

# 总线细胞阵列中空闲细胞冗余数量研究

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:** 总线细胞阵列应用于实际功能电路的设计, 能够提高功能电路的可靠性, 但是过多的空闲细胞冗余将带来巨大的硬件资源消耗. 通过分析总线细胞阵列功能块内细胞组成不同的情况下, 阵列的资源消耗和阵列的可靠性情况, 研究功能块中空闲细胞数量的选择方法, 同时兼顾阵列的硬件资源消耗和阵列的可靠性, 从而为实际电路设计提供支持指导.

**关键词:** 总线细胞阵列; 可靠性; 资源消耗; 空闲细胞; 冗余数量

**中图分类号:** TP302.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—7180(2016)09—0001—05

## Research on the Redundant Number of Spare Cells in Bus-based Embryonic Array

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

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

**Abstract:** Design the real function circuit with bus-based embryonic cells array (BECA), which can improve the reliability of functional circuit effectively, but more spare cells also bring huge hardware resources consumption. In this paper, the resource consumption and the reliability of the BECA are analyzed with different cells composition. The method of choosing spare cells in functional module is researched, which can balance the resource consumption and the reliability of the BECA. The research on the spare cells choosing in the BECA is helpful to the design of the real circuit.

**Key words:** bus-based embryonic array; reliability; resource consumption; spare cells; redundant number

### 1 引言

为了提高电路的可靠性和适应能力, 减少资源消耗, 瑞士联邦工学院于 1992 年提出了仿生硬件的概念, 将生物的自适应、自组织和自修复等功能引入到电路设计中, 使电路具有类似的仿生功能. 目前关于仿生硬件的研究主要有演化硬件和胚胎细胞阵列两种.

胚胎细胞阵列是一种基于多细胞组织生长和发育过程而设计的一种具有生物的自适应、自检测和自修复能力的仿生硬件结构<sup>[1]</sup>. 胚胎细胞阵列的工作过程: 电路功能分化映射到每一个胚胎细胞, 所有的胚胎细胞共同工作, 整个阵列实现功能电路的功能, 当阵列中出现故障时, 细胞中的故障检测模块就

会检测到故障信号, 然后通过控制模块启动自修复功能, 将出现的故障修复, 自修复的本质就是空闲细胞代替故障细胞实现其功能, 从而保证阵列正常工作<sup>[2]</sup>. 胚胎型仿生硬件的概念一经提出就受到了国内外学者的广泛关注, 目前在理论和应用方面都取得了一定的研究成果<sup>[2-8]</sup>. 总的来说, 国外关于胚胎型仿生硬件的研究起步比国内早, 相关理论知识已经比较成熟, 并有部分实现了小型的硬件, 如瑞士联邦工学院已研制出具有自修复功能的 Bio-Watch<sup>[9]</sup>、欧共体也研制出了 Ubichip<sup>[10]</sup> 芯片等. 国内的相关研究主要还处于理论研究阶段, 缺乏实际应用研究.

总线细胞阵列的可靠性和硬件资源的消耗同功

能块内空闲细胞数量选择的关系,经过仿真分析确定了功能块内空闲细胞数量的选择方法,在硬件资源消耗和阵列的可靠性间找到一个合适的平衡点,为实际电路的冗余细胞设计提供相应的指导.

2 总线细胞阵列

2.1 总线胚胎细胞阵列结构

基于人体自修复的工作过程和基本原理,将功能分解的思想运用到胚胎细胞阵列结构的设计过程中.已知胚胎细胞阵列的主要功能是完成相应的电路功能,当电路出现故障时,启动自修复功能,保证电路长时间功能的正常.所以胚胎细胞阵列由完成相应电路功能的功能块、完成功能块故障检测的检测块及实现各个模块通信的总线组成,总线细胞阵列的结构设计如图 1 所示.

