

# 人工免疫系统:原理、模型、分析及展望

肖人彬 王 磊

(华中科技大学 CAD 中心 武汉 430074)

**摘 要** 目前,受生物免疫系统启发而产生的人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)正在兴起,它作为计算智能研究的新领域,提供了一种强大的信息处理和解决问题范式.该文侧重以 AIS 的基本原理框架为线索,对其研究状况加以系统综述.首先从 AIS 的生物原型入手,归纳提炼出其仿生理理,主要包括免疫识别、免疫学习、免疫记忆、克隆选择、个体多样性、分布式和自适应等,进而对几种典型的 AIS 模型和算法分门别类地进行了细致讨论,随后介绍了 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** 生物免疫系统,人工免疫系统,计算智能,仿生理理,算法模型

**中图法分类号:** TP18

## Artificial Immune System: Principle, Models, Analysis and Perspectives

XIAO Ren-Bin WANG Lei

(CAD Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Drawing inspiration from the vertebrate immune system, a new research field of Artificial Immune System (AIS) is springing up. As a novel branch of computational intelligence, AIS has strong capabilities of pattern recognition, learning and associative memory, hence it is natural to view AIS as a powerful information processing and problem-solving paradigm in both the scientific and engineering fields. This paper intends to give a comprehensive overview of AIS based on a preliminary theoretical framework, which is started with the brief interpretative introduction of biological models of vertebrate immune system, then followed with some extracted bionic principles, viz. immune recognition, immune learning, immune memory, clone selection, diversity generation and maintenance etc. The mapping from natural immune system to AIS models is emphasized in this paper. As a result, some typical AIS based models and algorithms are discussed through classifications. It is the real engineering applications that draw the broad attention of computer scientists to recognize the great potential of AIS, hereby some important application fields as information security, pattern recognition, optimization, machine learning, data mining, robotics, diagnostics and cybernetics etc. are reviewed. Then based on the property analysis of AIS, some key problems in the state-of-the-art of AIS research are investigated, through which we hope to gain deep insight into AIS and suggest some new ideas that may be of value for AIS model development. Finally, some possible research directions of AIS are given by the authors in a further step as the summary of this paper, among which the application of AIS to evolutionary design is emphasized.

**Keywords** biological immune system, artificial immune system, computational intelligence, bionic principle, algorithmic model

# 1 引 言

近年来,人们不断从生物系统获得灵感,提出了若干采用计算途径实现的学习系统,包括人工神经网络(ANN)<sup>[1]</sup>、遗传算法(GA)<sup>[2]</sup>、蚁群系统(Ant System)<sup>[3]</sup>等,它们分别从大脑神经系统、自然进化过程和蚂蚁群体觅食、筑巢等社会活动启发而来.生物免疫系统同样是一个高度进化的生物系统,它旨在区分外部有害抗原和自身组织,从而清除病原并保持有机体的稳定<sup>[4]</sup>.从计算的角度来看,生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应和自组织的系统,具有很强的学习、识别、记忆和特征提取能力.人们自然希望从生物免疫系统的运行机制中获取灵感,开发面向应用的免疫系统计算模型——人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS),用于解决工程实际问题.目前,AIS已发展成为计算智能研究的一个崭新的分支<sup>[5]</sup>.

20世纪70年代,Jerne<sup>[6,7]</sup>提出了免疫系统的网络假说,开创了独特型网络理论,给出了免疫网络的数学框架,Perelson<sup>[8]</sup>对此进行进一步阐述.1986年,Farmer<sup>[9]</sup>基于免疫网络的假说,构造了一个免疫系统的动态模型并与Holland的分类器系统进行比较,提出了一些有价值的学习算法的构造思想,其工作具有重要意义.随后的研究者不断从生物免疫系统中抽取隐喻(metaphor)机制,用于AIS模型设计、算法实现和工程应用,其应用领域逐渐扩展到了信息安全<sup>[10,11]</sup>、模式识别<sup>[12]</sup>、智能优化<sup>[13-15]</sup>、机器学习<sup>[16,17]</sup>、数据挖掘<sup>[18-21]</sup>、机器人学<sup>[23-27]</sup>、自动控制<sup>[28]</sup>、故障诊断<sup>[29-31]</sup>等诸多领域,显示出AIS强大的信息处理和求解能力以及广阔的研究前景.

对于人工免疫系统,有几种不同的定义.Starlab<sup>①</sup>的定义为:“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”;Dasgupta<sup>[5]</sup>给出的定义为:“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求解”;Timmis<sup>[21]</sup>给出的定义为:“AIS是一种由理论生物学启发而来的计算范式,它借鉴了一些免疫系统的功能、原理和模型并用于复杂问题的解决”.Starlab仅从数据处理的角度对AIS进行了定义,而后两者则着眼于生物隐喻机制的应用,强调了AIS的免疫学机理,因而后两者更为贴切.

目前,由于认识到AIS在信息安全、机器学习与数据挖掘等领域潜在的应用前景,AIS的研究得到了许多大学、研究机构和工业界的重视.美国新墨西哥大学较早地开展了基于AIS的信息安全方面的研究,提出了计算免疫学<sup>[32]</sup>的概念,致力于构建计算机免疫系统,其相关研究成果已经在IBM,Intel等公司的相关信息安全软件中得到了应用.英国Kent大学的Timmis<sup>[21]</sup>对基于AIS的机器学习和数据挖掘技术进行了系统性的理论研究,并开展了基于AIS的大规模数据挖掘应用研究.作为计算智能的一个崭新分支,AIS已成为许多国际期刊的重要议题,如Evolutionary Computation,IEEE Transaction on Evolutionary Computation等,后者在2001年和2002年还相继出版了AIS专辑.在国际会议方面,从1997年开始,IEEE System, Man and Cybernetics国际会议每年均组织专门的AIS研讨会(Workshop);其它国际会议如GECCO(Genetic and Evolutionary Computation Conference),CEC(Congress on Evolutionary Computation)等也将AIS作为主题之一;而第一届人工免疫系统国际学术会议ICARIS(1st International Conference on Artificial Immune Systems)也于2002年9月在英国Kent大学召开.

关于AIS的研究进展在一些国内外的综述性论文中有所涉及.例如,Dasgupta<sup>[5]</sup>对1997年以前的AIS研究成果进行了全面总结;Bentley<sup>[33]</sup>在进化计算的背景下对AIS进行了简要概述,主要讨论了其在信息安全中的应用情况;文献<sup>[34]</sup>对AIS生物机理作了大致介绍,对AIS模型与应用进行了总结并展望了其今后的研究方向.本文侧重以AIS的基本原理框架为线索,对其研究状况加以系统综述.首先从AIS的生物原型入手,归纳提炼出其仿生机理,主要包括免疫识别、免疫学习、免疫记忆、克隆选择、多样性、分布式和自适应等,进而对几种典型的AIS模型和算法分门别类地进行了细致讨论,随后介绍了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.

