

电磁防护仿生研究进展

刘尚合, 马贵蕾, 满梦华, 张明亮, 张永强

(陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应国家级重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 随着电磁环境日趋复杂及电子系统电磁敏感度不断升高, 传统电磁防护技术的不足正日渐突出, 电子系统的电磁环境适应性面临严峻挑战, 亟需创新电磁防护理论与技术。受生物鲁棒性启发以提高电子系统的抗扰度为目的开展电磁防护仿生研究, 为解决这些科学难题提供了新的思路, 并引起国内外研究者的广泛关注。重点对生物鲁棒性启发的电磁防护仿生研究现状及相关研究进行了较全面的综述。具体阐述了开展电磁防护仿生研究的动机、内涵及研究路线, 综述了近年来国内外开展生物鲁棒性启发的电磁防护仿生研究的最新进展, 指出了该研究面临的挑战及未来潜在的研究方向。

关键词: 电磁防护仿生; 复杂电磁环境; 生物鲁棒性; 生物神经系统; 人工智能

Research Progress of Electromagnetic Protection Biomimetics

LIU Shanghe, MA Guilei, MAN Menghua, ZHANG Mingliang, ZHANG Yongqiang

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: As the electromagnetic environment becomes more complex and the electromagnetic sensitivity of electronic systems increases, the shortcomings of traditional electromagnetic protection technologies are becoming more and more prominent, the adaptability of electronic systems to the electromagnetic environment is facing serious challenges, and innovative electromagnetic protection theories, methods, and technologies are urgently needed. Biomimetic research on electromagnetic protection inspired by biological robustness to improve the immunity of electronic systems provides new ideas to solve these scientific challenges and has attracted wide attention from researchers at home and abroad. This paper focuses on a comprehensive review of the current status and related research of electromagnetic protection biomimetics inspired by biological robustness. The motivation, connotation, and research lines of electromagnetic protection biomimetic research are specifically outlined. The recent progress of biomimetic research on electromagnetic protection inspired by biological robustness at home and abroad is reviewed, and the challenges and potential future research directions of the study are pointed out.

Key words: electromagnetic protection biomimetics; complex electromagnetic environment; biological robustness; biological nervous system; artificial intelligence

0 引言

随着集成电路、人工智能、物联网和 5G 通信技术的迅猛发展, 电子系统向着高集成度、小型化、低功耗和智能化方向快速迭代, 其电磁敏感度也随之升高。与此同时, 大量自然的或者人为的电磁干扰源不断涌现, 空间电磁环境呈现日益复杂、恶劣的态势^[1], 电子系统遭受电磁干扰或电磁损伤而致

使其功能扰动、降级甚至失效的情况时有发生, 威胁着电子信息系统自身乃至整体设备的有效性、可靠性及安全性。屏蔽、滤波、接地及限幅等各种传统电磁防护技术被普遍应用^[2], 并取得了一定的防护效果, 但面对高功率、宽频谱、强大杀伤力的强电磁脉冲干扰以及专用领域的特殊需求, 电磁防护中的瓶颈性问题仍不能很好解决^[3]。亟需突破传统思维和方法束缚, 研究电磁防护新理论、新技术、新材料和新器件^[4-5]。

经过进化的洗礼, 与电子系统面对电磁干扰表现出的易损性相反, 生物系统对体内外环境变化产生的刺激信号都具有一定的反应能力、适应能力与

基金资助项目: 国家自然科学基金(51207167; 51407194); 国防基础科研计划(JCKY2020DC202); 装备预研基金重点项目(6140209020101)。Project supported by National Natural Science Foundation of China (51207167, 51407194), National Defense Basic Scientific Research Plan of China (JCKY2020DC202), Equipment Pre-research Fund Key Project of China (6140209020101).

鲁棒能力,使其自身功能仍可以保持稳定和可靠^[6-7];此外,可见光、红外辐射等作为电磁波,是自然界生物生存环境的重要组成部分,同时赋予了生物材料处理电磁波的能力^[8-11]。大自然这些优异的特性为研究学者开展电磁防护设计提供了源源不断的灵感。着眼大自然中生物的这些天然的优良特性以及电磁防护领域的迫切需求,电磁防护仿生研究^[4,5,12-13]的提出架起了生物领域与电磁防护领域的桥梁,为提高电子系统的电磁防护能力及在复杂电磁环境下的可靠性及适应性提供了新思路。

近年来,随着相关学科之间的深入交叉融合,电磁防护仿生的研究内涵及研究内容得到不断地丰富和发展,电磁防护仿生已逐渐成为学科交叉领域的热点研究方向,同时相关研究成果也不断更新。因此,有必要将新的内容融入到原有的电磁防护仿生研究框架中进行重新梳理,并对涵盖范围更广的电磁防护仿生设计成果进行一次系统的分类及对比。一方面加深学者对该领域的整体认识,另一方面指出该领域研究所面临的挑战及未来潜在的研究方向。希望能吸引不同学科领域的学者,通过跨学科的思想交流与合作研究,推动电磁防护仿生理论与技术的快速发展。

1 电磁防护仿生研究概述

通过模仿生物的形态、结构和功能或从中得到启发,来解决人类发展所面临的技术难题,即谓仿生学^[14]。电磁防护设计是在设计、研制和生产过程中使设备具有抗电磁干扰或电磁毁伤能力而采取的技术措施^[2]。电磁仿生学的提出架起了仿生学与电磁防护设计的桥梁^[4],为提高电子系统自身在电磁干扰环境下的抗扰度和可靠性开辟了新的途径,引起国内外学者的广泛关注。

随着电磁防护仿生研究的持续深入,近年来相关文献^[12-13,15]及学术会议^[16-17]将“电磁仿生学^[4]”更多地表述为“电磁防护仿生”,一方面突出了仿生设计面向电磁防护应用这一研究目的,另一方面扩展了仿生对象的选取范围,例如生物的材料结构^[9-10,18-20]、蛋白调控机制^[21]、生物免疫机制^[22]等,而不仅仅局限于生物处理电磁信号以及抵御电磁干扰的机制。

电磁防护仿生研究属于新兴的仿生学研究,是电磁学、生物学、电子学、材料学等学科的交叉。根据国际标准化组织 ISO/TC266 仿生学技术委员会

制定的国际标准 ISO 18458-2015^[23]规定的有关仿生学的术语,电磁防护仿生所涉及的“仿生学”可译为“Biomimetics”,电磁防护仿生的英文表述则为“Electromagnetic Protection Biomimetics”。电磁防护仿生的研究内涵是^[4,13,15]:基于仿生学原理实现用于电子系统电磁防护加固的仿生设计,从而满足抵御不同电磁干扰或电磁毁伤的需求,实现对现有电磁防护技术的强化、补充与完善。本文将符合这一研究内涵的相关研究工作纳入到本文的讨论中,以激发读者的研究灵感。

近十年来的研究文献显示,电磁防护仿生研究一般以电磁防护问题为牵引,进而在生物中寻求解决方案,如图 1 所示;电磁防护仿生研究也可以以电磁防护仿生应用为牵引,比较典型的代表是电磁防护仿生材料研究,可直接从生物仿生对象出发开展创新性仿生设计,其可选的研究路线大致经过图 1 中的第 5—8 步。但是无论采取哪一种研究路线,实现生物机制从生物领域向电磁防护设计技术领域的转换最为关键。而为了实现领域转换的目标,则需要对电磁防护问题或生物机制进行合理地抽象。

众所周知,形成电磁干扰或电磁危害的 3 要素包括电磁干扰源、电磁能量耦合途径和电磁敏感对象。因此,实现电磁防护设计的途径主要有 2 种,即抑制电磁干扰源到敏感对象的电磁能量耦合和提高电磁敏感对象的抗扰度^[2]。当前,电磁防护仿生研究领域的研究学者也主要围绕这 2 个目标开展研究,主要涉及电磁防护仿生材料设计^[9-10,18-20]及生物鲁棒性启发的电子系统抗扰性设计 2 个方面,本文主要对后者的相关研究内容及进展进行综述。