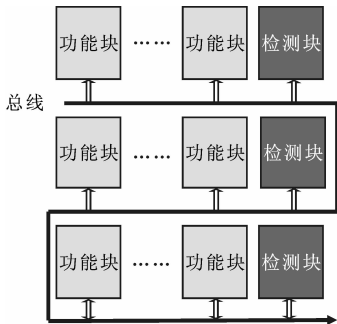


图 1 总线细胞阵列结构

总线细胞阵列由功能块、故障检测块和总线组成,功能块主要实现胚胎电路的功能,并保证电路出现故障时能正常工作,所以功能块由工作细胞、空闲细胞和辅助细胞组成,如图 2 所示,工作细胞完成相应的功能,空闲细胞作为工作细胞故障的备份,辅助细胞完成同总线的信息交互和对细胞的工作状态进行控制,保证功能块的正常工作和自修复的顺利完成.工作细胞和空闲细胞的结构如图 3 所示,工作细胞主要由控制模块、配置存储模块、功能单元和输入输出模块组成,控制模块主要控制细胞的工作状态,细胞有工作和“透明”两种状态;配置存储模块主要存储细胞工作过程中的基因配置信息,类似于生物细胞的 DNA 信息,决定细胞表达的功能和连接情况;功能单元是细胞的核心部分,实现细胞的具体功能;输入输出模块主要完成细胞间的信息传递,起到桥梁的作用.辅助细胞是功能块与总线进行信息交互的桥梁,同时也是功能块内细胞工作过程和自修复过程的控制器,辅助细胞的结构如图 4 所示.辅助细胞主要由基因存储模块、控制模块和输入输出模块组成.控制

模块的主要功能是根据功能块的工作状态信号和细胞当前的工作状态信息,确定细胞下一时刻的工作状态,产生各个细胞的状态控制信号;输入输出模块主要用于功能块与总线的信息传递;基因配置模块存储辅助细胞工作过程所需的配置基因.

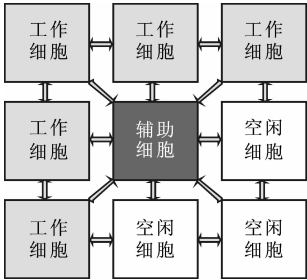


图 2 功能块结构

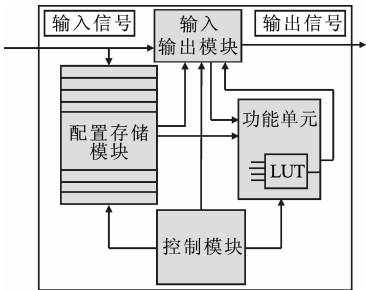


图 3 工作细胞结构

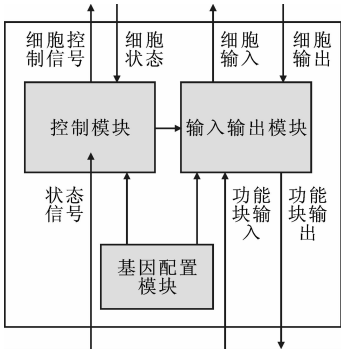


图 4 辅助细胞结构

故障检测是实现故障自修复的前提,故障检测的效率直接影响到自修复的效率.基于功能检测的思想,故障检测模块如图 5 所示,故障检测模块主要由存储器 SRAM 和异或门构成,存储模块主要存储各个功能块在不同输入信号下对应的输出信号,与或门主要实现理论的输出信号与实际的输出信号的异或值作为功能块的工作状态监测信号,完成对功能块工作状态的实时监测.

2.2 故障自修复方式

根据总线细胞阵列的结构特点,针对于单细胞

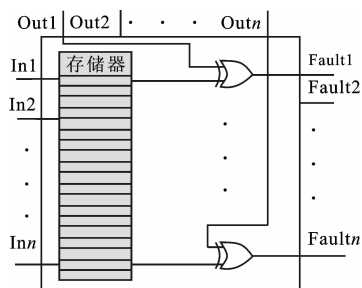


图 5 检测模块结构

故障提出了一种循环自修复方式,其自修复流程如图 6 所示, $m$  代表功能块内工作时最末尾细胞,当故障检测模块检测到故障信号时,功能块内的编号为  $m$  的细胞向后移动至  $m+1$  的位置,细胞  $m$  变为“透明”状态,检测此时的功能是否正常. 若功能正常则自修复成功;若功能仍不正常,透明细胞变为空闲细胞,  $m-1$  号细胞向后移动至细胞  $m$ , 细胞  $m-1$  变为“透明”状态检测功能是否正常,重复上述过程,直至故障修复成功.

