

## 多阶段人机协同求解动态柔性作业车间调度问题

张国辉<sup>a</sup>, 王永成<sup>a</sup>, 张海军<sup>b</sup>

(郑州航空工业管理学院 a. 管理科学与工程学院, b. 机电工程学院, 郑州 450015)

**摘要:** 针对柔性作业车间生产环境中机器故障的动态调度问题, 以最小最大完工时间和最小偏差为目标, 结合车间调度人员的经验建立多阶段人机协同动态调度策略. 在不同阶段该策略的调度人员可参与优化过程, 提高方案的可行性和稳定性. 设计外部精英库中最优解的更新方法, 依据海明距离保留具有相同目标值的多种调度方案. 最后通过实例仿真验证了该模型和算法的有效性、可行性和稳定性, 更便于有效地指导生产实践.

**关键词:** 柔性作业车间调度; 动态调度; 机器故障; 人机协同

中图分类号: TP301

文献标志码: A

## Multi-stage man-machine cooperated scheduling method for dynamic flexible job shop scheduling problem

ZHANG Guo-hui<sup>a</sup>, WANG Yong-cheng<sup>a</sup>, ZHANG Hai-jun<sup>b</sup>

(a. School of Management Science and Engineering, b. School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China. Correspondent: ZHANG Guo-hui, E-mail: zgh09@zzia.edu.cn)

**Abstract:** For dynamic scheduling of the machine breakdowns in the flexible job shop production environment, the multi-stage man-machine cooperated dynamic scheduling strategy is proposed to minimize the maximum completion time and the minimum deviation combining with the experience of the shop scheduling staff. The shop scheduling staff can participate the optimization process in the different stage to improve the feasibility and stability of the solution. An updating method is designed to update the optimal solution of the external elite library. Various schedules are saved with the same optimal fitness value according to the Hamming distance. The simulation results show that the proposed model and algorithm are effectiveness, feasibility and stability, so as to effectively guide the production practice.

**Keywords:** flexible job shop scheduling; dynamic scheduling; machine breakdowns; man-machine cooperated

### 0 引言

实际柔性作业车间调度(FJSP)环境中会遇到由机器、工件或资源引起的动态事件的干扰, 影响了正常生产. 此时需要考虑在上述情况发生时, 如何进行重调度, 以保证生产的稳定运行. Holloway等<sup>[1]</sup>最早提出了动态调度问题, 紧接着Nelson等<sup>[2]</sup>针对作业车间动态调度问题提出了将动态调度过程分成多个连续的静态调度区间的方法. 刘爱军等<sup>[3]</sup>提出了自适应多目标柔性作业车间动态调度算法. 杨琴等<sup>[4]</sup>提出了基于DBR(Drum-Buffer-Rope)约束理论的柔性流水车间动态调度方法. 张超勇等<sup>[5]</sup>提出一种基于滚动窗口的多目标遗传算法调度优化策略, 然而未考虑

加工机器与工艺路线的柔性. Wang等<sup>[6]</sup>研究了遗传算法求解FJSP中机器故障的问题. Nie等<sup>[7]</sup>采用遗传编程方法求解工件释放时间不确定的FJSP动态调度问题. 刘想德等<sup>[8]</sup>将工序树与优先调度规则相结合求解FJSP动态问题. 然而, 在以上文献中无论是在初始调度方案的优化过程中还是发生动态事件进行重调度的过程中都没有考虑到调度人员的经验作用.

### 1 问题描述

#### 1.1 问题定义

$n$ 个工件在 $m$ 台机器上进行加工, 每个工件包含一道或多道工序, 每道工序可以在一台或多台机器上进行加工, 加工时间依据加工机器而确定. 此外, 还

收稿日期: 2014-08-05; 修回日期: 2015-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203179); 航空科学基金项目(2014ZG55016); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(14HASTIT006); 河南省高等学校青年骨干教师计划项目(2014GGJS-105).

作者简介: 张国辉(1980—), 男, 副教授, 从事车间调度、智能优化算法等研究; 王永成(1965—), 男, 副教授, 从事控制工程的研究.

