

# 免疫算法研究

高彬彬, 杨孔雨

(北京信息科技大学 信息管理学院, 北京 100192)

**摘 要:**由生物免疫理论启发的人工免疫系统,是继神经网络和遗传进化计算之后,计算智能领域中的又一个研究热点。概述了免疫算法产生、发展的过程及作用机理,比较了现有典型免疫算法的设计方法及其在不同应用领域中的优劣,并讨论了免疫算法的分类。结合笔者的研究,给出了一些应用实例,探讨了发展免疫算法应注意的薄弱环节、难点和创新点,并从发展重点和未来的应用等诸方面展望了免疫算法的发展趋向。为免疫优化算法的进一步研究提供了参考。

**关键词:**免疫算法;鲁棒性;复杂性;自然计算

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2009)07-0249-04

## Research on Immune Algorithms

GAO Bin-bin, YANG Kong-yu

(School of Infor. Management, Beijing Infor. Sci. & Techn. University, Beijing 100192, China)

**Abstract:**Artificial immune system inspired by the theory of natural immune has been a hotspot in the field of computational intelligence comes on the heels of artificial neural networks and genetic evolution of computing. The development and principle of immune algorithms are summarized. The advantages and disadvantages of major design methods for immune algorithms are compared and classification of immune algorithms is discussed. Some application examples are given. Disadvantages, difficulties and creation points in developing immune algorithm are studied, and some prospects of immune algorithm are made on development emphasis and future applications, giving reference to further research of immune optimization algorithm.

**Key words:**immune algorithm; robustness; complexity; natural computation

## 0 引 言

生物免疫系统(Biology Immune System, BIS)是一个分布式、自组织和具有动态平衡能力的自适应复杂系统。它对外界入侵的抗原(Antigen, Ag),可由分布全身的不同种类的淋巴细胞产生相应的抗体(Antibody, Ab),其目标是尽可能保证整个生物系统的基本生理功能得到正常运转。人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)就是研究、借鉴、利用生物免疫系统的原理、机制而发展起来的各种信息处理技术、计算技术及其在工程和科学中的应用而产生的多种智能系统的统称。从生物信息处理的角度看,它可归为信息科学范畴,是与人工神经网络(Artificial Neural Net-

work, ANN)、进化计算(Evolutionary Computation, EC)等智能理论和方法并列的。

免疫算法是基于免疫系统的学习算法,是人工免疫系统研究的主要内容之一。它具有良好的系统应答性和自主性,对干扰具有较强维持系统自平衡的能力。此外,免疫算法还模拟了免疫系统独有的学习、记忆、识别等功能,具有较强模式分类能力,尤其对多模态问题的分析、处理和求解表现出较高的智能性和鲁棒性。

文中重点介绍免疫算法的主要设计方法、算法分析与比较、应用以及发展展望。

## 1 免疫算法的发展

免疫算法和免疫系统的理论与应用的研究历史较短。相关理论可追溯到1958年澳大利亚学者Burnet<sup>[1]</sup>率先提出了克隆选择原理,1960年因此获得诺贝尔奖。1974年,诺贝尔奖得主,生物学家、医学家、免疫学家Jerne<sup>[2]</sup>提出了免疫网络理论并建立了数学模型,奠定了免疫计算的基础。之后Farmer、Perelson、Bersini、Varela等学者分别在1986年、1989年和1990年发表了有关论文,在免疫系统启发实际工程应用方

收稿日期:2008-11-09;修回日期:2009-02-15

基金项目:教育部人文社科研究规划基金项目(07JA630063);北京市教委人才强教基金项目(71A0811106);北京市优秀人才培养资助项目(J0734006)

作者简介:高彬彬(1984-),男,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向为免疫优化计算、知识管理;杨孔雨,教授,研究领域为计算智能理论及应用、网络信息安全、优化与控制等。

