

并行机环境下的多目标 Job_Shop 调度问题研究*

刘佳, 刘林

(合肥工业大学 管理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 分析并讨论了带调整时间即换模具时间, 综合考虑工件完工时间、不同交货期窗口下的提前/拖期惩罚、并行机环境下的多目标 Job_Shop 调度问题, 提出了一种基于不同工件工序排序的染色体编码方式, 利用稳步遗传算法求解, 并融合变邻域搜索和依角度聚类的方法, 使得求得的 Pareto 解集在质量和分布上均有较好的效果。仿真实验表明了此种算法的可行性和有效性。

关键词: Job_Shop 调度; 多目标; 并行机; 混合遗传算法

中图分类号: TP3-05

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)12-0064-04

Job_Shop scheduling problem in parallel machine environment under the multi-target

Liu Jia, Liu Lin

(School of Management, Hefei University of Technology, HeFei 230009, China)

Abstract: In the circumstance of multi machine Job_Shop scheduling, restricting to order-dependent setup-time and taking an overall consideration of the two factors-completion time and earliness/tardiness penalties, this research proposes a hybrid genetic algorithm based on sequential coding of jobs on machines and interleaved mode in genes and integrates variable neighborhood search (VNS) and cluster analysis, making the Pareto solution set more effective in quality and distribution.

Key words: Job-Shop scheduling; multi-objective; multi machine; hybrid genetic algorithm

传统的 Job_Shop 调度问题常将工件的最大完工时间最小化作为调度问题的优化目标, 但在实际生产调度中, 不同的需求考虑其调度问题目标应该是两个或者两个以上的。例如在 Just-In-Time (JIT) 生成中将工件的提前和拖期惩罚作为首要性能指标, 提前或拖期完成任务都会影响库存成本或生产成本。多机并行作业车间调度问题由于工件具有多个可选择的加工机器, 更加符合实际的生产环境。本文从实际生产出发, 综合考虑所有工件的完工时间和提前/拖期惩罚。

目前, 已有学者对此问题进行了研究。参考文献[1]在此多目标的基础上提出了一种多目标粒子群算法。参考文献[2]用遗传算法解决在并行机条件下的带有不同交货期窗口的单目标 Job_Shop 调度问题。在考虑总生产时间时, 多数研究并没有顾及生产的调整时间或将调整时间简化到生产时间的一部分, 忽略了实际中调整时间

序依赖的特性^[3-10], 参考文献[11]就调度中调整时间的研究做了详细的综述。受此类文献启发, 本文以带调整时间的多机并行作业车间调度问题为研究对象, 综合考虑最小化工件最大完工时间、最小化提前/拖期惩罚的多目标, 针对其序依赖的特性提出了一种基于不同工件工序排序的染色体编码方式, 结合变邻域局部搜索和依角度聚类处理, 对个体进行双点交叉、依小概率变异操作, 使得到的结果在质量和分布上均有较好的效果。

1 问题描述

1.1 变量表示及假设

本文所考虑的并行机下 Job_Shop 调度问题是指: n 个工件, 在 m 种机器类型上加工, 每种类型的机器有 r_k 台并行工作, 即若某工件在该类型机器上加工, 可选择该类型机器上的任意一台机器加工。每个工件有自己的加工路径, 并且每个工件不要求必须在每种类型机器上

* 基金项目: 国家自然科学基金(71171071); 安徽省高校省级自然科学基金项目(重点)(KJ2011A215); 合肥工业大学博士学位专项基金(GDBJ2010001)

技术与方法 Technique and Method

都加工。所有工件的加工路径是确定的,且工序在不同类型机器上加工时间不同,不同工件之间有不同的换模具时间 S_{i12n} ,要求确定各机器上工件的加工顺序,并使得到的解是满意的解。

各变量表示: n 为工件总数; w 为机器类型数目; I 为工件集合, $I=\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$, 共计 n 个工件; O_i 为工件 i 包含的工序集合, $O_i=\{1, 2, \dots, j, \dots, O_i\}$, 即工件 i 有 O_i 道工序; M 为机器类型集合, $M=\{1, 2, \dots, k, \dots, w\}$, 即机器类型为 w 种; R_k 为 k 类型机器集合, $R_k=\{1, 2, \dots, q, \dots, r_k\}$, 即 k 类型机器有 r_k 台, 其中 $k=1, 2, \dots, w$; ST_{ijkq} 为工件 i 第 j 道工序在 k 类型机器的第 q 台机器上加工的开始时间; p_{ijkq} 为工件 i 第 j 道工序在 k 类型机器的第 q 台机器上加工的时间; ET_{ijkq} 为工件 i 第 j 道工序在 k 类型机器的第 q 台机器上加工的结束时间; S_{i12n} 为工件 i 换模具调整时间; c_i 为工件 i 的实际完工时间; h_i, w_i 为提前、拖期惩罚系数; $[e_i, t_i]$ 为工件 i 的交货期窗口时间。

