

# 基于仿生概念的网电空域鲁棒性研究

周永学,丁国良,原 亮

(军械工程学院 信息工程系,河北 石家庄 050003)

**摘要:**阐述了网电空域研究工作中以仿生方式进行电磁防护研究的基本内容,对研究内容在整个仿生领域中予以定位。定义了网电空域的基本概念,分析了空间电磁环境的安全问题,建立了电磁防护仿生研究的表象级对等模型,提出并归纳了研究策略和实现基础。根据结构和功能的关系进行相应方案的规划,并结合生物鲁棒性的研究成果,在分级冗余基础上考虑鲁棒裕度设计,描述网络简并、功能梯度和旁路易化的特征。因此,使得网电环境下电磁防护的仿生构想在技术上成为可能。

**关键词:**网电空间;网电空域;电磁仿生;电磁防护;自律机制;鲁棒性

中图分类号:TP393.02

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0170-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.043

## Study on Cyberdomain Robustness Based on Concept of Bionics

ZHOU Yong-xue, DING Guo-liang, YUAN Liang

(Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College,  
Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Discuss the basic content of studying the electromagnetic protection with bionics in cyberdomain, and locate them in the section of bionic axis. Define "cyberdomain" and analyze the security problem of spatial electromagnetic environment, establish the representation equivalent model of electromagnetic protection bionic research, and summarize the research strategy and implementation basis. According to the relationship between the structure and function, the corresponding scheme is planning, and combined with the research results of biological robustness, based on hierarchical redundancy, considering the robust tolerance design, describe the characteristics of network degeneracy, functional gradient. Thus, in cyber field, the hypothesis of electromagnetic protection by means of applying bionic technology has become a reality.

**Key words:** cyberspace; cyberdomain; electromagnetic bionics; electromagnetic protection; autonomic mechanism; robustness

## 0 引言

随着电子信息技术和网络技术的迅猛发展,各种新概念、新理论、新技术层出不穷。其中,最为引人瞩目的是在信息网络、智能物联网等高新技术推动下,产生的全新战争领域——“网电空间”(亦称为“网络电磁空间”)。因此,现代战争的攻击已不再局限于火力摧毁等传统手段,而是逐步演变成为信息战争中一种全新的作战模式,即以电磁攻防为主的“网电空间战”。对于信息安全防护与信息装备保障工作而言,也同样面临着巨大的挑战和新的发展机遇<sup>[1]</sup>。针对敌方的各类干扰或攻击,如何保证己方信息装备具备较高的生存率和鲁棒性,且在一定程度上适应未来瞬息万变的

战况,并形成具有普遍参考价值和指导意义的电磁防护新技术,已是迫在眉睫的实际要求。

## 1 网电空域概念与仿生方法引入

从宏观角度讲,“网电”涉及范围极为广泛和庞大,各种类型和程度的有意、无意干扰无处不在。而从微观角度看,“网电”所用装置又与大规模集成电路密不可分,其对电磁干扰却是十分敏感。传统的抗扰及防护手段已经难以满足复杂电磁场环境下系统可靠性的要求。众所周知,生物系统的复杂程度远高于目前各类人工系统,同时其优异的可靠性亦使所有人工系统望尘莫及。所以,针对网电空间中某些特定领域的

收稿日期:2013-12-06

修回日期:2014-03-13

网络出版时间:2014-07-28

基金项目:总装备部预研管理局“十二五”预研项目(120151333046)

作者简介:周永学(1985-),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为计算机网络应用与防护;丁国良,副教授,研究方向为智能检测与诊断;原 亮,教授,研究方向为计算机系统结构、EHW 理论及实现。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140728.1226.039.html>

可靠性问题,不妨考虑在一定程度上通过借鉴生物系统的抗干扰、自修复特征及其鲁棒性机理予以解决。对此,尤其需要以电磁生物效应为参照,以电磁仿生理论与网络和计算机技术为基础,形成网电空间中的防护新方式。

