

差异工件并行批调度问题中遗传算法研究^①



杨 栋

(中国科学技术大学 管理学院, 合肥 230026)
通讯作者: 杨 栋, E-mail: sa162040@mail.ustc.edu.cn

摘 要: 本文考虑了遗传算法在包含差异工件的并行批处理机调度中的应用问题. 工件具有不同的尺寸和到达时间. 首先基于问题假设提出了一个数学规划模型, 并采用 BF、ERT-LPT 实现工件的分批排序调度. 然后考虑到这是一个 NP-Hard 问题, 设计了新的选择、交叉、变异操作并结合遗传算法进行求解. 最后通过仿真实验对比, 验证了算法的有效性.

关键词: 遗传算法; 并行批; 生产调度; 差异工件

引用格式: 杨栋. 差异工件并行批调度问题中遗传算法研究. 计算机系统应用, 2019, 28(10): 196-200. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7117.html>

Research on Genetic Algorithm for Scheduling of Parallel Batch Processing Machines with Non-Identical Job Sizes

YANG Dong

(School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: This study considers the application of genetic algorithm for scheduling of parallel batch processing machines with non-identical job sizes. Jobs have different sizes and release times. Firstly, we propose a mathematical programming model based on the hypothesis of the problem, and use BF and ERT-LPT to implement batch scheduling of jobs. Secondly, since the problem considered is NP-Hard, we design a new selection, crossover and mutation operation and solve it with genetic algorithm. Finally, the effectiveness of the algorithm through simulation experiments is verified.

Key words: genetic algorithm; parallel batch; scheduling; non-identical job sizes

生产调度问题,就是在有限资源与时间内,最大效率的完成指定的生产目标.关于生产调度问题的研究一直是现今学界研究的热点.一些学者对单机批调度问题展开了研究. Uzsoy^[1]最先考虑了差异工件单机批调度中最小化最大完工时间 Cmax 的问题,并且证明其为 NP-hard 类问题. Lee^[2]在 Uzsoy^[1]的研究基础上,在单机批调度问题中考虑了工件动态到达约束. Mosheiov 和 Oron^[3]与 Cheng 等^[4]均考虑了其他调度目标,其中 Mosheiov 和 Oron^[3]考虑了单机批调度中最小化总流经时间问题,而 Cheng 等^[4]考虑了单机批调度中最小化模糊完工时间问题. 刘娟和陈华平^[5]提出了一

种求解单机批调度问题的改进 PSO 算法,并验证了算法的性能. 吴愁^[6]在单机批调度问题研究中考虑了能耗情况. 而并行批调度研究是对单机批调度问题的进一步拓展. 一些学者对不同算法在并行批调度问题中的应用进行了研究. Damodaran 和 Chang^[7]提出了一些启发式算法来求解最小化制造跨度并行批调度问题. 然而这些算法的局限之处在于,求解大规模工件问题得到的解的质量要弱于一些智能优化算法. 郭乘涛和江志斌^[8]提出了一种混合型蚁群算法来解决并行批调度中工件动态到达组批难问题; 王庆^[9]提出了一个混合粒子蜂群算法,并将其运用于并行批调度问题研究之中.

① 基金项目: 国家自然科学基金(重点项目)(71631006)

Foundation item: Key Program of National Natural Science Foundation of China (71631006)

收稿时间: 2019-03-24; 修改时间: 2019-04-17; 采用时间: 2019-04-23; csa 在线出版时间: 2019-10-15

程八一等^[10]考虑了最小化联合成本并行批调度问题,并设计了一种多项式时间近似算法.李国臣等^[11]和张震等^[12]分别考虑了能耗约束和模具约束并行批调度问题.

本文对遗传算法在差异工件动态到达约束下并行批调度问题中的应用展开了研究.首先根据问题假设建立了一个混合整数规划模型.采用BF、ERT-LPT规则对工件进行分批排序.然后设计了新的选择、交叉、变异操作并结合遗传算法进行求解.

