

自然计算研究进展

龚涛, 蔡自兴

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 随着量子计算、DNA 计算、免疫计算、进化计算和神经计算等新型计算机制的兴起, 传统的计算正扩展为自然计算, 因为这些新计算机制的产生都由自然系统启发而来. 为了发展和应用自然计算技术, 总结了自然计算的发展简史. 然后, 提出了计算机、自动控制等系统的两种体系结构, 分析了自然计算的新特征, 包括自然法则、交叉性、革命性和复杂性, 并给出了自然计算的复杂性分析定理. 改进了自然计算的映射模型, 提出了自然计算的算法流程. 最后, 探讨了自然计算的研究意义和应用. 总之, 自然计算是活跃的重要研究方向, 定会推动许多学科的发展.

关键词: 自然计算; 人工智能; 映射模型; 复杂性

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Research development of natural computation

GONG Tao, CAI Zi-xing

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: With burgeoning of new computing mechanisms such as quantum computation, DNA computation, immune computation, evolutionary computation and neural computation, etc., traditional computing is being expanded as natural computation, because the new computing mechanisms are all inspired from some natural systems. To develop and utilize the technology of natural computation, a brief history of natural computation was summarized. Then, two architectures of some systems such as computers and automatic control systems were proposed, and new features of the natural computation were analyzed, which include the law of nature, the cross of disciplines, revolution and complexity. Moreover, the complexity theorem of the natural computation was proposed. The mapping model of the natural computation was improved, and the algorithm workflow of the natural computation was proposed. At last, research significance and applications of the natural computation were investigated. All in all, natural computation is an active and important research branch, and will push development of many disciplines.

Key words: natural computation; artificial intelligence; mapping model; complexity

1 引言 (Introduction)

虽然人工智能推动了科技发展, 并影响着人类科学、教育、工业和生活等^[1-5], 但是由于人工智能缺乏坚实的数学基础, 尚不能像物理学、化学和天文学等其他学科那样得到更充分的发展.

令人鼓舞的是, 近年来自然计算 (Natural Computation, NC) 正成为人工智能最重要的数学基础之一^[6]. 这门计算科学研究如何使用数学工具模拟人脑的知识表示、推理、学习等功能. 人工智能研究需要信息论、概率论和优化论等数学背景^[7,8]. 例如, 量子计算机由两级量子系统或按照量子一致的方式处理信息的量子组成. 用量子计算解决某些问

题比经典计算更快.

这些问题包括大规模的因式分解和数据库搜索. 用量子计算求积分也比经典算法更有效^[9,10]. 因而量子计算能够促进人机交互向更智能化和自然化的方向发展. 计算已从科学计算的公式转换扩展到符号计算、生物机制的仿真以及自然法则的事件模拟. 最近又提出对太阳中的光子计算进行模拟和应用, 这样就可以发展光子计算的理论和设计, 并造出光子计算机. 总之, 量子计算、光子计算、免疫计算等其他一些新兴计算分支的产生和发展促进了自然计算的发展^[11-14].

莱顿自然计算研究中心的研究者们认为, 自然

计算是一种表示由自然启发的计算的一般性术语,而自然计算的研究就包括从理论上和经验上对由自然启发的计算的理解.自然计算的特征就是比喻性地使用自然系统潜在的概念、原理和机制.因此,进化算法使用生物学中变异、基因重组和自然选择的概念,而神经网络由大脑和神经系统中相互高度连接的神经结构启发而来.另一方面,自然计算还体现在分子计算,分子计算的目的是实现生物硬件中的算法,例如使用DNA分子和酶.自然计算是计算机科学中最令人兴奋的分支之一,越来越多人认为它将成为21世纪计算机科学的一个主要领域.

布拉德认为,人工智能的目标一直是模拟人类智能,但其方法学已根本改变了.所有这些趋势表明,人工智能需要坚实的数学基础,包括信息论、概率论和优化论等.人工智能的数学基础之一就是自然计算^[6-15].

