

文章编号:1005-0523(2007)04-0079-05

人工免疫系统研究综述

何珍梅, 徐雪松

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:概括了人工免疫系统的生物学理论基础;对人工免疫系统的理论研究以及工程应用情况进行了综述;详细介绍了几种常见的免疫算法机理及免疫算法结构,并对算法的特点进行了分析;最后指出了人工免疫系统的进一步研究方向.

关键词:生物免疫系统;人工免疫系统;免疫算法;克隆选择

中图分类号:TU45

文献标识码:A

人工免疫系统(AIS:Artificial Immune System)是根据免疫系统的机理、特征、原理开发的并能解决工程问题的计算或信息系统. AIS 在不同的工程问题有不同的映射和定义,在此引用文献^[1]的定义,所谓AIS就是借鉴和利用生物免疫系统(主要是人类的免疫系统)的各种原理和机制而发展的各类信息处理技术、计算技术及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称.

自然免疫系统是一种复杂的分布式信息处理学习系统,具有免疫防护、免疫耐受、免疫记忆、免疫监视功能,且有较强的自适应性、多样性、学习、识别和记忆等特点^[2],其特点及机理所包含的丰富思想为工程问题的解决提供了新的契机,引起了国内外研究人员的广泛兴趣,它的应用领域也逐渐扩展到模式识别、智能优化、数据挖掘、机器人学、自动控制和故障诊断等诸多领域. AIS是继进化算法、模糊系统及神经网络之后又一研究热点^[3]. 本文首先简要介绍了生物免疫系统结构和相关机理,然后对现有常见的免疫算法进行总结和比较,并综述了近年来AIS在科学和工程等应用领域的最新研究成果. 最后指出了下一步的研究方向.

1 生物免疫系统结构及相关机理

免疫系统(IS:Immune System)是生物,特别是脊椎动物和人类所必备的防御机制. 是保护肌体免受各种致病细菌侵袭,维护肌体健康的重要生物系统. 其功能是免疫. 免疫分两种:特异性免疫(Specific Immunity)和非特异性免疫(Nonspecific Immunity). 非特异性免疫又称先天性免疫,是肌体防御外来侵袭的第一道防线,由皮肤、粘液等组织完成;特异性免疫又称获得性免疫,是免疫系统通过对环境不断学习,后天积累的,针对特定致病因子的防御功能. 特异性免疫是肌体适应环境的体现,由免疫细胞完成,它是免疫学主要的研究对象.

免疫系统是由免疫活性分子、免疫细胞、免疫组织和器官组成的复杂系统. 免疫功能主要是由T细胞和B细胞完成. B细胞是免疫系统的本质部分,哺乳动物的B细胞在骨髓中发育成熟. B细胞有三个主要功能:产生抗体,提呈抗原和分泌细胞因子参与免疫调节. T细胞在胸腺中成熟^[2],其主要功能是特异细胞免疫和免疫调节.

免疫系统的主要特点:

(1) 免疫系统是分布式、没有中心控制器的系统. 它由广泛分布于全身的免疫细胞组成,这些免疫细胞通过时间和空间上的分布式网络结构实现各种免疫功能.

收稿日期:2007-04-20

基金项目:江西省教育厅科技项目(赣教技字[2005]123)、华东交通大学基金项目(304003)

作者简介:何珍梅(1968—),女,江西萍乡人,在读硕士研究生,研究方向:进化计算及智能控制.

(2) 免疫系统是个自适应系统. 由于入侵生物体内的抗原具有不可预知性, 免疫系统通过免疫细胞的增殖和分化作用不断地产生新的抗体, 最终生成适合的抗体来消灭抗原, 从而动态地适应外界环境的变化.

(3) 免疫系统具有强大的模式识别能力. 生物免疫系统具有辨别“自己”“非己”的特殊识别能力, 对于“非己”的抗原免疫系统能启动免疫应答排除异己, 而对于“自己”则形成免疫耐受, 维护生物体环境的稳定.

(4) 免疫系统具有强大的学习和记忆能力. 当抗原第一次入侵生物体内就会引发初次免疫应答, 使免疫系统产生抗体消灭抗原. 期间免疫系统通过抗原产生免疫记忆细胞, 当同类型的抗原再次入侵时, 二次免疫应答被触发, 免疫系统通过唤醒记忆细胞, 迅速产生大量的抗体消灭抗原. 二次免疫应答更迅速, 无须重新学习.

