

# 人工免疫系统及其算法

谢克明 谢刚 郭红波 续欣莹  
(太原理工大学信息工程学院 太原 030024)

**摘要:** 该文阐述了人工免疫系统(AIS)的基本概念, 讨论了几种典型的算法, 包括基于免疫系统基本机制的免疫算法, 基于免疫特异性的否定选择算法, 基于免疫系统克隆选择理论的克隆选择算法, 基于接种疫苗及免疫多样性的免疫进化算法, AIS与神经网络混合智能系统和模糊免疫系统以及威胁模型等。简述了AIS发展历史, 按年代顺序介绍了AIS在若干具有代表性的领域中的应用情况。最后通过对AIS的特性和存在问题的分析, 展望了今后的研究重点和发展趋势。

**关键词:** 人工免疫系统, 免疫算法, 否定和克隆选择, 免疫进化, 模糊免疫, 威胁模型

**中图分类号:** TP18, TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)11-1839-06

## Overview of Artificial Immune System and Its Algorithms

Xie Ke-ming Xie Gang Guo Hong-bo Xu Xin-ying

(College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** According to the prototype of living body's immune system, Artificial Immune System, (AIS) is introduced. Based on the main function of immune system, the typical algorithms are described, such as immune algorithm, negative and clonal selection algorithms, immune evolutionary algorithm, AIS-neural network mix intelligent system, fuzzy immune system, danger model and so on. a chronological list of AIS models and techniques that are found in the literature is showed. Finally, based on the analysis of AIS, the development directions and research emphases are discussed.

**Key words** Artificial Immune System, (AIS), Immune algorithm, Negative and clonal selection, Immune evolutionary, Fuzzy immune, Danger model

### 1 引言

从上世纪50年代至今, 人工智能飞速发展并应用于工程实践中。人工免疫系统 (Artificial Immune System, AIS)理论源于生物学、医学领域, 目前的定义主要有以下几种: “AIS是一种数据处理、归类、表示和推理策略, 该模型依据一种似是而非的生物范式, 即人体免疫系统”<sup>[1]</sup>; “AIS由生物免疫系统启发而来的智能策略所组成, 主要用于信息处理和问题的求解”<sup>[2]</sup>; “AIS是一种由理论生物学启发而来的计算范式, 它借鉴了免疫系统的功能、原理和模型并用于复杂问题的解决”<sup>[3]</sup>; “人工免疫系统是遵循可信的生物学范例——人类免疫系统原理的数据处理、分类、表示和推理策略系统”<sup>[4]</sup>; “人工免疫系统是基于自然免疫系统方法的计算系统”<sup>[5]</sup>。本文认为人工免疫系统是以人类高等脊椎动物的免疫系统为原型, 利用生物免疫系统各种原理和机制而发展的各类模型、算法及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称, 它是与生物免疫系统相对应的工程概念, 如同人工神经

网络与脑神经系统, 进化计算与遗传系统, 模糊控制与人类模糊思维等。

### 2 典型人工免疫算法

Immunity(免疫)是从拉丁文Immunise衍生而来的。很早以前, 人们就注意到传染病患者痊愈后, 对该病有不同程度的免疫力。因此, 在相当长时期内, 免疫在微生物学和病毒学上是指免除瘟疫; 换言之, 是指对传染因子的再次感染有抵抗力, 这是机体在初次感染后对该传染因子产生了免疫应答的结果。在医学上, 免疫是指机体接触抗原性异物的一种生理反应<sup>[6]</sup>。生物免疫过程宏观描述如图1所示。

