

文章编号: 1002-0411(2002)05-385-06

免疫优化算法及其前景展望

谈英姿 沈炯 吕震中

(东南大学动力系 南京 210096)

摘要: 生物免疫系统的多样性、适应性及免疫记忆等特性正越来越引起人们的关注. 目前已提出了一些基于免疫概念的优化算法. 本文详细地讨论了多种基于免疫概念的优化算法, 指出这些方法是免疫信息机理与遗传算法(GA)相结合的产物, 最后提出了免疫优化算法的发展前景.*

关键词: 免疫系统; 优化算法; 多样性; 免疫进化; 遗传算法

中图分类号: TP13

文献标识码: A

STUDY OF IMMUNE-BASED OPTIMIZATION ALGORITHM AND ITS FUTURE DEVELOPMENT

TAN Ying-zi, SHEN Jiong, LÜ Zhen-zhong

(Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: The diversity, adaptation and memory of the biological immune system are getting more interesting for the researchers. Several optimal algorithms based on immune system have been proposed. This paper discusses some immune-based optimization algorithms in detail. It points out that these methods are the combination of immune system information processing mechanism and genetic algorithm (GA). Finally some possible future research topics are proposed.

Keywords: immune system, optimization algorithm, diversity, immune evolution, genetic algorithm

1 引言(Introduction)

大自然尤其是生物系统一直是人们获得灵感的源泉, 从上世纪五六十年代开始, 研究热点就围绕着生物系统尤其是人类自身功能及结构的模仿: 如神经网络是对人脑结构的模拟; 而遗传算法则将生物的生存演化进行了模仿. 近年来, 生物免疫系统又成为一个新兴的仿生学课题^[1].

免疫系统是由器官、细胞和分子组成的一个复杂系统, 它是除神经系统外, 机体能特异地识别“非己”和“自己”的刺激, 对之作出精确的应答, 并保留记忆反应的功能系统^[2]. 研究表明免疫系统具有多种功能^[3]: 如模式识别、学习、记忆获取、产生多样性、耐受噪音及分布式检测等等. 免疫系统的这些诱人特性正逐渐引起工程研究人员的关注, 基于免疫学原理已提出了不少新的算法和技术^[4], 在众多的工程研究中引入免疫概念后取得了满意的效果: 自律机器人的研究^[5,6], 计算机及其网络安全^[7,8], 控制^[9-11], 模式识别^[12]及其新的免疫优化方法^[13,14]等等.

本文从免疫系统的进化角度来考察免疫信息处理机制(多样性、免疫自我调节、免疫记忆等), 其实免疫系统作为一个动态进化系统, 与遗传算法所模仿的自然界生物种群进化的过程有一定的相似之处, 但也有着自己特殊的演化规律, 免疫系统的动态变化包括从只有几毫秒的亚分子事件到几分钟、几年的细胞群体变化, 以及需要无数代才能完成的免疫基因库的改变. 在遗传算法的基本框架上, 结合免疫系统的特殊信息处理机制发展起来了多种免疫优化算法, 为随机优化算法打开了一个新的窗口.

本文在简单介绍生物免疫系统的基本概念之后, 详细讨论了几种免疫优化算法, 最后指出了免疫优化算法的发展前景.

2 生物免疫系统概述(Brief introduction about the immune system)

免疫系统对侵入机体的非己成分(如细胞、病毒和各种病原体)以及发生了突变的自身细胞(如癌细

胞)具有精确地识别、适度地应答和有效地排除的能力^[2]。免疫系统的功能主要由免疫细胞完成,免疫细胞主要有淋巴细胞(包括 T 淋巴细胞、B 淋巴细胞)和巨噬细胞。

免疫系统可分为先天性免疫系统和适应性免疫系统。先天性免疫系统是生物在种系发育和进化过程中逐渐建立起来的一系列天然防御功能,其特点是与生俱有,能传给下一代,无特异性,对各种病原体都有一定的防御功能。适应性免疫系统则是在个体生命过程中慢慢建立起来的,当免疫系统与某种病原体产生“免疫初次响应”之后,能记住该病原体,当再次遇到它时,会产生“免疫再次响应”,迅速而有效地消除该病原体。

