

文章编号: 1001-0920(2004)08-0841-06

免疫算法研究的进展

蔡自兴, 龚涛

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 概述了免疫算法的产生、发展和作用机理, 比较了不同免疫算法的设计方法及其优劣, 并讨论了免疫算法的种类。既从传统计算的流程、仿真、复杂性、参数设置、生命周期和规模等方面进行了分析, 也从自然计算的角度讨论了免疫算法。最后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。

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

Advance in research on immune algorithms

CA I Zi-xing, GONG Tao

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Correspondent: CA I Zi-xing, E-mail: zxcai@csu.edu.cn

Abstract: The development and principle of immune algorithms are summarized. The advantages and disadvantages of various design methods for immune algorithms are compared and classification of immune algorithms is discussed. Moreover, the immune algorithm is analyzed on workflow, simulation, complexity, parameter settings, life cycle and scale of traditional computation, and problems of immune algorithms are discussed from views of natural computation. 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.

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

1 引言

免疫是生物体的特异性生理反应, 由具有免疫功能的器官、组织、细胞、免疫效应分子及基因等组成^[1]。免疫系统通过分布在全身的不同种类的淋巴细胞识别和清除侵入生物体的抗原性异物。当生物系统受到外界病毒侵害时, 便激活自身的免疫系统, 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。当人工免疫系统受到外界攻击时, 内在的免疫机制被激活, 其目标是保证整个智能信息系统的信息处理功能正常运作^[2]。

免疫算法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, 自我-非自我的抗原识别机制使免疫算法具有较强模式分类能力。此外, 免疫算法还模拟了免疫系统的学习-记忆-遗忘的知识处理机制, 使其对分布式复杂问题的分解、处理和求解表现出较高的智能性和鲁棒性。

根据伯内特(Burnet)的细胞克隆选择学说(Clonal selection theory)和杰尼(Jerne)的免疫网络学说, 生物体内先天具有针对不同抗原特性的多样性B细胞克隆, 抗原侵入机体后, 在T细胞的识别

收稿日期: 2003-07-01; 修回日期: 2003-10-27

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60234030)

作者简介: 蔡自兴(1938—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、人工智能和智能机器人等研究; 龚涛(1978—), 男, 湖南桃源人, 博士生, 从事计算智能、人工智能和智能网络等研究

和控制下,选择并刺激相应的B细胞系,使之活化和增殖,并产生特异性抗体结合抗原;同时抗原与抗体、抗体与抗体之间的刺激和抑制关系形成的网络调节结构维持着免疫平衡^[3]。随着理论免疫学和人工免疫系统的发展,相继提出了几种免疫网络学说,如 Jerne^[4]提出了独特型网络(Idiotype network),以描述抗体之间、抗体与抗原之间的相互作用; Ishiguro 等^[5]提出一种互联耦合免疫网络模型; Tang 等^[6]提出一种与免疫系统中B细胞与T细胞之间相互反应相似的多值免疫网络模型; Herzenberg 等^[7]提出一种更适用于分布式问题的松耦合网络结构。基于这些自然免疫学说,可以创建一定的算法来模拟免疫机制,例如 Leandro 和 Fernando^[8]提出的使用克隆选择原理进行人工机器的学习和优化研究(这种算法称为免疫算法)。

免疫算法的关键在于系统对受害部分的屏蔽、保护和学习控制。设计免疫算法有两种思路^[2]:一是用人工免疫系统的结构模拟自然免疫系统的结构,类似于自然免疫机理的流程设计免疫算法,包括对外界侵害的检测、人工抗体的产生、人工抗体的复制、人工抗体的变异和交叉等;二是不考虑人工免疫系统的结构是否与自然免疫系统的结构相似,而着重考察两系统在相似的外界有害病毒侵入下,其输出是否相同或类似,侧重对免疫算法的数据分析,而不是流程上的直接模拟^[9]。因为免疫机制与进化机制紧密相关,所以免疫算法往往利用进化计算来优化求解^[10]。

本文重点介绍免疫算法的定义、主要设计方法、算法分析与比较、应用以及发展展望,具体包括:

- 1) 免疫算法的定义和发展史;
- 2) 免疫算法的主要设计方法;
- 3) 介绍几种典型免疫算法的分析和比较;
- 4) 讨论免疫算法的一些应用实例,设想未来的应用领域;
- 5) 对免疫算法的发展提出分析建议,指明发展的弱点、难点、重点和创新点,并对免疫算法的发展进行了展望。

2 免疫算法

人工免疫系统是由免疫学理论和观察到的免疫功能、原理和模型启发而生成的适应性系统。这方面的研究最初从20世纪80年代中期的免疫学研究发展而来。1990年, Bersini^[11]首次使用免疫算法来解决问题。20世纪末, Forrest 等^[12]开始将免疫算法应用于计算机安全领域。同期, Hunt 等^[13]开始将免疫

算法应用于机器学习领域。近年来,越来越多的研究者投身于免疫算法的研究。自然免疫系统所具有的显著的信息处理能力对计算技术的研究有很多重要的启发。一些研究者基于遗传算法提出了一些模仿生物机理的免疫算法^[14];人工免疫系统的应用问题也得到了研究^[15];还有一些学者研究了控制系统与免疫机制的关系^[16]。

目前对免疫算法以及有关问题还没有明确、统一的定义,以下定义仅供进一步讨论参考。

定义1 免疫算法是模仿生物免疫学和基因进化机理,通过人工方式构造的一类优化搜索算法,是对生物免疫过程的一种数学仿真,是免疫计算的一种最重要形式。

当然还有其他定义方法:文献[17]将免疫概念及理论应用于遗传算法,在保留原算法优点的前提下,力图有选择、有目的地利用待解问题中的一些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。

定义2 人工免疫系统是由免疫学理论和观察到的免疫功能、原理和模型启发而生成的适应性系统。可通过免疫算法进行人工免疫系统的计算和控制。

Starlab^[18]给出的定义为:人工免疫系统是一种数据处理、归类、表示和推理策略的模型,它依据似是而非的生物范式,即自然免疫系统。Dasgupta^[19]给出的定义为:人工免疫系统由生物免疫系统启发而来的智能策略组成,主要用于信息处理和问题的求解。Timmis^[20]给出的定义为:人工免疫系统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,并用于复杂问题的求解。Starlab 仅从数据处理的角度对人工免疫系统进行定义,而后二者则着眼于生物隐喻机制的应用,强调了人工免疫系统的免疫学机理,因而更为贴切^[18]。

定义3 免疫系统在受到外界病菌的感染后,能够通过自身的免疫机制恢复健康以保持正常工作的一种特性或属性称为免疫系统的鲁棒性^[2]。

定义4 抗原(antigen)指所有可能错误的基因,即非最佳个体的基因;疫苗(vaccine)是根据进化环境或待解问题的先验知识得到的对最佳个体基因的估计;抗体(antibody)是指根据疫苗修正某个个体的基因所得到的新个体^[15]。

3 免疫算法的主要设计方法

前面提到的设计免疫算法的两种思路,前者基

于白箱模拟的方法, 重点在于结构和机理上的模拟; 后者基于黑箱模拟的方法, 重点在于输入输出和功能上的模拟^[2]。前者免疫算法的设计依赖于生物免疫系统的知识

3.1 白箱模拟法

现在很难作到从结构和机理上完全模拟生物免疫机制, 因为人类还没有完全解开生物免疫之谜, 还有许多问题需要进一步研究。因而, 目前不少研究者往往按照白箱模拟法的思路, 借用生物免疫机制的一些概念, 从形式上进行一定的模拟, 以实现系统人工免疫的目的。例如, 文献^[15]模拟生命科学中的免疫理论, 引入了免疫算子来改进遗传算法。免疫算子根据生物免疫理论分为全免疫和目标免疫两种类型, 分别对应于生命科学的非特异性免疫和特异性免疫^[15]。

3.2 黑箱模拟法

黑箱模拟法间接地从输入输出的特征来考察人工系统对自然系统的模拟。免疫算法常采用遗传算法或进化算法对外界攻击或病毒进行学习, 产生与外界攻击或病毒相克的抗体。所以, 免疫算法一般采用了遗传学习机制^[18]。