DNA计算研究的最新成果已经扩展了对自然计算的理解.1994年,阿德曼博士使用现代分子生物学技术,提出了解决哈密顿路径问题的DNA分子生物学计算方法,并在试管里求出此问题的解^[16].这就显示了DNA计算是自然界生物中一种内在的独立于传统计算机的自然计算机制.自然界中存在着一些自然计算机制,例如太阳的光子计算.计算不仅指当前的计算机计算,还包括诸如生物机制、光学原理和脑功能的自然计算.计算的本质是什么?这个具有矛盾性的基本问题又摆到人们面前.计算和生命的关系又是什么?DNA计算似乎显示出计算是生命的基础和核心^[17].

根据自然计算的上述发展史,可以提出一些有关自然计算的问题,例如自然计算的表示、编码、控制策略、计算算法等.最近根据自然计算是自然界的一种内在机制和智能的基础的观点,提出了自然计算的一种框架^[18].不过,自然计算是否为自然现象的内在机制还有待实验和自然现象的验证.此外,还提出了从自然界存在的计算模式广义映射到新的自然启发的计算模式的模型,然后分析了这个模型的结构、原理和特征^[19].自然计算能够增强一般系统的许多特征,给予系统新的活力.由于自然计算是一种创新性的计算,所以这种计算的发展将推动系统学的根本性发展,包括系统结构的一般化和系统领域的扩展.如何协调传统计算和自然计算之类的新兴计算之间的关系?如何处理新兴计算分支之间的关系?这些都是本文要讨论的问题.

2 自然计算问题 (Natural computation problem)

对于计算机、自动控制等系统,计算模型是最重要的模块之一,如图1所示.

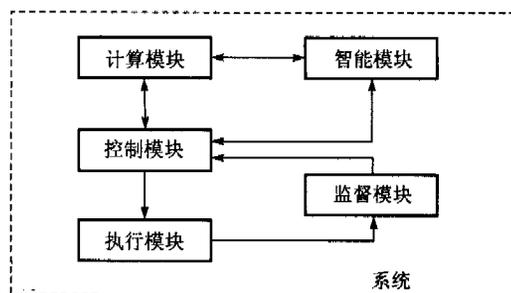


图1 计算机、自动控制等系统的基本体系结构

Fig. 1 Basic architecture of the systems such as computers and automatic control systems etc.

在现代数字时代,计算模块对各种数字操作以及数字信息与其他信息之间的转换是必要的.这里所指的其他信息包括自然信息,其形式是自然的,来自自然.

计算机、自动控制等系统可由底层、中间层和高层3层构成,如图2所示.底层包括执行模块和监督模块,其功能就是执行程序 and 监视结果与异常.中间层包括控制模块和计算模块,而其功能就是控制和计算信息.高层包括智能模块,其功能就是模拟人类智能行为.

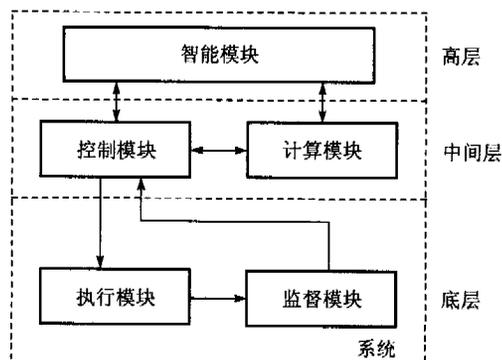


图2 计算机、自动控制等系统的分层体系结构

Fig. 2 Hierarchical architecture of the systems such as computers and automatic control systems etc.

从自然计算的发展史可以看出,自然计算是计算科学革命性的发展方向之一.因而自然计算也会影响计算机、自动控制等系统的发展,甚至引发系统科学的革命.

自然计算伴随着一些新的计算分支产生,这些新兴的计算分支包括量子计算、DNA计算、进化计

算、免疫计算和光子计算等. 下面讨论自然计算的新特征.

1) 自然法则.