### 1.1 网电空间与空域的概念

网电空间的概念涉及范围极为广泛和庞大。该空间由所有的电磁频谱、电子系统及网络化基础设施构成。从各类网络、通讯等用频装备,到传感器、嵌入式电子装置等不同设施,无不涵盖于该空间之中<sup>[2]</sup>。尽管网电空间是一个类似于陆、海、空、天的真实客观领域,但它没有任何地理和自然的界限,没有前线和后方的区分。所以,不同的网电“用户”在该空间中同时进行着各自的信息采集、存储、修改、交换和利用。任何一方均可“抢占资源”但又不可能完全“据为己有”,各个敌对势力之间还不断觊觎、攫取或毁坏对方的资源。所有信息网络能够达到和存在之处,都可能是作战空间<sup>[3]</sup>。因此,这也是一个能为敌对双方整体对抗所提供的多维、跨域、大尺度空间的“共用”平台。

相反,“网电空域”则是有着明显的专属特征。“域”指特定的空间和范围,具有“拥有”和“独占”以及强烈的“排他”属性。领域的概念随着人类认识世界、改造世界的过程而不断拓宽,从最初的陆地疆域扩展到现在的海防、领空等,直至今日的“网电”。因其可能受到敌方的攻击和掠夺,所以必须得到己方的严格控制和保护。可以认为,网电空域是网电空间中的某一个或某一些具有明确归属性质的特定位置或领域,而网电空间则由所有的网电空域集合而成。敌我双方均是基于各自的网电空域,在网电空间中相互角逐,且其技术手段五花八门,无所不用其极<sup>[4]</sup>。同时,也都在探测各方的薄弱环节和攻击模式,目的均是设法突破敌方网电空域的壁垒,并不断增强己方网电空域中信息传输、装备控制等工作的安全程度。

### 1.2 网电空域的电磁安全问题

网电空域所涉及的理论和技术点多、面广、特色鲜明,各类具有异质属性的物理子系统导致了设计与实现的复杂性大大增加<sup>[5]</sup>,致使一些网络构建和电磁分析等传统的辅助设计及维护工具已经有些不适。无论是在外部还是内部,网电空域中出现了许多全新的问题,迫切需要引入新的思路、方法和技术,通过多学科间的相互协作予以解决。

一般而言,网络方面的进攻泛指两类。一类是来自敌方的核爆电磁脉冲、高功率定向能等强大电磁武器的有意攻击。其作用效果均是利用具有陡沿、宽谱等特点的高强度窄脉冲,通过孔缝、传导等方式直接进入设备内部形成干扰或攻击,以致导致实体领域内具有

电子装置的作战装备出现节点屏蔽、传感失效、乱真切换、数据篡改、指控中断以及武器系统效能下降等问题,直至物理损伤。另一类是由无线注入技术、计算机病毒、软件木马等信息攻击武器予以间接进行的软杀伤<sup>[6]</sup>。因此,小到计算设备、传感装置,大至卫星通信、航天遥测,在网电空域中无不属于敏感环节。此外,大量的空间设备和嵌入式传感、通讯系统可能还会受到静电、雷电、宇宙射线、太阳电磁暴等自然电磁源以及己方电磁源的无意损害。

传统的设备级电磁防护手段包括电磁屏蔽、滤波、接地、使用瞬态抑制器件和钝感器件以及电磁防护材料等方式。这些防护技术是目前各类装备电磁防护措施的主体,但都存在各自的局限性。而相关设备出现电磁损伤后,一般只能实施维修或替换。此举除了需要付出高昂的人力、物力成本之外,更有可能因为地处战争或太空、深海等环境而使得现场维修工作甚难或无法进行,以致贻误战机。

### 1.3 仿生防护与特点定位

生物系统均存在着遗传和变异的机制,即“演化”。生物通过演化机制而提升自身有序度的过程,则为“进化”。正因自然界具有的这种“本能”,才出现了当今丰富多彩的生物世界以及每种生物所特有的非凡机制。通过进化,生物系统在承受各种不可预知的内外因素干扰时,表现出了极高的功能稳定特性。因此,生物系统的优良特性为人工系统的设计与制造提供了有益的启示,人类对于某一生物特性的工程模仿,即为“仿生”<sup>[7]</sup>。

“电磁防护仿生”概念正是针对该类利用传统技术手段难以解决的问题而提出<sup>[8]</sup>。通过借鉴动物在强电磁场环境下保持生物电生理信号正常传递的机理,从学科交叉的角度研究了电子装备电磁防护新原理、新技术,以便从功能层面对生物优良特性进行模仿。

