

仿生层级标定与电磁仿生模型建立^①

原 亮^{②*} 巨政权^{**} 满梦华^{**} 常小龙^{**} 褚 杰^{**} 丁国良^{*} 周永学^{*}

(^{*}军械工程学院计算机工程系 石家庄 050003)

(^{**}军械工程学院静电与电磁防护研究所 石家庄 050003)

摘 要 针对不同类型的仿生研究工作,明确了具体的分类方法,建立了仿生坐标,以便于对包括电磁仿生在内的诸多仿生类研究进行层面的标定和级别的划分,以及对所研究的内容在整个仿生领域中进行大致的定位。进而,阐述了电磁仿生研究的基本概念与所涉及学科类型等内容,提出了电磁仿生研究中的生物-电子对等模型和总体构成,细化了具体研究的方向、设想和防护模式,并从原型实现的工程策略角度介绍了电磁仿生防护研究中“三防线”的基本概念和相应的技术方法。

关键词 仿生学, 仿生分类, 仿生坐标, 电磁仿生, 电磁防护

0 引言

随着微电子器件体积的不断缩小、功耗的逐步降低,特别是随着可编程片上系统(system on programmable chip, SOPC)技术为电子、控制领域带来的革命性进步,各类电子系统的应用更加广泛,它们所起的作用显得愈加重要。然而,可以看到,电路集成度的增加、工作电压的降低等因素使其更易受到电磁环境的影响,致使许多传统、有效的电磁防范措施面临着新的挑战^[1]。众所周知,生物系统的复杂程度远比目前各类控制系统高,且其优异的可靠性亦使当今所有人工系统望尘莫及。因此,电子系统的可靠性问题可望通过借鉴生物系统的可靠性机理,甚至通过“演化设计优化”^[2]的方式得以改善或解决,即在电磁领域中创建一种基于仿生机制的新型防护模式和工程实现。待其深入发展、逐步成熟后,则有望形成一门新型的学科——电磁仿生学^[3]。

1 仿生层级的标定

仿生学是通过研究生物的结构、性状、机理、行为以及相互作用,为工程技术提供新的设计思想、工作原理和系统构成的技术科学^[4]。直接冠名仿生

学的研究众多,其中部分已有实质性的进展,例如工程仿生学^[5]、神经仿生学^[6]、分子仿生学^[7]、视觉仿生学^[8]、建材仿生学^[9]等。仿生学科的分类方法亦见报道,如分为电子仿生、控制仿生、机械仿生、化学仿生、医学仿生^[10],或力学仿生、分子仿生、能量仿生、信息与控制仿生^[11]等。实际上,从微观到宏观,生物的任何结构、特征、功能等要素均可成为仿生研究的对象,而目前的分类方式多在生物个体或其外在表现的基础上进行,似有必要进一步在抽象层面和本征级别上进行划分、定位,以便使其能够在规模和难度上做出大致的比对,进行更为有效的分析、归纳和深入研究。

1.1 基于仿生层面的划分

细胞是生物体的最小构造单位^[12]。无数不同类型的细胞逐级形成了千姿百态的生物世界。例如在动物界,心肌细胞构成了心肌组织,心肌组织又属于器官心脏,心脏为循环系统的组成部分,循环系统则存在于每个动物个体,而诸多的同类个体则构成了群落。于是,可将仿生模式按照被仿目标所处的层面直接标定为细胞型、组织型、器官型、系统型、个体型和群落型共6个型别。

对于细胞和组织而言,其功能往往需要进行深入的观察、分析才能予以判断,所以归属“解析层”;器官、系统可由其外表形状直观看出或推知其特点

① 国防科技重点实验室基金(9140C8702020803)资助项目。

② 男,1955年生,硕士,教授;研究方向:计算机体系结构,电磁仿生理论及实现;联系人,E-mail: yltgzy@yahoo.com.cn
(收稿日期:2011-03-29)

或功能,即为“可视层”;而对于个体、群落而言,因其均有自主或协调能力,则统称“行为层”,如表 1 所示。

表 1 仿生层面的划分

层面	型别	举例
行为层	群落型	蚁群算法、集群机器人
	个体型	风筝、仿生人
可视层	系统型	体外循环、血液透析
	器官型	蛙蹼、鱼眼镜头
解析层	组织型	人工肌肉、人造骨骼
	细胞型	医学教具、人工叶绿素