1 问题描述

本文研究了差异工件的并行批调度问题,该问题的具体特征描述如下:

- (1) 差异工件集合 $J = \{1, 2, \dots, n\}$, 其中, 工件 j 所需的加工时间为 p_j , 其尺寸为 s_j ;
- (2) 批处理机器集合 $K = \{1, 2, \dots, m\}$, 其中所有批处理机器的容量均为 C ;
- (3) 工件加工批次集合 $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$, 差异工件分批次加工, 且同一批中工件的总尺寸需不超过 C ;
- (4) 工件动态到达, 工件 j 的到达时间为 r_j , 工件在到达时间之前不允许加工;
- (5) 批的加工时间为批中工件最大的加工时间, 批的到达时间为批中最晚到达工件的到达时间;
- (6) 批的加工无法中断, 工件加工不允许抢占;
- (7) 优化目标是 minimized 制造周期, 即 makespan.

根据上述描述, 本研究差异工件的并行批调度问题的数学模型为:

$$\text{Min } C_{\max} \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \sum_{b=1}^{|B|} x_{jb} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^m y_{bk} = 1, \quad b = 1, 2, \dots, |B| \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^n s_j x_{jb} \leq C, \quad b = 1, 2, \dots, |B| \tag{4}$$

$$PT_{bk} \geq p_j y_{bk}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

$$RT_{bk} \geq r_j y_{bk}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

$$ST_{bk} \geq PT_{b-1,k}, \quad b = 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m \tag{7}$$

$$ST_{bk} \geq RT_{bk}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m \tag{8}$$

$$\left| \sum_{j=1}^n s_j / C \right| \leq |B| \leq n \tag{9}$$

$$CT_{bk} = ST_{bk} + PT_{bk}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m \tag{10}$$

$$C_{\max} \geq CT_{bk}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m \tag{11}$$

$$x_{jb} \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, |B| \tag{12}$$

$$y_{bk} \in \{0, 1\}, \quad b = 1, 2, \dots, |B|; k = 1, 2, \dots, m \tag{13}$$

式 (1) 表示的是本研究数学模型的优化目标; 式 (2) 表示的是一个工件只能分配到一个批次; 式 (3) 表示的是一个批次只能由一个机器进行加工; 式 (4) 表示的是同一批次所加工工件尺寸的容量约束; 式 (5) 表示在机器 k 上加工的批 b 的加工时间; 式 (6) 表示在机器 k 上加工的批 b 的到达时间; 式 (7)、式 (8) 表示的是系统对批的开始加工时间的约束, 即工件加工不允许抢占约束, 批中工件全部到达之后才能开始加工; 式 (9) 表示批的数量约束; 式 (10)、式 (11) 表示的是模型制造跨度的计算方法; 式 (12)、式 (13) 则是对两个 0-1 变量的描述.

2 遗传算法在并行批处理机调度中的应用

自 1975 年 Holland 教授提出遗传算法以来, 由于遗传算法所具有的独特求解复杂的优化问题的优势, 大量学者对遗传算法的理论研究方向以及应用研究方向展开了深入研究. 本文就是对差异工件并行批调度问题中遗传算法应用方向展开研究的.

2.1 遗传算法简介

遗传算法是通过模拟生物进化过程求得最优解的方法. 遗传算法一般计算流程如图 1 所示.

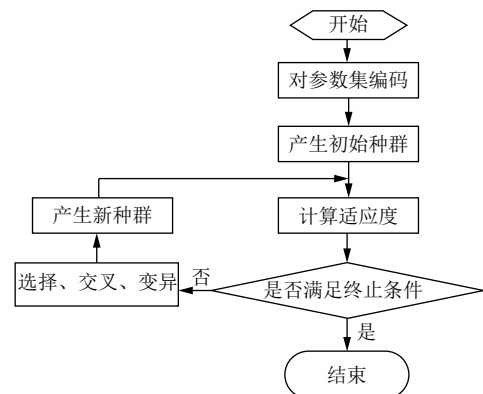


图 1 遗传算法计算流程图

2.2 编码与分批排序策略

常见用来求解批调度问题的编码方式有两种: 基于批和基于工件序列. 本文采用基于工件序列的编码方式, 即用一组 1~n 的数字排列代表一个可行解, 如表 1 所示.

表 1 基于工件序列的编码方式

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
工件编号	7	5	3	2	1	8	4	6

不同的排列中工件的位置不同, 根据后面提出的调度策略可以生成不同的调度方案.

分批与排序是批调度中最重要的两个决策过程, 决策的好坏直接影响解的质量. 本文考虑采用 BF 规则进行分批, 采用 ERT-LPT 规则安排批在机器上的加工顺序. 两种规则的具体实现步骤如下:

BF 规则:

- (1) 给定一个工件序列;
- (2) 选择序列中第一个工件, 在所有批中查找能容纳该工件且剩余容量最小的批, 并将该工件加入到该批中; 否则, 新建一个批并将该工件加入到新批中;
- (3) 重复步骤 2, 直到所有工件完成分批.