网电空域中的仿生研究并非针对某一生物或某一生物的特定器官进行,而是针对处于同一可比层面的某一类生物特征进行。即模仿生物个体和群落在电磁环境下,抗干扰与自修复现象,以及智能的自组织与自适应机制。因此,“网电仿生”在总体上属于仿生坐标<sup>[9]</sup>中“综合层——功能级”的仿生。

## 2 网电仿生层面及其电磁防护原理

世界面临的第六次科技革命将以生命科学为基础,融合信息科技和纳米科技,为解决和满足社会整体发展的需要而提供最新技术<sup>[10]</sup>。仿生工程将在科技发展中形成前沿研究方向,这一趋势已是不言而喻。况且,目前在基础器件层面,已经出现了单电子晶体管、单原子器件、单分子整流器、有机单分子电子器件

和忆阻器等全新概念的器件。在综合电路层面,产生了微电子与生物技术紧密结合的、以 DNA 芯片等为代表的生物芯片和器件<sup>[11]</sup>。因此,以生物科学为基础,设计构建具有全新理念的电磁防护方式,不仅已成可能,亦是基于网电空间的模式以及随着目前科技发展而产生的必然结果。

### 2.1 网电仿生的层面和内容

网电空域的相关仿生研究需要将生物鲁棒性方面的研究成果更为深入地映射至电磁防护领域,以便在理论上形成立足点,从技术上提供切入点,使其可在目前的条件下有助于网电空域中网络和电子系统的抗扰研究。参照仿生坐标并从具体技术和实现角度考虑,其抗扰和防护研究又可规划至另外三个层面进行。

(1)网电行为层。从耗散结构、生物抗扰原理和仿生修复机制角度进行网电空域中电子系统的电磁防护能力与自修复能力的宏观研究。该层面的研究重点关注系统的特性,多以黑箱方式描述。因此,应将生物系统的构造和生物活动的过程、机理和结构自组织过程及其简并性、进化性恰当地提取并融合至网电空域的电磁防护方面,以形成新的规划和设计思想。

(2)系统状态层。从自律机制角度,特别是从环境自适应的要求进行网络结构、抗扰系统等具体研究。该层面重点关注系统某一信息传输或装备控制环节的内部运作规律,多以模型方式描述。因此,可以通过仿真平台的建立,深化研究其给定状态、现行状态和干扰环节,形成相应的状态方程并可按照定量方式推知其抗扰或自修复状态。

(3)基础结构层。从生物特性方面进行具体抗扰电路的实现和损伤自修复研究,多以电路方式描述。通过引入新的抗扰电路设计理念和网络结构,争取降低电子系统的电磁环境敏感度<sup>[12]</sup>。其目标是在过强的干扰使得工作程序、系统状态紊乱甚至遭受局部硬损伤的情况下,仍能不依赖外界的支援而逐步自行修复,进而完成全部或部分预定功能。

### 2.2 生物-网电的对等和映射

如将某一生物或其组织看作是一个“功能系统”,则网电空域即为由人类制造的“特殊生物”。二者至少在形式和概念上有所对等。尽管这种对应方式尚待商榷和细化,但毕竟简捷、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。通过网络、电磁领域技术的深化与完善,并结合工程仿生等技术,使得网电空间已经成为了新的研究实在。

(1)“中枢神经网络”。网电空域的核心如同生物的大脑与脊髓,即中枢神经网络。中枢神经本身也是一个巨大复杂的网络,但其特点却是并行、异构、分布,

并以此表现出了极大的灵活性和鲁棒性。网电空域的综合效果具体体现于网电行为层,其中包括功能自适应和结构自适应。功能自适应性建模描述具体行动方面发生的适应性改变或响应行为,结构自适应性建模描述网络组织方面的自适应行为。

(2)“周围神经系统”。构成网电空间的各种外围网络可以类比为生物的周围神经网络。对于人体而言,尽管尺、桡、胫、腓等周围神经损伤后不会危及生命,但仍将导致肢体发生不同程度的功能障碍。这就映射到了实际装备及其面临的具体问题,需在网络层面的动态组网设计和软件修复方面切入,使其在局部遭受一定程度电磁干扰、损伤后仍能正常运行,甚至在不依赖于外界的干预的情况下予以自行修复<sup>[13]</sup>。

