

## 用于胚胎电子阵列的实验系统

朱 赛, 蔡金燕, 孟亚峰, 李丹阳, 孟田珍  
(军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 胚胎电子阵列是新兴的研究方向, 基于胚胎电子阵列实现的电路具有与生物类似的自修复、自组织等能力。当前研究多限于软件仿真, 缺少相应的实验系统。设计了实验系统体系框架和电子细胞模拟模块结构并进行了实现, 多块细胞模拟模块组成胚胎电子阵列, 与外部的信号发生器、逻辑分析仪等仪器连接, 构成胚胎电子阵列的实验系统。基于该实验系统进行了某胚胎电子阵列上目标电路的实现, 实验表明, 实验系统能够验证胚胎电子阵列功能, 并能够监测阵列中关键信号, 为研究阵列结构及自修复机制提供了硬件实验条件, 具有很大的实际意义。

**关键词:** 胚胎电子阵列; 实验系统; 电子细胞模拟模块; 自修复

**中图分类号:** V271.4; TP302.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0070-05

## An Experiment System for Embryonics Array

ZHU Sai, CAI Jin-yan, MENG Ya-feng, LI Dan-yang, MENG Tian-zhen

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

**Abstract:** Embryonics array is an emerging research directions, and the circuit implemented on embryonics array has self-repair and self-organization ability similar to biology. Current research mainly focuses on software simulation rather than the appropriate experiment system. An experiment system was designed for electronics array, which provide a hard platform for the research of embryonics array and self-repair circuit. The embryonics array's framework and electronic cell simulate module's structure were designed and the experiment system was realized. The experiment system is composed of the embryonics array made up of multiple electronic cell simulate modules, the signal generator, and logic analyzer. A target circuit based on a certain embryonics array was carried out on the experiment system. The result shows that the experiment system can verify the function of the embryonics array, and monitor the key signals in the array. The experiment system provides a hard platform for the research of embryonics array and self-repair mechanism, which has great practical significance.

**Key words:** embryonics array; experiment system; electronic cell simulate module; self-repair

### 0 引言

胚胎电子阵列是一种新型的仿生电子硬件, 基于该硬件实现的目标电路具有自修复能力, 能够大大提高电子系统的可靠性。

现有文献以高可靠性电子系统的实现为目标, 对胚胎电子阵列中的电子细胞结构、阵列结构及自修复机制进行了深入、广泛的研究, 提出了多种胚胎电子阵列结构及其自修复方法, 但研究中以软件仿真为主, 具体的硬件实验及实现较少。软件仿真虽然一定程度上

能够对细胞结构、阵列结构及自修复机制进行验证, 但仍有一定的局限性, 并不能反映硬件运行中的全部信息, 与硬件的实际运行存在一定差距。

本文设计并实现了用于胚胎电子阵列的实验系统, 该系统可用于任意电子细胞结构、胚胎阵列结构和多种自修复机制的实验, 为胚胎电子阵列的研究提供了实验平台, 向实用化研究迈进了坚实的一步。

### 1 胚胎电子阵列

#### 1.1 基础知识

胚胎电子学最先是由 DE GARIS H 作为一种新的仿生硬件提出的<sup>[1]</sup>, 其灵感取自于多细胞生物体结构和胚胎发育过程, 即多细胞生物发育过程中, 每个细胞根据它在胚胎内的位置表达特定基因而实现特定功能。每个细胞拥有一份完整的 DNA, 具有“通用性”,

收稿日期: 2014-09-30 修回日期: 2014-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61372039)

