

# 人工免疫算法与系统集成的研究

娄建安<sup>1</sup>, 李 阳<sup>1</sup>, 谢方方<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003;  
2. 军械工程学院 信息工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘 要:**生物免疫系统是一个复杂、并行、鲁棒的自适应系统,以其智能的信息处理能力而逐渐备受关注。为使研究人员能全面了解人工免疫常用算法原理及其应用和免疫系统与其他智能系统的交叉融合研究,以及由此建立的人工免疫系统模型、算法,在简述免疫系统生物学原理的基础上,概括了不同的免疫算法和各自的特性,总结了当前人工免疫系统与人工神经网络、进化算法、模糊系统的集成情况及工程应用现状。最后讨论了人工免疫系统面临的问题及未来发展趋势。

**关键词:**人工免疫系统;免疫算法;系统集成

**中图分类号:**TP18

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2013)09-0086-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.09.022

## Study of Artificial Immune Algorithms and System Integration

LOU Jian-an<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, XIE Fang-fang<sup>2</sup>

(1. Department of Vehical and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;  
2. Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** The biological immune system is a complex, parallel and robust adaptive system that is widely concerned for its intelligent information processing capacity. In order to make researchers get a comprehensive understanding of commonly used algorithms and its applications and the cross-integration with other intelligent systems, and thus created artificial immune system model and algorithm, on the basis of describing the principle of the immune system, summarize the different immune algorithms and individual characteristics, and sum up the Artificial Immune System (AIS) integrations with artificial neural networks, evolutionary algorithms, fuzzy systems integration and engineering application status. Finally discuss the problems faced by the artificial immune system and its future trends.

**Key words:** artificial immune system; immune algorithm; system integration

## 0 引 言

生物系统已成为人们创新的理论源泉,人们不断从生物现象、生物功能和生物系统中获得启发,创立了许多不同的仿生计算方法,如人工神经网络(ANN)、遗传算法(GA)、蚁群算法(AA)等。这些方法模仿生物的基本表象、结构、行为、功能及其相互作用,对推动智能计算、数据分析和模式识别等研究领域的发展起了巨大作用。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)就是从生物免疫系统的运行机制和计算能力中获得灵感,借鉴其高度并行、分布、自适应和自组织特性,从而开发出面向工程实际问题的模型和算法。

## 1 免疫学原理

免疫系统是生物,特别是人类所具有的必备防御机制。人类免疫系统结构复杂,它由具有免疫功能的器官、组织、细胞、效应分子及有关基因等组成<sup>[1]</sup>,可以有效保护机体抵抗病原体、有害入侵物质及癌细胞等致病因子侵害,是维护和保持机体稳定并完成大量高等生命行为的坚实基础。人工免疫机理如图1所示。

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,结合的程度称为亲和度(Affinity),二者匹配程度越好,抗原与抗体的亲和度就越大。

免疫学习分为两种:一是在初次应答阶段,当免疫

收稿日期:2012-10-29

修回日期:2013-01-30

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207167)

作者简介:娄建安(1967-),男,河南漯河人,教授,博士,研究生导师,研究方向为智能检测、故障诊断、演化硬件原理及实现;

李 阳(1988-),男,四川自贡人,硕士生,研究方向为嵌入式系统与应用、演化硬件、电磁仿生理论与实现。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1726.045.html>

系统初次识别一种新的抗原时,其匹配应答时间相对较长,对应的抗体经遗传操作后亲和度逐渐提高的遗传学习过程;二是当再次重复遇到同一抗原时,由于免疫记忆的作用,免疫应答时间大幅缩短,快速产生高亲和度的抗体消灭病原,再次应答是一个增强学习过程(Reinforcement Learning)。学习的结果是免疫细胞的个体亲和度提高、种群规模扩大、最优个体以免疫记忆的方式得到保存。

