

人工免疫系统研究进展

莫宏伟¹, 左兴权², 毕晓君³

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京邮电大学 信息工程学院, 北京 100876; 3. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 对人工免疫系统的工程应用历史及现状进行简要概括. 针对目前人工免疫系统研究出现的单纯偏重算法研究等问题, 在自然计算背景下考察面向工程的人工免疫系统的主要研究进展, 包括免疫计算、免疫启发的软、硬件系统等几个重要分支. 基于进展情况, 对人工免疫系统未来发展方向及面临问题开展讨论和分析. 目的是拓展人工免疫系统研究范围, 促使免疫学研究成果受到工程研究的重视和吸收, 促进人工免疫系统深入发展.

关键词: 自然计算; 免疫学; 人工免疫系统; 免疫计算

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785 (2009) 01-0021-09

Advances in artificial immune systems

MO Hong-wei¹, ZUO Xing-quan², B I Xiao-jun³

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper reviews the history and present state of artificial immune systems (AIS) research. The development of engineering-oriented AIS was explored from the background of natural computing, including some important branches of immuno-computing, immune inspired software systems and hardware systems, etc. This avoided focusing only on AIS algorithms. Based on current developments, problems facing AIS were analyzed and future developments discussed. The aim was to extend the scope of AIS research and promote immunology as a subject worthy of more attention in engineering research, thus realizing the potential of AIS.

Keywords: natural computing; immunology; artificial immune system; immunocomputing

众所周知的神经网络模型、模糊数学、遗传算法等, 这些方法通过模拟生物学隐含的基本原理 (比如, 基本交叉算子用于遗传算法) 已经成功解决许多工程领域中的问题. 这些方法看作第一代生物启发的计算技术^[1]. 人工免疫系统是后来发展的自然计算方法, 属于第二代生物启发的计算技术. 本文将人工免疫系统放在自然计算的体系内来考察, 对人工免疫系统近 10 年的发展情况进行总结, 与计算免疫学、免疫信息学相互借鉴, 并对未来发展趋势和面临问题进行分析 and 探讨, 有利于更全面、系统、深入地理解这一领域以

及其他相关领域的思想和方法.

1 人工免疫系统与自然计算

随着生物学的进步, 人们对生物系统的认识不断深入, 越来越多的计算机科学家和工程师认识到更多样的生物系统完全可以作为解决更多复杂问题的手段. 因而不不断涌现出新的计算方法, 比如利用 DNA 分子实现计算^[2]、膜计算模型^[3]以及免疫计算等等, 这些 20 世纪 90 年代以后产生的新方法可以看作第二代生物启发的计算技术, 而所有这些生物启发的计算技术都是自然计算的一种类型.

自然计算——研究自然界蕴涵的计算能力以及受自然界启发的计算方法^[1], 已经形成一个独特的研究领域. 根据文献 [1] 的观点, 自然计算的内容与形式可以归纳如图 1 所示.

收稿日期: 2007-12-24.

基金项目: 教育部留学归国人员科研启动基金资助项目 (20071108); 黑龙江博士后科研启动资金资助项目 (LBH-Q0816); 哈尔滨市青年人才专项资金资助项目 (2007RFQXS033); 水下机器人重点实验室项目 (200808).

通信作者: 莫宏伟. E-mail: mhw@hewei@sina.com.

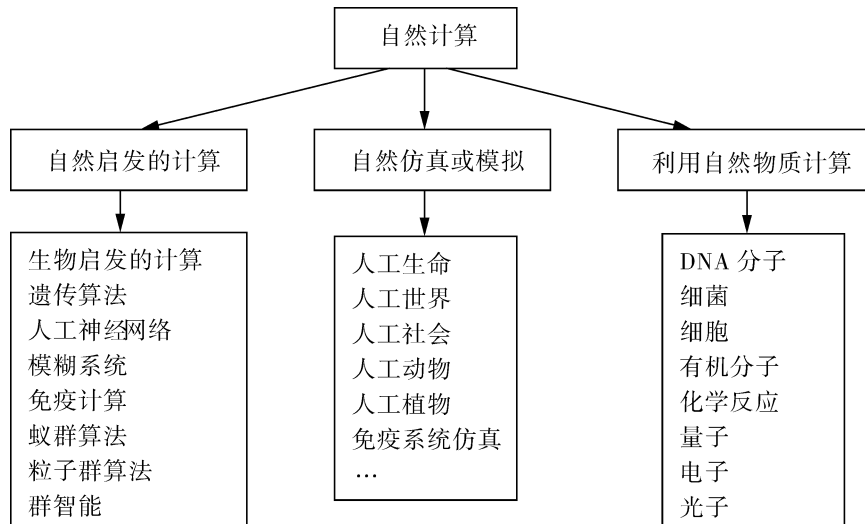


图 1 自然计算的内容与形式

Fig 1 Content and type of natural computing

由于当前自然启发的模型本身的局限性以及人们对生物学的理解和认识程度不断提高,有研究人员认为开发第二代生物启发计算方法的时候到来了,这些新方法将更接近它们的生物学本身.虽然现在还不能给出确切地定义,但如果第二代新形式和更高性能的生物启发的计算能够出现,则会诞生一个新的科学领域.

