

# 一种基于免疫原理的遗传算法\*

王煦法 张显俊 曹先彬 张 军 冯 雷

(中国科学技术大学计算机科学与技术系 合肥 230026)

**摘 要** 本文提出了一种免疫遗传算法 (Immune Genetic Algorithm, 简称 IGA). 免疫遗传算法是根据生物的免疫原理提出的一种改进遗传算法, 该算法主要体现了生物免疫机制中的抗原识别、抗原记忆和抗体的抑制、促进, 并结合货郎担 (TSP) 优化问题介绍了具体实现方法, 实验结果表明该免疫遗传算法有较好的性能.

**关键词** 遗传算法 免疫遗传算法 免疫 浓度 货郎担问题

**分类号** TP18

## 1 引言

遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 是一种模拟生物群体遗传和进化机理的启发式优化算法, GA 具有全局并行搜索的特点, 但是未成熟收敛和局部搜索能力差也是其明显的缺点. 目前, 人们正对 GA 做不断的改进和提高. 生物体的免疫系统具有很强的自适应性, 而实际问题的求解过程与生物免疫机制十分类似. 为此, 本文在抽取人体免疫机制的基础上, 提出了一种基于免疫原理的遗传算法, 并用于 TSP 问题的求解. 实验结果表明, 基于免疫原理的遗传算法可有效改善未成熟收敛缺陷, 提高遗传算法的全局和局部搜索能力.

## 2 生物免疫机制简介

综合文献 [2] 和文献 [3] 可知: 生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原, 可产生相应的抗体来抵御. 抗原和抗体结合后, 会发生一系列的反应, 通过吞噬作用或者特殊酶的作用而毁坏抗原. 生物的免疫系统 (如图 所示) 由淋巴细胞和抗体分子组成, 淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞和骨髓产生的 B 细胞组成, T 细胞分泌淋巴细胞活素, B 细胞分泌血清抗体, 淋巴细胞活素和血清抗体都可与抗原进行专一性结合产生抗体. 此外, 为维持免疫平衡, 抗体间有抑制和促进作用.

人体的免疫系统虽然十分复杂, 但是其呈现出来的抵御抗原的自适应能力却是十分明显的. 如果我们把外来侵犯的抗原和免疫系统产生的抗体分别与实际求解问题的目的函数以及问题的解相对应, 那么, 人体免疫功能的特点对于改进和提高遗传算法的能力是十分有启迪性的.

免疫系统的特征如下:

1) 产生多样抗体的能力:

通过细胞的分裂和分化作用, 免疫系统可产生大量的抗体来抵御各种抗原, 这对应于遗传算法中个体的多样性. 这种机制可用于提高遗传算法的全局搜索能力而不陷于局部解.

2) 自我调节机构:

免疫系统具有维持免疫平衡的机制, 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. 这对应于遗传算法中个体浓度的抑制和促进, 利用这一功能可以提高遗传算法的局部搜索能力.

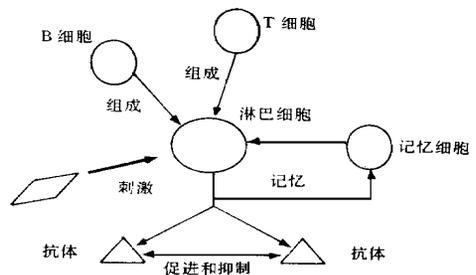


图 1 生物免疫机制的抽象模型

### 3) 免疫记忆功能:

产生抗体的部分细胞会作为记忆细胞而被保存下来,对于今后侵入的同类抗原,相应的记忆细胞会迅速激发而产生大量的抗体.如果遗传算法中能利用这种抗原记忆识别功能,则可以加快搜索速度,提高遗传算法的总体搜索能力.

## 3 免疫遗传算法

### 3.1 免疫遗传算法介绍

根据前述的分析,我们提出了一个免疫遗传算法(IGA),该算法由抗原的识别、初始抗体的产生、适应度计算、向记忆细胞的分化、抗体的促进和抑制、抗体产生(交叉、变异)六个模块组成.此外,我们称 IGA中个体为抗体.

**抗原识别模块** 抗原相当于遗传算法所要解决的问题,如不同城市数目的 TSP问题或城市数目相同,但城市间距离不同的 TSP问题,都可对应于不同的抗原.抗原识别模块主要功能是判断新抗原是不是记忆中的抗原,即新的 TSP问题是不是记忆中的 TSP问题.

