

The Inspiration of the Biological Anti-interference Mechanism in Electromagnetic Protection Bionics

Menghua Man[#], Ya Zhang, Liang Yuan, Guilei Ma, Jie Chu

National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

[#]Email: manmenghua@126.com

Abstract

With the rapid development of semiconductor technology, the electromagnetic sensitivity of electronic systems has been increased. And the more complicated electromagnetic environment has induced, the more significantly is the electromagnetic environment effects. As a result, the contradiction between them seriously restricts the efficiency of electronic equipment. Currently, the disadvantage of traditional electromagnetic protection methods appeared. After gradual evolution, information processing of biometrics has anti-interference ability, which show good anti-interference phenomenon. At present, our studies show that the degeneracy mechanism, the plasticity of synapse and neuronal synchronization reflect the anti-interference mechanism, which provides basic theory for design of electricity systems. Thus, the anti-interference mechanism of biological system can be applied in electromagnetic protection bionics in order to improve the reliability and adaptability of electronics systems in a complex electromagnetic environment.

Keywords: *Electromagnetic Protection; Bionics; Anti-Interference; Degeneracy; Plasticity; Synchronization*

生物的抗扰机制对电磁防护研究的启示

满梦华, 张娅, 原亮, 马贵蕾, 褚杰

机械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室, 河北 石家庄 050003

摘要: 随着电子设备电磁敏感度的升高和电磁环境的复杂, 使得传统电磁防护手段的不足日渐突出。经过长期的自然进化, 生物系统自身的信息处理机制已经具备了抗扰功能, 表现出优异的抗扰现象。目前研究发现, 神经网络的简并性、神经突触的可塑性和神经元同步放电特性体现了生物的抗扰机制, 为设计适应复杂电磁环境的电子系统提供了仿生对象与理论支撑。通过借鉴生物系统优异的信息处理和抗扰机制, 利用仿生学的基本方法, 开展电子设备电磁防护仿生研究具有重要的探索意义和应用前景。

关键词: 电磁防护; 仿生; 生物抗扰; 简并性; 可塑性; 同步

引言

随着科技的进步, 电子系统逐渐成为各式各样设备中不可或缺的一部分。电子系统大大增强和扩展了设备功能的同时, 其自身在电磁环境下的敏感性也在增强。伴随着信息化水平的不断提升和人类活动领域的不断拓展, 电子系统所处的空间电磁环境日趋复杂, 电磁噪声对电子系统的影响也不断加深^[1]。设备对于各种电磁能量越来越敏感。随着诸如雷达、通信、导航等各种电磁辐射源的功率不断加大和频谱增宽, 以及系统自身的电磁辐射与静电等问题^[2], 使得电子设备面临着更加复杂和恶劣的电磁环境。因此, 传统的电子设备抗扰和防护方式面临着严峻的挑战。

据报道, 21 世纪上叶 (约 2020~2050 年) 将会发生第六次科技革命^[3]。这场革命是以生命科学为基础,

融合信息科技和纳米科技，为解决和满足人类精神生活和生活质量的需要提供最新技术，主体内容包括“整合和创生物学”、“思维和神经生物学”、“生命和再生工程”、“信息和仿生工程”、“纳米和仿生工程”等。其中，《科学时报》对 108 位两院院士进行的问卷调查结果显示，信息和仿生工程的支持率最高，达到 72%^[4]。由此可见，对于生物信息机理的仿生研究在科技发展中的主体地位已得到学术界的广泛认同。

电磁防护仿生研究正是通过探索生物体电磁信息传递的抗扰机理，将生物抗扰机制引入电子设计领域，突破本征特性领域转换的关键技术，提出电子设备电磁防护仿生的新原理和新方法，为电子设备提供有别于传统方式的设计思想、工作原理和体系结构，以提高其在复杂电磁环境下的可靠性与适应性，为解决电磁干扰问题提供一种全新的技术支撑^[5,6]。

1 电磁环境下生物系统的优势

经过 35 亿年进化的生物世界是技术创新不可替代、取之不竭的知识宝库和学习源泉^[7]。借鉴和学习自然界中的生命现象和生命机理，同样可为解决电子设备电磁防护问题提供独到的思路和方法。

1.1 生物的抗扰现象

无论何种动物，其体内的所有活动均与生物电信号相关。此类信号电平极低，多以毫伏或微伏表示；电流极小，常以微安或更小的单位计量。然而，这些生物系统对外界各类电磁信号的干扰并不敏感。这些形似脆弱、娇嫩的生物系统可以自然而然地抵御正常生活中所面临的、上万倍于自身生物电信号电平的、任意类型的电磁干扰。反观电子系统，无论人工设计、制作得如何精心、完善，在复杂多变的电磁干扰面前总会暴露出各种各样的缺憾，从而必然直接影响电子系统的性能与寿命。电子设备对信号电平稳定性的要求较高，外界干扰信号的峰值只要达到或接近系统信号相同的数量级，就有可能导致电子系统失常。