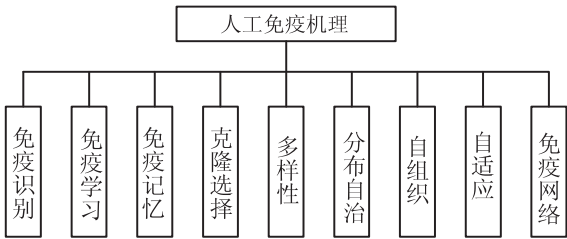


图1 人工免疫机理

免疫系统要实现对数量级远远大于自身的抗原识别,需要有效的多样性抗体生成机制。目前比较公认的多样性产生机制是抗原受体库的基因片段重组方法。多样性机理广泛应用于优化搜索过程,能够提高全局搜索能力,避免陷入局部最优。

免疫系统所具有的分布自治、自组织、自适应、免疫网络及非线性机理等,这里不再一一阐述。

2 免疫算法

免疫算法随着人们对人工免疫系统研究的深入而不断发展,主要是基于免疫系统的识别多样性、免疫自我调节和免疫记忆特性而设计的,也是人工免疫系统的重要研究内容之一。

2.1 免疫遗传算法

免疫遗传算法(IGA)是在深入理解进化算法的基础上,借鉴生物免疫机制而形成的一种新型遗传算法<sup>[2]</sup>。它模拟生物免疫系统产生抗体抵御入侵抗原,实现了抗原识别、抗体多样性生成,自我调节、免疫记忆等自适应功能。

免疫遗传算法将外来入侵的抗原和产生的抗体分别与待求解问题和候选解相对应,免疫系统特有的功能特性可以提高遗传算法的寻优速度,改善寻优质量。IGA利用免疫系统的抗体多样性保持机制,避免陷入局部最优,使IGA具有较好的全局收敛性;通过对抗体个体浓度的促进和抑制作用,提高IGA的局部搜索能力;模拟免疫记忆功能,对应于IGA的免疫记忆演化,加快算法搜索速度,提高总体搜索能力。免疫记忆单元的结构如图2所示。

记忆编号	抗原信息	最优抗体1	……	最优抗体n
------	------	-------	----	-------

图2 免疫记忆单元结构

IGA的流程图如图3所示。

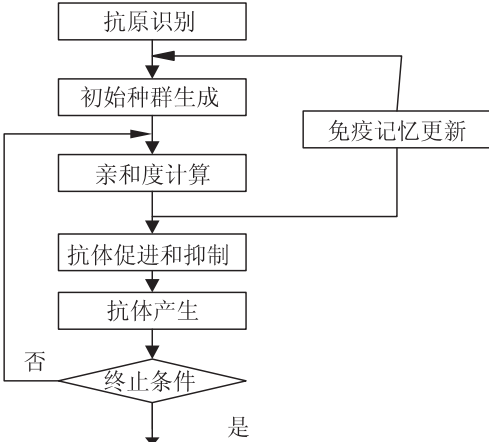


图3 IGA流程图

与传统的遗传算法和免疫算法相比,免疫遗传算法克服了传统遗传算法收敛速度慢和容易陷入局部最优的不足,提高了收敛速度,并有效地抑制了早熟现象。免疫遗传算法在数据处理<sup>[3]</sup>、机器人控制<sup>[4]</sup>和图像处理<sup>[5]</sup>等方面得到成功应用。

2.2 阴性选择算法

Forrest等基于阴性选择原理提出的阴性选择算法(NSA)模仿T细胞的免疫耐受和自我非我识别过程<sup>[6]</sup>,包括检测器生成和保护对象监视两个步骤。

NSA算法的检测器生成过程中,首先将合法数据定义为自体集S,然后随机产生字符串,如果字符串与自体集S的任一字符串匹配,就被删除,否则保留下来作为检测器;如此循环迭代,直到产生足够的检测器集R。检测器生成过程如图4所示。