例如文献^[2]将免疫算法应用于多维教育艾真体(agent)。免疫算法首先检测外来的侵害对多维教育艾真体的攻击, 分析其受害节点, 从而设定这个多维教育艾真体的最优修复目标; 然后判断当前多维教育艾真体是否符合最优修复目标, 即把整个系统的信息损失降为最小。若外界攻击或病毒侵扰没有危及系统的核心部分, 虽然某些环节失灵但整体仍能正常运转, 则可以不激活免疫算法也能逐渐消除损失; 若外界攻击或病毒侵扰危及系统的核心部分, 系统不能正常运转, 则运行免疫算法来最小化系统整体损失, 保证系统核心部分的恢复和正常运转。若多维教育艾真体符合最优修复目标, 则把最优结果及其参数存储到知识库中, 以供下次直接调用, 接着输出结果; 否则, 查询知识库, 看是否可找到能参考的现成解决方案。若有这个解决方案, 则直接调用, 并输出结果; 否则启动该免疫算法的进化进程: 首先设定种群及其进化参数, 然后通过受害节点种群按遗传、变异、交叉等进化原则迭代相互计算和操作, 最终收敛为最优结果, 即系统整体的最小损失解。在遗传算法运行时, 受害部分只有输入、输出被算法屏蔽, 这样能保证损失不会扩大或病毒不会蔓延。如果算法迭代超过上限, 则被迫终止算法, 并记录其最优结果及其参数; 否则每进化一次, 便重新返

回到判定系统是否达到最优修复目标, 进入下一轮算法计算过程。该免疫算法对每一次免疫遗传算法操作的最优结果进行收集、保存和整理, 下次遇到类似情况, 无需计算便能直接调用知识库中的最优结果。

4 免疫算法的分析和比较

近年来, 国内外已提出并发展了一些免疫算法, 特别是 1997 年人工免疫学研究在国际上兴起之后, 不同免疫算法的分析和比较主要从以下两方面进行研究:

- 1) 自然免疫系统的免疫学理论和方法;
- 2) 计算机算法的分析量度

主要免疫学说有反向选择原理、进化学说、克隆选择理论、疫苗学说和免疫网络理论等。根据这些不同的免疫学说提出以下 5 种不同的免疫算法:

1) 反向选择算法: 文献^[19]基于反向选择原理提出反向选择算法来检测异常, 其算法主要包括以下两步: 首先产生监测器集合, 其中每个监测器与被保护的数据都不匹配; 然后不断地将集合中每个监测器与被保护的数据相比较, 如果监测器与被保护的数据相匹配, 则判定该数据发生了变化。

2) 免疫遗传算法: Chun 等^[20]提出了一种免疫算法, 实质上是改进的遗传算法。

3) 克隆选择算法: De Castro^[21]基于免疫系统的克隆选择理论提出克隆选择算法, 该算法是模拟免疫系统学习过程的进化算法。

4) 基于疫苗的免疫算法: 焦李成等^[22]基于免疫系统的理论提出基于疫苗的免疫算法。

5) 基于免疫网络的免疫算法: Naruaki^[23]基于主要组织相容性复合体(MHC)和免疫网络理论提出一种自适应优化的免疫算法, 用于解决多艾真体中每个艾真体的工作域分配问题。

从计算机算法的量度分析, 可以考察免疫算法及其优化算法的以下参数:

1) 变异率: 免疫算法作为一种多峰值搜索算法, 变异操作在该算法中显得尤为重要, 算法通过变异操作维持群体的多样性, 使算法最终收敛于多个峰值或收敛于全局最优点。变异值的取值既不能太大也不能太小: 太小变异操作的效果不明显, 群体的多样性不能保证, 因而不能收敛于全部峰值; 太大则群体的稳定性很差, 搜索过程难以长时间稳定收敛, 易出现振荡。合适的变异率既可以搜索到全部峰值, 又可以保持稳定收敛的状态^[24]。

2) 选择阈值: 选择阈值是免疫算法基于比率选

择操作的一个重要参数,它与变异率配合,能有效地保证群体的多样性,防止过程陷入个别极值,对免疫算法的多峰值搜索能力影响很大。选择阈值不宜太大,太大该阈值的限制作用失效,搜索过程易陷入几个适应值较大的峰值,降低群体的多样性,因而难以找到所有的峰值。当然,此值也不宜太小,太小将使适应值对期望繁殖率的影响削弱太多,导致搜索难以找到几个较大峰值^[24]。