基本约束条件如下:

- (1) 按照工件的工艺要求,其工序有着顺序约束;
- (2) 同一时刻,一台机器上只能加工一个工件,且一个工件某一时刻只能在一台机器上加工,加工不能中断;
- (3) 不同工件之间没有优先关系;
- (4) 整个加工过程中,每个工件不能在同一类型的机器上加工多次;
- (5) 在零时刻,所有的机器都空闲,所有的工件都可被加工,在加工过程中,机器不发生故障;
- (6) 每个工件每道工序在某类型机器上的加工时间已知并相同,但在带有并行机的某类型机器中哪台机器上加工未知;
- (7) 所有工件的加工路线已知,每个工件有特定的加工路线,可能与其他工件加工路线不同。

1.2 调度问题假设及模型

调度问题数学模型:

$$\min Z_1 = \max\{c_i\}$$

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^n (h_i \max(0, e_i - c_i) + w_i \max(0, c_i - t_i))$$

$$\text{st. } ET_{ijkq} = ST_{ijkq} + p_{ijkq} + S_{i12n} \quad (1)$$

$$ST_{ijkq} \geq ST_{i(j-1)kq} + p_{i(j-1)kq} \quad (2)$$

$$ST_{opkq} \geq ST_{ijkq} + p_{ijkq} \quad \forall ST_{ijkq} \geq ST_{opkq} + p_{opkq} \quad (3)$$

式(1)表示工件 i 的第 j 道工序在机器类型 k 上的第 q 台机器的结束时间等于工件 i 的第 j 道工序在机器类型 k 的第 q 台机器上的开始时间、工件 i 的第 j 道工序在 k 类型机器上的第 q 台机器的加工时间、加工工件 i 的第 j 道工序的调整时间之和。式(2)表示工件加工的序依赖,即工件 i 的第 j 道工序必须在第 $j-1$ 道工序完成后才能开始。式(3)表示在某一确定时刻,机器类型 k 的第 q 台机器不能同时加工任意两个工件 o 和 i 。

2 混合遗传算法流程

结合变邻域搜索的局部搜索能力,采用基于机器上不同工件工序排序的染色体编码对个体进行双点交叉、依小概率变异,从而较好地处理调度问题中优化目标的序依赖问题。算法的具体流程如下:(1)基于不同工件工序排序对染色体进行编码;(2)人工修正并优化编码,得到初始种群;(3)计算个体适应度,并在此基础上依角度聚类;(4)对优秀的染色体进行变邻域搜索;(5)对染色体进行交叉变异迭代;(6)循环至输出结果。

3 混合遗传算法介绍

3.1 稳步遗传算法

3.1.1 染色体编码

采用基于不同工件工序排序的染色体编码方式,即每个工件的工序都用相应的工件号表示,并且每个工件号出现的次数为此工件的工序总数,然后根据工件号在染色体中出现的次序编译,第 k 次出现的工件编号表示工件的第 k 道工序,每个工件编号在染色体中的前后位置代表了该工件的加工顺序。染色体长度为所有工件的工序总和,即 $l = \sum_{i=1}^n O_i$ 。

例如:如果有 $J=\{1, 2\}$, $O_1=\{1, 2\}$, $O_2=\{1, 2, 3\}$, 染色体编码为:Chromosome={1, 2, 2, 1, 2}。

3.1.2 计算适应度值

以 Z_1, Z_2 目标函数加权(加权系数分别为 α, β)定义适应度函数 f ,基于目标函数对个体进行评价,定义为:

$$f = 1/(\alpha Z_1 + \beta Z_2), \text{ 此处 } \alpha = 0.5, \beta = 0.5.$$

3.1.3 遗传操作

(1)选择:采用最佳个体保存、依角度聚类和变邻域搜索3种策略相结合的方式,按最佳个体保存方法保留最优个体,将当前群体中适应度最高的 i 个染色体直接进入下一代种群;结合依角度聚类和变邻域搜索对剩余染色体进行选择。

(2)交叉:采用两点段交叉法,按交叉概率 P_c 在临时种群中选择数对个体,在每对个体上随机确定两个固定的点,若这两个点之间的相同工件的数目相同,则把两个固定的点之间的基因进行交叉;否则不进行交叉。

