

胚胎型

仿生自修复技术

Embryonic Bio-inspired Self-healing Technology

李岳 钱彦岭 等编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

胚胎型仿生自修复技术

Embryonic Bio - inspired Self - healing Technology

李岳 钱彦岭 卓清琪 王南天 李廷鹏 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

内容简介

本书首先介绍了胚胎型仿生自修复硬件的研究现状与发展趋势,然后分别从原核和真核两个方面对仿生自修复硬件涉及的生物学原理进行了研究探讨,以此为基础,重点论述了胚胎仿生自修复硬件的基本原理和硬件结构,并分别以 4×4 的乘法器、FIR 滤波器和模糊控制器为对象,研究了基于FPGA的仿生自修复硬件、真核仿生阵列和内分泌仿生阵列的设计和实现方法。

本书适合于电子系统设计人员及相关研究人员阅读,也可作为电子系统设计、微电子与纳米技术、可靠性设计与维修工程等相关专业研究生和高年级本科生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

胚胎型仿生自修复技术 / 李岳等编著. —北京:

国防工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-118-09053-6

I. ①胚… II. ①李… III. ①电子电路—电路设计—
仿生 IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第100434号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张6 字数166千字

2014年8月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

当前,电子系统广泛应用于各行各业,成为了生产、生活不可或缺的重要组成部分。随着电子系统的日益复杂,容错能力已经成为衡量系统性能的一个重要指标。为了保证电子系统的可靠性,传统的做法是对关键部件进行功能冗余,但功能冗余存在容错能力受限和环境适应性较差等不足。胚胎电子阵列是在借鉴生物体发育分化机制的基础上提出的一种新型电子阵列结构,阵列容错由细尺度上的电子细胞分布式自发完成,容错能力更强,环境适应性更好,从而提高电子系统的可靠性提供了一种新的方法。现阶段,关于胚胎电子阵列的研究正方兴未艾,本书在总结国内外相关研究成果的基础上,结合本单位近年来的研究积累编著而成,旨在抛砖引玉,为相关领域的研究人员提供借鉴和参考。

本书共 5 章:第 1 章介绍仿生自修复硬件的研究背景、基本框架,阐述胚胎型仿生自修复硬件的研究现状与发展趋势;第 2 章介绍生物的基本分类以及生物体自修复的 4 个层次,分别从原核和真核两个方面,对仿生自修复硬件可能涉及的生物学基本原理进行了介绍;第 3 章介绍仿生自修复硬件的基本原理,主要包括仿生自修复模型、仿生自修复硬件的基本体系结构、故障检测方法的基本原理,讨论仿生自修复硬件的自修复机制;第 4 章介绍仿生阵列的基本结构,阐述几种功能模块的实现结构、布线资源的结构以及配置存储模块、地址模块、自检模块等一些常见模块的基本结构;第 5 章以 4×4 的乘法器为例介绍基于

FPGA 的仿生自修复硬件的设计方法,详细讨论基于真核仿生阵列的 FIR 滤波器和基于内分泌仿生阵列的模糊控制器的设计。

鉴于理论水平和学识有限,书中难免有错误或不当之处,恳请读者批评指正。

作者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 仿生硬件的基本框架	3
1.2.1 P 轴:进化硬件	4
1.2.2 O 轴:复制与再生硬件	5
1.2.3 E 轴:后天学习硬件	6
1.2.4 混合 POE 硬件	7
1.3 胚胎型仿生自修复硬件的研究现状与发展趋势	8
1.3.1 胚胎电子细胞的结构设计	10
1.3.2 胚胎电子阵列的发育与自修复	11
1.3.3 胚胎电子阵列的应用	12
1.4 全书组织结构	13
第2章 仿生自修复硬件生物学基础	15
2.1 生物系统的分类与修复层次	15
2.1.1 生物的分类	15
2.1.2 生物体的修复层次	16
2.2 原核生物系统	17
2.2.1 原核细胞及其结构	18
2.2.2 原核生物的遗传物质及其特性	19
2.2.3 原核细胞群落及相互作用	25
2.2.4 细菌耐药性的形成	26
2.3 真核生物系统	28