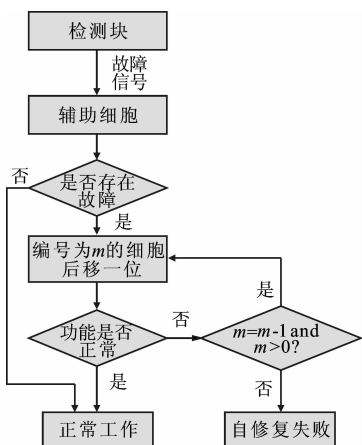


图 6 自修复流程图

其具体修复原理如图 7 所示,当功能块内存在某个细胞故障时(假设是细胞 3 故障,但工作时不知道具体的故障细胞),编号 5 的工作细胞向后移一位,其原来的位置变为“透明”状态,检测此时功能是否正常,若功能正常则自修复成功;若功能仍不正常,透明细胞变为空闲细胞,编号 4 细胞向后移动一位,检测功能是否正常,重复上述过程,直至故障细胞被变为“透明”状态,故障完成自修复,恢复正常工作.

### 3 阵列可靠性及资源消耗的分析

#### 3.1 $k$ -out-of- $m$ 模型

对于一个含有  $m$  个工作单元的系统,只要  $k$  个单

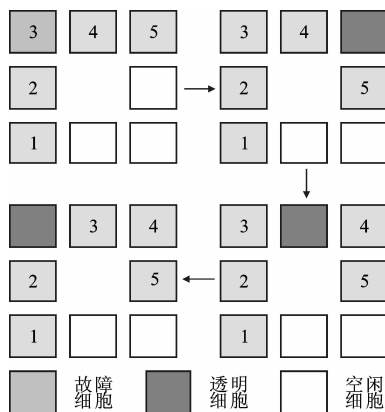


图 7 单细胞故障自修复过程

元正常工作则系统正常工作的系统成为  $k$ -out-of- $m$  模型<sup>[8]</sup>. 胚胎细胞阵列的结构满足  $k$ -out-of- $m$  模型,  $k$ -out-of- $m$  模型的可靠度可表示为:

$$R(t) = \sum_{i=k}^m C_m^i p(t)^i (1-p(t))^{(m-i)}$$

$$= \sum_{i=k}^m C_m^i e^{-\lambda i t} (1 - e^{-\lambda t})^{(m-i)}$$

其中  $p(t) = e^{-\lambda t}$  为每个单元正常工作的概率分布函数(称为可靠度),  $\lambda$  为单元失效率,取常数,单位为  $10^{-6}/h$ . 由于可靠度是一个随时间变化的量,难以度量,一般用平均无故障时间 MTTF (mean time to failure) 来衡量系统可靠性. MTTF 与  $R(t)$  的关系为:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

#### 3.2 阵列的可靠型分析

对于总线阵列结构而言,若所有的功能块  $s$  正常工作,则整个系统正常工作. 对每个功能块而言,所有的细胞  $m$  中若有  $k$  个细胞正常工作,则整个功能块就能正常工作,满足  $k$ -out-of- $m$  模型. 每个功能块正常工作的可靠度  $R_g(t)$  为:

$$R_g(t) = \sum_{i=k}^m C_m^i e^{-\lambda i t} (1 - e^{-\lambda t})^{(m-i)}$$

整个阵列的可靠度  $R_z(t)$  为:

$$R_z(t) = R_g^s(t)$$

则阵列的可靠性 MTTF<sub>z</sub> 为:

$$MTTF_z = \int_0^{\infty} R_z(t) dt$$

#### 3.3 阵列资源消耗分析

对于总线阵列结构而言,若阵列有  $N$  个工作细胞,每个功能块有  $n$  个工作细胞,则阵列中共有  $N/n$  个功能块,每个功能块中的冗余细胞为  $k$ . 则阵列中

冗余的空闲细胞就为  $N/n \times k$  个, 设每个空闲细胞的资源消耗为  $s$ , 针对于工作细胞在工作时涉及到布线资源的消耗等, 设工作细胞的资源消耗为  $(1 + \alpha)s$ ,  $\alpha$  为细胞工作过程中对于其他资源的利用率, 主要由电路设计水平决定, 则整个阵列的资源消耗为  $N/n \times k \times s + N \times (1 + \alpha) \times s$ .