(5) 免疫系统是一个动态系统. IS 时刻处在旺盛的新陈代谢之中, 各种免疫效应分子在相互抑制和激励中维护动态平衡.

2 人工免疫系统研究概况

人工免疫系统是借鉴免疫系统机理特点和功能的智能系统, 具有广泛的应用和理论基础. 在此着重阐述免疫算法的研究和 AIS 的应用研究.

2.1 常见的免疫算法

免疫算法是基于免疫机理提出的高效的学习和优化算法, 是 AIS 理论研究的重要内容之一.

2.1.1 克隆选择算法 (CSA: Clone Selection Algorithm)

Castro^[4] 基于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. 其基本要点为:

(1) 随机产生初始群体 P , 包括记忆群体 M , 加到剩下群体 Pr .

(2) 计算亲和度, 并根据其大小从 P 中选择 n 个最佳个体 (P_n).

(3) 克隆这 n 个最佳个体, 产生一个暂时的克隆群体 (C), 克隆的规模随亲和度的大小而改变.

(4) 克隆后的个体按突变概率产生突变, 突变概率与抗体的亲和度成正比/反比.

(5) 在新产生的群体 (C^*) 中重新选择一些好的个体构成记忆群体. 母体中的一些个体被新群体

中的其他好于母体的个体取代.

(6) 募集新个体 N_d 替换 d 个低亲和度个体, 以保持群体多样性.

算法的基本框架如图 1.

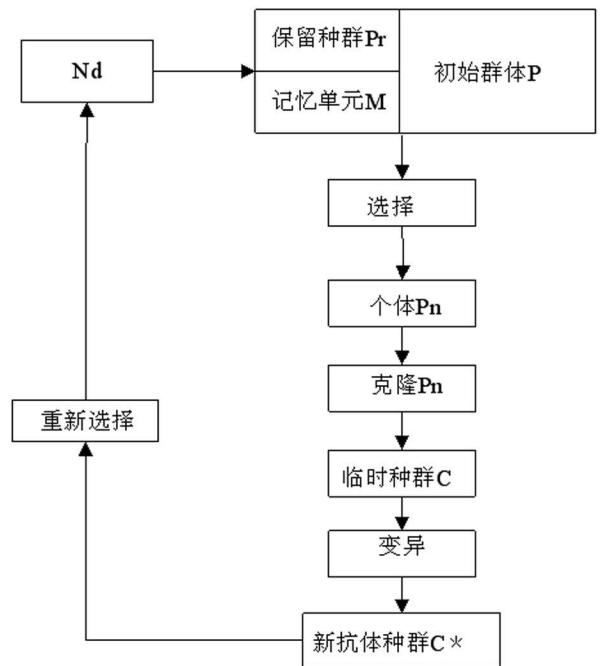


图1 克隆选择算法流程图

免疫系统克隆选择原理描述免疫应答的基本特征. 克隆选择算法的主要特点是: 高度并行性; 通过控制高频变异率, 可以实现一般特征的初始搜索; 克隆规模和收敛速度之间有冲突; 运用启发式可能性改进收敛性能和应用范围. 克隆选择算法能够解决复杂的机器学习任务, 如在模式识别和多模式优化上具有很好的效果.

2.1.2 B 细胞网络算法 (B-cell Algorithm)

以独特型网络理论和克隆选择理论为基础, Hunt 等人模拟生物免疫系统的自学习、自组织机理提出一种人工免疫网络模型— B 细胞网络及其算法^[5]. 其算法主要流程如图 2 所示.

算法将未知问题的解看作抗原, 认为只要找到能产生最高亲和度的抗体的 B 细胞, 也就找到了未知问题的解.

实验结果证明, 该算法具有较强的寻优能力并保持网络中多种模式和谐并存, 有比人工神经网络更快更好的模式识别能力.

