

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2023.01.020

复杂型面智能生产单元任务-刀具联合动态调度策略

彭乘风^{1,2}, 黎展滔¹, 陈庆新¹, 赖辉辉¹

(1. 广东工业大学 广东省计算机集成制造系统重点实验室, 广东 广州 510006; 2. 湘南学院
物理与电子电气工程学院, 湖南 郴州 423000)

摘要:以复杂型面智能生产单元为背景, 针对多机器的任务-刀具联合动态调度问题展开研究。通过分析复杂型面智能生产单元的作业流程和特征, 建立任务-刀具联合调度问题的数学模型。结合通过对问题进行过程分解的方式构建一种组合规则调度算法生产框架, 并通过在框架中嵌入启发式规则的方式生成72种组合规则算法。设计大量的算例测试集, 通过对比、分析72种算法在差异化环境配置下的仿真结果, 对比不同系统指标下算法的表现情况, 发现基于FNOP规则构建的算法在75%的场景中均能取得较优的求解质量。研究成果为车间生产管理人员制定任务-刀具调度策略提供一定指导作用。

关键词: 仿真优化; 多级刀库; 规则调度; 联合动态调度; 复杂型面

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2023)01-0170-12

Joint Dynamic Scheduling Strategy for Job Sequencing and Tool Switching in Complex Surface Intelligent Production Unit

PENG Chengfeng^{1,2}, LI Zhantao¹, CHEN Qingxin¹, LAI Huihui¹

(1. Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing System of Guangdong Province, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Physics, Electronics and Electrical Engineering, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China)

Abstract: Taking the complex surface intelligent production units as the research background, a joint dynamic job-tool scheduling problem of multi-machine is abstracted. This research is conducted in the following three steps: Firstly, the characteristics of complex surface intelligent production unit are analyzed, a mathematical model of job-tool joint scheduling is established. Secondly, priority dispatching rules are embedded into the algorithm framework, and thus 72 combined algorithms based on the characteristics of problem are generated. Finally, considerable calculation examples are designed and simulation experiments are conducted to analyze the effectiveness and adaptability of combined algorithms in different system performance indicators, and FNOP-rule-based algorithm obtains the better performed one in 75% circumstances. The research could provide guidance to the production planning for workshop production manager.

Key words: simulation optimization; multi-level tool library; dispatching rules; joint dynamic scheduling; complex surface

具有复杂型面特征的零部件是模具、航空和大型设备等高精度产品的重要组成部分。其具有小批量、多型面、高精度、工艺复杂等特征, 常需要多台加工设备协作生产。随着生产设备的功能集成, 通过切换刀具即可实现任务的单台设备集成加工。图1为复杂型面零部件智能生产单元。生产

单元由多台集成化加工设备、一台机械手设备和单元缓存架构成, 当设备上刀具满足工件加工需求时, 可通过多刀具协作的方式完成工件加工。如何构建可快捷响应的任务与刀具联合调度机制, 合理地利用生产资源, 提升生产效益, 是本文所研究的问题。

收稿日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775120, 71572049, 51675107, 51805096, 71802055); 中国博士后科学基金资助项目(2016M602444, 2018M630929); 广东省自然科学基金自由申请项目(2018A030313477)

