

免疫算法

梁鸿生, 郝勇娜, 王凯, 柴继河
(西安理工大学 自动化学院, 山西 西安 710048)

摘要: 首先对免疫算法作了介绍, 并与其它非确定性算法进行了比较, 随后介绍了现有的几种免疫算法及其实现步骤、应用情况。

关键词: 免疫系统; 免疫算法; 多峰值函数; 免疫算子

中图分类号: TP271⁺.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)05-0072-05

Immune Algorithms

LIANG Hong-sheng, HAO Yong-na, WANG Kai, CHAI Ji-he
(College of A. I. E. of Xi'an university of technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: An introduction of immune algorithms is offered, and the comparison of the characteristics of the immune algorithm with those of other uncertain algorithms is made. Some immune algorithms, their operations and applications are also presented.

Key words: immune system; immune algorithms; multi-modal function; immune operator

0 引言

迄今为止, 已经提出了许多非确定性优化方法(即随机优化方法)并已应用于不同的优化问题. 与确定性算法相比, 非确定性算法的优点在于它有更多的机会求得全局最优解. 大多数非确定性算法都体现了自然界生物的生理机制, 并且在求解某些特定问题方面优于确定性算法. 特别是最近发展起来的免疫算法有着不同于其它算法的优良特性^[1].

免疫系统是抵抗细菌、病毒和其它致病因子入侵的基本防御系统. 免疫系统通过一套复杂的机制来重组基因, 以产生抗体对付入侵的抗原, 达到消灭抗原的目的.

为了有效的提供防御功能, 免疫系统必须进行模式识别, 把自己的分子和细胞与抗原区分开来. 除了具有识别能力之外, 免疫系统与其它低级生物防御系统的区别在于它能够学习, 并且有记忆能力. 正是因为拥有上述特点, 免疫系统对同一抗原的防御反应, 第二次比第一次来得更快、更强烈.

免疫算法模仿了人体的免疫系统. 具体地说, 免疫算法从体细胞理论和网络理论得到启发, 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.

免疫算法与其它非确定性算法(如遗传算法、进化策略等)相比有如下区别:

- 1) 它在记忆单元基础之上进行, 确保了快速收敛于全局最优解.
- 2) 它有计算亲和性的程序. 亲和性有两种形式: 一种形式说明了抗体和抗原的关系, 即解和目标的匹配程度; 另一种形式说明了抗体之间的关系. 这个独有的特性保证了免疫算法具有多样性.
- 3) 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.

1 算法简介

免疫系统的识别多样性为我们带来许多的启示, 此特性的数学抽象可以描述为对多峰值函数的寻优问题. 同时, 许多工程问题可以抽象为对一些目标函数的优化, 其中大多数优化问题的目标函数就是多峰

收稿日期: 2003-04-30.

第一作者简介: 梁鸿生(1945~), 男, 教授; 主要研究方向: 智能检测.

值函数. 用已有的标准优化方法来求解这些多峰值函数优化问题并不容易, 在了解了识别多样性的机制之后, 自然人们会想到将免疫系统的这一特性应用于类似问题中. 于是人们便设计出了各种免疫算法.

1.1 基于信息熵的免疫算法^[2]

1.1.1 Toyoo Fukuda 等提出了一种基于信息熵概念的免疫算法

该算法流程如图 1 所示. 算法实现的基本步骤:

- 1) 抗原识别. 输入目标函数和各种约束作为免疫算法的抗原.
- 2) 产生初始抗体. 在第一次迭代时, 抗体通常是在解空间中用随机的方法产生的.
- 3) 计算亲和性. 分别计算抗原和抗体 V 之间的亲和性 ax_v 及抗体 V 和抗体 W 之间的亲和性 $ay_{v,w}$.

信息熵: 算法中为了表明全体中抗体的多样性, 引入信息熵的概念. 如图 2 所示 N 个长度为 M 的位串: 每位可供选择的字母表中共有 S 个字母: k_1, k_2, \dots, k_s . 则这 N 个抗体的信息熵为:

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (1)$$

其中: $H_j(N) = - \sum_{i=1}^S p_{ij} \log p_{ij}$, $H_j(N)$ 为 N 个抗体第 j 位的信息熵, p_{ij} 为 N 个抗体中的第 j 位字母为 k_i 的概率.