在自然界中存在着自然的计算模式. 人类、生物和非生物都具有一定的计算模式. 例如, 人脑可以执行数学计算和符号计算, 然后可以进行推理和搜索, 直到问题得到求解. 又如, 在生物界一直发生着诸如自然选择和适者生存之类的生物进化计算过程. 物种一直在向前发展, 自然在进化, 而整个环境不断从低级阶段向高级阶段发展. 再如, 太阳是光子计算的核心, 而九大行星一直年复一年地按照特定的速度和轨道绕着太阳转.

2) 交叉性.

自然计算可以描述为所有新兴计算分支的交集的映射集合, 如图 3 所示. 集合①表示 DNA 计算; 集合②表示进化计算; 集合③表示免疫计算; 集合④表示量子计算; 集合⑤表示计算机中蚁群计算、蜂窝计算等其他形式的计算; 集合⑥表示机器共同模拟自然的模拟计算机机制; 集合⑦表示自然计算. 从图中可以看出, 模拟计算是 DNA 计算、进化计算、免疫计算、量子计算和其他计算分支的交集.

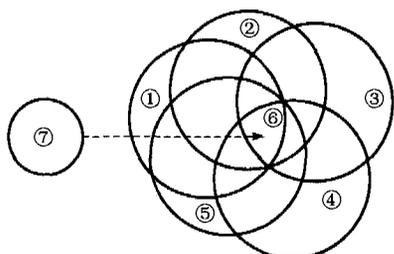


图 3 自然计算和模拟计算之间的映射关系

Fig. 3 Relations of mapping from natural computation to simulating computation

3) 革命性.

基于当前发展的计算技术(如量子计算、DNA 计算、进化计算和免疫计算等)的共同计算机机制, 已提出自然计算来统一这些新的计算分支^[19]. 事实上, 所有计算机具有模拟计算的共同机制. 另一方面, 自然界中不仅太阳可能具有自然计算机机制, 地球、月球、大海、火山、生物、人类等也都可能具有自然计算机机制. 此外, 自然界的自然计算机机制不同于计算机之类的人造机器的模拟计算机机制, 也不同于人脑的自然计算机机制. 它们的计算都为它们自己服务, 因而具备自己独特的结构和性质. 一般来说, 彼此是不能直接相互控制的.

在诸如 DNA 计算、量子计算之类的当前模拟计

算分支的发展过程中发现了自然计算, 如图 4 所示.

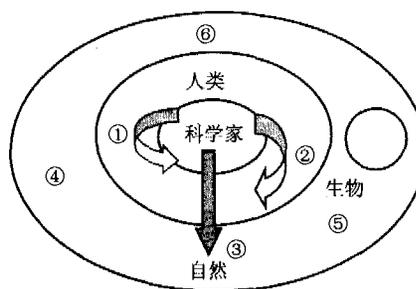


图 4 计算的发展

Fig. 4 Development of computation

图 4 中, 区域①表示早期的数学计算, 当时科学家使用计算机来模仿自身做一些数学计算工作. 区域②表示人工智能中的计算, 科学家使用计算机模拟人类处理知识. 区域③表示自然计算的模拟计算, 科学家使用计算机或者未来的计算机来模拟自然机制, 如进化、免疫系统、DNA 等. 区域④表示光子计算和量子计算, 科学家正在尝试使用量子计算机来解决问题, 其应用前景令人期待. 区域⑤表示分子计算和 DNA 计算, 科学家使用生物或者生物分子来像计算机一样解决问题, 或者使用计算机模拟生物. 区域⑥表示进化计算, 科学家使用计算机来模拟自然进化法则. 进化计算模拟生物进化的自然计算. 科学家首先使用计算机模拟自身, 然后科学家又使用计算机模拟人类, 但是发现在近数十、数百甚至数千年内很难解决这个问题. 于是科学家开始模拟自然界的许多事物, 例如 DNA、太阳、猴子和狗等.

举个例子, 一些生物具有免疫系统, 如人类和蚊子等. 在计算机的人工免疫系统的建模、算法设计、仿真和应用开发方面, 免疫算法用来模拟自然界中免疫系统的计算机机制. 电子计算机按照人类使用电子的二进制计算模式设计的算法或者程序运行. 光子计算机使用光子优于电子的计算模式, 按照人类设计的一定算法或者程序工作, 这样这些计算机就能模拟自然计算的机制.

