

# 原核细胞仿生自修复电路设计\*

李岳,王南天,钱彦岭

(国防科技大学装备综合保障技术重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:** 仿生电子阵列是模拟生物体自修复机制,具有在线自修复能力的新型电路。针对基于真核细胞的仿生电子阵列配置存储消耗大等不足,在比较真核细胞、原核细胞基因结构的基础上,提出了一种基于原核细胞的仿生电子阵列结构,设计实现了差分二进制相移键控调制电路,通过仿真验证了该结构的有效性。

**关键词:** 电路设计;原核细胞仿生;自修复;差分二进制相移键控调制电路

**中图分类号:** TP330 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0154-04

## Self-healing circuit design inspired by prokaryotic cell

LI Yue, WANG Nantian, QIAN Yanling

(Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Bio-inspired array is a new type of circuit based on the self-healing mechanism of organism. The current study presents a novel prokaryotic cell-based bio-inspired array structure based on the gene structure of eukaryotic cell and prokaryotic cell. Simulation experiment on designing a self-healing DBPSK circuit is carried out and the result shows that the presented prokaryotic cell-based bio-inspired array structure is effective and consumes less memory storage than the traditional eukaryotic array structure.

**Key words:** circuit design; prokaryotic cell-based bio-inspired; self-healing; Differentially Binary Phase Shift Keying (DBPSK)

提高重要装备中电子系统的可靠性,一般通过关键部件完全备份(如三模冗余<sup>[1]</sup>)来实现,这种做法往往存在环境自适应能力差的问题<sup>[2]</sup>。仿生电子阵列是近年来提出的一种具有类似生物体自诊断、自重构和自修复能力的新型电路,具有高可靠性,良好的环境适应性等优点,在人力不能直接维修或要求高可靠性的航空、航天机载电子设备等领域具有良好的应用前景<sup>[2-4]</sup>。

仿生电子阵列一般是基于真核细胞的仿生,模拟多细胞生物组织发育过程中体现的细胞自复制、自修复能力。这种细胞阵列中,每个细胞都包含有整个阵列的全部配置信息,资源消耗大。本文利用原核细胞结构简单、遗传物质分散的特点,提出并实现了一种新型的细胞电路和阵列结构,拓展了仿生电子阵列的范围,大幅度减少了仿生电子阵列对存储器的消耗,对将仿生电子阵列推向应用,具有一定的意义与价值。

### 1 仿生电子阵列的基本原理

在生物学中,根据细胞在进化中的地位、结构复杂程度可将细胞分为原核细胞和真核细胞<sup>[5]</sup>。

目前,一般的仿生电子阵列都是基于真核细胞的仿生,模拟胚胎的发育过程,故也常称为胚胎电子阵列,最开始是由 Mange 等人提出<sup>[6]</sup>,其基本原理如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

从阵列结构上看,胚胎电子阵列是由阵列细胞组成的均匀二维阵列,每个细胞的硬件结构完全相同,通过冯·诺依曼近邻连接<sup>[8]</sup>形成二维阵列。从细胞内部结构看,细胞内包含一个配置存储模块,用来模拟真核生物细胞的 DNA,存储阵列需实现的功能。类似真核细胞的分裂与分化,电子细胞实现的具体功能由其根据自身位置选择配置存储模块中的一个配置来确定。

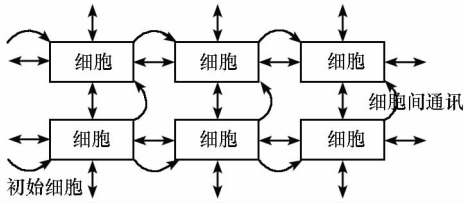
胚胎电子阵列中每个电子细胞都包含有整个阵列的全部配置信息,根据常用的行(列)或单细胞移出自修复机制<sup>[7]</sup>,细胞内的大部分配置信息将不会被使用,存储消耗大。

和真核细胞相比,原核细胞基因少、结构简单,但有形成相互合作群落的能力,如链球菌、四联球菌、八叠球菌、葡萄球菌等<sup>[9]</sup>。基于此,本文借鉴原核细胞的结构特征,设计仿生电子阵列。

\* 收稿日期:2011-12-06

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:李岳(1964—),男,湖南长沙人,教授,博士,博士生导师,E-mail:liyue@nudt.edu.cn