这种层面结构不仅有助于仿生内容的整体定位,还可梳理得出不同研究之间的逻辑关系。

1.2 基于工程级别的划分

从仿生实现的角度而言,仅仅进行层面划分尚不足以明确标定技术构成的规模和种类。因此,按照具体研究内容与目前技术条件下的实现难度,可以再行工程级别的划分,如表 2 所示。

表 2 工程级别的划分

级别	种类	举例
分子级	生物学类	人工胰岛素、生物工程
	材料类	人造蛛丝、陶瓷骨骼
功能级	智能类	神经网络、人工智能
	本能类	声纳、雷达
表象级	结构类	薄壳结构、蒙皮骨架
	形态类	风筝、蛙蹼

表象级形态类仿生的概念与方法简单、直观,结构类仿生,亦同样如此。例如蒙皮骨架与拱的结构可以分别理解为对鸟翅和蛋壳的仿生。

功能级仿生则是在表象级的基础之上远远深入了一步,即不再是对生物从整体或可见部位的外在模仿,而是将生物的某一具体本能或智能特性当作模仿的对象进行研究和模拟。声纳与雷达常被认为是模仿水中的豚类动物和空中的蝙蝠,其实不然。声纳和雷达只是分别对豚类、蝙蝠具有的超声探测、定位的手段进行的功能模拟,而与其外观、习性等诸多主要生物特征毫无关联。况且,这些动物的回声定位系统还有着人类目前难以理解和无法企及的超强抗扰能力。

材料与生物学类型的仿生均处于分子级层面,当属仿生研究之最高级别。例如对蛛丝的仿生,不

但需从视觉角度相像,而且必须满足高强度、有粘性等理化指标。尤其对生物学仿生而言,更需使其拥有生理活性的要素,即对外应有“活体”和“生命”的体现。此类仿生必须从基于分子级别或细胞层面的各个角度综合进行,而不是简单地如同前述功能仿生中的举例一样,依靠电子技术也能同样完成超声波的产生、探测与解码。

1.3 仿生坐标的建立

若将仿生层面和工程级别作为纵横两轴,则可形成一个“仿生坐标”,或称“仿生平面”,以更为直观和清晰的方式分门别类地进行仿生工作的划分和确定,如图 1 所示。



(注:未将转基因和克隆等生物学自身技术归类于仿生研究)

(*:尽管皮肤属于器官,但仿鲨鱼泳衣只是覆盖人体局部,所以将其列入组织层面)

图 1 仿生坐标结构

可以看出,这种分类方式还包含了研究深度的继承和递进关系。从左至右,各项内容主要是以复杂度的增加为主;自下而上,则体现了综合性的提高(图中各例仅为描述方便而设,尚待推敲)。

不难想像,摄影界常见的鱼眼镜头是从结构上对鱼眼的仿生,以获得更大范围的广角功能。这种通过结构模仿以获相应功能的方式,亦应归结为可视层-表象级中的结构类-器官型仿生。而在仿生伪装中与绿色植物的“同色同谱”要求,则是解析层-表象级中结构类-细胞型仿生。如能将其从功能角度进行叶绿素的实现,即具有在阳光下将二氧化碳与水合成为有机物的能力,则不管其颜色为绿与否,均应定位于对叶绿素的解析层-功能级中本能类-细胞

型仿生。若是更进一步,全部模仿了叶绿素的结构、功能,甚至颜色、性状都一致,那就应归类为解析层-分子级中的材料类-细胞型仿生。

仅就电磁仿生而言,暂时定位于解析层的功能仿生即可。具体言之,则应属于针对细胞在电磁环境下所具有的抗扰及自修复的本能的仿生。的确,神经细胞在强场环境中的抗扰能力、修复机制并未完全明了,尚需更为深入的探索。但即便如此,该领域中的已有成果、现代电子技术的长足发展和电子设备电磁防护的迫切需求,已使相关研究初具条件,这亦是现阶段研究所能起步的基础所在。