2 人工免疫系统

2.1 免疫学与人工免疫系统

免疫系统之所以受到计算机科学家的青睐,主要是由于它具有许多人工系统所没有的而其他的启发源也不具有的特性,比如“自己-非己”分子的区分、对危险信号的预警、故障耐受、对外界环境干扰的鲁棒性、对危险情况的分布式处理、分子与细胞相互作用的复杂性等等.

目前,许多免疫机制和理论在人工免疫系统都得到了应用,包括 B 细胞、T 细胞、树突细胞、抗体、抗原、免疫学习、免疫记忆、免疫网络理论、免疫危险理论、克隆选择理论、亲合力成熟、自己非己识别、阴性选择、亲合力、基因库、多样性、分布式、固有免疫系统、适应免疫系统、免疫应答、免疫耐受、免疫系统层次等等.但许多免疫系统的性质只是隐喻使用,并没有真正在人工系统中得到实现.多数人工免疫系统只采用少数几个免疫学机制:免疫网络、阴性选择和克隆选择.随着人们对免疫系统的认识不断深入,会有更多的免疫机制得到应用.2008 年召开的第七届人工免疫系统国际会议收录的一些文章已经体现了这一趋势^[4-5].

2.2 理论免疫学与人工免疫系统

关于人类的免疫系统有两个交叉的研究领域:一是理论免疫学领域,包括计算免疫学,其目的是解释免疫学现象,解决免疫学或医学问题,这一领域的历史较为悠久;二是从工程和科学角度研究免疫系统机制和性质,找到解决工程和科学问题(包括医学问题)的新方法.

计算免疫学是理论免疫学的重要分支.所谓计算免疫学(computing immunology)主要是利用微分方程、非线性理论、混沌理论、计算智能、计算机仿真等多种方法建立免疫系统模型,解释各种免疫现象和机制.计算免疫学的研究对人工免疫系统也很有启发性,从形式上看,其中关于免疫系统仿真与建模的研究实际上也是人工免疫系统的一部分,在方法、目的等方面都有交叉.

除了计算免疫学,在最近的十年中,免疫学已经发展出多个分支,比如复杂免疫学、免疫信息学、神经免疫学、免疫基因组学、免疫蛋白质组学、免疫芯片等,这些分支与人工免疫系统有重要关联.

理论免疫学与人工免疫系统是相互促进和发展的,理论免疫学的研究远早于人工免疫系统的研究,奠定了人工免疫系统的生物学基础.它的研究成果不断促进人工免疫系统的发展^[6].

理论免疫学、计算免疫学与人工免疫系统的关系如图 2 所示.一般认为,人工免疫系统主要是优化算法的研究,实际上它应该包括免疫系统机制启发的各种计算手段,如免疫启发的软件、硬件系统以及可用于研究或解决工程问题(包括医学方面的问题)的免疫系统仿真与模型.因此,作者重新给出人

工免疫系统定义为:人工免疫系统是基于免疫系统机制和免疫学理论而发展的各种人工范例的统称. 这个定义涵盖免疫启发的算法、技术、模型等,以及免疫启发的用于软、硬件系统范例.

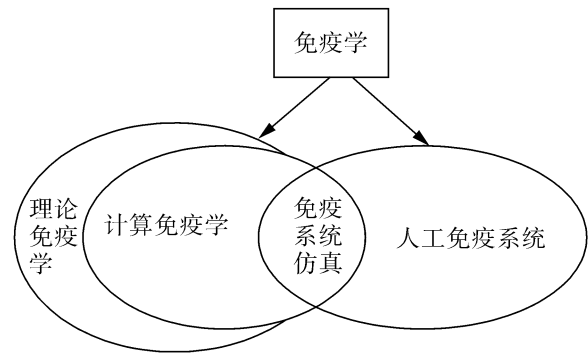


图 2 理论免疫学、计算免疫学与人工免疫系统关系
Fig 2 Relations among theory immunology, computing immunology and A IS

3 研究进展

早期的人工免疫系统都是多学科合作的方法开发的,主要受到免疫学理论的启发. 近些年,人工免疫系统在形式上越来越多样,在方法上越来越新颖,在应用范围上也越来越广泛;但它们的设计方式已经与早期研究有很大差别,在理论上也没有突破,与生物学即免疫系统机制和免疫学理论渐行渐远,较少在深入理解关键的免疫系统生物学性质上进行开发设计. 借助隐喻开展研究和设计是当前多数人工免疫系统的基本特征. 也有少数工作理解隐含的免疫性质,使用建模技术建立人工免疫系统.

人工免疫系统形式像免疫细胞一样是多样化的,以致目前人们还无法用一个统一的形式描述人工免疫系统以及建立相应的理论模型.

3.1 免疫计算

免疫计算包括免疫算法、免疫启发的计算系统、免疫湿件计算等 3 种形式.

