

自然计算的研究综述

康 琦^{1,2}, 安 静^{1,3}, 汪 镭^{1,2}, 吴启迪^{1,2}

(1. 同济大学控制科学与工程系, 上海 201804; 2. 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部
重点实验室, 上海 201804; 3. 上海应用技术学院电气与电子工程学院, 上海 201418)

摘 要: 自然计算是一种有效模仿自然界各类运行机制的优化理念与全新的计算智能思维范型. 从自然辩证的视角思考并探讨自然计算的统一性与多样性的关系, 首先提出一种自然计算研究框架模型; 然后对启发源到研究分支, 从计算模式到应用领域, 从软硬件实现到计算机研制等方面进行系统性的综述, 最后给出自然计算模式的统一性理念, 提出自然计算的统一性计算分析框架.

关键词: 自然计算; 计算智能; 思维范型; 统一性

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0548-011

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.023

Nature-Inspired Computation: A Survey

KANG Qi^{1,2}, AN Jing^{1,3}, WANG Lei^{1,2}, WU Qi-di^{1,2}

(1. Department of Control Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Key Laboratory of Embedded System and Service Computing Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Nature-inspired computation (NIC) is a heuristic optimization concept and a novel thinking pattern of computational intelligence by imitating various operating mechanisms effectively in nature. This paper studies the relationship between unification and diversity of NIC models from the dialectical perspective of natural philosophy. First, a kind of general framework for studying NIC is proposed; Second, all kinds of existing NIC models are systemic summarized in this paper, from inspiration source to research branch, from computing models to their applications, from hardware-software implements to computer development, as well as other aspects; Finally, based on the proposed unification concept of NIC models, calculation principle and analysis framework of the unification of NIC is refined and presented.

Key words: nature-inspired computation; computational intelligence; thinking model; unification

1 引言

大自然经过亿万年物竞天择、优胜劣汰、继承创造的演化,形成了美轮美奂、复杂多样的生命现象和自然奇观,其间蕴含着丰富的信息处理机制,为人类社会的“智能化”进程提供不竭的智慧源泉. 自然计算恰是这眼奇妙的“智慧”之泉. 一般而言,自然计算(Nature-Inspired Computation, NIC)^[1,2]是指以自然界包括生命、生物及生态系统,物理与化学,经济以及社会文化系统等,特别是生物体的功能、特点和作用机理为基础,研究其中所蕴含的丰富的信息处理机制,抽取相应的计算模型,设计相应的算法,研制革新计算系统,并在各相关领域加以应用. 当以计算过程的角度分析复杂自然现象时,可使

人们对于自然界以及计算的本质有更深刻的理解. 可以说,自然计算是继传统人工智能之后异军突起的一种全新的计算思维范型^[3],是计算智能的集成大者;她海纳百川、集众之智,以其独特的思想魅力和广阔的应用前景,吸引着众多研究开发者投身于这一新领域的开拓、创新,开辟了智能科学最广阔的天地、最精彩的篇章、最激动人心的前沿!

在自然科学研究领域,生命科学与工程科学的相互交叉、相互渗透和相互促进是体现现代科学技术发展特征的显著特点之一,而自然计算的迅速发展正体现了科学领域发展的这一特征和趋势. 在自然计算及智能科学相关的研究领域,各类智能算法层出不穷,形态多样,理念各异,建模及分析工具各具特色,充分体现了自

然计算丰富的内涵及其计算模式的多样性特征^[3~5];但它们均以自然界中有益的信息处理机制为研究对象,具有师法于自然、作用于自然的统一性原理,通常具有自学习、自组织和自适应特征,能够为具有大规模、分布式、异构、动态以及开放等特点的复杂系统的刻画(行为描述与分析),为传统算法难以求解的各类复杂问题等给出合理有效的解决方向,引导未来计算模式创新与计算机革命,具有非常广阔的应用前景。

到目前为止,国内外已开辟多个以“自然计算”为主题的国际会议和研讨会,包括 Int. Conf. Natural Computation (ICNC); Int. Conf. Computational Intelligence and Natural Computing (CINC); Int. Workshop on Nature Inspired Computation and Applications (IWNICA) 等,深入研究和探讨自然计算的机理,开拓自然计算的应用领域。2009 年,中国人工智能学会成立“自然计算与数字智能城市”专委会,以推动“自然计算”这一新兴领域的发展与应用。国际学术杂志也出版专刊介绍自然计算的研究成果^[4,6],”Natural Computing”2002 年创刊;2009 年,”Information Fusion”和 ”Neurocomputing”先后出版了自然计算主题的专刊,集中发表自然计算相关研究成果。

自然计算相关内容的研究论文数量众多,因为其涉及的领域实在很广;然而以自然计算为主题的综述性论文并不多。国外的有:Lila Kan^[2]对众多自然计算模式进行了列举与归纳;Nigel Shadbolt^[1]指出了自然计算与传统计算体系之间的不同在于其自组织与实现的无计划,并从网络、分子等不同层次以及系统的实现进行了论述;Masulli F, Mitra S 等^[4]对自然计算在蛋白质结构预测、微阵列数据分析和基因调控网络等生物信息学中复杂的数据分析问题进行了综述;Bruce J. MacLennan^[7]对自然计算模型进行总结,指出现有的图灵机模型已不能满足于自然计算的要求,并提出了一种新的计算模型。国内代表性的论文有:龚涛和蔡自兴^[8]分析了自然计算的新特征,包括交叉性、革命性和复杂性,给出了自然计算的复杂性分析定理,提出并改进了自然计算的映射模型,并给出了自然计算的算法流程;汪镭等^[9]认为自然计算各类算法中的相关主体表现出一种相对统一的智能计算特征,并对自然计算理念给出统一的框架描述;王鹏等^[10]分析了自然计算模式中的并行性与不确定性的内在关联,给出了算法的不确定性原理,并提出了自然计算的不确定性智能模型。上述工作从不同的视角对自然计算研究进行了有益的总结。

自然计算内涵丰富,分支领域众多,计算模型各具特色,充分体现多样性的特征;而作为计算智能的集成大者,自然计算演绎的又是一个统一性的理念。总体来说,自然计算研究主要涉及四个方面的内容:①各类自

然(社会)现象、机制、规律等的建模与模拟;②各类自然计算模式的创新,即算法的设计、实现与优化等;③自然计算的应用研究,包括对具有大规模、分布式、异构、动态以及开放等特点的复杂系统的刻画(行为描述与分析),以及各类复杂问题的求解等;④自然计算相关的软硬件实现与计算机研制等。在设计完成自然计算模式或系统之后,需要对其效能进行全面评价并进行优化改进,评价指标包括:有效性、计算效率、收敛性、鲁棒性和自适应性等。自然计算研究框架模型如图 1 所示。