抗体之间的亲和性: 用于表明两抗体之间的相似度. 其定义如下:

$$ay_{v,w} = 1/[1+ H(2)] \quad (2)$$

$H(2)$ 是抗体 V 和抗体 W 的信息熵. $H(2) = 0$ 时说明抗体 V 和抗体 W 的所有基因都是相同的. $ay_{v,w}$ 的值介于 0 和 1 之间.

抗原和抗体 V 之间的亲和性: 用于表明抗体对抗原的识别程度. ax_v 定义如下:

$$ax_v = 1/[1+ opt_v] \quad (3)$$

这里, opt_v 表示抗原和抗体之间的匹配程度. ax_v 的值也介于 0 和 1 之间.

4) 记忆单元更新: 将与抗原的亲和性高的抗体加入到记忆单元中. 由于记忆单元数目有限, 所以在记忆单元中用新加入的抗体取代与其亲和性最高的原有抗体.

5) 基于评价解的选择: 计算抗体的期望值, 期望值低的抗体将受到抑制.

$$e_i = ax_i / ci \quad (4)$$

式中, ci 是抗体 i 的密度(即数目). 为了有利于优化过程的进行, 在这一步中, 某些与抗原有较高亲和性的抗体也必须受到抑制.

6) 产生抗体: 通过交叉和变异, 产生进入下一代的抗体.

7) 终止条件: 终止条件满足后, 优化过程结束.

1.1.2 基于信息熵的免疫算法的优点

采用信息熵作为评价群体中解的相似度的指标, 比采用海明距离等指标更能客观地反映其含义.

采用基于浓度的选择机制, 既鼓励适应值高的解, 又抑制浓度高的解, 从而保证了算法的收敛及群体的多样性, 适合多峰值函数的寻优.

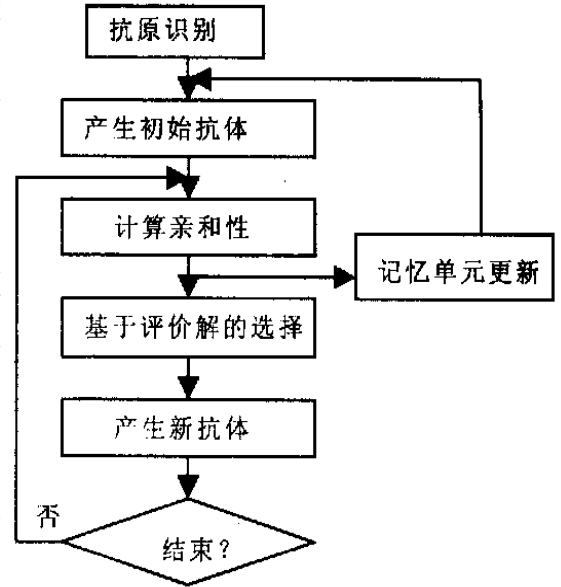


图 1 免疫算法流程图

	1	2	3	...	j	...	M
抗体 1					k_1		
抗体 i					k_2		
抗体 N					k_s		

等位基因 k_1, k_2, \dots, k_s

图 2 基因的信息熵

1.1.3 算法的收敛性及应用

文献[1]中将这种算法应用于对各种不同的 $\sin c$ 函数($N = 5, 7, 10$)进行了优化计算. 结果表明, 免疫算法和遗传算法在搜索最优解方面比进行策略更可靠, 且免疫算法比遗传算法快. 进化策略在速度上比前两者都快, 但易陷入局部最优解.

免疫反应中的“细胞超变异”现象也是导致识别多样性的重要因素. 细胞超变异现象可以应付入侵抗原的变种, 从而进一步提高免疫反应的识别多样性能力. 文[5]中依据免疫应答的超变异特性, 改进了算法中的遗传操作, 删去了交叉算子. 并用改进的免疫算法对5种典型的多峰值函数的全局优化问题作了仿真试验, 并与遗传算法和遗传规划的实验结果作了比较, 表明改进的免疫算法在对具有复杂形状的多峰值函数寻优时, 比其它算法效果要好, 而对于形状比较平滑的多峰值函数寻优时, 遗传规划的效果更好些.