需要满足约束条件: 1) 同一时刻同一台机器只能加工一个工件; 2) 同一时刻同一个工件只能被一台机器加工; 3) 不同工件的工序之间没有优先级, 同一工件的工序之间有顺序约束; 4) 所有工件的释放时间为零; 5) 重调度时刻, 故障机器上正在加工的工序可以等待机器修好后继续加工, 也可选择其他机器加工。

本文的优化目标函数为:

1) 最小化最大完工时间

$$f_1 = \min C_{\max} = \min(\max(C_i)), 1 \leq i \leq n, \quad (1)$$

其中  $C_i$  为工件  $J_i$  的完工时间。

2) 最小偏差度

$$f_2 = \min(C_{\max}(S_r) - C_{\max}(S_p)). \quad (2)$$

其中:  $S_r$  表示机器发生故障后的重调度方案,  $S_p$  表示初始调度方案。

在不同阶段选取的优化目标不一样, 在优化初始调度方案时, 只选取  $f_1$  一个目标函数; 当机器发生故障需要重新调度时, 两个目标同时优化。由于两个目标都为完工时间, 可将它们通过线性变换转换为一个目标函数进行优化, 如下式所示:

$$f_3 = \alpha f_1 + \beta f_2. \quad (3)$$

为方便后文描述, 如表 1 所示, 给出一个包括 4 个工件, 6 台机器的柔性作业车间调度问题。表 1 中的数字代表工序在机器上的加工时间, “-”表示工序不能在对应机器上加工。

表 1 4 个工件、6 台机器的柔性作业车间调度问题

工件	工序	可选择的机器和加工时间					
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
$J_1$	$O_{11}$	2	3	4	-	-	-
	$O_{12}$	-	3	-	2	4	-
	$O_{13}$	1	4	5	-	-	-
$J_2$	$O_{21}$	3	-	5	-	2	-
	$O_{22}$	4	3	-	-	6	-
	$O_{23}$	-	-	4	-	7	11
$J_3$	$O_{31}$	5	6	-	-	-	-
	$O_{32}$	-	4	-	3	5	-
	$O_{33}$	-	-	13	-	9	12
$J_4$	$O_{41}$	9	-	7	9	-	-
	$O_{42}$	-	6	-	4	-	5
	$O_{43}$	1	-	3	-	-	3

## 1.2 多阶段人机协同动态调度策略

本文结合柔性作业车间动态调度特点, 将机器的能力和人的经验融合起来, 提出了多阶段人机协同的动态调度策略。具体分为以下几个阶段。

第 1 阶段, 初始调度方案的优化与选择。该阶段包括 2 个步骤:

Step 1: 根据车间生产任务、工艺信息和车间机床等信息, 通过自适应遗传算法产生具有目标值相同

的多个初始调度方案集。

Step 2: 依据机床设备信息, 结合调度人员经验从初始调度方案集中选择一个方案作为执行方案。

第 2 阶段, 判断机器故障, 记录故障信息。该阶段包括 2 个步骤:

Step 3: 判断是否有机器故障事件的发生, 如果没有, 则继续执行初始调度方案; 否则, 转到 Step 4。

Step 4: 记录该时刻各台机器上正在加工以及后续未加工的工序信息, 并获取故障机器的相关信息。

第 3 阶段, 进行重调度, 确定重调度执行方案。该阶段包括 3 个步骤:

Step 5: 判断是否必须启动重调度, 如果需要, 则转到 Step 6; 否则, 继续执行初始调度方案。

Step 6: 利用自适应遗传算法进行重调度产生调度方案集。

Step 7: 在产生的重调度方案集中, 结合调度人员的经验, 选择其中一个作为执行方案。

在以上 3 个阶段优化过程中, 亦可跳过人工调整进行后续操作, 减少调度员的工作量并获得调度方案。

## 2 柔性作业车间动态调度求解算法

本文在初始调度以及进行重调度时提出自适应的遗传算法求解, 建立外部精英库, 而且基于海明距离进行更新, 以保留目标值相同而调度方案不同的解。具体执行步骤如下。

Step 1: 设置算法参数, 包括种群数目、迭代次数、交叉概率、变异概率以及  $\alpha$  和  $\beta$  的值。

Step 2: 采用机器和工序两段融合的染色体编码, 随机产生初始种群。

Step 3: 对染色体进行解码, 计算个体适应度值。

Step 4: 更新外部精英库中的优良解。

外部精英库更新时, 优先比较目标值, 目标值好的个体替换目标值差的个体; 当目标值相同时比较它们的海明距离, 以保留目标值较优而调度方案不同的个体。

Step 5: 判断是否满足结束条件, 如果满足则停止运算; 否则, 转到 Step 6。

Step 6: 选择操作。采用锦标赛选择方法, 每次从种群中选择 3 个个体, 适应度高的个体作为交叉对象。

Step 7: 自适应交叉操作。交叉概率根据算法迭代次数进行变化, 即

$$p_c = p_{cs}(1 - \text{CurIter}/\text{MaxIter}). \quad (4)$$

其中:  $p_{cs}$  为交叉概率初始值,  $\text{CurIter}$  为当前迭代次数,  $\text{MaxIter}$  为最大迭代次数。

前期交叉概率较大, 提高了种群广泛性搜索能

力; 后期交叉概率较小, 提高了集中性搜索能力. 种群中每个染色体由两部分组成, 机器染色体部分采用两点交叉方法. 工序染色体部分采用基于工件的 POX 交叉.

Step 8: 自适应变异操作. 采用自适应的变异概率, 即

$$p_m = p_{ms}(1 - \text{CurIter}/\text{MaxIter}). \quad (5)$$

其中:  $p_{ms}$  为设定的变异率初始值, 其他与式 (4) 中一样. 前期变异率较大提高了种群多样性, 后期变异率较小以防止破坏优良个体信息. 对于机器部分, 在可选机器中随机选择一个加工机器代替当前染色体中的加工机器. 对于工序部分, 每次从交换、插入和逆序中随机选择一种方法进行变异操作.

Step 9: 通过选择、交叉、变异操作后得到下一代群体, 转到 Step 3, 循环执行后续操作, 直到算法满足停止条件.

### 3 算例分析

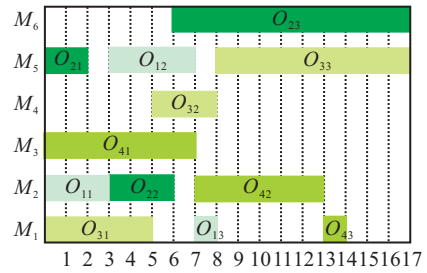
由于在柔性作业车间调度问题中没有发生机器故障的动态调度标准实例, 为此本文在表 1 数据的基础上模拟机器发生故障的动态调度案例. 对于机器故障的发生需要确定: 发生故障的机器、发生的时刻和所需维修时间等参数. 本文假设了 3 种机器故障的情景, 具体信息如表 2 所示.

表 2 3 种机器故障情景数据

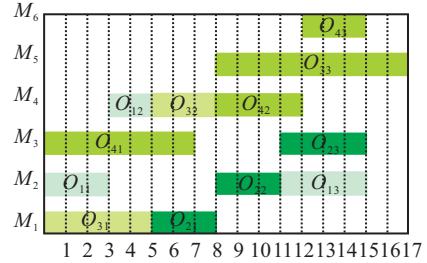
情景	故障机器	故障时间	维修时间
1	$M_6$	5	4
2	$M_2$ $M_3$	11	5 3
3	$M_1$ $M_4$ $M_5$	5	2 6 1

本文提出的多阶段人机协同动态调度算法在 WIN8 系统, RAM 4.00 GB, CPU 2.3 GHz 的运行环境中利用 Visual Studio 2012 编写代码并运行. 种群规模为 40, 最大迭代次数为 100, 交叉概率初始值  $p_{cs} = 0.8$ , 变异概率初始值  $p_{ms} = 0.2$ ,  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0.2$ . 为了更具有对比性, 假设调度人员在执行初始调度方案时存在方案 a 和方案 b 两个调度, 如图 1 所示, 完工时间都为 17.

