

# 一种求解车间作业调度问题的免疫算法

林秋镇, 胡庆彬, 陈剑勇

LIN Qiu-zhen, HU Qing-bin, CHEN Jian-yong

深圳大学 计算机与软件学院, 广东 深圳 518060

College of Computer Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

E-mail: qiuzheng658@163.com

LIN Qiu-zhen, HU Qing-bin, CHEN Jian-yong. Immune algorithm for job-shop schedule problem. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(31): 34-36.

**Abstract:** Artificial immune system is a new developing intelligent system based on the principles of the natural immune system. An immune algorithm is developed for job-shop schedule problem based on the clonal selection principle of the natural immune system. Using the strong search ability of immune algorithm can find the global optimal. By using the immune operations such as clone, hypermutation and suppression, it can improve the convergence rate and the diversity of population, and effectively solve the problems of population prematurity and slow convergence rate in genetic algorithm. Simulation result shows that the proposed immune algorithm is better in finding global optimal and convergent rate when comparing with the improved genetic algorithm.

**Key words:** job-shop schedule problem; immune algorithm; clonal selection algorithm; hypermutation

**摘要:**人工免疫系统是基于生物免疫系统特性而发展的新兴智能系统。基于免疫系统的克隆选择机制,提出一种求解车间作业调度问题的免疫算法。利用免疫算法较强的搜索能力可以实现全局寻优。通过使用克隆、高频变异和抗体抑制等免疫操作,提高了算法的收敛速度和种群的多样性,可以有效地克服遗传算法种群早熟化和收敛速度慢的问题。仿真结果表明,与改进后的遗传算法比较,提出的免疫算法在全局最优解和收敛速度上都有较为明显的优势。

**关键词:**车间作业调度问题;免疫算法;克隆选择算法;高频变异

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.31.011 **文章编号:** 1002-8331(2009)31-0034-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP18

## 1 引言

车间作业调度问题(Job shop Scheduling Problem, JSP)的一般描述为:车间作业系统有  $n$  个作业和  $m$  个机器,每个作业必须在每一台机器上加工,如何安排这些作业的加工顺序,使得所有作业最大完成时间最小。在管理科学、自动化以及超大规模集成电路设计等领域中,存在大量的组合优化问题,这类问题都可以抽象化成车间作业调度问题。车间作业调度问题是很多实际工程问题中的简化模型。长期以来寻求这一类问题的有效解决方法一直是运筹学领域的研究热点之一。当作业和机器数量较大时,由于其较高的计算复杂性,线性规划、动态规划、分枝定界和梯度下降等传统优化方法无法很好地解决这一类问题, JSP 属于典型的 NP-hard 难题<sup>[1]</sup>。最近提出的人工智能算法,如遗传算法和模拟退火都是基于自然界某些规律而提出来的,具有极强的并行搜索能力,很适合解决 JSP<sup>[2-3]</sup>。但是随着研究的深入,发现这些算法存在种群早熟化和收敛速度慢的问题。

生物免疫系统是一个并行的分布式自适应系统,能够自适应地抵抗外来抗原,其中蕴含着学习、优化和记忆等信息处理机理。近年来发展起来的人工免疫系统是受生物免疫信息处理

机制启发而发展的,它主要借鉴了免疫系统的功能和原理用于解决复杂问题<sup>[4]</sup>。De Castro 等人提出的克隆选择算法采用高频变异和免疫更新等机制,提高了算法的收敛速度和种群的多样性,比遗传算法有着更强全局搜索能力<sup>[5]</sup>。其后,De Castro 等人又提出了 OPT-aiNet 算法,该算法提出一个免疫网络模型,采用了免疫抑制的思想,能够很好地解决多峰值优化问题,可以用在信息分类和数据挖掘方面<sup>[6]</sup>。由于免疫算法较强的搜索能力和保持种群多样性的特点,目前免疫算法在函数优化、组合优化、模式识别、数据挖掘及网络安全等方面已经得到了有效应用<sup>[4]</sup>。在文中采用克隆选择算法解决 JSP,通过高频变异算子和抗体抑制机制,实现全局寻优和局部寻优,明显提高了算法的收敛速度和保持种群多样性。仿真结果表明,提出的免疫算法在全局最优解和收敛速度上都明显优于改进后的遗传算法<sup>[4]</sup>。

## 2 相关背景知识

### 2.1 JSP 数学模型

JSP 研究  $n$  个工件在  $m$  台机器上加工,已知各操作的加工时间和各工件在各机器上的加工次序约束,要求确定与工艺约束条件相容的各机器上所有工件的加工次序,使得所有工件的