作者简介: 朱 赛(1987—), 男, 河南周口人, 博士生, 研究方向为仿生电子系统、电子系统自修复设计。

当生物体中某一个细胞生病时,将自身的基因表达信息传递给空闲细胞,让空闲细胞替代完成自己的功能,从而保持生物体的正常活动。

胚胎电子阵列是由内部结构相同的电子细胞排列而成的均匀二维阵列,是一种具有自检测、自修复和自复制能力的生物启发式仿生硬件,其结构如图1所示。每个电子细胞都是具有一定数据处理能力的逻辑单元,由地址产生器、基因库、I/O单元、逻辑单元和内建测试(Built-In Test, BIT)模块组成。地址产生器用来计算细胞在电路中的位置,产生细胞在电路中的唯一标识,通过该标识细胞表达对应的基因,从而执行特定的功能和连接;基因库用来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;I/O单元进行细胞与周围细胞的信息交互,其连接方式受表达基因控制;逻辑单元执行细胞的逻辑功能,根据细胞表达基因,可以执行不同的逻辑功能;BIT模块在细胞运行过程中实时检测细胞状态。

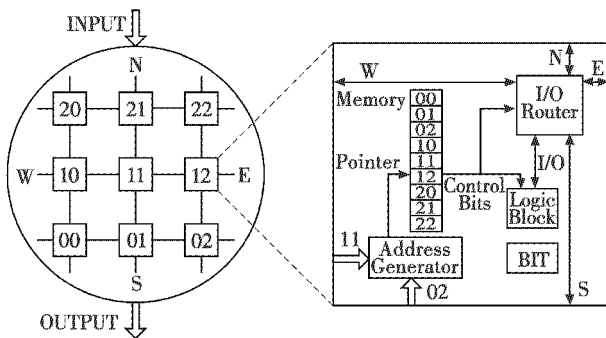


图1 胚胎电子阵列基本结构

Fig. 1 Basic structure of embryonic array

运行过程中,细胞内的BIT模块实时检测细胞状态,检测到细胞故障时,将对外发出“故障”信号触发自修复机制,将故障细胞从阵列中移除。剩余细胞重新计算坐标并表达相应基因,执行新的细胞功能及连接,维持原阵列功能,完成胚胎电子阵列上目标电路的自修复。

## 1.2 主要研究方向及进展

经过20多年的研究,在国内外学者的一致努力下,胚胎电子阵列的研究有了很大进步。当前主要研究方向为电子细胞结构、胚胎电子阵列结构及自修复机制的设计。

电子细胞是胚胎电子阵列的基本单元。自胚胎电子系统提出以来,电子细胞结构就是学者们的研究重点。文献[2]在胚胎电子系统思想下,提出了经典的电子细胞结构,主要由基因存储、地址产生器、I/O、逻辑块组成,该结构成为后续研究的基础;文献[3]使用分子对电子细胞结构进行细化,但其所设计分子结构

与电子细胞基本结构相似,只是概念上的不同,并没有扩展电子细胞的内涵;文献[4]提出一种蜂窝状电子细胞结构,每个细胞包含控制单元和执行单元两部分;文献[5]提出一种电子DNA的新型电子细胞结构;文献[6]提出原核电子细胞,降低了细胞内基因存储所需空间。

但当前电子细胞结构并不能达到存储、自检消耗的最优和自检覆盖率的最大化,为了提高胚胎电子阵列的最终使用,电子细胞结构特别是其内部的基因存储模块、自检模块还有待研究。

胚胎电子阵列结构是另一个研究重点,阵列结构决定了阵列上目标电路的实现及自修复方式。学者提出了多种阵列结构,如经典的阵列结构<sup>[2]</sup>、POE结构<sup>[7]</sup>、免疫-胚胎结构<sup>[8]</sup>、蜂窝形阵列结构<sup>[4]</sup>、电子组织<sup>[9]</sup>、SABRE结构<sup>[6,10]</sup>及其他结构<sup>[11-12]</sup>,从生物系统的各个角度对胚胎电子阵列进行了仿生设计。

如何模拟生物系统的自组织、自修复过程,在电子细胞、阵列结构的基础上设计自修复机制,也是研究重点。学者提出经典的自修复方法主要由行/列移除自修复和细胞移除自修复<sup>[13]</sup>,在经典自修复方法的基础上,又研究了其他的自修复方法,如免疫修复<sup>[14]</sup>、同类细胞替换和异类细胞转化相结合修复<sup>[9]</sup>、总线细胞移除及重利用<sup>[10]</sup>、相邻细胞替换<sup>[12]</sup>等自修复方法。