## 2 AIS的生物原型<sup>[4,35]</sup>

AIS的生物原型即是指人体等高等脊椎动物的

① <http://www.streamonthefly.com/pdf/in.pdf>

免疫系统(在不引起混淆的情况下, 本文将其简称为免疫系统), 其结构如图 1 所示. 可以看出, 免疫系统具有分层的体系结构.

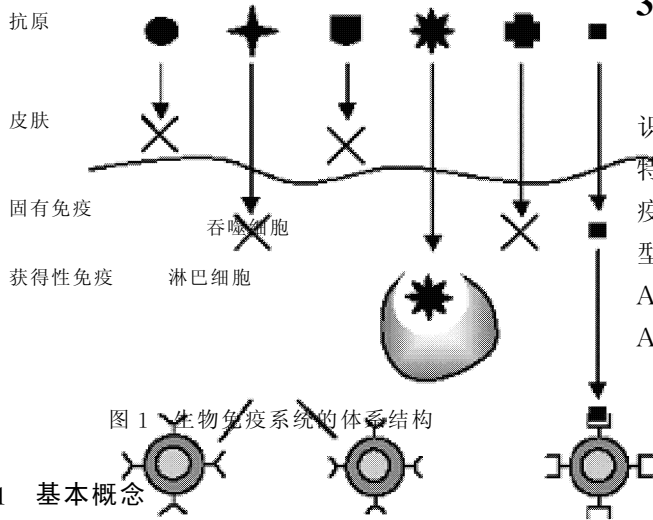


图 1 生物免疫系统的体系结构

## 2.1 基本概念

免疫系统抵御外部入侵, 使其机体免受病原侵害的应答反应称为免疫(immunity). 外部有害病原入侵机体并激活免疫细胞, 诱导其发生反应的过程称为免疫应答. 免疫应答分为固有性免疫和获得性免疫两种, 前者为机体先天获得, 可对病原进行快速清除; 后者特异性识别并清除病原体, 具有特异性、记忆、区分自我与非我、多样性和自我调节等优良特性. 诱导免疫系统产生免疫应答的物质称为抗原, 能与抗原进行特异性结合的免疫细胞称为抗体. 获得性免疫所具有的优良特性是 AIS 隐喻机制的不竭之源.

## 2.2 免疫细胞

免疫系统的主要功能是识别体内细胞, 将其归类为“自我”和“非我”, 并引发适当的防卫机制去除“非我”. 自我对应于机体自身的组织; 非我对应于外来有害病原或者体内病变组织. 免疫应答主要由分布在生物体全身的免疫细胞实现. 免疫细胞泛指所有参与免疫应答过程的相关细胞, 包括吞噬细胞、NK 细胞、淋巴细胞等. 淋巴细胞又分为 B 细胞和 T 细胞两种, 本文讨论的 AIS 特性主要涉及淋巴细胞的相关免疫特性.

## 2.3 B 细胞与 T 细胞

B 细胞的主要功能是产生抗体, 且每个 B 细胞只产生一种抗体. 免疫系统主要依靠抗体来对入侵抗原进行攻击以保护有机体. T 细胞的主要功能是调节其它细胞的活动或直接对抗原实施攻击. 成熟的 B 细胞产生于骨髓中, 成熟的 T 细胞产生于胸腺之中, B 细胞和 T 细胞成熟之后进行克隆增殖、分化并表达功能. 两种淋巴细胞共同作用并相互影响

和控制对方功能, 形成了机体内部高度规律的反馈型免疫网络.

## 3 AIS 的仿生机理

从信息处理的角度来看, 免疫系统具备强大的识别、学习和记忆的能力及分布式、自组织和多样性特性, 这些显著的特性不断地吸引着研究人员从免疫系统中抽取有用的隐喻机制, 开发相应的 AIS 模型和算法用于信息处理和问题求解. 图 2 给出了 AIS 仿生机理的主要内容描述, 下面对各种典型的 AIS 仿生隐喻机理及其具体实现进行讨论.

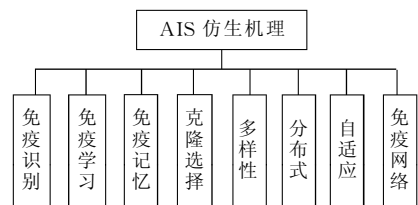


图 2 人工免疫系统的仿生机理

图 2 中前 4 种 AIS 仿生机理对应于免疫系统的应答过程. 免疫应答包括初次应答和再次应答(如图 3 所示), 初次应答是指免疫系统首次遇到一种抗原, 再次应答则是对已识别抗原产生的免疫应答. 免疫应答的实质是一个识别、效应和记忆的过程.

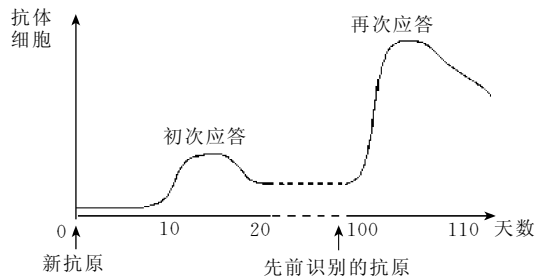
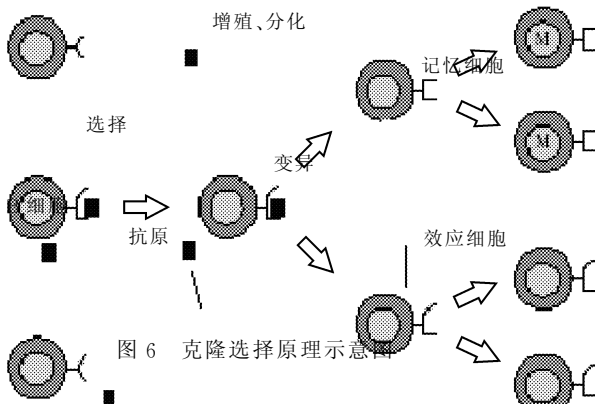


图 3 免疫应答示意图

### 3.1 免疫识别

免疫识别是免疫系统的主要功能, 同时也是 AIS 的核心之一, 而识别的本质是区分“自我”和“非我”. 免疫识别是通过淋巴细胞上的抗原识别受体(receptor)与抗原的结合(binding)实现的, 结合的强度称为亲合度(affinity). 未成熟的 T 细胞首先要经历一个审查环节, 只有那些不能与自我(即机体本身组织)发生应答的 T 细胞才可以离开胸腺, 执行免疫应答的任务, 从而防止免疫细胞对机体造成错误攻击. 该过程称为阴性选择(negative selection),





克隆选择的主要特征是免疫细胞在抗原刺激下产生克隆增殖,随后通过遗传变异分化为多样性效应细胞(如抗体细胞)和记忆细胞.克隆选择对应着一个亲合度成熟(affinity maturation)的过程,即对抗原亲合度较低的个体在克隆选择机制的作用下,经历增殖复制和变异操作后,其亲合度逐步提高而“成熟”的过程.因此亲合度成熟本质上是一个达尔文式的选择和变异的过程,克隆选择原理是通过采用交叉、变异等遗传算子和相应的群体控制机制实现的.

