

列队竞争算法求解多产品间歇 生产过程排序问题

孔令启^{1,2} 郑世清² 李玉刚^{1,2} 岳金彩^{1,2} 韩方煜²

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

摘要: 由于组合爆炸特性, 多产品厂的排序问题很难求解大规模甚至中等规模的问题。采用一种新的随机型优化搜索算法——列队竞争算法来对该问题进行求解, 引入新的选择策略和变异方法。计算表明同已有的方法相比, 该方法求解效率高、收敛速度快、使用简单方便, 是一种求解多产品间歇过程排序问题的有效算法, 为多目的厂间歇过程排序研究提供了新思路。

关键词: 列队竞争算法; 多产品厂; 间歇过程排序; 组合优化; 进化算法

中图分类号: TQ062

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2004)S2-0131-03

Solving scheduling of multiproduct batch processes with line-up competition algorithm

KONG Ling-qi^{1,2}, ZHENG Shi-qing², LI Yu-gang^{1,2}, YUE Jin-cai^{1,2}, HAN Fang-yu²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The production scheduling of multiproduct batch processes have a difficult problem to solve in large or medium scale due to the combinatorial explosion. A novel stochastic optimization technique based on line-up competition algorithm (LCA) is proposed to overcome this difficulty, and herein the selection strategy and the mutation method are introduced. An example is studied to illustrate that the LCA has the properties of high efficiency, fast convergence and is simple to use compared with the former algorithms, and the method can be used as a novel algorithm for multiproduct scheduling and other combinatorial optimization problems as scheduling of batch multipurpose plant.

Key words: line-up competition algorithm; multiproduct; batch processes scheduling; combinatorial optimization; evolutionary algorithm

间歇生产过程由于其产品的批量小、品种多、系列化、附加值高、生产灵活多变的特性, 已广泛应用于食品、聚合物、药品、分子筛、增塑剂、抗氧化剂、染料和涂料等合成步骤复杂、技术密集型产品的生产。典型的间歇生产过程包括多产品厂和多目的厂 2 种形式, 而间歇生产过程排序是间歇过程研究的重要内容, 对多产品厂的生产排序进行研究具有很重要的实际意义, 它是研究多目的厂排序的基础, 因此多产品厂的排序研究很受重视^[1]。

多产品厂的排序问题类似于流水作业问题。在过去的 30 年中, 许多学者对此进行了深入研究, 混合整数线性规划法(MILP)和分支定界法(BAB)可以求得问题的最优解^[2], 但这类问题在数学上是 NP 完全的, 由于其组合爆炸特性, 对于一些大规模甚至中等规模的问题很难求解。因而寻求次优算法是解决上述问题的重要途径, 这主要包括启发式算法和以遗传算法(GA)^[3]、模拟退火法(SA)^[4]等为代表的

随机型算法。

列队竞争算法(line-up competitive algorithm, LCA)^[5-6]是一种新的随机型优化搜索算法, 它在求解非线性规划、组合优化问题、换热网络和分离序列综合的全局优化问题方面得到了成功的应用。本文以无限中间储罐(UIS)的多产品厂间歇过程为例, 采用列队竞争算法对多产品厂间歇生产过程排序问题进行求解, 并引入新的选择策略和变异方法。计算表明同已有的方法相比, 该方法求解效率高、收敛速度快、使用简单方便, 是一种求解多产品间歇过程排序问题的有效算法。

1 问题的数学模型

多产品间歇过程按照中间储罐的设置方式可以分为无限中间储罐(UIS)、无中间储罐(NIS)、有限中间储罐(FIS)、零等待(ZW)和含有多种储罐设置方式的混合中间储罐(MIS)。UIS 问题是一类特殊的

多产品间歇过程,以下以 UIS 的多产品厂间歇过程为例,对多产品厂间歇过程排序问题进行研究。

从数学上来看,生产 N 个产品, M 台设备单元的多产品厂,对于 UIS 问题,如果以总生产时间 (makespan) 最短作为优化目标,则该问题的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min(C_{N,M}) \\ \text{subject to.} \\ C_{i,j} = \max(C_{i-1,j}, C_{i,j-1}) + t_{X_i,j} \\ \quad i = 2,3,4,\dots,N \quad j = 2,3,4,\dots,M \\ C_{1,j} = C_{1,j-1} + t_{X_1,j} \quad j = 2,3,4,\dots,M (\text{这里 } i = 1) \\ C_{i,1} = C_{i-1,1} + t_{X_i,1} \quad i = 2,3,4,\dots,M (\text{这里 } j = 1) \\ C_{1,1} = t_{X_1,1} \quad (\text{这里的 } i = j = 1) \\ 1 \leq \{X_i\} \leq N \quad X_i \in \text{自然数} \quad i = 1,2,3,\dots,N \end{cases} \quad (1)$$