2.3.1	真核细胞及其结构	29
2.3.2	生物体的发育	32
2.3.3	生物细胞的通信	33
2.3.4	生物体的自修复	35
2.3.5	生物体的内分泌系统	40
2.4	本章小结	41
第3章	仿生自修复硬件基本原理	42
3.1	仿生自修复模型	42
3.1.1	真核仿生模型	43
3.1.2	原核仿生模型	48
3.1.3	内分泌仿生模型	54
3.2	仿生自修复硬件的体系结构	58
3.2.1	网状结构	58
3.2.2	总线结构	61
3.2.3	复合结构	62
3.3	仿生自修复硬件的故障自检测方法	65
3.3.1	模块多模冗余	65
3.3.2	关键信息编码冗余	67
3.3.3	对称自检测	69
3.3.4	细胞互检	71
3.4	仿生自修复硬件的自修复机制	72
3.4.1	单细胞移除机制	73
3.4.2	列(行)移除机制	74
3.4.3	细胞移除机制	74
3.4.4	Szasz 移除机制	76
3.4.5	Lala 移除机制	77
3.4.6	复合移除机制	77
3.4.7	自修复机制的可靠性分析	78
3.5	仿生自修复硬件的实现方法	82

3.5.1	专用芯片的实现	82
3.5.2	基于可编程逻辑器件的实现	86
3.6	本章小结	88
第4章	仿生自修复硬件的基本结构	90
4.1	仿生电子阵列结构	90
4.1.1	真核仿生阵列结构	90
4.1.2	原核仿生阵列结构	95
4.1.3	内分泌仿生阵列结构	97
4.2	功能模块结构	102
4.2.1	基于 MUX 的基本结构	102
4.2.2	基于 MUX 的对称自检结构	103
4.2.3	基于 LUT 的基本结构	104
4.3	输入输出模块结构	109
4.3.1	传统输入输出模块结构	110
4.3.2	链状结构布线资源	110
4.3.3	对称布线连接	111
4.3.4	内分泌细胞输入输出模块结构	116
4.4	配置存储模块结构	117
4.4.1	基于查找表结构	117
4.4.2	基于移位寄存器结构	118
4.5	其他常见模块结构	121
4.5.1	地址模块基本结构	122
4.5.2	基于扩展海明码的自检模块结构	123
4.6	本章小结	124
第5章	仿生自修复硬件的设计与实现	125
5.1	基于 FPGA 的仿生自修复乘法器	125
5.1.1	基于 FPGA 的仿生自修复硬件实现步骤	125
5.1.2	乘法器详细设计步骤与结果分析	129

5.1.3	基于原核仿生阵列的乘法器	135
5.2	基于真核仿生阵列的 FIR 滤波器.....	141
5.2.1	FIR 滤波器及其实现结构	142
5.2.2	FIR 滤波器的仿生电子阵列实现基础	146
5.2.3	仿生自修复 FIR 滤波器设计	150
5.2.4	仿生自修复 FIR 滤波器仿真与验证	156
5.3	基于内分泌仿生阵列的模糊控制器.....	159
5.3.1	一级直线型倒立摆建模	159
5.3.2	仿生自修复模糊控制器设计及实现	162
5.3.3	模糊控制器仿真验证	169
5.3.4	模糊控制器实验验证	171
5.4	本章小结.....	176
参考文献.....		177

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着科学技术迅猛发展和信息时代的到来,电子系统已广泛应用于各行各业,成为了生产、生活不可或缺的重要组成部分。然而,电子系统投入使用以后,在各种复杂环境应力的作用下,总会产生性能退化、突发性故障或暂态故障。为保持系统的可用性,系统的可靠性和容错能力就非常重要。随着系统复杂度的提高,可靠性和容错能力的要求也越来越高。对工作在特殊环境下的航空航天机载电子系统,这种需求更加迫切。

