实际价值。

参考文献:

- [1] 王友仁,崔坚,游霞,等. 仿生硬件及其发展[J]. 中国空间科学技术, 2004,36(1): 32-42.
- [2] R Canham, ATyrrell. An embryonic array with improved efficiency and fault tolerance[C]// Proceedings NAST/DoD Conference on Evolvable Rlardwre. [s. l.];IEEE, 2003:265-272.
- [3] Lucian Prodan, Mihai Udrescu, Mircea Vladutiu. Self-repairing embryonic memory arrays[C]// Proceedings 2004 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware. [s. l.];IEEE, 2004:130-131.
- [4] Mange D, Sanchez E, Staiffer A. Embryonics: a new methodology for designing field-programmable gate arrays with self-repair and self-replicating properties[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI). 1998, 6(3): 387-399.
- [5] 周贵峰,钱彦岭,王南天,等. 胚胎型仿生硬件结构 FIR 滤波器设计与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(增刊): 61-65.
- [6] 王南天. 基于原核仿生阵列的自修复技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [7] 杨仕元. 数字系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.

作者简介:

王涛 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为电子系统故障检测及自修复. E-mail:wangtao920110@126.com.

蔡金燕 男,(1961-),教授,博士生导师. 研究方向为检测理论、可靠性技术及电子系统自修复.

孟亚峰 男,(1970-),副教授,硕士生导师. 研究方向为装备故障检测、可靠性理论.