

文章编号: 1001-0920(2005)10-1185-04

一种新的免疫遗传算法及其应用

段玉波, 任伟建, 霍凤财, 董宏丽

(大庆石油学院 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为了克服基本遗传算法存在的缺点和不足, 将免疫系统中抗体多样性的维持机制引入遗传算法, 同时兼顾个体多样性和提高种群中个体适应度的水平, 提出了基于相似性矢量距为选择概率的免疫遗传算法, 并给出了此类概率选择的一般表示形式。为了防止基于相似性矢量距为选择概率的免疫遗传算法在优化过程中出现退化现象, 通过在算法中引入免疫疫苗的方式, 对该算法进一步加以改进。从每一代保优抗体中提取有效信息, 进而得到一种新的疫苗提取方法。基于所提出的改进免疫遗传算法, 提出了改进的编码方案。对20个城市的TSP问题进行研究, 通过不同参数的比较, 得出了算法中相关参数的取值范围。比较了6种算法的收敛速度, 进一步证实了所提出算法具有良好的收敛性。

关键词: 免疫遗传算法; 相似性; 矢量距; 免疫疫苗; TSP

中图分类号: TP301; TP18

文献标识码: A

A Kind of New Immune Genetic Algorithm and Its Application

DUAN Yu-bo, REN Wei-jian, HUO Feng-cai, DONG Hong-li

(Faculty Electrical and Information Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, Correspondent: REN Wei-jian, E-mail: renwj@126.com)

Abstract: To overcome the shortage of the basic genetic algorithm, the mechanism of antibodies' diversity in the immune system is introduced into the genetic algorithm. In the case of keeping individual diversity and improving the level of adaptability of the individual diversity in the population, the immune genetic algorithm based on selection probability of similarity and vector distance is proposed. Meanwhile the general expressing form of the kind of selection probability is given. Secondly, the immune vaccine is introduced into immune genetic algorithm on selection probability of similarity and vector distance to prevent the algorithm degenerative during the process of optimization. The immune genetic algorithm is applied to the 20-city traveling salesman problem, and advanced coding strategy is proposed. Comparing the algorithm with other six algorithms, the results show that the convergent speed of the algorithm is faster than others.

Key words: Immune genetic algorithm; Similarity; Vector distance; Immune vaccine; TSP

1 引言

目前, 基本遗传算法(SGA)的应用无论是解决实际问题还是建模, 其应用范围不断扩展, 这主要依赖于遗传算法本身的逐渐成熟。近年来, 许多遗传算法的研究与Holland最初提出的算法已大不相同, 比如不同的遗传基因表达方式, 不同的交叉和变异算子、特殊算子的引用, 以及不同的再生和选择策

略。但这些改进方法产生的灵感大都来自大自然的生物进化, 可归结为一个“算法簇”。人工免疫系统中的免疫算法就是受生物免疫系统的启示而设计出来的一种启发式算法, 已应用于机器学习^[1]、异常和故障诊断^[2]、模式识别^[3]、机器人控制^[4]、网络入侵检测^[5]、工业生产^[6]等领域。但是, 目前发展的基于免疫学原理的算法都是在解决具体问题中提出的, 还

收稿日期: 2004-10-13; 修回日期: 2005-02-08

基金项目: 黑龙江省骨干教师基金项目(1053G002)。

作者简介: 段玉波(1951—), 男, 黑龙江木兰人, 教授, 博士生导师, 从事电力系统的辨识、预报和控制等研究;
任伟建(1963—), 女, 黑龙江泰来人, 教授, 博士生, 从事复杂系统的优化与控制的研究。

