

简并性在电子系统仿生设计中的研究

侯海峰¹, 丁国良¹, 满梦华², 褚杰²

(1. 军械工程学院 信息工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘要:简并性是系统内不同结构的元素具有相同功能或产生相同输出的能力,在元素缺失或破坏的情况下其仍能保持生物功能完整,在生物生存与进化中发挥着重要的作用。目前,简并性在电子系统仿生设计研究中也逐渐得到广泛重视。为使研究人员了解简并性及在电子仿生中的应用,概括了生物系统中的简并性现象及原理,阐述了生物简并性与复杂性、进化性、鲁棒性之间的联系,介绍了简并性在电子系统仿生领域的研究现状。最后讨论了简并性在数字电路鲁棒性设计中的发展趋势。

关键词:简并性;鲁棒性;电子系统

中图分类号:TP331.2;TP302.8

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)09-0168-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.09.038

Study on Degeneracy in Electronic Systems Bionics Design

HOU Hai-feng¹, DING Guo-liang¹, MAN Meng-hua², CHU Jie²

(1. Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Electrostatic and Electromagnetic Protection Institute, Ordnance Engineering College,

Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Degeneracy, the ability of elements that are structurally different to perform the same function or yield the same output, can still maintain the biological fully function when elements is in case of loss or damage. It plays an important role in survival and evolution of biology. Nowadays, the study of degeneracy in electronic systems bionics design is received widely attention. With the purpose of researchers understanding degeneracy and application in electronic bionic, generalize the phenomenon and principle of degeneracy in biological system, expound the relationship between biological degeneracy and complexity, evolution, robustness, introduce the research status of degeneracy in the fields of electronic systems bionics. Finally, the future development trend of the degeneracy in the robust of digital circuit design is discussed.

Key words: degeneracy; robustness; electronic systems

0 引言

现今,集成电路广泛应用于各类电子系统中。随着科技的进步,电子系统所面临的电磁环境日趋复杂,比如电磁脉冲和高功率微波等电磁辐射通过各种途径耦合到电子系统中,给系统设备造成干扰,使其产生误动作或功能失效^[1]。在空间环境,电子系统暴露在高能带电粒辐射之中,单粒子翻转效应时常发生,甚至造成电路的局部损伤^[2]。目前,最常用的解决方法就是硬件冗余技术^[3],但由于采用相同结构的电路模块进行冗余,随着电路规模的扩大,资源开销随之增大,利

用率降低。而生物系统中的简并性为解决这些问题提供了一种新颖的思路。简并性在生物系统中普遍存在,Georges-Louis Leclerc 与 Comte de Buffon 第一次将它引入到科学研究中^[4]。它来源于进化论、物种选择学说和遗传学说,其基本思想是生物体在某些元素缺失或破坏的情况下,仍能保持功能的完整性。目前,简并性在生物中的神经网络、基因网络等方面发挥重要作用。如果将简并性应用于电子电路领域,将会极大提高复杂环境下系统的鲁棒性。

收稿日期:2013-11-07

修回日期:2014-02-12

网络出版时间:2014-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207167)

作者简介:侯海峰(1988-),男,陕西扶风人,硕士生,研究方向为演化硬件、智能检测技术;丁国良,副教授,研究生导师,研究方向为嵌入式系统与应用、演化硬件、智能检测技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140717.1229.022.html>

1 生物简并性

简并性广泛存在于生物界中,是基因网络、神经网络与进化的重要性质,对于自然选择有重要作用。比如,密码子由 3 个核苷酸构成,因而 4 种不同的核苷酸总共可以组合成 64 种不同的密码子。但密码子编码的氨基酸却只有 20 种,这说明遗传编码是简并的,多数氨基酸有多个不同的遗传编码^[8]。这种特性是自然选择的结果,因为它可以使基因突变的影响降到最低程度。生物系统内各层面简并性例子如表 1 所示。