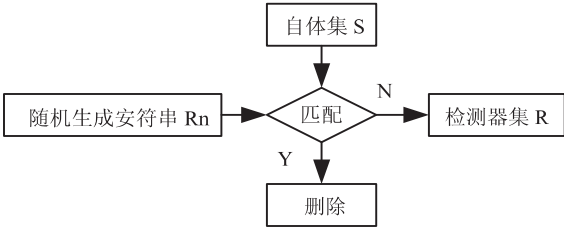


图4 检测器生成过程

传统的检测由于受限于已知异常样本,无法检测出未知的异常,而阴性选择算法能够发现未知异常而广受关注,在系统异常检测、故障模式识别<sup>[7-8]</sup>和网络异常入侵防御<sup>[9]</sup>等方面得到了大量应用。

2.3 克隆选择算法

De Castro基于免疫系统的克隆选择原理提出了克隆选择算法<sup>[10-11]</sup>。克隆选择算法首先定义抗原Ag和抗体Ab的亲和度 $affi_{Ag,Ab}$ 及抗体 $Ab_1$ 和抗体 $Ab_2$ 之间的亲和度。 $affi_{Ab_1,Ab_2}$ 衡量抗体间相似度,亲和度越小,则两个抗体越相识。克隆选择算法基本步骤如下:

(1)初始化抗体,创建记忆抗体集合( $M$ )和初始抗体集合( $Ab_s$ );

(2) 克隆选择, 计算  $M$  中每一个抗体与抗原的亲密度, 选择亲密度最高的作为记忆细胞  $M_c$ , 并克隆记忆细胞, 加入  $Ab_s$  中;

(3) 亲密度成熟, 将变异后高亲密度记忆细胞加入  $Ab_s$  中;

(4)  $Ab_s$  更新, 清除受较少刺激的  $Ab$ , 计算每个  $Ab$  平均刺激, 检查终止条件;

(5) 循环, 如果  $Ab_s$  中的平均刺激值小于给定阈值, 则返回步骤(3);

(6) 记忆细胞库更新, 如果抗体与抗原亲密度大于记忆细胞与抗原亲密度, 将新的  $Ab$  加入  $M$  中, 如果记忆细胞平均刺激值低于阈值, 则将  $M_c$  从记忆集合  $M$  中删除;

(7) 循环, 检查终止条件, 如果满足条件, 优化过程结束, 否则返回步骤(2), 直至条件满足为止。

克隆选择算法在编码机制和适应度评估上与遗传算法基本相同, 但在搜索策略和步骤上有所不同, 并且通过免疫记忆, 该算法在搜索过程中保存局部最优解, 使算法计算效率大大提高。克隆选择算法成功应用到网络安全、字符识别<sup>[12]</sup>和多峰函数优化<sup>[13-14]</sup>中, 取得了良好效果。

## 2.4 免疫网络算法

免疫网络算法是基于免疫网络模型提出来的, 也是目前人工免疫系统研究的一个热点<sup>[15]</sup>。

Timmis 在免疫网络模型中加入人工识别球(Artificial Recognition Ball, ARB)概念, 基于 ARB 概念, 陆续出现了资源受限人工免疫系统 RLAIS(Resource Limited AIS)和自稳定人工免疫系统 SSAIS(Self Stabilizing AIS)。

由免疫聚类模型提出的免疫聚类网络算法 AI-DEA(AIS-Data Envelopment Analysis), 将待分析数据作为抗原, 通过抗体对抗原的学习、记忆过程来识别、处理数据, 并从中找到数据间的相关性。

免疫网络算法(AiNet, Artificial immune Net)忽略 B 细胞与抗体的区别, 利用统计推论技术实现, 目的是建立一个记忆集合, 用于识别和表示数据结构, 具有减少数据冗余、选择不同距离标准进行亲和力计算、收敛速度快和模型简单等优点, 广泛用于数据压缩、数据聚类等领域。