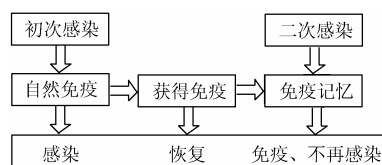


图1 生物免疫过程

### 2.1 基本免疫算法

基本免疫算法基于生物免疫系统基本机制，模仿了人体的免疫系统。基本免疫算法从体细胞理论和网络理论得到启发，实现了类似于生物免疫系统的抗原识别、细胞分化、记忆和自我调节的功能<sup>[7]</sup>，基本免疫算法由图2所示。如果将免疫算法与求解优化问题的一般搜索方法相比较，那么抗原、抗体、抗原和抗体之间的亲和性分别对应于优化问题的目标函数、优化解、解与目标函数的匹配程度。

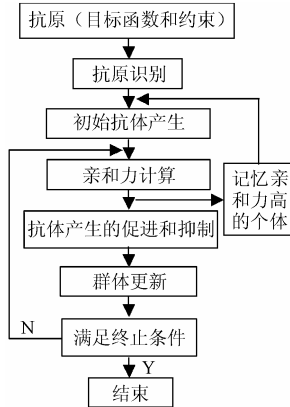


图2 基本免疫算法流程图

### 2.2 否定选择算法

否定选择算法基于生物免疫系统的特异性，借鉴生物免疫系统中胸腺T细胞生成时的“否定选择”(Negative selection)过程。Forrest<sup>[8]</sup>研究了一种用于检测数据变化的否定选择算法，用于解决计算机安全领域的问题，该算法通过系统对异常变化的成功监测而使免疫系统发挥作用，而监测成功的关键是系统能够分清自己和非己的信息。否定选择算法流程如图3所示。

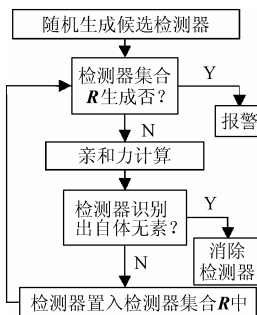


图3 否定选择算法流程图

### 2.3 克隆选择算法

Castro<sup>[9]</sup>基于免疫系统的克隆选择理论提出了克隆选择算法，这是一种模拟免疫系统的学习过程的进化算法。克隆选择算法模拟这一过程进行优化，算法框图如图4所示。Castro进一步将免疫网络理论与克隆选择算法相结合，提出了人工免疫网络学习算法用于知识发现，冗余数据挖掘，自

动分类，并对算法的参数灵敏度特性进行了分析。

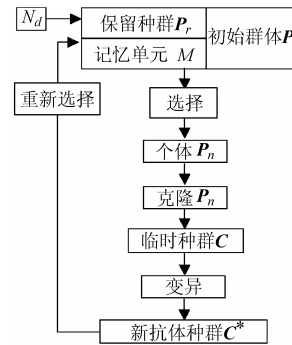


图4 克隆选择算法流程图

## 3 复杂人工免疫算法

### 3.1 免疫进化算法

进化计算作为一种有向随机搜索的优化算法已得到了广泛的应用，与基本免疫算法相结合，可构成“免疫-进化算法”，它已成为AIS研究和应用的成功领域之一。

文献[10]提出了集免疫机制和进化机制于一体的一种全局并行算法——基于免疫策略的进化算法，证明了算法的全局收敛性，并且给出了免疫疫苗的选取策略和免疫算子的构造方法，并较好地解决了已有算法中出现的退化现象，且收敛速度有显著提高。文献[11]提出了一种具有免疫功能的遗传算法。把待求解的问题对应为抗原，问题的解对应为抗体，在免疫算法中加入了遗传算子，与遗传算法相比，增加了抗原识别、记忆功能和调节功能，不降低遗传算法的鲁棒性，而且兼顾了搜索速度、全局和局部搜索能力。文献[12]设计了具有免疫体亲近性特征的遗传算法。该算法增加了在已知的优秀个体中扩大同类个体范围的功能，避免了在同类个体中的最优秀者被丢失的可能性，同时保留了通常的遗传算法的交叉、变异等遗传算子，扩大了全局的搜索范围，避免了局部收敛。可快速求解具有多个离散变量及多结点的网络优化问题。文献[13]提出了基于免疫抗体记忆的免疫算法，模拟生物特征引入了两种记忆机制，并把算法有效地应用于n-TSP(n-th agents' Travelling Salesman Problem)问题。文献[14]借鉴抗体的多样性保持策略，弥补遗传算法在群体多样性差时易陷入局部极小的缺点，大大提高了算法的群体多样性。该算法具有较好的全局收敛性，能有效解决装箱问题。这些算法可以快速求出满足一定精度要求的最优解，对解决实际的工程应用问题具有很大价值。