2 生物鲁棒性启发的电子系统抗扰性设计

生物鲁棒性是指生物系统在受到内外因素扰动下维持特定功能的一种系统属性^[6,24],是生物经过漫长进化的结果以及生物系统适应环境必不可少的关键特性,它普遍存在于单个基因的表达、单个细胞的表达以及发育过程中分化细胞的表达方面,还存在于信号转导网络、代谢网络、神经网络、基因表达调控网络等大型网络中以及包含细菌趋化性、昼夜节律在内的较小生化网络中^[25]。

尽管电子系统与生物系统传输的信号有差异,但 2 者的相似之处表现在诸多方面。①与电子系统的各种电磁干扰类似,神经系统内充斥着各种噪声,如感觉噪声、电噪声、突触噪声以及运动噪声等,

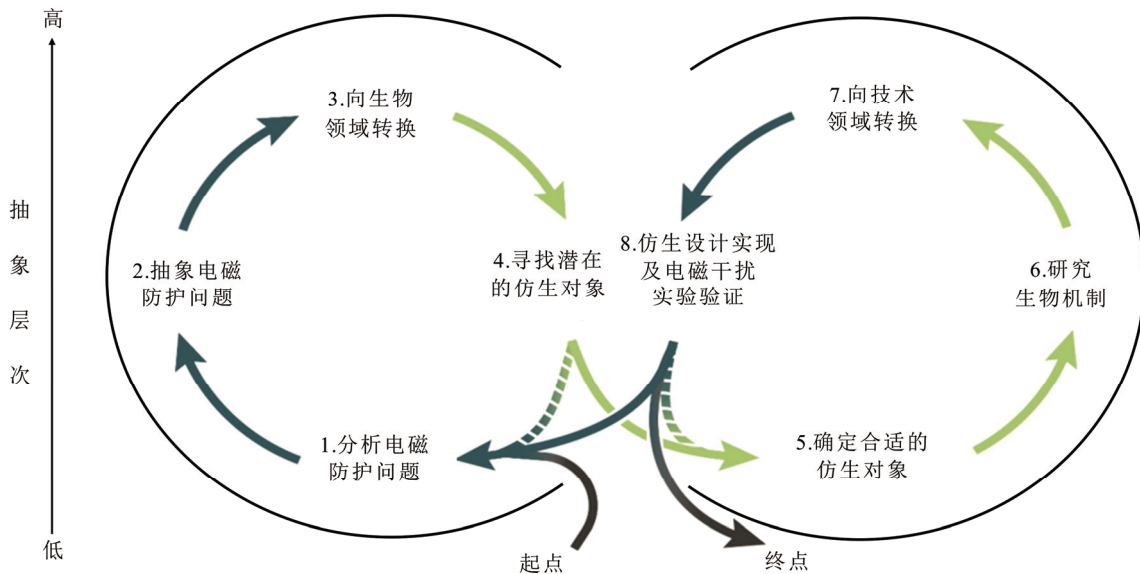


图1 问题驱动的电磁防护仿生研究路线示意图

Fig.1 Problem-driven process of electromagnetic protection biomimetics

但神经系统不同于电子系统，其神经信息处理功能依然可靠^[26]，并且还可以有效利用噪声(例如随机噪声)来执行感知、捕食等生理功能^[27]。②与各种电子系统的辐射发射类似，动物机体中各种带电离子和运动的偶极子会向外辐射各种电磁波，并且在组织器官水平、生物体的宏观电磁学特征更加明显，例如神经元的动作电位、心电、心磁、脑电、脑磁等^[28]。然而，生物体内各细胞、各组织、各器官可以有序的工作而互不干扰，表现出时域和频域的高度兼容性^[29]。③与电子系统的电磁损伤类似，生物体在一定电磁场作用下生物体会产生一些生物电磁效应，例如神经元放电活动受扰^[30]、离子浓度和跨膜电位的波动、DNA 损伤、染色质扰动、甚至细胞凋亡等^[31]，但经过进化的洗礼，赋予了生物系统抵御一定干扰、容忍损伤并且自修复的特性^[21,32]。④与无线通信系统依赖电磁波进行通信类似，生物细胞同样可能依靠电磁波进行信息传递，并且不受干扰环境的影响^[33-34]；另一个不是依赖电磁波通信、但较为相似的例子是，一群蝙蝠共用超声波频段进行观察、捕食与交流，面临着嘈杂的声环境^[35]，但从未发生类似多部雷达或电台间的同频干扰现象。诸如此类的例子不胜枚举，生物系统中普遍存在的生物鲁棒性为电子系统的抗扰性设计提供了源源不断的灵感，研究学者正在遵循以电子系统模仿生物体结构、功能或鲁棒性原理的思想^[36]，期望获得类似生物系统的鲁棒性，从而提升其在复杂电磁环境下的抗扰度，如图2所示。

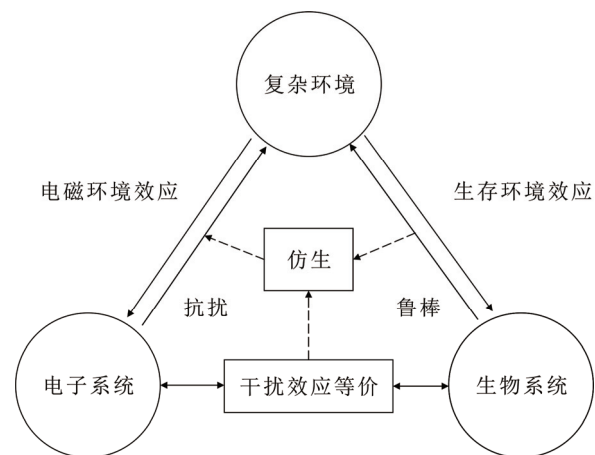


图2 生物鲁棒性对电子系统抗扰性设计的启示

Fig.2 Enlightenment of biological robustness to immunity design of electronic system

2.1 生物鲁棒性研究

探究生物系统的鲁棒性机制是实现电子系统抗扰性仿生设计的基础和前提。基于电磁防护仿生研究领域的研究热点，本节主要围绕生物系统的进化机制、生物神经系统鲁棒性研究以及生物基于电磁波通信机制的研究进展进行概述。

2.1.1 生物系统的进化机制

进化也称演化，是指系统能够产生可遗传的、可被选择的表現型^[37-38]。它能够降低有害变异产生的概率，提高变异产生新颖功能的能力。生物鲁棒性与演化性是相辅相成、相互促进的关系，鲁棒性有利于生物系统的进化，而系统在进化过程中也会

保留鲁棒性较高的功能特征。因此, 生物鲁棒性形成的根本原因是进化^[37]。

生物系统具有进化能力的关键特征是因为具有灵活的多功能蛋白质、弱连接和模块化结构。若将这些特征归纳到统一的鲁棒系统中, 则其体系结构需要具有以下特点: ①保持系统鲁棒性的同时, 应具有较高的遗传多样性; ②具有抗干扰能力较强的功能模块; ③具有模块化的核心功能处理单元, 各模块间相互协调工作能够实现多种功能表现型。

满足以上需求的一种系统结构为嵌套式的蝶形体系结构^[6], 如图 3 所示。此结构的 2 个特征有利于系统演化性和鲁棒性的提高。首先, 核心处理模块通过多功能通用接口与大量多种多样的输入、输出模块交互。这既能有效地降低各个核心处理单元与多种输入输出模块之间交互的复杂性, 又能将刺激输入与响应输出有效地隔离, 实现退耦机制。此时, 只需要保持核心处理模块具有较高的鲁棒性, 而不需要所有刺激-响应关系都具有额外的鲁棒机制。其次, 系统核心处理模块都是基于通用底层单元的网络系统, 底层单元的活化状态相对独立且具有类似开关行为的特征。

2.1.2 生物神经系统的鲁棒性机制

神经系统是一个存在复杂反馈通路和并行分布处理的非线性系统, 具有较高的可靠性和适应能力。从目前的研究看, 通过神经系统的以下几个特点, 可以使上述优良特性得以部分解释:

1) 信息编码方式。神经元发放的脉冲序列被认为是生物神经编码的基本单元。目前被普遍接受的神经信息编码方式包括脉冲平均发放率编码、脉冲时间编码、脉冲序列的相关性编码^[39], 主要依赖神经元集群实现。神经元集群具有动态特性, 同一神经元在不同的时刻可能参与不同的集群编码。这种组织方式具有较高的效率和可靠性, 个别神经元受到干扰或者死亡并不影响集群对信息的编码与处理。其中, 神经元同步放电现象是神经元实现集群编码的一种重要表现形式。2014 年, 文献[40]对 Hindmarsh-Rose(HR)神经元耦合同步网络进行了抗脉冲干扰特性分析, 研究表明神经元间电突触耦合强度的分布对网络的抗脉冲干扰特性影响较大。同年, 文献[41]对噪声环境下 FitzHugh-Nagumo(FHN)神经元同步放电网络的抗扰特性进行了研究, 发现神经元放电同步程度与抗扰特性强弱间具有近似线性的内在关系。2021 年, 文献[42]克服了 HR、FHN

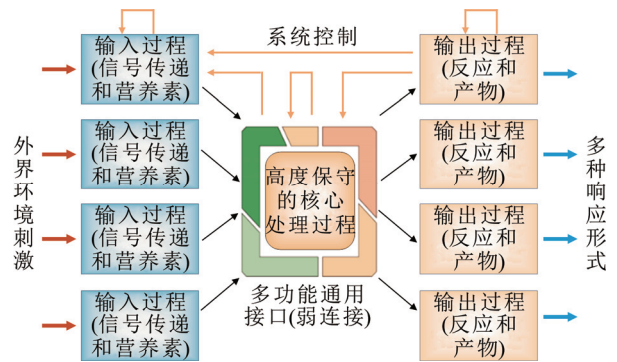


图3 嵌套式的蝶形体系结构^[6]

Fig.3 Architectural framework of bow-tie structure^[6]

神经元模型以及电突触模型在反映生物神经元及突触的生理实际方面的局限性^[43], 基于更接近生理实际的 Hodgkin-Huxley(HH)神经元模型及 Leonid 化学突触模型构建了具有生物属性的神经网络模型, 并进一步证实了生物神经元同步放电行为对噪声干扰的抑制作用, 且通过对比发现改变神经元间耦合强度得到的抗扰效果比改变网络拓扑结构得到的抗扰效果更优。

此外, 文献[44-45]还评估了噪声干扰及参数波动下单个神经元编码的抗扰特性, 研究表明基于符号序列排序性的神经编码机制(即 S 空间编码)是神经元抵御输入噪声干扰及参数波动的一种重要机制。

2) 简并性^[46]。这是一种系统内不同结构的部件在特定环境下具有相同功能或产生相同输出的一种属性, 被普遍认为在实现生物系统鲁棒性方面发挥着重要作用^[25,37,47-50]。简并性现象在生物系统各个层次中普遍存在^[50], 例如在遗传编码中, 多种三联密码子对应一种氨基酸^[49]; 在神经系统中, 不同结构的神经元回路在特定状态下能产生相同的功能^[51]; 等等。张宏等构建了双耳声音定向的简并性神经回路生物学模型, 通过仿真分析证明了神经系统存在简并特性^[51]。听觉神经系统利用不同回路的共性实现信息处理, 利用不同回路的个性提高系统的适应能力。因此, 简并的听觉系统能够大大提高信息处理的精度和可靠性。满梦华等构建了基于前馈布尔网络的生物细胞网络模型^[52], 揭示了相比冗余, 简并与生物细胞网络的功能鲁棒性的相关性更显著, 且随着简并度升高, 该网络的鲁棒度升高。2016 年, 满梦华与英国皇家科学院院士 Karl Friston 等基于信息熵和互信息理论提出了生物神经网络简并性的量化方法^[53], 证明了真实生物神经网络中简

并性的存在。

3) 并行分布处理^[54-55]。神经系统中每个神经单元具有一定的独立性, 神经元会对其他相邻神经元产生影响, 但不会唯一决定其他神经元的行为。由于并行分布处理特性的存在, 部分神经元的死亡只会引起神经网络功能的逐渐退化, 而不是突然丧失。

4) 突触可塑性^[56]。突触可塑性是指突触在形态和传递效能上能够改变的特性, 是构成记忆和学习的基础。一般而言, 突触权重取决于突触前神经元递质的释放量和突触后神经元膜上的受体类型及电学特性。这些因素的改变会导致突触权重的变化, 形成突触可塑机制, 从而使神经系统具有动态和复杂的结构, 表现出优良的适应性和鲁棒性。

2015年, 文献^[57]仿真分析了在突触及神经元损伤下神经网络输出放电率的变化, 发现基于脉冲时间依赖可塑性(spike-timing-dependent plasticity, STDP)机制的神经网络具有很好的抗扰能力, 且这种能力与STDP机制密切相关。2017年, 文献^[58]研究高斯白噪声和脉冲噪声刺激下小世界脉冲神经网络的信息编码特性, 发现在相同的激励条件下, 小世界网络的平均频率编码和脉冲间隔(inter-spike interval, ISI)编码所编码的响应均随刺激强度的增加而增强; 在不同的刺激下, 小世界网络的平均频率编码和ISI编码均表现出各自的特异性。近年来, 河北工业大学郭磊教授研究团队还分别研究了高斯白噪声、脉冲干扰、交流电场刺激以及损伤等各种干扰刺激下基于突触可塑性的前馈^[59-60]、小世界^[58,61]、无标度^[62-63]脉冲神经网络的抗扰特性。研究表明, 神经网络在突触可塑性的调节下有一定的抗高斯噪声、脉冲干扰及交流电场干扰的能力; 神经网络在受到神经元损伤情况下, 突触可塑性权值动态调控过程与网络抗扰性能呈显著相关^[62]; 在随机攻击神经元节点时, 无标度脉冲神经网络的抗扰性优于小世界脉冲神经网络; 而在蓄意攻击高等度节点时, 小世界脉冲神经网络的抗扰性优于无标度脉冲神经网络^[63]。

2.1.3 生物基于电磁波通信的机制

近年来, 美国国防高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)国防技术办公室发布的“无线电生物(RadioBio)”项目^[33-34]相关研究成果表明生物细胞间存在基于电磁波通信的行为^[64-71], 如图4所示^[72]。其中, 生物细胞天线是实现电磁波通信的关键。

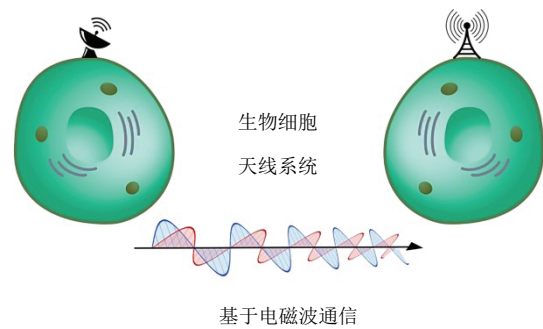


图4 生物细胞间基于电磁波通信的示意图^[72]

Fig.4 Schematic diagram of electromagnetic communication between biological cells^[72]

相关研究团队围绕微管^[64-66]、细菌^[68,70]以及植物细胞^[69,71]开展研究, 主要关注生物细胞内或细胞之间射频到微波频段内的电磁通信现象, 试图建立生物天线模型, 揭示生物细胞依靠电磁波通信的证据。与传统天线凭借电导体中的高频电流转变成电磁波的机制不同, 生物细胞中的天线主要考虑由带电或极性生物分子的机械振动产生交变电场从而转变成电磁波的机制, 比较有代表性的研究包括基于微管及细菌的生物天线研究。

1) 基于微管的生物天线研究

微管是真核细胞细胞骨架和纤毛中普遍存在的一种纤维结构, 由 α 、 β 蛋白构成, 其外形笔直, 横切面呈圆管状。加州大学圣地亚哥分校海洋生物学家Dimitri Deheyn及电磁学领域专家Daniel Sievenpiper建立的交叉学科团队^[64-66]将处于高频机械振动中的微管视为产生交变电场的谐振器, 并假设当谐振器产生的交变电场 >1 kV/m时, 其磁场能量可以超过背景热能, 从而实现电磁通信。