4 总线型细胞阵列中空闲细胞选择分析

总线型细胞阵列结构主要是为了解决大规模或超大规模胚胎电路在功能分化及自修复过程资源消耗大、耗时长和实现困难等问题而设计的, 为研究总线型细胞阵列结构的可靠性分析和资源消耗与冗余细胞数量的关系, 分析研究时取工作细胞的数量不能过小, 利用 Matlab 对功能块内不同冗余细胞数量情况下, 阵列的可靠性和阵列资源消耗进行仿真分析.

4.1 阵列可靠性分析

为了满足分析要求, 选择分析的细胞阵列的工作细胞数为  $N = 10\,000$ , 为了简化阵列内的连接方式选取每个功能块的细胞数  $n = 8$ ,  $\lambda = 1 \times 10^{-6}/\text{h}$ , 则功能块中空闲细胞数  $k$  同阵列中的可靠度的关系如图 8 所示, 每个功能块中的空闲细胞数  $k$  同阵列的可靠性关系如图 9 所示.

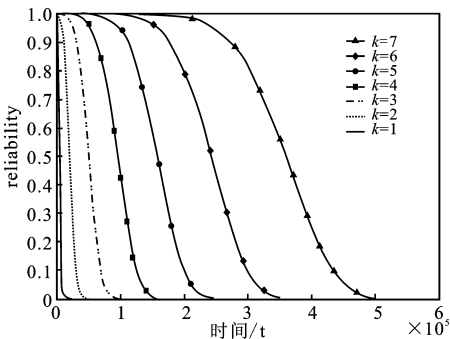


图 8 功能块内不同的空闲细胞设置的可靠度曲线

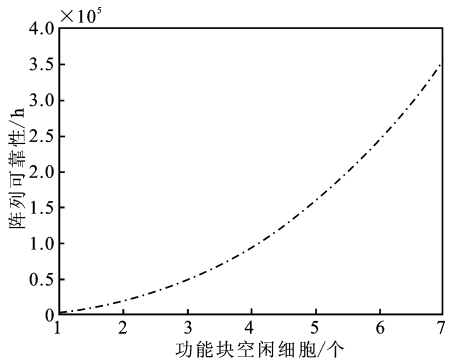


图 9 阵列可靠性曲线

4.2 阵列的资源消耗分析

在总线型细胞阵列结构中, 功能块中空闲细胞

的冗余是阵列资源消耗的重要组成部分, 当工作细胞一定的情况下即对于相同的电路而言, 空闲细胞配置的多少直接关系到资源的消耗. 根据功能块内不同的空闲细胞的设置, 分析阵列的资源消耗. 对于一个含有 10 000 个工作细胞的阵列, 阵列空闲细胞的设置与空闲细胞总数的关系如图 10 所示.

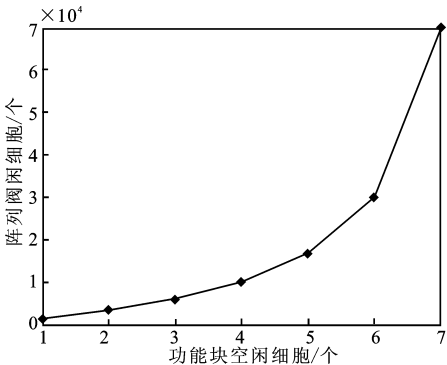


图 10 阵列空闲细胞曲线

仿真结果如表 1 所示, 分析图 9、图 10 和表 1 发现, 随着功能块内空闲细胞数量的增加, 阵列的可靠性和阵列空闲细胞的冗余都在增加. 分析图中曲线各自的变化率, 随着功能块内部空闲细胞的增加, 阵列的冗余空闲细胞数量比阵列的可靠性增长趋势更加明显, 即阵列的资源消耗增长更明显, 由 3.3 节可知阵列的资源消耗与空闲细胞的数量直接相关, 工作细胞相同的情况下, 空闲细胞直接决定了阵列资源消耗. 当空闲细胞为 3 时, 阵列空闲细胞数为 6 000 个, 此时的阵列可靠性为  $5.027\,6 \times 10^4 \text{ h}$ , 阵列的资源消耗为  $1.6 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$ , 当功能块内空闲细胞大于 3 时, 阵列的可靠性也在增加, 但此时阵列冗余的空闲细胞开始不小于阵列的工作细胞, 而且阵列的可靠性开始显著增加. 根据实际功能电路设计对于可靠性的标准可知, 当阵列的可靠性为  $5.027\,6 \times 10^4 \text{ h}$  时, 能够满足阵列的可靠性要求. 经过仿真分析, 对于工作细胞为 10 000 时, 选择功能