表 1 生物系统中不同层面的简并性

生物系统	简并性特征
遗传密码	许多不同的核苷酸序列编码相同的多肽链
蛋白质折叠	不同的多肽可以通过折叠实现结构上和功能上的等效
转录单位	启动点、终止点的简并性可以合成多种功能等效的信使 RNA
基因	功能相同的等位基因、重复的基因等等
转录后处理	在信使 RNA 的处理、转运、翻译的退化中都存在简并机制
蛋白质功能	存在功能上重复的蛋白质
代谢	存在多个并行的合成和分解的途径
亚细胞定位	存在将细胞内成分运输并定位到合适位置的简并机制
亚细胞器	每个细胞中都存在异质的线粒体、核糖体等细胞器
细胞内/间信号	简并的信号通过激素、生长因子等各种简并途径传输
免疫反应	抗体和其他抗原识别细胞是简并的
神经网络互联	局部连接、长距连接、神经动力学都具有很强的简并性
身体运动	多种不同的肌肉运动方式会产生等效的结果
生物间沟通	在生物间几乎有无限种方式可以表达相同的信息

Edelman 将简并性定义为系统内不同结构的元素具有相同功能或产生相同输出的能力^[6]。与冗余不同,简并性元素可以产生相同功能,也能产生不同的功能,这些取决于它当时所处的环境。简并与冗余的特点如图 1 所示。

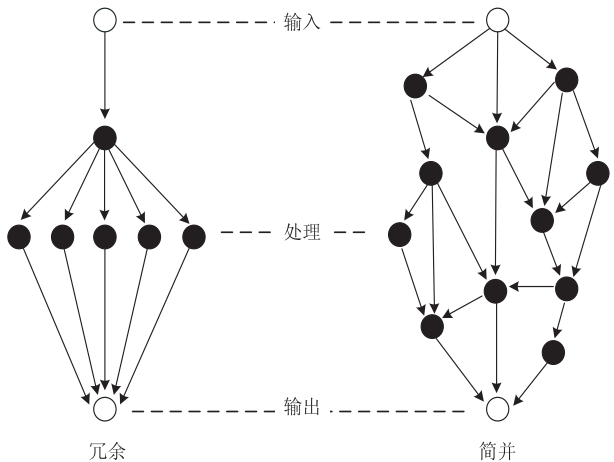


图 1 简并与冗余

同样是相同的输入产生相同的结果,但简并比冗余有更多可选的路径来实现相同的功能,而且不同途径具有不同特性^[7],这种不同回路间特性的差别使得

系统具有适应多种环境的能力。具有简并性的系统内部没有完全相同的功能元素,但各元素之间存在一定程度上的功能重叠。简并性是自然选择的先决条件,如果一个选择性系统没有简并,那么无论其有多丰富的多样性,在变化复杂的环境中会很快失败。简并性也是自然选择的必然结果,自然选择使得许多并不相同的结构可以产生相同的功能,这不仅增强了生物系统的鲁棒性,也加强了它们对不可预知环境的适应性。

2 简并性对生物系统的作用

在自然界中,简并性是保证生物系统鲁棒性的重要机制,也是联系鲁棒性、复杂性与进化性的纽带^[8],见图 2。简并性是生成鲁棒系统的有效机制,能提高系统长期进化性,增加系统的等级复杂性。简并与复杂性有积极的关联,它描述了系统元素之间既功能冗余又功能独立的程度,简并性高的系统必然伴随着高复杂性^[9]。Edelman 利用信息论的理论方法证明了神经系统的复杂性 with 简并性存在正相关^[6]。简并性是进化的先决条件并且是鲁棒性的有效来源。简并性增强系统的演化能力,并使系统功能的实现方法灵活,使其能响应复杂多样的外界环境。Edelman 与 Gally 分析了生物系统内存在的简并性现象,并认为简并性是自然进化的必要条件和必然结果^[10]。研究表明,由冗余蛋白质构成的系统有鲁棒性,但在进化方面却受限;反而,由简并蛋白质构成的系统不仅有鲁棒性也有进化性。因此,简并性在实现鲁棒性的同时也促进了系统进化能力的提高。