没有象遗传算法那样应用广泛的一般形式和模式。免疫遗传算法就是将遗传算法与免疫算法的优点结合起来的一个多学科相互交叉和渗透的新型算法。

本文将免疫算法引入到遗传算法中,提出了相似性矢量距的选择概率,采用在保优抗体中提取疫苗的新方法,克服了基本遗传算法早熟收敛和收敛性能差等缺点。

2 改进的免疫遗传算法

遗传算法是一种具有“生成+检测”的迭代过程的搜索算法,而免疫遗传算法(IGA)则具有借鉴生物免疫系统的自适应识别和排除侵入机体的抗原性异物的功能,将生物免疫系统的学习、记忆、多样性和识别的特点引入遗传算法。在解决实际问题时,目标函数和约束条件作为抗原输入,随后产生初始抗体群,并通过一系列遗传操作及抗体亲和度的计算,在保持抗体多样性的情况下,找出针对该抗原的抗体,即问题的解。本文对免疫遗传算法进行了两点改进:一是采用基于相似性矢量距的选择概率;二是在保优抗体中提取免疫疫苗,从而改善了算法的收敛性,提高了抗体的多样性。算法的流程如图1所示。

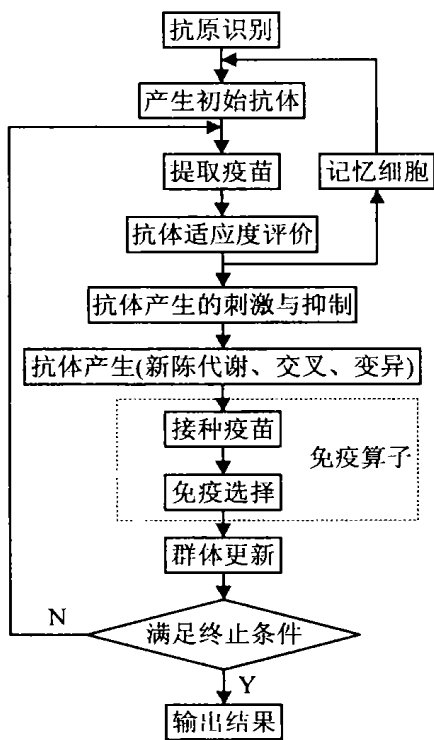


图1 免疫遗传算法流程图

2.1 基于相似性矢量距的选择概率

在常见的算法中,通常选取与种群中个体适应度成正比的方式作为选择概率,即某个个体的适应度越高,被选择的概率越大。因此,很容易使得种群中相似适应度的个体迅速增加,从而导致算法未成熟收敛。为克服算法的这一缺点,本文将各个抗体之

间在编码上的相似性考虑进来,提出基于相似性矢量距的选择概率。

抗体相似性通过抗体编码的欧几里德距离(Euclidean Distance)求取。抗体 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 与 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 之间的 Euclidean 距离为

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (1)$$

d 值越大,表示二者的相似程度越低;如果 $d = 0$,则表示两个抗体完全相同。于是,抗体 i 的浓度定义为

$$C_i = \frac{\text{与抗体 } i \text{ 相似度小于 } \lambda \text{ 的抗体数}}{N} \quad (2)$$

其中 λ 为某一个确定的阈值。这样,基于相似性的矢量距定义方式的选择概率为

$$P_s(x_i) = \alpha \frac{\rho(x_i)}{\sum_{j=1}^N \rho(x_j)} + (1 - \alpha) \frac{1}{N} e^{-\frac{C_i}{\beta}} \quad (3)$$

其中: α 和 β 为常数调节因子, $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$; x_i 为优化解; $f(x_i)$ 为适应度函数; $\rho(x_i) = \sum_{j=1}^N |f(x_i) - f(x_j)|$ 为抗体的矢量距^[7]。由式(3)可以看到,该选择概率既与抗体的适应度有关,又与该抗体的相似度有关。这样选择的抗体群体,在一定程度上可以克服抗体陷入局部最优解的问题,保持了抗体的多样性。

