

文章编号: 1001-0920(2008)07-0781-05

免疫克隆选择算法求解柔性生产调度问题

刘晓冰, 吕 强

(大连理工大学 管理学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为减少计算复杂度, 将具有解决复杂组合优化问题的免疫克隆选择算法应用于求解柔性生产调度问题. 首先设计一种有效的抗原和抗体的数据结构, 用抗原表示待调度的生产计划, 抗体表示高效的柔性生产调度结果; 然后着重设计了用于产生高效的柔性生产调度结果的克隆免疫算子; 最后运用该模型对一个实际生产系统进行仿真调度决策, 实验评估结果验证了算法的正确性和有效性.

关键词: 人工免疫系统; 克隆选择; 柔性调度

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Immune clonal selection algorithm for flexible job-shop scheduling problem

LIU Xiaobing, LV Qiang

(College of Management, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Correspondent: LV Qiang, E-mail: lvqiang05@163.com)

Abstract: In order to reduce the computational complexity, immune clonal selection principle, which has the ability of solution to complex combinatorial optimization problem is applied to flexible job-shop scheduling problem. A kind of data structure of antigen and antibody is designed. An antigen is the representation of job-shop scheduling and an efficient antibody is the representation which creates feasible solutions. Then the clonal immune factor is designed, which is used to produce flexible job-shop scheduling result. Finally, we apply the developed system to schedule a real-time system. The simulation results show the effectiveness and correction of the algorithm.

Key words: Artificial immune system; Clonal selection; Flexible job-shop scheduling problem

1 引 言

集成制造系统的发展对生产调度的实施提出了新的要求. 相比于经典的作业车间调度(JSS), 具有路径柔性的作业车间调度(FJSS)问题更具复杂性, 它不仅要解决每道工序分配的机器选择问题, 而且还要确定每台机器上分配的生产工序的顺序问题.

当前在 FJSS 研究领域, 基于生物计算的智能搜索优化算法是主要的研究热点^[1,2]. 人工免疫系统是一个信息处理技术与计算方法相结合的智能系统, 它通过借鉴和利用生物免疫系统的性质和机制, 开发用于解决工程和科学问题的智能系统技术. 作为一种智能优化搜索策略, 人工免疫算法在优化计算生产调度问题等方面逐步得到应用并取得了良好的效果^[3]. 文献[4]最早将人工免疫算法用于优化计

算生产调度问题; [5]将研究扩展到动态调度问题; 直到 2004 年, [6]开始针对 FJSS 问题作了一定的尝试. 在国内, [7]借鉴自然界中生物免疫系统的概念和机理, 提出了解决确定条件下具有零等待的流水车间生产调度问题的免疫调度算法; [8]构造了面向机床作业的融生物免疫机理和专家系统为一体的生产调度模型; [9]给出了基于动态评价免疫算法的车间作业调度研究.

与进化算法一样, 上述人工免疫系统算法同样也是依靠编码来实现与问题本身无关的搜索, 并表现出较好的解决问题的能力, 但相关研究还处于初始阶段, 有关算法机理的描述和分析并不多见, 还缺乏与其他算法的深入比较.

另一方面, 受生物免疫系统克隆选择机理的启

收稿日期: 2007-04-10; 修回日期: 2007-10-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70471056).

作者简介: 刘晓冰(1956—), 男, 长春人, 教授, 博士生导师, 从事先进制造模式、企业信息化的研究; 吕强(1970—), 男, 山东莱芜人, 博士生, 从事企业信息化、企业战略采购的研究.

发,人们构造了一种新的自然计算方法——免疫克隆选择算法.该算法源于免疫系统而非自然进化,在细胞水平上,抗体之间的相互协作保证了记忆细胞库、疫苗和免疫优势的存在;在算法结构上,不仅强调全局搜索,而且重视局部搜索,因充分发挥了克隆算子的作用,故具有更好的种群多样性,同时也强调抗体群的适应度函数变化和抗体间的相互作用而导致的多样性变化.这些特性是免疫系统固有的,也是多数人工智能系统所缺乏的特性.

基于以上研究,本文提出了基于克隆选择免疫算法的柔性生产调度求解问题.首先给出柔性生产调度问题的数学模型,在此基础上,将免疫克隆选择算法应用于模型的求解,提出一种有效的抗原和染色体两层编码方案的抗体数据结构;然后着重研究了用于产生高效的柔性生产调度结果的克隆免疫算子.