从生物信息处理的角度来看,免疫系统具有以下特性:

- 多样性

多样性是免疫系统的重要特征之一。免疫学的初步研究表明,通过细胞的分裂和分化作用,体细胞超变异,抗体的可变区与不变区的基因重组等方式,免疫系统可产生大量的不同抗体来抵御各种抗原,从而使免疫抗体库具有丰富的多样性。

- 免疫自我调节

免疫系统具有维持免疫平衡的机制,能将免疫响应的强度限定在一定水平上。通过对抗体的抑制和促进作用,能自我调节产生适当数量的必要抗体。

- 免疫记忆特性

产生抗体的小部分细胞会作为长寿的记忆细胞而被保存下来,当再次遇到同类抗原,相应的记忆细胞会迅速激发而产生大量的抗体。这一特性在医学临床中应用为接种疫苗,将某些传染病的低活性疫苗注射到未感染者身上,刺激接受者产生抗体,从而产生对此类传染病的抵抗能力。

- 分布式系统

免疫系统是一个典型的分布式系统,由许多局部相互作用的免疫细胞组成来完成对全局的免疫保护功能,并没有一个集中控制中心,因而也具有容错功能,不会象集中控制系统那样因为控制中心的小失误,造成全局功能的瘫痪。

- 动态适应特性

几百万年以来,免疫系统都在与病原体不断竞争的过程中逐渐进化,这种免疫系统与病原体的相互适应的过程具有明显的动态特性,两者相互竞争共同进化。

- 多时间尺度进化系统

免疫系统的变化包括从只有几毫秒的亚分子事件到几分钟、几年的细胞群体变化,以及需要无数代才能完成的改变,免疫系统实际上是一个随环境改变而不断完善的多时间尺度进化系统。

3 免疫优化算法(Immune-based optimization algorithm)

在遗传算法的进化大框架上,引入免疫的抗体自我调节,免疫响应过程,免疫疫苗接种,免疫记忆等概念,发展了以下的免疫优化算法。

3.1 基于免疫自我调节机制的免疫优化算法

在遗传算法中,如果根据适应度函数选择出的双亲基因非常接近,那么所产生的后代相对双亲也必然比较接近,所期待的改善就比较小,这样基因模式的单一性不仅减慢进化历程,而且可能导致进化停滞,过早收敛于局部最优点。

抗体多样性是免疫系统的一个重要特性,这种多样性可用来提高遗传算法的全局搜索能力而不致陷于局部解。在免疫调节中,那些与抗原亲和力大并且浓度较低的抗体会受到促进,而与抗原亲和力小或浓度较高的抗体将会受到抑制,以此保证抗体的多样性。将这一概念应用到标准的遗传算法中,保持群体多样性,改善未成熟收敛,提高遗传算法的性能。个体浓度越小,选择概率越大,然而个体浓度越大,则选择概率越小。这样,在保留高适应度个体的同时,进一步确保个体多样性,能避免早熟现象。

文[15]主要利用了免疫系统的这一抗体浓度调节原理,使那些与抗原亲和力大但浓度较高的抗体受到抑制。在对群体的候选个体选择时,在传统的遗传算法适应度比例选择机制的基础上,增加基于浓度的调节概率因子,于是个体的选择概率 p_i 由适应度 p_{fi} 和浓度抑制概率 p_{ai} 两部分组成:

$$p_i = \alpha p_{fi} + (1 - \alpha) p_{ai} = \alpha \frac{F_{it}(i)}{\sum_{j=1}^N F_{it}(j)} + (1 - \alpha) \frac{1}{N} e^{-\frac{c_i}{\beta}} \quad (1)$$