**基金项目:**国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60703112);深圳市科技计划项目(No.QK200601)。

**作者简介:**林秋镇(1984-),男,硕士生,主研领域为免疫算法及其应用,网络安全;胡庆彬,男,教授,硕士生导师;陈剑勇,男,副教授,硕士生导师。

**收稿日期:** 2008-06-19 **修回日期:** 2008-11-05

最大完成时间最小。其数学模型可以描述为:

$$\text{Min } (f(X, M, J, S, T))$$

其中:  $f$  为所有工件按加工顺序  $X$  加工完毕后所用的最少时间。  $X$  为所有工件  $J$  在机器  $M$  上的所有可能加工顺序, 是一个解空间。  $M$  为机器集合,  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$ ,  $m_i (i=1, 2, \dots, m)$  表示第  $i$  个机器。  $J$  为工件集合,  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ,  $j_i (i=1, 2, \dots, n)$  表示第  $i$  个工件。  $S$  为每个工件的加工顺序集合,  $S = \{s_{ij}, i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m, s_{ij}$  表示第  $i$  个工件的第  $j$  个工序使用的机器号。  $T$  为每个工件在每台机器的加工时间,  $T = \{t_{ij}, i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m, t_{ij}$  表示第  $i$  个工件的第  $j$  个工序需要加工的时间。

同时工件  $J$  和机器  $M$  满足: 每个工件必须在每台机器上加工; 一台机器在某时刻只能加工一个工件的一道工序; 每个工件的工序在加工时不可中断; 不同工件的工序之间没有先后的约束关系, 相同工件的工序之间有先后约束关系。

## 2.2 克隆选择算法

克隆选择算法模拟生物免疫系统的克隆选择原理。在一个生物免疫系统中, 一旦病原体侵入生物体内就会被分解为抗原片, B 淋巴细胞能够产生对抗原具有特异性反应的抗体。只有那些能成功识别抗原的免疫细胞才能克隆增生, 经历变异后的免疫细胞分化为浆细胞和记忆细胞。浆细胞能够分泌大量抗体, 最终能够消灭抗原。记忆细胞则能快速响应再次遇到的相同或类似的抗原, 达到高效持久的免疫应答作用<sup>[4]</sup>。克隆选择对应着一个亲合力成熟的过程, 也即是说克隆选择过程中, 抗体经过克隆、重组和变异等免疫操作, 抗体与抗原的亲合力越来越大, 趋向成熟。因此, 在克隆选择算法中, 一般将可行解视为抗体, 将待优化的目标函数及其约束条件视为抗原, 重组和变异等免疫操作由于是在解空间中搜索更优的可行解, 可以看成是亲合力逐渐成熟的过程。克隆选择算法采用克隆算子, 保证亲合度高的抗体有较多克隆个体, 同时加入高频变异算子和免疫抑制机制, 既保证了种群的多样性, 又保证了算法的局部搜索能力和在较大的解空间中的全局搜索能力。其算法流程如图 1 所示。

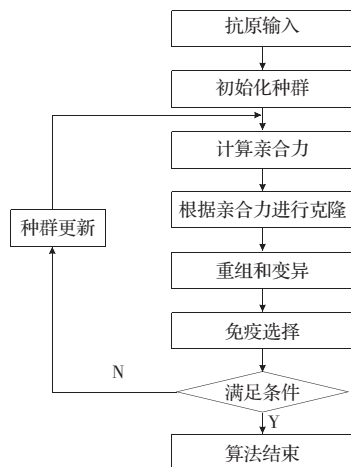


图 1 克隆选择算法流程图

## 3 车间作业调度免疫算法

### 3.1 编码设计

要使用免疫算法解决实际问题, 首先要解决实际问题的编码问题。对不同的实际问题需要不同的编码, 由于车间作业调

度算法约束条件的复杂性, 传统二进制编码根本不适用于车间调度算法。对此, 相关研究学者提出了 9 个较为成熟的编码方案<sup>[1]</sup>。在文中, 主要采用基于操作的编码方式。对于一个  $n$  个工件和  $m$  个机器的车间调度问题, 用一个  $1 \times (n \times m)$  的数字编码序列来表示可行解, 也即一个抗体, 可以表示为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n \times m}\}$ , 其中  $1 \leq x_i \leq n (1 \leq i \leq n \times m)$ , 每个工件  $x_i$  出现的次数都为  $m$  次, 相同工件  $x_i$  之间的顺序关系对应工件  $x_i$  的不同工序。这样就可以保证解码后各个工件的加工流程满足所隐含的工艺约束条件。解码方式采用的是文献[1]中提到的活动解码方法: 先将抗体转化成为一个有序的操作表, 然后基于该表和工艺约束条件对各操作以最早允许加工时间逐一加工, 从而产生作业调度方案。

### 3.2 初始化种群

为了利用车间作业调度问题给出的一些先验知识, 在论文中采用剩余加工时间最多优先算法生成一个初始解, 然后通过随机交换抗体基因位生成其他初始解, 这样生成的初始解既带有随机性, 又利用到了先验知识而能够得到较好的初始解。其剩余加工时间最多优先算法主要步骤为:

(1)  $\text{Toltime}(i)$  表示每一个工件  $i$  在各个机器上需加工的时间总和,  $P(i, j)$  表示工件  $i$  的第  $j$  个工序需加工的时间,  $\text{Runtime}(i)$  表示工件  $i$  的已加工工序, 初始化为 0, 初始化  $k=1$ 。

(2) 如果还存在工件的剩余加工时间总和不为零, 则转(3), 否则算法结束, 得出初始解序列 Solution。

(3) 挑出剩余加工时间最大的工件  $i$ , 令  $\text{Solution}(k)=i$ ,  $\text{Runtime}(i)=\text{Runtime}(i)+1$ ,  $\text{Toltime}(i)=\text{Toltime}(i)-P(i, \text{Runtime}(i))$ ,  $k=k+1$ , 转(2)。

### 3.3 免疫算子

在免疫算法中, 主要是通过高频变异实现局部寻优。高频变异应该具备有超变异能力, 这样使得算法可以跳出局部最优值, 实现全局寻优, 使得算法有较强的鲁棒性和自适应性<sup>[7]</sup>。在 Castro L N 等提出的纯克隆选择算法中, 并没有重组算子, 可是他也提到重组算子和变异算子是生成新抗体的两大步骤<sup>[5]</sup>。针对 JSP, 在文中保留了重组算子, 提出了基于工件工序的单一交叉算子和基于高斯随机数的变异算子, 使得算法具有较快的收敛速度和全局寻优能力。

#### 3.3.1 克隆算子

克隆是对父代抗体模式的复制过程。只有部分亲合度高的抗体才会有机会克隆增生。对一个父代抗体  $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  来说, 克隆后的子代群体为:  $q_i \times X_i$ , 这里的  $q_i$  就是抗体克隆个数,  $q_i$  可由下式计算而得

$$q_i = \text{ceil} \left( \frac{\alpha \times N}{i} \right)$$

其中  $\text{ceil}$  为取整函数,  $\alpha (0 < \alpha < 1)$  是一个与克隆规模有关的参数,  $N$  为种群规模,  $i$  是克隆抗体按亲合度降序排序后的序号。这样就保证高亲合度的抗体具有较多的克隆子代, 可以快速趋近局部最优解。在文中, 抗体  $x$  的亲合度  $g(x)$  由下式计算:

$$g(x) = a \log(-b \times f(x))$$

其中  $f(x)$  为抗体  $x$  解码后所有工件加工完毕后所需的时间,  $a$  和  $b$  为预定义的正整数, 这样就保证亲合度越大时, 调度方案所需要的时间越少。

#### 3.3.2 交叉算子

交叉算子是生成新抗体的重要步骤。但在克隆选择算法

中,局部搜索主要是通过高频变异来实现的。针对 JSP,遗传算法中已有相关的交叉算子提出<sup>[2,8]</sup>,交叉算子有利于优秀基因段的共享,对提高算法的收敛性有很大帮助。在论文中,为了保证交叉算子对解的结构破坏达到最小,同时又能对抗体的生成模式进行一定的扰动作用,提出一种基于工件工序的单一交叉算子。

对抗体  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,其单一交叉算子的主要步骤为:

(1)随机生成一个工件数  $i$  和工序数  $j$ ,其中要求生成的工序数不能为第一个或者是最后一个。

(2)查找工件  $i$  的第  $(j-1)$  和  $(j+1)$  个工序在抗体  $X$  中的位置,取夹在这两个位置之间的基因段进行随机排序生成新基因段。

(3)将生成的新基因段代替原基因段,生成一个新抗体。

例如:抗体  $X=\{1,3,2,4,3,4,1,2,4,3,1,2,4,2,3,1\}$ ,假如生成的随机数工件数为 2,工序为 2 时,则夹在工件 2 的第 1 个工序和第 3 个工序的基因段为  $\{4,3,4,1,2,4,3,1\}$ ,对这段基因段进行随机排序,如果得到基因段  $\{3,4,1,3,4,2,1,4\}$ ,则将生成的基因段更新原有基因段得到新抗体为: $X'=\{1,3,2,3,4,1,3,4,2,1,4,2,4,2,3,1\}$ 。