(3)“底层神经末梢”。可编程逻辑器件是一类能够拓展出自修复功能及形成相应系统的集成电路。该类芯片内海量基本逻辑单元等同于生物体内众多的末梢神经细胞,与网电空域中的各类传感器件和执行元件共同形成基础结构层。单个或多个相互关联的 FPGA(现场可编程门阵列)芯片可以以功能电路的形式,形成结构复杂、功能完备的各种“组织”和“器官”。

鉴于此,可以确定网电空域中电磁仿生技术的主要思想如下:利用生物进化原理和方法,通过电子系统的生物进化设计和演化硬件技术,实现系统规划和重配、电子电路和数据处理芯片的自动诊断和电路系统的重新生成,最终达到自适应、自修复的目的,以实现仿生意义上的电磁防护新模式。

## 3 网电空域中鲁棒性研究策略

生物系统时常会遇到各类干扰。例如,基因突变对于物种引起的干扰、激素变化对于生物体内环境的干扰、随机放电或者细胞死亡对神经系统的干扰,以及电磁辐射对生物、器官或细胞功能的干扰等。但生物均可依靠不同的抗扰和修复机制,得以保持自身的鲁棒特性。

### 3.1 生物功能鲁棒与网电空域鲁棒

“鲁棒性”是一个较为宽泛的概念,在不同学科中都有具体和明确的定义,通常泛指系统在内部或外界干扰因素影响下保持其功能稳定性的能力<sup>[14]</sup>,包括了坚固性、耐久性等含义,并广泛拓展应用于诸多领域。其主要强调对于局部失效具有不敏感的特性,以及在输入干扰造成局部毁伤的情况下,系统能够保持正常的功能输出,避免发生与所受损伤并不相称的、更为严重的破坏。生物鲁棒性广泛存在于生物种群、整体、器官、细胞和分子等各种层次。生物系统始终处在变化的环境中,但是它总是能够保持一个相对稳定的内环境,使其在各种差异不大的外部环境下都能生存。因



此,生物鲁棒性完全体现在生物系统对环境的适应上,是一种典型的“功能鲁棒”。

网电空域仿生防护研究中的鲁棒性是一种源自生物系统的自组织、自修复、自适应的基本特性,是在系统发生局部毁损或面临着设计中所没有考虑到的内部结构或外部环境改变等情况时,自身能够维持其功能或适应其环境变化的一种标定或量度。

### 3.2 以生物网络为基础的理论研究

生物大脑主要是由大量的网络构成,每个神经网络结构又由成千上万的神经元经由突触相互连接。这些网状结构包括了大量的冗余,且是多端口的网络系统。其潜在功能强大,最重要的便是具有学习和自律的特性。作为由世界上所有网络构成的“网络”,网电空间与生物网络在结构上亦有很大程度的相似性。

一般描述的生物网络(如生化网络、基因网络、神经网络等)是典型的复杂适应性系统,包含了多个体的多层次作用和关系。利用复杂网络理论对生物网络进行研究的方法已经获得快速发展。该类研究首先需要形成生物网络的聚类算法及主要建模理论,以从度分布、聚类系数及鲁棒性等角度对现阶段生物网络性质进行研究。从而能够站在一个新角度,针对构成网电空域的分层复杂网络结构,分析物理层与逻辑层之间的影响和关系及负载对于网络鲁棒性的影响<sup>[15]</sup>。

### 3.3 以演化理论为基础的方法研究

鲁棒性分析可以从生物个体的系统整体性上寻找作用因素,需要解决生物系统维生的条件(对应于“系统稳定”)和抵抗外源扰动或参数摄动的能力(对应于“系统品质”)两个问题。建立生物系统的数理模型是实现网电空域鲁棒性分析的重要途径。因此,运用控制理论分析生物系统的鲁棒性是一种最为直接和现实的方法。在该基础上,又产生了“演化硬件”的理论和“系统演化”的方法。

控制论中所研究的稳定性可被看作是针对外部和内部扰动的不敏感性。而在生物领域,演化则可作为提高鲁棒性的手段,需要实体改变系统的结构或功能来适应变化的环境。所以在生物系统中,“鲁棒”和“演化”之间的关系密不可分。甚至可以认为,演化(特别是予以具体实现的遗传算法等软件方法)就是提高鲁棒性的核心内容和具体的技术手段,亦是建立“演化-鲁棒-结构自律”仿生过程的先决条件之一。特别是,通过仿生研究,可以引入传统方式所不具备的问题分析与解决方法。