通过计算不同振动模式、阶数及幅度下 $1 \mu\text{m}$ 长的微管外任意一点场强, 发现只有在高振动阶和较大振幅下, 在距离微管轴心 $10\sim 100$ nm范围内处可以产生 >1 kV/m的场, 从而使其可能与距微管轴心 100 nm以内的生物分子产生相互作用。如果这种相互作用具有信息传递的作用, 则该团队推测这种作用有可能是实现了短距离的细胞内调节^[65]。此外, 为了克服高频振动不被周围的生物介质过度阻尼, 该团队还提出了由微管谐振实现电磁通信的限制条件: 即微管谐振器应足够大, 从而满足高品质因子的要求, 但品质因子不能大到使得其在低于等离子体频率之下的频率谐振^[66]。

2) 基于细菌的生物天线研究

生物膜是一种或多种类型的微生物聚集体, 它们可以在许多不同环境及不同表面中形成和生长。形成生物膜的微生物包括细菌、微生物和真菌。密歇根大学应用电磁学领域 Kamal Sarabandi 教授团队^[68,70]认为细菌生物膜内的细菌细胞自带“天线”, 从而允许它们向相邻细胞和周围环境发送和接收信号。

为验证该猜测, 该团队以金黄色葡萄球菌生物膜为研究对象, 提出由于细菌生物膜内细胞间实现电磁波通信的假设^[68,70]: 即细胞产生的热量使得与其细胞膜较接的带电淀粉样原纤维产生加速振动或偏转移动而向外辐射有目的的电磁波信号; 根据互易定理, 传输的电磁波信号对附着在相邻细胞上的淀粉样原纤维的永久偶极子施加力, 从而将电磁波能量转化为机械能, 细胞感知到这种振动, 就表示从相邻细胞那里接收到信息。该团队依据该假设建立了细菌细胞依靠带电淀粉样原纤维实现电磁波信号传递的天线模型。通过计算 2 000 个生物天线相互作用的所有共振频率, 发现细菌细胞可以在 kHz 至 MHz 范围内实现电磁信号传递。此外, 该团队还利用通信信道理论, 证明了细菌细胞基于电磁波的通信比依赖于分子扩散的群体感应具有更高的信道容量, 且在数据传输速率和通信距离方面具有显著优势^[70]。

以上研究表明, 生物系统细胞环境极其嘈杂, 生物细胞之间尺度的差异化、细胞内具有有损散射的水溶液、热环境、以及外界复杂电磁环境等都会对生物细胞天线间的发射、接收或者感知电磁信号产生一定影响。生物细胞独特的天线设计一旦被揭示, 将对复杂电磁环境下无线通信系统的抗扰性设计具有重大启示意义^[73]。

2.2 模仿生物进化机制的数字电路鲁棒性设计

静电放电(electro-static discharge, ESD)作为一种典型的电磁脉冲, 威胁着电子系统的可靠性^[74]。遵循问题牵引的电磁防护仿生研究路线, 研究者探究了现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)、多功能逻辑门器件(multifunction logical element, MLE)构成的数字电路受 ESD 干扰及损伤的效应规律, 发现数字电路在受到损伤后, 其功能呈逐步下降的趋势而非直接失效的规律, 这与生物系统受伤或细胞死亡而导致功能逐渐下降的现象类似^[75-76]。根据演化硬件技术模仿生物进化机制的特点, 陆军工程大学石家庄校区(原军械工程学

院)研究团队^[75-78]率先提出将演化硬件技术引入到电磁防护设计领域, 以实现数字电路电磁损伤后的功能自修复。

文献^[78]基于结构自组织、环境自适应、故障自修复的生物自律三特性和笛卡尔遗传编码的思想, 提出一种基于演化硬件技术的通用嵌入式系统在线故障自修复模型; 基于演化硬件技术, 文献^[79]还设计实现了一种可演化的组合逻辑数字电路系统, 并验证了其在静电放电干扰环境下的高可靠性; 文献^[80]通过引入关键函数对 ESD 自修复数字电路模型进行了改进, 提高了电路修复概率和速度, 并应用于无刷直流电机控制系统中的换相电路。文献^[81]将三模冗余容错机制、多层前馈神经网络结构、演化硬件技术三者有机结合, 提出了三模冗余演化仿生自修复系统, 并应用于无刷直流电机控制电路。该系统比单纯基于演化硬件技术及普通三模冗余的硬件系统具有更高可靠性和更强适应性, 使其能够适应并稳定工作于较为复杂、多变的恶劣电磁环境中。对比以上研究发现, 通过设计高效的演化算法以优化可编程单元的连接结构, 成为提升自修复系统修复概率、速度和降低硬件资源消耗的有效方法, 此外, 通过建立演化自修复系统的马尔科夫模型对其可靠性进行评估是一种常被采用的可靠性评估方式。

区别于以上单纯从原理上模仿生物进化机制的仿生自修复模型, 2012 年满梦华等人^[75,82]提出了一种新颖的、基于细胞结构的可演化数字电路模型, 如附录 A 图 A1 所示。该仿生数字电路模型^[82]包括一个可重构数字电路(reconfigurable digital circuit, RDC)和一个演化引擎。类比细胞结构和功能, 其中 RDC 模仿细胞质的功能来完成逻辑运算和通信任务, 由 MLE 构成的可编程多功能节点互连组成。演化引擎由嵌入式处理器和遗传算法构成, 模仿细胞核和高尔基体的功能, 其主要任务包括 2 部分: (1)诊断并检测 RDC 中电路功能是否发生故障, (2)利用(1+ λ)演化策略算法修改染色体的信息以改变 RDC 内的电路拓扑结构, 直至满足结束演化条件(演化代数为 10^4), 结束演化。

基于 ESD 对数字电路的干扰效应结果及以上可演化数字电路模型, 文献^[82]对受到不同 ESD 干扰程度的 4 种功能电路进行演化设计, 仿真结果表明这 4 种电路最高可抵御 65%计算节点的 ESD(放电电压 <0.5 kV)干扰以及 100%计算节点的 ESD(放

电电压 >0.5 kV)干扰。

2.3 模仿生物简并性的数字电路鲁棒性设计

以上基于演化硬件的仿生自修复系统都属于在线自修复,对修复速度及实时性有较高的要求,且其中作为演化算法载体的控制芯片将成为电磁干扰的薄弱环节。为此,文献[83]将生物简并性引入到基于细胞结构的可演化数字电路^[82]的设计中,采用离线演化的方式,得到一些高简并度的数字电路,使其ESD抗扰度得到显著提升,证明了简并度提高是可演化数字电路鲁棒度提高的直接原因。其中,对数字电路的简并度计算参考生物系统的度量方法^[46],其主要思想是计算系统内不同结构子集间功能贡献度的重叠量,从而得到数字电路的简并度(degeneracy, D),其计算方法详见附录B式(B1)。

不同于文献[84]分别考虑低压及高压ESD干扰效应结果的情况,文献[85]同时考虑3种ESD干扰效应以相同概率对数字电路功能的影响情况,并通过计算数字电路在不同ESD干扰效应下维持其既定功能的功能完备度来评估该数字电路的ESD抗扰度(immunity, I),其计算方法详见附录B式(B2)。通过评估发现,演化生成的高简并度2位全加器功能电路ESD抗扰度最低为76%,最高到达94%,c17及majority功能电路的最高ESD抗扰度分别为94%和90%,这比文献[82]所报道可演化数字电路的ESD最高抗扰度的平均值有了显著提升,验证了将生物简并性引入到数字电路的演化设计中以提升ESD抗扰度的有益效果。

2.4 生物神经鲁棒性机制启发的神经形态电路抗扰性设计

生物神经系统与神经形态硬件系统呈现出多尺度对等映射的关系^[84](如图5所示),在组件及网络层面,硅基神经形态硬件系统包含模拟生物神经元及突触特性的神经元电路和突触电路、以及类生物神经网络的结构,其中突触电路中 U_{pre} 、 U_{post} 分别模拟突触前电位及突触后电位, $C_{membrane}$ 模拟神经元细胞膜膜电容, $E_{reversal}$ 模拟离子通道的反转电位;在离子传输层面,亚阈状态的金属-氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)中载流子跨势垒扩散与跨神经元细胞膜的离子流动类似,因此生物神经系统的鲁棒性机制对神经形态硬件系统的抗扰性设计提供了最为直接的灵感^[85]。