2 电磁仿生的构成与任务

目前,电磁仿生研究的主要目的在于电磁防护^[3]。通过引入新的电路设计理念,争取降低电子系统的电磁环境敏感度。甚至在过强的干扰使得工作程序、系统状态发生紊乱,或是遭受局部硬损伤的情况下,仍能不依赖外界的支援而完成全部或部分预定功能。进而,有望在一定程度上另辟蹊径,形成对实际电子控制系统设计和制造具有参考价值或指导意义的结构性抗扰及自主性修复等技术。

2.1 电磁仿生研究的基本构成

电磁仿生研究需要以电磁学、生物学的理论为先导,特别是以电磁生物效应为纽带,以电子学中演化硬件(evolvable hardware, EHW)技术作为主要的实现基础,使其能在寻求突破常规模式方面获得新的契机。但是,电磁仿生绝非 EHW 技术的简单拓展,而是一种层次更深、领域更宽、学科跨度更大的有机综合,如图 2 所示^[13]。

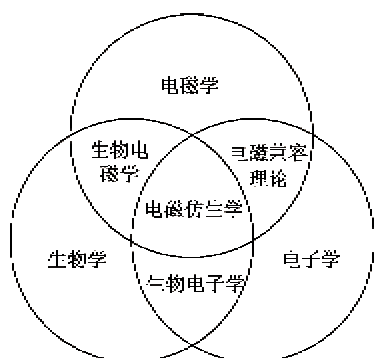


图 2 电磁仿生学及相邻学科

然而,“演化硬件”一词系由英文直译而成,仅是概念和术语的结合,并非实质性的生物-电子联合。严格说来,只有在一个完全自然的条件下,物种

或生物通过长期进行其结构、功能的变异以适应生存环境的过程方可称为“演化”,即以“自然”和“长期”为其必备特征。若将人类干预、硬件模拟等情况仍称演化,则有悖原意,多显不适。

实际上,任何受到人类影响和控制的生物演化已被称为“基因工程”。而人类基于非生物平台对生物所做的一切模拟,正是所谓“仿生”。因此,英文描述中又有了更为贴切的“仿生硬件(Bionic-inspired Hardware, Bio-ware)”^[14]等说法,但终因习惯问题而未被广泛接受。

2.2 电磁仿生研究的主要任务

在科技发展的前沿领域和许多工程应用中,结合了生物信息特征与仿生工程策略的成果已经多有报道,仿生研究的基本方向亦获普遍认同。因此,对于工作在恶劣环境之中并且难以直接回收、及时维护或人工干预的各类电子系统而言,设计构建具有全新理念的电磁防护方式,不仅已成可能,亦是技术发展所带来的必然结果。

如前所述,生物神经元电信号的传导特性、抗扰机制与细胞康复原理极为复杂,短期之内难以看到明显的研究成效。但是,任何相关的局部突破,均有助于拓展或映射至电磁防护的工程应用领域,成为电磁仿生工作中的基础性和基准性支撑。同时,工程应用又为生物电磁的深化探索提出了更加具体和明确的需求。

总之,电磁仿生研究的主要任务就是争取能在复杂电磁环境下,对相关电子系统的可靠性和健壮性予以有效改进以取得显著提高,并重点体现在以下两个方面:

(1) 电磁环境下的抗干扰

传统的电磁抗扰手段包括:①进行电路屏蔽、滤波、合理接地等;②加装瞬态抑制器件、钝感器件、电磁防护材料等;③使用具有容错功能的 TMR(三模块冗余)结构等。尽管这是目前电磁防护的主流措施且收效显著,但电子系统与生物个体面对强场时所呈现的抗扰能力还是反差太大。因此,生物所独具的抗扰特征正是电磁仿生所研究的首选目标。

(2) 系统损伤后的自修复

对于因软件损伤而导致故障的传统系统而言,最为简单的解决方法莫过于重新启动。但是,仅仅一个相关存储单元或门电路的硬件失效,便足令软件恢复的所有努力徒成徒劳。只有在现场可编程逻辑阵列(field programmable gate array, FPGA)和仿生算法相互结合的基础上,进行局部的硬件自主修复

工作才有可能。作为传统电磁防护方式的补充,仿生技术自然有望大大加强相关系统的可靠性、健壮性。

3 电磁仿生与防护研究体系

电磁仿生防护工作是对单纯仿生研究的拓展性继承,尤其需要进行理论与实验的平行研究。既需完成生物相关机制的原型探寻,又需要完成仿生模型的物理实现和仿生电路的抗扰测试,以验证其设计思想与防护模式。因此,其主要工作需有较为严格的逻辑关系和较为完整的体系结构。