4) 复杂性.

计算复杂性是解决一个数学形式问题所必需的固有计算资源的量度. 它是不变的, 因为计算复杂性仅仅依赖于这个问题, 而独立于用来解决这个问题的特定算法^[7]. 对于自然计算的问题, 其信息是局部的. 也就是说, 这些信息不能唯一地标识一个数学问题的物理状态或者一个实例. 而且, 这些信息受误差影响. 例如, 在天气预报中要知道天气的当前状态, 要通过地球站、飞机、轮船和卫星来测量数据. 因

为测量数目是有限的,因而其得到的信息是局部的,这些测量不可避免地受误差影响.可以创建对天气的自然计算的模拟,并且只能在一定误差范围内知道当前的天气.因为天气看上去是无序的,所以这个误差就被放大了,并且将预测天气的能力限制为几天内.

因为自然计算是新兴的、复杂的,并且自然计算的复杂性和自然界的许多机制有关,所以很难严格而准确地测量自然计算的复杂性.按照人工智能的观点,一个系统的精度越高,其智能就越低.反过来,一个系统的智能越高,其精度就越低^[20,21].基于人工智能方法,可以分析自然计算的复杂性,并允许精度比常规分析低一些的分析方法.

首先,在人类可以解决的问题中,人的问题是最复杂的,如大脑之谜.人与自然力量相比,人类的能力是有限的.和太阳系中的太阳之力类似,人的能力也可描述在一个圈内.但这个圈就是人的复杂性,是复杂圈.因而如果人类(H)独立解决的问题表示为 $P(H)$,而 $C(*)$ 表示复杂性圈函数,那么

$$C(H) \geq C(P(H)). \quad (1)$$

自然系统表示为 S ,例如人、太阳、地球等.此系统通过其基本操作集合 OS 工作:

$$OS = \{op_1, op_2, op_3, \dots, op_n\}. \quad (2)$$

$op_i, i = 1, 2, \dots, n$ 表示其基本操作,如果缺一个基本操作, S 系统就不能正常工作.

定义 1 S 系统的每个基本操作 op_i 有一定的时间复杂性和空间复杂性,分别表示为 $tm(op_i)$ 和 $sp(op_i)$.则 S 系统的时间复杂性表示为

$$\max\{f(tm(op_1), tm(op_2), \dots, tm(op_n))\}.$$

其中 $f(*)$ 表示这个系统 S 中所有基本操作的时间复杂性组合函数.

而这个系统 S 的空间复杂性可以表示为

$$\max\{g(sp(op_1), sp(op_2), \dots, sp(op_n))\}.$$

其中 $g(*)$ 表示系统 S 的另一个函数.

定理 1 如果一个自然系统 S 可以解决的问题用 P 表示,那么

$$C(S) \geq C(P). \quad (3)$$

证 S 系统的基本操作集合表示为

$$OS_S = \{op_i, i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

那么, S 系统的时间复杂性可以表示为

$$tm(S) = \max\{f(tm(op_1), \dots, tm(op_n))\}, \quad (5)$$

其中 $f(*)$ 表示这个系统 S 中所有基本操作的时间复杂性组合函数.

这个系统 S 的空间复杂性可以表示为

$$sp(S) = \max\{g(sp(op_1), \dots, sp(op_n))\}. \quad (6)$$

其中 $g(*)$ 表示这个系统 S 中所有基本操作的空间复杂性组合函数.