1.2 免疫规划(Immune Programming, IP)^[3]

1.2.1 免疫规划算法通过引入“免疫算子”

接种疫苗和免疫选择, 在算法中模拟了人体免疫系统所特有的自适应性和人工免疫这一加强人体免疫系统的手段, 使构造出的算法具有快速全局收敛的良好性能. 疫苗的选取、免疫算子的操作方法以及整个免疫规划算法的步骤, 提出了免疫系统在工程中应用的新思路.

免疫规划流程如图3所示: 免疫规划算法实现的基本步骤:

- 1) 抗原识别. 输入目标函数和各种约束条件作为免疫算法的抗原.
- 2) 初始抗体产生. 在第一次迭代时, 抗体通常在解空间中用随机的方法产生.
- 3) 抽取疫苗. 通过对待求的问题进行具体分析, 从中提取出最基本的信息作为疫苗.
- 4) 条件判断. 若当前群体中包含最佳个体, 则算法停止运行并输出结果; 否则继续.
- 5) 交叉和变异. 对目前的父本种群进行交叉和变异操作.
- 6) 接种疫苗. 设个体 x , 给其接种疫苗是指按照先验知识来修改 x 的某些基因位上的基因, 使所得个体以较大的概率具有较高的适应度. 首先考虑以下两种特殊情况: 其一, 若个体 y 的每一基因位上的信息都是错误的, 即每一位码都与最佳个体不同, 则对任一个体 x , x 转移为 y 的概率为 0; 其二, 若个体 x 的每个基因位都是正确的, 即 x 已经是最佳个体, 则 x 以概率 1 转移为 x . 除此之外, 设有群体 $c = (x_1, x_2, \dots, x_{n_0})$, 对 c 接种疫苗是指在 c 中按比例 a 随机抽取 $n_a = an$ ($0 < a \leq 1$) 个个体而进行的操作.
- 7) 免疫选择. 这一操作分两步完成. 第一步是免疫检测, 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. 这时该个体将被父代中所对应的个体所取代; 如果子代适应度优于父代, 则进行第二步处理——退火选择^[4], 即在目前的子代群体 $E_k = (x_1, x_2, \dots, x_{n_0})$ 中以概率:

$$P(x_i) = e^{f(x_i)/T_k} / \sum_{i=1}^{n_0} e^{f(x_i)/T_k} \tag{5}$$

选择个体 x_i 进入新的父代群体, 其中 $f(x_i)$ 为个体 x_i 的适应度, $\{T_i\}$ 是趋近于 0 的温度控制序列.

- 8) 群体更新: 对群体经免疫选择后, 便可得到新一代父本.

1.2.2 免疫规划算法的优点

采用接种疫苗的方式, 加入了对问题的先验知识, 可有效地加快算法收敛速度和提高解的质量.

采用基于退火选择的免疫选择方式, 可防止“早熟”现象, 又可保证寻优过程朝着全局最优的方向进行.

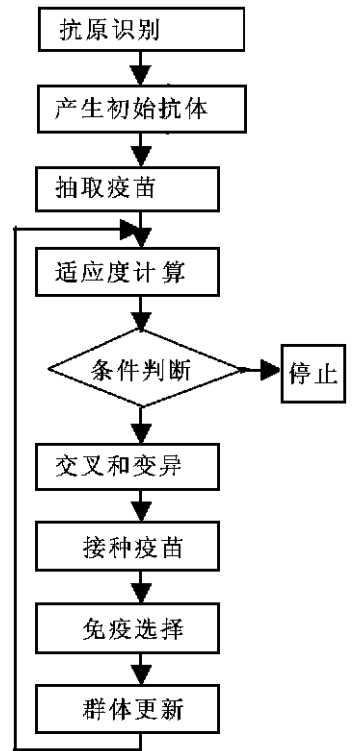


图3 免疫规划流程图

1.2.3 算法的收敛性及应用

文献[3]中详细地描述了免疫算子——接种疫苗和免疫选择的具体实现方法,同时理论证明了算法的全局收敛性.理论分析和用于TSP问题的实验结果表明,与通用遗传算法相比,免疫算法不仅是有效的,也是可行的,并较好的解决了已有算法中出现的退化现象,且使收敛速度有显著提高.文[6]在讨论TSP问题的同时,还用算法对一个典型的多峰值函数进行了优化,结果显示:疫苗的选择对算法的性能有较大的影响,但不会影响算法的收敛性,同时,验证了算法具有较好的搜索能力和自适应能力.