3.1 电磁仿生防护的研究内容

电磁仿生防护研究旨在通过参照某些生物的独特特征,寻找可供电磁防护工作所效法或借鉴的方案与手段。再经分类,建立相关仿生及防护模型,在工程领域完成其结构对等和功能映射。以此,将生物系统抗扰、康复机制引入电子系统设计过程,构造一种高度可靠的电路系统,使其可在复杂多变的电磁环境中具有较好的兼容性、适应性与自修复特性。相应的基础研究结构如图 3 所示。

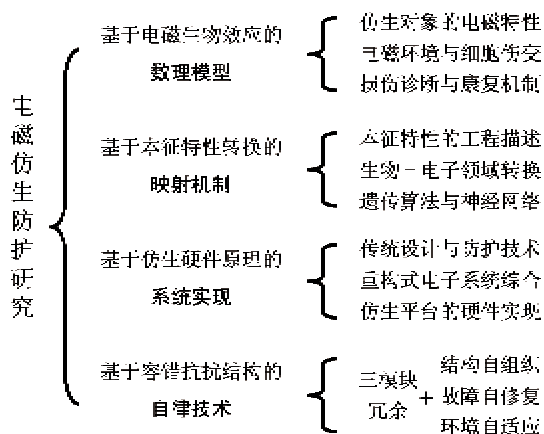


图 3 电磁仿生防护研究的基础结构

(1) 基于电磁生物效应的数理模型

通过针对仿生对象进行不同强度、时间、形式、环境的特定电磁生物效应实验,以研究其结构、性质、原理、行为和功能。广泛地运用电子技术、神经网络、自控理论等成熟方法,建立其电磁特性的模拟、数字、生化或逻辑方面的模型。基于这些模型,既能继续进行细胞的信息传导与损伤康复机制的探索,促进相应医学领域的应用和发展^[15],又能形成后续仿生研究的理论基础。

(2) 基于本征特性转换的映射机制

对生物优良的抗扰能力进行产生条件、作用机理的深入探寻,充分利用生物与电子系统间的结构、功能、组织、能量等各方面的对等规律,完成其本征特性的工程描述。从而,有利于选取合适的 FPGA 等器件作为仿生实现载体并辅以遗传算法等软件技术,建立准确、实用、有效的生物-电子对等转化机制,使仿生对象的本征特性抽象化、等效模型具体化。

(3) 基于仿生硬件原理的系统实现

按照一般复杂电磁环境的构成,进行不同类型芯片的电磁特性分析^[16]以及芯片毁伤阈值的实测、仿真并求其敏感频段,是电磁仿生研究的先期工作之一。后续的嵌入式单片系统(advanced RISC machine)和 FPGA 控制系统的毁伤实验^[17]为综合实现具有仿生功能的可编程片上系统(SOPC)奠定了芯片筛选、抗扰方式确定与适应频段划分的基础。依托灵活配置特定阵列结构^[18]的方式所“硬化”的实验平台^[19],可直接进行抗扰结构的等效实现^[20],使其在板、在片演化研究^[21]能够得以深化、优化、实用化。

(4) 基于容错抗扰结构的自律技术

只要具备了一定的仿生基础和硬件环境,基于“自律三特性”^[22]的理论研究、机制探索等工作便可展开。即使是在效应分析多受所限、数学模型不甚完备的情况下,相关的研究、实验工作仍可基于遗传算法、神经网络等软件领域中传统的仿生模型,在前述硬件平台上进行。三模块冗余(triple module redundancy, TMR)容错技术^[23]与基于自律特性的仿生修复相结合,可使系统发生故障后利用校验机制先行做出判断并保证系统能以容错方式继续稳定运行,进而争取后续自修复的时间和机会。

3.2 电磁仿生研究的对等模型

如将某一生物或其组织看作是一个“功能系统”,则电子系统即为由人类制造的“特殊生物”。二者至少在概念上有所对等。尽管这种“领域转换”方式尚待商榷和细化,但其毕竟简捷、直观、逻辑完整。在现有的硬件技术保障下,足以启动生物抗扰特性在电子系统中的“等效实现”研究^[24]。将生物个体的基本结构特征直接映射至电子系统便可看出,两者之间存在着微妙的结构对应关系和较高的层面相似度,如图 4 所示。