## 2 实验系统需求分析

作为一个完整的实验系统,应该能够对胚胎电子阵列研究过程中的各个环节进行试验、验证。通过1.2节分析可知,所设计实验系统需要具有以下4种能力。

### 1) 对电子细胞结构、功能验证能力。

随着研究的不断进行,在生物细胞结构的启发下,研究者设计出越来越多的电子细胞结构,试验系统应该能够对现有的、未来可能出现的各种电子细胞结构及其功能进行验证,即系统中电子细胞的功能、结构应该是可变的,可以模拟多种电子细胞结构、功能。

### 2) 具有阵列结构验证能力。

阵列结构是当前研究的重要方向,所设计的实验系统应该具备对各种电子细胞阵列结构进行验证的能力,即试验系统中各电子细胞的连接方式是灵活的,可以根据不同的实验对象设置电子细胞间的连接,能够实现各种连接方式。

### 3) 自修复能力验证。

对于胚胎电子阵列上的目标电路,试验系统应该具有对其自修复机制及自修复能力进行验证的能力。首先,所设计的实验系统具有故障注入能力,即能够对阵列中的电子细胞注入不同类型的故障;其次,实验系

统应该能够执行所设计的自修复机制,对故障电路进行自修复。

#### 4) 目标电路运行及状态监测能力。

胚胎电子阵列的各种研究内容需要通过目标电路的具体实现进行验证。实验系统应该能够提供目标电路运行时所需的输入信号,即应该具有信号产生能力。胚胎电子阵列上实现的电路为数字电路,其输入、输出信号均为数字信号,则实验系统应该具有产生各种数字信号(包括组合信号和时序信号)的能力。

为了验证电路的自修复能力,需要分析电路的输入、输出及关键过程信号,如细胞故障信号、列移除信号等,在电路运行过程中,实验系统应该具备多信号监测能力,同时监测、记录研究者所关心的各路信号,以便进一步的分析。

### 3 实验系统设计与实现

在2节实验系统需求分析的基础上,对实验系统整体框架及其中的电子细胞模拟模块结构进行了设计,并采用具体的器件、设备对实验系统进行了实现。

#### 3.1 系统设计

为了满足2节中的需求1),对任意结构的电子细胞进行模拟,并且能够进行电子细胞间的多种互联方式,系统中以电子细胞为最小单元,设计细胞模拟模块,每个细胞模拟模块具有丰富的外部接口,通过接口间的连接实现各种阵列结构。以细胞模拟模块为基本单元所设计的实验系统结构如图2所示。

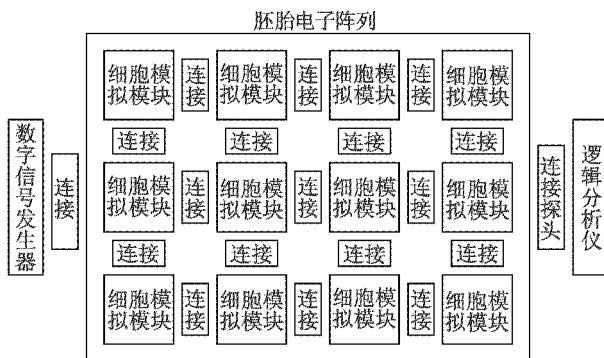


图2 实验系统结构框图

Fig. 2 Framework of experiment system

由图2可以看出,试验系统主要由细胞模拟模块、数字信号发生器和逻辑分析仪组成。细胞模拟模块通过连接组成胚胎电子阵列,数字信号发生器产生目标电路所需输入,逻辑分析仪对电路的输入、输出及过程信号进行监测。