免疫算法是免疫计算的重要内容,人工免疫系统的研究也主要集中在各种免疫算法的设计和应用上. 免疫算法目前有两种类型:基于群体的(或者选择)模型和基于网络的模型. 基于群体的模型是受到免疫细胞在释放进入淋巴系统之前早期变异的过程启发的. 采用特殊的算法(阳性、阴性、克隆)去选择一组自己或非己的识别器(无监督学习)或者分类器(监督学习).

免疫算法主要用于优化,目前多种形式的免疫优化算法已经开发出来并在多目标优化、调度方面得到应用^[7-8]. 其中免疫克隆算法的多样性、全局和局部优化能力得到了深入开发^[9].

免疫网络计算模型是受到免疫网络理论启发的计算方法. 免疫网络是生物和社会系统中的许多动力学网络模型之一. 多数现有数学网络理论局限于静态的、同质的、结构的、封闭的网络,简单且易处理. 但这些并不是实际的生物网络模型特征. 因此免疫网络计算模型面临的挑战在于开发动态的、异质的、无结构的、开放的网络模型^[10].

如果说许多不同的免疫算法与遗传算法等其他计算智能算法相比相对成熟,已经具有一定的竞争力,则其他 3 种形式的人工免疫系统还处于初级阶段. 免疫计算可以与其他计算智能方法互相借鉴和融合. 免疫计算与其他计算智能的关系见图 3 所示.

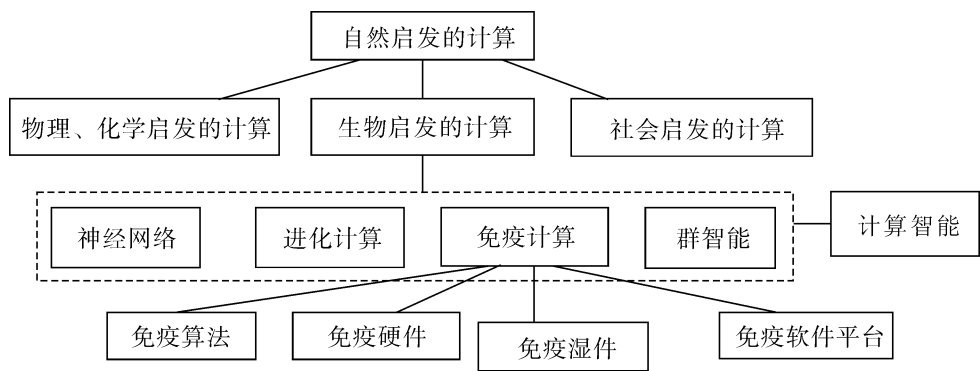


图 3 免疫计算与其他计算智能的关系
Fig 3 The relation between immunocomputing and the other computing intelligence

在免疫启发的计算系统方面, Tarakanov和 Das-gupta提出了形式免疫模型的硬件实现,开发了免疫

芯片,这是第一个基于免疫系统的硬件计算系统.在虚拟服装^[11]、入侵检测^[12]方面也都有成功应用.

基于免疫系统计算平台方面,文献[13]提出了可扩展的人工免疫网络分布式协议模型,用于通讯终端系统.文献[14]提出了基于免疫系统原理的 GeGaM 通用计算模型,可以用于开发新计算方法.文献[15]设计了 DLE 软件计算平台,基于免疫学原理,可用于解决旅行商问题、蛋白质分析等多种问题.这方面的研究还有许多值得深入的地方,比如基于通用计算模型开发出新算法,以及免疫计算平台的理论框架等,这些研究将有助于建立免疫计算的一般模型.

最后一种方式类似利用 DNA 分子实现计算,属于湿件计算,即直接利用生物组件实现计算的技术,包括细胞计算、蛋白质计算等等.在人工免疫系统领域,即直接利用免疫细胞或网络乃至系统实现计算的技术与方法,类似控制 DNA 分子一样控制免疫细胞和分子实现计算的“湿件”.它可用于监测大到环境、社会,小到传染病、机械故障等的免疫监测和防御系统等.目前,它更多地指一种不同于传统计算方式的新计算思想.

上述 3 种免疫计算形式上有差别,但共同点是其应用目的,即都是为了解决计算问题而提出或设计,具有一般性、普适性.即可以利用它们解决不同方面的问题,或者改造后适用于不同方面的问题.

3.2 免疫系统启发的软件和硬件系统

免疫系统启发的软件和硬件系统是基于免疫学原理和免疫系统机制解决特定问题的软件构架和硬件系统.与免疫计算不同之处在于,这类系统不是为了单纯解决计算问题而设计,而是针对工程实际问题而设计.免疫学机制或者有针对性设计的免疫算法被嵌入其中.

Forrest 最早利用免疫系统自己非己识别问题设计了 UNIX 系统下的计算机病毒检测系统, Kephart 提出一个免疫系统启发的结构保护计算机系统不受病毒袭击^[16].此后不断改进,最终形成 BM 的计算机病毒免疫系统.最近的计算机病毒免疫系统由 Lamont 等人开发设计^[17],这些都是利用免疫系统阴性选择、自己非己识别机制来实现的.