例如，生活中的静电放电电压纵有千伏甚至高达万伏，但对于动物机体而言，一般不会造成任何实质性的伤害。然而，静电放电却可将普通电子器件严重损毁^[2]。另一方面，即便是由于过高的电压造成了生物肌体的损伤，特别是因强电磁场的作用（但没有致命的电流通过生物体），只要不是使其全局性地彻底失活，仍有恢复的可能。至少该生物个体可以在一定的条件和环境下能够“挣扎逃生”、“带伤运行”，然后设法“调理康复”。从目前电子技术的角度来看，生物的抗扰能力之强达到了不可思议的程度。

1.2 生物抗扰的机理分析

从作用的形式上来看，外界电磁环境对生物信息系统和电子信息系统的影晌相似，都会引起系统内单元部件产生信号扰动、信息错乱乃至物理损伤。而从作用结果来看，前者可以自行抗扰、修复、适应环境，而后者却往往只因局部单元的损伤就能立即导致全局失效。因此，生物系统自身的信息处理机制已经具备了抗扰功能，表现出优异的抗扰现象。根据当前的研究成果，生物神经网络的简并特性、神经突触的可塑机制和神经元同步放电机制是三个重要原因。

1.2.1 神经网络的简并特性

神经网络的简并性，是指网络内不同结构的回路在特定环境下具有相同功能或产生相同输出的一种属性^[8]。需要特别强调的是，不同结构回路之间功能的部分重叠可以等同于功能的部分冗余，但并非一般冗余概念中所采用完全相同回路备份同一功能、以结构性重叠保证冗余单元在功能上的重叠^[9]。具有简并性的回路在特定环境下能够表现出具有相同功能的共性，而在其它环境下又能表现出具有不同功能的个性。也就是说生物的简并性不同于武器系统的冗余设计、重构技术，在组织形式和工作机理上的表现是，简并结构内的网络节点可以通过不同的调控方式（激活或抑制）参与到不同回路的功能实现过程之中，外界电磁环境对于某一节点的扰动，能够激发受扰节点所属异构回路的不同响应，从而改变受扰回路对系统功能的贡

献程度。这些变化既可能使某些回路的功能降低，又可能使某些回路的功能增强。功能增强的回路能够补偿（或缓解）功能降低的回路对网络整体功能的负面影响，各回路相互之间形成了一种功能动态代偿机制，从而导致网络整体功能具备了抗扰特征。

1.2.2 神经突触的可塑机制

突触是神经元之间形成联系、发生作用的基础，包括化学突触和电突触两种^[10]。电突触传递信号的本质是电耦合，能通过同步放电行为使得一个神经元膜电位的变化被另一个神经元快速感知并做出反应。实现电突触耦合的三项基本内容为连接方式、耦合数目和权重分布。而最为重要的当属体现“动态”和“可塑”特性的权重分布。利用突触可塑性，神经元能够根据外界刺激、环境变化、内部损伤等情况自主调节相互之间的连接关系。并使神经元灵活地参与不同神经元集群的运算，形成动态的、复杂的结构，这种动态特性使神经网络具有很好的适应性和可靠性。

在脑损伤后的功能恢复时期，需对受损区域周边其它正常结构予以适度的功能训练。从而，使其除了完成正常运作外，对于受损部位的功能也能部分分担，并且使其功能梯度逐渐得到“提升”。若是现有的神经通路已经无力代偿，则需“唤醒”冗余的神经元通道，发育出更多、更长的突触结构，形成侧枝与前端存活神经元发生联系，以跨越死亡或失能的神经元，形成新的结构、予以功能代偿。因此，突触可塑性使得神经网络具备了动态的功能自组织的能力，从而表现出环境自适应的特征。

1.2.3 神经元同步放电机制

神经元同步放电是指两个或多个神经元之间具有相关的、同步化的放电行为。在大脑中，神经元同步放电现象非常普遍。一方面，神经元同步与信息编码、学习、记忆等神经功能密切相关。另一方面，在信息编码和传导过程中，神经元的同步放电行为对噪声产生较强的抑制作用。因此，大脑有可能利用同步放电完成信息处理和传递的同时，也抑制了噪声干扰。大脑的这一特性对电磁防护仿生研究具有一定的启示意义。神经元同步放电现象与神经系统的功能密切相关，且同步放电行为有助于实现神经信息编码和传递。