## 3 人工免疫系统集成与应用

人工免疫系统所特有的学习记忆、抗体多样性、抗原特异性结合和维持机体自适应稳定的特性, 使得 AIS 可以与 ANN、EA、模糊系统等有机结合, 集成模型可以更加高效组合各自方法的优点, 从而更有效地解决工程实际问题, 成为当前人工免疫系统的另一个研

究热点。

### 3.1 AIS 与 ANN 集成

1997 年, Dasgupta 首先对 AIS 与 ANN 在原理上进行了比较分析, 随后 de Castro 和 von Zuben 提出了人工免疫网络模型(AiNet)<sup>[10]</sup>, 用于实现以无监督方法确定 RBF 神经网络中径向基函数的位置及数量, 该模型的目标是对无标记数值数据进行筛选和聚类。在模型中, 欧几里德形状空间用来产生抗体多样性并表示分子, 一个抗原对应一个输入模式, 一个抗体对应一个 RBF 神经网络候选中心。AiNet 模型能够产生初始权重向量集, 并保持向量多样性以避免前馈神经网络收敛于局部最优解。

国内张全平等也提出了 AIS 与 ANN 的集成模型(AINEN)。该模型从微观上看是一个个子神经网络, 而从宏观上看则是一个大的免疫网络。通过在微观层面上提高神经网络集成的个体之间的异构度, 在宏观层面上提高免疫网络的适应度, 从而降低了泛化误差<sup>[16]</sup>。

以 AIS 和 ANN 集成模型为基础的改进模型已经成功应用在网络安全<sup>[17]</sup>、函数优化<sup>[18]</sup>、故障预测<sup>[19-20]</sup>和模式识别<sup>[21-22]</sup>等领域。

### 3.2 AIS 与 EA 集成

AIS 具有自适应特性, AIS 与进化算法(EA)的集成, 可以改善个体性能和优化算法。Hajela 等研究了 AIS 与 EA 的结合, AIS 的抗原识别和自适应过程可以用于改善 EA 的结构优化, 提高算法的收敛性能, 并解决约束设计问题<sup>[23]</sup>。

国内于鹏等研究了免疫进化算法(IEA), 借助遗传和接种疫苗操作将基于打分和具有约束的两类 Bayesian 网结构学习方法有机结合, 使集成算法获得更快的收敛速度和更高的网络精度<sup>[24]</sup>。

人工免疫系统与遗传算法的集成研究成果涉及到数据处理<sup>[3]</sup>、自动控制<sup>[25]</sup>、优化学习和模式识别<sup>[26]</sup>等许多领域。

### 3.3 AIS 与模糊系统集成

在免疫系统中, 抗体与抗原的识别是近似识别, 即抗体与抗原之间存在一定模糊度。因此, AIS 与模糊系统就可以进行有效的集成。de Castro 等提出了一个 AIS 与模糊系统的集成模型<sup>[27]</sup>, 通过各个类的质心来描述类, 允许对确定类对应的免疫网络细胞赋予级别, 从而产生一个模糊聚类方案。该模型的每个免疫细胞属于一个单一的类, 并通过模糊隶属度函数使每个细胞与类产生模糊关联。

国内何宏等基于免疫机理和模糊逻辑提出了模糊自适应免疫算法<sup>[28]</sup>, 目的在于避免算法过早收敛于错误值。该算法采用混沌超变异操作增强算法搜索能



力,同时免疫调节策略保持抗体群多样性,并利用模糊逻辑调节算法参数以提高算法自适应能力。

人工免疫系统与模糊系统的集成研究广泛用于工程实际自动控制<sup>[29-31]</sup>,显著增强了系统的控制能力,取得了良好的应用效果,显示出人工免疫系统强大的工程实际解决能力。

## 4 结束语

人工免疫系统研究主要用生物免疫原理,通过识别、学习和免疫操作,达到系统损害最小化,从而实现系统的鲁棒性、安全性、智能性、可靠性和自适应能力。目前,人工免疫系统研究还存在两个难点,一是免疫算法相对简单、低能,免疫机制引入有限,与生物机能差距很大,远不能满足实际应用需要;二是数学模型简单,功能不强,结果失真,智能度不高。