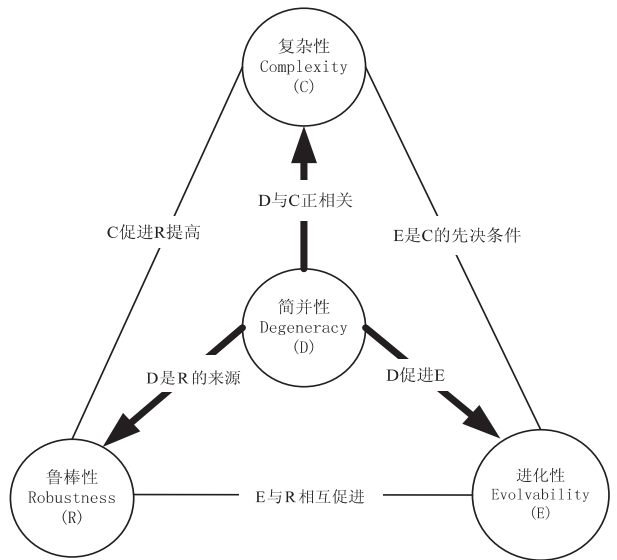


图 2 简并性、复杂性、鲁棒性与进化性的关系

简并系统内不同结构的元素在特定外部环境下可以具有相同功能,功能代偿机制存在于元素之间。某一功能元素受到干扰而失去作用时,其他元素随即调整自身功能,补偿受到干扰元素的功能,从而维持整体

系统功能的鲁棒性^[11]。实现过程如图 3 所示。

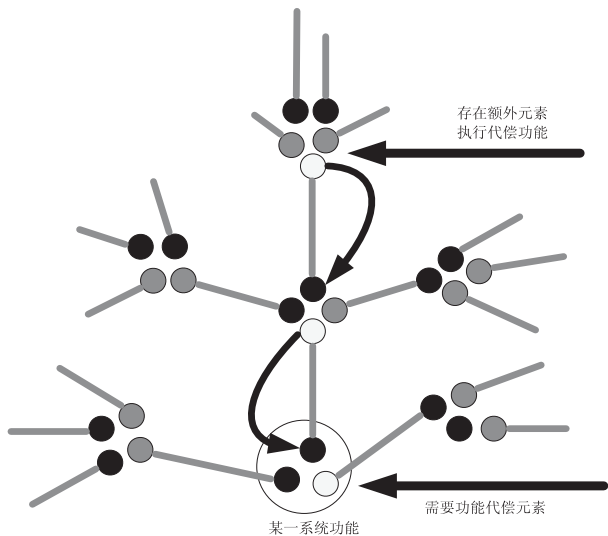


图 3 简并性增强系统鲁棒性示意图

图 3 中,直线连接的两个节点代表系统元素可以执行的两种功能,深色表示正执行的功能,浅色表示未执行的功能,根据实际需求,系统元素在两功能之间进行切换。系统某一特定的功能由某一功能集群来完成,这个集群是由多个元素共同组成。当某一系统功能受到外部环境影响而需要额外的功能元素时,与其相关的元素发生功能调整,转而执行此项功能,如图中曲线箭头所示的元素功能切换方向。经过多次切换,直到系统其他功能集群内的富余元素发挥代偿功能,最终使系统整体功能不受影响。

3 简并性在电子系统中的应用

实际上,电子系统中的许多要素或概念都可以在生物系统中找到相似物,或“对照体”。基于此,可以认为生物系统与电子系统同处一种“对等领域”,进而,使实质性的启发与借鉴成为可能^[12]。因此,可以将简并性引入到电子系统仿生中,设计具有高简并性的电路,从而提高系统鲁棒性。在此方面,国内外已进行了不少相关研究。

英国伯明翰大学计算机智能与应用研究所的姚新课题组研究了生物系统简并性与鲁棒性的关系,利用多智能体仿真模型证明了提高系统功能鲁棒性和环境适应性的重要原因就是简并性,并提出了基于简并性的工程系统可靠性与适应性的优化方法,将其运用于动态环境下具有高可靠性要求的复杂系统优化与决策中^[13-14]。特别地,他们还完成了澳大利亚国防部的一项军事项目并将简并性应用其中。