2 柔性生产调度的问题描述

假定一个加工系统有 M 台机器和 N 个工件,每个工件包含一道或多道工序,工件的工序顺序是预先确定的,每道工序可以在多台不同的机器上加工,工序的加工时间随机器的性能不同而变化.柔性生产调度目标是为每道工序选择最合适的机器,以及确定每台机器上各工件工序的最佳加工顺序及开工时间,使所有工件在系统中的流通时间取得最优值.

柔性生产调度问题的数学描述如下:

1) 目标函数

$$\min(\text{MS}) = \min[\max(\text{MP}_k)], k = 1, 2, \dots, M.$$

2) 约束条件

$$E_{ijk} - E_{i(j-1)n} = 0, 1 < j \leq J_i,$$

$$X_{ijk} - X_{i(j-1)n} = 1;$$

$$E_{ijk} - S_{egk} = 0, X_{ijk} = X_{egk} = 1, R_{ijegk} = 1;$$

$$E_{ijk} - M_{ijk}, X_{ijk} = 1.$$

其中:MS 为所有工件的最后完工时间; MP_k 为所有工件在机器 k 上的完工时间; N 为工件数量; M 为机器数量; J_i 为工件 i 所包含的工序数; M_{ijk} 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的加工时间; E_{ijk} 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的结束时间; S_{egk} 为工件 e 的第 g 道工序在机器 k 上的开始时间; R_{ijegk} 表示若工件 i 的第 j 道工序和工件 e 的第 g 道工序在同一台机器 k 上执行,且工序 j 先于工序 g 时为 1,则其他为 0; X_{ijk} 表示若工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上执行时为 1,则其他为 0.

柔性 Job Shop 排定问题(FJSP)可分为两种类型:1) T-FJSP:每个工件的每一道工序在所有机器上都可加工;2) P-FJSP:每个工件的每一道工序不是在所有机器上都可加工,但至少可在一台机器上

加工.

3 基于克隆选择算法的柔性生产调度模型

3.1 抗原表达

本文用抗原表示待调度的生产计划,根据第2节对柔性生产调度问题的定义和柔性工艺的特点,给出抗原数据表达,如表1所示.其中 $\times\times\times$ 表示该工艺不可在此机器上操作.

表1 待调度的生产计划的抗原数据表达

工件 序号	工序 序号	计划执行时间				
		机器1	机器2	机器3	...	机器 m
1	1	5	$\times\times\times$	4	...	4
1	2	7	2	6	...	$\times\times\times$
1	3	$\times\times\times$	8	12	...	2
2	1	7	6	$\times\times\times$...	6
2	2	9	2	4	...	8
...
N	3	12	$\times\times\times$	4	...	11

将柔性生产调度原数据条件规模用3层级别表示:加工系统机器数目为 M ;加工工件数目为 N ;工件包含的最大工序数目为 J .为此,给出如下算法:

输入:待调度的生产计划的抗原数据表达矩阵 $1, 2, N \times M$;

输出:相似程度.

算法步骤:

Step 1: 读入欲对比的两个抗原数据表达矩阵.

Step 2: 对每个抗原数据表达矩阵进行如下操作:

Step 2.1: 计算抗原数据表达矩阵的规模并赋值于 $[m, l]$;

Step 2.2: 加工系统机器数目 M 为 $1, 2, \dots, m$, 并将转为固定长度的二进制数 mb ;

Step 2.3: 加工工件数目 N 为原数据表达矩阵第 1 列的最大值,并将转为固定长度的二进制数 jb ;

Step 2.4: 工件包含的最大工序数目 J 为原数据表达矩阵第 2 列的最大值,并将转为固定长度的二进制数 jgb ;

Step 2.5: 从左到右将 mb, jb, jgb 合并为 3 倍固定长度的二进制数.

Step 3: 将欲对比的两个抗原二进制数从左到右进行匹配,计算能完全匹配的子序列的位数,将其作为相似程度.

3.2 抗体表达

柔性生产调度目标是为每道工序选择最合适的机器,以及确定每台机器上各工件工序的最佳加工顺序及开工时间,使所有工件在系统中的流通时间

取得最优值. 抗体为高效的柔性生产调度结果, 针对行业生产调度的特殊要求, 给出一种有效的染色体两层编码方案的抗体数据结构.