上式中 α 和 β 为加权系数, c_i 表示抗体 i 的浓度,可以看出抗原亲和力大的抗体和低浓度的抗体生存机率较大。这样在保留高适应度个体的同时,进一步确保个体多样性。

文[15]将免疫自我调节机制用于共生进化网络设计,增加群体的多样性,从而加快网络的优化设计速度。

这种免疫优化算法,从提高种群的多样性角度

来确保收敛到全局最优点, 在 BP 网络的设计^[16]及典型的 NP 问题, 如装箱问题^[17]、二次布局求解^[18]等问题中取得了很好的效果。

3.2 基于免疫响应的免疫优化算法

文[19]基于 Kazuyuki Mori^[20]等人发展的免疫模型, 提出了一种免疫优化算法. 具体地说, 这种免疫优化算法从体细胞理论和免疫网络理论中得到启发, 实现了类似于免疫系统的自我调节功能和生成不同抗体的功能. 具有以下特点:

- 它在记忆单元基础上运行, 对于曾经出现过的抗原, 免疫算法产生相应抗体的速度比以前更快, 提高了算法的总体搜索能力, 确保了快速收敛于全局最优解;
- 它有计算亲和力的程序, 体现了抗体的多样性;
- 它通过促进或抑制抗体的产生, 体现了免疫反应的自我调节功能.

该算法的框图如图 1 所示.

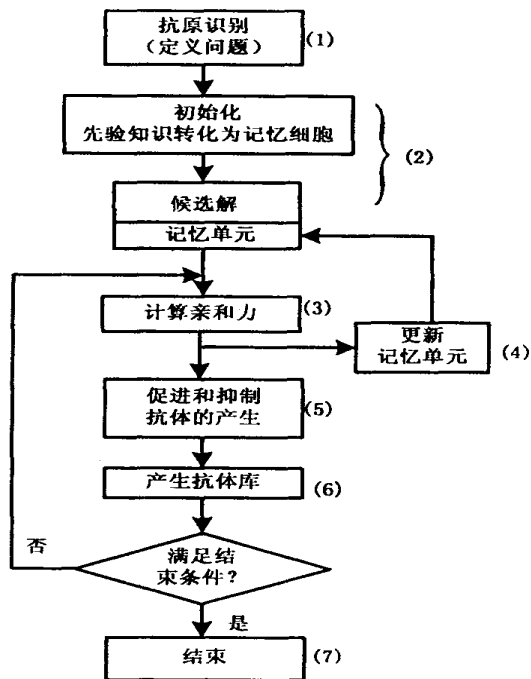


图 1 基于免疫响应的免疫优化算法框图

Fig. 1 The flow chart of optimization algorithm based immune response

文[21]使用这一免疫优化算法来解决热机组调度难题, 将目标函数和限制作为抗原, 对于一个与抗原结合得很好的抗体, 这一抗体就是所求的解, 并将这一算法与模拟退火算法(SA)、拉哥朗日松弛法(LR)、神经网络动态规划(NN-DP)、增强型基因方

法(GANN-DP)等方法在获得参数的成本及计算复杂性两方面进行了比较, 免疫优化算法在这几种方法中, 有着最小的成本, 计算时间仅次于 GANN-DP, 但由于免疫算法不需要预处理和训练, 实现起来比 GANN-DP 更方便.

文[22]又将这一方法应用在电力系统中的电容位置的分布优化设计中. 文[23]使用该方法作了电网规划方面的探索, 将该方法跟基于遗传算法的电网规划方法进行比较, 结果表明免疫优化算法在全局寻优的性能方面要优于遗传算法. 文[24, 25]采用该方法进行了经典优化问题 TSP 的研究, 获得了满意的效果.

3.3 基于疫苗接种的免疫优化算法

疫苗接种是免疫记忆临床应用的一个重要方面, 疫苗的预防免疫已在世界范围内消灭了天花、麻疹、小儿麻痹等重大流行病, 这是在对这些流行病病毒的充分了解的基础上, 研制出疫苗来有针对性地防治这些流行病. 将这一免疫概念用于遗传算法, 有效地利用求解问题的一些基本的、显而易见的特征信息或知识, 提取“疫苗”, 使问题求解更具有针对性.