表 3 为计算结果, DFJSP (Dynamic FJSP) 表示本文提出的方法, RS (Right-Shift) 表示右移策略. 由表 3 可知, 本文提出的方法要优于右移策略, 能够在完工时间不发生延长或者延长时间非常短的情况下安排生产. 同时, 整体而言, 方案 a 要优于方案 b, 也说明在产生的初始调度方案集中或者重调度方案集中挑选执行方案时, 调度人员的经验或者说车间信息的准确预判非常重要.



(a) 方案 a



(a) 方案 b

图 1 两种初始调度方案

表 3 计算结果对比分析

情景	方案	DFJSP		RS	
		$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
1	a'	17	0	20	3
	b'	17	0	17	0
2	a'	17	0	18	1
	b'	18	1	20	3
3	a'	18	1	23	6
	b'	18	1	23	6

以情景 3 为例, 在调度时刻 5,  $M_1$ 、 $M_4$  和  $M_5$  三台机器同时发生了故障. 方案 a 中如果采用右移策略时, 工序  $O_{32}$  及后续工序  $O_{33}$  都会被延迟, 最终完工时间延迟为 23; 经过本文提出的方法重调度后, 完工时间为 18. 对于方案 b, 如图 2 所示, 右移策略的完工时间为 23; 采用本文提出的方法重调度后如图 3 所示, 方案 b 和方案 b' 发生了很大的变化, 方案 b' 的完工时

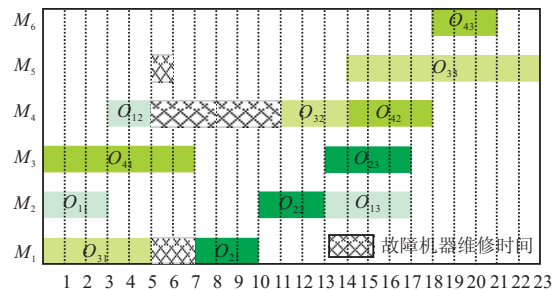


图 2 情景 3 中方案 b 在时刻 5 右移重调度的甘特图

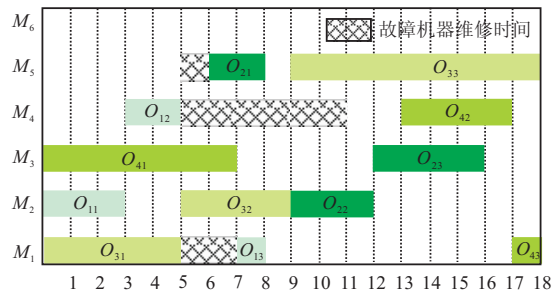


图 3 情景 3 中方案 b' 在时刻 5 重调度的甘特图

间为 18.

对于文献 [9] 中的 8 个工件、5 台机器的例子采用本文提出的算法进行运算, 初始调度时最大完工时间为 24, 比文献 [9] 中缩短了 6 个时间单位; 而且, 生成了多个调度方案, 由于篇幅所限, 只给出图 4 和图 5 所示的两种调度方案. 当机器  $M_2$  在时刻 6 发生故障时, 维修时间为 2, 对于方案 c 右移策略, 机器  $M_4$  和机器  $M_2$  的完工时间都延长到了 26; 而对于方案 d 而言, 只影响到了机器  $M_2$ , 且完工时间仍为 24.