为了达到对各种细胞结构的可编程实现,以FPGA为主要器件对细胞模拟模块进行了电路设计,设计结构如图3所示。

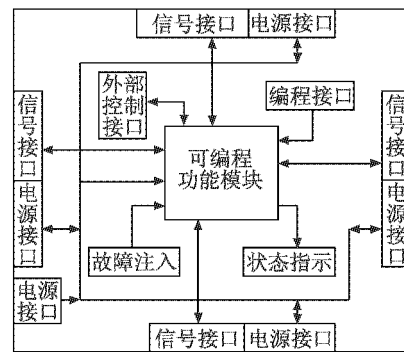


图3 电子细胞模拟模块结构

Fig. 3 Structure of electronic cell simulation module

电子细胞模拟模块主要由可编程功能模块、故障注入、状态指示、I/O接口(图3中各信号接口)、编程接口和电源接口组成。可编程功能模块是细胞模拟模块的主要部分,用于实现电子细胞结构及功能,该模块具有可编程功能,通过编程可模拟实现各种结构的电子细胞;故障注入用于电子细胞故障设置,通过该模块,实验者可向电子细胞手工注入各类故障,以此检验电子细胞对各类故障的处理结果及阵列的修复结果;状态指示主要用于细胞工作状态信息显示,以便实验者对电路运行状态及自修复过程的观察;I/O接口分为细胞间I/O接口和外部控制I/O接口,细胞间I/O接口用于电子细胞与其他细胞间的连接、通信,通过编程,各I/O接口可模拟实现电子细胞的各种通信方式,并向外传送各种细胞信号,外部控制I/O接口为外部控制预留接口,当需要外部控制器对电子细胞进行控制时,可通过该接口进行;编程接口用于整个模块的配置,通过该接口对可编程功能模块进行编程;电源接口为整个模块提供工作电源,分为单独电源接口和细胞间电源接口两种形式,单独电源接口直接连接外部电源为模块供电,而细胞间电源接口用于细胞与其周围邻居间电源传输,通过该接口可完成整个阵列中所有电子细胞的供电。

#### 3.2 试验系统的实现

在3.1节设计的基础上,对电子细胞模拟模块进行了实现,并选用数字信号发生器和逻辑分析仪搭建的胚胎电子阵列实验系统,如图4所示。



图4 胚胎电子阵列试验系统

Fig. 4 Experiment system for embryonics array

系统中的数字信号发生器采用数字 I/O NI PXI-6541,最大可产生 32 路数字信号,50 MHz 时钟,既可以每路信号单独程控,又能够进行多路信号的同时产生,通过编程控制,可产生丰富多样的数字信号,能够满足一般数字电路的输入需要;采用逻辑分析仪 Agilent 1693AD 监测目标电路中的各种信号,1693AD 最多可同时监测 32 路数字信号,具有多种监测模式,可同时监测胚胎电子阵列中多个电子细胞的输入、输出、状态及控制信号,记录信号各时刻状态及不同信号间的逻辑、时序关系。

选用 Xilinx 的 Spartan XC3S500E FPGA 芯片、XCF04S FLASH 存储芯片和 50 MHz 晶振设计 FPGA 最小系统,实现可编程功能模块。Spartan XC3S500E FPGA 芯片选用 QFP208 封装,其最大可用 I/O 数目为 158,设计中 128 位 I/O;4 位 I/O 用于故障注入;4 位 I/O 用于状态指示;细胞 I/O 接口使用  $28 \times 4 = 112$  位 I/O,电子细胞模拟模块四周的 I/O 接口均为 28 位。使用 4 位拨码开关进行电子细胞的故障注入,根据不同码值注入不同类型的故障,最大可支持 15 种故障模式。使用 4 个 LED 进行电子细胞运行状态的显示,通过不同的 LED 组合,最多可显示 16 种状态,故障注入和状态显示数目能够满足各种实验需要。基于以上器件所实现的电子细胞模拟模块如图 5 所示。