1.3 免疫遗传算法(Immune Genetic Algorithm, IGA)^[2]

1.3.1 免疫遗传算法机制

免疫遗传算法是将免疫系统中抗体的多样性的维持机制引入遗传算法中,使IGA的性能比标准GA更进了一步.免疫遗传算法的流程如图4所示:

算法的基本实现步骤:

- 1) 抗原识别: 输入目标函数和各种约束条件作为免疫算法的抗原.
- 2) 初始抗体产生: 在第一次迭代时, 抗体通常在解空间中用随机的方法产生.
- 3) 条件判断: 终止条件满足后, 优化过程结束.
- 4) 交叉和变异: 算法中都采用高斯变异, 减少了完全随机变异的不确定性.

5) 群体更新: 基于浓度的群体更新地实现是:

$$P_s(i) = \alpha \times C \times \left| 1 - \frac{Fitness(i)}{\max Fitness(i)} \right| + \beta \times \frac{Fitness(i)}{\max Fitness(i)} \quad (6)$$

其中, α 、 β 为 0~1 之间的可调参数, $P_s(i)$ 代表第 i 个抗体的选择概率, $Fitness(i)$ 表示第 i 个抗体的适应度, $\max Fitness(i)$ 表示抗体的最大适应度, C 为抗体的浓度.

1.3.2 免疫遗传算法的优点

该算法中采用基于浓度的选择更新, 取代了原遗传算法的基于适应值的选择复制, 从而有效地防止了遗传算法中“早熟”的问题, 将搜索过程引向全局最优.

算法中都采用高斯变异, 减少了完全随机变异的不确定性.

1.3.3 算法的收敛性及应用

文献[7]中模拟了免疫系统的再次应答特性, 设计了记忆库, 包含问题类别特征码、问题特征参数、抗体记忆区字段的记忆库的设计, 较好的利用了免疫记忆的机理, 增强了算法使用范围的多样性, 使记忆库不仅可用于同一问题的进化过程中的代间优良解的保留, 并且可用于作为同类问题在构造初始群体时的依据, 初始群体的产生, 通过问题类型的识别, 可从记忆库中直接提取, 能有效加快算法收敛速度. 文中将这一算法分别应用于神经网络的训练及TSP问题, 证明了免疫遗传算法的快速全局收敛性, 有效地克服了一般遗传算法易陷入局部极值的缺陷.

1.4 否定选择算法(Negative Selection Algorithm, NSA)

1.4.1 否定选择算法的实现步骤

在生物免疫系统中, T 细胞表面存在能识别抗原的表面受体. 在 T 细胞产生初期, 它位于胸腺中, 其受体由于基因重组和体细胞免疫等因素而随机产生. T 细胞经过一个“否定选择”过程清除掉那些对自身成份发生免疫反应的 T 细胞, 从而使流出胸腺的成熟 T 细胞在免疫反应过程中能够对自身成份表现为免疫耐受状态, 而对外部抗原产生免疫反应并清除之. 否定选择算法采用相同的原理, 先随机产生监测器, 然后删除与自身对抗的, 并保留能检测非己的细胞. 否定选择算法流程^[4]如图5所示.

否定选择算法的实现步骤概括为以下四部分:

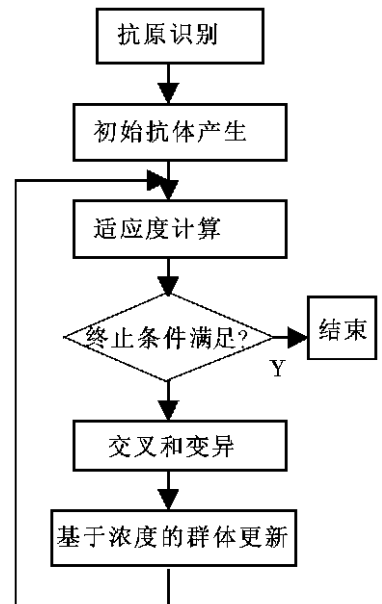


图4 免疫遗传算法流程图

1) 将所维护信息的正常模式或系统的静态行为定义为“自己”信息,并将其表示为一个有限字符集上长度为 l 的等长字符串集 S .