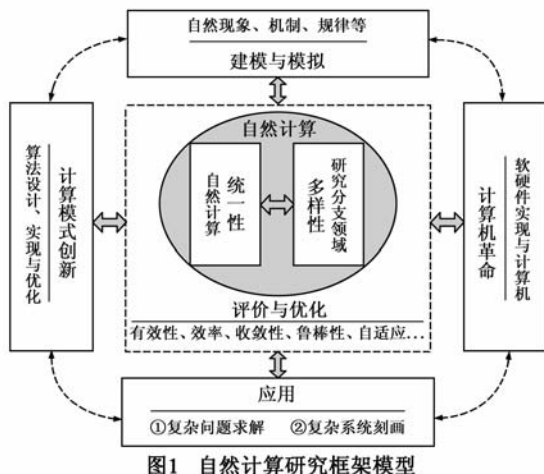


图1 自然计算研究框架模型

本文作者基于多年的研究与体会,对自然计算从启发源到研究分支,从计算模式到应用与软硬件实现以及计算机研制等方面进行系统性的归纳总结;并从辩证的视角思考理解自然计算的内涵,给出自然计算模式的统一性理念和计算分析框架。

2 自然计算的启发源

从自然计算要素角度看,每种自然计算方法都对应一种实际的启发源^[11],要将启发源中所包含的内在的特殊规律,如生物进化规律、离子进出细胞膜的规律等,利用数学或逻辑符号建模描述成一种特殊计算过程;而从其启发源的属性来分,又包括了自然界全部的物质(物理和化学)、生命(生命系统、生物群和生态系统等)和文化(社会、文化、语言以及情感等)三个层次。表 1 列举了一些典型的自然计算模式及其自然启发源。

3 自然计算的主要研究分支

自然计算的本质是借鉴自然界的功能与作用机理抽象出计算模型,研究涉及现代自然科学的方方面面,相关领域非常广泛。正是由于自然计算模式的多样性,其外延和内涵互相交织,相互包含,研究范畴常常被混淆,难以对其进行准确而细致的划分。例如,作为自然

计算的主要分支,进化计算研究内容丰富,形成了系统的研究体系和方法,但由于进化计算以染色体构成的种群为基础,具有明显的群体智能特征,从其启发源来看,它也应属于生命系统模拟计算范畴;神经计算由于其鲜明的生物学特点,常常被认为是生命系统模拟计算的重要代表,但究其内部作用机理,神经网络又可以作为自组织理论研究的一部分处理,而且由神经元构成的神经网络还具有群体智能信息处理的特征,也可以归为群体智能研究范畴;从系统的角度,群体智能实际上属于生态计算;另外,上述大多研究内容都具有群体特征(普适性),可以用群体智能来阐释.

表 1 自然计算启发源

启发源属性		自然计算模式	对应的自然系统
物质层次	物理	模拟退火算法	退火
		量子计算	原子
		混沌优化	混沌系统(物理现象)
		晶体生长算法	晶体生长的物理化学过程
	化学	分子计算	分子体系
		化学(反应)计算	化学反应过程
生命层次	生命系统	进化计算	遗传、进化系统
		神经计算	神经网络
		免疫计算	免疫系统
		内分泌计算	内分泌系统
		元胞自动机	元胞动态系统
		生物分子计算(DNA、RNA、蛋白质 计算)	生物分子体系(DNA 双螺旋、RNA、蛋白质)
		膜计算	细胞膜
		植物生长算法、树苗成长算法	植物、树木生长过程
	生物(群)	蚁群算法、微粒群算法、蜂群算法、群搜索优化等	蚂蚁、鸟、蜜蜂、鱼、狮子等生物群
		细菌(群)觅食算法、细菌趋药性算法	细菌(群)
	生态系统	搜索者优化	人群
		生物地理学优化	生物物种、种群
		自组织迁移算法	生物种群
		人口迁移算法	人群
文化层次	社会、文化、情感等	形式语言	自然语言
		模糊计算、计算动词理论	语言(名词、动词)推理
		Bayesian 网络	符号认知、推理
		自私基因算法	人的自私行为
		文化算法、Memetic 计算	社会文化(符号、知识)
		多主体系统	社会相互作用
		社会认知算法	社会认知
		粒计算	信息认知
		情感计算	社会、文化、人类情感

为了明确学科内涵,尽可能以所体现的显著特点为依据,将自然计算划分为下述相互交叉的主要研究分支.其中典型的自然计算模式总结参见表 2.

表 2 自然计算模式总结简表

计算模式	基本思想	提出时间,提出者
CA	细胞(群)动态演化	1950s, 美国 Von Neumann, John; Ulam, Stanislaw M.
CNN	细胞单元构成的神经网络	1988 年,美国 Leon O. Chua
SCuA	树苗的生长发育过程	2006 年,土耳其 Ali Karci
PGSA	模拟植物的生长过程	2005 年,中国 Li T
GA	模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程	1975 年,美国 Holland, John
EP	从整体的角度模拟物种的进化过程	1962 年,美国 Fogel, LJ; Owens, AJ; Walsh, MJ
ES	模仿生物进化,且性状总遵循正态分布	1963 年,德 Rechenberg, I; Schwefel, HP
GP	利用生物进化思想来解决复杂问题的一种编程模型	1989 年,美国 Koza, J. R.
DE	模拟生物进化机制,基于种群内个体差异度生成临时个体,随机重组进化	1997 年,德国 Rainer Storn; 美国 Kenneth Price
EDA	将自然进化算法和构造性数学分析方法相结合	1996 年,德国 Muhlenbein, H; Paaß, G
DNA	模拟生物分子结构并借助于分子生物技术进行计算	1994 年,美国 USC, Adleman L M
MeC	从生命细胞在分层结构中处理化合物的方式中抽象出计算模型	1998 年,罗马尼亚 Paun G.
BP	反向传播神经网络	1969 年,美国 Arthur E. Bryson; Yu-Chi Ho
RBF	人类大脑皮层中的神经细胞对外界反应的局部调节	1987 年,英国 Powell M
SOM	自组织特征映射网络	1981 年,芬兰 Kohonen T
Hopfield	模拟人脑联想记忆功能的反馈式神经网络模型	1982 年,美国 Caltech, Hopfield, J. J
AIS	借鉴自然免疫系统机制模拟免疫功能、原理和模型	1998 年,美国 Dasgupta, Dipankar
AES	基于人体内分泌系统的信息处理机制	2003 年,英国 Neal M; Timmis J
ACO	蚂蚁觅食行为,正反馈和分布式协作寻找最优路径	1991 年,意大利 Dorigo M
PSO	鸟群运动模型	1995 年,美国 Kennedy, James; Eberhart, Russell
ABC	模拟自然界蜜蜂繁殖和采蜜行为	2005 年,土耳其 Karaboga, D
AFSA	模仿鱼群的觅食行为	2002 年,中国 Li XL 等
GSO	自然界群居动物如狮子等寻找生存资源的群体行为	2006 年,He S. ; Wu Q. H
SOA	模拟人类(人群)搜索行为	2010 年,中国 Dai CH 等
BFO	基于 Ecoli 大肠杆菌在人体肠道内吞噬食物的行为	2002 年, Passino, KM
BC	模拟细菌在化学引诱剂环境中的运动行为	2002 年,瑞士 Sibyue D. Muller 等
BBO	模拟生物种群在栖息地的分布、迁移和灭绝规律	2008 年,美国 Dan Simon