面做出了突出贡献,他们的研究作为建立有效的基于免疫原理的计算系统和智能系统开辟了道路。1990年,Bersini 首次使用免疫算法来解决问题。20 世纪末,Forrest 等开始将免疫算法应用于计算机安全领域。近年来,免疫理论和算法已经引起了相关研究人员的极大关注。

1996 年,在日本举行了基于免疫系统的国际专题讨论会,首次提出了“人工免疫系统”的概念。1997 年和 1998 年 IEEE Systems, Man and Cybernetics 国际会议还组织了相关专题讨论,并成立了“人工免疫系统及应用分会”。目前,世界上绝大多数人工免疫系统研究成果出自美国、英国和日本。而巴西 Campinas 大学的 De Castro 博士最早在其博士论文中总结了人工免疫系统,并试图建立人工免疫系统的统一框架结构。取得显著成绩的主要有:利用免疫系统原理研究计算机安全的美国 New Mexico 大学计算机科学系的 Forrest 博士;研究基于免疫原理的计算机安全和异常检测及工业应用的 Missouri 大学计算机与数学系的 Dasgupta 博士;研究数据分析的英国 Kent 大学的 Timmis 博士;研究计算机网路入侵的 King's 学院的 Kim 博士;威尔士大学 E. Hunt 和 Densie Cooke 领导的 ISYS 研究小组等。

在我国,西南交通大学的靳蕃教授等在 1990 年前后就已经指出“免疫系统所具有的信息处理与肌体防卫功能,从工程角度来看,具有非常深远的意义”。1998 年西安电子科技大学王磊、焦李成等在 ICSP'98 上首先提出了一种免疫遗传算法并应用于典型优化问题 TSP 的求解中。目前,国内在免疫优化算法理论与应用方面的研究成果具有鲜明特色。其中,中国科学技术大学王煦法教授在国内较早开展免疫优化算法方面的研究,并扩展到基于免疫计算的人工生命、进化硬件领域;西安电子科技大学焦李成教授提出了具有较完备理论基础的免疫克隆算法及一系列改进,也在国际上较早提出了新颖的免疫遗传算法。

## 2 典型免疫算法分析

基于生物免疫系统,在保留遗传算法优良特性的前提下,力图有选择、有目的地利用待求问题中的特征信息或知识来抑制其优化过程中出现的退化现象,这种算法称为免疫算法(Immune Algorithm, IA)<sup>[3]</sup>。

一方面人工免疫系统的研究尚处于初始阶段,另一方面免疫系统庞大,机理复杂,可参照的研究成果较少,以下为有代表性的免疫算法。

### 2.1 一般免疫算法

一般免疫算法是模仿免疫系统抗原识别、抗原与

抗体结合及抗体产生过程,并利用免疫系统多样性和记忆机理抽象得到的一种免疫算法,它在人工免疫系统发展的早期阶段形成。典型算法有 Chun 等提出的免疫遗传算法、Mori、Endoh 等。由于仅仅考虑了免疫系统的一些基本机制,该类算法的实现比较简单,使得该类算法在复杂问题求解能力方面受到一定限制。

### 2.2 阴性选择和克隆选择算法

D'haeseleer 等开发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。该算法的优点是简便、易于实现,但计算复杂度呈指数级增长,难以处理复杂问题。Forrest 等随后给出了一种复杂度较低的高效检测器生成算法。

目前,免疫优化计算的大部分成果是基于 Burnet<sup>[1]</sup>提出的克隆选择学说,其选择过程本质上是微观世界的达尔文进化过程。基于克隆选择原理,巴西 Campinas 大学的 De Castro 博士提出了一种克隆选择算法,其核心是采用了比例复制算子和比例变异算子。对比遗传算法,该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,主要表现在通过在候选解的邻域内产生一个变异解的群体,从而扩大搜索范围以加强局部搜索和通过替换群体中低亲和度的抗体来维持抗体的多样性,避免过早收敛从而实现全局优化。通过验证该算法在解决复杂机器学习问题,如模式识别和多模式优化上有很好的效果,但是该算法容易产生多样性差、算法实现过程困难的缺点。在此之前 Weinland、Forrest、Fukuda 等人也分别从不同的角度模拟了克隆选择机理,并将其用于优化或模式识别等问题,但是由于过于复杂并未引起研究人员的广泛关注。Timmis 等人同样基于克隆选择机理提出了 B-Cell 算法,Cutello 等人基于 CLONALG 设计了不同的高频变异操作,提出了用于优化的免疫算法 opt-IA。