若将 FPGA 片内海量基本逻辑单元看作生物体内众多的细胞,由此类单元构成的功能电路则可看

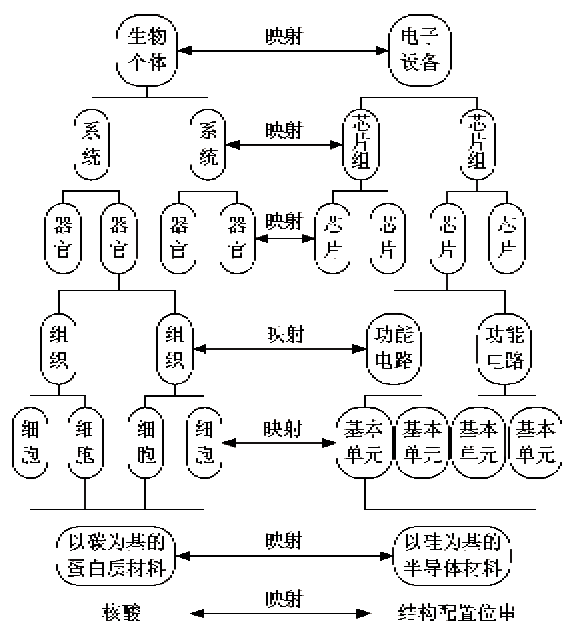


图4 生物个体与电子系统对等模型

作为生物细胞形成的组织。进而,可再由各种“组织”形成具有一定功能的可在某种程度上自修复的“仿生器官”。多个相互关联的FPGA芯片形成了结构复杂、功能完备的芯片组,亦等同于生物个体中的系统。不同功能的芯片组所形成的电子设备则是直接对应于生物个体。在这种情况下,FPGA的配置位串可对等为生物细胞核中的核酸,两者分别确定了电路和细胞的结构与功能,形成逻辑上的“对等模型”。

当然,将来如有“蛋白质”计算机的出现,必属仿生领域的巨大成就,对于各类仿生研究而言,更是莫大福音。

3.3 电磁仿生防护的实现平台

生物机体中,所遭受的“干扰”多体现于信息传输通道,即作用于神经纤维,而“康复”又是受损后其自身功能之一。因此,抗扰研究主要探寻神经细胞间的信息传导特征与安全机制,自修复的研究则侧重于机体的抗损能力和康复方式。对于此类研究而言,FPGA技术提供了极佳的实现平台。

(1) FPGA的固有优势

FPGA等可编程逻辑器件内部的电路资源丰富、使用方便,并能以“在系统编程”方式对其电路逻辑进行反复修改或变更,完成各类密集型算法的实现,进行不同信号的模拟和处理,以解决常规方法难以应对的抗扰问题。同时,灵活的通道编程和逻辑宏单元连接,使得隔离、旁路等手段较易实现。于是,就有了将受损单元进行“修复”的可能^[25]。

(2) 电子系统的抗扰实现

神经系统所具有的优异抗扰能力与其特殊的细胞连接结构密切相关^[12]。此类连接绝非如同FPGA中基本单元之间的编程定制一样简单明了,甚至可能就是一个具有非线性及时变特征、隐含了不同的滤波及抗扰环节的多输入、多输出“通道”。而使用模拟或数字技术对此类“通道”进行仿真与实现,亦是电磁仿生工作中抗扰研究的主要内容之一。

(3) 电子系统的修复机理

当发生FPGA的局部毁损时(例如空间应用中受到“单粒子”的影响),系统需要遵循修复策略,利用其冗余空间和TMR模块中尚能正常工作的部分,不断生成功能相同但结构相异的电路,自动、反复地进行试探性的下载和验证。当某种结构恰巧避开故障单元时,便可认为得到了能够“旁路”故障的电路,从而实现受损功能的“激活”。该方式甚至能在个别故障单元无法准确测知的情況下,逐步完成其功能恢复或代偿^[26]。实际上,具有足够冗余空间的FPGA芯片只要不是出现全局性 or 大范围的毁损,便有望以此方式达到“修复”的目的。