续表

计算模式	基本思想	提出时间,提出者
SOMA	模拟社会环境下群体的自组织行为	2000 年,捷克 Zelinka Ivan 和 Lampinen J
PMA	模拟人口迁移机制	2003 年,中国 Zhou Y 等
MeA	拉马克主义的文化进化	1989 年,美国 Moscato, Pablo
CuA	拉马克主义的文化进化	1994 年,美国 Reynolds G
SCO	社会认知理论	2002 年,中国 Xie XF 等
SGA	人类自私基因	1998 年,意大利 Como F
GrC	从不同粒层次上模拟人类思维和解决复杂问题	1996 年,美国 UC Berkeley, Lin TY
SA	模拟物理退火及熔融金属中粒子的统计力学原理	1983 年,美国 Kirkpatrick, S
CGI	自然界晶体生长过程	2009 年,美国 Yuriy Brun
CRO	模拟化学反应过程	2010 年, Albert Y

3.1 进化计算

进化计算的研究起始于 1950 年代,当时几个计算机领域的科学家独立地开始研究进化系统.他们的共同思想是将自然界中的进化过程引入工程研究领域,将遗传、选择等作为算子参与优化,以解决工程中的优化问题.“进化计算”(Evolutionary Computation, EC)这一术语 1990 年代初才被提出,它是模拟生物进化过程中的自然选择法则和信息遗传机制等技术或算法的总称^[12].进化计算为解决真实系统中的复杂优化问题设计更加鲁棒和高效的算法^[13],通常处理的是高维、非线性、不确定性问题等.

最典型、最原始的进化算法包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[14]、进化策略(Evolutionary Strategy, ES)^[15]、进化规划(Evolutionary Programming, EP)^[16]和遗传编程(Genetic Programming, GP)^[17],它们均是借鉴生物界中进化与遗传机理来解决复杂的问题,但在基因结构表达及对交换与突变作用有所侧重.GA 模拟遗传选择和自然淘汰的生物进化过程;EP 从整体的角度来模拟生物的进化过程,强调“物种的进化过程”;ES 则假设不论基因发生何种变化,产生的结果(性状)总遵循高斯分布;GP 是利用生物进化思想来解决复杂问题的一种编程模型,适于解决那些有大量动态变量的问题.

在所谓的“智能进化”中,除了考虑遗传因素,还考虑到学习,这就是进化的强化学习(Evolutionary Reinforcement Learning, ERL)^[18],它是一种通过遗传评价网络的报酬信号对行动网络结合强度实施最优化的强化学习方法.分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm, EDA)^[19]和差分进化(Differential Evolution, DE)^[20]也是典型的进化计算模式.EDA 将自然进化与构造性数学分析方法相结合,通过对当前较优个体集合建立概率模型来引导算法下一步的搜索范围,并从所获得较优解的概率分布函数中抽样产生新的个体,是一种

基于概率模型的进化算法.DE 基于种群内的个体差异度生成临时个体,用一个特殊的差分操作代替经典的交叉或变异来生成子代并随机重组实现种群进化.

总之,进化计算具有实现简单、算法通用、不依赖于问题信息,具有较好的全局收敛性和鲁棒性,适于并行分布处理,在诸多应用领域展现了特色和魅力.

3.2 生命系统模拟计算

生命系统模拟计算是对自然界生命体或系统的各种机制进行抽象和模拟,并用于提出智能计算方法的一个多主题松散连接的研究领域,其理论构建于生物学、计算机及数学基础上.此领域包含了对从生物分子到细胞到功能(器官)系统再到生命体不同层次上的生命智能机制的模拟.生命系统模拟计算的层次模型如图 2 所示.

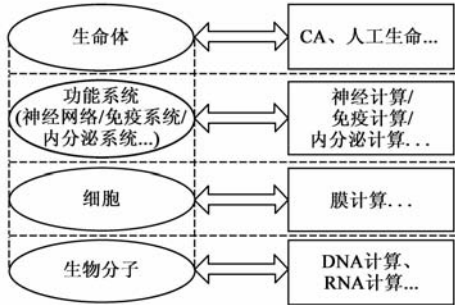


图2 生命系统模拟计算的层次模型

生物分子 DNA 计算(DNA Computing)^[21]是一种模拟生物分子结构并借助于分子生物技术进行计算的新思维和新方法,是生物分子计算的重要内容,开创了以生化反应作为计算工具的先例,特别是它在解决 NP 难问题时显示出其巨大的潜力.1994 年,美国南加州大学的 Adleman L.^[22]在“Science”上发表开创性论文“Molecular computation of solutions to combinatorial problems”,提出了 DNA 计算的概念,并成功地利用 DNA 计算方法解决了著名的数学难题“七顶点哈密尔顿路径”(有向图的 HP 问题).1995 年,美国普林斯顿大学的 Lipton R.^[23]对另一类经典 NP 完全问题—可满足性问题(SAT 问题)论证了 DNA 计算的有效性.生物分子计算还包括了 RNA 计算^[24]和蛋白质计算等模型^[25].

在细胞层次上,膜计算(Membrane Computing, MeC)旨在从生命细胞的结构与功能以及组织、器官(包括脑)和其它细胞群等的协作中,抽象出计算模型^[26].该类计算模型被称为膜系统或 P 系统,包含膜的层次结构、表示对象的多重集和进化规则.膜计算模型包括细胞型、组织型和神经型膜系统^[27].

在功能系统层次,由神经、免疫和内分泌系统组成“神经内分泌免疫网络”,在生命系统中扮演着维持动态平衡的重要角色^[28].①人工神经网络(Artificial Neural

Network, ANN)是在现代生物学基础上提出的,由大量简单的处理单元(人工神经元)广泛连接构成的可模拟生物过程的复杂网络系统.人工神经元是 McCulloch 和 Pitts 于 1943 年提出的一种生物神经元的近似模型^[29].在此领域,研究者提出了多种网络模型和学习算法等,如反向传播 BP 神经网络^[30]、自组织映射神经网络与算法(Self-organization Map, SOM)^[31],它是一种无监督学习的神经网络学习算法,广泛应用于聚类问题;模拟人脑联想记忆功能的反馈式神经网络模型—Hopfield 网络^[32],引入了“能量函数”的概念,可用于判别网络的稳定性;基于人类大脑皮层中的神经细胞对外界反应的局部调节构成的 RBF 神经网络等^[33].②人工免疫系统(Artificial Immune Systems, AIS)是借鉴自然免疫系统机制来模拟免疫学功能、原理和模型来解决复杂问题的自适应系统,其概念因 1974 年由免疫学家 Jerne, K 提出免疫网络理论而引起关注,并正式由 Dasgupta D 提出^[34];随后,一系列用于实际复杂问题求解的免疫算法被提出^[35].③2003 年,Neal M, Timmis J 首次提出“人工内分泌系统(Artificial Endocrine System, AES)”的概念^[36],并就生物机体的动态平衡原理对神经-免疫-内分泌系统的综合研究进行了探索.之后,在研究人体内分泌系统的信息处理机制的基础上,提出了新型内分泌模型与算法.