如果给定产品加工序列 $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$, 则产品 X_i 在单元 j 上操作结束的时刻 $C_{i,j}$ 是产品 X_i 在单元 j 开始操作的时刻加上该产品在该单元的操作时间 ($t_{X_i,j}$), 而产品 X_i 在单元 j 上开始加工的先决条件是: ① 设备空闲, 即单元 j 的上一批产品操作结束 (时刻为 $C_{i-1,j}$); ② 产品 X_i 的上一工序也已完成 (时刻为 $C_{i,j-1}$)。即取决于这 2 个结束时刻中较晚的一个 $\max(C_{i-1,j}, C_{i,j-1})$, 则最后被加工的产品 X_N 的 M 工序的完工时刻 $C_{N,M}$ 就是给定加工工序的方案完工时间。由于其他几种中间储罐安排方式 (NIS、FIS、ZW、MIS) 的生产调度问题都是 UIS 问题的扩展^[7], 因此本文的算法也能用于其他类型的多产品排序问题。

2 列队竞争算法

列队竞争算法是一类随机算法, 同遗传算法 (GA)、进化策略 (ES) 和进化规划 (EP) 一样, 它属于一种模拟生物进化过程的进化算法, 但是与后者不同之处在于, 列队竞争算法在模拟进化过程中采用无性繁殖, 即始终保持家族独立并行进化。同时在该算法中通过家族内部的生存竞争和家族间的地位竞争这 2 种竞争方式, 使群体快速进化到最优或接近最优的区域。

家族内的生存竞争是指各家族中仅性状 (与目标函数值有关) 最好的家族成员得以生存并作为该家族的变异的母体, 家族间的地位竞争是根据各家族变异母体的性状从好到坏来排定位次, 不同地位的家族具有不同的竞争推动力。竞争推动力可以理解为家族变异能力的大小, 处于第一位的最优秀的

个体只进行一次变异, 所迁移的范围较小, 有利于加速局部搜索; 列队中处于越靠后的个体, 变异次数逐渐增加, 个体在搜索空间的迁移范围逐渐增大, 起到了全局搜索的作用。这 2 种竞争方式起到均衡局部的精细搜索与全局的粗略搜索的作用, 能确保得到最优解或者满意解。列队竞争算法的计算框图如图 1 所示。

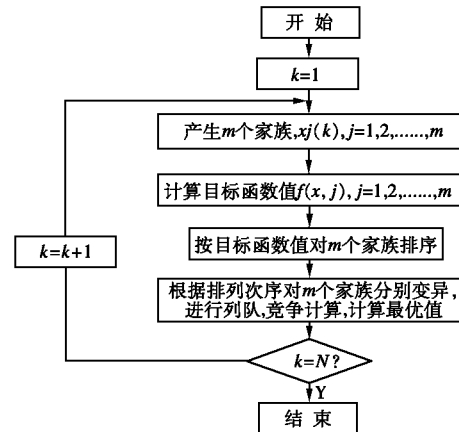


图 1 列队竞争算法的计算框图

3 用列队竞争算法解多产品间歇过程排序问题

用列队竞争算法来对多产品间歇过程排序进行优化时, 首先要解决的是染色体编码问题, 其次是选择策略和变异算子问题。至于家族排位由于目标函数是求 $C_{N,M}$ 的最小值, 这里的家族排位是按 $C_{N,M}$ 的升序进行排队的, 使目标函数值较小的家族靠前。

3.1 染色体编码

由于多产品间歇过程排序需要优化的是产品序列 X , 因此采用序列 X 本身进行编码是比较方便和直接的, 并且根据 (2) 式知道, 只要给定了产品加工序列 (由于 $t_{X_i,j}$ 是给定的), 就可以求得按照该加工序列进行加工的最早加工完成时间 $C_{N,M}$ 。

3.2 选择策略和变异算子

列队竞争算法的选择策略采用父子混合选择策略, 这种选择策略同自然选择的不同之处在于父代种群参与家族内部竞争, 这样使真正优秀的家族成员得以生存, 从而保证整个家族不会退化, 各家族并行进化的总体效果是“物种的进化”。