3.4 电磁仿生防护的工程策略

尽管电子系统抗干扰和自修复问题形式复杂,但仿生模式的建立有望成为设计空间的拓扑结构规划和参数寻优的有力工具,以直接进行自动搜索或实现复杂算法的维数降解。进而,可在多芯片并行技术与相应的密集型进化基础之上,完成“演化生成-容错运行-演化修复”的“三防线”结构研究。若能再进一步,则是争取迈向“环境自适应”等更高目标。从工程角度而言,其基本实现策略如下:

(1) 电磁抗扰功能电路的演化生成

借鉴生物神经系统抗扰模型,经由演化生成基本电路^[27]。如能在特定的干扰环境下生成,则可认为该电路针对此类干扰拥有了“自然免疫”。

(2) 核心部件三模方式的冗余校验

以TMR方式构建控制系统实现容错运行,旨在故障时能够尽量保持工作状态,延长其故障或受损后系统的生存时间,先行争取修复时机^[28]。

(3) 同步于容错运行的在板演化

TMR中任一模块的故障均应立即触发进化过程。在容错运行基础上,同步进行针对故障的搜索、定位和类型判断。只要故障模块不是全局毁损,就可尝试在板演化^[29],利用FPGA中的冗余单元重新进行结构配置,以避让故障环节、重现模块功能,甚至恢复正常的三模块结构。

(4) 满足自适应要求的结构调整

若是系统需要频繁修复,必定意味着环境中导致故障的因素太多,或是系统对环境的“适应度”欠佳。因此尚可继续演化,在具有相同功能的不同结构中反复选择,直到自动适应相应的环境为止^[30]。进而,再行完成其可靠性评测、判定等工作。

4 结 论

实用程度较高的仿生类项目大都需要跨接于强电(高电压、大功率等)、弱电(控制电路、微弱信号等)、生物电(静息电位、动作电位、膜离子流等)等领域,并需综合实现。电磁仿生工作有望促进这“三电”协调、共同提高的良性循环的形成。这既是对传统的抗扰方式予以补充、强化和完善的有效切入点,又是多学科融合之后所诞生的技术增长点,甚至可能成为生物电工领域中某些课题的长远立足点。尽管目前仍然面临诸多理论难点和技术障碍,但其广阔的应用前景和稳定的发展态势业已初现端倪。特别是量子器件^[31]和量子计算方式^[32]的出现,又为电磁仿生研究提供了更为新颖、实际的动力源和参照系。同样可以认为,今后电子-生物结合的重要程度,决不亚于早年电子-机械结合的革命性意义,而且其规模和影响可能更为宏大和深远。