ERT-LPT 规则:

- (1) 计算所有批的到达时间、加工时间. 批的到达时间为批中最晚到达工件的到达时间, 批的加工时间是批中工件最大的加工时间;
- (2) 将批按到达时间的先后顺序排列, 若有多个批的到达时间相同, 则按照批的加工时间长短顺序进一步排列;
- (3) 选择当前处于空闲的状态的机器, 将批序列中首个批次安排在该机器上加工;
- (4) 重复步骤 (3), 直到所有批调度完成, 最后计算 makespan.

2.3 面向并行机批调度问题的遗传算法

遗传算法是基于种群的进化算法, 通过染色体的选择、交叉、变异操作生成新一代种群, 然后在整个解空间迭代优化寻找最优解. Damodaran 等^[13]提出了一种遗传算法求解单机批调度问题. 本文在此基础上, 考虑新的选择、交叉、变异算子结合遗传算法对并行批处理机调度问题进行求解.

(1) 选择

选择操作是首先寻找适应度较高的个体作为母本,

适应度用来评价个体的优劣程度. 根据前文提出的 BF、ERT-LPT 规则可以计算出个体的 makespan 值. 本文中选定以下公式作为适应度函数:

$$fitness(i) = e^{-C_{max}(i)} \quad (14)$$

选取指数函数作为适应度函数, 是因为在公式中采用指数函数可以提高算法的收敛速度^[14].

然后基于比例选择的方式挑选优势个体, 其中优势个体选择概率为:

$$p(i) = \frac{fitness(i)}{\sum_{j \in pop} fitness(j)} \quad (15)$$

其中, pop 为当代种群. 显然, 个体适应度越大, 被选择的几率越大.

(2) 交叉

交叉操作是遗传算法中生成子代种群最有效、最直接的方法. 好的交叉策略能够提高算法的搜索能力, 节省运算时间. 常见的交叉操作有单点交叉、双点交叉. 本文通过利用一组随机浮点数组实现一种新的交叉方式, 具体如图 2 所示.

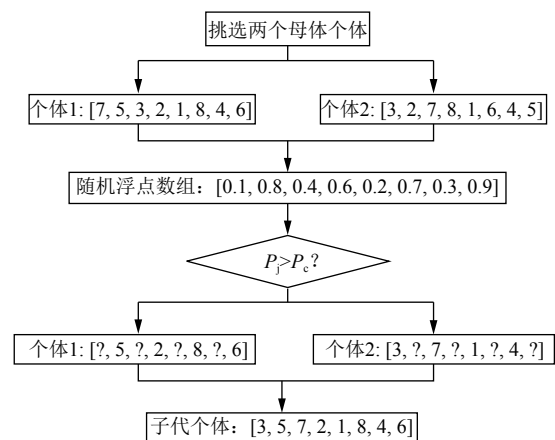


图 2 交叉操作

图 2 中, 我们先挑选工件规模为 8 的两个个体作为母本, 分别是: 个体 1[7, 5, 3, 2, 1, 8, 4, 6]、个体 2[3, 2, 7, 8, 1, 6, 4, 5]. 然后随机生成一组浮点数组[0.1, 0.8, 0.4, 0.6, 0.2, 0.7, 0.3, 0.9]. 我们设交叉概率 $p_c=0.5$, 对于个体 1 来说, 当 $p_j > p_c$ 时, 子代保留个体 1 的基因特征, 其余位置上的工件我们根据个体 2 中这些工件的相对位置来决定相应的次序. 如此我们可以得到这样一个子代个体, 它的 2、4、6、8 号位置上的工件和个体 1 一致, 为 5、2、8、6; 它的 1、3、5、7 号位置上的

工件和个体 2 一致, 为 3、7、1、4。最后, 得到一个子代个体[3, 5, 7, 2, 1, 8, 4, 6]。

(3) 变异

生物在遗传过程中, 难免会发生变异。遗传算法中同样引入了这种思想。对于新生成的个体, 设变异概率为 p_m , 当随机数 $rand < p_m$ 时, 我们随机交换个体中两个位置的工件, 以此作为变异操作。