此外,西电焦李成教授领导的研究组在对免疫选择机理深入研究的基础上,提出了自适应多克隆规划算法、自适应动态克隆算法、免疫优势克隆算法等多种高级免疫克隆选择算法。图 1 为克隆选择原理示意图。这两种算法只体现了个体(抗体)和环境(抗原)之间的相互作用——抗体对抗原进行学习、适应和表达,个体之间除了产生后代外不存在直接的相互作用。

### 2.3 免疫网络学说与人工免疫网络模型

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、响应、记忆等免疫系统功能。目前,主要的人工免疫网络模型有 Ishiguro 提出的用于机器

人行走控制和规划的互联耦合网络模型、Tang 提出的用于字符识别的多值网络模型、De Castro 提出的用于无监督学习的 ABNET 抗体网络模型和用于数据聚类分析的 aiNET 免疫网络模型及 Ishida 提出的用于以联想记忆为基础的分布诊断的 PDP(parallel distributed processing)免疫网络模型等。

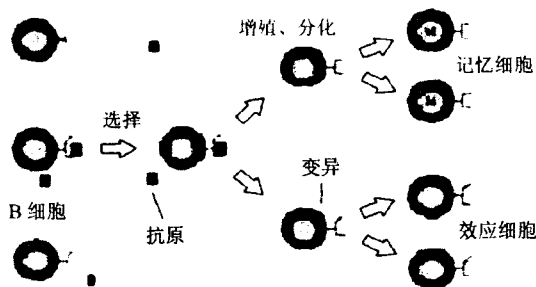


图1 克隆选择原理示意图

人工免疫网络模型体现了两种不同的相互作用,即个体和环境之间的相互作用以及个体之间的相互刺激和抑制作用。

独特型网络调节(Idiotypic Network Regulation, INR)理论<sup>[2]</sup>由 N. K. Jerne 于 1974 年提出,主要与抗体有关。针对 GA 在进化过程后期多样性逐渐降低的缺陷,可用 INR 网络模型改进 GA。用群体适应度的增量对应抗原,抗体对应待求解问题的候选解(待进化个体),则算法保证在每次群体适应度改变时,进化个体都构成分布式网络并相应调节,从而维持了群体收敛性和个体多样性之间的动态平衡。定义抗体上能够被其他抗体识别的部分叫做独特型(idiotype, Id)抗原决定簇。简化的 Jerne 免疫网络结构如图 2 所示。

从图中可清楚地看出,机体的免疫网络主要由淋巴细胞构成:第一组为抗原反应细胞(ARC),它可通过其抗原受体对外来抗原起反应,网络正是以该细胞为主体并与另外三组淋巴细胞构成的;第二组为独特型反应细胞(IRC)或独特型组(idiotype set),它能识别 ARC 上的独特型决定簇,从而抑制 ARC 对外来抗原起反应;第三组为内部摄像组(internal image set),其抗原受体上的独特型与外来抗原相同,故能被 ARC 识别,并激发 ARC 增殖;第四组为非特异性平行组(non-specific parallel set),其抗原结合的特异性与 ARC 不同,但其抗原受体上的独特型(Id)与 ARC 上的 Id 相同,故能被 IRC 识别,从而间接抑制 ARC 的增殖,加强对网络的抑制作用。二、三、四组淋巴细胞也可以各自成为主体,再分别与另外三组淋巴细胞结合而构成网络,如此下去,在体内形成一种网络系统。