## 4 深化研究的内容与应用领域

尽管网电空域与生物系统有着诸多相似之处,特别是具有相似的信息处理和能量转换特征,但其毕竟

是由人类制造和使用的“被组织”系统。其本质的区别主要体现于传统的电子类系统不能像生物一样,自发、自主地进行从无序到有序、从低级到高级、从简单到复杂的演替或进化,也就无法在需求变化时自主形成新型结构,或在受到损伤时恢复原有功能。所以,若将“被组织”与“自组织”有机结合并应用于网电空域中的电子系统进行仿生研究,尚需进行下述新的概念或原理探寻。

### 4.1 明确结构与功能的关系

微生物群落的结构鲁棒性可被定义为群落结构在时间尺度上的一致性、在外界扰动下保持结构稳定的能力以及结构变化后恢复原有结构的能力这三个方面。但是长期以来,生物系统中结构鲁棒性和功能鲁棒性的关系存有争议。其焦点主要集中在群落多样性与稳定性之间是否存在正相关或负相关的关系。

对于一个稳定的生物系统或网电空域而言,其功能必然是恒定的;对于某一恒定的功能而言,结构却可以是多样的;而任何一个具体结构所对应的功能则是单一的。因此,系统的结构鲁棒性所注重的是其结构稳定,而系统的功能鲁棒性则强调其功能稳定。可以推论,系统完全可能因其结构的适度更动而得到性状的相应改善,使得整体功能更加稳定。这一概念对于网电空域中仿生防护相关工作的进行至关重要。

在每个网电空域中,均有精心规划的网络结构和相应软件、协议及各类防护措施,以保证系统的功能。目前,无论是基于传统连接还是基于并行技术的网络平台,均属于固定结构的网络。而相比之下,生物的大脑在发育之初并无固定的网络结构,所有的语言、认知等功能网络均经后期学习和训练而形成。这些网络具有自组织、自适应以及自学习的特点,并只由外界刺激来触发。同时,又能反向刺激网络结构的完善<sup>[16]</sup>。

### 4.2 标定分级冗余与鲁棒裕度

鲁棒性和冗余度一样,也是可以量化表征的。然而,在网电空域中,尚未针对鲁棒裕度深入开展定量研究和计算的工作。但可以认为,对于目标和路线进行阐明的过程本身,就是一种创新和贡献,且有利于占据设计和管理策略上的制高点。

冗余是鲁棒性的结构基础。生物编码 DNA 外显子仅占全部 DNA 的 5%。其他非编码 DNA(内含子等)的功能目前并不完全清楚。尽管如此,这种冗余肯定有着非常重要的意义。人体神经系统中,中枢神经系统的冗余度远高于周围神经系统。即在仿生的不同逻辑层面,其冗余与鲁棒性的要求亦有差别。越是接近调控功能的核心,越应享有更多的冗余。因此,冗余度也需分级。

与分级冗余相似,战略、战术上重要的电子仪器和

器件,应有较高鲁棒裕度,亦应分层予以规定。前述对于网电空域仿生防护所进行的分级、分层规划不仅仅是一种标准化的措施,更是策略上的选择和战略上的部署。在复杂的仿生系统中,可根据外来干扰的时频特性及功率强度等,设计不同的阵列冗余及鲁棒特性。此时亦必然存在着电子系统与生物系统的鲁棒性研究与对等标定的问题,即完成整体鲁棒性与局部鲁棒性之间的差异、仿生系统鲁棒性与被仿系统鲁棒性之间的差异研究,及层面、结构中鲁棒裕度问题的确定。

总之,分级冗余研究旨在解决系统受损后程度评估、修复与否、时机选择和可供使用资源的问题,而鲁棒裕度研究则是决定受损系统修复和恢复的程度问题。因此,这两项指标将为“模块化设计”赋予更新、更深的含义。

## 5 结束语

在借助生物进化的概念和仿生规划的基础上,通过采用全新的思路、方法深入进行了网电空域的定义及其仿生防护等方面的理论研究。特别是从耗散结构、自律机制和鲁棒特性这三个方面,初步论述了网电空域中电磁防护仿生的原理和实现方法。进而,有望建立一种新型的防护研究模式,对传统干扰的抗扰方式进行强化、补充与完善,使得网电空域最终能够满足在不同层面上的多种安全、稳定的运行要求。可以看出,电磁防护仿生是尝试使用新理论、新器件解决网电空域中传统问题的一个研究切入点,又是将网电概念、生物技术、电磁防护与微电子技术等诸多学科结合之后诞生的一个技术增长点,甚至可能作为奠定网电空域仿生发展方向的一个长远立足点。因此,该类研究的提出和开展,既能满足网电空域发展的需要,又能符合科技发展的潮流。亦可望从整体拓宽电磁防护的科研领域与项目规模,将网电空域的安全与稳定研究推向一个新的阶段。