3) 抗体生命周期:免疫系统的抗体群中,克隆抗体具有一定的寿命,将这种免疫抗体生命周期引入优化算法,可用于动态环境中种群个体的不同适应性的标度,在大范围内具有适应性的个体将具有较长的寿命,而只能在小范围内适应的个体,其寿命较短。

4) 复杂性:计算复杂性是解决一个数学形式问题所必需的固有计算资源的量度,它是不变的,因为计算复杂性仅依赖于这个问题,而独立于用来解决这个问题特定算法^[25]。对于自然界本身的计算(自然计算)及其模拟计算问题,其信息是局部的。换言之,这些信息不能唯一标识一个数学问题的一个物理状态或一个实例,而且这些信息受误差的影响。例如,在多维教育免疫网络中要想知道受害部分的情况,就需要通过各种传感器测量数据。因为测量数目是有限的,因而得到的信息是局部的,且这些测量不可避免地受误差的影响。

5) 解群体的规模:解群体的规模(即群体中解个体的数目)一直是随机搜索算法的一个重要参数,它是影响算法并行性的决定性因素之一。规模太小,则并行搜索的范围太小,难以找到所有峰值;规模太大,又会不必要地延长搜索过程所需要的时间。因此,针对不同问题特点,选择适当的群体规模无疑会提高算法的效率和性能^[24]。

5 免疫算法的应用

免疫算法已得到越来越多的应用,包括优化求解、杀毒、故障诊断、鲁棒控制、智能网络、防止黑客入侵、容错、匹配、分类与决策等方面。本文简要介绍一些例子。

基于免疫系统的机制,可以提出一种新的信息处理体系结构。免疫算法着重体现免疫系统的信息特征,如特异性(specificity)、多样性(diversity)、容错性(tolerance)和记忆力(memory)^[26]。这种免疫算法可用来实现主动噪音控制,以消除噪音干扰,并具有噪音学习能力。

使用免疫算法可进行要纠错的同步电机的最优

设计,这里免疫算法作为一种最优设计算法^[27]。

免疫算法是一种可辨识和消除外来物体的适应性生物机制的算法,基于免疫模型可以提出一种优化算法,应用于 n 个艾真体的销售员旅行问题(n -TSP)。实验仿真表明,免疫算法在组合优化问题上具有优良的求解性能^[28]。

使用免疫算法还可以实现电力公司的分布式系统或有费用的支线重新配置,以维护系统的负载平衡。实验仿真显示,该算法效果良好^[29]。

基于神经网络辨识器可以实现HIA(体液免疫算法)的PD控制器,用来解决PD控制参数因随机选取而引起的突变问题^[30]。实验结果表明,HIA的PD控制器比传统控制器性能好。

另一个例子是一种特殊的免疫算法,用来从数据库中发现一些感兴趣的高级预测规则,而不象其他文献那样发现分类知识。与该算法相关的3个数据挖掘专题为已发现知识的兴趣、算法的计算效率以及表述性与效率之间的权衡^[31]。

总之,免疫算法作为一种最优算法、仿生智能算法,在计算、网络、控制、学习等方面都有许多应用,具有很大的应用潜力。

6 发展趋势与展望

免疫算法是人工免疫系统的重要算法,用来模拟自然界中生物免疫原理,对外界侵害进行识别、学习和防御操作,达到系统损害的最小化,从而实现系统鲁棒性、安全性和智能性的最大化。根据免疫算法的研究经验,外来侵害的检测和内部学习机制的优化成为两大难点^[2]。目前使用的外来侵害检测算法还十分简单低能,与生物体的机能差距很大,远不能满足实际应用的需要。改进免疫算法的识别模块需要利用模式识别、决策、网络入侵等方面的知识和技术。现在的免疫算法一般建立在精确的数学模型/公式或进化计算的基础上。数学模型固然简单、易于实现,但功能不强,结果往往失真,智能度不高,也不便于改进。进化计算是一种比较成功也比较成熟的仿生优化算法,可以实现全局最优,也可以进行并行/分布式计算,但其弱点在于效率不高,随机性不好把握。为了提高算法的效率,可进行并行处理,也可根据具体问题的信息,在免疫算法中加入问题的启发性信息,以优化算法的效率。