目前的人工免疫网络模型普遍存在自适应能力比较差,参数比较多,而且过分依赖对网络节点的增减来

保持网络动态,缺乏对免疫网络非线性信息处理能力的模拟等缺陷,限制了算法的成功应用。

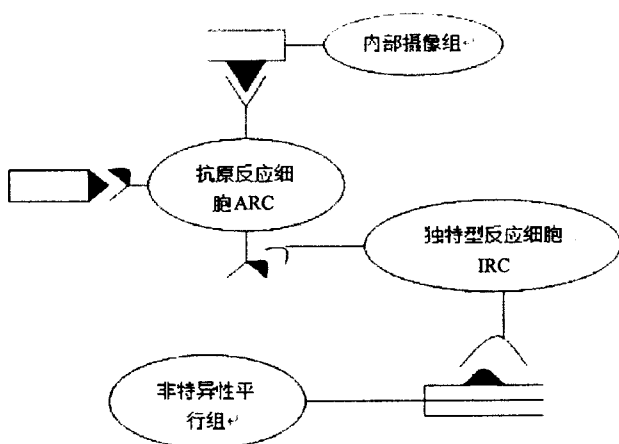


图2 简化的免疫网络结构示意图

## 2.4 混合免疫算法

结合各种智能算法,研究人员通过利用 AIS 的有关原理对其他智能计算方法进行改进和加强,或将 AIS 与其他智能算法加以融合从而发展得到了各种混合免疫算法,如免疫进化算法、免疫神经网络、AIS 与蚂蚁算法的混合算法等。使得多种智能算法集成的免疫算法成为 AIS 算法研究的热点和重要发展方向之一。

其中焦李成、王磊<sup>[3]</sup>等人于 2000 年提出了基于疫苗的免疫遗传算法,是国际上较早提出的一种免疫遗传算法。其在 SGA 框架基础上引入免疫算子,该算子通过疫苗接种和免疫选择两个操作步骤来完成,前者为了提高适应度,后者则为了防止群体的退化,从而减轻原有进化算法后期的波动现象,达到提高收敛速度的目的。具体而言,它们分别是:

1) 接种疫苗:按照先验知识来修改个体(或者是从群体中按一定比例抽取的个体)的某些基因位上的基因,使所得个体以较大的概率具有更高的适应度;

2) 免疫选择:首先进行免疫检测,即对接种了疫苗的个体进行检测,若其适应度仍不如父代,说明在交叉、变异的过程中出现了严重的退化现象。这时该个体被父代中所对应的个体所取代;如果子代适应度优于父代则进行退火选择。

图 3 为基于疫苗的免疫遗传算法基本流程。

## 3 免疫算法理论分析及应用的主要进展

免疫优化计算理论分析的主要进展体现在基于马尔科夫链的收敛性分析和非线性动力学模型等方面,对免疫优化算法的非线性随机分析可能是未来研究的难点之一。

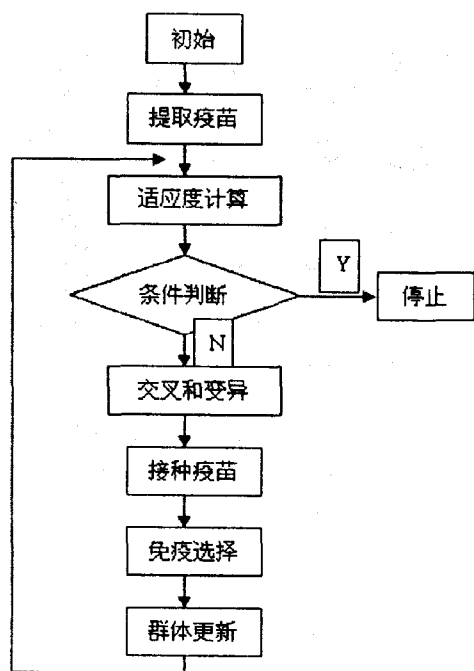


图 3 基于疫苗的免疫遗传算法基本流程

目前,免疫算法已经应用于各种单目标、多目标优化及工程优化之中。例如用于异常和故障诊断、机器人行为仿真、机器人控制、网络入侵检测、神经网络设计等领域,并表现出较卓越的性能和效率。此外,免疫算法还被应用于数据挖掘、信息处理、联想记忆、银行识别抵押诈骗等方面(见表 1)。