虽然人工免疫系统的发展还存在一些不足,但其发展前景仍然十分可观,广泛的工程实际应用和诸多成功案例增强了人工免疫系统发展的必要性和可行性。随着免疫算法的逐步成熟,系统模型的逐渐完善,免疫理论的研究推进,人工免疫系统的应用必将成为人们关注的焦点。

## 参考文献:

[1] 漆安慎,杜婵英.免疫的非线性模型[M].上海:上海科技教育出版社,1998.

[2] 丁永生.计算智能:理论、技术与应用[M].北京:科学出版社,2004.

[3] 夏芸,刘锋.基于免疫遗传算法的软件测试数据自动生成[J].计算机应用,2008,28(3):723-725.

[4] 张颖,谭冠政.改进的免疫遗传算法在多机器人协作中的应用[J].计算机测量与控制,2008,16(7):1001-1003.

[5] 马剑英,张晓娜.基于免疫遗传算法的图像多阈值分割[J].微计算机信息,2007(3):309-311.

[6] Forrest S, Perelson A, Allen L, et al. Self-Nonself Discrimination in a Computer[C]//Proc. of 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Oakland CA: [s. n.], 1994:202-212.

[7] 牛慧峰,姜万录,王文杰.阴性选择算法在工业控制系统故障诊断中的应用[J].燕山大学学报,2008,32(4):362-366.

[8] 林圣,何正友,钱清泉.基于人工免疫算法的输电线路故障类型识别新方法[J].电力系统保护与控制,2011,11(6):95-100.

[9] 秦晓倩.计算机病毒人工免疫中阴性选择算法的研究[J].信息网络安全,2009,9(4):30-33.

[10] de Castro L N, von Zuben F J. Immune and neural network models: Theoretical and empirical comparisons[J]. Int Journal of Computational Intelligence and Application, 2001, 1(3):

239-257.

[11] 刘战东,付涛,戴玉刚等.基于区间套理论的克隆选择算法的收敛性研究[J].计算机工程与科学,2010,32(5):57-59.

[12] 潘晓英,陈皓.基于免疫克隆选择优化的车牌定位[J].计算机工程与应用,2012,48(3):162-164.

[13] de Castro L N, von Zuben F J. Learning and Optimization Using the Clone Selection Principle[J]. IEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3):239-251.

[14] 任永昌,朱萍.克隆选择算法分析及其改进的研究与应用[J].计算机技术与发展,2012,22(5):101-104.

[15] 葛红.核聚类人工免疫网络的参数研究[J].计算机工程与科学,2007,29(3):136-138.

[16] 张全平,吴耿锋.基于人工免疫网络的神经网络集成方法[J].计算机工程,2008,34(3):199-201.

[17] 陶源,郭春霞,张智.基于免疫神经网络的网络攻击仿真模型研究[J].计算机应用研究,2009,26(1):334-336.

[18] Agiza H N, Hassan A E, Salah A M. An Improved Version of opt-aiNet Algorithm for Function Optimization[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2011, 11(3):80-85.

[19] Yin Qian, Luo Ruiyi, Guo Ping. Software Fault Prediction Framework Based on aiNet Algorithm[C]//Proc. of 2011 Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). [s. l.]: [s. n.], 2011:329-333.

[20] 侯胜利,王威,史霄霏,等.基于免疫神经网络的耦合转子系统故障检测[J].机床与液压,2011,17(4):131-134.

[21] Fan Haixiong, Liu Fuxian. Type Recognition of Air-attack Target Based on VD-AiNet Cluster Algorithm[J]. Modern Defense Technology, 2011, 6(10):6-16.

[22] 周颖,陈玲玲,杨鹏,等.基于免疫神经网络的下肢假肢肌电信号识别方法的研究[J].河北工业大学学报,2010,6(4):13-16.