虽然免疫算法的发展主要有以上两个难点,但免疫算法的发展前景依然十分乐观,实际应用的召唤和成功实例大大增强了免疫算法发展的必要性和可能性。以后随着人工免疫系统的发展,免疫算法会

逐步成熟, 成为人工免疫系统的计算中心。免疫算法在计算机网络方面的应用将会不断增强和扩展, 网络的安全性和鲁棒性将会得到实质性的提高, 其智能水平也会不断提高^[2]。因为自然/人工灾害时有发生, 而自然免疫系统是最完美的抗灾系统之一, 因此基于免疫算法的抗灾智能 Web 系统将得到大力研究, 并在实际抗灾系统信息化进程中得到应用; 机器人作为研究的热点, 免疫机器人的提出、研究和开发将成为智能机器人的一个亮点^[32]; 故障诊断的智能化是发展趋势, 免疫算法在故障诊断方面的应用能大大提高其智能度, 增强诊断效果。

今后免疫算法的研究重点大致集中在以下几方面:

1) 免疫算法的有效性: 类似于人的免疫系统的抗病能力, 人工免疫系统的免疫算法必须是有效的, 必须确实能够自适应性地减弱或消除外来的损害, 例如杀毒。

2) 自我-非自我的智能化识别能力: 用智能化技术增强免疫算法的异己识别能力是重点之一。

3) 免疫算法的智能效果: 将免疫算法引入应用系统是否能增强系统的整体智能是评价算法成败的一个重要指标。

4) 并行免疫算法与网络: 免疫算法与网络的并行化是算法发展的必然趋势, 并正成为研究的热点之一。而自然免疫系统的潜在并行处理能力无疑为免疫算法与网络的并行化奠定了根本的生物基础。

5) 免疫算法在网络、智能系统和鲁棒系统中的应用: 由于免疫算法来源于基于神经网络和内分泌网络的自然免疫系统, 网络 and 智能必将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。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。

7 结 语

免疫算法作为一种新兴的仿生算法, 具备许多特有的优点, 如全局优化、鲁棒性好、易于并行处理、智能度高等。免疫算法已获得较好的应用, 必将成为网络、智能、控制、计算等领域研究的重点和热点之一。本文给出了免疫算法的定义和概念, 总结了免疫算法的发展史, 比较了不同免疫算法设计的优劣, 既从传统计算的流程图、复杂性等方面对其进行了分析, 也从自然计算的角度讨论了免疫算法, 并举例说明了免疫算法的应用, 探讨了免疫算法的未来应用领域。最后对免疫算法发展的难点和重点进行了探

讨, 展望了免疫算法的美好前景, 为免疫算法的研究提供了一些经验性的建议和预见。

参考文献(References):

- [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] 龚涛. 多维教育免疫艾真体的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- [3] 刘克胜, 曹先彬, 郑浩然, 等. 基于免疫算法的 TSP 问题求解[J]. 计算机工程, 2000, 26(1): 1-2, 16.
(Liu K S, Cao X B, Zheng H R, et al. Solving TSP based on immune algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2000, 26(1): 1-2, 16.)
- [4] Jerne N K. Towards a network theory of the immune system[J]. *Ann Immunol*, 1974, 125C: 373-389.
- [5] Ishiguro A, Watanabe Y, Ichikawa S, et al. Gait control of hexapod walking robots using mutual-coupled immune network[J]. *Advanced Robotics*, 1996, 10(2): 179-195.
- [6] Tang Z, Yamaguchi T, Tashima K, et al. Multiple-valued immune network model and its simulations[A]. *Proc 27th Int Symp on Multiple-valued Logic [C] A utogonish*, 1997. 233-238.
- [7] Herzenberg L A, Black S J. Regulatory circuits and antibody response[J]. *European J of Immun*, 1980, 10(1): 1-11.
- [8] Leandro N D C, Fernando J V Z. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 306-313.
- [9] 龚涛, 蔡自兴. 自然计算的广义映射模型[J]. 计算机科学, 2002, 29(9): 27-29.
(Gong T, Cai Z X. Generalized mapping model of natural computation[J]. *Computer Science*, 2002, 29(9): 27-29.)
- [10] Leandro N De Castro, Fernando J Von Zuben. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 306-313.
- [11] Bersini H, Varela F. Hints for adaptive problem solving gleaned from immune network[A]. *Parallel Problem Solving from Nature[C]*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 343-354.
- [12] Dasgupta D, Forrest S. An anomaly detection algorithm inspired by the immune system[A]. *Artificial Immune System and Their Applications [C]*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 262-277.
- [13] Cooke D E, Hunt J E. Recognizing promoter sequences using an artificial immune system[A]. *Proc*