综上所述, 本文将以上 3 种遗传操作嵌入到遗传算法中, 并结合上文提出的启发式算法来对并行批处理机调度问题求解, 算法框架如表 2 所示。

表 2 算法框架

算法.面向并行批处理机调度问题的遗传算法	
1	参数设置: 设定种群规模、迭代次数 (NC)、交叉概率、变异概率等;
2	初始化种群;
3	开始迭代 (While $t < NC$);
4	根据 2.2 节中分批排序规则计算每个个体的 makespan 及适应度值;
5	根据 2.3 节中遗传操作生成下一代的种群;
6	$t=t+1$;
7	终止迭代 (End While);
8	输出最优解以及调度方案。

3 仿真实验设计与分析

3.1 仿真实验设计

本文根据吴愁^[6]提出的方法生成随机算例。算例规模从 5 个角度进行划分: 工件数量、工件尺寸、加工

时间、到达时间和机器数量。我们考虑了规模分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 的差异工件算例, 工件尺寸从 [1, 10] 随机生成, 加工时间从离散均匀随机分布 [8, 15] 中产生, 机器数量设置为 2, 工件的到达从 [0, R] 中生成, 其中 $R = \sum s_i p_i / M / C$ 。实验中机器容量均设为 20。算例规模如表 3 所示。

表 3 算例规模

因素	水平
n	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
s	Uniform [1, 10]
p	Uniform [8, 15]
r	Uniform [0, $\sum s_i p_i / M / C$]
m	2

为了比较算法的性能, 我们将提出的算法和粒子群算法 (PSO) 作了实验对比, 同时对于每个算例, 首先使用 BFLPT-ERTLPT (以下简称 BFLPT) 启发式算法进行了求解, BFLPT 的实验结果也纳入到实验对比当中。每个算例运行 5 次取平均值。所有算法都由 Matlab 实现, 实验环境为 4 G RAM, 2.3 GHz 的 Windows7 电脑。

3.2 实验结果分析

实验结果如表 4 所示, 遗传算法 GA 与粒子群算法 PSO 结果中均包含解的质量与运算时间。而由于 BFLPT 算法的运算时间很短暂, 不具有对比性, 所以并没有在结果表中列出。表 4 中第 7 列与第 8 列分别表示的是遗传算法与 PSO 以及 BFLPT 算法解的质量对比, 其计算方式为:

表 4 结果比较

工件	GA		PSO		BFLPT	Over PSO	Over BFLPT
	avg C_{max}	time	avg C_{max}	time	avg C_{max}		
10	24	1.01	24	1.78	25	0.00	4.00
20	46.6	2.60	45.6	3.34	56	-2.19	16.79
30	74.8	4.64	76.4	5.52	86	2.09	13.02
40	86.2	6.95	82.8	7.44	104	-4.11	17.12
50	122.2	10.72	123.6	11.45	141	1.13	13.33
60	126	14.89	126.6	15.24	149	0.47	15.44
70	143.8	19.30	148	19.19	175	2.84	17.83
80	177.4	26.27	188.4	27.04	205	5.84	13.46
90	169.6	28.02	191.4	28.15	203	11.39	16.45
100	216.4	38.14	241.6	37.71	286	10.43	24.34

$$Over PSO = \frac{avg C_{max}(PSO) - avg C_{max}(GA)}{avg C_{max}(PSO)} * 100 \quad (16)$$

$$Over BFLPT = \frac{avg C_{max}(BFLPT) - avg C_{max}(GA)}{avg C_{max}(BFLPT)} * 100 \quad (17)$$

从表 4 中我们可以看出遗传算法 GA 的运行时间

大多数情况都小于粒子群算法 PSO 的运行时间。图 3 是表 4 中第 2 列、第 4 列与第 6 列结果对比折线图。从图 3 中我们可以清晰的观察到遗传算法 GA 与其他两种算法解的质量之间的对比情况。图 4 是表 4 中第 7 列与第 8 列结果改进柱状图。从图 4 中我们可以清晰

的观察到遗传算法 GA 与其他两种算法解的质量改进程度. 如图 3 与图 4 所示, 随着工件规模的逐渐增大, 遗传算法 GA 较之其他两种算法的优势变得十分明显.