常小龙等以基于神经元同步放电实现集群编

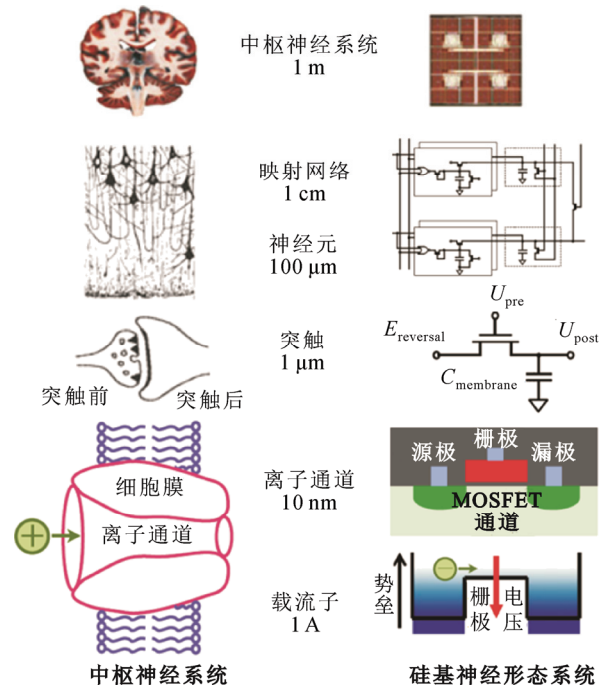


图5 不同尺度下中枢神经系统与硅基神经形态系统的对比^[84]

Fig.5 Comparison of the central nervous system and silicon-based neuromorphic system at multiscale levels^[84]

码功能的生物神经网络为蓝本,直接模仿生物神经网络的结构和功能,提出了一种同样具有集群编码功能的生物启发的电磁防护模型(bio-inspired electromagnetic protection model, BEPM),如附录A图A2所示^[41,86]。该模型由神经元电路和突触电路构成,其中神经元电路可以将接收的电压或电流信号转换为神经脉冲信号,突触电路的功能是根据2个神经元电路膜电位(如神经元电路 k 的膜电位 a_k 和神经元电路 l 的膜电位 a_l)的状态,为相互耦合的神经元电路提供实时的反馈调节信号(如神经元电路 l 对神经元电路 k 的反馈调节信号 w_{li} 和神经元电路 k 对神经元电路 l 的反馈调节信号 w_{lk}),从而使2个神经元电路之间产生同步发放神经脉冲的行为,进而实现集群编码功能。此外,文献[86-87]还利用互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)模拟电路技术设计实现了BEPM,并实验证明了BEPM对正、负脉冲干扰的明显抑制作用,进而确保了干扰环境下可靠的信息编码功能,为具有图像信号处理功能的脉冲耦合神经网络硬件的电磁防护设计提供了一种新思路^[87]。

不同以上基于CMOS模拟电路技术实现神经形态电路设计,兰州交通大学逯迈教授团队致力于基于数字芯片FPGA的神经网络硬件设计^[88-91],先

后实现了基于 FPGA 的 HH 神经元硬件^[89]及 5 种具有不同机理的化学突触硬件^[90-91], 为实现更符合生物实际且多样化拓扑结构的高抗扰度神经网络硬件提供了技术基础。该团队基于以上研究成果还构建了包含 10 个 HH 神经元及 1 种化学突触的神经网络硬件^[92], 通过改变网络拓扑结构及增加神经元之间的耦合强度, 分别实现了链式、环式以及复杂网络拓扑结构的具有同步化放电行为的神经网络硬件^[93]。

通过以上研究可以看出, 当前设计的基于神经元同步放电集群编码功能的神经形态硬件的防护能力上限还未可知, 但参考具有同步放电行为的 FHN 神经元网络模型^[41]以及 HH 神经元网络模型的仿真分析结果^[42]可知, 继续增加构成该神经形态硬件的神经元电路数量、神经元电路之间的突触电路连接数量以及耦合强度, 将有助于其电磁防护能力的提升。

2.5 人体免疫机制启发的系统级电磁防护设计

人体免疫系统是人体免受各种病原体侵害的关键防御系统, 是电磁防护仿生设计的又一灵感所在。以电磁防护仿生应用为牵引, 张耀辉等发现工程系统级高功率电磁防护体系与人体免疫系统具有相似性^[22]: 在结构方面都表现出多层次防御的特点, 在反应过程方面对外界干扰的防护都分为识别、反应、效应等阶段。基于以上结论, 文献^[22]从结构上模仿生物免疫系统, 建立了具有 3 道防线的工程系统级高功率电磁防护仿生体系, 旨在利用电磁防护材料、防护模块及电子系统电磁防护加固设计方法依次从空域、能域及重要敏感电子设备或系统方面对高功率电磁干扰进行各层级防护; 从功能上仿生, 提出模仿免疫识别建立入侵电磁信号实时监测系统的思路、模仿免疫系统的预警及记忆功能对高功率电磁信号进行预警防护的设计思路、以及模仿免疫系统的自适应调节功能实施弹性防护、增加电子设备或器件的可调性等。一方面提高了电子系统的主动防护能力, 另一方面为解决对高功率电磁干扰“欠防护”或“过防护”的问题提供一种有效的解决途径。

3 总结与展望

电磁防护仿生研究作为创新电磁防护理论与技术的一种有效途径, 已成为电磁防护领域未来发展的重要方向和研究热点。尤其, 近十年来, 来自不同学科领域专家的思想碰撞, 在生物鲁棒性启发的电子系统抗扰性设计方面取得了开创性的进展和

突破。

首先, 在生物鲁棒性研究方面, 构建了前馈、小世界、无尺度等属性的生物神经网络模型以及生物细胞天线等基础物理模型; 重点探索了生物系统的进化机制、生物神经系统的鲁棒性机制(如神经信息编码方式、简并性及突触可塑性等)、生物基于电磁波通信的机制等。其次, 在仿生设计方面, 基于生物鲁棒性的研究成果, 一是基于问题牵引的研究路线, 研究者模仿生物进化机制, 将演化硬件技术应用到数字电路的 ESD 抗扰设计方面, 证明了该仿生设计方法是使受 ESD 干扰或损伤的数字电路像生物系统一样实现演化自修复的一种有效途径; 二是模仿生物系统简并性结构及功能的特点, 结合信息熵的数学理论在数字电路拓扑设计中引入简并特性, 提出了数字电路的简并性度量方法, 并以提高数字电路的简并度作为提高数字电路抗扰特性的一种新颖的途径; 三是, 根据神经形态电路与生物神经网络在结构与功能层面的相似性, 构建了一种同样具有集群编码功能的生物启发的电磁防护模型, 并验证了其抵御正、负脉冲干扰的有益效果; 四是, 受人体免疫系统鲁棒性机制的启发, 提出了基于仿生的工程系统级高功率电磁防护设计理论。

以上成果显示出将生物鲁棒性机制引入电子系统电磁防护设计的优势, 但需要指出的是, 受限于现阶段对生物系统及电磁防护领域问题的认识深度以及生物机制到电磁防护设计领域的转换难度, 从生物中汲取灵感开展电磁防护仿生设计研究仍处于初级研究阶段。未来需要进一步加强生物学、电磁学、电子学等多学科领域学者的交流与合作, 来推动对生物体结构及功能特性的深入解析与模仿, 进而提出创新性电磁防护仿生设计, 提高电子系统在复杂电磁环境下的自主电磁防护能力及适应性, 有效保障好电子系统的电磁安全。

此外, 立足当前的研究现状及面向实际应用的现实需求, 电磁防护仿生研究还面临诸多挑战, 一些新的研究思路还有待探索。

1) 电磁防护仿生研究需要继续深入探究生物应对干扰或损伤的鲁棒性机制。生物系统具有模块化的属性, 当前的鲁棒性研究只关注了系统模块的一个侧面, 生物系统模块内不同细胞、组织及结构相互作用、协同配合产生鲁棒性功能的行为过程还有待进一步探究。此外, 生物电磁信息处理的鲁棒性机制研究还需重点突破生物细胞基础物理建模及

生物电磁信号探测技术。一是,当前物理模型的构建存在诸多假设,需要进一步将有损散射的水溶液、细胞尺度差异性、细胞热环境等考虑在内,进一步揭示基于电磁波的信息传递机制;二是为了给当前仿真结果提供真实测试数据支撑,实现微纳米级别生物电磁波的探测技术还有待开发。