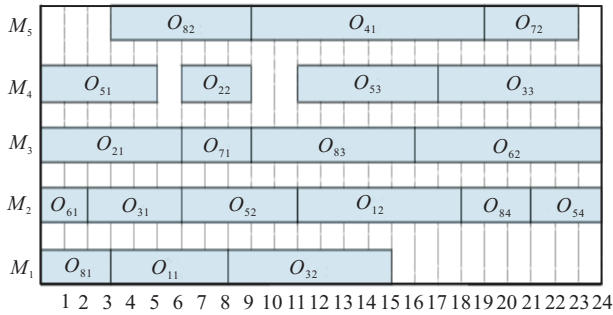


图 4 调度方案 c

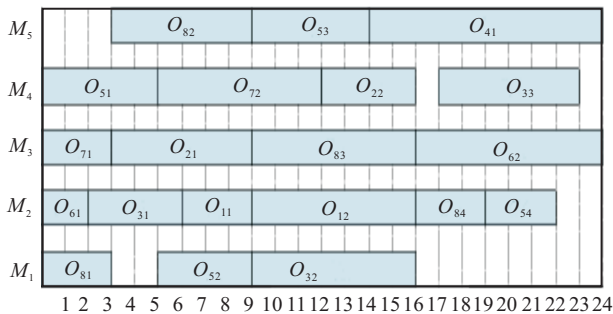


图 5 调度方案 d

## 4 结 论

1) 本文研究了机器故障下的柔性作业车间动态调度问题, 提出了多阶段人机协同的动态重调度策略, 以充分发挥调度人员的经验作用.

2) 采用外部精英库保留优良解, 提出了基于海明距离的更新策略, 以具有相等目标值而调度方案不同的优良解为调度人员提供更多的选择.

3) 不同的调度方案中, 良好的调度方案能够在避免启动重调度或重调度幅度较小的情况下应对机器故障的动态事件.

4) 通过模拟机器故障动态事件案例, 对所提出的多阶段人机协同动态调度策略和算法进行了验证, 计算结果表明, 本文提出的方法具有很好的有效性和稳定性.

## 参考文献(References)

- [1] Holloway C A, Nelson R T. Job shop scheduling with due dates and variable processing times[J]. *Management Science*, 1974, 20(9): 1264-1275.
- [2] Nelson R T, Holloway C A, Mei-Lun Wong R. Centralized scheduling and priority implementation heuristics for a dynamic job shop model[J]. *AIIE Transactions*, 1977, 9(1): 95-102.
- [3] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 柔性作业车间多目标动态调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(12): 2629-2637. (Liu A J, Yang Y, Xing Q S, et al. Dynamic scheduling on multi-objective flexible job shop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(12): 2629-2637.)
- [4] 杨琴, 周国华, 林晶晶, 等. 基于 DBR 理论的柔性流水车间动态调度[J]. *控制与决策*, 2011, 26(7): 1109-1112. (Yang Q, Zhou G H, Lin J J, et al. Dynamic scheduling of flexible flow shop problem based on DBR theory[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(7): 1109-1112.)
- [5] 张超勇, 李新宇, 王晓娟, 等. 基于滚动窗口的多目标动态调度优化研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(18): 2190-2197. (Zhang C Y, Li X Y, Wang X J, et al. Multi-objective dynamic scheduling optimization strategy based on rolling-horizon procedure[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(18): 2190-2197.)
- [6] Wang Y M, Yin H L, Da Qin K. A novel genetic algorithm for flexible job shop scheduling problems with machine disruptions[J]. *The Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5/6/7/8): 1317-1326.
- [7] Nie L, Gao L, Li P, et al. A GEP-based reactive scheduling policies constructing approach for dynamic flexible job shop scheduling problem with job release dates[J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24(4): 763-774.
- [8] 刘想德, 张根保. 柔性作业车间动态调度方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2014(5): 243-246. (Liu X D, Zhang G B. Flexible job shop dynamic scheduling method research[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(5): 243-246.)
- [9] 余琦玮, 蒋海青. 柔性作业车间动态调度问题研究[J]. *科技与企业*, 2013(19): 36-37. (Yu Q W, Jiang H Q. Research on flexible job shop dynamic scheduling problem [J]. *Science-Technology Enterprise*, 2013(19): 36-37.)

(责任编辑: 孙艺红)