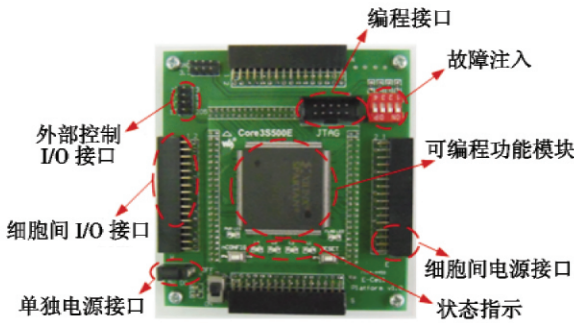


图 5 电子细胞模拟模块的实现

Fig. 5 Realization of cell simulation module

实验系统中,通过增减细胞模拟模块的数目可组成任意规模的胚胎电子阵列。

### 4 实验验证及分析

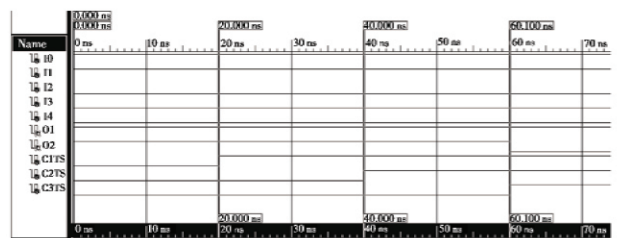
对于某胚胎电子阵列结构<sup>[15]</sup>,在该实验系统上进行自修复实验,实验中以 ISCAS'89 中的 C17 电路为目标电路。该电路功能只需要两个细胞便可实现,为了验证阵列的自修复能力,阵列规模设置为  $2 \times 3$ 。

首先在 Xilinx ISE Design Suite 12.2 中采用待实验的电子细胞结构对 C17 电路进行仿真实现,并使用 Xilinx 仿真软件 ISim M63c 进行电路的仿真。仿真过程中为了便于观测自修复过程,将输入信号设置为固

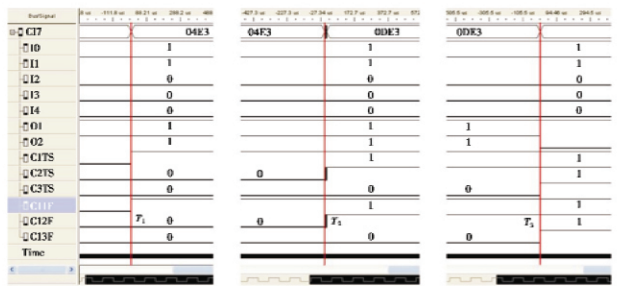
定信号,分别在 20 ns,40 ns 和 60 ns 向阵列中(1,1), (1,2),(1,3)位置细胞注入故障,并监测电路的输入 I0,I1,I2,I3,I4,输出 O1,O2 及细胞阵列中各列细胞列移除信号 C1TS,C2TS,C3TS,仿真结果如图 6a 所示。

使用本文设计的电子细胞模拟模块搭建规模为  $2 \times 3$  的胚胎电子阵列,通过编程接口将待实验的电子细胞下载到阵列中的各细胞模拟模块,利用数字信号发生器产生与仿真中相同的电路输入信号,逻辑分析仪监测电路的输入、输出、各列细胞列移除信号及(1,1),(1,2),(1,3)位置细胞故障信号。运行过程中通过细胞模拟模块的故障注入接口分别对(1,1),(1,2),(1,3)位置细胞注入固定 0 故障,使用逻辑分析仪分别记录 3 次故障注入过程,将 3 次记录进行整理,其结果如图 6b 所示。由于 3 次故障注入的监测信号分别单独记录,3 次记录间的时间尺度并不存在关系,图 6b 顶部的时间刻度并不矛盾。

在仿真和实验运行过程中,当向(1,1)细胞注入故障时,如图 6a 中 20 ns 和图 6b 中的  $T_1$  时刻,由于列移除机制,该列细胞的移除信号 C1TS 变为高,第一列细胞被移除,由第二列细胞执行电路功能,电路输出正常;在 40 ns 和  $T_2$  时刻向(1,2)细胞注入故障时,第二列细胞的移除信号 C2TS 有效,第二列细胞功能被移除,由阵列中的第三列细胞执行电路功能,电路输出正常;60 ns 和  $T_3$  时刻向(1,3)细胞注入故障时,第三列细胞被移除,阵列中没有冗余的细胞列执行电路功能,电路故障,其输出错误。可以看出,图 6a、图 6b 结果完全相同,实验系统可以正确执行电路的自修复,并记录其自修复过程中的关键信号。