人工生命(Artificial Life, AL)借助计算机及其他非生物媒介,实现具有生物系统应有特征的过程或系统^[37],最先由 C. Langton 于 1987 年在洛斯阿拉莫斯国家实验室召开的“生成以及模拟生命系统”国际会议上提出.元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一个建立在离散时空上的模拟生命体演化的动力系统,是人工生命的初级表现形式^[38].散布在规则格网中的元胞取有限的离散状态,依据确定的局部规则作同步更新,大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化.1988 年,美国加州伯克利大学模拟了由细胞单元构成的神经网络的动态行为^[39].涂晓媛研发的新一代计算机动画“人工鱼”是人工生命的典型实现^[40],被学术界称为“晓媛的鱼”.此外,基于植物和树苗的生长发育过程提出的模拟植物生长算法(Plant Growth Simulation Algorithm, PGSA)^[41]和树苗成长算法(Saplings Growing up Algorithm, SGuA)^[42],属于个体层资生命系统模拟计算的范畴.

3.3 群体智能

群体智能(Swarm Intelligence, SI)是自然计算研究领域最为活跃、应用最广的一个分支.通过对自然界中群居生物社会行为的观察,将其协作表现出的宏观智能行为特征称为群体智能^[43].

“群体智能”的概念最早可追溯到分子自动机系

统.之后,研究者从计算机模拟的角度学习自然界中的生物群智能行为,获得了相应的计算和仿真模型,并提出群体智能系统的基本原则^[44].1986 年 C. Reynolds^[45]提出用于模拟鸟类聚集行为的仿真模型 Boid;同年 A. Okubo^[46]对昆虫群、浮游动物群、鸟群和哺乳动物群等从分组运动的角度建立群体运动动力学模型并进行仿真.1991 年 Camazine 等^[47]对蜜蜂的筑巢和采蜜行为等进行了建模和计算机模拟.1995 年 VICSEK 等^[48]用一些简单的数学方程描述个体的动力学模型,用网络建立个体间的信息传递及简单的相互作用关系,通过计算机模拟仿真,发现群体出现行为上的一致性.1997 年 Deneubourg^[49]设计了一个基于化学向性反应扩散模型,用于模拟展示非直接通信影响的蚁群建巢过程.1998 年, R. Kube 等^[49]设计了机器人合作推盒子的实验来模拟蚁群合作搬运物体的行为.1999 年, Bonabeau 和 Dorigo 等^[49]对群体智能进行了详细的论述和分析,给出其不严格定义“由昆虫群体或其它动物社会行为机制而激发设计出的算法或分布式解决问题的策略”.之后, Bonabeau 将群体智能的定义进一步推广为无智能或简单智能的主体通过任何形式的聚集协同而表现出的智能行为. J. Kennedy 和 R. C. Eberhart^[50]在 2001 年合著的“Swarm intelligence”中指出,“人的智能是源于社会性的相互作用,文化和认知是人类社会性不可分割的重要部分”,成为了群体智能发展的一个重要里程碑.

通过对生物群现象的观察与研究,提出了一系列群体智能实现模式.1991 年, Dorigo M^[51]提出的蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO),是首个得到广泛关注并得以成功应用的群体智能算法. ACO 充分利用生物蚁群个体间简单的信息传递,通过正反馈和分布式协作来寻找最优路径的集体寻优特征,对 TSP 难题进行了很好的解答^[52].微粒群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是群体智能又一代表作^[53,54],它受 Boid 模型启发,将鸟群运动模型中的栖息地类比于所求问题解空间中可能解的位置,通过个体间的信息传递,引导群体向可能解的方向移动,并逐步增加发现较好解的可能性.人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC),通过模拟蜜蜂繁殖和采蜜两种行为的机理,建立蜜蜂自组织模型,定义蜜蜂根据各自的分工进行不同的活动,实现蜂群信息的共享和交流,从而找到问题的最优解^[55,56].群搜索优化(Group Search Optimizer, GSO)的提出则源于自然界狮子寻找生存资源的群体行为^[57],例如发现食物、追随发现者分享食物和游荡等.此类典型算法还包括^[58-61]:蜂群优化算法(Bee Colony Optimization, BCO)、蜜蜂繁殖优化模型(Bee Mating Optimization, BMO)、人工鱼群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)和模拟人类搜索行为的搜寻者优化算法(Seeker Optimization Algo-

rithm, SOA)等。

微观世界中的细菌行为也为群体智能的发展作出了贡献。细菌觅食算法(Bacterial Foraging Optimization, BFO)^[62]模拟了 Ecoli 大肠杆菌在人体肠道内吞噬食物行为,包括趋化、复制和驱散三个步骤,优化问题的解对应搜索空间中细菌的状态。细菌趋药性算法(Bacterial Chemotaxis, BC)从微生物细菌行为中获得灵感^[63],利用细菌在化学引诱剂环境中的运动行为(应激机制和梯度下降)来设计优化方法。

3.4 生态计算

根据 1869 年德国生物学家恩斯特·海克勒的定义,生态学是研究生物体与其周围环境(包括非生物环境和生物环境)相互关系的科学^[64]。生态计算(Ecology Computation)对自然界生态系统进行模型化描述,用各种计算模型模拟生态系统并服务于实际应用。总体来讲,生态计算研究主要从博弈和协同两个进化的角度展开,分别建立了博弈型人工生态系统和基于多主体的协同生态模型。从博弈的角度,生态系统中的各种策略根据其适应度,或淘汰或变异等,缓慢地进化,那些能够适应环境的策略或相互依存的策略集团自发形成具有新秩序的组织。从协同的角度,计算的过程可视为一种相变,是系统处在一种非线性结构下产生新的更有序时空结构的过程。

生态计算在于面向智能计算的一般原理,从生态系统的层次性、耦合性及人与环境的关系等方面进行研究。广义上讲,神经网络、进化系统、多主体系统、免疫系统等都是生态系统。由于系统的层次化,生态关系也有不同的层次,如人作为细胞的生态系统,而本身又是社会经济“生态系统”的一个“细胞”。

在种群层次上,前述群体智能属于生态计算范畴;还可利用生物种群内个体典型的生长、迁移和组合模式等进行生态计算模式的构建。在群落层次上,描述生物在种群中所处位置、发挥功能和所起作用的生态位模型及相关运行法则;生态因子的梯度分布及群落结构模式;群落效率和稳定性与群落内种群进化适应度之间的关系法则等可作为生态计算的原型。在生态系统层次,各类局部环境因子构成的小生境模式及作用机制;生态系统的动态演化模式;生态系统食物链能量流动模式、物质循环流动模式和信息传递动态网络模式;生态系统的自我调节机制及总体动态平衡模式等都可作为生态计算设计原型。典型的生态计算模型^[65,66]有生物地理学优化(Biogeography-based Optimization, BBO)、人口迁移算法(Population Migration Algorithm, PMA)和自组织迁移算法(Self Organizing Migrating Algorithm, SOMA)等。BBO 借鉴生物种群栖息地的分布、迁移和灭绝规律,模拟了生物物种在地理分布上的特征,根