2) 电磁防护仿生研究需要继续突破领域转换的壁垒。这既需要国家及地方科技部门政策引导和投入支持,也需要不同学科领域科技人员的密切交流和通力合作,共同推动。特别是通过生物领域与电磁防护领域的科技人员之间的密切配合,综合考虑电子系统与生物系统在结构和/或功能层面的对应关系,以及对生物鲁棒性机制及电磁防护问题的合理化抽象,是加快生物鲁棒性机制向电磁防护技术领域的转换、提升电磁防护仿生原型设计有效性的重要途径。

3) 电磁防护仿生研究成果将为人工智能系统的电磁防护设计提供新的思路。前期探索的生物鲁棒性机制及受其启发在电磁防护设计领域的初探为人工智能系统的电磁防护仿生设计打下了良好的理论及实践基础。借鉴已揭示的生物鲁棒性机制,进一步将生物进化机制、自愈机制等引入到人工智能系统的网络元素、拓扑结构或支撑功能的自组织、演化设计方面,将有助于实现电磁环境效应下硬件系统的仿生功能自修复。同时,进一步参考和结合人工智能仿生学部分相关领域的研究成果,将有望实现人工智能仿生应用电磁防护设计的新突破。例如,为提升神经形态智能硬件在电磁环境下的抗扰度,可结合神经形态智能硬件模仿生物神经网络的具体架构和功能特性,并将生物神经系统的简并性机制、集群编码机制以及突触可塑性机制等引入其电磁防护设计中。此外,要做到对人工智能系统具体电磁干扰效应的精准防护,还需要对其开展针对性的电磁环境效应研究,揭示人工智能系统的电磁环境效应规律,从而,以此为牵引在生物神经网络中找到可供借鉴的解决方案。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献 References

- [1] 刘尚合, 武占成, 张希军. 电磁环境效应及其发展趋势[J]. 国防科技, 2008, 29(1): 1-6.
LIU Shanghe, WU Zhancheng, ZHANG Xijun. Electromagnetic environment effect and its development trends[J]. National Defense Science & Technology, 2008, 29(1): 1-6.
- [2] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605-1613.
LIU Shanghe, LIU Weidong. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605-1613.
- [3] 中国信息与电子工程科技发展战略研究中心. 中国电子信息工程科技发展研究(综合篇 2018—2019)[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 134.
China Electronics and Information Strategies. Research on the development of electronic information engineering technology in China (General Topics 2018—2019)[M]. Beijing, China: Science Press, 2019: 134.
- [4] 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.
LIU Shanghe, YUAN Liang, CHU Jie. Electromagnetic bionics: a new study field of electromagnetic protection[J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(1): 1-7.
- [5] 刘尚合, 褚杰, 原亮. 电子系统的电磁仿生研究与进展[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(1): 1-6.
LIU Shanghe, CHU Jie, YUAN Liang. Study and progress of electromagnetic bionics for electronic system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2009, 23(1): 1-6.
- [6] KITANO H. Biological robustness[J]. Nature Reviews Genetics, 2004, 5(11): 826-837.
- [7] BERTOLASO M, CAIANIELLO S, SERRELLI E. Biological robustness: emerging perspectives from within the life sciences[M]. Cham, Germany: Springer, 2018: 4-17.
- [8] VIGNOLINI S, RUDALL P J, ROWLAND A V, et al. Pointillist structural color in Pollia fruit[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(39): 15712-15715.
- [9] HUANG L X, DUAN Y P, LIU J, et al. Bioinspired gyrotropic metamaterials with multifarious wave adaptability and multifunctionality[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(12): 2000012.
- [10] HUANG L X, DUAN Y P, DAI X H, et al. Bioinspired metamaterials: multibands electromagnetic wave adaptability and hydrophobic characteristics[J]. Small, 2019, 15(40): 1902730.
- [11] YANG J J, ZHANG X F, ZHANG X, et al. Beyond the visible: bioinspired infrared adaptive materials[J]. Advanced Materials, 2021, 33(14): 2004754.
- [12] 原亮, 魏明, 褚杰, 等. 电磁防护仿生研究的内容、基础与实现规划[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(S1): 1-4.
YUAN Liang, WEI Ming, CHU Jie, et al. The content, foundation and realization plan of the bionic research of electromagnetic protection[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(S1): 1-4.
- [13] 原亮, 满梦华, 常小龙. 电磁防护仿生原理与故障自修复机制研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(3): 76-85, 102.
YUAN Liang, MAN Menghua, CHANG Xiaolong. Study on principle of electromagneticproof bionics and fault-restore mechanism[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(3): 76-85, 102.
- [14] 田喜梅, 汪润茂. 国际仿生领域高被引论文计量分析[J]. 科技情报研究, 2021, 3(2): 59-71.
TIAN Ximei, WANG Runmao. A bibliometric study on highly cited papers in the field of biomimetics[J]. Scientific Information Research, 2021, 3(2): 59-71.
- [15] 常小龙, 赵国亮, 武翠霞, 等. 电磁防护仿生技术研究的进展与展望[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(4): 1517-1521.
CHANG Xiaolong, ZHAO Guoliang, WU Cuixia, et al. Research progress and prospect on study of bio-inspired electromagnetic protection technology[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(4): 1517-1521.
- [16] 河北工业大学电气学院. 关于举办 2014 年电磁防护仿生学术研讨