文[13]在标准的遗传算法中引入免疫概念, 有效地利用问题的先验知识, 提出了基于疫苗接种的免疫优化算法, 在保留原算法的优良特性的前提下, 引入了一个新的算子——免疫算子, 有选择、有目的地利用待求问题中的一些特征信息或知识, 提取“疫苗”来抑制其优化过程中出现的退化现象. 在进化选择过程中, 通过“接种疫苗”和“免疫选择”来指导搜索过程, 获得更好的优化性能. 这一算法的框图如图 2 所示.

该方法对 TSP (Travelling Salesman Problem) 问题进行了仿真实验, 与通用遗传算法相比, 这种免疫优化算法能较好地解决已有算法中出现的退化现象, 且使收敛速度有显著提高.

免疫算子的关键是合理提取疫苗. 一般说来, 选取疫苗时既可以根据问题的特征信息来制作免疫疫苗, 也可以在具体分析的基础上, 考虑降低原问题的规模, 增设一些局部条件来简化问题. 其实这是对求解的问题先验知识充分了解之后, 提取合理疫苗, 使算法更具针对性而换取计算时间的节省.

3.4 基于免疫抗体记忆的免疫优化算法

在适应性免疫调节过程中, 对特殊抗体的记忆起着重要作用. 文[26]提出了一种基于免疫抗体记忆的优化算法并用于 n-TSP 问题. 提出的免疫优

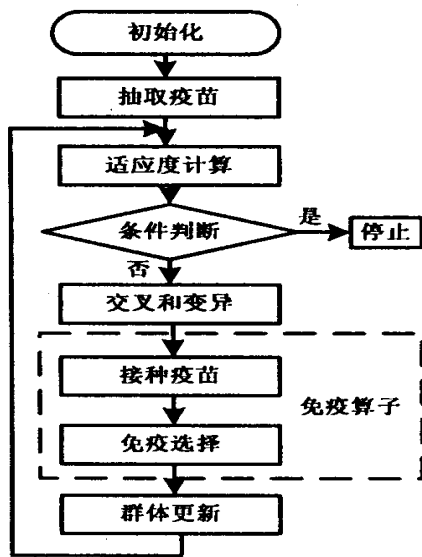


图2 基于疫苗接种的免疫优化算法框图

Fig. 2 The flow chart of optimization algorithm based immune vaccine

化算法是对传统 GA 的改进,与 GA 相比,增加了两个新算子:一个是记忆细胞,一个是抑制细胞.这两种算子都是对重要抗体的记忆.记忆细胞是对具有高亲和力抗体的记忆,用于全局搜索过程中促进优良个体的搜索,而抑制细胞则是对高浓度抗体的记忆,在局部搜索过程中抑制相似解的搜索.算法框图如图 3 所示.

文[26]对于免疫算法的性能进行了计算机仿真,结果表明提出的免疫算法对于组合优化问题具有很好的性能.

3.5 几种免疫优化算法小结

上述几种免疫优化算法都是针对传统遗传算法存在的问题,如局部搜索能力差,存在未成熟收敛和随机漫游等现象,从而导致算法的收敛性能差,需要很长时间才能找到最优解^[27],结合不同的免疫信息处理机制发展而来的.

第一种方法是利用抗体多样性保持机制,改进传统的遗传算法,提高了算法的群体多样性,能有效地抑止早熟现象,使免疫遗传算法具有较好地全局收敛性;第二种方法引入了免疫记忆和抗体多样性等免疫特性;第三种方法在传统的 GA 中引入疫苗接种的概念,能充分利用问题的先验知识,改善算法的性能,在优化问题中获得了良好的效果;第四种方法则将随机搜索过程中的局部搜索和全局搜索采用不同的促进和抑制策略,有效保证了算法的收敛速度.