据生物物种在地理上分布的特点,设计一种基于概率(迁入/迁出)的移动算子进行信息共享,控制物种在岛屿之间移动。SOMA 和 PMA 是分别模拟生物和人类的迁移行为提出的新型优化算法。

3.5 社会文化计算

社会、经济与文化系统等也是自然计算的重要启发源,此类计算模式包括^[67~72]:文化基因算法(Memetic Algorithm, MeA)、文化算法(Cultural Algorithm, CuA)、社会认知优化(Social Cognitive Optimization, SCO)、自私基因算法(Selfish Gene Algorithm, SGA)、粒计算(Granular Computing, GrC)和情感计算(Affective Computing, AC)等。将威尔逊的文化进化学说融入进化计算中,渐渐形成了以文化基因算法和文化算法等为主的文化进化计算的概念。Moscato, P 于 1989 年首次提出“Memetic Algorithm”的概念,用局部启发式搜索来模拟由大量专业知识支撑的变异过程,融合了基于种群的全局搜索和基于个体的局部启发式搜索。Reynolds G 提出的 CuA 由社会群体空间和知识空间两部分组成,分别从微观和宏观层面模拟了两个进化模型,群体空间和知识空间通过通信协议相互联系,通过群体中的个体社会交互共享信息,为不断累积经验的个体成分的进化建立模型。SCO 是基于人类社会认知中的观察学习行为而提出的一种优化模型。SGA 则是受人类的自私基因启发提出的社会性进化算法,由概率向量产生群体,并通过竞争机制产生惩罚基因和奖励基因来更新概率向量解。GrC 从不同粒层次上模拟人类思维属于基于问题概念空间划分的智能计算方法,能有效地分析和处理模糊、不精确、不一致和部分真值的问题。AC 通过赋予计算机识别、理解、表达和适应人的情感的能力来建立和谐人机环境,并使计算机具有更高的、全面的智能。

3.6 其他非生命模拟计算

自组织理论起源于物理学,随后在化学中发现类似的“自集合”现象,之后被用于研究各种不同领域的复杂系统,成为当代系统科学引人注目的一个热点。

因此,从自然界非生命形态或现象(物理、化学现象等)中也可以获取有益的智能计算灵感,创建智能计算模式,这就是其他非生命模拟计算^[73~76]。例如, S. Kirkpatrick 模拟固体退火原理提出了模拟退火算法(Simulated Annealing, SA);量子计算(Quantum Computation, QC)是一种依照量子力学理论进行的新型计算,其原理及重要量子算法为在计算速度上超越图灵机模型提供了可能。2009 年, Y. Brun 等模拟自然界晶体生长过程提出的晶体生长算法(Crystal-Growth-Inspired algorithms, CGI)。2010 年, Albert Y 提出了模拟化学反应过程的 Chemical-Reaction Optimization(CRO)算法。

4 自然计算的统一性理念

各类自然计算智能算法的提出首先已经满足了一定范围内的统一性,因为它们都是大自然启迪的产物,学习、模拟自然法则,并且总是为解决某类复杂计算及优化问题而设计.近年来,研究者开始关注某类自然计算模式的总体框架建模研究,包括进化计算和群体优化模式^[77]等.

作者通过对自然智能及相关生物学、生态系统、社会系统等研究以及不断的思考发现,在这些形式各异的智能行为模式之中耦合交融着确定与随机、必然与偶然的矛盾统一性,它们共同推动“进化”的继承与创造过程:利用“随机”来保证所实现的“智能系统”具有创造的能力,而用继承行为中的“确定性”来保证系统具有收敛的趋势.这样,我们自然地想到,将其中某些具有相当数量共同特征的自然智能计算实现模式加以详细分析,归纳共性的关键要素、计算体与行为机制,提出自然计算的统一性理念,从而能够构建一套不失其多样性的自然计算的统一模型和分析框架.图3描述了自然计算的统一性理念.

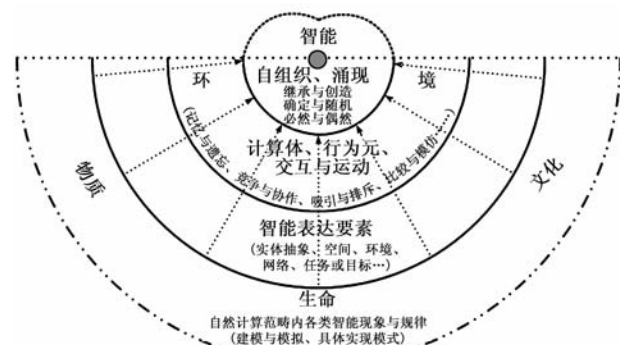


图3 自然计算的统一性理念

通过对自然计算范畴(物质、生命和文化三个层次)内各类智能现象与规律等进行总结与研究,归纳出智能表达的关键要素,包括计算实体抽象、环境、空间、目标等,并分别进行分类描述.例如,空间要素包括空间性质(离散或连续空间)和维度(一维、两维或多维空间);环境要素分为静态环境、动态环境、噪声环境等;目标有单目标和多目标之分.计算体的基本功能包括通信(感知与传导)、计算交互与运动,包含记忆与遗忘、竞争与协作、吸引与排斥、比较,评价与模仿等行为机制.

智能计算体动态行为模式 Z 定义如下:

$$Z = f\left\{\sum_{C_i} \dot{B}(d \circ \vartheta), \Omega, \Gamma\right\} \quad (1)$$

其中, f 为非线性函数,表示计算体状态 S 的动态变化; $B(\cdot)$ 表示计算个体的动态行为,由确定性行为 d 和随

机行为 ϑ 构成,通过算子 $\circ$ 组合作用; $\sum_{C_i} \dot{B}(d \circ \vartheta)$ 为计算体 C_i 行为的集合; Ω 代表问题空间和环境; Γ 表示计算体之间的交互连接网络(多层次、动态结构).

明晰关键表达要素及组件化、模块化的行为功能单元之间的关系,构建自然计算模式的统一分层框架模型,如图4所示.考虑其中的具有普适性的“群体行为”模式,基于复杂网络理论进行建模,分析各行为在群体作用下的动态特性.