(3)变异:为了保证种群的稳定性,选择变异发生概率 $P_m \leq 0.001$ 选择个体,然后在选择的个体上随机选择两个点,再将这两个点的基因交换。

3.1.4 解码操作

带有并行机的混合 Job_Shop 调度问题的解码操作有两个关键点:确定当前工序在哪台机器上加工;确定当前工序的开始加工时间和完成时间。

(1) 确定当前工序的加工机器

根据染色体,确定该染色体对应的工序加工工序串;根据染色体和该染色体对应的加工工序串,确定机器类型串;根据工件 i 所对应的工序 j 和加工机器类型

技术与方法 Technique and Method

k , 同时考虑当前工序允许加工的最早开工时间和机器当前空闲时间两种因素选择机器。在 k 类型的 r_k 台机器中找出结束时间最小的机器 q , 并在其上安排工件 i 的第 j 道工序的加工操作。如果存在优先顺序相同的机器, 则从中随机选择机器。

(2) 根据确定的机器, 确定当前工序的开始加工时间

将当前工序 O_{ijk} 以在机器 q 上的最早允许加工时间加工, 即从零时刻到当前时刻对该机器上的加工空闲依次判断能否将此工序插入加工。若能, 则在空闲中插入加工, 并修改该机器上的加工队列; 否则, 以当前时刻加工该工序, 将此工序排在机器当前队列的队尾。

用 $ET_{i(j-1)*}$ 表示工件 i 的第 $(j-1)$ 道工序加工结束时间, 工序 O_{ijk} 在空闲时间段 $[t_a, t_b]$ 中插入的条件是:

$$\max(ET_{i(j-1)*}, t_a) + p_{ijk} + S_{i12m} \leq t_b$$

如果工序 O_{ijk} 在空闲中插入, 则工序开始加工时间为:

$$ST_{ijk} = \max(ET_{i(j-1)*}, t_a)$$

工序的完工时间为: $ET_{ijk} = ST_{ijk} + p_{ijk} + S_{i12m}$

如果工序 O_{ijk} 在机器当前队列的末尾插入, ET_{*kq} 表示 k 类型 q 机器原加工结束时间, 则工序的开工时间为:

$$ST_{ijk} = ET_{i(j-1)*}, ET_{*kq} \leq ET_{i(j-1)*}$$

或者 $ST_{ijk} = ET_{*kq}, ET_{*kq} > ET_{i(j-1)*}$

工序的完工时间为: $ET_{ijk} = ST_{ijk} + p_{ijk} + S_{i12m}$

此时, k 类型机器 q 上的新加工结束时间为:

$$ET_{*kq} = ET_{ijk}$$

3.2 依角度聚类分析

用向量夹角表示点与点之间的距离, $d_{ij} = \frac{X_1 \times X_2}{|X_1| \times |X_2|}$,

X_1 和 X_2 为两个点的坐标。本文在染色体计算适应度以后, 用依角度聚类将初始种群进行分类, 并在每一类中保留 Pareto 优解。若优解个数不止一个, 则随机保留一个。

3.3 变邻域搜索算法

变邻域搜索方法 VNS (Variable Neighborhood Search) 是一种局部搜索算法, 它采用两种或者两种以上的邻域结构, 当其中一个邻域陷入局部最优时即改用其他邻域生成方法。本文所使用的 VNS 算法选用两种邻域结构——插入邻域和交换邻域。其应用规则如下: (1) 插入邻域操作: 随机选取序列中一个工件, 将该工件随机插入其他任一工件之前; (2) 交换邻域操作: 随机选取序列中两个工件, 将这两个工件的位置互换。

对于聚类保留下来的个体, 随机地用插入或交换操

作进行变邻域搜索。当迭代规定次数没有更优则换一个操作。若优于原排序则替换。达到迭代次数要求后停止算法。对于产生的解都依据评价标准对其判读是否可行或更优, 避免产生非法解。

4 仿真实验及分析

4.1 评价标准

对于多目标算法的 Pareto 解集, 本文从解的质量和分布两方面来比较。

(1) 解的质量: 假定评价的两个 Pareto 解集分别为 A_1 与 A_2 。将这两个解集叠加得到一个新的 Pareto 解集 A , 若新的解集中属于原解集 A_1 的解的数量为 a_1 , 属于原解集 A_2 的解的数量为 a_2 , 则 A_1 解的质量可描述为: $Q(A_1) = a_1 / (a_1 + a_2)$ 。