Williams 等人在 2001 年将原来用于计算机病毒防御的系统改成基于免疫系统方法的计算机网络防御免疫系统^[18]. Hofmeyr 和 Forrest 在 2000 年提出基于网络的分布式异常检测系统^[19]. Kim 仔细研

究了阴性选择算法和克隆选择算法,提出动态克隆选择算法,整和人工免疫系统,用于设计网络入侵检测系统^[20].

这一方向的典型系统还包括基于主体的免疫算法实现故障诊断^[21]、基于免疫网络理论提出分布式行为仲裁机制控制一组机器人^[22]、自治分布系统控制半导体生产的一般框架^[23]、可直接由硬件实现的、基于自己非己区别机制的机器故障耐受机制^[24]、基于免疫网络机制的软件开发^[25]、基于免疫网络的建议器系统^[26]、基于免疫系统原理的物理安全系统等等.

这些系统的根本目的不是要解决计算本身的问题,而是以软件或硬件形式实现免疫系统机制解决某一特定任务.

3.3 理论研究

目前还没有关于人工免疫系统一般通用的、完整理论体系,即能够解释所有人工免疫系统方法的理论.从上述综述可以看出,人工免疫系统主要的研究过程是抽取免疫机制——设计模型或算法——实验验证或计算机仿真(解决问题),而理论分析与具体解决的问题和所应用的领域有关.

免疫计算计划^[27]是欧盟资助 MCOMP 计划的主要研究内容.其目标是建立基于自然免疫系统的数学模型^[28],开发基于该算法的软件和硬件.目前,在该计划支持下,基于生物体内蛋白质和免疫网络信息处理原理,研究人员已经建立了一种新的免疫计算范例,解决特定复杂问题和计算机系统中防护病毒、入侵袭击、噪声和随机误差等.该计划最终实现称为免疫计算机的新型计算机系统,设计出免疫计算机原型及软件系统.文献[29]提出了设计生物启发的计算及人工免疫系统的一般框架,实际上是阐述免疫算法的开发过程和一般思路,没有关于人工免疫系统的具体理论描述.

3.4 人工免疫系统工程应用

免疫系统的特征启发科学家在不同的领域应用免疫原理解决具体问题.人工免疫系统应用可分为两大类:面向工程技术的应用和面向医学(免疫学、生物学)的应用.

面向工程技术的应用是指利用免疫学理论和免疫系统机制解决不同技术领域的问题.由于免疫系统的复杂性,这类应用通常模拟特异的免疫系统机制,忽略其中的诸多细节^[30-38].从目前的应用范围看,人工免疫系统反映了智能信息处理领域研究与

应用的一个新方向. 面向医学(免疫学、生物学)的应用是指利用人工智能、数学、计算机等多种技术建立免疫系统模型,实现免疫系统仿真^[39]、虚拟免疫系统解决医学免疫学和生物学方面的问题,比如免疫记忆的产生、进化免疫系统、免疫系统复杂性、免疫信息学、免疫学数据库、抗体芯片的制造等. 它们的目的是更好地理解免疫活动,结果可用于开发医学、制药学或者化学工业研究需要的计算机模型工具. 有许多这样的应用例子,比如免疫应答的仿真、免疫系统疾病的发展模型、接种效果模型等.

现有的人工免疫系统基于自然免疫系统的不同机制,具有多样性表现形式,这使得人工免疫系统与自然免疫系统在多样性方面非常一致,其应用领域也表现出多样性,其研究手段从借鉴其他计算智能方法到理论研究也表现出多样性,比如不断借鉴进化计算、主体、计算机科学、人工智能、机器学习、生物学、医学等多个学科和领域的理论、知识、方法和技术来设计人工免疫系统,互相融合和利用,解决具体问题,因此人工免疫系统是一个开放式的研究领域.

4 人工免疫系统未来发展与问题

4.1 免疫算法

人工免疫系统的相关算法多是在 1999 年以后提出的,而且这些算法几乎都是针对特定问题而言的,对算法复杂性、收敛性证明等深刻而具有普遍意义的研究成果还很少. 因此,免疫算法研究在解决其存在问题的基础上,今后的研究重点集中在以下几方面:

1)免疫算法的有效性评价. 目前的免疫算法多种多样,应用范围也很广泛,一般在研究中只与有限的其他算法在某一个问题上比较其性能,缺乏全面、有效的评价指标和体系. 虽然免疫算法也是面向问题的,但过于多样化的、基于问题的算法性能不利于免疫算法的持续发展. 需要探索出一般的理论,以便与其他算法在理论上证明其针对某一领域的问题的有效性,包括并行免疫算法.

2)免疫算法在网络系统等复杂系统中的应用. 比如,由于免疫系统与神经网络和内分泌网络互相影响,网络智能将成为免疫算法应用的新方向. 再者,免疫算法能增强复杂系统的鲁棒性,而且免疫性与鲁棒性之间存在的必然联系使得免疫算法将在鲁棒系统中得到较好的应用.