### 3.3.3 变异算子

免疫学认为,亲合度成熟和抗体多样性的产生主要是依靠抗体的高频变异,而非交叉操作,因此,与一般遗传算法认为交叉是主要算子而变异是背景算子不同,在克隆选择算法中,更加强交叉的作用。由于采用了基于操作的编码方式,传统的基于实数编码方式的高斯变异不适合用于车间作业调度算法。基于二进制的编码两点交换变异方式虽然能用于车间作业调度算法,但生成的新抗体与父代抗体较为相似,不利于跳出局部最优值。在文中,将高斯随机数与两点变异方式结合起来,提出一种基于高斯随机数的变异。其算子主要思想为:生成一个高斯随机数控制两点变异的次数。通过高斯随机数的生成,可以进行多次两点交换变异,生成远离父代抗体的子代抗体。两点交换变异方式是随机挑选两个基因位进行交换,其中两点交换变异的次数  $Mutationtimes$  可按下式生成:

$$Mutationtimes = \text{ceil}(N(0,1) \times \beta)$$

其中  $\text{ceil}$  为取整函数,  $\beta$  是一个用户预定义参数,  $N(0,1)$  为一个满足标准高斯分布的随机数。

### 3.3.4 选择算子和免疫抑制

克隆选择原理认为,淋巴细胞除了扩增或者分化成浆细胞以外,也能分化成生命期较长的 B 记忆细胞,这些记忆细胞能预先被免疫系统选择出来,并迅速活化和增殖以执行高效的免疫功能。在文中,用免疫记忆细胞记录了当前种群父代群体,当交叉、变异等免疫操作完成后,生成了新的子代种群。子代种群与免疫记忆中的父代种群组合成混合种群并按亲合度进行降序排序,同时利用免疫抑制机制原理删除冗余抗体,能较好保持种群的多样性。在选择下一代种群时,使用择优选择策略。在免疫抑制之后的混合种群中选择亲合度较高的抗体组成下一代种群并更新免疫记忆细胞。如果免疫抑制之后混合种群的个数少于设定的种群个数时,则对当前最优解进行多次两点交换变异随机生成新抗体加入到下一代种群中去,保证种群个数不变,同时也增加了种群的多样性。

## 4 算法仿真

为了评价算法的性能,与最近提出的改进后遗传算法<sup>[2]</sup>作比较,分别对 FT 类经典的 FT10 作 20 次仿真实验,已知 FT10 的最优解为 930。算法各参数取值如下:种群为 50,进化代数为 100,改进后遗传算法的交叉概率为 0.8,变异概率为 0.01。该算法的交叉概率为 0.8,变异概率为 1,进行克隆操作的抗体个数为 10,克隆规模参数  $\alpha$  取 0.32,这样可以保证克隆后的种群也为 50,变异随机数预定参数  $\beta$  取 1.5。该算法在 20 次仿真中得到的最小最优解为 979,而改进后遗传算法得到的最小最优解为 993,最小最优解进化图的比较如图 2。在 20 次仿真中,该算法中得到的平均最优解为 1 004.9,改进后遗传算法得到的平均最优解为 1 029,平均最优解的进化图比较如图 3。从图中可以看出,提出的免疫算法鲁棒性较好,在最优解和收敛速度上都明显优于改进后的遗传算法。

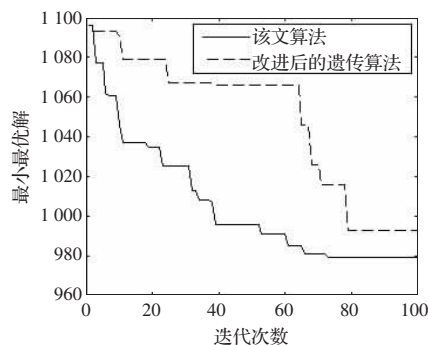


图2 最小最优解进化比较图

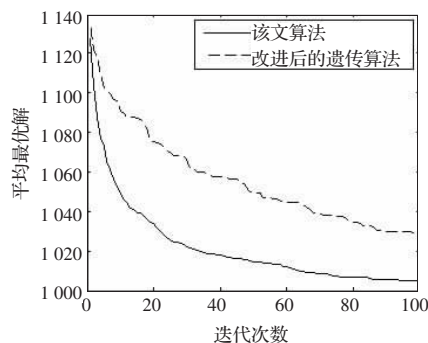


图3 平均最优解进化比较图

## 5 结束语

提出用免疫算法解决车间调度问题,提出了单一交叉算子和基于高斯随机数的高频变异算子,使得算法具有较好的局部搜索能力和全局寻优能力,很好地克服了种群早熟化和收敛速度慢的问题。对经典 FT10 问题的 20 次仿真结果表明,提出的免疫算法在全局最优解和收敛速度上都具有显著的优势。

## 参考文献:

- [1] 王凌.车间调度及其遗传算法[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 王宝文,李春廷,刘文远,等.基于工件位置交叉算子的车间作业调度算法[J].计算机工程与应用,2007,43(13):96-97.
- [3] 陶泽,谢里阳,郝长中,等.基于混合遗传算法的车间调度问题的研究[J].计算机工程与应用,2005,41(18):19-22.
- [4] 焦李成,杜海峰,刘芳,等.免疫优化、计算、学习与识别[M].北京:科学出版社,2006.