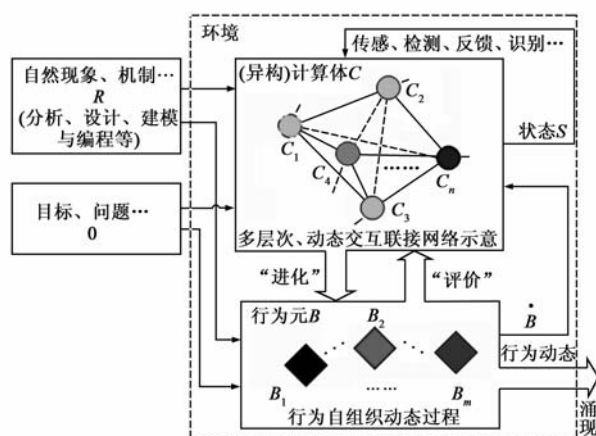


图4 自然计算的统一模型和分析框架

5 自然计算软硬件实现、计算机研制与应用

5.1 自然计算系统的软硬件实现

除了算法的计算机仿真外,研究者对典型自然系统进行了建模与软件仿真,以及系统行为的模拟等,如人工生态系统、人工生命、群体智能、分子系统及复杂自适应系统等.例如,在细胞膜计算领域,已开发多种P系统软件完成P系统的计算过程,包括转移P系统、细胞型P系统、过渡P系统仿真软件及P系统分布式软件等^[78].IBM在1997年设计完成了一个基于AIS的计算机防范病毒系统^[79],该原型系统虽未能商用化,但基本实现了自动检测和清除病毒的功能.

在硬件方面,专用器件或芯片的研制已成为研发新一代计算机的基础.例如,神经器件是人工神经网络的硬件化实现^[80],根据生物信息处理过程中某些特征加以模型化所设计成的专业器件,包括硅神经器件和光神经器件.美欧日多家研究机构和公司致力于神经网络VLSI芯片的研发,相继推出一系列神经芯片,并在医学、图像识别处理和工业智能控制等领域得到成功应用.

5.2 未来计算机研制

基于自然计算的未来计算机研制主要包括分子计算机、DNA/RNA计算机、量子计算机和神经计算机等.

1970年代提出了通过化学方法建造分子计算机的概念^[81],即试图利用有机或无机导电聚合物、生物聚合物、电荷转移盐、有机金属和其他可传导电子的分子材

料,制造纳米级的分子导线、开关、二极管和存储器等,以实现分子水平上的信息传输、存储、检测和处理.80年代,研究从理论探讨进入实验室阶段.近年来,单分子电子导线和单分子电子器件,如分子二极管、两极分子开关等已取得突破;而且使分子电子器件之间有可靠电接触的技术也有了显著进展,预示着建造更复杂的结构是可能的.

利用生物分子(如 DNA、RNA、蛋白质等)所具有的信息承载能力,并借鉴生物体中的信息运作机制,也可以建造计算机^[82].1994年,Adleman发明了第一个试管中的DNA计算机TT100,掀起了生物计算机研究的热潮.若要实现可操作的计算机,必须解决四则运算和逻辑运算.R. Lipton发明一种编码方案使DNA具备布尔代数运算的功能.1996年, Frank等提出DNA二进制加法,并解决了乘法运算问题.之后,多种DNA计算模型被提出^[82],如剪接模型、粘贴模型、等同检测模型、插入/删除系统、最小计算模型、表面计算模型、逻辑运算、分子矩阵乘、因式分解等;但DNA负数表示、减法运算、除法运算等问题尚未解决.Ogiharas等用从鲑鱼卵中分离出的DNA制成世界上首例DNA计算机“硬件”—DNA逻辑门.Christina S.建立了一个RNA分子装置实现逻辑门的功能,通过核酶(ribozyme)实现分子计算机的“非”逻辑门.此外,任何能够将输入信号转换成输出信号的蛋白质都能够作为计算或信息传送单位,可以并已经开始被用于研制生物分子开关.最近,科学家们开始利用DNA计算来创造生物计算机,放在人体或生物体工作,计算结果可通过荧光蛋白的活动来读取.然而,生物计算机的研究仍处于胚胎发育时期,计算系统的框架还未形成.

量子计算机的思想源于1982年Feynman提出的按量子力学规律工作计算机的概念.1985年,Deutsch D定义了量子Turing机,描述了量子计算机的一般模型.之后量子因子分解算法和量子搜索算法被提出,证明量子计算可从根本上超越经典计算机的计算和信息处理能力.目前,量子计算机物理可实现方案有:离子阱方案、核磁共振方案和腔量子电动力学方案等.近日,耶鲁大学设计出一种超导通信“总线”,实现芯片上两个远距离量子位之间的信息传输与存储,使量子计算从“拥有信息”发展到“沟通信息”,迈出了量子计算机实现的实质性第一步.

神经计算机的研制包含四个层次:神经网络模拟模型、普通计算机附加装置、神经元芯片和神经计算机.通常,神经计算机分为虚拟神经计算机(仿真器)和全硬件实现的神经计算机.根据其应用场合与逻辑功能,神经计算机又分为用于神经信息处理的系统和用于实时控制的神经控制系统.目前,神经计算机硬件还

只限于专门的应用,如专用加速板、专用仿真器等.

5.3 自然计算应用领域

自然计算的应用涉及领域很广,在复杂优化问题求解、优化调度控制与故障诊断、智能控制与机器人控制、智能交通、智能建筑、计算机集成制造、智能电网、数据挖掘、模式识别、网络通信与信息安全、工业设计优化、社会经济、金融与管理、生态环境、生物医学医药、新能源与新材料、航空航天与军事等领域的应用都有报道.

可以预见,未来的网络将在环境感知的基础上,通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实施交互;越来越复杂的网络交互行为逐渐表现出自然界生物网络特性,这必将为自然计算提供展示其无穷魅力的舞台和更为广阔的发展空间.

6 总结与展望

自然计算是一种有效模仿自然界各类运行机制的优化计算理念与全新的智能思维方式,是实现人类“智能化”进程的有效途径与最终目标,必然带来思维模式和计算方式的伟大革命!目前,自然计算的研究主要集中在对自然与社会现象、规律、机理以及行为与组织的模拟、智能计算模式研究(算法分析、验证、改进与创新)、分布式问题求解策略以及各种实际应用问题求解等方面.自然与社会模拟仿真为自然计算模式的研究提供了思路和方法依据,而智能算法的分析、改进与创新为各种复杂应用问题的求解提供了快速可靠的理论基础,为人工智能、认知科学等领域的基础理论问题的研究开辟了新的途径.

自然计算丰富的内涵与计算模式体现了继承与创造、确定与随机、必然与偶然耦合交融多样性进化特征.通过对智能科学及相关生命科学、生物学、生态系统的学习、研究以及不断的思考发现,在奇特多样的智能行为模式之中,“群体行为”特征与机制具有普适意义,并通过确定与随机、必然与偶然的统一机理共同推动继承与创造的进化过程.“个体”之合作成“群体”,“群体”之协作成“社会”,“社会”之源为自然.师法于自然,作用于自然,是人类社会改造自然活动的宗旨,也应该是智能科学与智能计算研究所应遵循的基本原则.作者首先从自然辩证的哲学视角思考并探讨自然计算的统一性和多样性的关系,提炼其统一性理念;然后从现有的计算模式出发,综合运用系统科学、生命科学、信息科学等多学科理论和方法,归纳提炼自然计算的统一性计算原理和分析框架.