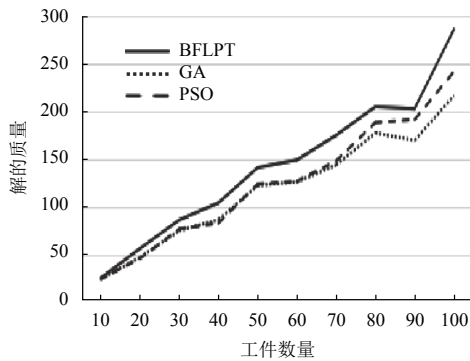


图 3 不同工件规模下解的质量

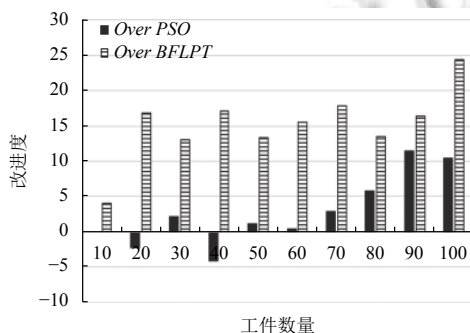


图 4 不同工件规模下解的质量改进

4 结论与展望

本文研究了遗传算法在考虑差异工件的并行批处理机调度中的应用问题. 首先提出了一个数学规划模型, 并采用 BF 规则对工件进行分批, 采用 ERT-LPT 规则将批分配在机器上加工. 我们提出了一种基于随机浮点数组的交叉操作, 并将其嵌入到遗传算法进行求解. 实验结果表明, 我们提出的算法不论是在解的质量上还是运行时间上, 相比 PSO 算法都具有很大的优势, 尤其是在大规模工件算例中优势会更加明显.

未来的研究可以考虑更复杂的生产加工模型, 例如多阶段流水车间、柔性车间等; 也可以研究其他的一些优化目标, 例如最大延时时间、延迟工件数等.

参考文献

- Uzsoy R. Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes. *International Journal of Production Research*, 1994, 32(7): 1615–1635. [doi: 10.1080/00207549408957026]
- Lee CY. Minimizing makespan on a single batch processing machine with dynamic job arrivals. *International Journal of Production Research*, 1999, 37(1): 219–236. [doi: 10.1080/002075499192020]
- Mosheiov G, Oron D. A single machine batch scheduling problem with bounded batch size. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(3): 1069–1079. [doi: 10.1016/j.ejor.2006.01.052]
- Cheng BY, Li K, Chen B. Scheduling a single batch-processing machine with non-identical job sizes in fuzzy environment using an improved ant colony optimization. *Journal of Manufacturing Systems*, 2010, 29(1): 29–34. [doi: 10.1016/j.jmsy.2010.06.007]
- 刘娟, 陈华平. 基于云模型的 PSO 算法求解差异工件单机批调度问题. *计算机系统应用*, 2010, 19(2): 164–168. [doi: 10.3969/j.issn.1003-3254.2010.02.039]
- 吴愁. 遗传算法在考虑能耗的单机批调度中的应用. *计算机系统应用*, 2018, 27(8): 138–145. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.006489]
- Damodaran P, Chang PY. Heuristics to minimize makespan of parallel batch processing machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(9–10): 1005–1013. [doi: 10.1007/s00170-007-1042-8]
- 郭乘涛, 王志斌. 应用混合蚁群算法求解并行批处理机组批与调度问题. *上海交通大学学报*, 2010, 44(8): 1068–1073.
- 王庆. 并行多机批调度的问题研究[硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- 程八一, 黄小曼, 杨艳艳, 等. 差异分批模式下的联合成本优化问题及算法. *管理科学学报*, 2016, 19(8): 102–112. [doi: 10.3969/j.issn.1007-9807.2016.08.008]
- 李国臣, 乔非, 王俊凯, 等. 考虑能耗约束的并行机组批调度. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(8): 2063–2072. [doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.08.013]
- 张震, 尤凤翔, 赵欣桥. 有模具约束的并行机批量流调度问题研究. *工业工程*, 2018, 21(3): 59–64. [doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2018.03.007]
- Damodaran P, Manjeshwar PK, Srihari K. Minimizing makespan on a batch-processing machine with non-identical job sizes using genetic algorithms. *International Journal of Production Economics*, 2006, 103(2): 882–891. [doi: 10.1016/j.ijpe.2006.02.010]
- 陈成栋. 两阶段流水车间批调度问题的蚁群算法研究[硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.