表 1 仿真结果统计

| 空闲细胞数<br>$k$ | 阵列 MTTF                | 空闲细胞<br>总数          | 阵列资源<br>消耗                                            |
|--------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| 1            | $4.493\,9 \times 10^3$ | $1.429 \times 10^3$ | $1.143 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$ |
| 2            | $2.050\,1 \times 10^4$ | $3.333 \times 10^3$ | $1.333 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$ |
| 3            | $5.027\,6 \times 10^4$ | $6 \times 10^3$     | $1.6 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$   |
| 4            | $9.481\,3 \times 10^4$ | $1 \times 10^4$     | $2 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$     |
| 5            | $1.563\,1 \times 10^5$ | $1.667 \times 10^4$ | $2.667 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$ |
| 6            | $2.396\,1 \times 10^5$ | $3 \times 10^4$     | $4 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$     |
| 7            | $3.554\,9 \times 10^5$ | $7 \times 10^4$     | $8 \times 10^4 \text{ s} + 10^4 \alpha \text{ s}$     |

块内的空闲细胞数为3,阵列的可靠性完全能够满足要求,而且阵列的资源消耗相对较少。

由上述分析可知,在总线型细胞阵列中空闲细胞数量的选择过程中,可以通过分析阵列的可靠性和资源消耗与功能块中的关系,根据设计的需要,找到满足设计要求的可靠性要求下最少的资源消耗对应的空闲细胞或一定的资源消耗对应的最大可靠性对应的空闲细胞选择。通过分析三者之间的关系,在阵列的可靠性和资源消耗找到平衡点,合理的选择细胞阵列的空闲细胞冗余数量,为实际的电路设计提供相应的指导。

## 5 结束语

胚胎电子细胞阵列是一种新型的仿生电子技术,具有重要的实用价值和经济价值。大规模或超大规模的集成电路是目前电子系统设计的趋势,要将胚胎细胞阵列技术应用于大规模或超大规模电路的设计中,资源消耗问题是一个必须解决的问题。

总线细胞阵列是一种基于功能分解的一种新的细胞阵列结构,通过总线细胞阵列的结构和自修复特点,完成了总线细胞阵列的可靠性和资源消耗的建模分析。通过一个具有10 000个工作细胞的阵列的可靠性与资源消耗同阵列空闲细胞数量选择的分析,总结了一种总线型细胞阵列中空闲细胞的选择方法,兼顾总线细胞阵列的可靠性和资源消耗,该方法对于指导实际功能电路的设计具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 孟田珍. 电子细胞阵列结构研究和数字自修复电路设计[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
- [2] Xu J Q, Dou Y, Lv Q et al. Etissue: a bio-inspired match-based reconfigurable hardware architecture supporting hierarchical self-healing and self-evolution[C] // 2011 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). San Diego, CA, USA: IEEE, 2011:311-318.
- [3] 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.

- [4] Zhu Sai, Cai Jinyan, Meng Yafeng, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2014, 13: 224-232.
- [5] Zhang Zhai, Wang Youren. Method to self-repairing reconfiguration strategy selection of embryonic cellular array on reliability analysis[C]// 2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). Leicester, UK: IEEE, 2014: 225-232.
- [6] 张砦,王友仁. 基于可靠性分析的胚胎硬件容错策略选择方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 236-242.
- [7] Wang Nantian, Qian Yanling, Li Yue, et al. Design method for a multi-layer bio-inspired self-healing hardware[C]// 2014 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan). Zhangjiajie, China: IEEE, 2014: 653-657.
- [8] 林勇, 罗文坚, 钱海等.  $n \times n$  阵列胚胎电子系统应用中的优化设计问题分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(2): 171-176.
- [9] Tempesti G, Mange D, Stauffer, A, et al. The BioWall: an electronic tissue for prototyping bio-inspired systems[C] // Proceedings 2002 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware. Alexandria, VA, USA: IEEE Comput. Soc, Los Alamitos, 2002, 221-230.
- [10] Upegui A, Thoma Y, Satiza'bal H F, et al. Ubichip, Ubidule, and MarXbot: A hardware platform for the simulation of complex systems[C] // 9th International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware, York, UK discipline: Springer-Verlag, 2010: 286-298.

## 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 女, (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.