假定必须由以下操作集合解决问题 P :

$$OS_P = \{op_j, j = 1, 2, \dots, l\}. \quad (7)$$

这个集合 OS_P 中的所有操作必须转换为这个系统 S 中的一些基本操作,并且这些操作通过基本操作来执行,那么这个问题 P 就可以被这个系统 S 解决.因而这个操作集合 OS_P 可以映射到某个基本操作集合.因此,这个集合 OS_P 等价于以下集合

$$OS_P = \{op_k, k = i_1, \dots, i_m, m < n, op_k \in OS_S\}, \quad (8)$$

则问题 P 的时间复杂性可以表示为

$$tm(P) = \max\{f_1(tm(op_1), \dots, tm(op_l))\}, \quad (9)$$

其中 $f_1(*)$ 表示这个系统 S 中解决这个问题所有操作的时间复杂性组合函数.而且

$$tm(P) = \max\{f_2(tm(op_{i_1}), \dots, tm(op_{i_m}))\}, \quad (10)$$

其中 $m < n$, $f_2(*)$ 表示用于这个问题的这个系统 S 中的基本操作的时间复杂性组合函数.从公式(5)和(10)可以推导出问题 P 的时间复杂性和系统 S 的时间复杂性之间的关系

$$tm(P) \leq tm(S). \quad (11)$$

同时,基于公式(4)(6)和(8),可以使用类比推理方法推断出问题 P 的空间复杂性和系统 S 的空间复杂性之间的关系

$$sp(P) \leq sp(S). \quad (12)$$

因此, $C(S) \geq C(P)$.

3 自然计算的改进映射模型和算法 (Improved mapping model and algorithm of NC)

文献[18,19]提出了自然计算的早期映射模型.下面提出一种改进的映射模型.

3.1 自然计算的改进映射模型 (Improved mapping model of NC)

按照与人脑的关系,自然计算可分为两种.布拉德提出,可通过对大脑的电化反应的建模和计算来获取对大脑的基本理解,换句话说,可以把大脑理解为一个图灵机^[6].因此,大脑的自然计算和其他自然对象的自然计算构成了整个自然计算.

在自然计算的早期映射模型中,非人脑自然对

象的自然计算可以通过大脑功能映射到模拟计算. 大脑的自然计算在自然计算的改进模型中得到充分反映.

设 Γ 表示映射, 它将集合 $NC = \{no\}$ 中的元素自然对象 no (不是脑元素) 映射到集合 $SC = \{co\}$ 中的机器元素 co , 并且 co 表示 no 的象, 即计算机元素, no 称为原象, 如图 5 所示. 从自然到机器的映射 Γ 分两步进行, 先从自然映射到大脑, 记为 Γ_1 , 再从大脑映射到机器, 记为 Γ_2 , 从而映射 Γ 可以表示为大脑中这两个映射操作的乘积, 记为

$$\begin{aligned} \Gamma: no \rightarrow co, \Gamma(no) = co, \\ \Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2. \end{aligned} \quad (13)$$

在式(13)中, Γ_1 表示大脑的输入映像, 而其功能就是再组织、理解和学习自然计算的信息. Γ_2 表示大脑的输出映像, 而其功能就是创造和设计人工机器的模拟计算, 包括计算机和人工智能机器.

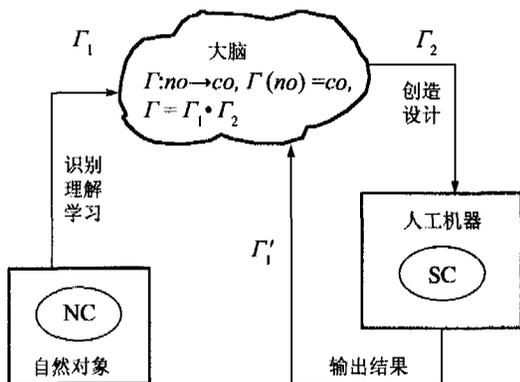


图 5 自然计算的改进映射模型
Fig. 5 Improved mapping model of NC

最初, 大脑再组织、理解和学习从自然计算的自然对象收集的信息, 产生了第 1 个映射 Γ_1 . 然后, 大脑创造和设计人工机器的模拟计算用来模拟自然计算, 产生了第 2 个映射 Γ_2 . 因此, 产生了从自然计算到模拟计算的映射 $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$. 运行人工机器之后, 人工机器的一些输出结果就反馈给大脑, 即大脑再次获取一些新信息, 并产生一个新的映射 Γ_1' , 用以改进 Γ . 现在 $\Gamma = \Gamma_1' \cdot \Gamma_2$ 或者 $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_1'$ (如果 Γ_1 仍然存在).