[23] Hajela P, Yoo J S. Immune network modeling in design optimization[J]. New Ideas in Optimization, 1999, 30(5):203-216.

[24] 于鹏,刘大有,贾海洋,等.基于免疫进化算法的Bayesian网结构学习[J].吉林大学学报(理学版),2006,44(6):919-924.

[25] 陈文英,阎绍泽,褚福磊.免疫遗传算法在智能桁架结构振动主动控制系统优化设计中的应用[J].机械工程学报,2008,44(2):196-200.

[26] 丁建立,慈祥,黄剑雄.一种基于免疫遗传算法的网络新词识别方法[J].计算机科学,2011,38(1):240-245.

[27] de Castro L N, von Zuben F J. An evolutionary network for data clustering[C]//Proc. of 6th Brazilian Symposium on Neural Networks. Rio de Janeiro, RJ Brazil: IEEE Computer Society Press, 2000:84-89.

[28] 何宏,钱锋.基于模糊自适应免疫算法的非线性系统模型参数估计[J].控制理论与应用,2009,26(5):481-485.

即减少了在同一时间内参与交互的节点数量,同时定期汇报策略也减少了随机传播产生的大量重复交互。

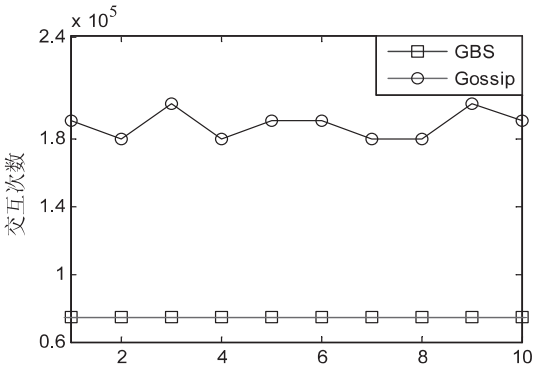


图5 Gossip 与 GBS 算法通信代价对比

3.4 种子节点比率  $\alpha$

$\alpha$  表示种子节点占总节点数的比率,图6显示了当  $T=4$  时,不同的  $\alpha$  对通信代价的影响。很明显,随着  $\alpha$  的增加,通信代价随之增加。这是因为随着  $\alpha$  的增加,种子节点数也跟着增加,这就导致 GBS 慢慢向 Gossip 退化,理论上当  $\alpha = 1$  时,GBS 算法就会基本退化为 Gossip 算法。

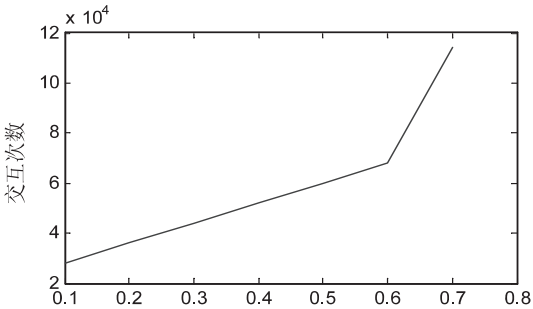


图6 种子节点比率  $\alpha$  对通信代价的影响

既然  $\alpha$  越小,通信代价越低,是否可以将  $\alpha$  设置为很小的数。通过分析可知,如果  $\alpha$  过低,少量的种子节点需要并发处理大量与普通节点的交互,会造成种子节点负担过重。因此,种子节点和普通节点比率接近 1:1 时,其每秒处理的请求与在 Gossip 情况下接近,不会给系统增加额外的负担。因此在使用中建议采用 0.4~0.6。

4 结束语

随着互联网的快速膨胀,大数据时代已经到来,面对海量的数据存储和处理需求,各种 Dynamo 式存储

系统大量涌现。这些存储系统通常由几百台甚至成千上万台 PC 机组成,如何高效地管理这些计算机信息,成为系统维护的一个关键。GBS 算法继承了 Gossip 算法高可靠性、稳定性的优点,同时减少了大量的重复交互,可以有效地降低通信消耗,在云存储系统维护方面发挥重要作用。

参考文献:

[1] Reinsel G D. The Digital Universe Decade—Are You Ready? [M]. [s. l.]: [s. n.], 2010.