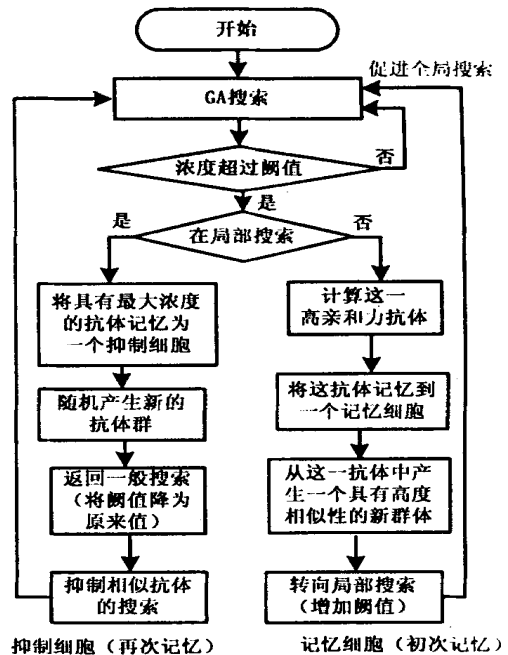


图3 基于免疫抗体记忆的免疫优化算法

Fig. 3 The flow chart of optimization algorithm based immune antibody memory

从以上的各种方法看出,不管是引入免疫自我调节原理,还是参考免疫响应过程或是利用疫苗接种原理,都是从改善现有遗传算法存在的问题为出发点,可以认为遗传算法与免疫优化算法是融合发展的,遗传算法为免疫信息处理机制提供了一个应用平台,而免疫概念也为遗传算法的进一步发展开辟了一个新天地.

4 免疫优化算法前景展望(The future of immune-based optimization algorithm)

从以上提出的几种免疫优化算法及其应用可以看出,免疫与遗传算法的结合已有了初步的成果,然而免疫系统的分布性,多时间尺度进化等特性在优化算法方面的应用仍需作进一步的探索研究.

4.1 免疫系统与病原体之间相互竞争共同进化

免疫系统经过几百万年逐渐进化,使之能很好地与病原体进行作战.免疫系统和病原体之间存在着相互竞争,共同进化的关系.

免疫系统的这一特性可用于动态优化算法的求解过程,随着环境的变化,得到的优化解也应是动态进化的,而传统遗传算法一般是静态寻优,往往无法在线动态寻优,免疫系统的动态特性以及与变化环境的不断适应过程,为动态优化提供了一种新的思路,这方面有待作进一步的研究.

4.2 多时间尺度进化

免疫系统实际上是一个在动态变化环境中通过自学习而不断完善的多时间尺度进化系统。

作为多时间尺度进化的初步研究, 文[28]探讨了免疫系统的双时间尺度进化问题. 将免疫系统的双时间尺度进化分为 DNA 分子生物进化的慢速学习模式和用于免疫系统进化的快速学习模式两种. 免疫系统的鲁棒性是在慢速学习阶段, 保证在外来攻击的大范围内获得满意的性能, 免疫系统的自适应性是在快速学习阶段实现的. 该方法成功应用在一个不确定模型 UH-1 经度直升机悬停模型上.

免疫多时间尺度的进化概念也是对遗传算法单尺度进化的扩展和补充.

4.3 优化算法的搜索方式

免疫系统对于特殊的入侵抗原, 在选择最适宜的抗体时, 也经历了一种搜索“最优抗体”的过程. 免疫系统的搜索方式是将随机性和基于反馈的高度定向行为结合起来^[29]. 免疫系统在任何时候, 都有许多不同受体的 B 淋巴细胞, 可以捕获潜在的抗原; 它们的不同受体类型是通过 B 细胞父辈的遗传物质随机组合形成的. 当一个抗原激活了一个特定 B 细胞并使其增殖, 这是基于反馈的高度定向行为, 使生成的抗体越来越针对于这一特定抗原. 与此同时, 免疫系统内部仍存在大量的不同种类的克隆抗体, 随时准备识别新的抗原.