2) 在系统执行过程中不断对“自己”信息进行动态监视.

3) 针对被保护对象产生一组检测器集 R (R 中的每个检测器根据一定的匹配规则不会与 S 集中的“自己”信息发生匹配).

4) 系统监测: 周期性地将 R 中的检测器与 S 中的“自己”信息进行匹配, 一旦发生匹配, 则提示系统可能发生异常.

1.4.2 否定选择算法的优点

该算法中的检测算法是唯一的, 且检测是概率性的. 对一个鲁棒性(robust) 的系统能够随机地检测外来的活动而非搜索已知的模式.

1.4.3 算法的收敛性及应用

文[8]中, 对该算法进行了深入的研究. 实验表明, 否定选择算法被应用于计算机网络安全保障, 解决了许多过去在同类问题中难以解决的难题, 且成效显著.

2 小结

免疫算法是源于免疫系统的启示而构造的新型多峰值寻优算法. 本文对现有的算法形式进行了总结, 把它们归为免疫算法、免疫规划、免疫遗传算法和否定选择算法 4 类. 免疫算法和免疫遗传算法主要是利用免疫系统的多样性产生和维持机制, 来保持解群体的多样性, 从而克服一般寻优过程尤其是多峰值函数中最难应付地“早熟”问题, 最终求得问题的全局最优解; 免疫规划除利用免疫多样特性之外, 还引入了疫苗接种机制, 即利用先验知识来引导寻优过程, 进一步提高算法的快速性和有效性; 否定选择算法是源于免疫系统的抗原识别机制而设计的针对计算机安全保护问题的一种算法, 是当前解决计算机安全保护问题的一个值得推广的新思路.

参考文献:

[1] 胡朝阳, 文福栓. 免疫算法与其它模拟进化优化算法的比较研究[J]. 电力情报, 1998(1): 61~ 73.
 [2] 葛红. 免疫算法综述[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2002, 8(3): 120~ 126.
 [3] 王磊, 潘进, 焦季成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74~ 78.
 [4] 王磊. 免疫进化计算理论及应用[D]: [博士论文]. 西安: 西安理工大学自动化学院, 2001.
 [5] ChunJang- Sung, JangHyun- Kyo, HahnSong- Yop. A Study on Comparison Optimization Performances between Immune Algorithm and Other Heuristic Algorithms[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(5): 2972~ 2975.
 [6] 王磊, 潘进, 焦季成. 免疫规划[J]. 计算机学报, 2000, 23(8): 806~ 812.
 [7] 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.
 [8] Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.

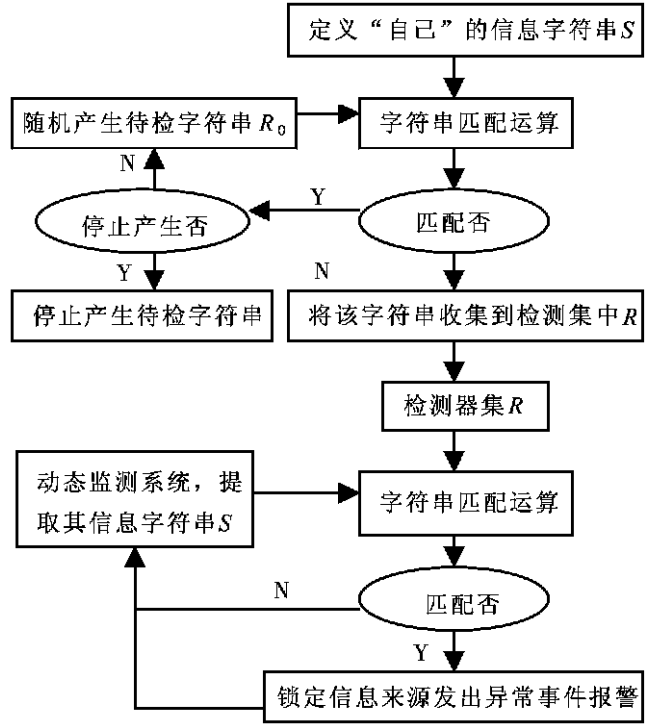


图5 否定选择算法流程图