(a) 阵列结构

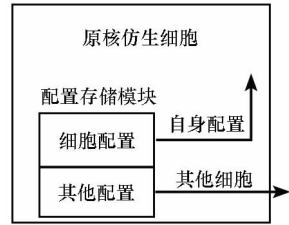


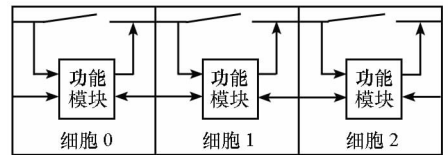
图3 原核仿生细胞配置

Fig. 3 Cell configuration of prokaryotic cell inspired

将图3所示的仿原核电子细胞结构与图2所示的仿真核细胞结构相比,容易看出仿原核电子细胞配置信息要少很多,特别是当阵列细胞数量比较大的时候。假设仿原核电子细胞的其他配置和自身细胞配置数据量相等,如果阵列有10个细胞,则仿真核细胞阵列的配置信息是仿原核细胞阵列的5倍,如果有100个细胞,则是50倍。

### 2.2 阵列设计

如图1所示胚胎电子阵列中,细胞成二维均匀分布,当某细胞故障需要移出时,一般采用整行(列)移出的方式,许多正常细胞被移出。肺炎链球菌分裂沿平面进行,分裂后细胞成链状,借鉴此结构,本设计将阵列设计为链状的一维结构,细胞间依次连接,如图4所示。



(b) 细胞内部结构

图1 仿生电子阵列基本结构

Fig. 1 Basic structure of bio-inspired array

## 2 原核细胞仿生电路设计

### 2.1 细胞配置结构设计

真核细胞包含整个生物体的全部基因,不同细胞根据自身环境表达不同的基因而体现出不同的形态。和真核细胞类似,图1所示基于真核细胞仿生电子阵列的细胞结构中,其配置存储模块包含有整个阵列所有细胞的配置信息,每个细胞根据自身地址选择不同配置信息配置细胞以实现不同功能,其基本原理如图2所示。例如,某细胞的配置存储模块输入地址为 $k$ ,则配置存储模块输出细胞 $k$ 配置作为细胞的自身配置,完成该细胞的功能分化。

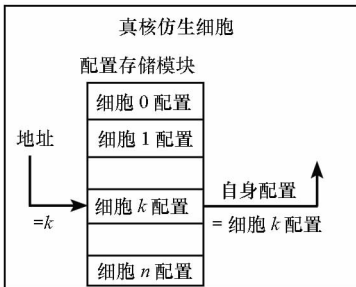


图4 基于原核细胞仿生的链状阵列

Fig. 4 Catenulate array based on prokaryotic cell

另外,设计了可切断的总线结构,既可以满足电路中对远距离信号的传送要求,又实现了总线复用。例如需传递细胞0信号到细胞2,有两种方式。方式1:通过细胞0、1,细胞1、2之间的局部连接经由细胞1传递。方式2:细胞0的总线开关断开,细胞1的总线开关闭合并关闭总线驱动,就可以将信号传到细胞2。如果该信号还要传递给后面的细胞,将细胞2的开关闭合即可。由于细胞0的开关断开,其左边总线还可以用来接收其左侧细胞传来的信号,实现长总线的分段使用。

### 2.3 配置与重构

使用仿生设计的目的是实现电路的自修复,以提高可靠性,故要研究其自修复机制。

图2 真核仿生细胞配置

Fig. 2 Cell configuration of eukaryotic cell inspired

原核细胞内遗传物质则比较少,除了自身生长所需的基因外,仅包含少量用于和周围细胞进

在如图 1 所示的细胞阵列结构中,当某细胞故障后移出,其右侧所有细胞依次完成自身左侧细胞的功能。故在如图 3 所示结构中,在“其他配置”中存储其左侧细胞的配置信息(故下文称“其他配置”为“备份配置”),当细胞故障时发出故障信号,触发其右侧细胞重构,如图 5 所示。

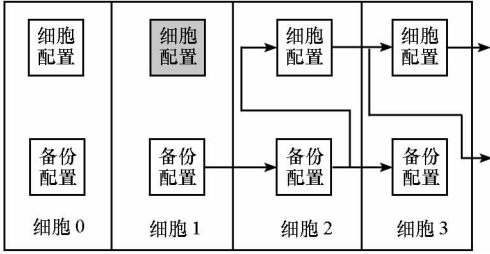


图 5 阵列重构原理

Fig. 5 Reconfiguration principle of the array

某时刻细胞 1 检测到细胞故障,向右发出故障信号。细胞 2 检测到细胞 1 发出的故障信号后,立刻将此信号向后传递给细胞 3,同时开始将其“备份配置”导入其“细胞配置”,并将其“细胞配置”向细胞 3 传递。细胞 3 检测到故障信号后,立刻接收细胞 2 传来的配置信息。故障细胞 1 左侧的细胞 0 则保持不变。