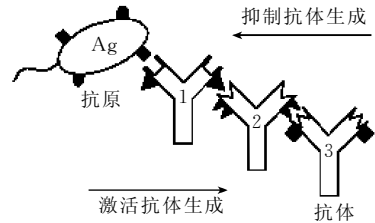
根据克隆选择原理,De Castro<sup>[41]</sup>提出了克隆选择算法模型,并在模式识别、组合优化和多峰值函数优化中得到了验证. Kim<sup>[10,11]</sup>将克隆选择原理用于网络入侵检测.其算法的核心在于增殖复制算子和变异算子,前者与个体亲合度成正比,保证群体亲合度逐步增大;后者与个体的亲合度成反比例关系,保留最佳个体并改进较差个体.

### 3.5 免疫网络

基于细胞选择学说,Jerne<sup>[6,7]</sup>开创了独特型网络理论,给出了免疫网络的数学框架.在 Jerne 工作的基础上,Perelson<sup>[8]</sup>提出了独特型网络的概率描述方法.免疫网络理论对免疫细胞活动、抗体生成、免疫耐受、自我与非我识别、免疫记忆和免疫系统的进化过程等做出了系统的假设,并且将免疫系统视为由免疫细胞或者分子组成的调节网络,免疫细胞以抗体间的相互反应和不同种类免疫细胞间的相互通信为基础,抗原识别是由抗原相互作用所形成的免疫网络完成的.

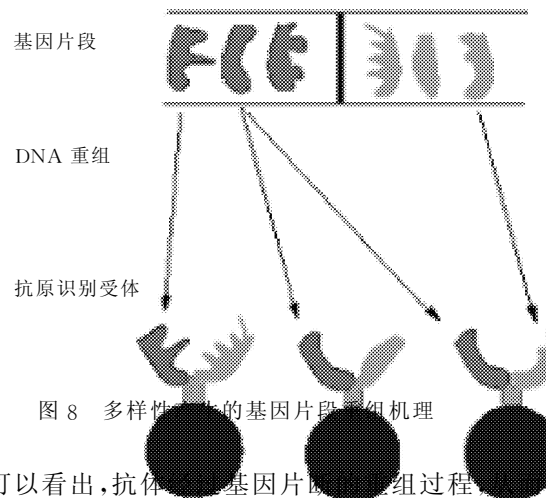
独特性免疫网络理论认为,免疫细胞对识别信号(抗原或其它免疫细胞、分子)的应答有阳性反应和阴性反应两种.前者可以产生细胞增殖、细胞激活和抗体生成;而后者则导致免疫耐受或抑制,如图 7 所示.通过对免疫细胞或分子的数学建模,免疫网络理论可以很方便地用于描述免疫系统的突现属性,

如学习和记忆等.受到免疫网络理论的启发,研究人员构造了多种人工免疫网络模型,如互联耦合网络<sup>[23]</sup>、多值免疫网络<sup>[42]</sup>、抗体网络<sup>[35]</sup>等,并应用于数据聚类<sup>[18]</sup>、数据分析<sup>[19,20]</sup>、机器人控制<sup>[23-25]</sup>等领域.



### 3.6 个体多样性

根据免疫学知识<sup>[4]</sup>,免疫系统大约含有  $10^6$  种不同的蛋白质<sup>①</sup>,但外部潜在的抗原或待识别的模式种类有  $10^{16}$  之多.要实现对数量级远远大于自身的抗原识别,需要有效的多样性个体产生机制.但是免疫系统如何产生如此多的抗体,从而对抗原的有效识别?抗体多样性的生物机制主要包括免疫受体库的组合式重整、体细胞高突变以及基因转换等,而目前比较公认的多样性产生机制是抗原受体库的基因片断重组方法(见图 8),其中基因片断是抗体的组成单位之一.



可以看出,抗体的多样性是由基因片断重组过程产生的多样性的抗原识别受体.依据该原理,De Castro 开发了多样性产生模型 SAND<sup>[35]</sup>,并用模拟退火算法对群体的多样化机制进行了模拟.多样性仿生机理可以广泛应用于优化搜索过程,特别是组合优化与多峰值函数优化.将该多样性机理用于遗传算法中,可以有效地改善算法的局部收敛性能,从而

① 抗体是由能够与抗原发生特异性结合的球蛋白

更好地找到全局最优解,或者保留局部最优集合用于多峰值函数优化.另外,多样性产生机制可为需要多样性数据集合的研究与应用提供借鉴,如神经网络集成<sup>[43]</sup>等.

### 3.7 分布式和自适应特性

免疫系统由分布在机体各个部分的细胞、组织和器官等组成.免疫系统的分布式特性首先取决于病原的分布式特征,即病原是分散在机体内部的;其次免疫系统的分布式特性有利于加强系统的健壮特性(robuste),从而使得免疫系统不会因为局部组织损伤而使整体功能受到很大影响.

分散于机体各部分的淋巴细胞采用学习的方式实现对特定抗原的识别,完成识别的抗体以正常细胞变异概率的10倍进行变异<sup>[35]</sup>,使得其亲合度提高的概率大大增加,并通过分化为效应细胞和记忆细胞分别实现对抗原的有效清除和记忆信息保留,这个过程实际上是一个适应性的应答过程.由于免疫应答机制是通过局部细胞的交互起作用而不存在集中控制,所以系统的分布式进一步强化了其自适应特性.

分布式和自适应特性在提升系统的工作效率和故障容错<sup>[36,37]</sup>能力方面得到了应用.由于工作载荷分布在不同的多个工作单元上,系统的工作效率得到有效提高;同时,其分布式特性还可以减少由局部工作单元失效所引起的对系统整体的不利影响.据此,Forrest<sup>[32]</sup>研究了分布式和自适应的病毒检测和网络安全入侵检测系统.另外,免疫系统的自适应特性为自动控制<sup>[28]</sup>提供了很好的借鉴.

## 4 AIS 模型与算法

基于免疫系统仿生机理开发的 AIS 模型主要有免疫网络模型和 AIS 应用框架模型,其实现算法主要有一般免疫算法、阴性选择算法、免疫学习算法等.下面对几种典型的 AIS 模型与算法进行讨论.

### 4.1 人工免疫网络模型

人工免疫网络模型将 AIS 视为一个由节点(淋巴细胞)组成的网络结构,通过节点之间的信息传递和相互作用达到识别、效应、记忆等免疫系统功能,主要有独特型网络模型<sup>[7]</sup>、互联耦合网络模型<sup>[23]</sup>、多值网络模型<sup>[42]</sup>、抗体网络模型<sup>[35]</sup>等.

Ishiguro<sup>[23]</sup>提出了一种互联耦合人工免疫网络模型,即免疫系统是通过多个完成某一特定任务的

局部免疫网络之间的相互通信来形成大规模免疫网络,该模型已用于机器人的行走控制和路径规划之中.Tang<sup>[42]</sup>提出了一种多值免疫网络模型,通过字符识别显示出多值免疫网络在记忆模式、记忆容量方面,特别是在噪声免疫能力方面要优于二进制网络模型.