[2] de Candia G, Hastorun D, Jampani M, et al. Dynamo: Amazon's Highly Available Key-value Store [C]//Proc. of SOSP' 07. Stevenson, Washington, USA: ACM, 2007: 205–220.

[3] Ghemawat S, Gobioff H. The Google File System [C]//Proceedings of the 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles. New York: ACM Press, 2003: 19–22.

[4] Shvachko K, Kuang H, Radia S. The Hadoop Distributed File System [C]//Proc. of IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technology. California: [s. n.], 2010: 1–10.

[5] Lakshman A, Malik P. Cassandra – A Decentralized Structured Storage System [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2010, 44(2): 35–40.

[6] Hajnal A, Milner E C, Szemerédi E. A cure for the telephone disease [J]. Canad. Math. Bull., 1972(15): 447–450.

[7] 杨文俊. P2P 网络系统中节点自组织管理机制 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(7): 57–60.

[8] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks [J]. IEEE Networks, 1988, 18(4): 319–349.

[9] Karp R, Schindelhauer C, Shenker S, et al. Randomized rumor spreading [C]//Proc. of Conf. on Foundations of Computer Science. CA: [s. n.], 2000: 565–574.

[10] 刘德辉, 尹刚, 王怀民, 等. Chord 网络环境下的 Gossip 算法 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(9): 48–51.

[11] 刘德辉, 尹刚, 王怀民, 等. 分布环境下的 Gossip 算法综述 [J]. 计算机应用, 2010, 37(11): 24–28.

[12] 徐小龙, 柴倩, 程春玲. 一种基于 P2P 网络的分布式文献库共享模型 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(1): 104–107.

[13] 连淑娟, 孙波, 魏云刚. 结构化 P2P 网络拓扑匹配技术综述 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 2807–2809.

(上接第 89 页)

[29] 文定都, 曾红兵, 李毅梅. 一种新颖的模糊免疫 PID 在温度控制中的研究 [J]. 微计算机信息, 2009(3): 38–40.

[30] 陈辉, 纪友哲, 祁晓野, 等. 前馈模糊免疫算法在泵阀联合 EHA 压力环控制中的应用 [J]. 四川大学学报(工程科

学版), 2010, 42(3): 184–188.

[31] 刘刚, 李华德, 杨丽娜. IPMSM 调速系统的快速免疫模糊控制器 [J]. 微电机, 2010, 5(4): 49–52.

# 人工免疫算法与系统集成的研究

作者：[娄建安](#), [李阳](#), [谢方方](#), [LOU Jian-an](#), [LI Yang](#), [XIE Fang-fang](#)

作者单位：[娄建安, 李阳, LOU Jian-an, LI Yang\(军械工程学院 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003\)](#), [谢方方, XIE Fang-fang\(军械工程学院 信息工程系, 河北 石家庄, 050003\)](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2013(9)

## 参考文献(31条)

1. [漆安慎, 杜婵英](#) [免疫的非线性模型](#) 1998

2. [丁永生](#) [计算智能:理论、技术与应用](#) 2004

3. [夏芸, 刘锋](#) [基于免疫遗传算法的软件测试数据自动生成\[期刊论文\]-计算机应用](#) 2008(03)

4. [张颖, 谭冠政](#) [改进的免疫遗传算法在多机器人协作中的应用\[期刊论文\]-计算机测量与控制](#) 2008(07)

5. [马剑英, 张晓娜](#) [基于免疫遗传算法的图像多阈值分割\[期刊论文\]-微计算机信息](#) 2007(03)