3)免疫混合算法. 现有的免疫算法多集中在利用

免疫机理改进已有的其他算法,尤其是对进化算法的改进. 对于上述问题,仅仅通过深入认识相关免疫机理,进而对免疫系统算法本身改进,是难以获得彻底解决的. 研究表明,结合其他自然计算策略,可以改善免疫算法的性能. 针对特定的问题,抽取不同的方法,有目的地融合人工免疫系统模型与其他自然计算方法,进行求解应是一个主要发展方向. 除免疫—遗传方法、免疫—神经网络方法,建立综合神经、内分泌及免疫这三大生物调节系统功能的协同集成框架. 进而在这一集成框架下深入研究神经、内分泌及免疫的机理,提出新算法,并更广泛地用于工程实践.

4)免疫算法的数学理论分析. 免疫算法的理论研究迄今十分有限. 在算法的收敛性、稳定性方面没有统一的理论,只有研究人员根据各自的问题给出的研究结果. 因此首先研究人工免疫系统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、复杂性分析等. 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.

5)面向工程应用的免疫算法模型. 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免疫工程应用研究,努力达到人工免疫系统模型的实用化.

4.2 人工免疫系统理论

进一步研究免疫系统的各种机理,包括免疫系统的智能涌现、免疫学习理论、免疫记忆理论、免疫认知理论、免疫模式识别理论、免疫细胞社会学理论、免疫复杂网络与通讯理论等方面的深层次理论阐述. 只有对每种免疫机理有了更深入的理论认识,才能为工程应用,比如算法设计提供保障,而且,新机理的发现必将催化新方法的产生.

未来人工免疫系统理论研究可能通过与计算免疫学的结合方面取得突破,以计算机仿真免疫系统研究为手段,从生物学基础方面(在细胞、分子甚至基因层次)提出和建立人工免疫系统理论基础. 或者面向不同的应用领域,发展各自的理论基础,比如面向优化的免疫计算理论、面向数据挖掘的免疫挖掘理论、面向控制的免疫控制理论等等.

基于免疫系统的湿件计算理论将有助于突破冯氏结构计算机的局限,提出新的计算模式和方法,在网络通信、人机接口、人工生命等诸多领域都有重要应用价值.

4.3 人工免疫系统应用

人工免疫系统的研究范围和应用领域还应不断扩大. 人工免疫系统是不同于其他自然计算分支的研究领域. 此外, 进一步拓宽人工免疫系统的应用领域, 除了解决诸如网络安全、数据挖掘、图像处理、模式识别、故障诊断、噪声耐受、自适应控制、分布式控制、协调控制、预测控制、机器学习、搜索和优化、进化设计、疾病预测与诊断等领域的实际问题以外, 基于免疫系统机制, 不仅可以设计出新的免疫计算方法, 而且可以利用免疫机制开发设计故障诊断系统、计算机安全系统、物理安全系统、自然灾害预报系统、生态环境预测系统、流行病监测系统、并行计算系统、免疫控制系统, 也可以开发出基于免疫系统计算机机制的免疫计算机, 类似 DNA 计算机的计算系统等等. 可以完成或解决人工神经网络等方法不善于解决的问题, 在经济学、管理学, 甚至农业、教育等方面都可以不断应用.

基于免疫系统的硬件和软件会随着技术的进步而不断发展, 比如用于药物和医学实验的虚拟免疫系统、具有自我恢复机制的智能硬件系统等.

4.4 人工免疫系统未来面临的问题

面对人工免疫系统的未来, 似乎更多的是未知的问题. 这也是人工免疫系统的生命力所在. 作者认为, 未来人工免疫系统主要面临以下问题或挑战^[39]:

1) 跨学科合作. 人类社会各个学科本来没有严格的界限, 现代社会分工导致学科的出现, 而人类社会的发展促使人们重新走向多科学互相融合的道路. 人工免疫系统也不例外, 尤其需要计算机科学和免疫学以及数学等多学科之间的合作. 相对于模糊在数学上的完整体系, 神经网络相对完整的几种类型, 进化计算的基本数学理论, 人工免疫系统在理论层次是很弱的, 应用的数学方法也非常有限. 需要对这些系统的更深入理解, 以在研究中突破, 而不是重新开发旧技术, 这需要数学应用上的突破. 必须指出的是, 目前多数人工免疫系统所依据的免疫学理论及对免疫系统的认识基本停留在经典免疫学的水平, 从自己非己识别到免疫系统认知, 都是免疫学领域比较经典和成熟的理论, 而多数人工免疫系统研究人员对现代免疫学的发展基本上一无所知. 这个突现研究领域的成熟需要对免疫系统性质详细和深入地理解和研究, 也需要与免疫学专家合作. 国外这种合作一直非常普遍, 国内还需要加强沟通和合作.

2) 从人工免疫系统角度看, 免疫学对人工免疫系统的影响方面有许多问题值得探讨. 通过观察现在的人工免疫系统的应用研究状态, 可以发现, 只有在现有免疫学理论和免疫系统机制基础上, 积极寻求新的免疫机制和理论, 突出免疫学理论的本质, 才可能获得对人工免疫系统有用的启发思想和过程. 比如除了已经得到应用的免疫学理论, 未来还有那些免疫机制和免疫学理论可以应用? 免疫系统的信息处理机制, 免疫网络本身的动力学问题对所建立的人工免疫系统产生什么影响? 现有的免疫网络、克隆选择机制是有缺陷的, 对人工免疫系统的性能的影响如何评估? 对于一般目的的机器学习应用, 如识别和分类, 能通过观察选择和识别期间的计算轨迹以获得有用信息吗? 如何利用模型决定免疫系统的哪些机制对正确的人工系统鲁棒功能是必要的, 哪些机制是不必要的?