2.1.3 阴性选择算法 (NSA: Negative Selection Algorithm)

阴性选择算法基于生物免疫系统的特异性, 借鉴生物免疫系统胸腺 T 细胞生成时的“阴性选择”

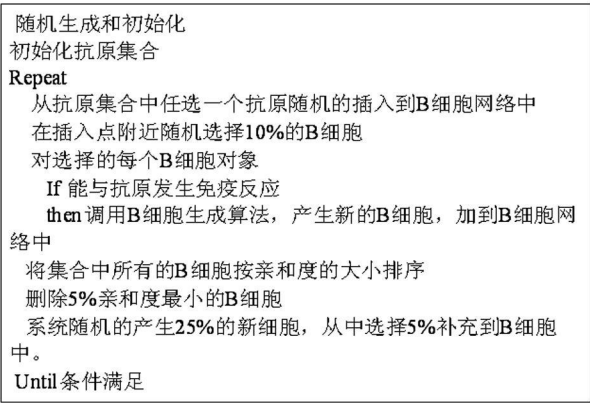


图 2 B 细胞网络算法流程图

(Negative Selection) 过程. 通过 Forrest^[6] 研究一种用于检测变数据变化的阴性选择算法, 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; 随机产生检测器, 删除那些测到自己的检测器, 以使那些测到非己的检测器保留下来.

阴性选择算法主要依赖于三个重要原理: (1) 检测算法的每个拷贝是唯一的; (2) 检测是概率性的; (3) 一个鲁棒性的系统应能随机性地监测外来的活动而非搜索已知的模式. 该算法在计算机和网络安全、工程系统故障诊断等监测领域有许多应用.

2.1.4 免疫遗传算法 (IGA; Immune Genetic Algorithm)

免疫遗传算法可以看作一种新型融合算法, 是一种改进的遗传算法, 是具有免疫功能的遗传算法. 算法流程如图(3)所示.

文^[7]中提出一种免疫遗传算法, 该方法将免疫系统中抗体多样性的维持机制引入遗传算法中, 免疫遗传算法种类较多, 应用也相当广泛, 比如 TSP 问题, 信号分析等. 这些算法主要任务是设定特定的增强群体多样性的免疫算子与遗传算法结合, 改进遗传算法的搜索性能, 克服遗传算法由于交叉搜索而在局部搜索解空间上效率较差的缺点, 又在很大程度上避免未成熟收敛. 大量的实例表明免疫遗传算法表现出超越遗传算法和免疫算法的优点.

综合以上各种免疫算法, 可以发现如下特点^[8]:

(1) 免疫算法是建立在编码上随机优化算法. 各种优化问题的解首先改成相应的可编码码串, 然后对码串进行处理.

(2) 免疫算法是并行优化算法, 其操作的对象均是一个种群.

(3) 免疫算法是一个反复的进化过程, 通过随机搜索不断强化优化个体, 完成群体进化, 最终获得最优个体. 与常见的进化算法相同, 对个体筛选不必优化其梯度信息.

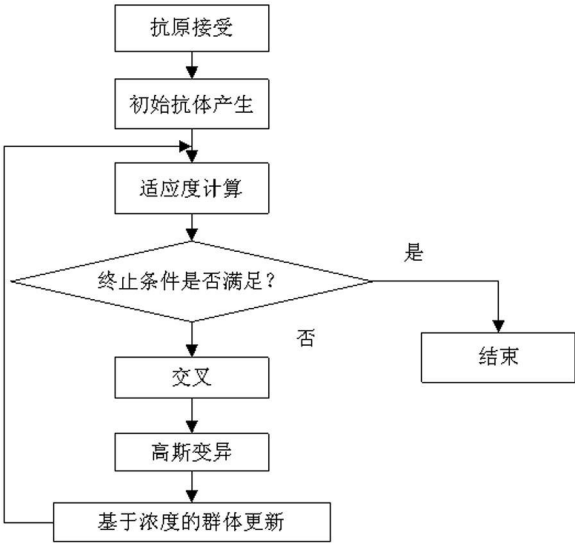


图 3 免疫遗传算法流程图

(4) 保持模式多样性是免疫算法的重要任务, 也是算法的重要特征.

从上述特点可以看出, 免疫优化算法实质上仍属于进化算法范畴.

2.2 人工免疫系统的应用研究

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, 人工免疫系统的应用研究涉及到自动控制、优化计算、模式识别与故障诊断、网络安全等领域. 下面对一些典型的应用领域进行简要介绍.