- 会的通知[EB/OL]. 天津: 河北工业大学, 2014(2014-09-16) [2021-11-25]. <https://hebut.edu.cn/xzxx/49168.htm>.
School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology. Notice on holding 2014 academic seminar on electromagnetic protection biomimetics[EB/OL]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2014(2014-09-16) [2021-11-25]. <https://hebut.edu.cn/xzxx/49168.htm>.
- [17] 交大新闻网. 2018 年电磁防护仿生交叉学科学术研讨会在西安交通大学召开[EB/OL]. 西安: 西安交通大学, 2018(2018-04-16) [2021-11-25]. <http://news.xjtu.edu.cn/info/1007/88540.htm>.
Jiaotong University News Network. 2018 electromagnetic protection biomimetics cross discipline academic seminar held in xi'an jiaotong university[EB/OL]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018 (2018-04-16)[2021-11-25]. <http://news.xjtu.edu.cn/info/1007/88540.htm>.
- [18] PANG H F, DUAN Y P, DAI X H, et al. The electromagnetic response of composition-regulated honeycomb structural materials used for broadband microwave absorption[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 88: 203-214.
- [19] XU J D, LI R S, JI S R, et al. Multifunctional graphene microstructures inspired by honeycomb for ultrahigh performance electromagnetic interference shielding and wearable applications[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5): 8907-8918.
- [20] ZENG Z H, WANG C X, SIQUEIRA G, et al. Nanocellulose-MXene biomimetic aerogels with orientation-tunable electromagnetic interference shielding performance[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(15): 2000979.
- [21] 耿读艳, 谢红娟, 万晓伟, 等. 基于 DNA 损伤的蛋白调控网络研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 018702.
GENG Duyan, XIE Hongjuan, WAN Xiaowei, et al. Study on regulatory network of proteins based on DNA damage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 018702.
- [22] 张耀辉, 谢彦召, 李跃波, 等. 人体免疫机制对重要基础设施系统级电磁防护的借鉴[J]. *高电压技术*, 2019, 45(8): 2662-2667.
ZHANG Yaohui, XIE Yanzhao, LI Yuebo, et al. Reference of human body immunity mechanism to system level electromagnetic protection of important infrastructures[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(8): 2662-2667.
- [23] ISO. Biomimetics-terminology, concepts and methodology: BS ISO 18458: 2015[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.
- [24] KITANO H. Towards a theory of biological robustness[J]. *Molecular Systems Biology*, 2007, 3(1): 137.
- [25] WHITACRE J M. Biological robustness: paradigms, mechanisms, and systems principles[J]. *Frontiers in Genetics*, 2012, 3: 67.
- [26] FAISAL A A, SELEN L P J, WOLPERT D M. Noise in the nervous system[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2008, 9(4): 292-303.
- [27] MCDONNELL M D, WARD L M. The benefits of noise in neural systems: bridging theory and experiment[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2011, 12(7): 415-425.
- [28] 韩毓旺, 侯亚义, 都有为. 生物电磁特性与电磁生物学效应的概述及最新进展[J]. *自然杂志*, 2010, 32(6): 319-325, 331.
HAN Yuwang, HOU Yayi, DU Youwei. Overview of electromagnetic properties of life and electromagnetic biological effects and their latest progress[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2010, 32(6): 319-325, 331.
- [29] 常 斌. 生物体电磁兼容研究——磁刺激对大鼠心电图的影响[D]. 天津: 天津大学, 2007.
CHANG Bin. Study on electromagnetism compatibility of organism-study on the effects of electrocardiograph on rats with magnetic stimulation[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2007.
- [30] 张 帅, 史 勋, 尹 宁, 等. 基于 H-H 神经元模型的经颅磁刺激对神经元放电活动的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(4): 1124-1130.
ZHANG Shuai, SHI Xun, YIN Ning, et al. Effects of transcranial magneto-acoustical stimulation on neuronal firing activities based on H-H neuron model[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(4): 1124-1130.
- [31] ROMANENKO S, BEGLEY R, HARVEY A R, et al. The interaction between electromagnetic fields at megahertz, gigahertz and terahertz frequencies with cells, tissues and organisms: risks and potential[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2017, 14(137): 20170585.
- [32] 郑秀秀, 包家立, 朱朝阳. 电磁场扰动下的细胞系统鲁棒性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3837-3845.
ZHENG Xiuxiu, BAO Jiali, ZHU Chaoyang. Robustness of cell system under electromagnetic field disturbance[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(12): 3837-3845.
- [33] BANSAL R. RadioBio[turnstile][J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2017, 59(3): 117-153.
- [34] LIN J C. Bioelectromagnetics research programs[health matters][J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2019, 20(1): 14-16.
- [35] CORCORAN A J, MOSS C F. Sensing in a noisy world: lessons from auditory specialists, echolocating bats[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2017, 220(24): 4554-4566.
- [36] 包家立, 朱朝阳. 生物鲁棒性对电磁防护仿生的借鉴[J]. *高电压技术*, 2017, 43(8): 2433-2441.
BAO Jiali, ZHU Chaoyang. Biological robustness: a reference to the electromagnetic protection bionics[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(8): 2433-2441.
- [37] FÉLIX M A, WAGNER A. Robustness and evolution: concepts, insights and challenges from a developmental model system[J]. *Heredity*, 2008, 100(2): 132-140.
- [38] NIVEN J E, CHITTKA L. Evolving understanding of nervous system evolution[J]. *Current Biology*, 2016, 26(20): R937-R941.
- [39] 李 轶. 神经信息处理机理及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
LI Yi. Mechanism and application of neural information processing[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2011.
- [40] 常小龙, 刘尚合, 满梦华, 等. HR 神经网络抗脉冲干扰特性的研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 116-120.
CHANG Xiaolong, LIU Shanghe, MAN Menghua, et al. Research of characteristic of Hindmarsh-Rose network against pulsed interference[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2014, 42(6): 116-120.
- [41] 常小龙, 丁国良, 姜建安. 神经网络同步放电的抗扰特性[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(10): 1485-1490.
CHANG Xiaolong, DING Guoliang, LOU Jian'an. Anti-interference of neuronal network synchronization[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(10): 1485-1490.
- [42] 尚 蕾, 逯 迈. 具有生物属性的小规模电子神经网络抗扰特性仿真研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2021, 34(2): 137-145.
SHANG Lei, LU Mai. Simulation research on anti-interference characteristics of small-scale electronic neuronal network with biological attributes[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2021, 34(2): 137-145.
- [43] 徐冷凤, 李传东, 陈 玲. 神经元模型对比分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(24): 240701.
XU Lingfeng, LI Chuandong, CHEN Ling. Contrastive analysis of neuron model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(24): 240701.
- [44] 满梦华, 张 娅, 马贵蕾. 基于 S 空间编码的神经信息处理抗扰特性研究[C]// 静电放电: 从地面新技术应用到空间卫星安全防护——中国物理学会第二十届全国静电学术会议论文集. 石家庄: 中国物理学会静电专业委员会, 2015: 457-462.
MAN Menghua, ZHANG Ya, MA Guilei. Study on the anti-interference mechanism of neural information processing based on S-space coding theory[C]// *Electrostatic Discharge: From the Application of New Ground Technology to the Safety of Space Satellites-The 20th Chinese Physical Society Proceedings of the 20th National Electrostatics Academic Conference*. Shijiazhuang, China: Electrostatic Committee of Chinese Physical Society, 2015: 457-462.
- [45] MA G L, MAN M H, ZHANG Y Q, et al. Research on the robustness mechanism of Maeda-Makino hardware neuron based on symbolic