列队竞争算法的变异算子对算法的收敛性有很大的影响, 在实际应用中合理地制定出变异策略是至关重要的, 依据列队竞争算法的思想在制定变异策略时需遵循如下 2 条原则: 一是个体进行一次变

异操作,对系统结构的改变不会产生显著的差异;二是个体经过多次的变异操作,系统结构应有较大的改变,即要求随着变异操作次数,对系统结构的改变应具有量变引起质变的特性。根据这 2 个原则,这里选择倒位变异(inversion mutation,又叫反转变异),即随机的选择 2 个位置,并将这 2 个位置之间的基因串反转的变异,如下所示:

随机的选择 2 个位置

1 2 3 4 5 6 7 8 9

进行倒位变异运算后得到

1 2 6 5 4 3 7 8 9

对于产品加工问题,即随机的选择产品加工序列中 2 个位置,并将 2 个位置之间(包括这 2 个位置)的产品加工次序反转,得到新的产品加工序列。

4 算例分析

表 1 操作时间矩阵

产品 编号	间歇设备单元			产品 编号	间歇设备单元		
	1	2	3		1	2	3
1	61	2	56	5	11	14	20
2	42	32	42	6	35	89	75
3	1	31	71	7	66	8	25
4	46	98	42	8	25	46	44

表 2 简单遗传算法和本算法的比较

项目	简单遗传算法	本算法
种群规模	80	8
选择策略	轮盘赌	父子混合
交叉方法	部分匹配交叉(PMX)	无
变异方法	倒位变异	倒位变异
平均计算次数	962	966
终止代数	500	30
平均收敛次数	8.45	11.70
平均收敛概率/%	0.8784	1.211

注:分别对 2 种算法进行 100 次运算,平均计算次数指平均每次运算调用计算目标函数值的次数。

本文采用文献[8]上的例子,求解 8 产品、3 单元简化 UIS 流水作业车间的调度排序问题,操作时

间矩阵如表 1 所示。分别用简单遗传算法和本文所提供算法计算,比较结果见表 2。最优解为 {3, 8, 2, 5, 6, 1, 4, 7} 和 {3, 5, 8, 2, 6, 1, 4, 7}, 最短完工时间(411 min)优于文献报道用模拟退火法计算的结果(457 min)^[8]。最优调度的 Gantt 图(解为 {3, 8, 2, 5, 6, 1, 4, 7})见图 2。

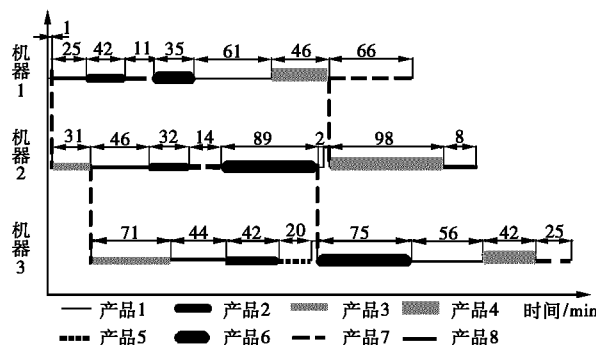


图 2 最优调度的 Gantt 图

通过比较可见,队列竞争算法在计算目标函数值的次数和简单遗传算法相当情况下,其收敛次数和概率均优于简单遗传算法,表明该方法比简单遗传算法求解效率高、收敛速度快。另外,由于本算法不象遗传算法那样考虑复杂的交叉方法。即使对于复杂编码问题也比较容易实现。

5 结语

用队列竞争算法求解多产品厂间歇排序问题,并根据多产品厂间歇排序问题特点,引入染色体编码方法、选择策略和变异方法。实例计算表明同已有的方法相比,该方法求解效率高,收敛速度快,使用简单方便,是一种求解多产品间歇过程排序问题的有效算法。

参考文献

[1] Rippin D W T. [J]. Comput Chem Eng, 1993, 17(S1): 1.
 [2] Ignall E, Schrage L. [J]. Operations Research, 1965, 13: 349.
 [3] Reeves C R. [J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(1): 5.
 [4] 王举. [J]. 化工学报, 2000, 51(6): 751.
 [5] Yan Liexiang. [J]. Comput Chem Eng, 2003, 27(2): 251.
 [6] 鄢烈祥, 麻德贤. [J]. 化工学报, 1999, 50(5): 663.
 [7] Ku H M, Karimi I. [J]. Ind Eng Chem Res, 1980, 27(10): 1840.
 [8] 宋建成. 间歇过程计算机集成控制系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999. 206. ■