a 仿真结果



b 实验系统运行结果

图 6 C17 电路仿真与实验结果

Fig. 6 Simulation and experiment result of C17

实验系统运行过程中,细胞模拟模块的状态指示能够显示细胞当前状态:第3个LED指示细胞是否正常,第4个LED指示细胞是否被移除。C17运行及故障注入过程中,阵列状态如图7所示。可以看出,正常运行时,阵列中所有细胞正常,细胞的第3个LED指示其正常状态,如图7a所示; $T_1$ 时刻向(1,1)细胞注入故障时,第一列细胞被移除,该列细胞的第4个LED显示了其移除状态,如图7b所示; $T_2, T_3$ 时刻分别对(1,2),(1,3)细胞注入故障时,对应列细胞状态都能通过指示LED正确显示细胞状态,如图7c、图7d所示。

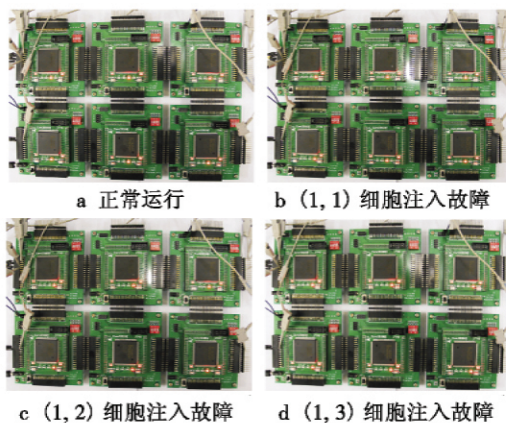


图7 胚胎电子阵列运行状态

Fig.7 Running states of embryonic array

由图6所示的仿真、实验结果及图7所示的胚胎电子阵列运行状态可以看出,对于特定的细胞结构,实验系统能够正确执行其功能,能够产生执行过程中所需的输入信号、监测记录运行中的过程信号,并通过细胞模拟模块的状态指示直观地显示功能执行过程。

该实验系统采用细胞模拟模块作为基本单元,通过增加细胞模拟模块的数目,可构建任意规模的胚胎电子阵列,运行不同规模的目标电路。细胞模拟模块可通过编程配置功能模拟任意I/O数目不大于112的电子细胞结构,且电子细胞间连接灵活,能够组成各种结构的胚胎电子阵列。

## 5 结束语

本文在分析胚胎电子阵列当前研究进展及研究方向的基础上,进行了试验系统需求分析,设计了试验系统体系框架和细胞模拟模块结构,最终实现了该实验系统,并以某胚胎电子阵列结构为例,对实验系统进行了应用分析。

经过初步应用可以看出,该实验系统能够满足任意细胞结构、阵列结构和自修复机制的实验需求,为胚胎电子阵列上目标电路提供输入数字信号,并监测目标电路及胚胎电子阵列的状态、控制信号,为研究者验