常数调节因子 α 可以改变选择概率每部分的权值。如果采用两个极端的选择方式: $\alpha = 1$, 则式(3)是基于矢量距为选择概率的免疫遗传算法; $\alpha = 0$, 式(3)则成为基于抗体相似性为选择概率且具有保持最优个体功能的基本遗传算法。采用不同的相似性定义方式对应的常数调节因子 β 可能不同。所以,常数调节因子也是一个逐渐训练的过程。式(3)这种基于相似性矢量距的选择概率也是此类选择概率的一般表示方式。由式(3)知,在抗体浓度一定的条件下,抗体矢量距越大选择概率越大;在抗体矢量距一定的条件下,抗体浓度越大选择概率越小。这样,在保留高适应度抗体的同时也确保了个体的多样性。因此能有效地防止某些个体控制选择过程,有助于抑制群体中所有的个体都陷于同一极值而停止进化的未成熟收敛现象,增强局部搜索能力。

2.2 基于保优策略的免疫算子

免疫遗传算法在进行每一次迭代过程中,都要进行选择、交叉和变异等遗传操作,以及保持最优解等策略,使进入下一代种群个体的平均适应度比上一代高。而下一代还要重复上一代的这些提高种群适应度的操作,从而必然使某些个体存在“退化”现象。因此,可以在基于相似性矢量距的免疫遗传算法的基础上引入一个新的算子,即免疫算子(Immune

Operator), 流程如图 1 所示 免疫算子^[7]是由提取疫苗、接种疫苗和免疫选择 3 个步骤完成的 为了提高算法的通用性以及应用上的便利性, 本文在种群进化过程中, 从其最佳个体的基因中提取有效信息, 进而开辟一条制作免疫疫苗的途径

疫苗提取算法的思路是: 通过对前 $k-1$ 代保留下来的最优个体群和当前代的最优个体群进行分析, 抽取该最优个体的 x_1 和 x_2 基因位的特点和有效信息作为疫苗 H . 免疫算子的核心在于如何抽取疫苗和利用疫苗 疫苗的抽取及其接种方法如图 2 和图 3 所示 免疫选择是对已接种了疫苗的个体进行检测 若其适应度不如父代, 说明在交叉、变异、接种过程中出现了严重的退化, 这时该个体将被父代中所对应的个体替代 如果子代适应度优于父代, 则子代将代替父代进入下一代种群 免疫选择采用文献[7]的退火选择 免疫选择对加强接种算子, 消除其负面影响有积极作用, 具有较强的鲁棒性

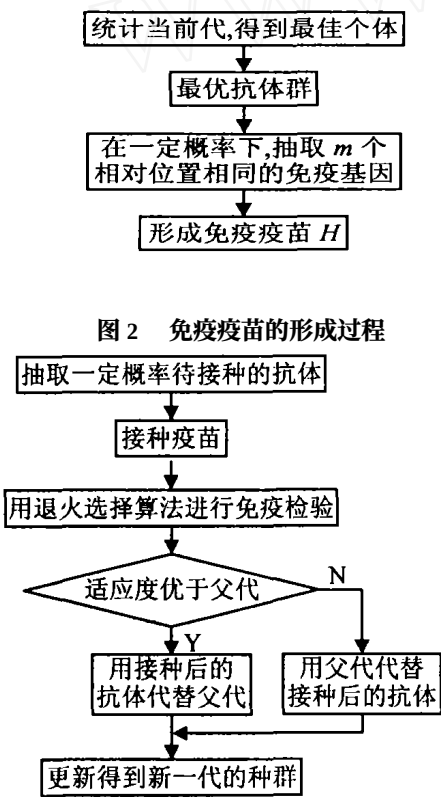


图 3 免疫算子的作用过程

3 TSP 问题的求解

3.1 抗体的编码

编码对于算法的性能和种群多样性等影响很大, 就二进制编码和浮点数编码而言, 一般二进制编码比浮点数编码搜索能力强, 但浮点数编码比二进制编码在变异操作上能保持更好的种群多样性^[8]. 同时, 还应考虑到具体问题的编码方式对求解该问题是否有效 因此, 本文在求解 TSP 问题时采用浮