2.2.1 自动控制

自动控制是 AIS 应用的重要方向之一^[9]. 免疫系统在动态变化的环境中维持其自身系统的稳定起重要作用, 是一个鲁棒性很强的自适应控制系统, 它能够处理环境干扰和不确定性. 其自适应机制可为未知环境中的动态问题求解提供了一种崭新的思路. 其应用有基于独特型网络理论和免疫反应机制的自治机器人或群体. 主要成果: 有 1995 年 Mitsu-moto 等人提出了分布式机器人数量决策方案^[10]实现了分布式自治机器人群体的自组织, Ishiguro 等人提出了自治机器人的行为决策机制^[11]; 1998 年 Dasgupta 等人借鉴独特型网络理论和免疫系统的识别反应机理, 构造了基于人工免疫系统的多智能体决策和控制框架^[12]等. 1998 年 Takhashi 基于 T 细胞免疫反馈规律设计出一种免疫反馈控制

器^[13],能有效地实现非线性对象控制.1992 年 Krishnakumar 首次提出免疫化神经网络辨识和控制的思路^[14],实现了不确定系统快速在线辨识和自适应控制.2001 年 Kim 用免疫网络算法优化 PID 控制器参数,实现了非线性对象的自适应 PID 控制^[15]等.

2.2.2 模式识别

免疫系统是一个动态随机系统,通过抗体与抗原的亲合作用实现对外来入侵的抗击,AIS 基于该机理进行模式识别.Cooke^[16]基于骨髓功能模拟解决 DNA 序列的模式识别问题.Castro^[17]采用状态空间表示待识别的模式,研究了基于克隆选择机理的字符识别问题.Hunt^[18]建立了基于 Java 实现的 AIS 构架 Jisys,用于模式识别,该模型集成分类器系统、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、无监督学习的能力,能外在地表达学习内容.

2.2.3 优化计算

免疫系统能够并行地处理不同抗原的抗体,其多样性抗体的进化机理可用于寻优搜索,利用免疫系统的抗体浓度控制机制改造遗传算法,克服遗传算法的早熟问题.目前,这方面应用的报道较多,如:永磁同步电机参数优化,电磁备外形优化^[19];VLSI 印刷线路板布线优化^[20];函数测试、旅行商问题求解^[21]约束优化和多判据设计等等.Chun 等人还将免疫算法与遗传算法和进化策略进行了比较,显示了其优越性.

2.2.4 网络安全

AIS 在网络安全方面也有许多应用实例.基于免疫原理的计算机系统比普通作用系统所支持的系统更具有辨别和保护能力.应用成果有计算机病毒检测^[22,23]等.

除了上述几个方面的应用,AIS 在图像处理、机器人控制、金融机构风险预测分析、保安系统、各种计算机安全和网络入侵诊断和检测系统等方面都有广泛的应用.

3 展望^{[1][24,25]}

AIS 是一种应用性较强的技术型综合性研究领域,许多免疫机理与工程问题尚未获得充分认识,理论探讨基本上还未开始,因此具有很大的发展空间,值得深入研究.进一步的研究方向有:

(1) 免疫计算智能的深入研究.人工智能在许多方面是相通的,将 AIS 与神经网络、模糊系统等人

工智能进行比较和集成,开发新的应用方法及改进现有各种免疫计算的不足,使免疫计算智能理论与技术将更丰富,应用范围更深、更广.

(2) 加强 AIS 的理论研究.由于 AIS 尚未形成自己的一套完整的理论体系,一定程度上,这制约了研究发展及工程上广泛应用.必须加强理论研究,包括一般原理、方法、定义、定理以及数学建模、数学描述.

(3) 进一步发展和扩大 AIS 在科学和各类工程领域的应用.深入研究工程应用问题的组合性、非线性、约束性等特性,达到 AIS 模型的实用化.结合计算机网络技术及数据库技术,拓宽人工免疫工程的应用领域.

(4) 人工智能大多是受生物体机制启发而产生的.生物免疫系统是一个相当复杂的系统,至今仍然存在许多不解之谜,加强生物学理论方面的研究是非常重要的且很有必要的.应加强神经系统、免疫系统、内分泌系统之间的相互关系研究,以从中得到更多的启发,开发出新型的生物计算系统.

总之,AIS 的研究只是刚刚起步,但随着它的进一步深入研究并与其他智能方法的融合,必将为智能优化、智能控制、模式识别、计算机安全等领域的研究提供新的强有力的工具.