- Intelligent Systems in Molecular Biology (ISMB 95)* [C]. Cambridge: AAA I Press, 1995. 89-97.
- [14] Jiao L icheng, Wang L ei. Novel genetic algorithm based on immunity [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2000, 30(5): 552-561.
- [15] Ha Daewon, Shin Dongwon, Koh Dw an-Hyeob, et al. Cost effective embedded DRAM integration for high-density memory and high performance logic using 0.15 μm technology node and beyond [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2000, 47(7): 1499-1506.
- [16] Ding Yongsheng, Ren Lihong. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia [A]. *IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C]. San Antonio, 2000, 1: 534-538.
- [17] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74-78
(Wang L, Pan J, Jiao L C. Immune algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(7): 74-78.)
- [18] 肖人彬, 王磊. 人工免疫系统: 原理、模型、分析及展望 [J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1281-1293
(Xiao R B, Wang L. Artificial immune system: Principle models, analysis and perspectives [J]. *Chinese J Computers*, 2002, 25(12): 1281-1293.)
- [19] Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-nonself discrimination in a computer [A]. *Proc of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy* [C]. Oakland, 1994. 202-212.
- [20] Chun J S, Kim M K, Jung H K. Shape optimization of electromagnetic devices using immune algorithm [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1997, 33(2): 1876-1879.
- [21] De Castro L N, Vov Zuben F J. An immunological approach to initialize centers of radial basis function neural networks [A]. *V Brazilian Conf on Neural Networks* [C]. Brazil, 2001. 79-84.
- [22] Wang L, Jiao L C. Novel genetic algorithm based on immunity [A]. *Proc IEEE Int Symp Circuits Syst* [C]. Geneva, 2000. 385-388.
- [23] Toma N, Endo S, Yamada K, et al. The immune distributed competitive problem solver with major histocompatibility complex and immune network [A]. *IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. Nashville, 2000. 1865-1870.
- [24] 葛红, 毛宗源. 免疫算法几个参数的研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(12): 15-18
(Ge H, Mao Z Y. Research on parameters of immune algorithm [J]. *J of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2002, 30(12): 15-18.)
- [25] Traub J F, Werschulz A G. *Complexity and Information* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [26] Ishida Yoshiteru, Adachi Norihiko. Active noise control by an immune algorithm: A adaptation in immune system as an evolution [A]. *Proc of the IEEE Conf on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE, 1996. 150-153.
- [27] Chun Jang-sung, Lin Jeong-pil, Jung Hyun-kyo, et al. Optimal design of synchronous motor with parameter correction using immune algorithm [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 610-615.
- [28] Satoshi Endoh, Naruaki Toma, Koji Yamada. Immune algorithm for n -TSP [A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. Piscataway: IEEE, 1998. 3844-3849.
- [29] Lin Chia-hung, Chen Chao-shun, Wu Chia-jean. An immune-based optimization method for loading balance of main transformers and distribution feeders [A]. *Proc of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf* [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, Beijing, 2001. 1: 48-53.
- [30] Lee Y J, Song D H, Choi S U, et al. An implementation of HIA (Humoral immune algorithm) PD controller using neural network identifier [A]. *Proc of the SICE Annual Conf* [C]. Nagoya: Society of Instrument and Control Engineers (SICE), 2001. 331-334.
- [31] Zheng Jianguo, Wang Lei, Jiao L icheng. An immune algorithm for generalized rule induction [A]. *CIE Int Conf of Radar Proc* [C]. Beijing, 2001. 1023-1026.
- [32] Gong Tao, Cai Zixing. Mobile immune-robot model [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics, Intelligent Systems and Signal Proc* [C]. Changsha, 2003. 1091-1096.