**初始群体产生模块** 如果抗原识别模块判断出新抗原是记忆中的抗原,则从记忆细胞中取出相应的抗体组成免疫遗传算法的初始群体,否则,随机产生初始群体.

**适应度计算模块** 计算个体(相当于抗体)的适应度.

**记忆细胞的分化模块** 如果抗原是新抗原,则用当前群体中适应度高的个体替换掉记忆细胞中的适应度低的个体,否则,把当前群体中适应度高的个体加入记忆细胞中.

**抗体的促进和抑制模块** 计算当前群体中适应度相近的个体浓度,个体浓度即相近个体总数与群体中总个体数的比值,浓度高则减小该个体的选择概率(即抑制),反之则增加该个体的选择概率(即促进).

**抗体产生模块** 交叉和变异操作.

免疫遗传算法框图如图 2所示.

在本算法中定义了下列名词:多样性、亲和度、浓度.多样性是抗体的多样性测度.设有  $N$  个抗体,每个抗体长度为  $M$ ,采用的符号集大小为  $S$ ,则抗体基因座  $j$  的信息熵  $H_j(N)$  可定义为:

$H_j(N) = -\sum_{i=1}^S P_{ij} \log P_{ij}$ , 其中的  $P_{ij}$  为第  $i$  个符号出现在基因座  $j$  上的概率,且可定义为:

$$P_{ij} = \frac{\text{在基因座 } j \text{ 上出现第 } i \text{ 个符号的总个数}}{N}$$

由此可得平均熵  $H(N)$ :  $H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N)$

两个抗体  $u$  和  $v$  之间的亲和度定义为  $A_{u,v}$ , 则  $A_{u,v} = \frac{1}{1 + H(2)}$  (1)

$A_{u,v}$  取值范围  $0 \sim 1$ ,  $A_{u,v}$  越大,表示  $u, v$  两个抗体越亲和或类似.  $A_{u,v} = 1$  则表示  $u, v$  两者基因完全一致.

抗体的浓度  $C_i$  即群体中相似抗体所占的比重,即

$$C_i = \frac{\text{和抗体 } i \text{ 具有很大亲和度的抗体数}}{\text{抗体总数 } N} \quad (2)$$

### 3.2 算法设计

- (1) 系统对输入的抗原进行识别
- (2) 初始群体产生:从记忆细胞中产生有效的抗体群,具体讲,就是从保存抗体的数据库中,读进初始抗体.
- (3) 计算适应度、多样性、亲和度
- (4) 向记忆细胞分化(更新新数据库)

在前一步中,具有高适应度的抗体写入数据库,具体操作前面(1)式计算欲写入的抗体和数据库中所有抗体之间的亲和度.删除数据库中和欲追加抗体最亲和的抗体,代之以追加抗体.

- (5) 抗体的促进和抑制.

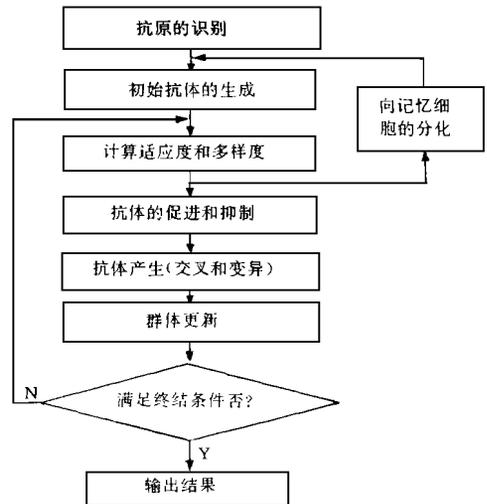


图 2 免疫遗传算法框图

用前面(2)式计算抗体浓度.找出浓度最大的个体,设为个体 $1, 2, \dots, t$ ,则定义该 $t$ 个个体的浓度概率为 $\frac{1}{N} (1 - \frac{t}{N})$ ,其中 $1 < t < N$ ,其他 $N - t$ 个个体的浓度概率为 $\frac{1}{N} (1 + \frac{t^2}{N^2 - Nt})$ .个体的选择概率由 $p$ 适应度概率 $p_f$ 和浓度概率 $p_d$ 两部分组成,即

$$p = T p_f + (1 - T) p_d, \text{其中 } 0 < T, p_f, p_d < 1$$

显然上式可实现:个体适应度越大,则选择概率越大,个体浓度越大,则选择概率越小,这样既可保留适应度高的个体,又可确保个体多样性,改善未成熟收敛.

(6) 群体更新

群体更新中的选择、交叉和变异操作与其他遗传算法相同.

### 4 TSP问题求解

TSP问题<sup>[6]</sup>是寻找一条最短的遍历 $n$ 个城市的路径,或者说搜索整数子集 $X = \{1, 2, \dots, n\}$ ( $X$ 的元素表示对 $n$ 个城市的编号)的一个排列 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ,使 $Td = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}) + d(v_1, v_n)$ 取最小值.式中的 $d(v_i, v_{i+1})$ 表示城市到城市的距离.由于它是诸多领域内出现的多种复杂问题的集中概括和简化形式,所以成为各种启发式的搜索、优化算法的间接比较标准.本文作了IGA在TSP问题中的应用实验研究.