3) 自然免疫系统是极其复杂的, 还有许多理解不透的生物机制. 从免疫学研究角度看, 下面这些问题值得进一步思索: 免疫学理论是否都适用于解决实际问题, 如何利用实际的免疫系统进行计算? 免疫系统和其他生物系统工作受基本物理层次影响的程度有多大? 免疫应答都能在基本物理层次上实现吗? 能够利用免疫系统的计算约束来对付一些疾病吗? 如何建立真正的控制人类免疫系统的自治系统? 如何利用模型决定免疫系统哪部分对人工系统功能是必要的, 哪部分是不必要的, 只是特殊的物理实现? 哪部分仅仅是可能发生的进化的方面? 这些问题需要免疫信息学、免疫网络、电子学、生物学、生物医学工程、纳米、分子操作技术等结合起来才能解决.

4) 免疫系统群体涌现智能. 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, 这些特性在许多人工免疫系统模型中得到了具体体现. 人工免疫系统的学习和记忆机制是在局部单元协作下产生的系统智能涌现, 这与其他涌现计算方法是十分相似的. 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、免疫的记忆、学习与智能涌现模型的数学或计算模型.

5) 人工免疫系统的理论基础. 人工免疫系统最

薄弱的环节是理论基础,多数人工免疫系统工作集中在简单的隐喻抽象和直接应用上。尽管开发了人工免疫系统框架,但是缺乏有意义的形式和理论支撑。人工免疫系统已经应用到许多问题领域,但是需要做更多的努力去理解人工免疫系统的本质,找到最适合的应用。对于这点,理论上寻求更深刻的理解是必要的。从目前的状况看,建立统一的人工免疫系统理论基础是比较困难的,因此可以从应用领域入手,结合具体问题开展理论研究。比如免疫优化算法,它是对计算智能方法的有意补充,丰富了自然计算这一领域的研究内容。国内外在这方面已经取得许多进展,这方面的理论可能最先取得突破,但不应局限于模仿进化算法来研究免疫算法。如何用免疫启发的计算建立比实际更好的系统,免疫计算的极限在哪里?与其他计算智能相比,它的适应条件是什么?这些问题需要结合具体应用深入探讨。今后的理论研究也主要是在免疫工程应用方面有突破,但不会很快出现统一各类面向问题的应用基础理论描述,结合具体问题的理论研究将是主要突破点。

6) 许多现代生物计算方法面对日益复杂的问题已经显示出其缺陷。今天,生物计算概念趋于直接利用生物成分实现计算,比如 DNA 分子、光感蛋白质、生物高聚物等,用于解决不同的计算问题,如旅行商、人工神经网络的仿真、移动机器人控制等。但现有技术的效率与运行并融合复杂信息的自然系统的效率相差很远。对于如何建立生物免疫分子系统,可以实现智能控制机制,并超越当前的方法,如何建立基于真正的生物免疫分子过程的表达模型,帮助人们更深刻地认识它们等问题,还没有明确答案。人工免疫系统的研究也存在同样问题。

7) 如何利用控制论、信息论、系统论、博弈论、复杂系统、复杂网络、自组织甚至物理学、生物学、计算机、人工智能等理论结合纳米、微电子、微机电系统相结合产生新方法、新技术,用于解决复杂的工程问题。比如对于免疫系统分子信息处理机制,如何用量化模型描述,并抽取其中的机制用于通信、保密、计算机网络、智能网络、环境保护、环境探测、地球生态系统等领域。免疫系统的虚拟实现以及免疫系统的物理实现等都是非常诱人的方向。

上述问题是该领域今后若干年都要面对的重要问题。显然,随着更多传统软件工程技术和计算机硬件系统的建立,这些问题研究将不断取得进展。

5 结束语

经过来自不同学科领域的研究人员多年的努力,人工免疫系统日趋成熟。已经有许多文献、著作阐述该领域的工作。作为这些思想的综合和继续,本文讨论了与人工免疫系统有关的一系列问题,包括免疫学本身的进展,研究人员如何从免疫学获得启发等等。并通过综合分析现有人工免疫系统典型应用,反映其研究状态,积极寻求新的、甚至矛盾的思想和理论,使人工免疫系统在思辨和争论中获得新动力并不断前行。近几年,国内、外在人工免疫系统领域的应用发展较快,尤其在优化、计算机安全等领域取得了进一步成果,但仍有许多基础性问题亟待来自各方面的专家合作研究、解决。作者将人工免疫系统十余年的发展进行了全面的概括和总结,目的是能够从纷繁复杂的发展现状中清理出明晰的方向。任何一个学科或方向在发展阶段必然有这样那样的困难和问题出现。及时总结发展中的问题,有助于人们更加清楚地看到该领域的发展前途,从而充满信心地迎接挑战。