2 电磁防护仿生的概念与内涵

电磁防护仿生研究的特征是学科交叉点多、应用领域面广、原始创新特色鲜明，需要借助跨领域、大团队的交叉合作与思想碰撞，将相关领域中稳定、成熟的理论成果和实践方法相互渗透、成功结合，可望迅速生成一门新兴的边缘科学和武器装备建设中一个新的技术增长点。

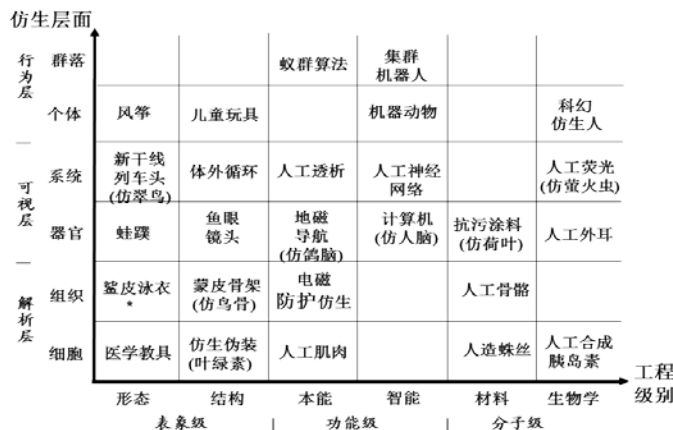


图 1 仿生坐标定位

2.1 仿生定位

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，为工程技术提供灵感的技术科学^[7]。

从微观到宏观，生物的任何要素均可成为仿生研究的模仿对象。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”，便可对电磁防护仿生工作进行清晰的定位，如图 1 所示。

图 1 中，从左至右，各项内容主要是以复杂度的增加为主；自下而上，则体现于综合性的提高。可以看出，这种分类方式包含了研究深度的继承和递进关系。电磁防护仿生定位于解析层的功能仿生。具体言之，则应属于针对神经组织在电磁环境下所具有的抗扰及自修复之本能的仿生。

2.2 体系框架

电磁防护仿生研究的整体思路是以电磁生物效应和电子系统的电磁环境效应为基础，结合生物建模与计算机仿真技术、微电子技术和仿生硬件自律技术。在领域转换映射机制的结合下，将生物系统的抗扰特性与作用机理恰当地提取并转化到电磁防护领域，建立并完善电磁防护仿生的基本原理和仿生模型，指导工作于复杂电磁环境下的电子系统的电磁防护仿生加固设计。进而，从微观的半导体工艺设计到宏观的装备应用实现展开全方位的综合研究，其基本框架如图 2 所示。

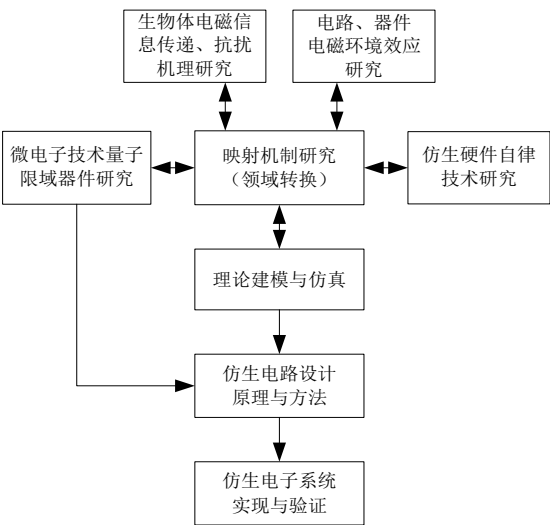


图 2 电磁防护仿生研究体系框架

3 探索与展望

通过电磁防护仿生的方法进行复杂电磁环境下电路系统的防护机制研究包括两项内容：一是如何有效抵御已知和未知的干扰以使系统输出尽量不受影响；二是过强的干扰造成了电路局部损伤后如何使其功能恢复。前述神经网络的简并性研究可从理论上解释抗扰电路的工作原理，而电路损伤后的自修复工作则需参照脑损伤后的自愈过程，利用突触可塑的机制予以实现。

在电子系统中，通过从整体层面模拟生物神经网络的简并性，在局部环节借鉴神经突触的可塑性以及同步放电，进行电路实现。按照简并方式形成的功能电路将比使用传统方式设计的同样功能电路远为复杂。尽管如此，系统的总体规模却因复用节点的存在而比冗余结构有所降低^[11]。因此，简并结构的最大优势在于利用了这种局部的简单电路复杂化方式，以使得生物中的抗扰机理在电路中也成为可能，从而有望从整体上实现电路的抗扰、修复等复杂问题简单化。