在免疫系统内部存在一个抗体之间相互作用的网络.De Castro<sup>[35]</sup>据此提出了一个抗体网络模型 ABNET,该模型以克隆选择原理(见 3.4 节)为基础,其核心为网络的生成算法,生成的抗体网络用于识别给定数量的抗原(问题).ABNET 的主要特征为竞争式学习、网络结构的自动生成和连接强度(权重)的二进制表示等.从机器学习角度来看,它是一种性能优异的无监督学习策略.

### 4.2 AIS 应用框架模型

随着 AIS 探讨的深入,研究人员致力于开发统一的 AIS 框架模型,这类模型主要有 ARTIS<sup>[36]</sup>、RLAIS<sup>[21]</sup>、Jisys<sup>[17]</sup>、aiNET<sup>[18]</sup>等.在此重点介绍由美国新墨西哥大学的 Hofmeyr 和 Forrest 开发的分布式自适应系统模型框架——ARTIS,该模型已经成功地用于网络入侵检测之中.

免疫系统中自我和非我的识别是基于蛋白质链之间的化学绑定.在 ARTIS 中使用了固定长度为  $L$  的二进制字符串来表示蛋白质链,长度为  $L$  的所有字符串集合形成了一个论域  $U$ ,而  $U$  被划分为两个不相交的子集,分别称作自我集合  $S$  和非我集合  $N$ ,即  $U = S \cup N, S \cap N = \emptyset$ .随后使用一个图  $G = (V, E)$  来对检测器所处的分布式环境进行建模,其中  $V$  包含一个检测器的局部集合,而检测器可以在图上沿着边  $E$  来遍历节点.检测器的识别采用部分匹配方法(见图 4),并由协同刺激信号进行激活.检测器由阴性选择算法训练,在一定生命周期执行检测任务.另外,Forrest 提出了基于记忆的检测模式,通过记忆机制加速对异常特征的识别.该应用框架模型较为完整地给出了从免疫系统到 AIS 的模型映射,提供了一个完整的 AIS 问题求解范式.

### 4.3 一般免疫算法

目前,一般的免疫算法大多采用类似遗传算法的搜索策略,借用了 GA 的选择、交叉和变异算子(有的只用变异算子),但在群体搜索策略、解的表示和记忆单元设置等方面与 GA 有所不同.从搜索策略来讲,GA 采用适应度函数来指导搜索过程,AIS 采用亲合度<sup>[19,20]</sup>(如 Hamming 距离、信息熵等)等进行度量<sup>[13,14]</sup>;GA 采用二进制或浮点字符串来表

示一个完整的解,而 AIS 大多采用部分编码<sup>[36]</sup>,即其个体编码只对应于解的一部分;另外,AIS 与 GA 的群体控制策略也有所不同,GA 无明显的记忆单元,而 AIS 则保存最优个体记忆信息<sup>[15]</sup>,用于加速局部搜索或者抑制早熟收敛,从而使算法快速收敛到全局最优解。

采用 GA 算子的免疫算法目前尚无统一框架,但已经在求解诸如组合优化等问题中显示了强大的优化搜索能力。从本质上讲免疫算法可以看作是对 GA 的改进。Endoh<sup>[15]</sup>提出了基于两种记忆模式的免疫算法,充分利用记忆机制在优化迭代搜索过程中的作用,加速算法收敛并抑制算法早熟,数值实验表明它比遗传算法的求解效率大大提高。本文作者对 AIS 的记忆机制进行了进一步研究<sup>[44]</sup>,提出了融合迭代记忆和联想记忆的改进 AIS 算法,数值实验表明该算法的计算效率较之一般遗传算法有了进一步提高,并且经机构同构判定这一个典型工程组合优化实例进行验证,结果表明该算法比一般 GA 的求解时间平均减少近半。文献<sup>[45]</sup>提出了免疫规划算法,其核心在于构造一个包含免疫选择和接种疫苗两个步骤的免疫算子,该算法可以有效抑制进化过程中出现的退化现象,其搜索性能有了很大的改善。其它基于 GA 算子的免疫算法还有免疫遗传算法<sup>[46]</sup>、免疫进化策略<sup>[47]</sup>和基于主体的免疫算法<sup>[48]</sup>等。

#### 4.4 阴性选择算法

基于阴性选择原理(见 3.1 节),D'haeseleer<sup>[49]</sup>给出了一种阴性选择算法,用于监测数据改变。其中抗体(问题解答)与抗原(问题)的匹配采用 Forrest 提出的部分匹配规则(见图 4)。该算法的流程如下:

Step1. 有限字符表上,定义一组长度为  $L$  的字符串集合  $S$  来代表自我,用于检测。

Step2. 产生检测器集合  $R$ ,依据阴性选择原理,对每个检测器进行审查。审查采用部分匹配规则,即两个字符串匹配当且仅当至少有  $r$  个连续位相同,其中  $r$  为参数。

Step3. 通过连续地将  $R$  中的检测器与  $S$  比较来监测  $S$  的改变。如果检测器发生匹配,则有改变发生。

该算法的优点是简便、易于实现,主要问题是计算复杂度呈指数级增长,难以处理复杂问题。Forrest<sup>[36]</sup>随后给出了一种复杂度较低的高效检测器生成算法。阴性选择算法目前广泛应用于模式识别<sup>[50]</sup>、病毒检测<sup>[51]</sup>、网络入侵检测<sup>[10,11]</sup>、异常检测<sup>[38]</sup>等。该算法并没有直接利用自我信息,而是由自我集合通过阴性选择生成检测子集,具备了并行性、健壮性和分布式检测等特点。

#### 4.5 克隆选择算法

基于克隆选择原理(见 3.4 节),De Castro<sup>[41]</sup>提出了一种克隆选择算法,核心是比例复制和比例变异算子,在解决诸如模式识别等复杂机器学习任务方面,该算法有显著能力。算法流程如下:

Step1. 产生候选方案的集合  $S(P)$ ,该集合为记忆细胞子集( $M$ )和剩余群体( $Pr$ )的总和( $P=P_r+M$ );

Step2. 基于亲和度度量确定群体  $P$  中的  $n$  个最佳个体  $P_n$ ;

Step3. 对群体中的这  $N$  个最佳个体进行克隆(复制),生成临时克隆群体  $C$ 。克隆规模是抗原亲和度度量的单调递增函数。

Step4. 对克隆生成的群体施加变异操作,变异概率反比于抗体的亲和度,从而生成一个成熟的抗体群体( $C^*$ )。

Step5. 从  $C^*$  中重新选择改进个体组成记忆集合,  $P$  集合的一些成员可以由  $C^*$  的其他改进成员加以替换。

Step6. 将群体中的  $d$  个低亲和度的抗体予以替换,从而维持抗体的多样性。

该算法成功应用到了二进制字符识别、多峰函数优化和组合优化中<sup>[41]</sup>,取得了良好效果。对比遗传算法,克隆选择算法在编码机制和评价函数的构造上基本一致,但搜索的策略和步骤有所不同;而且通过免疫记忆机制,该算法可以保存各个局部最优解,这对于多峰函数优化十分重要。