免疫算法和进化算法之间区别主要表现在：(1)免疫算法在记忆单元基础上运行，确保了快速收敛于全局最优解；进化计算则是基于父代群体，不能保证概率收敛；(2)免疫算法

评价标准是计算亲和性抗体-抗原的亲和力以及抗体-抗体亲和度,反映了真实的免疫系统的多样性,而进化算法则是简单计算个体的适应度;(3)免疫算法通过促进或抑制抗体的产生,体现了免疫反应的自我调节功能,保证了个体的多样性,而进化算法只是根据适应度选择父代个体,并没有对个体多样性进行调节。

### 3.2 AIS与人工神经网络混合算法

神经系统和免疫系统之间有许多异同,文献[15]描述了两种系统生理上的一般相同点和不同点。AIS 和人工神经网络(ANN)都是受生物启发而产生的技术,二者利用学习、记忆、联想恢复等能力实现在高度分布式系统中识别问题功能。由于AIS能学习并记住曾被识别的模式并能高效地组建新的模式检测器,所以Glenn<sup>[16]</sup>认为免疫系统是继神经系统之后的“第二大系统”。免疫系统中亲和力成熟过程等同于神经网络中权值更新过程,二者都是增加对被识别模式的响应能力。

文献[10]在探讨与分析生物自然界中免疫现象的基础上,提出了一种集免疫机制和神经信息处理机制于一体的免疫神经网络。该网络可以使人们直接利用待求问题的特征信息,并通过注入先验知识来调节隐层单元的激励函数,以达到简化网络的结构,提高其工作的效率和准确性。

Casto提出的aiNet算法<sup>[17]</sup>模拟了免疫网络对抗原刺激的过程,主要包括抗体-抗原识别、免疫克隆增值、亲合度成熟以及网络抑制、免疫网络被认为是一个付权无向图,而且不是全连接的。

Sasaki<sup>[18]</sup>提出了一种基于免疫系统反馈机理的自适应学习的神经网络控制器,根据免疫系统反馈机理抗体迅速识别抗原、消灭抗原并保持免疫系统稳定平衡状态的性能,用于改进神经网络学习算法的下降梯度,使学习步长尽可能大,以保持学习的稳定性。

Neidhofer<sup>[19]</sup>使用免疫神经网络进行复杂系统识别,把免疫系统的鲁棒性引入到神经网络中,使神经网络具有动态自适应能力。解决了后向神经网络在动态变化环境中的无效性,该方案能成功控制在线不确定系统、持续变化的动态系统等。

对AIS和ANN二者混合系统的研究表明,AIS对ANN不仅是有效的补充,更重要的是它们之间可以互相促进,提出多种解决问题的新思路。

### 3.3 模糊AIS

目前AIS结合模糊控制系统的研究很少,比较有影响的是Nasaroui<sup>[20]</sup>和Ding<sup>[21]</sup>所做的研究。免疫系统能够对付几乎

无穷多的抗原和细菌,免疫系统能够识别的异己分子的种类数是未知的。Nasaroui利用抗原-抗体匹配、识别过程中的不确定性和模糊性,提出了一种模糊免疫算法。通过WEB站点数据挖掘、WEB请求预测等仿真实验证明了算法的有效性。Ding利用免疫系统反馈原理,设计了一种模糊自调整免疫PID控制器,该控制器结构简单,参数调整方便、快捷,并成功应用于过高温自动控制系统中的温度调节。