6. [Forrest S, Perelson A, Allen L](#) [Self-Nonself Discrimination in a Computer](#) 1994

7. [牛慧峰, 姜万录, 王文杰](#) [阴性选择算法在工业控制系统故障诊断中的应用\[期刊论文\]-燕山大学学报](#) 2008(04)

8. [林圣, 何正友, 钱清泉](#) [基于人工免疫算法的输电线路故障类型识别新方法](#) 2011(06)

9. [秦晓倩](#) [计算机病毒人工免疫中阴性选择算法的研究](#) 2009(04)

10. [de Castro L N, von Zuben F J](#) [Immune and neural network models:Theoretical and empirical comparisons](#) 2001(03)

11. [刘战东, 付涛, 戴玉刚](#) [基于区间套理论的克隆选择算法的收敛性研究\[期刊论文\]-计算机工程与科学](#) 2010(05)

12. [潘晓英, 陈皓](#) [基于免疫克隆选择优化的车牌定位\[期刊论文\]-计算机工程与应用](#) 2012(03)

13. [de Castro L N, von Zuben F J](#) [Learning and Optimization U-sing the Clone Selection Principle](#) 2002(03)

14. [任永昌, 朱萍](#) [克隆选择算法分析及其改进的研究与应用\[期刊论文\]-计算机技术与发展](#) 2012(05)

15. [葛红](#) [核聚类人工免疫网络的参数研究\[期刊论文\]-计算机工程与科学](#) 2007(03)

16. [张全平, 吴耿锋](#) [基于人工免疫网络的神经网络集成方法](#) 2008(03)

17. [陶源, 郭春霞, 张智](#) [基于免疫神经网络的网络攻击仿真模型研究\[期刊论文\]-计算机应用研究](#) 2009(01)

18. [Agiza H N, Hassan A E, Salah A M](#) [An Improved Version of opt-aiNet Algorithm for Function Optimization](#) 2011(03)

19. [Yin Qian, Luo Ruiyi, Guo Ping](#) [Software Fault Prediction Framework Based on aiNet Algorithm](#) 2011

20. [侯胜利, 王威, 史霄霈](#) [基于免疫神经网络的耦合转子系统故障检测](#) 2011(04)

21. [Fan Haixiong, Liu Fuxian](#) [Type Recognition of Air-attack Tar-get Based on VD-AiNet Cluster Algorithm](#) 2011(10)

22. [周颖, 陈玲玲, 杨鹏](#) [基于免疫神经网络的下肢假肢肌电信号识别方法的研究](#) 2010(04)

23. [Hajela P, Yoo J S](#) [Immune network modeling in design optimi-zation](#) 1999(05)

24. [于鹏, 刘大有, 贾海洋](#) [基于免疫进化算法的Bayesian网结构学习\[期刊论文\]-吉林大学学报\(理学版\)](#) 2006(06)

25. [陈文英, 阎绍泽, 褚福磊](#) [免疫遗传算法在智能桁架结构振动主动控制系统优化设计中的应用\[期刊论文\]-机械工程学报](#) 2008(02)

26. 丁建立, 慈祥, 黄剑雄 一种基于免疫遗传算法的网络新词识别方法[期刊论文]-计算机科学 2011(01)
27. de Castro L N, von Zuben F J An evolutionary network for da-ta clustering 2000
28. 何宏, 钱锋 基于模糊自适应免疫算法的非线性系统模型参数估计[期刊论文]-控制理论与应用 2009(05)
29. 文定都, 曾红兵, 李毅梅 一种新颖的模糊免疫PID在温度控制中的研究 2009(03)
30. 陈辉, 纪友哲, 祁晓野 前馈模糊免疫算法在泵阀联合EHA 压力环控制中的应用 2010(03)
31. 刘刚, 李华德, 杨丽娜 IPMSM调速系统的快速免疫模糊控制器 2010(04)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjz201309022.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201309022.aspx)