#### 4.6 免疫学习算法

机器学习是系统内部的适应性变化,该变化使得系统此后执行同一问题范围内的相似任务时效率更高。从该定义我们不难看出这与 AIS 的免疫学习机理十分吻合。Farmer<sup>[9]</sup>首先对免疫系统的学习特性进行了探索性研究,指出其与 Holland 的分类器系统具有相似性。随后 Hunt<sup>[16]</sup>基于免疫网络理论给出了一种有监督的机器学习算法。Ishida<sup>[30]</sup>提出了一种基于 PDP 模型的 AIS 学习算法,并将其应用到故障诊断中。

Timmis 研究了基于 AIS 的无监督学习策略,建立了一个机器学习模型 RLAI<sup>[20]</sup>,该模型通过构造网络从所学数据中发现复杂的相互关系。较之于神经网络,AIS 在学习对象的表达方面有了很大的进步,而且网络规模可以控制。RLAIS 采用群体控制策略控制群体增长和判断算法终止,定义了人工识别球(Artificial Recognition Ball,ARB)来代表 B 细胞。ARB 基于刺激水平(stimulation level)对 B 细胞进行分配,而当 ARB 不再需要 B 细胞时该 ARB 将被去除,由此实现有效的群体控制。通过将相似的 ARB 集中在一起,RLAIS 可以实现从数据中进行

模式提取和聚类分析。同时该模型也可用于增强学习,在数据分析和知识发现等方面具有潜在应用价值<sup>[21]</sup>。在他人工作的基础上,Carter<sup>[12]</sup>对基于 AIS 的监督学习策略进行了研究,限于篇幅不再详述。

## 5 AIS 的典型应用

近年来,基于免疫系统原理开发的各种模型和算法广泛地应用在科学研究和工程实践中,下面对一些典型的应用领域进行简要的介绍。

### 5.1 信息安全

信息的安全性主要取决于以下 3 个方面<sup>[36]</sup>:检测计算机设备的非授权使用情况、维护数据文件的完整性和防止计算机病毒扩散。而安全策略的核心问题是对于非法入侵的检测,可将其理解为识别自我和非我的问题。鉴于免疫系统具有与保护机体的强大能力,相应的 AIS 模型在信息安全方面得到了广泛应用。Forrest 及其研究小组最早开展了基于 AIS 的信息安全研究并提出了计算机免疫学<sup>[32]</sup>的概念,致力于建立自适应的计算机与网络免疫系统,从而增强现行的计算机与网络系统的安全性。Kim<sup>[11]</sup>基于克隆选择和阴性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阴性检测算子对于维持较低的误报检测率是十分关键的。

在病毒检测方面,D'haeseleer<sup>[49]</sup>使用阴性选择算法来检测被保护数据和程序文件的变化。试验结果显示与其它病毒检测方法相比,该算法具有几个明显的优势,如检测的概率可与 CPU 时间相妥协(随机可调)以及可用较低的个体费用去获得较高的全系统可靠性(分布式),而且它可以检测到原来没有被发现的新病毒(自适应);不足之处是只能针对静态数据和软件进行检测。Kephart<sup>[52]</sup>提出了一种新的病毒检测方法,它采用已知病毒的特征代码序列来检测已知病毒,而未知病毒则通过系统中发现的异常行为加以检测。

### 5.2 模式识别

免疫系统强大的识别能力在模式识别方面得到了广泛的应用,主要涉及到了阴性选择、克隆选择和免疫网络等仿生机理。Forrest<sup>[36]</sup>给出了免疫系统的二进制模型,研究了模式识别问题和免疫系统中个体与群体水平上的学习机制,其中抗体和抗原用简单的二进制编码表示,模式匹配采用部分匹配规则。Dasgupta<sup>[53]</sup>研究了光谱识别问题,采用二进制对光

谱识别的对象进行了具体描述,同时还给出了相应的匹配函数以及识别算法。De Castro<sup>[41]</sup>研究了基于克隆选择机理的字符识别问题,采用状态空间表示待识别的模式。

Hunt<sup>[17]</sup>给出了基于 Java 实现的 AIS 框架 Jisys,并将其用于模式识别,其中从免疫系统中抽象出的仿生机理包括抗体遗传、克隆选择与亲和力成熟、免疫记忆、免疫系统的匹配机制和相关网络的自组织特性等。该模型集成了分类器系统、神经网络、机器推理和基于实例的检索等优点,具有噪声忍耐及无监督学习的能力,并可以外在地表达所学习的内容。

### 5.3 数据挖掘

数据挖掘是“从巨量数据中获取有效的、新颖的、潜在有用的、最终可理解模式的非平凡过程”<sup>[54]</sup>。采用 AIS 模型的数据挖掘任务目前主要集中在数据聚类分析、数据浓缩、归类任务等方面。Hunt 和 Cooke<sup>[16]</sup>研究了基于 AIS 模型的无监督学习算法,将其用到了 DNA 序列的分类任务中。值得一提的是,Cooke 构造的 AIS 无监督学习算法在执行聚类任务方面取得了比决策树(C4.5)、ANN 和最小临近法更好的效果,其误差率仅为 3%。在对 AIS 与聚类分析(cluster analysis)、科赫网络(Kohone network)进行对比分析后,Timmis 指出 AIS 在数据分析中的应用是可行且有效的<sup>[21]</sup>。他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有限资源 AIS 模型 RLAI<sup>[20]</sup>,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>[55]</sup>研究了基于免疫网络模型 aiNet 的高维原始数据的聚类分析,通过人工免疫网络的进化实现对冗余数据的去除,深入研究了数据的结构表示和空间分布,并进一步揭示出了数据簇内的相互关系进行了很好的揭示。该方法是一种非常有效的数据聚类分析方法,不足之处是计算量比较大。

### 5.4 智能优化

作为一种智能优化搜索策略,AIS 在函数优化、组合优化、调度问题等方面得到应用并取得了很好的效果。组合优化是运筹学的一个重要分支,它主要通过数学方法去寻找离散事件的最优编排、分组、次序或筛选等。工程实际中有不少问题具有组合优化特性,如机构运动链的同构判定<sup>[44]</sup>等。随着这类问题规模的扩大,其问题空间呈现组合爆炸特性,难以用常规优化方法求解。



基于免疫原理实现的免疫算法在组合优化求解中显示出了强大的能力,这些问题包括旅行商问题(TSP)<sup>[15]</sup>、二次分配问题(QAP)<sup>[47]</sup>、装箱问题<sup>[46]</sup>、调度问题<sup>[56,57]</sup>等.在大多数情况下,免疫算法取得了比现有启发式算法更好的求解结果,尤其在求解的效率方面,显示出 AIS 在智能优化领域具有广阔应用前景.其它应用还包括工程优化设计,如径向分配中的电容布局优化问题<sup>[58]</sup>、静电装置的形状优化<sup>[13]</sup>、带参数校正的同步电机的优化设计问题<sup>[14]</sup>等,AIS 的求解结果也令人满意.