参考文献:

- [1] DE CASTRO L N. Fundamentals of natural computing[M]. New York: Champman & Hall/CRC, 2006
- [2] ADLEMAN L M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems [J]. Science, 1994, 226 (11): 1021-1024.
- [3] PAUN G. Membrane computing: An introduction[M]. Berlin, Springer-Verlag, 2002
- [4] KELSEY J, HENDERSON B, SEYMOUR R M. A stochastic model of the interleukin (L)-1 network [C]//Proceeding of the 7th International Conference on Artificial Immune Systems Phuket, Thailand, 2008: 1-11.
- [5] ANDREWS P S, TMM IS J. Adaptable lymphocytes for artificial immune systems[C]//Proceeding of the 7th International Conference on Artificial Immune Systems Phuket, Thailand, 2008: 376-386
- [6] 莫宏伟. 人工免疫网络记忆分类器原理与应用研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005.
MO Hongwei. Research of the principles and applications of artificial immune network memory classifier[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [7] GONG M G, JIAO L C, DU H F, et al. Multiobjective immune algorithm with nondominated neighbor-based selection [J]. Evolutionary Computation, 2008, 16 (2): 225-255.

- [8] 左兴权, 莫宏伟, 范玉顺. 参数化活动调度及其混合免疫调度算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(增): 257-262.
- ZUO Xingquan, MO Hongwei, FAN Yushun. Parameterize active schedule and its hybrid immune scheduling algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(Suppl): 257-262.
- [9] 公茂果, 焦李成, 杜海峰, 等. 用于约束优化的人工免疫响应进化策略[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 37-47.
- GONG Maoguo, JIAO Licheng, DU Haifeng, et al. Artificial immune responded evolutionary strategy for restricted optimization[J]. Journal of Computer Science, 2007, 30(1): 37-47.
- [10] DING Y S, REN L H. Design of a bio-network architecture based on immune emergent computation[J]. Control and Design, 2003, 18(2): 185-189.
- [11] TARAKANOV A O, ADAMATZKV A. Virtual clothing in hybrid cellular automata[J]. Kybernetes, 2002, 31(7/8): 394-405.
- [12] TARAKANOV A O. Mathematical models of intrusion detection by an intelligent immunochip[J]. Communication in Computer and Information Science, 2007, 1: 308-319.
- [13] SUZUKI J, YAMAMOTO Y. Building an artificial immune network for decentralized policy negotiation in a communication endsystem: OpenWebServer/Nexus study[C]//The 4th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics Orlando, USA, 2000.
- [14] 严 悍, 张 琨, 李千目, 等. GeGM: 一种人工免疫系统通用基因模型及实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 747-751.
- YAN Han, ZHANG Kun, LI Qianmu, et al. GeGM: A kind of artificial immune general gene model and its realization[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 747-751.
- [15] BROWNLEE J. Introduction to IDLE—The immunological inspired distributed learning environment[R]. Victoria, Australia: Centre for Intelligent Systems and Complex Processes (CISCP), Faculty of Information and Communication Technologies (ICT), Swinburne University of Technology, 2005.
- [16] KEPHART J O. A biologically inspired immune system for computers[M]//BROOKS R A, MAES P. Artificial life IV: Proceeding of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems Cambridge, USA: MIT Press, 1994: 130-139.
- [17] LAMONT G B, MARTELSTEN R E, VAN VELDHUIZEN D A. A distributed architecture for a self-adaptive computer virus immune system[M]//New ideas in optimization: Advanced topics in computer science series Maidenhead, UK: McGraw-Hill Ltd, 1999: 167-183.
- [18] JWL LAMS P D, ANCHOR K P, BEBO J L, et al. CD IS: Towards a computer immune system for detecting network intrusions[C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Recent Advances in Intrusion Detection Berlin: Springer-Verlag, 2001: 117-133.
- [19] HOEMEYER S A, FORREST S. Architecture for an artificial immune system[J]. Evolutionary Computation, 2000, 7(1): 1289-1296.
- [20] KM J, BENTLEY P J. Towards an artificial immune system for network intrusion detection: An investigation of dynamic clonal selection[C]//The Congress on Evolutionary Computation (CEC-2002). Honolulu, USA, 2002: 1015-1020.
- [21] ISHIDA Y. Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm: Towards immune network PDP model[C]//Proceedings of ICNN 90. San Diego, USA, 1990, 1: 777-782.
- [22] SHIGURO A, WATANABE Y, KONODO T, et al. A robot with a decentralized consensusmaking mechanism based on the immune system[C]//Proceeding of 3rd International Symposium on Autonomous Decentralized Systems Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997: 231-237.
- [23] HUKUDA T, MORIKI K, TSUKIYAMA M. Immune-based management system for a semiconductor production line[M]//DASGUPTA. Artificial immune systems and their applications Berlin: Springer-Verlag, 1998: 270-288.
- [24] BRADLEY D W, TYRELL A M. Immunotronics: Hardware fault tolerance inspired by the immune system[J]. Evolvable Systems: From Biology to Hardware Berlin: Springer-Verlag, 2000, 1801: 11-20.
- [25] SUZUKI J, YAMAMOTO Y. Net: An extensible framework for simulating immune network[C]//Proceedings of The IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Nashville, USA, 2000, 1: 119-124.
- [26] MORRISON T, ACKELIN U. An artificial immune system as a recommender system for Web sites[C]//Proceedings of the First International Conference On Artificial Immune Systems (ICARIS-2002), Canterbury, UK Berlin: Springer-Verlag, 2002: 161-169.
- [27] TARAKANOV A O, SKORMIN V A, SOKOLOVA S P. Immunocomputing: Principles and applications[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2003.
- [28] TARAKANOV A O, NICOSIA G. Foundations of immunocomputing[C]//First IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI'07). Madison, USA:

- Omnipress, 2007: 503-508
- [29] STEPNEY S, SMITH R E, TMMIS J, et al Conceptual frameworks for artificial immune systems[J]. International Journal of Unconventional Computing, 2005, 1 (3): 315-338,
- [30] ZHONG Jiang WU Zhongfu, WU Kaigui, et al A novel dynamic clustering algorithm based on immune network and Tabu search[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 14 (2): 285-288
- [31] 郎依林, 李中华, 毛宗源. 自适应人工免疫算法在数据挖掘中的应用 [J]. 计算机应用, 2006, 26 (8): 1993-1996
- WU Yilin, LI Zhonghua, MAO Zongyuan The application of self adaptative artificial immune algorithm in data mining[J]. Computer Engineering, 2006, 26 (8): 1993-1996
- [32] SINGH C T, NARAYAN S B. An artificial immune system for a multiagent robotics system [J]. Transactions on Engineering, Computing and Technology, 2005, 6: 308-311.
- [33] LEHMANN M, DILGER W. Controlling the heating system of an intelligent home with an artificial immune system [C]// International Conferences on Artificial Immune Systems (ICARIS 2006). Berlin: Springer-Verlag, 2006: 335-348
- [34] 黄席樾, 张著洪, 何传江, 等. 现代智能算法理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [35] 梁意文, 曹玲林, 蔡 瀛. 危险感知的数字微分初步 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27 (增): 228-232
- LIANG Yiwen CAO Linglin, CAI Ying Elementary number differential of danger sense[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27 (Suppl): 228-232
- [36] LUO Wenjian, ZHANG Zeming, WANG Xufa A heuristic detector generation algorithm for negative selection algorithm with hamming distance partial matching rule [C]// International Conference on Artificial Immune Systems, (ICARIS 2006). Berlin: Springer-Verlag, 2006: 229-243
- [37] 付冬梅, 位耀光, 郑德玲. 基于双因子调节的免疫控制器的设计、实现与分析 [J]. 信息与控制, 2006, 35 (4): 526-531.
- FU Dongmei, WEI Yaoguang, ZHENG Deling Design realization and analysis of immune controller based on double factor regulation [J]. Information and Control, 2006, 35 (4): 526-531.
- [38] 岳 训. 面向流数据特征提取的人工免疫网络模型研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006
- YUE Xun Research of artificial immune network of stream data feature extraction oriented [D]. Dalian: University of Dalian Technology, 2006
- [39] 莫宏伟, 郭茂祖, 毕晓君. 人类免疫系统仿真与建模研究综述 [J]. 计算机仿真, 2008, 25 (1): 11-15.
- MO Hongwei, GUO Maozu, BIXiaojun Review of human immune system simulation and modeling [J]. Computer Simulation, 2008, 25 (1): 11-15.

作者简介:



莫宏伟,男,1973年生,教授,博士。IEEE会员, IEEE计算机学会、IEEE计算智能学会、IEEE海洋工程学会、IEEE机器人与自动化学会会员, IEEE系统、人与控制论学会会员, IEEE控制系统学会会员, 国际人工免疫网络协会会员,

中国人工智能学会自然计算与数字城市专业委员会发起人之一, 中国生物医学工程学会高级会员, 中国计算机学会高级会员, 国家自然科学基金评审专家, 黑龙江省生物医学工程学会理事。主要研究方向为自然计算、人工免疫系统。承担国家、省级等基金项目 8 项, 参与国防基础预研项目等项目 3 项, 获得黑龙江省科学进步奖 1 项。发表论文 30 余篇, 被 SCI 等三大检索收录 15 篇, 出版专著 4 部。



左兴权,男,1971年生,副教授,博士,主要研究方向为人工免疫系统、生产调度、智能优化计算。发表学术论文 30 余篇。



毕晓君,女,1964年生,教授,博士生导师,博士,中国图像图形学会会员,黑龙江省生物医学工程学会常务副理事长,黑龙江省人工智能学会常务理事。主要研究方向为图像处理、语音识别合成技术、信息智能处理技术。先后承担省部级

科研项目 7 项, 获得省部级科学技术进步二等奖 2 项、三等奖 3 项。发表学术论文 31 篇, 其中 9 篇被 EI 收录。