Javier Macia 与 Ricard V. Solé 将简并性应用在了演化数字电路中。通过分析由 Nand 门组成的人工演化容错电路,证明当系统的简并性提升时,容错电路性能也会得到提升,具有相同演化特征的细胞网络也是

利用简并性机制来提高其系统功能的鲁棒性^[15]。可靠的系统不仅仅依赖于冗余,简并性也是必须的。

张宏等人从序空间编码理论出发,以神经回路为基础,验证了双耳定向神经回路中的简并网络以及各种网络被简并的方法,将简并现象与序空间编码结合起来。这使得对神经网络的简并性现象有了一个具体的认识,为 Edelman 的中枢神经系统的简并性理论提供了支撑^[16-17]。

张子阳等人将生物系统中的简并性概念引入到网络工程领域,利用简并性设计,改善网络性能。给出了简并性在网络工程中的定义并构建一个由简并节点组成的无线通信环境。从接入成功率、平均最短路径长度和网络直径 3 个方面考查了简并对网络性能的影响。通过仿真结果表明简并性可以改善网络的连通度、健壮性、时延和链路利用率等特性^[18-19]。这是将生物简并性理论转化为工程应用的国内首次探索。

4 结束语

简并性作为生物系统的一个显著特征,其系统中不同结构的元素可以在特定条件下发挥相同功能或产生相同结果,提高容错性能,从而使系统更加可靠。随着简并性的成熟与发展,越来越多仿生优化和工程应用专家关注此领域,他们寻求借鉴生物简并性来提高人工系统在不可预知、复杂多变环境下的鲁棒性与适应性。基于简并性的特性,将其引入到数字电路中,利用演化硬件技术,设计具有高简并性的电路,提高电路系统的鲁棒性能,这将提高诸如电磁等复杂环境下电子设备的可靠性。

参考文献:

- [1] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
- [2] 张 新. 航天微电子器件单粒子翻转研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2002.
- [3] 解双建, 原 亮, 满梦华, 等. 基于演化硬件的容错电路设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(10): 2495-2497.
- [4] Mason P H. Degeneracy at multiple levels of complexity[J]. Biological Theory, 2010, 5(3): 277-288.
- [5] 程罗根. 遗传密码的变偶与简并[J]. 生物学杂志, 1993(5): 28-28.
- [6] Tononi G, Sporns O, Edelman G M. Measures of degeneracy and redundancy in biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(6): 3257-3262.
- [7] Félix M A, Wagner A. Robustness and evolution: concepts, insights and challenges from a developmental model system

(下转第 175 页)

运行和控制。

在上述装备的协同设计过程中,总体设计阶段形成一系列总体设计文件和数据,如设计基准、设计说明文件、设计任务等都在学科部门 A 的数据管理系统中进行,这些数据通过网络传输给学科部门 B 作为其详细设计依据。而学科部门 B 在详细设计阶段产生的设计数据在临时数据库系统中进行审批、更改和发放。并通过网络发送给学科部门 A。学科部门 A、B 之间随时可以进行数据交互、保证数据一致性。

5 结束语

文中在面向对象方法的基础上提出了太阳能光伏电池装备多学科协同设计的数据管理模型。该模型能够为太阳能光伏电池装备协同设计商对太阳能电池装备的设计过程中的数据交互与管理提供参考,并在此模型的基础上提出了基于 ECA 规则的动态数据管理方法,使多学科协作设计成员间能够对数据信息实时共享,并且能够即时交换意见,以提高协作设计效率,使得太阳能光伏电池装备设计的数据管理更加科学化、合理化。有利于形成具有核心优势的数据信息管理体系,促进企业管理水平的提高。

参考文献:

[1] Roy U, Liao Jianmin. Application of a blackboard framework to a cooperative fixture design system[J]. Computers in Industry, 1998, 37(1): 67-81.

[2] Zhao Gang, Deng Jiati, Shen Weiming. CLOVER: an Agent-based approach to systems interoperability in cooperative de-

+++++

[J]. Heredity, 2008, 100(2): 132-140.