假想阵列最左侧细胞 0 的左侧还有一个虚拟的细胞,让该细胞发出故障信号,就可以利用细胞的自修复机制完成整个阵列的初始化,基本原理如图 6 所示。

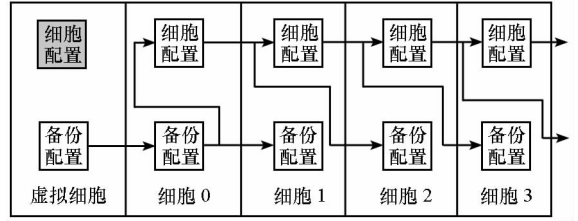


图 6 阵列初始化原理

Fig. 6 Initialization principle of the array

### 3 仿真实验验证

本实验实现一个通信领域的基本模块,差分二进制相移键控调制电路(Differentially Binary Phase Shift Keying, DBPSK)。根据 DBPSK 的基本原理<sup>[10]</sup>,用 Verilog HDL 描述后进行综合,得到如图 7 所示的电路。实现该电路只需要上节中设计的 3 个细胞,这里设计 6 个细胞的链状阵列。将细胞阵列用 Verilog HDL 实现,通过 ISIM 仿真,结果如图 8 所示。

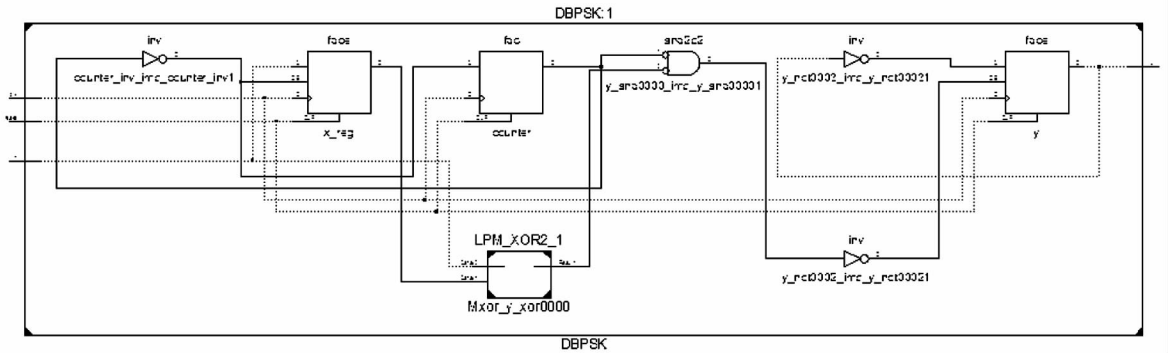


图 7 DBPSK 实现电路

Fig. 7 Realization circuit of DBPSK

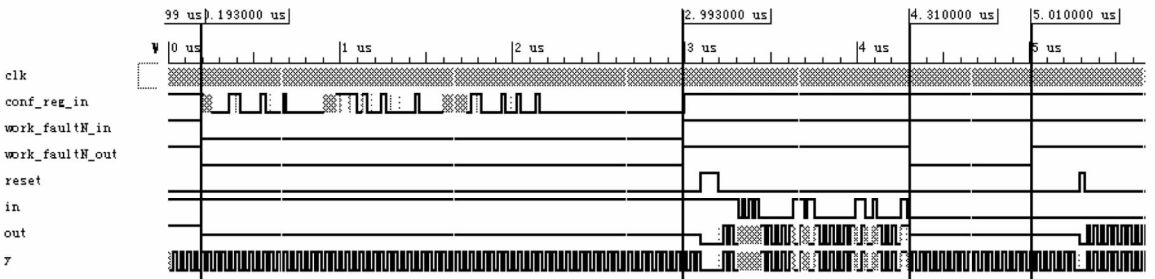


图 8 仿真结果

Fig. 8 Result of simulation

图 8 中,clk 为输入时钟,conf\_reg\_in 为配置输入信息,work\_faultN\_in 为工作/配置控制输入,work\_faultN\_out 为阵列的工作/配置状态输

出,低电平表示阵列处于配置(或重构)状态,高电平则表示工作状态。信号 reset、in、out 分别为细胞阵列实现 DBPSK 的重启、调制输入和调制输

出。信号  $y$  为直接用 DBPSK 模块的输出。

在  $work\_faultN\_in$  的第 1 个下降沿(图中竖线所示的  $0.193\mu s$  时刻),  $work\_faultN\_in$  变为低电平,阵列开始配置,载入  $conf\_reg\_in$  的配置数据,  $work\_faultN\_in$  变为高电平( $2.993\mu s$  时刻)后,阵列开始工作。由于  $work\_faultN\_in$  的配置信号会依次向右传播,故最后一个细胞  $work\_faultN\_out$  输出有一个同样的低电平( $0.193 \sim 2.993\mu s$ )。  $work\_faultN\_out$  的第二个下降沿( $4.31\mu s$ )的出现是因为内部某细胞故障,产生的重构信号依次向右传递,最后从  $work\_faultN\_out$