### 3.4 威胁模型

这一理论自从1994年首次被Matzinger<sup>[22]</sup>提出以来就颇有争议,它是对传统的人工免疫模型中自己和非己理论的挑战,之后对它的争论和研究不断。威胁模型认为,生物体内免疫的应答反应不是因为机体对自己和非己的识别(虽然存在这些行为),更重要的是机体对各种潜在的综合威胁的感知。这一理论被应用在入侵检测中,成功解释了自己和非己模型理论中无法解决的难题<sup>[23-25]</sup>。

## 4 人工免疫算法的工程应用

AIS在近几年得到了迅速发展,已经渗透到诸如计算机病毒检测及网络安全、认知模型、多Agent系统、设计与规划、模式识别、自组织、学习、函数优化、故障诊断检测、机器人学等各类研究领域中。

早在1986年,Farmer<sup>[26]</sup>就开始在机器学习中引入了生物免疫的相关机理来建立动态模型;1990年Ishida<sup>[27]</sup>引入了生物免疫系统的网络防御体系,建立了PDP学习算法,并将其应用于传感器网络故障诊断;从1994年开始,Forrest<sup>[8]</sup>等开展了基于人工免疫系统的信息安全研究,致力于建立自适应的计算机与网络免疫系统,以增强现行的计算机与网络系统的安全性。但直到1996年,在日本举行的首届免疫系统国际专题会议上,人工免疫系统的概念才首次被提出并确认。随后基于生物免疫机理的人工免疫系统得到了迅速的发展和应用。

Dasgupta(1997)<sup>[15]</sup>等将人工免疫引入人工神经网络模型,并将它们有机结合应用于信息传输。Chun(1998)<sup>[28]</sup>等人在体细胞和免疫网络理论的基础上发展了免疫遗传算法,该算法把抗原看作目标函数,抗体看作问题的可行解,抗体与抗原的亲和力看作可行解的适应度。1999年,Dasgupta<sup>[29, 30]</sup>等运用人工免疫否定选择算法,通过对切削操作时时间序列数据的分析来检测刀具是否损坏;他们也利用免疫遗传算法进行化学光谱的分析,取得不错的效果;Okamoto<sup>[31]</sup>等提出了一种基于Agent分布式多网络的反计算机病毒系统,它由免疫系统和恢复系统组成,其功能表现为通过“自己”的信

息辨认“非己(病毒)”的信息。2000年, Tarakanov<sup>[32]</sup>利用抗原与抗体的复合性建立了Biosystem模型; Timmis<sup>[33, 34]</sup>等构造了一种与领域无关的无监督机器学习方法用于实验数据的聚类分析, 并进一步给出了用于数据分析的模型RLAIS, 该模型在多谱影像的深入数据分析和网络故障预测中得到了应用; De Castro<sup>[35]</sup>研究了基于克隆选择机理的字符识别问题, 采用状态空间来表示待识别的模式; Bradley<sup>[36]</sup>通过自体和非自体的识别将人工免疫系统应用于硬件的故障诊断与容错, 效果良好。2001年, De Castro<sup>[37]</sup>等提出了aiNET算法, 并将其应用于数据分析; Kim<sup>[38]</sup>基于克隆选择和否定选择机理研究了网络的入侵检测问题, 指出了影响入侵模式检测的几个因素, 并通过实验证明嵌入式否定检测算子对于维持较低的误报检测率是十分关键的; 王肇捷<sup>[39]</sup>等将免疫算法用于解决计算机视觉中的立体匹配, 得到了最佳视差图, 而且匹配效果好, 速度快。2002年, Tarakanov<sup>[40]</sup>等利用免疫网络组建了具有免疫特性的芯片结构, 并应用在模式识别上; Nasaroui<sup>[41]</sup>使用模糊理论模拟抗原-抗体匹配的免疫网络算法, 应用在了Web数据挖掘方面; Hart<sup>[42]</sup>引入免疫记忆理论, 建立了基于松散分布记忆模式的非静态数据分析系统, 在多Agent同分布数据传输和采样的应用效果良好; Kim<sup>[43]</sup>也在克隆选择原理的基础上提出一种变化环境下的动态学习算法。2003年, Gonzalez<sup>[44]</sup>分析和比较了否定选择中的二进制匹配规则, 提供了一种否定选择算法中如何选择不同匹配规则的思路。Dasgupta<sup>[45]</sup>等依据否定选择和克隆选择理论提出一种多级免疫学习算法用于异物检测和模式识别; 2004年, 宫新保等<sup>[46]</sup>根据生物免疫机理提出一种基于免疫聚类和遗传算法的RBF网络设计用于多用户检测; 舒栋才等<sup>[47]</sup>也提出一种基于免疫进化算法的投影寻踪聚类, 并将其应用在地下水动态分类中。