第 1 层: 工件工序顺序染色体编码表达式

此染色体编码表达所有待调度的生产工件的工序执行顺序, 以表 2 的 3 台机器和 2 个工件为例, 其工件工序顺序染色体编码表达式为 (2 1 1 2 1), 其中每个工件包含的工序数目为待调度的生产计划的抗原数据表达中给出的数目. 编码表达式中工件的顺序默认执行工序的顺序, 即 (21 11 12 22 13). 因同一工件的工序之间有严格的先后约束, 并在待调度的生产计划的抗原数据表达中给出, 故不能采用后一种方式, 其原因是为了避免在使用后面的克隆免疫算子时产生无效的柔性生产调度结果.

第 2 层: 每道工序选择的最合适的机器染色体编码表达式

编码表达式表示每道工序选择的最合适的机器, 用 1 表示该机器被选中, 用 0 表示该机器未被选中, 用 xxx 表示该机器不可用, 如表 2 所示.

表 2 染色体编码表达

工件序号	工序序号	机器 1	机器 2	机器 3
1	1	0	xxx	1
1	2	0	1	0
1	3	xxx	1	0
2	1	1	0	xxx
2	2	0	0	1

3.3 抗体的初始化

在使用抗体前, 其染色体两层编码方案的抗体数据结构需初始化, 具体方案如下:

1) 第 1 层的工件工序顺序染色体编码表达式为随机生成; 2) 由于调度的目的是使所有工件在系统中的流通时间取得最优值, 第 2 层每道工序选择的最合适的机器染色体编码为, 在待调度的生产计划的抗原数据表达中, 选择机器计划执行时间最小的. 初始化可使后面的克隆免疫算子产生高效的柔性生产调度结果.

3.4 克隆免疫算子

1) 在工件工序顺序染色体克隆免疫算子中, 其变异操作为, 在其工件工序顺序染色体中任意选择两个位置的值得进行互换, 原工件工序顺序染色体为

2 1 1 2 1

变异后工件工序顺序染色体为

1 1 1 2 2

变异操作中进行互换的数目由变异率决定, 变异率越高, 互换的数目也越大.

2) 在机器染色体克隆免疫算子中, 其变异操作是, 在机器染色体编码中选择 n 个工序重新进行随机确定执行机器. 变异操作中 n 数值同样由变异率决定, 变异率越高, n 将越大.

3.5 免疫克隆选择算法的实现步骤

克隆策略是建立在遗传算法基础上的启发性搜索算法. 它通过克隆复制来增加种群数目, 扩大搜索空间, 再经过变异操作来增加种群的多样性, 跳出局部最优, 获得全局最优. 在变异过程中, 保持初始个体不参与变异操作, 以防止破坏最优解. 对变异后的个体进行选择操作, 将最优的个体作为新的初始种群以加快收敛速度. 算法具体描述如下:

Step1: 初始化抗体群 Ab , 随机产生 N 个抗体, 生成初始群体, 初始化方案如 3.3 节.

Step2: 对 Ab 中的抗体按照亲和力由大至小降序排列, 从中选取前 M 个抗体按照 3.4 节的克隆免疫算子进行克隆, 得到规模为 N_c 的抗体群 Abc ; 亲合度函数定义为最小 $Makespan$.

Step3: 对抗体群 Abc 中的抗体按照亲和力由大至小降序排列, 进行删除操作, 从中选取前 M 个抗体, 得到规模为 N_c 的抗体群 Abe .

Step4: 合并抗体群 Ab 和 Abe , 选出亲和力最高且互不相同的 N 个抗体组成抗体群 Abc .

Step5: 随机产生规模为 N_r 的抗体群 Ab_r , 选出亲和力最高的 N_s 个抗体组成抗体群 Ab_s .

Step6: 用 Ab_s 代替 Abc 中亲和力最低的 N_s 个抗体, 形成规模为 N 的抗体群 Ab .

Step7: 判断是否满足终止条件, 不满足则转 Step2 继续执行; 满足则结束计算. 其中结束条件为: 1) 如果迭代次数 N_c 大于某个最大阈值 (即最大迭代次数), 则算法结束; 2) 如果最优值几代不变, 则算法结束; 否则, 继续执行.

3.6 算法及其复杂度证明

3.6.1 算法的证明

从克隆操作、免疫基因操作和克隆选择操作可以看出, 免疫克隆选择算法先将一个低维空间 (n 维) 的问题转换到更高维 ($N_c(k)$ 维) 的空间中求解, 然后将结果再投影到低维空间 (n 维) 中, 从而获得对问题更全面的认识. 因此, 对于任何初始状态 A_0 , 算法都会以概率 1 收敛到最优种群集. 对该结论的证明可参阅文献 [10], 限于篇幅, 本文不再赘述.