3.2 自然计算算法(NC algorithm)

对于图 1 中的这类系统, 首先搜集系统的控制任务信息, 用来设置系统的目标. 然后该系统需要选择控制策略、计算算法和智能机制. 最后, 运行这个系统, 并获得一些结果. 系统算法框图的整个过程如图 6 所示.

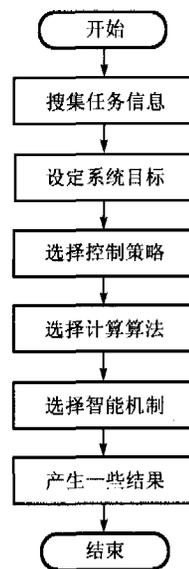


图 6 系统算法
Fig. 6 System algorithm

信息的一种重要属性是代价. 例如, 天气测量是一种代价很大的过程^[7]. 当系统搜集自然界中的任务信息时, 可以获得自然计算的编码. 编码和控制策略是计算的两大关键部分^[19, 22]. 模拟计算的编码结果是形式对象序列, 如二进制数、种群等.

自然计算的外部特征是多变的, 但具有与模拟计算共同的计算机制. 不同的控制策略和计算算法产生不同的自然计算特征. 自然计算系统由存储器 S , 自然计算的编码序列, 控制策略 $\{C_j\}$ 和计算算法 $\{A_k\}$ 组成.

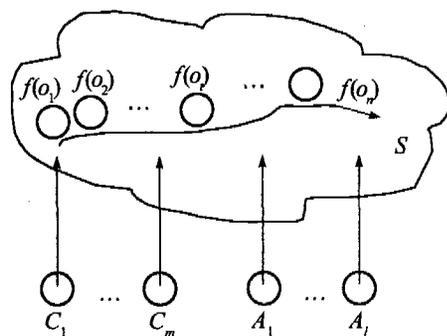


图 7 自然计算系统的计算算法
Fig. 7 Computing algorithm of NC system

4 意义和应用 (Significance and applications)

人工智能的发展史表明, 自然计算将成为人工智能坚实的数学基础之一. 自然计算也将为计算机科学带来重要革新^[22-27]. 自然计算将统一一些新兴的计算分支, 例如 DNA 计算等. 自然计算还将扩展其研究领域到自然机制, 产生新的自然计算分支.

进化计算、免疫计算和光子计算等新兴计算分支在科学、技术、教育、商业、经济、工业等领域都有增长的应用. 自然计算将有一个非常广阔、灿烂的应用前景.

5 结论(Conclusions)

本文中介绍了自然计算的发展史,提出了自然计算问题. 基于计算机、自动控制等系统的体系结构分析了自然计算的一些新特征. 然后,改进了从自然计算到模拟计算的映射模型,以强调大脑的自然计算,包括识别、理解、学习、创新和设计的能力. 再提出和分析了自然计算的算法. 最后,讨论了自然计算研究的意义和应用. 综上所述,自然计算将充分发展为年轻的计算分支^[28].

参考文献(References):