从当前各领域的研究成果可以看出,自然计算的研究宽泛但不够深入,多还处于实验仿真和性能分析与验证阶段,理论根基并不深厚,需要在理论上进行更

深入的探索.可以预知,在这方面的突破将会极大地推进自然计算与智能科学研究的发展.另外,通过挖掘其自然生物系统、生态系统及生命系统等原型中能够反映“群体行为”的智能化信息处理机制,发现其内在的并行机制,研究并解决实际应用中大规模的工程优化问题,值得在今后的工作中进一步探讨.拓展自然计算模式的应用领域,突出其应用优势,也是促进计算智能研究的一种重要模式.随着应用领域的逐渐拓展,计算智能的内涵和外延很可能会逐渐远离最初的理论模式和知识范畴,因此必然需要随着算法研究和应用领域的拓展重新认识和发展新的智能算法.

自然计算的终极目标是为人类呈现一种全新的思维模式,带来真正的计算革命,研制未来的分子计算机、生物计算机、量子计算机、神经计算机,甚至是“自然计算机”.因此,实现计算智能化的自然计算征程任重而道远!

参考文献

- [1] Nigel Shadbolt. Nature-inspired computing[J]. IEEE Intelligent Systems, 2004, 19(1): 1–3.
- [2] Lila Kari, Grzegorz Rozenberg. The many facets of natural computing[J]. Commun. ACM, 2008, 51(10): 72–83.
- [3] Rabinovich Z. Natural thinking mechanisms and computer intelligence[J]. Cybernetics & Systems Analysis, 2003, 39(5): 695–700.
- [4] Francesco Masulli, Sushmita Mitra. Natural computing methods in bioinformatics: A survey[J]. Information Fusion, 2009, 10(3): 211–216.
- [5] Enrique Alba, Talbi E, et al. Nature-inspired distributed computing[J]. Computer Communications, 2007, 30(4): 653–655.
- [6] Manuel Grana. Lattice computing and natural computing[J]. Neurocomputing, 2009, 72: 2065–2066.
- [7] Bruce J MacLennan. Natural computation and non-Turing models of computation[J]. Theoretical Computer Science, 2004, 317(1–3): 115–145.
- [8] 龚涛,蔡自兴.自然计算研究进展[J].控制理论与应用, 2006, 23(1): 79–85.
Gong T, Cai ZX. Research development of natural computation[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 79–85. (in Chinese)
- [9] Wang L, Kang Q, Wu QD. Nature-inspired computation: effective realization of artificial intelligence[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(5): 126–134.
- [10] 王鹏,李建平.不确定性与自然计算并行性的内在关联[J].计算机科学, 2010, 37(2): 216–220.
Wang P, Li J. Relationship between uncertainty and parallelism of natural computation[J]. Computer Science, 2010, 37(2): 216–220. (in Chinese)
- [11] 莫宏伟,徐立芳.自然计算与计算主义[A].第11届中国人工智能学术年会论文集[C].北京:北京邮电大学出版社, 2005. 210–215.
Mo H, Xu L. Natural computing and computing doctrine[A]. Proc of Annual Conference of CAAI[C]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press, 2005. 210–215. (in Chinese)
- [12] Fogel D B. Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence[M]. New York: IEEE Press, 1995.
- [13] Yuan Q, Qian F, Du W. A hybrid genetic algorithm with the Baldwin effect[J]. Information Sciences, 2010, 180(5): 640–652.
- [14] Holland, J. Adaption in Natural and Artificial Systems[M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1975.
- [15] Yao X, Liu Y, Lin G. Evolutionary programming made faster[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 1999, 3(2): 82–102.
- [16] Yang Z, Tang K, Yao X. Large scale evolutionary optimization using cooperative coevolution[J]. Information Sciences, 2008, 178(15): 985–999.
- [17] Koza J R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [18] Nils T Siebel, Gerald Sommer. Evolutionary reinforcement learning of artificial neural networks[J]. Int Journal Hybrid Intelligent Systems, 2007, 4(3): 171–183.
- [19] 程玉虎,王雪松,郝名林.一种多样性保持的分布估计算法[J].电子学报, 2010, 38(3): 591–597.
Cheng Y H, Wang X S, Hao M L. An estimation of distribution algorithm with diversity preservation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 591–597. (in Chinese)
- [20] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341–359.
- [21] 刘文斌,朱翔鸥,王向红. DNA 计算的研究进展[J].电子学报, 2006, 34(11): 2053–2057.
Liu W B, Zhu X O, Wang X H. Progress in the research of DNA computing[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(11): 2053–2057. (in Chinese)
- [22] Adleman LM. Molecular computation of solutions to combinatorial problems[J]. Science, 1994, 266(5187): 1021–1024.
- [23] Lipton RJ. DNA solution of hard computational problems[J]. Science, 1995, 268(5210): 542–545.
- [24] Duncan GR. Computing with RNA[J]. Technology Review, 2008, 10: 17.
- [25] Eichelberger CN, Najarian K. Simulating protein computing: Character recognition via probabilistic transition trees[A].