3.6.2 算法的复杂度分析

柔性调度是一个具有 NP 复杂度的组合优化问题, 解决此问题的直接方法是利用 Viterbi 算法遍历解空间以获得最优解. 这种穷举方法的计算复杂度为 $O(M^{N_j})$. 对于抗体集合中抗体数量为 N_p , 迭代

次数为 N_g 的克隆选择算法,通常 N_p 和 N_g 与设备和工序数呈一次线性关系.因此,基于克隆选择算法的柔性调度问题的计算复杂度为 $O(MNJ)$,远小于穷举法的计算量.随着某工件工序不能在某机器上作业的约束条件的改变,算法的复杂度还会降低.

4 实验数据及分析

4.1 测试数据集及部分最好解

运用本文算法对文献[11]中的6个P-FJSP的 benchmark 问题集进行求解.实例资料为6个工件6台机器的Job Shop 调度问题.各工件工序的加工时间和加工工艺如表3所示.

表3 FMS 车间调度问题的原始数据

工件	工序	机器类型	加工时间	工件	工序	机器类型	加工时间
N_1	1	3	1	N_4	1	1/2/3	5
	2	1/6	3		2	4	3
	3	2/5	6		3	5	8
	4	4	7	4	6	9	
N_2	1	2	8	N_5	1	3	9
	2	3	5		2	1/2	3
	3	1/5/6	10		3	5	5
	4	4	4		4	6	4
N_3	1	3	5	N_6	1	2/4	3
	2	4	4		2	6	9
	3	6	8		3	1	10
	4	1	9		4	5	4
	5	2	1		5	3	1
	6	5	7				

算法由 Visual C++ 语言实现,以 P4 2.8 GHz 台式电脑为平台实现柔性生产调度.设定最大迭代次数为300次,连续优化15次,Makespan 值为55,计算结果如表4所示.最优 Makespan 值变化如图1所示.

表4 计算结果

优化次数	计时 s	优化次数	计时 s	优化次数	计时 s
1	23.203 1	6	23.109 4	11	22.890 6
2	23.203 1	7	23.109 4	12	22.890 6
3	23.203 1	8	23.109 4	13	22.890 6
4	23.203 1	9	23.109 4	14	22.890 6
5	23.203 1	10	23.109 4	15	22.890 6

可以看出,利用免疫算法优化 benchmark 问题时,算法具有良好的优化性能,15次连续优化均找到了最优 Makespan = 55,并且算法具有较快的收敛性能,在计算迭代的早期便能迅速逼近最优

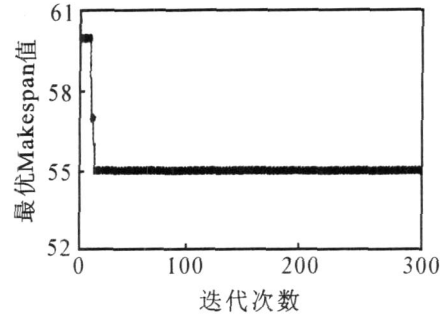


图1 最优 Makespan 值变化

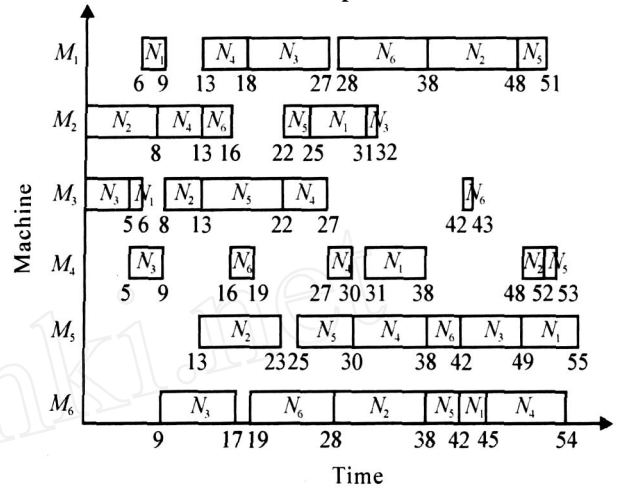


图2 最优 Makespan 值对应的甘特图

Makespan 值.对应的最优调度示意图如图2所示.