(上接第 169 页)

- 规则学习[J]. 中文信息学报,2001,15(3):1-8.
- [8] 吴应良,韦 岗,李海洲. 一种基于 N-gram 模型和机器学习的汉语分词算法[J]. 电子与信息学报,2001,23(11):1148-1153.
- [9] 黄建中,王肖雷. Katz 平滑算法在中文分词系统中的应用[J]. 计算机工程,2004,30(B12):371-372.
- [10] Chen S F, Goodman J. An empirical study of smoothing techniques for language modeling [C]//Proc of the 34th annual meeting on association for computational linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 1996: 310-318.

## 参考文献:

- [1] 郑 简,史燕中. 计算机网络电磁安全的脆弱性分析及防护对策[J]. 保密科学技术,2011(9):57-60.
- [2] 廖晓阳,陈徐飞,于鑫刚,等. 赛博空间技术的军事应用研究及对策[J]. 电子科技,2011,24(11):147-149.
- [3] 吴 巍. 赛博空间技术发展现状与通信网络安全问题[J]. 无线电通信技术,2012,38(3):1-4.
- [4] 李 昊,龙晓波. 赛博行动与电子战[J]. 中国电子科学研究院学报,2011,6(3):240-242.
- [5] 林 峰,舒少龙. 赛博物理系统发展综述[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(8):1243-1248.
- [6] 吕信明. 关于网络电磁空间战的思考[J]. 国防科技,2012,33(4):1-7.
- [7] 路甬祥. 仿生学的科学意义与前沿[J]. 科学中国人,2004(4):22-24.
- [8] 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.
- [9] 原 亮,巨政权,满梦华,等. 仿生层级标定与电磁仿生模型建立[J]. 高技术通讯,2012,22(6):631-637.
- [10] 何传启. 第六次科技革命的中国战略机遇[J]. 决策与信息,2012(6):20-22.
- [11] Wang Zhongqiang, Xu Haiyang, Li Xinghua, et al. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(13):2759-2765.
- [12] 巨政权,原 亮,满梦华,等. 电子系统的层次分解及建模[J]. 现代电子技术,2011,34(5):18-20.
- [13] 满梦华. 嵌入式异构冗余容错计算系统的研究与实现[D]. 石家庄:军械工程学院,2009.
- [14] 吕大刚,宋鹏彦,崔双双,等. 结构鲁棒性及其评价指标[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):44-54.
- [15] 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[D]. 石家庄:军械工程学院,2010.
- [16] 黄 涛,夏 志,汪清祥,等. NMDA 受体在运动易化学习记忆突触机制-LTP 中的作用[J]. 广州体育学院学报,2008,28(4):100-104.
- [11] Gale W A, Sampson G. Good turing frequency estimation without tears[J]. Journal of Quantitative Linguistics, 1995, 2(3): 217-237.
- [12] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 基于模式记忆并行蚁群算法的输电网规划[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):17-22.
- [13] Kit C, Pan Haihua, Chen Hongbiao. Learning case-based knowledge for disambiguating Chinese word segmentation; a preliminary study [C]//Proc of first SIGHAN workshop attached with the 19th COLING. Taipei: [s. n.], 2002.
- [14] 张华平,刘 群. 基于角色标注的中国人名自动识别研究[J]. 计算机学报,2004,27(1):85-91.

基于仿生概念的网电空域鲁棒性研究

作者：[周永学](#)，[丁国良](#)，[原亮](#)，[ZHOU Yong-xue](#)，[DING Guo-liang](#)，[YUAN Liang](#)

作者单位：[军械工程学院 信息工程系, 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\(11\)](#)

引用本文格式：[周永学](#).[丁国良](#).[原亮](#).[ZHOU Yong-xue](#).[DING Guo-liang](#).[YUAN Liang](#) [基于仿生概念的网电空域鲁棒性研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(11)