本实验采用以遍历城市的次序排列进行编码,选择机制为适应度比例选择机制和个体浓度选择机制的加权和.交叉采用部分匹配交叉策略,变异采用随机多次对换方式,逆转操作采用单向连续多次逆转方法,群体更新采用有覆盖的代间更新方式<sup>[6]</sup>.

为了便于分析和比较,我们选择文献[1]中城市数目分别为30, 50和75的三个TSP问题进行了实验.优化后的最佳路径如图3图4和图5所示,最佳路径长度如表1所示.表1还列出了D. T. Whitley采用遗传算法方法得到的最佳结果<sup>[4]</sup>, D. B. Fogel采用进化规划方法得到的最佳结果<sup>[5]</sup>,文献[6]采用自适应优化策略得到的最佳结果.从表1的对比结果可知对于30城市的TSP问题,本算

表1 三个 TSP问题的优化结果

城市数	30	50	75
文献[4]的优化结果 (遗传算法, 1989)	423. 7406	430	553
文献[5]的优化结果 (进化规划, 1993)	423. 7406	427. 855	549. 180
文献[6]的优化结果 (自适应策略遗传算法, 1996)	423. 7406	427. 3121	542. 3093
本文的优化结果(基于免疫的遗传算法, 1997)	423. 7406	427. 3121	540. 6915

法找到了由Oliver等人(1987)确认的最佳路径<sup>[7]</sup>,对于75城市的TSP问题,本算法搜索到了新的,比表中其他三种结果更优的路径.

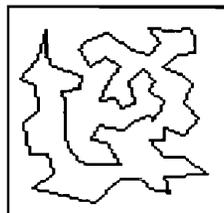
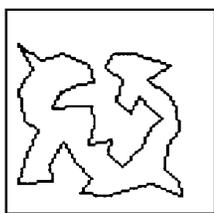
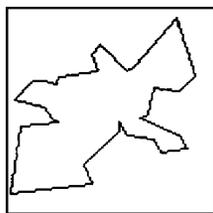


图3 30城市 TSP优化路径      图4 50城市 TSP优化路径      图5 75城市 TSP优化路径

法找到了由Oliver等人(1987)确认的最佳路径<sup>[7]</sup>,对于75城市的TSP问题,本算法搜索到了新的,比表中其他三种结果更优的路径.

### 5 结 论

本文尝试抽取生物免疫机制,提出了一种基于免疫的遗传算法,实验结果表明该算法提高了遗传算法的全局和局部搜索能力,并改善了未成熟收敛缺陷.今后我们将更深入地了解生物免疫机制,并改进本算法中的抗原识别和记忆模块,以及抗体之间的促进、抑制模块.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 陈国良,王煦法 庄镇泉,王东生. 遗传算法及其应用. 北京:人民邮电出版社. 1996, pp. 1~ 27, pp. 137~ 143, pp. 287~ 332
- [ 2 ] 王亚辉. 分子免疫学. 北京:科学出版社. 1982. pp. 1~ 10, pp. 286~ 319
- [ 3 ] R. R. Mohler , K. S. Lee, A. L. Asachenkov and G. I. Marchuk. A system approach to immunology and cancer, IEEE Trans on systems, man and cybernetics. Vol. 24 No. 4. April, pp. 632~ 641, 1994
- [ 4 ] Whitley, D. et al. Scheduling problems and traveling salesman: the genetic edge recombination operator, Proc. of 3rd Int. Conf. on genetic Algorithms, pp133~ 140, 1989
- [ 5 ] D. B. Fogel. Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems, Cybernetics and System, No. 24 pp27~ 36, 1993
- [ 6 ] 陈贤富. 遗传优化的理论和方法研究. 中国科学技术大学博士学位论文. pp. 89~ 109, 1996
- [ 7 ] Oliver, L. M. , Smith, D. J. , & Holland, J. R. C. , A study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem, Genetic Algorithm and their applications. Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, pp224~ 230, 1987

## AN IMPROVED GENETIC ALGORITHM BASED ON IMMUNE PRINCIPLE

WANG Xufa ZHANG Xianjun CAO Xianbin ZHANG Jun FENG Lei

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China Hefei 230026)

**Abstract** An improved Genetic Algorithm based on Immune principle is presented in this paper. Enlightened by the immune principle of creature, this algorithm simulates the immune system to solve problems. The main functions such as the memory and recognition of antigen and the adjustment of antibody are involved in this algorithm. Its application to TSP problem shows IGA performs well at the aspects of search ability and search speed.

**Key words** Genetic algorithm Immune genetic algorithm(IGA) Immune Densitg TSP