将随机性与定向性相结合来进行搜索, 有可能在深度优先搜索和光度优先搜索中取得平衡, 这对于优化算法的搜索方式也是一种启发, 有待进一步的探索.

4.4 免疫抗体生命周期概念的引入

免疫系统中抗体群中, 克隆抗体具有一定的寿命, 可能是几天、几个星期或几个月, 而记忆细胞可以存在几十年, 将这种免疫抗体生命周期引入优化算法. 可以用于动态环境中的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的寿命较短. 这样种群个体具有不同的生命周期, 可以获得动态优化的效果.

5 结论(Conclusion)

自然免疫系统是一种具有高度分布性的自适应学习系统, 它具有完善的机制来抵御外来病原体的入侵. 由于自然免疫系统具有强大的信息处理能力, 一直是一个很有研究价值的课题. 免疫优化算法是

借鉴生物免疫系统的进化机制, 结合传统遗传算法的框架结构, 为随机搜索提供了新的方法. 也为传统遗传算法的性能改进提供了新的可能.

生物免疫系统有待人们进一步的研究, 生物免疫信息处理机制的应用研究也尚处起步阶段. 但免疫概念的引入为人们的研究打开了新的窗口, 可以肯定随着免疫系统机理进一步揭示, 免疫优化方法会更深入的进行下去, 免疫优化算法将为随机优化方法开辟一个新的发展空间.

参 考 文 献 (References)

- 1 Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications. Berlin: Springer-Verlag. 1999
- 2 林飞卿, 余传霖, 何球藻. 医学基础免疫学. 上海: 上海医科大学出版社, 1992
- 3 De Castro, Von Zuben. Artificial Immune Systems: Part I - Basic Theory and Applications. ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/tr_dca/trdca0199.pdf, 1999
- 4 De Castro, Von Zuben. Artificial Immune Systems: Part II - A Survey of Applications. ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/tr_dca/trdca0200.pdf, 2000
- 5 Watanabe Y, Ishiguro A, Uchikawa Y. Decentralized Behavior Arbitration Mechanism for Autonomous Mobile Robots Using Immune Network. In: Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications. Berlin: Springer-Verlag. 1999, 187~209
- 6 刘克胜, 张军, 曹先彬等. 一种基于免疫原理的自律机器人行为控制算法. 计算机工程与应用. 2000, 36(5): 30~32
- 7 Forrest S, Perelson A, Cherukuri R. Self-Nonself Discrimination in a Computer. In: Proceedings of 1994 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. Los Alamitos CA USA: IEEE Computer Society, 1994, 202~212
- 8 Okamoto T, Ishida Y. A Distributed Approach to Computer Virus Detection and Neutralization by Autonomous and Heterogeneous Agents. In Proc of the ISADS'99. 328~331
- 9 丁永生, 任立红. 一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统. 控制与决策, 2000, 15: 443~446
- 10 KrishnaKumar K, Neidhoefer J. Immunized Neurocontrol. Expert Systems with Applications. 1997, 13(3): 201~214
- 11 Kawafuku M, Sasaki M, Takahashi. Adaptive Learning Method of Neural Network Controller using an Immune Feedback Law. In 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway NJ USA: IEEE, 1999, 641~646
- 12 Forrest S, Javornik B, Smith R E. Using Genetic Algorithms to Explore Pattern Recognition in the Immune System. Evolutionary Computation, 1993, 1(3): 191~211
- 13 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法. 电子学报. 2000, 28(7): 74~78
- 14 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫规划. 计算机学报. 2000, 23(8):