- [1] 蔡自兴, 徐光祐. 人工智能及其应用(第3版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(CAI Zixing, XU Guangyou. *Artificial Intelligence: Principles & Applications* [M]. Third edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [2] CHEUNG L C Y, HOLDEN T S I. Survey of artificial intelligence impacts on information systems engineering [J]. *Information and Software Technology*, 1991, 33(7): 499-508.
- [3] CHIEN Steve, DECOSTE Dennis, DOYLE Richard, et al. Making an impact artificial intelligence at the jet propulsion laboratory [J]. *AI Magazine*, 1997, 18(1): 103-121.
- [4] MCCORMARK D M, Day R. How artificial intelligence impacts E&P productivity [J]. *World Oil*, 1993, 214(10): 6.
- [5] NG E Y K, FOK S C, PEH Y. C, et al. Computerized detection of breast cancer with artificial intelligence and thermograms [J]. *J of Medical Engineering and Technology*, 2002, 26(4): 152-157.
- [6] BALLARD H D. *Introduction to Natural Computation* [M]. Cambridge: The MIT Press, 1997.
- [7] TRAUB J F, WERSCHULZ A G. *Complexity and Information* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [8] CAGAN Jonathan, GROSSMANN E Ignacio, HOOKER John. Conceptual framework for combining artificial intelligence and optimization in engineering design [J]. *Research in Engineering Design-Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, 1997, 9(1): 20-34.
- [9] NOVAK E. Quantum complexity of integration [J]. *J Complexity*, 2001, 17(1): 2-16.
- [10] GROVER L. Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 79(2): 325-328.
- [11] SPEARS M William. *Evolutionary Algorithms* [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [12] 高琳, 许进, 张军英. DNA 计算的研究进展与展望[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 973-977.
(GAO Lin, XU Jin, ZHANG Junying. A Survey of DNA Computing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(7): 973-977.)
- [13] MATOBA Osamu, NAUGHTON J Thomas, FRAUEL Yann, et al. Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(29): 6187-6192.
- [14] FRANSON J D, JACOBS B C, PITTMAN T B. Quantum computing using single photons and the Zeno effect [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(6): 1-13.
- [15] RICHARDS W A Ed. *Natural Computation* [M]. Cambridge: The MIT Press, 1988.
- [16] ADLEMAN L. Molecular Computation of Solution to Combinatorial problems [J]. *Science*, 1994, 66(11): 1021-1024.
- [17] 郝宁湘. DNA 计算机: 数学与生命的交融[J]. 自然辩证法研究, 2000, 16(10): 30-34.
(HAO Ningxiang. DNA Computer; Blend of Mathematics and Life [J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2000, 16(10): 30-34.)
- [18] 龚涛, 蔡自兴. 自然计算的广义映射模型[J]. 计算机科学, 2002, 29(9): 27-29.
(GONG Tao, CAI Zixing. Generalized Mapping Model of Natural Computation [J]. *Computer Science*, 2002, 29(9): 27-29.)
- [19] GONG Tao, CAI Jingfeng, CAI Zixing. A Coding and Control Mechanism of Natural Computation [C]// YEN G Gary, LIU Derong. *Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Houston, Piscataway: IEEE Society Press, 2003, 727-732.
- [20] TRAUB J F. Do Negative Results from Formal Systems Limit Scientific Knowledge? [J]. *Complexity*, 1997, 3(1): 29-31.
- [21] ALIPPI C, PIURI V, SCOTTI F. Accuracy versus complexity in RBF neural networks [J]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2001, 4(1): 32-36.
- [22] GONG Tao, CAI Zixing. Mobile Immune-Robot Model [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Society Press, 2003: 1091-1096.
- [23] CAI Zixing, GONG Tao. Multi-dimension education immune network [C]// *Proceedings of the 6th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando: Int Inst Informatics & Systemics, 2002: 32-37.
- [24] ABBASS H A. An agent based approach to 3-SAT using marriage in honey-bees optimization [J]. *Int J of Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems (KES)*, 2002, 6(2): 1-8.
- [25] ABBASS H A, HOAI N X, MCKAY R I. AntTAG: A new method to compose computer programs using colonies of ants [C]// *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Honolulu, Piscataway: IEEE Society Press, 2002: 1654-1659.
- [26] GONG Tao, CAI Zixing. Robust distributed system of multi-dimension education agents [C]// *Proceedings of 2002 International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*. Wuhan:

Wuhan Univ Technology Press, 2002; 144 - 150.

- [27] 李茂军, 罗安, 童调生. 人工免疫算法及其应用研究 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 153 - 157.
(LI Maojun, LUO An, TONG Tiaosheng. Artificial immune algorithm and its applications [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 153 - 157.)
- [28] DENNING J Peter, METCALFE M Robert. *Beyond Calculation: The Next Fifty Years of Computing* [M]. New York: Springer-Verlag, 1997.