## 5.5 机器人学

机器人学是目前人工智能领域的一个研究热点,涉及的研究领域非常广.借鉴 AIS 的学习、识别、分布式和自适应等仿生机理,AIS 在机器人行为控制、行为仲裁和路径规划等方面得到了很好的应用.Mitsumoto<sup>[26,27]</sup>基于免疫系统的“自我-非我”识别网络,开发了动态环境中的自适应移动测量算法并将其应用到多主体机器人系统中,他还进一步研究了基于免疫的自组织多机器人系统群体控制策略.

Ishiguro 构造了一个基于免疫网络的机器人行为规划框架 Immunoid<sup>[23]</sup>,将互联耦合网络理论应用到六足步行机器人的步法协调控制之中<sup>[24]</sup>,研究了基于 AIS 的分布式决策机制并用于自治移动式机器人的行为规划<sup>[25]</sup>.Lee<sup>[59]</sup>基于细胞选择和独特型网络的控制机理构造了一个 AIS 模型,将机器人个体视为 B 细胞,环境条件视为抗原,行为策略视为抗体,该模型已应用到群体自治移动式机器人系统的协同控制之中.AIS 在机器人学方面的应用很好地体现了 AIS 的智能突现与群体智能特性,但对于动态环境的适应性还有待提高.

## 5.6 故障诊断

阴性选择机理的一个重要应用是检测模式的变化.Dasgupta<sup>[38]</sup>提出了一个高效检测算法用于检测系统和进程中稳态特征的变化,其中“自我”被认为是被监视系统的正常行为模式,所以任何所观察数据超过允许偏差的偏移,都被认为是异常模式.该方法需要足够的正常模式数据样本来产生不同的检测器集合,而检测器通常以概率的方式进行检测而不需要有异常模式的先验知识.Dasgupta 将该检测算法用于铣削刀具断裂检测中,试验结果表明它可有效地用于自动安全临界操作监测.

Ishida<sup>[30]</sup>研究了基于 PDP 网络模型的学习算法在分布式故障诊断中的应用,将免疫网络模型用

于故障诊断的相互特征识别,该模型有以下特点:(1)并行处理;(2)可以处理不完全信息和数据;(3)自组织;(4)在失效传播中没有必要的反馈回路.此外 Ishiguro<sup>[29]</sup>将免疫网络模型用于在线设备系统故障诊断;Tang<sup>[42]</sup>将人工免疫网络模型用于交流驱动和 UPS 的控制和诊断.故障诊断是继信息安全之后的另一个从免疫系统直接映射而来的 AIS 应用领域,深入挖掘 AIS 仿生机理将有助于进一步开展基于 AIS 模型的故障诊断研究.

## 5.7 其它应用

AIS 其它方面的应用还有噪声控制<sup>[60]</sup>、联想记忆<sup>[61]</sup>、决策支持系统<sup>[25,62]</sup>、基于智能主体的策略<sup>[48]</sup>等,限于篇幅不再详细讨论.

# 6 问题分析与研究展望

## 6.1 问题分析

从以上对 AIS 算法模型和应用的讨论可以看出,AIS 的研究取得了一定程度的进展,但仍有许多问题需要解决,如仿生隐喻机理的深入挖掘、AIS 模型的理论分析以及面向工程应用的模型和算法完善等,下面对此作初步分析.

### 6.1.1 AIS 的群体突现智能

免疫识别和效应是由分布在生物机体内部的大量免疫细胞与抗原通过相互作用实现的,其中涉及到了免疫细胞间的协调、协作等问题,整体任务的完成是由局部单元协同作用的结果,这些特性在 AIS 模型中得到了具体体现.AIS 的学习和记忆机制是在局部单元协作下产生的系统智能突现,这与其它突现计算方法是十分相似的,如蚁群系统的任务分配和墓地构造等.

目前,AIS 模型在机器人协作的最优群体决策中已经得到了较好的应用.但仍存在一些问题.由于大多数模型只是抽取了免疫系统中的部分机理,对于构成免疫系统自适应特性的吞噬细胞、T 细胞、细胞因子等未加以考虑,因此当环境突然改变时系统缺乏自适应性.所以要进一步地研究免疫系统的仿生隐喻机制,探讨其它仿生机理在群体智能突现和突现计算中的作用.

### 6.1.2 智能技术的对比与融合

智能计算方法的融合旨在充分利用各种不同方法的优点,更为有效地解决实际问题,这是一个研究的难题同时也是一个富有前途的方向.通过对比不难发现,在知识存储和模型结构方面,人工免疫网络

模型与人工神经网络模型遗传算法是十分相似的, AIS 兼具进化主义和结构主义两种计算智能方法的特点。

首先,神经网络和免疫系统在多样性细胞组成、模式识别、学习与记忆机制以及阈值的概念等方面都颇为相似。无疑,ANN 模型及其各种应用对 AIS 的研究是有启发意义的。而与 ANN 相比,AIS 具有更多明显优势,例如相对于神经网络的“黑箱”式结构,人们对免疫系统已有了较为深入的理解并形成了相对成熟的理论,这对 AIS 模型的建立及其应用颇有帮助。

将 AIS 与模糊系统相结合,可以改善模糊系统的功能,如优化模糊神经网络的拓扑结构及参数等;同时也可以 AIS 模糊化以改善 AIS 对模糊和不确定性问题的求解能力。将 ART 神经网络与人工免疫网络相结合,可以明显改善数据聚类分析的效果<sup>[63]</sup>。AIS 具有清晰表达所学习知识的特性,由此可以弥补 ANN 的解释能力缺陷,提高知识的可理解性。

### 6.1.3 AIS 算法的并行性研究

生物免疫系统本质上是一个并行、分布式的自组织系统,分布式、自组织和自适应特性已经在阴性检测算法、人工免疫网络等 AIS 模型中得到了具体的体现,并应用于网络入侵检测、模式识别、机器学习、数据聚类分析等工程实践中。目前的应用情况表明,关于 AIS 分布式和自组织特性的研究是成功的。

相比而言,关于 AIS 并行计算模型的研究目前少见相关文献报道。从免疫系统的内部机理来讲,并行性是其一大特色。与遗传算法、人工神经网络等计算智能方法相比,AIS 同样应该具有强大的并行计算特性。深入研究并挖掘 AIS 算法的并行特性,相信会为大规模并行算法和并行计算机的研究提供一种强大的支持,特别是在网络入侵检测方面,并行检测算法的研制将会极大提高计算机安全系统检测和响应的速度。在组合优化求解方面,算法的并行性也将会为 NP 问题找到求解的有效途径。

### 6.1.4 面向工程的约束优化与数据挖掘研究

AIS 算法是在遗传算子的基础上,通过改进、扩展相应的个体表示策略、群体生成与控制机制、记忆机制等发展而来的,目前在函数优化、组合优化、参数优化等方面有明显优势。特别是 AIS 算法中的记忆机制,大大增强了算法的求解效率。但要使 AIS 算法成为工程优化的一种普适算法,仍有许多问题有待解决,如工程问题的约束处理和非线性处理技