- Proc of IEEE Int Conf Granular Computing [C]. Atlanta, USA: IEEE, 2006. 101 – 105.
- [26] Paun G. Computing with membranes[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 61(1): 108 – 143.
- [27] Paun G, Rozenberg G, Salomaa A. Handbook of Membrane Computing[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [28] 丁永生, 刘宝, 任立红. 基于生物网络的智能控制与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Ding Y S, Liu B, Ren L H. Biological Networks Based Intelligent Control and Optimization[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [29] 焦李成, 刘芳. 神经网络研究的进展和展望[J]. 电子学报, 1990, 18(1): 109 – 113.
- Jiao LC, Liu F. Development and prospect on neural network[J]. Acta Electronica Sinica, 1990, 18(1): 109 – 113. (in Chinese)
- [30] Wu W, Wang J, Cheng M. Convergence analysis of online gradient method for BP neural networks[J]. Neural Networks, 2011, 24(1): 91 – 98.
- [31] Juha Vesanto, Esa Alhoniemi. Clustering of the self-organizing map[J]. IEEE Trans Neural Networks, 2000, 11(3): 586 – 600.
- [32] Hopfield J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. Proc of the National Academy of Science(PNAS), 1982, 79(8): 2554 – 2558.
- [33] Ho K, Leung C, Sum J. Convergence and objective functions of some fault/noise-injection-based online learning algorithms for RBF networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2010, 21(6): 938 – 947.
- [34] Dasgupta D. An Overview of Artificial Immune Systems and Their Applications[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [35] 郭一楠, 王辉, 程健. 自适应免疫克隆选择文化算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 966 – 972.
- Guo Y N, Wang H, Cheng J. Adaptive immune clonal selection cultural algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 966 – 972. (in Chinese)
- [36] Neal M, Timmis J. Timidity: A useful emotional mechanism for robot control[J]. Informatics, 2003, 4(27): 197 – 204.
- [37] 宁淑荣, 班晓娟, 涂序彦. 人工鱼“情 + 智”协调的意图产生与行为控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 835 – 839.
- Ning S R, Ban X J, Tu X Y. Intention produce and behavior control for artificial fish based on harmonic of emotion and intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 835 – 839. (in Chinese)
- [38] Ilachinsky A. Cellular Automata: A Discrete Universe[M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2001.
- [39] Chua LO, Yang L. Cellular neural networks: Theory[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(10): 1257 – 1272.
- [40] Tu XY. Artificial fishes: Physics, locomotion, perception, behavior[A]. Proc of ACM Computer Graphics[C]. Orlando, FL: ACM, 1994. 43 – 50.
- [41] 李彤, 王春峰, 王文波. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法—模拟植物生长算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 76 – 85.
- Li T, Wang C F, Wang W B. A global optimization bionics algorithm for solving integer programming-plant growth simulation algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(1): 76 – 85. (in Chinese)
- [42] Karci A. Natural inspired computational intelligence method: Saplings growing up algorithm[A]. Proc of IEEE Int Conf Computational Cybernetics[C]. Gammarth, Tunisia: IEEE, 2007. 221 – 226.
- [43] Bonabeau E, Dorigo M, et al. Inspiration for optimization from social insect behavior[J]. Nature, 2000, 406(6): 39 – 42.
- [44] Bonabeau E, Meyer C. Swarm intelligence: A whole new way to think about business[J]. Harvard Business Review, 2001, 79(5): 107 – 114.
- [45] Reynolds C. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25 – 34.
- [46] Okubo A. Dynamical aspects of animal grouping: swarms, schools, flocks, and herds[J]. Advances in Biophysics, 1986(22): 1 – 94.
- [47] Camazine S, Sneyd J. A model of collective nectar source selection by honey bee: self-organization simple rules[J]. Journal of Theoretical Biology, 1991, 149(4): 547 – 571.
- [48] 郑毓蕃, 束玲琳. 群体行为的一致性问题和研究[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(6): 7 – 34.
- Zheng Y, Shu L. Recent research and progress on consensus problem[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(6): 27 – 34. (in Chinese)
- [49] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems[M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [50] Kennedy J, Eberhart R. Swarm Intelligence[M]. Morgan Kaufmann, 2001.
- [51] Dorigo M, Gambardella L. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53 – 66.
- [52] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [53] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[A]. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks[C]. Perth: IEEE, 1995. 1942 – 1948.
- [54] Zhan ZH, Zhang J, Li Y. Adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics-B, 2009, 39(6): 1362 – 1381.
- [55] Seeley TD. The Wisdom of the Hive: The Social Physiology

- of Honey Bee Colonies[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1995.
- [56] Karaboga D, Ozturk C. A novel clustering approach: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(01): 652 – 657.
 - [57] He S, Wu QH, et al. Group search optimizer: An optimization algorithm inspired by animal searching behavior[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2009, 13(5): 973 – 990.
 - [58] Pham D, Ghanbarzadeh A. The bees algorithms—A novel tool for complex optimization problems[A]. Proc of IPROMS [C]. Oxford: Elsevier, 2006. 454 – 461.
 - [59] Abbass HA. Marriage in honey-bee optimization: A haplometrosis polyginous swarming approach[A]. Proc of Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2001. 207 – 214.
 - [60] 李晓磊, 邵之江, 等. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32 – 38.
Li XL, Shao ZJ, et al. An optimizing method based on autonomous animats: Fish-swarm algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2002, 22(11): 32 – 38. (in Chinese)
 - [61] Dai CH, Chen WR, Song YH. Seeker optimization algorithm: A novel stochastic search algorithm for global numerical optimization[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(2): 300 – 311.
 - [62] Passino KM. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control[J]. IEEE Control Syst Mag, 2002, 22(3): 52 – 67.
 - [63] Muller S, Marchetto J, Airaghi S. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 16 – 29.
 - [64] 尚玉昌. 普通生态学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
 - [65] Simon D. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702 – 713.
 - [66] Zelinka I. SOMA: Self-Organizing Migrating Algorithm[M]. Berlin: Springer, 2004. 167 – 217.
 - [67] Jiao LC, Gong MG, Wang S. Natural and remote sensing image segmentation using memetic computing[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2010, 5(2): 78 – 91.
 - [68] Reynolds G. An introduction to cultural algorithms[A]. Proc of the Annual Conf on Evolutionary Programming [C]. River Edge, NJ: World Scientific Publishing, 1994. 131 – 139.
 - [69] Xie XF, Zhang WJ. Social cognitive optimization for nonlinear programming problems[A]. Proc of Int Conf Machine Learning and Cybernetics [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2002. 779 – 783.
 - [70] Bargiela A, Pedrycz W. Granular Computing: An Introduction [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
 - [71] Como F, Reorda M S, Squillero G. The selfish gene algorithm: a new evolutionary optimization strategy[A]. Proc of Annual ACM Symp on Applied Computing [C]. Atlanta, USA: ACM, 1998. 349 – 355.
 - [72] Picard R W. Affective Computing[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
 - [73] Kirkpatrick S, Gelatt, CD, Vecchi, MP. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671 – 680.
 - [74] Nielsen M, Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
 - [75] Brun Y, Medvidovic N. Crystal-growth-inspired algorithms for computational grids[A]. Proc of the Workshop on Bio-Inspired Algorithms for Distributed Systems [C]. Barcelona, Spain: ACM, 2009. 19 – 26.
 - [76] Albert Y S Lam, Victor O K Li. Chemical-reaction-inspired metaheuristic for optimization[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2010, 14(3): 381 – 399.
 - [77] Adam Prügel-Bennett. Benefits of a population: Five mechanisms that advantage population-based algorithms[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2010, 14(4): 500 – 517.
 - [78] Patun A, Paun G. Small universal spiking neural P systems [J]. Biosystems, 2007, 90(1): 48 – 60.
 - [79] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1541 – 1543.
Jiao L, Du H. Development and prospect of the artificial immune system[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1541 – 1543. (in Chinese)
 - [80] 何振亚, 汪军. 神经计算与智能信息处理的发展[J]. 科技与经济, 1996, (4): 34 – 35.
He Z, Wang J. Development of neural computing and intelligent information processing[J]. Science, Technology & Economy, 1996, (4): 34 – 35. (in Chinese)
 - [81] 尹屹梅, 林祥钦. 分子计算机的研究进展[J]. 化学进展, 2001, 13(5): 337 – 342.
Yin YM, Lin XQ. Progress on molecular computer [J]. Progress in Chemistry, 2001, 13(5): 337 – 342. (in Chinese)
 - [82] 俞洋, 缪淮扣, 宋世平. DNA 分子计算与 DNA 计算机的研究进展[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 497 – 502.
Yu Y, Miu H K, Song S P. DNA molecular computing and DNA computer research[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(5): 497 – 502. (in Chinese)

作者简介

康 琦(通讯作者) 男, 1980 年出生, 博士, 同济大学控制科学与工程系讲师. 主要研究方向为计算智能, 智能控制和学习系统等.
E-mail: qkang@tongji.edu.cn

安 静 女, 1978 年出生, 上海应用技术学院电气与电子工程学院讲师, 同济大学控制科学与工程系博士研究生, 主要研究方向为计算智能和智能信息处理.