传统上,一般采用多模冗余容错机制来保证电子系统的可靠性。通过事先的故障模式分析,对其关键构成部件进行冗余配置,当故障发生时,通过一定故障诊断手段,实时检测故障,并对故障部件进行及时切换,从而保证系统正常运行。对某些特殊场合中的电子设备,如航天电子产品,由于空间射线干扰及装备长时间运行引起老化等因素的存在,故障发生的随机性增强,采用冗余容错机制就会存在一些问题,主要表现在以下几个方面^[1, 2]:

(1) 资源开销。受装备体积限制,不可能对所有部件进行冗余配置,一般只考虑关键部件的备份。当其他部件发生故障时,容错机制就不起作用。如果对关键部件界定不清楚,该冗余的地方没有冗余,就有可能发生严重后果。

(2) 容错性能受故障检测能力限制。对冗余机制来讲,系统的容错能力取决于系统的故障检测和诊断能力。如果检测深度不够,故障很有可能发生漏检,容错能力就会受到影响。

(3) 环境适应性较差。理想状态下,冗余容错机制应能对系统所

有可能发生的故障具备容错能力。但由于冗余系统一般是设计者事先设置的,其对故障的适应能力取决于设计者对系统工作环境的认识程度,一般情况下很难使设备达到很好的环境适应性。

冗余容错机制是建立在对所有可能发生故障的先验知识基础之上的,由于工作环境的复杂性,再睿智、再谨慎的人也很难做到万无一失,最好的解决方法是使装备能够自我检测和自我修复,自身具有应付灾难的能力。自然界不乏自修复的例子。例如,在整个生命历程中,人体不断受到病毒的侵害或外界环境造成的伤害,但依靠其自身修复机制,人体的整体功能是非常可靠的。因此,通过模拟生物体的自修复机制,开发具有自修复能力的硬件系统一直是人们努力的方向。

20 世纪以来,生命科学取得了惊人的成就,生命的运行机制正逐渐被人们所认识、掌握和运用,人工生命科学开始兴起并取得很大进展。同时,生命科学的成就也不断启迪工程技术人员的智慧和灵感,各种仿生结构和系统不断被开发出来,并在人们的生产和生活实践中得到广泛的应用。

仿生自修复技术就是在上述背景下提出来的,直接来源于细胞自动机、人工神经网络、处理器阵列和进化算法等人工生命系统的研究成果。在自然界的细胞系统中,细胞具备天然的容错和自修复能力。同时,细胞的这种自诊断和自修复能力可以通过遗传和进化,不断得到优化,并将优良性状保留给下一代。根据从生命科学研究领域所获得的灵感,可以确认,如果能模拟生物体的免疫和修复机制,将能有效地实现系统的维修能力,提高系统的可靠性。

仿生自修复是对传统故障检测和维修技术的改革。目前,故障检测和维修系统的设计是建立在开发者对装备服役环境的假设和分析基础之上的,由于设计纰漏和认识偏差,不经意的错误和遗漏可能导致严重的后果。仿生自修复技术则不必依赖于设计者的预测和分析,依靠自身的修复机制,自动适应环境变化,对系统故障和缺陷进行自主监控和维修,将故障隐患消灭于无形之中,其重要性和价值不言而喻。

1.2 仿生硬件的基本框架

经过 40 多亿年的进化,生物体展现出丰富而又强大的自适应能力。生物适应性表现在两个方面:一方面是进化的适应性;另一方面是个体的应激性^[3]。进化的适应性是指生物体与环境表现相适合的现象。由于周围环境的改变,通过长期的自然选择,使得生物体与环境相适应的特征能够通过遗传传给下一代。保护色、警戒色、拟态和休眠等生物适应现象均属于进化的适应性。个体的应激性是指生物对外界各种刺激(如光、温度、声音、食物、化学物质、机械运动、地心引力等)所发生的反应,是一种动态的反应,能够在比较短的时间内完成。

研究人员通过对地球生物的进化过程进行考察,发现生物进化存在以下 3 个层次^[4]:

(1) 种群演化(Phylogenetic)。这一层次主要关注遗传编码的短暂进化,它的显著标志是物种的进化,或者是种群演化。生物的繁殖是基于基因的复制,在个体水平上拥有极低的误码率,以保证后代的特性保持不变,但在群体或种群这个层次,误码率就会相对高一些。正是由于基因突变(无性繁殖)或重组中的基因突变(有性繁殖),导致了新物种或新组织的出现。种群机制从根本上讲具有很大的随机性,突变和重组产生了生物的多样性,这些多样性对种群的生存必不可少,使得其能够不断适应变化的环境,并产生新的物种。

(2) 个体发育(Ontogenetic)。随着多细胞组织的出现,表现出了生物组织的第二层次:母细胞——受精卵的连续分裂,每个新分化的细胞都拥有一份母细胞基因的副本,然后根据细胞所处的位置(它们在整体所处的位置)进行特定的表达。后一阶段也被称为细胞分化。个体发育是一个多细胞组织的发育进程,这一进程本质上是确定的。然而,基因上的单一碱基的错误可能导致个体发育系列的变化,这种变化是显著的,也可能是致命的,还有可能导致畸形个体的产生。

(3) 后天学习(Epigenetic)。个体发育进程受限于能够存储的信息总量,因此不可能对生物体进行完整规定。一个著名的例子是,人的大脑有 10^{10} 个神经元和 10^{14} 个连接,如果用 4 个字符的基因来进行完

整描述,基因长达 3×10^9 ,从而导致无法进行完整的描述。因此,当复杂度达到一定程度,就会出现一种允许生物体融合大量的连接与外界进行相互作用的不同进程。这个进程就是后天学习,主要包括神经系统、免疫系统和内分泌系统。这些系统的共同特征是拥有完全由基因组决定的一个基本结构,该结构在个体与环境的相互作用时被修改。

与自然生物相类似,仿生硬件系统也可以沿着这 3 个轴进行划分,即种群演化、个体发育和后天学习,称为 POE 模型,如图 1.1 所示。由于在自然界中不同轴之间的区别不是很容易刻画,而且每个轴的定义也不是那么精确,因此这里进一步说明 POE 框架里每个轴的含义:种群演化轴包含进化,个体发育轴包括没有受环境影响的个体从基因物质开始的发育,后天学习轴包含个体与环境相互作用的学习。为了便于理解,这里列出 3 个例子,它们的硬件组成能够用 P 、 O 、 E 轴进行区分:其中, P 轴表示进化算法借鉴自然界的种群演化过程; O 轴表示多细胞自动机就是基于个体发育的概念,由一个母细胞产生,通过多次分裂和分化,产生了一个多细胞的有机体; E 轴表示人工神经网络体现了后天学习的进程,通过与环境的相互作用,改变系统的突触权重和拓扑结构^[5]。

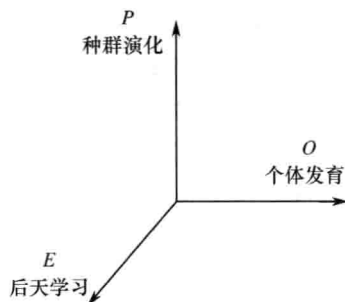


图 1.1 POE 模型

1.2.1 P 轴:进化硬件

进化硬件指可根据当前环境自动改变自身结构和功能以适应环境变化的硬件系统。主要包括模型评估、应用模型、配置引擎(进化算法)与可重配置硬件 4 部分,如图 1.2 所示。其基本思想是利用可重配

置硬件根据与自身结构相对应的结构位串来配置自身的结构,不同的结构位串对应不同的硬件结构。将代表硬件拓扑结构和属性的结构位串作为进化算法的基本对象,如遗传算法的染色体,采用软件仿真或硬件实测的方式评估染色体所代表的硬件结构的性能,以此适应度函数指导进化过程。进化算法作为配置引擎,可根据硬件系统的表现,动态改变硬件结构,进而改变硬件功能以适应当前环境变化,目前用于进化硬件的进化算法包括遗传算法(Genetic Algorithms, GA)、遗传规划(Genetic Programming, GP)、进化规划(Evolutionary Programming, EP)和进化策略(Evolutionary Strategies, ES)等。可重配置硬件方面,根据应用场合的不同,主要有FPGA、FPAA和FPTA等商业平台以及专为进化硬件研制的应用平台^[6, 7]。