## 5 展望

AIS在短期内已发展成为计算智能领域研究的一个重要分支, 显示出巨大的潜力和强劲的发展势头。但是免疫系统是非常复杂的系统, 医学界关于免疫机理目前还有许多问题没有研究明白, 对已有的研究成果还有很多争议。甚至有学者认为智能行为不能用简单的数学模型描述, 人工智能“应该从生物学而不是物理学受到启示”, 基于“还原论”的传统AI应该转向“进化论”<sup>[48]</sup>。AIS取得成功的大小受制于免疫系统的发展及其发展程度, 它作为一个新的研究领域只是刚刚开始, 目前多数研究还处在探索阶段, 现有的算法没有

统一的标准, 而且开放性的问题不断涌现。随着人类对免疫系统的深入研究, AIS在理论和实践上有待取得新的突破。

生物系统中的信息处理系统部分包含遗传系统、脑神经系统、免疫系统和内分泌系统4种类型, 它们之间相互区别、相互制约, 又相互联系、相互依赖的机理为人工智能的综合集成提供了坚实的生物基础。人工免疫系统可以与进化计算、神经网络、模糊控制等技术紧密结合在一起, 我们可更大胆地设想借鉴生物内分泌系统(虽然目前还没有关于内分泌系统在智能控制工程应用研究的报道)以形成一个具有多学科、多手段、多技术的协同集成框架, 为模拟具有人类的智能提供一种崭新的思路。

## 参考文献

- [1] <http://www.streamonthe-fly.com/pdf/in.pdf>
- [2] Dasgupta D, Attoh Okine N. Immunity based systems: A survey. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997. 369 – 374.
- [3] Timmis J, Knight T. Artificial immune system: Using the immune system as inspiration for data mining. In: Abbass H A, Sarker R A, New ton C S eds. Data Mining: A Heuristic Approach. Hershey: Idea Publishing Group, 2001. 209 – 230.
- [4] De Castro L N. & Von Zuben F J. Artificial Immune Systems: Part I basic theory and applications. Technical Report-RT DCA, 1999, (01): 89.
- [5] Timmis J. & Hunt J. An artificial immune system for data analysis. *Biosystems*, 2000, 55(1/3): 143 – 150.
- [6] <http://user.nankai.edu.cn/sky/myxkc/introduction/1-1-1.html>.
- [7] Hong J, Lee W, Lee B, Lee Y. An efficient production algorithm for multihead surface mounting machines using the biological immune algorithm. *International Journal for Fuzzy Systems*, 2000, 2(1): 45 – 53.
- [8] Forrest S, Perelson A, Cherukuri R. Self-nonself discrimination in a computer[A]. In: Proceedings of 1994 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy[C]. Los Alamos, CA, USA, IEEE Computer Society, 1994: 202 – 212.
- [9] Castro L N, Von Zuben F J. Data Mining: a Heuristic Approach [M]. USA, Idea Group Publishing, 2001: 231 – 259.
- [10] 王磊. 免疫进化计算理论及应用. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2001, 9.
- [11] 莫宏伟, 王科俊, 金鸿章. 计算智能的融合应用研究. *自动化技术及应用*, 2002, (1): 12 – 16.
- [12] 孟繁栋, 扬则, 胡云吕, 徐慧. 具有免疫体亲近性的遗传算法及其应用. *天津大学学报*, 1997, 30(5): 624 – 627.