[8] Whitacre J, Bender A. Degeneracy: a design principle for achieving robustness and evolvability[J]. Journal of Theoretical Biology, 2009, 263(1): 143-153.

[9] Whitacre J M. Degeneracy: a link between evolvability, robustness and complexity in biological systems[J]. Theoretical Biology and Medical Modelling, 2010, 7(6): 1-17.

[10] Edelman G M, Gally J A. Degeneracy and complexity in biological systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(24): 13763-13768.

[11] Whitacre J M, Axel B. Networked buffering: a basic mechanism for distributed robustness in complex adaptive systems[J]. Theoretical Biology and Medical Modelling, 2010, 7: 1-20.

[12] 刘尚合, 原亮, 褚杰. 电磁仿生学—电磁防护研究的新领域[J]. 自然杂志, 2009, 31(1): 1-7.

[13] Mei Yi, Tang Ke, Yao Xin. Evolutionary computation for dynamic capacitated arc routing problem[J]. Evolutionary Com-

sign systems[J]. Computers in Industry, 2001, 45(3): 261-276.

[3] Taratoukhine V. Conflict management in computer supported collaborative design[C]//Proceedings of IEEE international conference on artificial intelligence systems. [s. l.]: IEEE, 2002: 152-157.

[4] 王雪聪. 以顾客满意为中心的大规模定制质量改进体研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.

[5] 吴丹, 王先遼, 魏志强, 等. 基于协同服务平台的分布式产品数据管理[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(6): 791-794.

[6] 郝静, 何涛, 李士才, 等. 协同式工厂设计系统中的数据管理方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 563-567.

[7] 纪杨建, 祁国宁, 顾巧祥. 产品族生命周期数据模型及其演化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 240-245.

[8] 尹建伟, 陈刚, 董金祥. 一个通用 PDM 安全管理模型及实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(11): 971-976.

[9] 王昊光, 董众. 面向航天器设备的数据管理应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(1): 188-191.

[10] 程存有, 叶晓俊. BOM 的建立及在 PDM 与 ERP 集成系统中的应用[J]. 计算机工程, 2003, 29(4): 143-145.

[11] 倪莉, 秦鹏飞. 企业 BOM 的集成管理[J]. 中国纺织大学学报, 1998, 24(6): 26-29.

[12] 王国鸿, 宁汝新. 对制造业物料清单的研究[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(2): 196-200.

[13] 胡敏. 企业集成环境下的 BOM 研究[J]. 计算机工程, 2001, 27(6): 22-24.

[14] 周伟. 基于网络的协同设计系统数据交换及管理关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

+++++

putation for DOPs, 2013, 490: 377-401.

[14] Whitacre J M, Rohlfshagen P, Bender A, et al. Evolutionary mechanics: new engineering principles for the emergence of flexibility in a dynamic and uncertain world[J]. Natural Computing, 2012, 11(3): 431-448.

[15] Macia J, Solé R V. Distributed robustness in cellular networks: insights from synthetic evolved circuits[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2009, 6(33): 393-400.

[16] 张宏, 方路平, 范影乐, 等. 神经系统的简并性[C]//Proceedings of the 8th biennial conference of the Chinese society for neuroscience. [s. l.]: [s. n.], 2009.

[17] 张宏, 刘淑芳, 钱鸣奇, 等. 神经系统的简并与序空间编码分析[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7322-7329.

[18] 张子阳. 无线通信网络中简并性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

[19] 张子阳, 唐俊华, 李建华. 简并性—生物理论在无线通信中的应用[J]. 信息安全与通信保密, 2011, 9(5): 80-81.

简并性在电子系统仿生设计中的研究

作者:

[侯海峰](#), [丁国良](#), [满梦华](#), [褚杰](#), [HOU Hai-feng](#), [DING Guo-liang](#), [MAN Meng-hua](#), [CHU Jie](#)

作者单位:

[侯海峰, 丁国良, HOU Hai-feng, DING Guo-liang\(军械工程学院 信息工程系, 河北 石家庄, 050003\), 满梦华, 褚杰, MAN Meng-hua, CHU Jie\(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄, 050003\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(9)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201409038.aspx