术就是其中之一。

AIS 在数据挖掘方面的应用仅限于数据聚类分析等任务,还没有真正走向工程实用,如大规模的 Web 数据挖掘、文本挖掘以及面向大规模工程数据库、多媒体数据库等的知识挖掘任务等。问题的关键包括学习算法的健壮性和伸缩性,以及对不确定和模糊性等非规则信息的处理等;数据挖掘结果的可视化也是 AIS 解决工程实际问题的一项关键技术。

## 6.2 研究展望

基于 6.1 节所作的问题分析,我们预计今后 AIS 的研究将围绕以下几个方面展开。

(1) 算法机理的深入探讨。研究并行 AIS 算法,深入挖掘个体多样性和联想记忆的编码方案,为相关的应用提供有效的编码方案和计算方法。如并行分布式网络入侵检测、机器学习训练样本的多样化生成、基于启发式联想记忆模型的模式特征提取等。特别地,免疫识别机理可以为模式特征提取,联想记忆机制可为模板匹配等提供良好的借鉴。

(2) 算法的数学理论分析。首先研究 AIS 算法的一般数学框架,提供一种通用的算法范式,然后对其性能进行深入的数学分析,包括参数分析、收敛性分析、稳定性分析等。更重要的是挖掘出优化和学习算法的有效性之源,为进一步提出高效的信息处理算法提供理论依据。

(3) 面向工程应用的 AIS 算法模型完善。深入研究工程应用问题的组合性、非线性、约束性等特性开展相应的算法研究和数值实验以及大规模的 AIS 工程应用研究(如面向工程数据库知识发现的 AIS 机器学习算法在产品信息分类中的应用研究等),努力达到 AIS 模型的实用化。

(4) 计算智能方法的融合。综合各种算法的特点,针对特定的问题,抽取不同的方法,有目的地融合 AIS 模型与其它计算智能方法,各取所长,进行求解。如通过一种方法对问题进行预处理,进而应用 AIS 模型求解获得满意的结果;或者利用一种方法加强另外一种方法,开发更为高效的智能计算方法。

(5) 面向进化设计的 AIS 模型研究。进化设计是一个崭新的研究领域,作为计算机科学和工程设计学科的交叉点,进化设计代表着下一代计算机辅助设计系统的发展方向<sup>[33]</sup>。AIS 是一种强大的计算智能方法,可为解决进化设计中关键的设计方案编码、特征表示、设计优化、方案创新等提供强大的支持。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Ji, Cha Jian-Zhong, Xiao Ren-Bin. Intelligent Design. Beijing: Higher Education Press, 1998(in Chinese)  
(周 济, 查建中, 肖人彬. 智能设计. 北京: 高等教育出版社, 1998)
- 2 Chen Guo-Liang, Wang Xu-Fa *et al.* Genetic Algorithm and Its Applications. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1996(in Chinese)  
(陈国良, 王煦法等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996)
- 3 Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithm and stigmergy. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8): 851—871
- 4 Lin Xue-Yan, Zhang Ling. Modern Cellular and Molecule Immunology. Beijing: Science Press, 1999(in Chinese)  
(林学颜, 张 玲. 现代细胞与分子免疫学. 北京: 科学出版社, 1999)
- 5 Dasgupta D, Attok-Okine N. Immunity based systems: A survey. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997. 369—374
- 6 Jerne N K. The immune system. Scientific American, 1973, 229(1): 51—60
- 7 Jerne N K. Towards a network theory of the immune system. Annual Immunology, 1974, 125C: 373—389
- 8 Perelson A. Immune network theory. Immunological Review, 1989, 110: 5—36
- 9 Farmer J D, Packard N H, Perelson A S. The immune system, adaptation, and machine learning. Physica D, 1986, 22: 187—204
- 10 Kim J, Bentley P. The artificial immune model for network intrusion detection. In: Proc 7th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Aachen, Germany, 1999. 13—19
- 11 Kim J, Bentley P. Towards an artificial immune system for network intrusion detection: An investigation of clonal selection with a negative selection operator. In: Proc Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001. 27—30
- 12 Carter J H. The immune system as a model for pattern recognition and classification. Journal of the American Medical Informatics Association, 2000, 7(3): 28—41
- 13 Chun J S, Kim M K, Jung H K *et al.* Shape optimization of electromagnetic devices using immune algorithm. IEEE Trans Magnetics, 1997, 33(2): 1876—1879
- 14 Chun J S, Lim J P, Jung H K. Optimal design of synchronous motor with parameter correction using immune algorithm. IEEE Trans Energy Conversion, 1999, 14(3): 610—615
- 15 Endoh S, Toma N, Yamada K. Immune algorithm for  $n$ -TSP. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, CA, USA, 1998. 3844—3849
- 16 Hunt J E, Cooke D E. Learning using an artificial immune system. Journal of Network and Computer Applications, 1996, 19(2): 189—212
- 17 Hunt J E, Timmis J, Cooke D E *et al.* Jisys: The development of artificial immune system for real world applications. In: Dasgupta D ed. Artificial Immune System and Their Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 157—186
- 18 De Castro L N, Von Zuben F J. An evolutionary immune network for data clustering. In: Proc 6th Brazilian Symposium on Neural Networks, Rio de Janeiro, Brazil, 2000. 84—89
- 19 Timmis J, Neal M, Hunt J. Artificial immune system for data analysis. Biosystems, 2000, 55(1—3): 143—150
- 20 Timmis J, Neal M. A resource limited artificial immune system for data analysis. Knowledge Based Systems, 2001, 14(3—4): 121—130
- 21 Timmis J, Knight T. Artificial immunes system: Using the immune system as inspiration for data mining. In: Abbass H A, Sarker R A, Newton C S eds. Data Mining: A Heuristic Approach. Hershey: Idea Publishing Group, 2001. 209—230
- 22 Ishiguro A, Ichikawa S, Uchikawa Y. A gait acquisition of a 6-legged robot using immune networks. In: Proc IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany, 1994, 2: 1034—1041
- 23 Ishiguro A, Shirai Y, Kondo T *et al.* Immunoid: An architecture for behavior arbitration based on the immune networks. In: Proc IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, 1996. 1730—1738
- 24 Ishiguro A, Kuboshiki S, Ichikawa S. Gait coordination of hexapod walking robots using mutual-coupled immune networks. In: Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Perth, Australia, 1995. 672—677
- 25 Ishiguro A, Watanabe Y, Kondo T *et al.* Decentralized consensus making mechanisms based on immune system: Application to behavior arbitration of an autonomous mobile robot. In: Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Nagoya Japan, 1996. 82—87
- 26 Mitsumoto N, Fukuda T, Shimojima K *et al.* Autonomous robotic system and biologically inspired immune swarm strategy as a multi-agent robotic system. In: Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, 1995. 2187—2192
- 27 Mitsumoto N, Hattori T, Idogaki T *et al.* Self-organizing micro robotic system. In: Proc 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995. 261—270
- 28 Renders J M, Hanus R. Biological learning metaphors for adaptive process control: A general strategy. In: Proc IEEE International Symposium on Intelligent Control, Glasgow, Scotland, 1992. 469—474
- 29 Ishiguro A, Watanabe Y, Uchikawa Y. Fault diagnosis of plant systems using immune networks. In: Proc IEEE International Conference on Multi-Sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Las Vegas, NV, 1994. 34—42