- [13] Endon S, Toma N, Yamada K. Immune algorithm for n-TSP. IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics. San Diego, California, 1998, 4: 3844 – 3849.
- [14] 曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法的装箱问题求解. 小型微型计算机系统, 2000, 21(4): 361 – 363.
- [15] Dasgupta D. Artificial neural networks and artificial immune systems: similarities and differences. in Proc. of IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Orland, FL, 1999: 873 – 878.
- [16] Rowe G W. The Theoretical Models in Biology. First edition, Oxford University Press, 1994.
- [17] Castro L N D, Zuben F J V. An evolutionary immune network for data clustering. Proceedings Sixth Brazilian Symposium on Neural Networks, 2000: 84 – 89.
- [18] Sasaki M, Kawafuku M, Takahashi k. An immune feedback mechanism based adaptive learning of neural network controller. ICONIP'99 6<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing. IEEE Computer Society Press, Perth, Western Australia, 1999: 502 – 507.
- [19] Neidhoefer J C, Krishnakumar K. System theory, immunized neural networks for complex system identification. Proceedings SSST '93., Twenty-Fifth Southeastern Symposium on, Tuscaloosa, Alabama, 1993: 383 – 387.
- [20] Nasaroui O, Gonzalez, F, Dasgupta D. The fuzzy artificial immune system: motivations, basic concepts, and application to clustering and Web profiling. FUZZ-IEEE'02, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on, Hawaii, HI, 2002, Vol.1: 711 – 716.
- [21] Ding Y, Ren L. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia. FUZZ IEEE 2000, The Ninth IEEE International Conference, San Antonio, 2000, vol.1: 534-538.
- [22] Matzinger P. The danger model: a renewed sense of self. *Science*, 2002, 296: 301 – 305.
- [23] Aickelin U, Cayzer S. The danger theory and its application to AIS. 1st International Conference on AIS, Canterbury, UK, 2002: 141 – 148.
- [24] Aickelin U, Bentley P, Cayzer S, Kim J, McLeod J. Danger theory the link between AIS and IDS. in Proceedings ICARIS-2003, 2<sup>nd</sup> International Conference on Artificial Immune Systems, LNCS 2787, 2003: 147 – 155.
- [25] Greensmith J, Aickelin U, Twycross J. Detecting danger: applying a novel immunological concept to intrusion detection systems. 6<sup>th</sup> International Conference in Adaptive Computing in Design and Manufacture, Bristol, UK. 2004.
- [26] Farmer J D, Packard N H, Perelson A S. The Immune System, Adaptation and Machine Learning. *Physical* 22D, 1986: 187 – 204.
- [27] Ishida Y. Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm: towards immune network PDP modle. Proc. of IJCNN 90, San Diego, 1990: 777 – 782.
- [28] Chun J S, Jung H K, Hahn S Y. A study on comparison of optimization performance between immune algorithm and other heuristic algorithms[J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 1998, 34(5): 2972 – 2975.
- [29] Dasgupta D, Forrest S. Artificial immune systems in industrial applications [A]. IPMM '99. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials [C]. Honolulu, 1999, 1 : 257 – 267.
- [30] Dasgupta D. Immune-based intrusion detection system: a general framework. in Proceedings of the 22th National Information Systems Security Conference, Arlington, Virginia, USA, 1999: 18 – 21.
- [31] Okamoto T, Ishida Y. A distributed approach to computer virus detection and neutralization by autonomous and heterogeneous agents. In: Proc. 4th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, Tokyo, Japan, 1999: 328 – 331.
- [32] Tarakanov A, Dasgupta D. A formal model of an artificial immune system, *BioSystem*, 2000, 55 (1-3): 151 – 158.
- [33] Timmis J I. Artificial immune systems: A novel data analysis technique inspired by the immune network theory. [Dissertation], University of Wales, 2000.
- [34] Timmis J, Neal M, Hunt J. Artificial immune system for data analysis. *Biosystems*, 2000, 55(1- 3): 14 – 150.
- [35] De Castro L N, Von Zuben F J. Clonal selection algorithm with engineering applications. In: Proc GECCO'00, Las Vegas, Nevada, USA, 2000: 36 – 37.
- [36] Bradley D, Tyrell A. Immunotronics: Hardware fault tolerance inspired by the immune system. in Proceedings of the 3th International Conference on Evolvable Systems(ICES2000). Vol. 1801, Springer-Verlag, INC., 2000, v.1801: 11–20.
- [37] Lendro Nunes, De Castro L N, Fernando Jose, *et al.*. aiNET: An Artificial Immune Network for Date Analysis. in Date Mining: A Heuristic Approach, Idea Group Publishing, London, UK, 2001: 231–259.
- [38] Kim J, Bentley P J. Towards an artificial immune system for network intrusion detection: An investigation of clonal selection with a negative selection operator. In: Proc. Congression

- Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001: 27 – 30.
- [39] 王肇捷, 黄文剑. 立体匹配的免疫算法[J]. 电脑与信息技术. 2001(4): 4 – 6.
- [40] Tarakanov A, Dasgupta D. An immune chip architecture and its emulation. Proc. of the 2002 NASA/DoD Conf. on Evolvable Hardware, Washington, DC, USA, 2002.
- [41] Nasaroui O, Gonzalez F, Dasgupta D. The fuzzy AIS: motivations, basic concepts, and application to clustering and web profiling. In: International Joint Conference on Fuzzy Systems. Part of the World Congress on Computational Intelligence, Honolulu, HI, 2002: 711 – 717.
- [42] Hart E, Ross P. Exploiting the analogy between immunology and spare distributed memories: A system for clustering non-stationary data. the first ICARIS, 2002.
- [43] Kim J, Bentley P J. Toward an artificial immune system for network intrusion detection: An investigation of dynamic clonal selection, in Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation CEC2002, Honolulu, 2002.
- [44] Fabio Gonzalez, Dipankar Dasgupta, Jonatan Gomea. The Effect of binary rules in negative selection. In Proceedings of GECCO-2003, Chicago, 2003.
- [45] Dasgupta D, Yu Senhua, Majumdar N S. MILA –Multilevel Immune Learning Algorithm, In the Proceedings of GECCO, Chicago, 2003.
- [46] 宫新保, 周希朗. 基于免疫聚类和遗传算法的RBF网络设计方法, 应用科学学报, 2004.(1): 81 – 84.
- [47] 舒栋才, 樊明兰, 林三益. 基于免疫进化算法的投影寻踪聚类及其在地下水动态分类中的应用. 四川大学学报(工程科学版), 2004. (1): 15 – 18.
- [48] 戴汝为, 王珏. 关于智能系统的综合集成[J]. 科学通报, 1993, 38(4): 645 – 655.
- 谢克明: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理、智能控制理论及应用、进化计算、人工免疫系统等等.
- 谢 刚: 男, 1972年生, 副教授, 主要研究方向为智能控制理论及应用、进化计算、人工免疫系统等等.
- 郭红波: 男, 1978年生, 讲师, 主要研究方向为智能控制理论及应用、人工免疫系统等等.
- 续欣莹: 男, 1980年生, 讲师, 主要研究方向为智能控制理论及应用、进化计算等等.