近年来，国内外在仿生技术方面进行了大量的探索，研究了高强度生物材料、生物膜、仿生防污材料、仿生飞行器、仿生水下航行器、仿生导航和仿生修复等技术，并呈现材料--结构--系统仿生设计一体化，材质合成--结构成型--界面连接仿生制造复合化，功能材料--智能器件--变体机构仿生系统集成化的发展趋势。特别值得一提的是，美国宇航局 JPL 实验室设计并实现了新型仿生硬件(FPTA-2)，可以通过故障后的“自修复”方式，使得其所构成的整流器工作在大温差（-180° C 至+125° C）和高电离辐射(175kRad)的极端环境之下^[12]。

电磁防护仿生是一个全新的领域，学科融合范围广、跨度大，具体实现时所需的环境复杂、技术要求高、探索性强，需要同时进行大量新概念、新方法的探索以及基础模型的建立和原理样机的研制。因此，电磁防护仿生研究的原始创新性强，基础特征明显，挑战巨大，有待立足国内，统一协调，强强联合推动武器装备建设的新发展。

前期研究分析表明，通过电磁学、电子学和生物领域的深入交叉、有机融合，使得复杂电磁环境下电磁防护仿生的设想在理论探索与系统实现两方面，具备了深化研究的可能和明确的前景，有望整体拓宽电磁防护的研究领域，探索一条电子设备抗电磁危害研究的新思路、新途径。尽管目前此类工作面临诸多理论难题和技术障碍，但其巨大的潜力和发展态势已初现端倪。可以预见，今后电子-生物结合之重要程度，决不亚于早年电子-机械结合之伟大意义，而且其规模和影响可能更为宏大和深远。

4 致谢

感谢国家自然科学基金（基于生物网络简并性的仿生抗扰电路实现方法研究 51407194，类神经网络结构开放式电路电磁损伤故障自修复研究 51207167）的资助与支持。

REFERENCES

- [1] Shanghe Liu, Guozhi Sun. Analysis of the Concept and Effect s of Complex Electromagnetic Environment [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 49(1):1-5
- [2] Shanghe Liu. The theory of electrostatic and protection [M]. Beijing: ordnance industry Press, 1999
- [3] Chuanqi He. The Strategy Challenge of the Sixth Technology Revolution[M], Beijing: Science Press. 2011
- [4] Qin Ye, Chuanqi He. Hundreds of Academician Keep a Watchful Eye on the Sixth Science Revolution [N]. Science Times, 2011/5/20(III edn)
- [5] Shanghe Liu, Liang Yuan, Jie Chu. Electromagnetic Bionics: A New Study Field of Electromagnetic Protection [J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(1): 1-7
- [6] Shanghe Liu, Jie Chu, Liang Yuan. Study and Progress of Electromagnetic Bionics for Electronic System [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2009, 23(1): 2-6
- [7] Yongxiang Lu. The meaning and development of bionics [J]. Science Chinese, 2004, 2004(4): 22-24
- [8] Gerald M. Edelman, Joseph A. Gally. Degeneracy and complexity in biological systems[J]. PNAS, 2001, 98(24): 13763-13768
- [9] Giulio tononi, Olaf Sporns, Gerald M. Edelman. Measures of degeneracy and redundancy in biological networks[J]. PNAS, 1999, 96(6): 3257-3262
- [10] John H. Byrne, James L. Roberts. From Molecules to Network An Introduction to Cellular and Molecular Neuroscience [M]. Beijing: Science Press, 2010
- [11] Menghua Man, Shanghe Liu, Xiaolong Chang, Mai Lu. The biological property of synthetic evolved digital circuits with ESD immunity - redundancy or degeneracy?[J]. Journal of Bionics Engineering, 2013, 10(3): 396-403
- [12] Mircea Gh. Negoita, Lukas Sekanina, Adrian Stoica. Adaptive and Evolvable Hardware and Systems: The State of the Art and the Prospectus for Future Development[J]. International journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems, 2008, 12(3): 183-185

【作者简介】



¹ 满梦华（1984-），男，汉，博士，讲师，电磁防护仿生。

Email: manmenghua@126.com

² 张娅（1988-），女，汉，硕士，工程师，电磁防护仿生。

³ 原亮（1955-），男，汉，硕士，教授，电磁防护仿生。

⁴ 马贵蕾（1989-），女，汉，硕士，工程师，电磁防护仿生。

⁵ 褚杰（1980-），男，汉，博士，讲师，电磁防护仿生。