免疫算法应用于物流配送调度中车辆路径问题,抗体采用自然数编码,并对算法中算子做适应性调整。MATLAB 仿真实验结果显示,该算法能够在较短的代数内快速地收敛到全局最优解。优化结果进一步证明了免疫算法解决 VRP 问题的优良性能<sup>[4]</sup>。

表 1 人工免疫系统主要应用领域

应用领域示例	
控制	电压调节器的控制,复杂动力学系统自适应控制
规划	电网规划
设计	设计人工神经网络
组合优化	TSP 问题,CDMA 多用户检测
图像处理	图像分割,立体匹配
数据处理	多成分混合色谱信号的解析
知识发掘	数据库知识发现
机器人	多智能体决策系统,分布式自动机器人系统等
故障监测和诊断	加工工具破损监测,旋转机械在线故障诊断
网络安全	病毒防护与入侵检测

## 4 结束语

一方面,由于对人工免疫系统的研究还处于起步阶段;另一方面,由于免疫机理复杂、系统庞大,甚至连

免疫学家对免疫现象的认识和描述都比较困难,人工免疫系统可以借鉴的成果还不多,因此人工免疫系统不论在模型建立、算法等方面都存在诸多问题<sup>[5]</sup>。算法设计是人工免疫系统研究的核心<sup>[6]</sup>,笔者认为今后免疫算法的研究重点大致集中在以下几方面:

1)免疫算法性能研究。免疫算法性能至少应该包括收敛性、动态性能以及有效性<sup>[7]</sup>。目前相关讨论甚少,借助进化算法以及人工神经网络的相关研究成果,可能是有效途径之一。

2)免疫算法与进化算法等其他智能算法的对比研究。这不仅是深入认识人工免疫系统特点的需要,也是多种智能策略互补融合的需要。

3)免疫算法在网络、智能系统和鲁棒系统中的应用。神经网络、内分泌及免疫这三大调节系统相互联系、相互补充和配合、相互制约的机理为基于人工免疫系统的智能系统集成提供了生物学基础,网络 and 智能成为免疫算法发展的不可缺少的特征,也是其重要应用领域<sup>[8]</sup>。免疫算法能增强系统的鲁棒性,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<sup>[9]</sup>。欧盟的“IMCOMP”(EU Project IST-2000-26016)已经将研制免疫芯片(immuno-chips)作为其项目的主要创新之一<sup>[10]</sup>,而且 A. Tarakanov 等一批国外学者已经开始相关研究。

## 参考文献:

- [1] Burnet F M. The Clonal Selection Theory of Acquired Immunity[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1959.
- [2] Jerne N K. Towards a Network of the Immune System[J]. Annual Immunology, 1974, 125: 373-389.
- [3] 王磊,潘进,焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74-78.
- [4] 梁艳,杨孔雨. 免疫优化算法在物流配送车辆调度中的应用[C]//第 13 届海峡两岸信息管理发展与策略学术会议论文集. 北京: 北京交通大学出版社, 2007.
- [5] 焦李成. 自然计算、机器学习与图像理解前沿[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [6] De Castro, Zuben F J V. Learning and Optimization Using the Clone Selection Principle[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 239-251.
- [7] 张建萍,刘希玉,谭业武. 改进免疫遗传算法及其应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(10): 166-169.
- [8] 杨孔雨. 免疫进化理论与应用[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008.
- [9] 檀庭方. 基于自适应免疫遗传算法的 VRP 问题的研究[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(6): 74-79.
- [10] 杨孔雨,王秀峰. 自适应多模态免疫进化算法的研究与实现[J]. 控制与决策, 2005(6): 717-720.