点数编码

为了缩小抗体空间, 提高搜索效率, 本文提出 TSP 问题较直观的抗体编码方式, 即将每个抗体的第 1 个基因位(字符串的第 1 个字符) 固定为出发的城市编号 1 这样每个抗体只有 $(n-1)$ 个基因位可任意排列, 抗体空间只包含 $(n-1)!$ 个抗体, 同样解空间只包含 $(n-2)!/2$ 个可行解 这种编码方式更符合旅行商问题的实际情况, 只是从固定的第 1 个城市出发, 最终又返回到第 1 个城市 该种编码方式最主要的优点是降低了问题的时间复杂度

3.2 算法的比较

本文对 $n=20$ 的 TSP 问题进行研究 20 个点的坐标见文献[9], 最终得到的最优抗体为 1 3 12 2 9 17 6 20 13 5 16 18 7 19 15 10 8 4 11 14, 如图 4 所示 求得该 TSP 问题的最短距离为 24 522.2 图 5 所示是基本遗传算法(选择概率 $P_r=0.7$, $P_c=0.6$, $P_m=0.4$), 基本免疫遗传算法($P_r=0.03$, $P_c=0.6$, $P_m=0.4$), 基于矢量距的免疫遗传算法($\alpha=1$, $P_r=0.03$, $P_c=0.6$, $P_m=0.4$), 基于抗体多样性的基本遗传算法($\alpha=0$, $\beta=0.8$, $\lambda=25$, $P_r=0.03$, $P_c=0.6$, $P_m=0.4$), 基于相似矢量矩的免疫遗传算法($\alpha=0.6$, $\beta=0.4$, $\lambda=25$, $P_r=0.03$, $P_c=0.6$, $P_m=0.4$) 以及本文提出的免疫遗传算法($\alpha=0.6$, $\beta=0.4$, $\lambda=25$, $P_r=0.03$, $P_c=0.6$, $P_m=$

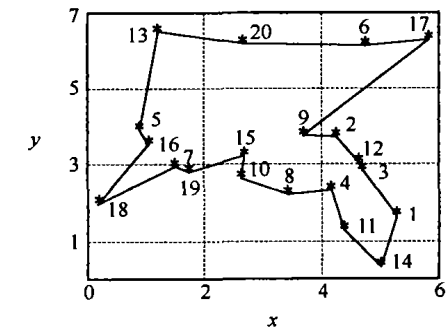


图 4 20 个城市 TSP 问题的最优抗体路线

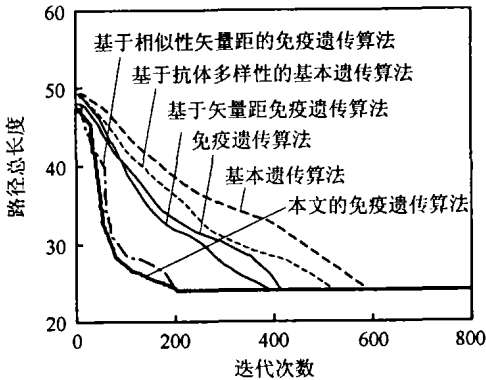


图 5 6 种算法运行代数的比较

0 4) 共 6 种算法(每种算法都在 10 次实验中收敛的最好结果) 在运行代数上的比较 从图中可以看到, 尽管最终都得到了最优解, 但不同的算法在收敛速度上却相差很大, 本文提出的免疫遗传算法收敛速度最快, 其次是基于相似性矢量距的免疫遗传算法, 而收敛速度最慢的是基本遗传算法

4 结 语

本文提出了一种新的免疫遗传算法, 该算法具有如下特点:

1) 具有产生多样性个体的能力 利用相似性确定抗体的浓度, 通过抗体的相似性矢量距确定其适应度, 并将其作为最终抗体的选择机制, 将某些具有较高适应度且浓度相对较低的抗体进入到下一代, 维持进化过程中个体的多样性, 从而提高免疫遗传算法全局搜索能力, 避免陷入局部最优解

2) 具有相似性矢量距选择概率的一般性 采用该种抗体的选择机制, 通过改变某些参数可以使整个算法在相似性与浓度之间均衡调节, 使整个算法既具有免疫算法的优点又包含遗传算法的长处

3) 具有最优个体记忆功能 利用这种抗原记忆识别功能, 可加快搜索速度、提高算法的总体搜索能力;

4) 具有快速全局收敛性能 利用免疫疫苗可以提高算法收敛速度的优点, 通过在种群进化过程中, 从其最佳个体的基因中提取有效信息, 进而开辟一条制作免疫疫苗的新途径, 使构造出的算法具有快速全局收敛的良好性能, 从而克服基本遗传算法易陷入局部最优解的缺点

参考文献(References)

- [1] Castro L N de, Fernando J, Zuben V. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 239-251.
- [2] Gonzalez F, Dasgupta D. Anomaly Detection Using Real-valued Negative Selection [J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2003, 4(4): 383-403.
- [3] Karanikas C, Proios G. A Nonlinear Discrete Transform for Pattern Recognition of Discrete Chaotic System [J]. *Chaos, Soliton and Fractals*, 2003, 5(17): 195-201.
- [4] Hong J, Lin W, Lee S. An Efficient Production Algorithm for Multihead Surface Mounting Machines Using Biological Immune Algorithm [J]. *International J of Fuzzy Systems*, 2000, 2(1): 45-53.
- [5] 赵俊忠, 黄厚宽, 田盛丰. 免疫机制在计算机网络入侵检测中的应用研究[J]. *计算机研究与发展*, 2003, 40(9): 1293-1298.
(Zhao J Z, Huang H K, Tian S F. Immune Principle and its Application in Intrusion Detection [J]. *J of Computer Research and Development*, 2003, 40(9): 1293-1298.)
- [6] Sung-Ling Chen, Ming-Tong Tsay, Hong-Jey Gow. Scheduling of Cogeneration Plants Considering Electricity Wheeling Using Enhanced Immune Algorithm [J]. *Electrical Power and Energy System*, 2005, 27(1): 31-38.
- [7] 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.)
- [8] 郑日荣, 毛宗源, 罗欣贤. 基于欧氏距离和精英交叉的免疫算法研究[J]. *控制与决策*, 2005, 20(2): 161-164.
(Zheng R R, Mao Z Y, Luo X X. Artificial Immune Algorithm Based on Euclidean Distance and King-Crossover[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(2): 161-164.)
- [9] 王小平, 曹立明. *遗传算法 — 理论、应用与软件实现* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 93-99.
(Wang X P, Cao L M. *Genetic Algorithm — Theory, Application and Software Implementation* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 93-99.)

(上接第 1184 页)

- [5] 李凡长. 动态模糊 Petri 网模型及其应用研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2002, 23(7): 853-858.
(Li F Z. Research on a Dynamic Fuzzy Petri Net Model and its Applications[J]. *Mini-Micro Systems*, 2002, 23(7): 853-858.)
- [6] Gao M M, Zhou M C. Fuzzy Reasoning Petri Nets for Demanufacturing Process Decision [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics*, 2001, 31(1): 167-172.
- [7] Gao M M, Zhou M C. Fuzzy Reasoning Petri Nets [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics*, 2003, 33(5): 314-323.
- [8] Fernandez Roberto, Zerhouni Noureddine. Modeling and Analysis of Disassembly Systems Using Continuous Petri Nets [A]. *Proc of the 4th IEEE Int Symposium on Assembly and Task Planning Soft Research Park* [C]. Fukuoka, 2001: 232-237.