输出。

如图 9 所示,  $work\_faultN\_out$  为 0 时,阵列处于配置(或重构)状态,  $out$  信号高阻输出(为  $z$ , 如  $\sim 2.993\mu s$ )。每次配置(或重构)后,由于阵列内部信号未知,  $out$  输出不确定(为  $x$ , 如  $2.993 \sim 3.093\mu s$ ),在输入  $reset$  信号( $3.093 \sim 3.193\mu s$ )重启后,  $out$  输出正常( $3.193\mu s \sim$ )。

通过观察图 9 中  $in$ 、 $out$  信号以及比较  $out$ 、 $y$  信号,容易看出该阵列实现了 DBPSK 的功能,且具有一定的自修复能力。

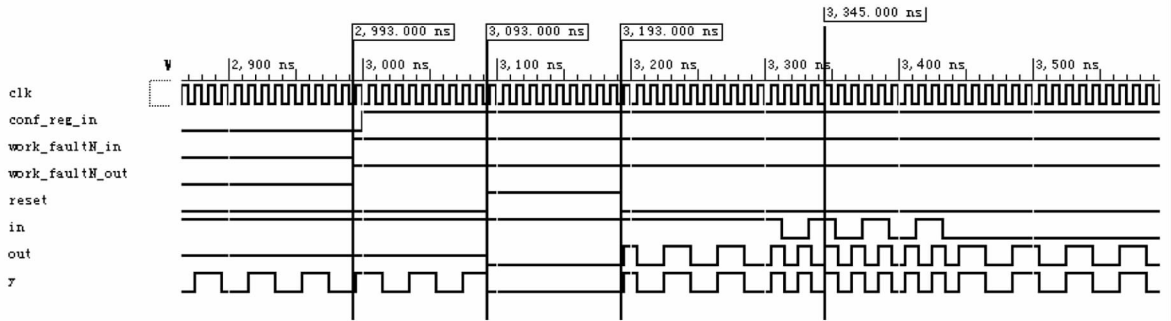


图 9 阵列调制结果

Fig. 9 Result of the array's modulation

## 4 结论与展望

本文以 DBPSK 为对象,提出并实现了一种新型的细胞电路和阵列结构,拓展了仿生电子阵列的范围。仿生电子阵列改变了传统电子系统的电路结构、容错模式以及数字电路系统的设计方法,在航空、航天等重要电子装备(系统)中具有广阔的应用前景。

## 参考文献 (References)

- [1] Kim H, Jeon H J, Lee K. The design and evaluation of all voting triple modular redundancy system[C]// Proceedings of the 2002 Reliability and Maintainability Symposium, 2002: 439 - 444.
- [2] 林勇. 基于进化型硬件的容错方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
LIN Yong. Research fault tolerance methods based on evolvable hardware[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [3] 郑瑞娟, 王慧强. 生物启发的容错计算技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(4): 30 - 34.  
ZHENG Ruijuan, WANG Huiqiang. A survey of bio-inspired fault tolerance computing techniques [J]. Computer Engineering and Technology, 2006, 42(4): 30 - 34. (in Chinese)
- [4] 周贵峰, 钱彦岭, 王南天, 等. 基于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: 61 - 65.

- ZHOU Guifeng, QIAN Yanling, WANG Nantian, et al. Design and simulation of FIR filters based on embryonic bio-inspired hardware architecture [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24: 61 - 65. (in Chinese)
- [5] 刘艳平, 沈嫄芳, 韩凤霞. 医学细胞生物学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2001.  
LIU Yanping, SHEN Yunfang, HAN Fengxia. Medical cell biology[M]. Changsha: Center South University Press, 2001. (in Chinese)
- [6] Mange D, Sanchez E, Stauffer 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) Systems, 1998, 6(3): 387 - 399.
- [7] 周贵峰. 基于胚胎型细胞电路的 FIR 滤波器仿生自修复技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
ZHOU Guifeng. Research on bio-inspired self-repairing technique of FIR filter via embryonic circuit[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] Wolfram S. Theory and applications of cellular automata[C]// World Scientific, 1986.
- [9] 周长林, 查永喜, 徐旭东, 等. 微生物学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2003.  
ZHOU Changlin, ZHA Yongxi, XU Xudong, et al. Microbiology [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 田云, 徐文波, 张延伟. 无线通信 FPGA 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
TIAN Yun, XU Wenbo, ZHANG Yanwei. Wireless communication FPGA design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)