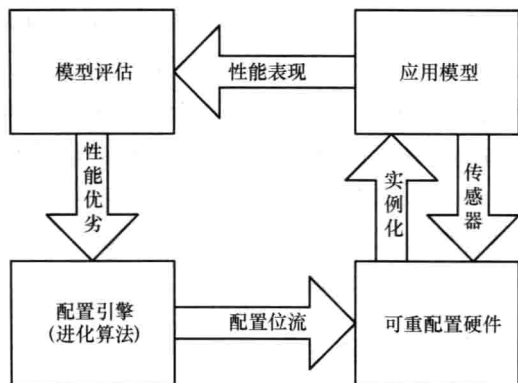


图 1.2 进化硬件的结构

1.2.2 O 轴:复制与再生硬件

个体发育是指个体根据自身的遗传物质由受精卵发育成多细胞生物体的生长过程。个体发育硬件就是模仿生物复制和再生特性的硬件。对个体发育硬件的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代冯·诺依曼提出的研制具有自繁殖与自修复能力机器的设想。从那时起,人们一直在从事这方面的探索,由于技术条件的限制一直未能实现。

1990 年前后,各种进化算法和大规模可编程逻辑芯片的出现,使人们找到了实现冯·诺依曼设想的一种技术途径。Mange^[4] 和 Mar-

chal^[8]受自然界多细胞生物体发育过程启发,提出了基于现场可编程门阵列(FPGA)的胚胎型仿生硬件(也称胚胎电子系统)。其基本思想是,通过模拟多细胞生物胚胎的发育过程,构造一种通用的仿生电子细胞,细胞通过冯·诺依曼近邻连接形成二维阵列。胚胎型仿生硬件借用了分子生物学概念,模仿多细胞生物的胚胎发育过程中体现的多细胞结构、细胞分裂、细胞分化的特性,从而使得硬件电路也能具有类似于生物的自诊断、自修复和自复制能力^[2,9]。

M. Samie 等参照原核生物细胞的结构和行为,提出了另一种细胞阵列设计思想^[10,11]。在自然界中,原核细胞,如细菌,是比较简单的生命形式。原核细胞没有明显的细胞核,染色体以折叠的形式存在于细胞质中。原核细胞不能形成组织,但很多原核细胞可以成群聚集,形成菌团或生物膜,通过细胞的协同,菌团或生物膜具有与真核细胞组织类似的生长、分化、自修复和环境适应性等特征。同真核细胞相比,原核细胞的DNA 比较简单,包含的基因也较少。通过折叠结构,细胞可记忆相邻细胞的遗传特征,并通过病毒标记等形式,记忆周围环境的变化,并将其遗传给下一代。按照这种机理设计的细胞阵列,即原核仿生阵列^[12-14]。

本书研究的胚胎型仿生自修复硬件(包含原核仿生阵列)属于复制与再生硬件(O 轴)的研究范畴。

1.2.3 E 轴:后天学习硬件

后天学习发生在个体发育形成之后,通过与环境的不断相互作用,获得适应环境的能力。在多细胞生物中,具有后天学习能力的系统主要有3类:神经系统、免疫系统和内分泌系统。通过对这些系统的研究,研究人员提出了3类具有后天学习能力的仿生系统:人工神经网络系统、人工免疫系统和人工内分泌系统。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)系统是指借助数学和物理等工程技术手段从信息处理的角度模拟人脑神经网络结构和功能,并建立简化的模型,它是一种大规模并行的非线性动力学系统,具有巨量并行性、结构可变性、高度非线性、自学习性和自组织性等特点。人工神经网络处理单元大体可以分为3类,即输入单元、输出单元和隐