- dynamics[J]. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2021, 3(2): 61-66.
- [46] TONONI G, SPORNS O, EDELMAN G M. Measures of degeneracy and redundancy in biological networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(6): 3257-3262.
- [47] EDELMAN G M, GALLY J A. Degeneracy and complexity in biological systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(24): 13763-13768.
- [48] WAGNER A. Distributed robustness versus redundancy as causes of mutational robustness[J]. *Bioessays*, 2005, 27(2): 176-188.
- [49] MASON P H. Degeneracy at multiple levels of complexity[J]. *Biological Theory*, 2010, 5(3): 277-288.
- [50] MASON P H, DOMÍNGUEZ D J F, WINTER B, et al. Hidden in plain view: degeneracy in complex systems[J]. *Biosystems*, 2015, 128: 1-8.
- [51] 张宏, 刘淑芳, 钱鸣奇, 等. 神经系统的简并性与序空间编码分析[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7322-7329.
- ZHANG Hong, LIU Shufang, QIAN Mingqi, et al. Analyses of degeneracy in neural system and neural code[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7322-7329.
- [52] 满梦华, 张娅, 蔡娜, 等. 细胞信号网络功能鲁棒的简并性拓扑特征[J]. *生物信息学*, 2015, 13(1): 40-46.
- MAN Menghua, ZHANG Ya, CAI Na, et al. Degenerate topology analysis of robustness in cellular signaling network[J]. *Chinese Journal of Bioinformatics*, 2015, 13(1): 40-46.
- [53] MAN M H, ZHANG Y, MA G L, et al. Quantification of degeneracy in Hodgkin-Huxley neurons on Newman-watts small world network[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2016, 402: 62-74.
- [54] CRICK F. The recent excitement about neural networks[J]. *Nature*, 1989, 337(6203): 129-132.
- [55] MCCLELLAND J L, RUMELHART D E, HINTON G E. *The appeal of parallel distributed processing*[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1986: 3-44.
- [56] HOLTMAAT A, SVOBODA K. Experience-dependent structural synaptic plasticity in the mammalian brain[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2009, 10(9): 647-658.
- [57] 陈云芝, 徐桂芝, 周茜, 等. 基于脉冲时间依赖可塑性的自适应神经网络抗扰能力研究[J]. *生物医学工程杂志*, 2015, 32(1): 25-31.
- CHEN Yunzhi, XU Guizhi, ZHOU Qian, et al. Robustness analysis of adaptive neural network model based on spike timing-dependent plasticity[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 32(1): 25-31.
- [58] GUO L, ZHANG W, ZHANG J L. Neural information coding on small-world spiking neuronal networks modulated by spike-timing-dependent plasticity under external noise stimulation[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(3): 5217-5231.
- [59] GUO L, LÜ H, HUANG F R, et al. Research on neural information coding of spiking neural network based on synaptic plasticity under AC electric field stimulation[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, 33(7): 1959021.
- [60] 郭磊, 刘东钊, 黄凤荣, 等. 基于突触可塑性的自适应脉冲神经网络在高斯白噪声刺激下的抗扰功能研究(英文)[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(2): 225-235.
- GUO Lei, LIU Dongzhao, HUANG Fengrong, et al. Research on disturbance rejection of adaptive spiking neural network based on synaptic plasticity under white gaussian noise[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(2): 225-235.
- [61] 石洪溢. 基于突触可塑性的小世界脉冲神经网络抗扰功能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- SHI Hongyi. Research on disturbance rejection of small-world spiking neural network based on synaptic plasticity[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2019.
- [62] GUO L, HOU L T, WU Y X, et al. Encoding specificity of scale-free spiking neural network under different external stimulations[J]. *Neurocomputing*, 2020, 418: 126-138.
- [63] 吕欢. 基于突触可塑性的无标度脉冲神经网络抗扰功能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- LÜ Huan. Study of anti-interference ability of scale-free spiking neural network based on synaptic plasticity[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2019.
- [64] THACKSTON K. *Investigations into electromagnetic signaling in cells*[D]. Berkeley, USA: University of California, 2020.
- [65] THACKSTON K A, DEHEYN D D, SIEVENPIPER D F. Simulation of electric fields generated from microtubule vibrations[J]. *Physical Review E*, 2019, 100(2): 022410.
- [66] THACKSTON K A, DEHEYN D D, SIEVENPIPER D F. Limitations on electromagnetic communication by vibrational resonances in biological systems[J]. *Physical Review E*, 2020, 101(6): 062401.
- [67] WANG C X, HILBURN I A, WU D A, et al. Transduction of the geomagnetic field as evidenced from alpha-band activity in the human brain[J]. *eNeuro*, 2019, 6(2): ENEURO.0483-18.2019.
- [68] BARANI N, SARABANDI K. Theory of electromagnetic-based communication within bacterial communities[C]// 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta, USA: IEEE, 2019: 1-2.
- [69] AWAN H, ADVE R S, WALLBRIDGE N, et al. Information theoretic based comparative analysis of different communication signals in plants[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 117075-117087.
- [70] BARANI N, SARABANDI K. Biological cell communication: quorum sensing versus electromagnetic signaling[C]// 2020 IEEE USNC-CNC-URSI North American Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium). Montreal, Canada: IEEE, 2020: 191-192.
- [71] AWAN H, ZEID K, ADVE R S, et al. Communication in plants: comparison of multiple action potential and mechanosensitive signals with experiments[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2020, 19(2): 213-223.
- [72] Deheyn Lab. *Electromagnetic communication*[EB/OL]. San Diego, USA: Deheyn Lab, 2019[2021-11-26]. <https://deheynlab.ucsd.edu/research/em-communication/>.
- [73] BANSAL R. *RadioBio[microwave surfing]*[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2017, 18(6): 16-18.
- [74] 刘尚合, 胡小锋, 原青云, 等. 航天器充放电效应与防护研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2108-2118.
- LIU Shanghe, HU Xiaofeng, YUAN Qingyun, et al. Research progress in charging-discharging effects and protection of spacecraft[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2108-2118.
- [75] 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[J]. *高电压技术*, 2011, 37(2): 375-381.
- MAN Menghua, JU Zhengquan, YUAN Qingyun, et al. Design of protection model for electrostatic discharge injection injury based on the electromagnetic bionics[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(2): 375-381.
- [76] 巨政权, 原亮, 满梦华, 等. FPGA静电损伤容错系统设计与演化修复能力研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(11): 2848-2857.
- JU Zhengquan, YUAN Liang, MAN Menghua, et al. Design of fault-tolerant system and research of evolvable repairing capability for the esd damaging effects of FPGA[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(11): 2848-2857.
- [77] 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.
- XIE Shuangjian, YUAN Liang, MAN Menghua, et al. Design and realization of fault-tolerant circuit based on evolvable hardware[J]. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(10): 2495-2497.
- [78] 满梦华, 原亮, 巨政权, 等. 嵌入式系统门级在线自修复技术研究[J]. *计算机工程*, 2011, 37(19): 9-11, 16.
- MAN Menghua, YUAN Liang, JU Zhengquan, et al. Research on gate-level online self-repairing technology for embedded system[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(19): 9-11, 16.

- [79] 满梦华, 刘尚合, 常小龙, 等. 可演化组合逻辑数字电路的静电放电抗扰特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2322-2328.
MAN Menghua, LIU Shanghe, CHANG Xiaolong, et al. Anti-electrostatic discharge interference characteristics of evolvable combinational circuits[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2322-2328.
- [80] 常小龙, 刘尚合, 满梦华, 等. 静电放电损伤自修复数字电路模型的建立与优化[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2329-2335.
CHANG Xiaolong, LIU Shanghe, MAN Menghua, et al. Construction and improvement of self-repairing digital circuit model for electrostatic discharge damage[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2329-2335.
- [81] 褚杰, 满孟华, 常小龙, 等. 复杂电磁环境中高可靠性 TMR-EHW 电机控制电路设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2314-2321.
CHU Jie, MAN Menghua, CHANG Xiaolong, et al. Design of motor control circuit based on TMR-EHW in complex electromagnetic environment[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2314-2321.
- [82] LIU S H, MAN M H, JU Z Q, et al. The immunity of evolvable digital circuits to ESD interference[J]. Journal of Bionic Engineering, 2012, 9(3): 358-366.
- [83] MAN M H, LIU S H, CHANG X L, et al. The biological property of synthetic evolved digital circuits with ESD immunity-redundancy or degeneracy?[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(3): 396-403.
- [84] CAUWENBERGHS G. Reverse engineering the cognitive brain[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(39): 15512-11513.
- [85] TORRES-HUITZIL C, GIRAU B. Fault and error tolerance in neural networks: a review[J]. IEEE Access, 2017, 5: 17322-17341.
- [86] CHANG X L, LIU S H, MAN M H, et al. Bio-inspired electromagnetic protection based on neural information processing[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(1): 151-157.
- [87] CHANG X L, LIU S H, XIE F F, et al. The research of bio-inspired electromagnetic protection based on pulse coupled neural network[C] // 2012 5th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics. Chongqing, China: IEEE, 2012: 777-780.
- [88] 王金龙, 逯迈, 胡延文, 等. 基于现场可编程门阵列的 Hodgkin-Huxley 模型神经元动作电位的数值模拟功能实现[J]. 生物医学工程学报, 2015, 32(6): 1302-1309.
WANG Jinlong, LU Mai, HU Yanwen, et al. Hardware implementation of numerical simulation function of Hodgkin-Huxley model neurons action potential based on field programmable gate array[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(6): 1302-1309.
- [89] LU M, WANG J L, WEN J, et al. Implementation of Hodgkin-Huxley neuron model in FPGAs[C] // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, China: IEEE, 2016: 1115-1117.
- [90] 陈凯. 基于 FPGA 的生物神经突触的模拟与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
CHEN Kai. Simulation and implementation of biological synapse based on FPGA[D]. Lanzhou, China: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [91] 陈凯, 逯迈, 易飞鸿, 等. 基于 FPGA 的神经突触的硬件实现

及放电性能比较[J]. 中国生物医学工程学报, 2020, 39(1): 57-66.
CHEN Kai, LU Mai, YI Feihong, et al. Hardware implementation and discharge performance comparison of nerve synapses based on FPGA[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2020, 39(1): 57-66.

- [92] 闻佳, 逯迈, 董绪伟, 等. 基于 HH 模型的神经网络的数值模拟与 FPGA 实现[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(1): 38-45.
WEN Jia, LU Mai, DONG Xuwei, et al. Numerical simulation of neural network based on HH model and its FPGA implementation[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2017, 30(1): 38-45.

- [93] 尚蕾. 小型神经网络同步放电特性的 FPGA 硬件实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
SHANG Lei. Synchronous discharge characteristics of small-scale neural network by hardware implementation based on FPGA[D]. Lanzhou, China: Lanzhou Jiaotong University, 2021.



LIU Shanghe
Professor
CAE member

刘尚合

1937—, 男, 教授, 中国工程院院士
主要从事静电与电磁防护技术方面的研究工作
E-mail: liushh@cae.cn



MA Guilei
Ph.D. candidate

马贵蕾

1989—, 女, 博士生
主要从事电磁防护仿生方面的研究工作
E-mail: mglijyp@163.com



MAN Menghua
Ph.D.
Corresponding author

满梦华(通信作者)

1984—, 男, 博士, 讲师
主要从事电磁防护仿生方面的研究工作
E-mail: manmenghua@126.com

收稿日期 2021-12-02 修回日期 2022-01-05 编辑 程子丰