- 806~ 812
- 15 张 军, 刘克胜, 王煦法. 一种基于免疫调节算法的 BP 网络设计. 安徽大学学报(自然科学版). 1999, **23**(1): 63~ 66
- 16 曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法和共生进化的神经网络优化设计方法. 计算机研究与发展. 2000, **37**(8): 924~ 930
- 17 周伟良, 何 鲲, 曹先彬等. 基于一种免疫遗传的装箱问题求解. 小型微型计算机系统. 2000, **21**(4): 361~ 363
- 18 曹先彬, 郑 振, 刘克胜等. 免疫进化策略及其在二次布局求解中的应用. 计算机工程. 2000, **26**(3): 1~ 2
- 19 Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung, Song-Yop. Hahn A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other heuristic algorithms Magnetics. 1998, **34**(5~ 1): 2972~ 2975
- 20 Kazuyuki Mori, Makoto Tsukuklyama, Toyoo Fukuda. Immune algorithm with searching diversity and its application to resource allocation problem. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Part C 1993, **113**(10): 872~ 878
- 21 Shyh-Jier Huang. Enhancement of the thermal unit commitment using immune algorithms based optimization approaches. Electrical Power and Energy System 1999, **21**: 245~ 252
- 22 Shyh-Jier Huang. An immune-based optimization method to capacitor placement in a radial distribution system Power Delivery, IEEE Transactions. 2000, **15**(2): 744~ 749
- 23 高 洁. 应用免疫算法进行电网规划研究. 系统工程理论与实践. 2001, 05: 119~ 123
- 24 王煦法, 张显俊, 曹先彬等. 一种基于免疫原理的遗传算法. 小型微型计算机系统. 1999, **20**(2): 117~ 120
- 25 刘克胜, 曹先彬, 郑浩然等. 基于免疫算法的 TSP 问题求解. 计算机工程. 2000, **26**(1): 1~ 2
- 26 Endoh S, Tom a N, Yamada K. Immune algorithm for n-TSP. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 1998, 4: 3844~ 3849
- 27 张丽萍, 柴跃廷. 遗传算法的现状与发展动向. 信息与控制. 2001, **30**(6): 531~ 536
- 28 KrishnaKumar K, Neidhoefer J. Immunized Neurocontrol. Expert Systems with Applications. 1997, **13**(3): 201~ 214
- 29 Irun Cohen, Lee Sege. Design Principles for the Immune Systems and Other Distributed Autonomous Systems. oxford: oxford university press. 2001, 335~ 361

作者简介

谈英姿(1969-), 女, 博士研究生. 研究领域为免疫优化, 免疫控制及其在热工过程控制中的应用研究.

沈 炯(1957-), 男, 博士生导师. 研究领域为优化控制, 电厂热工过程自动化的理论与应用.

吕震中(1940-), 男, 博士生导师. 研究领域为电厂过程控制, 集散控制, 现场总线等.

2003 中国控制与决策学术年会(15thCDC) 征文通知

会议主题: 控制与决策系统的理论与应用

征文范围: 1. 自动控制理论及其应用; 2. 系统理论与系统工程; 3. 决策理论与决策方法; 4. 自动化技术及其应用; 5. 人工智能与智能控制; 6. 自动控制与决策领域的其它重要课题.

时间地点: 2003 年 5 月 秦皇岛

来稿要求: 1. 具有较高学术水平, 内容充实具体; 2. 未在国内公开发行的刊物和全国性学术会议上发表或宣读; 3. 全文不超过 5000 字(含图表所占字数, 插图限 2~ 3 幅); 4. 写作格式参见本会论文集; 5. 写清第一作者详细通讯地址、邮编、电话、电子信箱; 6. 来稿一式二份, 用 Word 或方正排版, A4 纸打印并附软盘.

论文出版: 入选论文在《控制与决策》增刊上发表.

论文评优: 应广大作者和读者的要求, 本届年会将评选优秀论文.

截稿日期: 2002 年 11 月 20 日

录用通知: 2002 年 12 月 10 日以前

联系地址: 110004 沈阳东北大学 125 信箱

联系人: 李淑华

电 话: (024)23906437, 83687766