参考文献

- [1] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(1): 1-5
- [2] Sekanina L. Gate-level optimization of polymorphic circuits using Cartesian genetic programming. In: Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, Trondheim, Norway, 2009. 1599-1604
- [3] 刘尚合,原亮,褚杰. 电磁仿生学——电磁防护研究的新领域. 自然杂志, 2009, 31(1): 1-7
- [4] 路甬祥. 仿生学的意义与发展. 科学中国人, 2004 (4): 22-24
- [5] 李建桥,任露全,田喜梅. 工程仿生学的新进展. 国际学术动态, 2009, 6:34-36
- [6] 李朝义. 神经仿生学. 科学中国人, 2004, 4: 31
- [7] 徐建兴. 纳米机器人——分子仿生学新领域. 中国高新技术企业, 2001, 2:39-40
- [8] 程志军,谢少荣. 视觉仿生学研究现状及展望. 机械工程师, 2010, 4: 24-27
- [9] 蒋冬青. 建材仿生学研究综述. 陕西建筑与建材, 2004, 8:14-16
- [10] 邓爱华. 科学家聚焦仿生学. 科技潮, 2004, 4:8-11
- [11] 全国科学技术名词审定委员会. <http://baike.baidu.com/view/803.htm>
- [12] 周衍椒,张镜如. 生理学. 第三版. 北京:人民卫生出版社, 1991. 13
- [13] 刘尚合,褚杰,原亮. 电子系统的电磁仿生研究与进展. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(1): 2-6
- [14] Andy M T, Floreano D, Tempesti G, et al. POEtic tissue: an integrated architecture for bionic-inspired hardware. In: Proceedings of the 5rd International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware, Trondheim, Norway, 2003. 129-140
- [15] 丁桂荣,郭国祯. 电磁辐射对血脑屏障通透性的影响及其机制研究进展. 中华劳动卫生职业病杂志, 2009, 27(9):562-565
- [16] 常小龙. 密码芯片抗电磁侧信道攻击逻辑电路研究:[硕士学位论文]. 石家庄:军械工程学院计算机工程系, 2010. 31-32
- [17] 刘文冰. ESD 抗扰度试验方法和试验平台研究:[硕士学位论文]. 石家庄:军械工程学院计算机工程系, 2007. 27-29
- [18] Yang H Q, Chen L G, Liu S T, et al. A flexible bit-stream level evolvable hardware platform based on FPGA. In: Proceedings of the 2009 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, San Francisco, USA, 2009. 51-56
- [19] 陈利光. 适合于硬件进化的 FPGA 平台设计实现:[博士学位论文]. 上海:复旦大学信息科学与工程学院, 2009. 55-56
- [20] 满梦华,巨政权,原青云等. 基于电磁仿生概念的静电放电注入损伤防护模型设计. 高电压技术, 2011, 37(2):375-381
- [21] 何国良,李元香,史忠植. 基于精英池演化算法的数字电路在片演化方法. 计算机学报, 2010, 33(2): 365-372
- [22] 褚杰. 基于仿生思想的容错电路自律机制研究与模型建立:[博士学位论文]. 石家庄:军械工程学院静电与电磁防护研究所, 2009. 28-29
- [23] 原亮,丁国良,刘文冰等. TMR 整体硬化技术及其在电控系统中的应用. 计算机工程, 2006, 32(21): 249-251
- [24] 巨政权,原亮,满梦华等. 电子系统的层次分解与建模. 现代电子技术, 2011,34(5):18-20
- [25] 姜建安. 基于演化硬件的数字电路自主修复方法研究:[博士学位论文]. 石家庄:军械工程学院电气工程系, 2010. 81-83
- [26] Yuan L, Huang F Y, Liu W B, et al. FPGA-based experimentation for TMR structure and evolutionary approach of self-recovering. In: Proceedings of the 1st In-

- ternational Conference on Maintenance Engineering, Chengdu, China, 2006. 172-179
- [27] 平建军, 王友仁, 高桂平等. 数字演化硬件函数级在线进化研究. 高技术通讯, 2009, 19(1): 61-65
- [28] 满梦华, 原亮, 丁国良等. 多核异构冗余模型设计与可靠性分析. 军械工程学院学报, 2010, 22(1): 67-71
- [29] 崔新风. 基于神经网络结构模型的数字电路演化设计与实现: [硕士学位论文]. 石家庄: 军械工程学院电气工程系, 2010. 15-18
- [30] 巨政权. 双核异构同步系统多功能平台的研究与实现: [硕士学位论文]. 石家庄: 军械工程学院计算机工程系, 2008. 24-25
- [31] 彭英才, 赵新为, 刘明. 纳米量子器件研究的若干前沿问题. 自然杂志, 2003, 25(3): 145-149
- [32] 周正威, 涂涛, 龚明等. 量子计算的进展和展望. 物理学进展, 2009, 29(2): 127-159

Inception of bionic hierarchy and electromagnetic bionics modeling

Yuan Liang^{*}, Ju Zhengquan^{**}, Man Menghua^{**}, Chang Xiaolong^{**},

Chu Jie^{**}, Ding Guoliang^{*}, Zhou Yongxue^{*}

(^{*} Department of Computer Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

(^{**} Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

Abstract

To facilitate the bionics research, this paper proposes a unified bionics classification code and sets up the bionics coordinates to help the definition of bionics hierarchy and the classification of bionics levels for different types of the studies, including the electromagnetic bionics study. Further more, this paper intuitively explains the fundamentals and subjects that are involved in electromagnetic bionics studies, and introduces a new bio-electro equivalence model in electromagnetic bionic studies. The new model details the study on protection against complex electromagnetic interference and offers the new course for future studies. The principle of "triple defence" on electromagnetic protection is also explained.

Key words: bionics, bionics category, bionics coordinate, electromagnetic bionics, electromagnetic protection