作者简介:

龚涛 (1978—), 男, 中南大学信息科学与工程学院博士生, 正在主持免疫计算方面的国家自然科学基金青年项目, 已发表论文 23 篇左右, 编著著作 10 多本, 研究方向为免疫计算、自然计算、人工智能, E-mail: taogong@sigmaxi.org;

蔡自兴 (1938—), 男, 中南大学信息科学与工程学院首席教授, 国家级教学名师, 博士生导师, 正在主持移动机器人方面的国家自然科学基金重点项目, 已发表论文 400 多篇, 编著著作 20 多本, 研究方向为智能控制、人工智能、智能机器人。

《非线性控制系统理论与应用》(第 2 版) 书评

由胡跃明教授撰写的《非线性控制系统理论与应用》一书自 2002 年由国防工业出版社出版以来, 被多个大学院所作为非线性控制相关课程的研究生教材或参考书. 在 2004 年被教育部学位管理研究生教育司推荐该书为研究生教学用书后, 著者对原书进行了认真修改, 增加了著者的若干最新研究成果, 并于 2005 年 7 月由国防工业出版社发行第 2 版.

著者根据多年来从事非线性控制系统理论与应用的教学与研究工作经验, 力求将一些非线性系统基本理论和比较有代表性的热点研究内容和实例收入书中, 介绍给读者, 该书是一部具有学术参考价值的著作.

全书共分 9 章, 前 3 章主要介绍非线性控制系统的必须预备知识, 包括基本概念、微分几何基础、稳定性理论等. 对于不熟悉微分几何理论的读者, 著者在每节尾部以向量函数和偏导数概念作了介绍, 力求工科读者能够掌握和应用非线性控制方法. 此外, 鉴于不变性原理在分析系统稳定性和收敛性方面的应用意义, 著者在稳定性部分重点介绍拉萨尔不变性原理的应用.

第 4 章介绍非线性控制系统的输入/输出分析方法, 主要包括描述函数方法和沃特拉表达方法. 第 5 章重点介绍非线性控制系统的精确线性化方法, 首先对单输入/单输出系统给出了可以实现输入/输出线性化和输入/状态线性化的条件以及精确线性化方法, 然后将有关结果推广到多输入多输出系统, 此外还讨论了零动态、动态扩展、鲁棒线性化及有线性动态误差的状态观测器设计等相关问题. 第 6 章集中讨论非线性几何控制方法, 主要介绍了能控性和能观性概念以及标准分解方法, 同时还系统讨论了非完整系统特别是无漂移控制系统的控制问题. 在第 2 版中, 增加了作者关于不确定无漂移非完整系统显式周期时变反馈方法的最新研究结果. 该方法通过适当的时变周期奇函数反馈使系统初值问题解为周期解, 然后构造系统的首次积分, 并结合变结构控制方法给出了使系统渐近稳定的一般反馈规律的设计. 该设计方法对于一般仿射非线性系统的周期时变反馈控制器设计也有一定的参考价值. 第 7 章主要介绍非线性系统的变结构控制方法, 将精确线性化和变结构控制方法有机地结合以用于非线性不确定系统的鲁棒控制问题. 第 8 章集中介绍了近年来非线性控制系统领域中的一些研究热点, 包括各种近似化方法、反步设计方法、齐次控制方法、微分平滑方法等, 对从事该领域理论与应用研究的读者很有参考价值. 最后一章给出了球棒系统、飞行器和非完整移动机器人的非线性控制设计.

该书不仅介绍了非线性控制系统的基础理论, 同时也对当前有关研究热点作了必要的探讨, 并附有习题供读者参考. 可作为控制理论与控制工程等相关专业硕士与博士研究生的教材和非线性控制理论与应用研究工作者的参考书. 书中介绍的非线性系统精确线性化及各种近似化等方法可能对有关从事非线性模型简化的其他工程专业人员也具有很好的参考价值.

(中国科学院数学与系统科学研究院 秦化淑)