(2) 分布范围: 设 z^0 与 z^1 为集合 A 中的任意解, $f_i(z^0)$ 和 $f_i(z^1)$ 分别表示其在目标 i 上的目标函数值, F_i^{\max} 和 F_i^{\min} 为所有参与比较算法所得解的最大与最小目标值, 则解集 A 分布情况的计算公式如下:

$$FS(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \max_{(z^0, z^1) \in A \times A} \left\{ \left(\frac{f_i(z^0) - f_i(z^1)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \right)^2 \right\}}$$

4.2 实验结果

4.2.1 参数设置

本文参数如下: 初始种群为 50, 迭代次数为 50, 聚类数为 8, VNS 搜索迭代次数为 10, 工件的工序、加工时间、换模具时间和交货期随机生成, 加工时间范围为 $[5, 20]$, 换模具时间范围为 $[0, 5]$, 交货期范围为预计生产周期的 0.8~1.2 倍。

4.2.2 试验结果

在 5 种不同规模的条件下, 将本文设计的多目标混合遗传算法 (HGA) 同多目标遗传算法 (GA) 和多目标粒子群优化算法 (PSO) 对解的质量和分布以及各算法在两目标上各自的最小值进行比较。每个规模做 5 次模拟取数据平均值。比较结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 该算法在解的质量、分布以及单个目标的优化方面都有很明显的效果。

本文以带准备时间的多目标多机并行作业车间调度问题为研究对象, 建立相关模型并针对此问题提出了一种新的解决多目标调度问题的混合遗传算法。算法基于机器上不同工件工序排序的染色体编码, 结合聚类分

表 1 算法质量、分布及最小值对比

规模	质量			分布			最小值		
	HGA	GA	PSO	HGA	GA	PSO	HGA	GA	PSO
8×6×12	0.74	0.12	0.14	1.624	1.927	1.414	85/284	85/313	86/336
10×8×15	0.851	0.064	0.085	1.414	0.648	0.477	158/925	160/863	158/950
20×8×15	0.975	0	0.025	1.562	0.680	0.182	332/6 306	354/6 986	361/6 948
30×10×20	1	0	0	2	1.301	0.862	495/31 667	522/31 829	524/31 814
50×15×30	0.976	0	0.024	1.380	1.250	0.636	883/91 570	893/91 901	895/89 429

技术与方法 Technique and Method

析和变邻域搜索。实验结果显示,该算法很好地处理了多目标调度中的不同目标干扰问题,在解的质量和均匀度上均有较好的效果。在依角度聚类上,对于3个或更多目标操作仍有限制,所以该算法对于目标数超过两个的调度问题可能不具有优势。

参考文献

- [1] 雷德明,吴智铭.基于粒子群优化的多目标作业车间调度[J].上海交通大学学报,2007,41(11):1796-1800.
- [2] 童刚,李光泉,刘宝坤.用遗传算法解决在并行机上带有不同交货期窗口的Job-Shop调度问题[J].系统工程,2008,18(3):37-42.
- [3] 王凌.车间调度及其遗传算法[M].北京:清华大学出版社,2003:56-101.
- [4] 胡建军,唐常杰,段磊,等.基因表达式编程初始种群的多样化策略[J].计算机学报,2007,30(2):305-311.
- [5] 王海瑶,蒋增强,葛茅根.基于规则组合的Job Shop多目标柔性调度方法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(1):20-52.
- [6] 赵韩,高先圣,姜康.基于免疫遗传算法的多目标柔性作业车间调度研究[J].系统仿真学报,2008,20(22):6163-6168.
- [7] MANSOURI S A.Multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines[J].European Journal of Operational Research,2005,167(3):696-716.
- [8] VINCENT T,NICOLAS M,FABRICE T.An ant colony optimization algorithm to solve a 2-machine bicriteria flow shop scheduling problem[J].European Journal of Operational Research,2002,142(2):250-257.
- [9] VINCENT T.Solving a bicriteria scheduling problem on unrelated parallel machines occurring in the glass bottle industry[J].European Journal of Operational Research,2001,135(1):42-49.
- [10] Alvanez-Valdes R,FUETES A,TAMARIT J M,et al.A heuristic to schedule flexible Job-Shop in a glass factory[J].European Journal of Operational Research,2005,165(2):525-534.
- [11] ALLAHVERDI A,NG C T,CHENG T C E.A survey of scheduling problems with setup times or costs[J].European Journal of Operational Research,2008,187(3):985-1032.

(收稿日期:2012-02-22)

作者简介:

刘佳,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:作业车间调度。

刘林,男,1964年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向:车间生产调度及排产。