单元。输入单元接受外部环境的信号和其他系统模型处理的数据;输出单元将系统处理后的信息进行输出;隐单元是位于输入和输出单元间外部系统不可见单元。神经元间相互连接,并存在一定连接强度,信息的表示和处理体现在网络处理单元的连接机制中。人工神经网络的功能由处理单元的活动函数、模式和网络的相互连接机制确定^[15]。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)是指在研究人体免疫系统的信息处理机制的基础上,构造出体现免疫系统的信息处理特性的一类新的人工智能模型和方法。目前人们对人工免疫系统的研究主要包括由免疫系统机制启发的各种算法,体现免疫系统机制、免疫启发功能的软件、硬件系统和人工免疫网络以及基于网络结构的框架模型^[16]。

人工内分泌系统(Artificial Endocrine System, AES)是指在研究人体内分泌系统的信息处理机制的基础上,构造出体现内分泌系统的信息处理特性的一类新的人工智能模型和方法。Neal 和 Timmis 在 2003 年首先提出了“人工内分泌系统(AES)”的概念,并将其定义为“能对外部激励做出反应,并具有控制功能荷尔蒙的系统”^[17, 18]。其主要包括激素的产生、激素的控制和激素水平调节机制。随着生物内分泌学的发展,人们对内分泌系统的作用机理有了更深入的了解,针对内分泌信息处理机制的智能计算模型也越来越受到人们的重视^[19]。

1.2.4 混合 POE 硬件

在生物学中, P 、 O 、 E 三轴之间互相影响、互相关联,使得有时很难判断某一组织具体属于哪个轴。人工仿生系统也面临着同样的问题。有些仿生系统可能同时具有两个或者 3 个轴特性的,称其为混合 POE 硬件,如图 1.3 所示。PO 硬件包含具有发育、复制和再生等个体发育特性的进化硬件,其特点是能够使基因不断进化,而这些基因将引导个体的发育。PE 硬件具有进化硬件和后天学习硬件的特性。进化的人工神经网络系统就是 PE 硬件的典型代表。OE 硬件具有发育和学习的能力,在个体发育的过程中, O 轴和 E 轴不停地相互影响。在 OE 硬件中,可以认为 E 轴通过增量学习算法负责更新参数, O 轴通过生长和

修改过程使得硬件的拓扑结构能够适应环境变化。POE 硬件同时具有进化、发育和学习的能力。POEtic 芯片便是一个包含 3 轴的硬件平台,通过进化、发育和学习的过程,能够适应动态的、部分不确定环境的硬件。

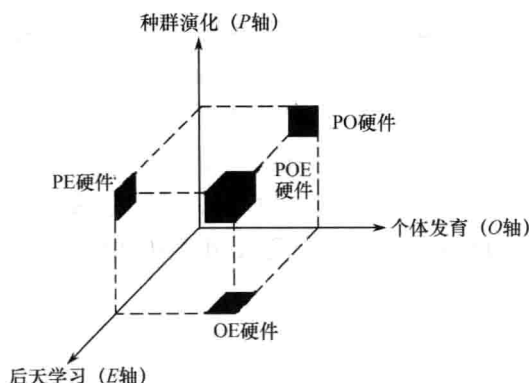


图 1.3 混合 POE 硬件

1.3 胚胎型仿生自修复硬件的研究现状与发展趋势

早在 20 世纪 50 年代,计算机之父冯·诺依曼提出了研制具有自修复能力的通用机器的大胆构想^[20]。随着电子技术的发展,仿生自修复技术取得很大进展,人们逐渐实现了冯·诺依曼的构想,设计了具有自修复能力的电子系统,如胚胎电子阵列(Embryonic Array, EA)^[4, 20]、演化硬件(Evolvable HardWare, EHW)^[21]等。

20 世纪 90 年代, Mange 等提出了胚胎电子阵列,日本学者^[21]则提出演化硬件(Evolvable HardWare, EHW)。演化硬件技术是将演化理论应用于电子电路设计中,使电子电路能够像生物一样根据工作环境的变化自主地、动态地改变自身结构与参数以获得期望的性能,具有类似于生物的自适应、自修复等特性。演化硬件技术是基于通用型 FPGA 阵列开展研究的,受限于 FPGA 阵列的结构,演化硬件染色体的编