参考文献:

- [1] 莫宏伟.人工免疫系统原理与应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- [2] 陈慰峰.医学免疫学[M].北京:人民卫生出版社,2001.
- [3] 丁永生,任立红.人工免疫系统:理论与应用.模式识别与人工智能[J].2000(3):52~59.
- [4] DeCastro L. C, Von Zuben F. J. The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications[J]. submitto GECCO '00. 2000. 61.
- [5] J. E. Hunt, D. E. Cooke. Learning Using an Artificial Immune System [J]. Journal of network and computer applications, 1996, 19, 189—212.
- [6] Dasgupta D. & Forrest S. Novelty Detection in Time Series Data Using Ideas From Immunology [J]. Un Proc. of the ISCA '96, 1996.
- [7] Hofmeyr S, Forrest S. Architecture for an Artificial Immune System [J]. Evolutionary Computation, 1999, 7(1): 1289—1296.
- [8] 徐雪松.基于人工免疫系统的函数优化及其在复杂系统中的应用[D].浙江大学 2004(1).
- [9] 韦巍,张国宏.人工免疫系统及其在控制系统中的应用.控制理论与应用[J], 2002, 19(2): 157—166.
- [10] Mitsumoto N, Fukuta T. Control of Distributed Autonomous

- Robotic System Based on Biologically Inspired Immunological Architecture[R]. IEEE international conference on robotics and automation, Albuquerque, NM, USA, 1997, 4: 3551—3556.
- [11] A. Ishiguro, Y. Watanabe et al. Decentralized consensus — making mechanisms based on immune system Application to a Behavior Arbitration of an Autonomous Mobile Robot[J]. International Conference on Evolutionary Computation, 1996, 1: 82—87.
- [12] D. Dasgupta. An Artificial Immune System as a Multi-agent Decision Support System[R]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Diego, 1998, 3816—3820.
- [13] Takahashi K, Yamada T. Self-tuning Immune Feedback Control for Controlling Mechanical Systems[J]. Proceedings of IEEE Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Tokyo, Japan, 1997, 101—107.
- [14] K. Krishnakumar. Immunized Neurocontrol: Concepts and Initial Results Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks[J]. COGANN-92, International Workshop, 1992, 2: 146—168.
- [15] D. H. Kim. Tuning of a PID Controller Using Immune Network Model and Fuzzy Set[J]. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001, 3: 1656—1661.
- [16] J. E. Hunt, D. E. Cooke. Recognizing Promoter Sequences Using an Artificial Immune System[M]. In Proceedings of Intelligent Systems in Molecular Biology, 1995: 89—97.
- [17] L. N. de Castro, F. J. Von Zuben. Clonal Selection Algorithm[J]. submitted to GECCO '00. 2000. 61st Annual Meeting of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, Las Vegas, Nevada, USA, 2000: 36—37.
- [18] J. Hunt, J. Timmis, etc. Jisys: Development of an Artificial Immune System For Real World Applications[C]. Artificial Immune Systems and their Applications. Springer-Verlag, 1998: 157—186.
- [19] Chun J S, Lim J P, et al. Optimal Design of Synchronous Motor with Parameter Correction Using Immune Algorithm[R]. Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference, Milwaukee, WI, USA, 1997, 2: 21—23.
- [20] Tasswa I, Koakusu S, etc. An Evolutionary Optimization Based on the Immune System and its Application to the VLSI Floor Plan Design Problem[J]. Electrical Engineering, 1998, 122(2): 30—37.
- [21] Dasgupta D, Attah-Okin N. Immunity-based Systems: a Survey[J]. Proceedings of International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Orlando, FL, USA, 1997, 1: 869—874.
- [22] J. Kim, Peter J. B. Towards an Artificial Immune System for Network Intrusion Detection: An Investigation of Dynamic Clone Selection[J]. IEEE, 2002, 0—7803—7283—4/02.
- [23] Okamoto T, Ishida Y. Multiagent Approach Against Computer Virus: An Immunity-based System[J]. In Proc. of the AROB '99, 1999. 69—72.
- [24] 黄席樾, 张著洪, 胡小兵, 等. 现代智能算法理论及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2005.
- [25] 祈振强. 人工免疫算法及应用研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2004(6).

The Overview of Artificial Immune System Research

HE Zhen-mei, XU Xue-song

(School of Electric and Electronic Engineering, East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: Artificial immune system based on immune systems is introduced. In this paper, its development history, content of research and immune engineering are summarized. Some immune algorithms, their frame and immune algorithm characteristics are described. Finally, the further research directions are suggested.

Key words: biological immune system; artificial immune system; immune algorithm; clone selection