4.2 算法性能对比结果

在本文算法中,为考察算法各参数对算法性能的影响,对求解一组随机产生的 J 作业, M 机器, N 工序问题的性能进行仿真比较.其中:作业在各机器上的加工时间在 $[1, 20]$ 区间随机产生,对每个问题独立运行10次,每次运行300代.在计算过程中,由于随机产生的初始种群不同,会获得不同的优化结果.随着优化过程的进行,免疫算子增加了候选方案的多样性,实现了并行搜索,优化了算法的调度结果.当达到某一步骤时,优化计算的数值变化幅度逐渐减小、稳定,最终收敛得到全局最优解.表5给出了两种算法在不同问题集情况下的性能对比.

表5 算法性能对比结果

问题集	Brandimarte	本文算法	
	算法	最佳结果	平均结果
10 * 6(1)	42	41	43
10 * 6(2)	32	30	33
10 * 15	86	78	85
15 * 4	186	173	180
15 * 8	81	83	84
20 * 5	157	157	159
20 * 10	523	523	524
20 * 10	269	352	358

5 结 论

本文结合实际生产情况，研究了免疫克隆选择算法求解柔性调度问题。分析发现，在大多数情况下，免疫算法可取得比启发式算法更好的求解结果。然而当问题进一步复杂时，简单的克隆选择计算仍然难以处理，需要对其改进。另外，为使算法机理描述简单，该算法只借鉴了免疫系统部分信息处理机制，而诸如记忆、遗忘、混沌以及自适应等其他机理则没有考虑。适当考虑这些思想和方法，将会降低算法的复杂度，提高算法的有效性，这也是今后努力的方向。

参考文献(References)

[1] 夏蔚军, 吴智铭. 基于混合微粒群优化的多目标柔性 Job-shop 调度[J]. 控制与决策, 2005, 20(2) : 137-141. (Xia W J, Wu Z M. Hybrid particle swarm optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems[J]. Control and Decision, 2005, 20(2) : 137-141.)

[2] 杨晓梅, 曾建潮. 遗传算法求解柔性 job shop 调度问题[J]. 控制与决策, 2004, 19(10) : 1197-1200. (Yang X M, Zeng J C. Solving flexible job shop scheduling problem using genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2004, 19(10) : 1197-1200.)

[3] Jain A S, Meeran S. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future[J]. European J of Operation Research, 1998, 113(2) : 390-434.

[4] Hart E, Ross P, Nelson J. Producing robust schedules via an artificial immune system[C]. Proc of the ICEC '98. Seoul: IEEE Press, 1998: 464-469.

[5] Aickelin U, Burke E. A mohamed din investigating artificial immune systems for job shop rescheduling in changing environments [M]. Bristol: Engineer 's House, 2004.

[6] Tay J C, Wibowo D. An effective chromosome representation for evolving flexible job shop schedules [C]. Genetic and Evolutionary Computation Conf. Washington, 2004: 1324-1331.

[7] 徐震浩, 顾幸生. 不确定条件下零等待的流水车间免疫调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(10) : 1247-1251. (Xu Z H, Gu X S. Immune scheduling algorithm for flow shop under uncertainty with zero wait [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(10) : 1247-1251.)

[8] 李蓓智, 杨建国, 丁惠敏. 基于生物免疫机理的智能调度系统建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(6) : 446-450. (Li B Z, Yang J G, Ding H M. The modeling and simulation of intelligent scheduling system based on biologic immunity mechanism[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(6) : 446-450.)

[9] 余建军, 孙树栋, 郑锋. 基于动态评价免疫算法的车间作业调度研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3) : 25-31. (Yu J J, Sun S D, Zheng F. Job-shop scheduling study by dynamic evaluation based immune algorithm [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(3) : 25-31.)

[10] 刘若辰, 杜海峰, 焦李成. 一种免疫单克隆策略算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11) : 1180-1184. (Liu R C, Du H F, Jiao L C. An immune monoclonal strategy algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11) : 1180-1184.)

[11] Brandimarte P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search [J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(3) : 158-183.

下 期 要 目

线性时滞系统稳定性分析综述	张冬梅, 余立
基于因特网的共享控制系统的时滞依赖鲁棒稳定控制	钟铭恩, 等
基于 DSM 的复杂产品开发流程优化遗传算法	陈冬宇, 等
基于改进 BP 神经网络的菌体浓度软测量	杨强大, 等
求解作业排序问题的一种改进修复约束满足算法	上官春霞, 等
Tent 混沌粒子群算法及其在结构优化决策中的应用	张浩, 等
一类受扰时滞离散系统的滑模跟踪控制	牟丽君, 等
一类通讯受限不确定网络控制系统鲁棒 H 滤波	夏红伟, 等