- 30 Ishida Y. Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm towards immune network PDP model. In: Proc International Joint Conference on Neural Networks, San Diego, CA, USA, 1990. 777-782
- 31 Ishida Y, Adachi N. An immune network model and its application to process diagnosis. *Systems and Computers in Japan*, 1993, 24(6): 38-45
- 32 Forrest S, Hofmeyr S A, Somayaji A. Computer immunology. *Communications of the ACM*, 1997, 40(10): 88-96
- 33 Bentley P J, Gordon T G W, Kim J *et al.* New trends in evolutionary computation. In: Proc IEEE International Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 2001. 162-169
- 34 Ding Yong-Sheng, Ren Li-Hong. Artificial immune system: Theory and applications. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000, 13(1):52-59(in Chinese)  
(丁永生, 任立红. 人工免疫系统:理论和应用. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 52-59)
- 35 De Castro L N, Von Zuben F J. Artificial immune system: Part I: basic theory and application. School of Electrical and Computer Engineering, State University of Campinas, Campinas-SR, Brazil; Technical Report RT-DCA 01, 1999
- 36 Forrest S, Hofmeyr S A, Immunology as information processing. In: Segel and Cohen eds. *Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems*. USA: Oxford University Press, 2000
- 37 McCoy D F, Devarajan V. Artificial immune systems and aerial image segmentation. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997. 867-872
- 38 Dasgupta D, Forrest S. Artificial immune systems in industrial applications. In: Proc 2nd International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, Honolulu, 1999. 257-267
- 39 Smith D J, Forrest S, Perelson A S. Immunological memory is associative. In: Dasgupta ed. *Artificial Immune Systems and their Applications*. Berlin: Springer, 1998. 105-112
- 40 Burnet F M. Clonal selection and after. In: Bell G I, Perelson A S, Pimbley G H eds. *Theoretical Immunology*, New York: Marcel Dekker Inc., 1978. 63-85
- 41 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
- 42 Tang Z, Yamaguchi T, Tashima K *et al.* Multiple-valued immune network model and its simulations. In: Proc 27th International Symposium on Multiple-Valued Logic, Antigonish, Nova Scotia, Canada, 1997. 519-524
- 43 Zhou Zhi-Hua, Chen Shi-Fu. Neural network ensemble. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(1):1-8(in Chinese)  
(周志华, 陈世福. 神经网络集成. 计算机学报, 2002, 25(1): 1-8)
- 44 Xiao Ren-Bin, Wang Lei, Fan Zheng. An artificial immune system based isomorphism identification method for mechanism kinematics chains. In: Proc 2002 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC2001/DAC-34063, Montreal, Canada, 2002. 1-6
- 45 Wang Lei, Pan Jin, Jiao Li-Cheng. The immune programming. *Chinese Journal of Computers*, 2000, 23(8):806-812 (in Chinese)  
(王磊, 潘进, 焦李成. 免疫规划. 计算机学报, 2000, 23(8): 806-812)
- 46 Cao Xian-Bin, Liu Ke-Sheng, Wang Xu-Fa. Solving packing problem using an immune genetic algorithm. *Mini-Micro Systems*, 2000, 21(4):361-363(in Chinese)  
(曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法的装箱问题. 小型微型计算机系统, 2000, 21(4):361-363)
- 47 Cao Xian-Bin, Zheng Zhen, Liu Ke-Sheng *et al.* Research on quadratic assignment problem using an immune evolutionary strategy. *Computer Engineering*, 2000, 26(3):1-10(in Chinese)  
(曹先彬, 郑振, 刘克胜等. 免疫进化策略及其在二次布局求解中的应用. 计算机工程, 2000, 26(3): 1-10)
- 48 King R L, Russ S H, Lambert A B *et al.* An artificial immune system model for intelligent agents. *Future Generation Computer Systems*, 2001, 17(4): 335-343
- 49 D'haeseleer P, Forrest S, Helman P. An immunological approach to change detection algorithms: Analysis and implications. In: Proc IEEE Symposium on Security and Privacy, Las Alamitos, CA, USA, 1996. 110-119
- 50 Forrest S, Javornik B, Smith R E *et al.* Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system. *Evolutionary Computation*, 1993, 1(3): 191-211
- 51 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
- 52 Kephart J O, Sorkin G B, Swimmer M. An immune system for cyberspace. In: Proc IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997. 879-884
- 53 Dasgupta D, Cao Y, Yang C. Immunogenetic approach to spectra recognition. In: Proc GECCO'99, San Francisco, CA, USA, 1999. 149-155
- 54 Han Jia-Wei, Micheline K. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Beijing: China Machine Press, 2001(in Chinese)  
(Han Jiawei, Micheline Kamber. 数据挖掘: 概念与技术. 北京: 机械工业出版社, 2001)
- 55 De Castro L N, Von Zuben F J. aiNet: An artificial immune network for data analysis. In: Sarker R A, Newton C S eds. *Data Mining: A Heuristic Approach*. Hershey: Idea Publishing Group, USA, 2001
- 56 Mori K, Tsukiyama M, Fukuda T. Adaptive scheduling system inspired by immune system. In: Proc 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San

Diego, 1998. 3833—3837

- 57 Hart E, Ross P, Nelson J. Producing robust schedules via an artificial immune system. In: Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, 1998. 464—469
- 58 Huang S J. An immune-based optimization method to capacitor placement in a radial distribution system. IEEE Trans Power Delivery, 2000, 15(2): 744—749
- 59 Lee D W, Sim K B. Artificial immune network based cooperative control in collective autonomous mobile robots. In: Proc 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Sendai, Japan, 1997. 58—63
- 60 Ishida Y, Adachi N. Active noise control by an immune algorithm: Adaptation in immune system as an evolution. In: Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation,

Nagoya, Japan, 1996. 150—153

- 61 Abbattista F, Di Gioia G, Di Santo G *et al.* An associative memory based on the immune networks. In: Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Nagoya, Japan, 1996. 519—523
- 62 Dasgupta D. An artificial immune system as a multi-agent decision support system. In: Proc 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, CA, 1998. 3816—3820
- 63 Du Hai-Feng, Wang Sun-An. Data enriching based on ART-artificial immune network. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 14(12): 401—405 (in Chinese)  
(杜海峰, 王孙安. 基于 ART 人工免疫网络的数据浓缩方法研究. 模式识别与人工智能, 2001, 14(12): 401—405)



**XIAO Ren-Bin**, male, born in 1965, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include artificial intelligence in engineering, creative design of complex products, management decision theory and decision support system, system methodology

and system complexity.

**WANG Lei**, male, born in 1978, M.S. candidate. His research interests include bionic algorithms for optimization and machine learning.