证、分析、改进阵列结构及自修复提供了硬件条件,也为胚胎电子阵列的研究提供了硬件实验平台,具有很大的实际意义。

## 参考文献

- [1] DE GARIS H. Genetic programming: Artificial nervous systems, artificial embryos and embryological electronics [C]//Proceedings of the 1st Workshop on Parallel Problem Solving from Nature, 1990:117-123.
- [2] SANCHEZ C O, TYRRELL A M. Fault-tolerant systems: The way biology does it! [C]//Proceedings of the 23rd Euromicro Conference on New Frontiers of Information Technology Short Contributions, 1997:146-151.
- [3] CANHAM R, TYRRELL A M. An embryonic array with improved efficiency and fault tolerance[C]//Proceedings of NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, 2003: 265-272.
- [4] TYRRELL A M, SUN H. A honeycomb development architecture for robust fault-tolerant design [C]//Proceedings of the First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS 2006), 2006:281-287.
- [5] BOESEN M R, MADSEN J. eDNA: A bio-inspired reconfigurable hardware cell architecture supporting self-organisation and self-healing [C]//Proceedings of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS 2009), 2009:147-154.
- [6] SAMIE M, DRAGFFY G, TYRRELL A M, et al. Novel bio-inspired approach for fault-tolerant VLSI systems[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 21(10):1-14.
- [7] THOMA Y, TEMPESTI G, SANCHEZ E, et al. POEtic: An electronic tissue for bio-inspired cellular applications[J]. Biosystem, 2004(76):191-200.
- [8] CANHAM R O, TYRRELL A M. A hardware artificial immune system and embryonic array for fault tolerant systems [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2003(4):359-382.
- [9] 徐佳庆, 窦勇, 吕启, 等. 电子组织: 一种具有自适应能力的可重构仿生硬件结构[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(9):2005-2017. (XU J Q, DOU Y, LÜ Q, et al. eTissue: An adaptive reconfigurable bio-inspired hardware architecture [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(9):2005-2017.)
- [10] BREMNER P, LIU Y, SAMIE M, et al. SABRE: A bio-inspired fault-tolerant electronic architecture [J]. Bioinspiration and Biomimetics, 2013(8):1-16.

- (ZHENG Z M, LI J Y. Research on the demand principle for spare part of warship equipment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(2):104-107.)
- [12] 李保华, 杨云. 备件需求预测模型研究[J]. 航空维修与工程, 2008(5):59-61. (LI B H, YANG Y. The study on demand forecasting model of spare parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(5):59-61.)
- [13] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4):311-314. (XU Z S. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgment matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4):311-314.)
- [14] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1):44-47. (CHEN H Y, ZHAO J B. Research on compatibility of fuzzy judgment matrices [J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(1):44-47.)
- [15] ZHOU M L. Principles and practice of similarity system theory [J]. International Journal of General Systems, 1994, 23(1):39-48.
- [16] SNEATH P, SOKAL R. 数值分类学[M]. 赵铁桥, 译. 北京: 科学出版社, 1984. (SNEATH P, SOKAL R. Numerical taxonomy [M]. Translated by ZHAO T Q. Beijing: Science Press, 1984.)
- [17] 王浣尘. 可行性研究和多目标决策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. (WANG H C. The feasibility study and multi-objective decision [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.)
- [18] RAUSAND M. 系统可靠性理论: 模型、统计方法及应用 [M]. 2 版. 郭强, 王秋芳, 刘树林, 译. 北京: 国防工业出版社, 2010. (RAUSAND M. System reliability theory: Models, statistical methods, and applications [M]. 2nd ed. Translated by GUO Q, WANG Q F, LIU S L. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)

(上接第 56 页)

- [3] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007. (LIU J Y. The principle and methodology of satellite navigation [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.)
- [4] 杨静, 张洪钺, 朱士青. 基于伪距、伪距率的 GPS/SINS 容错组合导航系统 [J]. 航天控制, 2003, 21(3):17-25. (YANG J, ZHANG H Y, ZHU S Q. An GPS/INS integrated navigation system based on pseudo-range and pseudo-range rate [J]. Aerospace Control, 2003, 21(3):17-25.)
- [5] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. (QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Kalman filter and principle of integrated navigation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)

(上接第 74 页)

- [11] KIM S, CHU H, YANG I, et al. A hierarchical self-repairing architecture for fast fault recovery of digital systems inspired from paralogous gene regulatory circuits [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 20(12):2315-2328.
- [12] YANG I, JUNG S H, CHO K H. Self-repairing digital system with unified recovery process inspired by endocrine cellular communication [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2013, 21(6):1027-1040.
- [13] ORTEGA-SANCHEZ C, MANGE D. Embryonics: A bio-inspired cellular architecture with fault-tolerant properties [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2000, 1(3):187-215.
- [14] SZASZ C, CHINDRIS V. Self-organizing and fault-tolerant behaviors approach in bio-inspired hardware redundant network [C] // Processing of 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2010:37-42.
- [15] ZHU S, CAI J Y, MENG Y F, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2014, 13:224-232.



请扫描二维码  
关注我刊