作者简介: 彭乘风(1991—), 男, 江西省人, 博士研究生, 主要研究方向为智能制造系统信息化、车间调度。

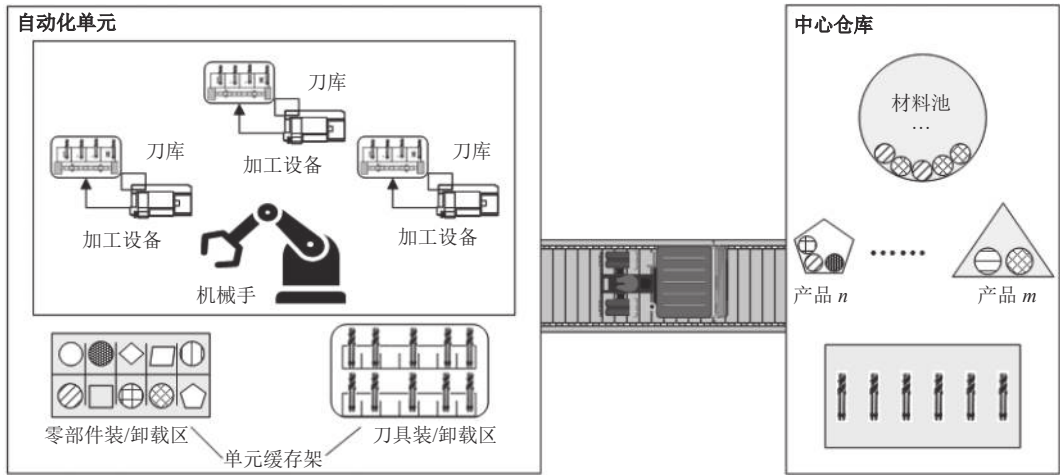


图 1 复杂型面智能生产单元

Figure 1 Complex surface intelligent production unit

表1按生产环境、优化目标、工件序列排序方式、刀具寿命、刀库容量和求解算法对近年来本文

所研究问题的部分研究成果进行分类。通过文献综述表可以发现如下。

表 1 任务-刀具联合调度问题文献综述

Table 1 Literature review on job sequencing and tool switching jointscheduling problem

生产环境	优化目标	工件序列	刀具寿命	刀库容量	求解算法	文献
单机器	最小总换刀次数	固定	随机	C	启发式方法	[1]
		排序	/	C	迭代邻域搜索	[2]
		排序	随机	C	遗传算法	[3]
	最小化拖期时间	固定	确定	C	模因算法	[4]
	最小化转化时间	固定	/	C	多阶段模拟退火	[5]
	最小化总成本	固定	/	1	启发式算法	[6]
	多目标	排序	确定	C	遗传算法	[7]
单工序-多机器	最小化 C_{max}	排序	/	/	改进遗传算法	[8]
		排序	/	C	约束规划	[9]
	多目标	排序	/	C	启发式算法	[10]、[11]
	最小化拖期时间	排序	/	C	启发式算法	[12]、[13]
	最小化拖期时间	排序	/	C	启发式算法	[14]

1) 多数研究人员以最优化生产指标 (如最小总换刀次数、最小化拖期时间、最小化 C_{max} 等) 为目标, 采用数学规划算法、智能搜索算法和启发式算法对单机^[1-8]和多机^[9-14]任务-刀具联合调度问题进行求解, 且研究多为已知工件序列对刀具进行调度^[1,4-6], 或假设刀具寿命无限, 在刀库容量有限的情况下同时对工件和刀具进行调度^[2,9-14]。而以同等并行机为背景, 在工件批到达场景下, 考虑有限刀具寿命和有限刀库容量约束的联合调度问题的研究较少。

2) 当刀库容量 $C > 2$ 时, 刀具配置问题是NP-Hard问题^[15], 针对小规模场景, 多数研究人员采用

数学规划算法来进行静态调度方案的求解^[10-11]; 针对中大规模场景, 多采用智能搜索算法和启发式算法进行求解^[1-9,12-14]。然而本文针对动态环境展开研究, 需要在较短时间内求得较高质量的方案, 而规则类算法较智能算法和数学规划算法具有更强的时效性^[16]。因此, 本文采用规则类算法对问题进行求解。

综上所述, 针对本文所研究的问题, 首先构建问题的数学模型; 然后对问题进行结构化分析, 提出一种组合调度算法生成框架, 并通过嵌入多种规则策略产生大量组合调度算法; 最后, 在多差异环境下进行仿真实验, 分析算法在不同系统性能指标

下的表现情况。

1 数学模型

1.1 问题描述

本文所研究的问题描述如下。在加工单元内包含一个由多台同等并行机组成的加工设备集合 $M = \{1, 2, \dots, w\}$ ，每台加工设备有一个拥有 C 个刀槽的刀库，可存放一组刀具 $T = \{1, 2, \dots, t\}$ ，刀具 $i (i \in T)$ 的剩余使用可用时长为 l_i ；现有一个待加工工件集合 $J = \{1, 2, \dots, n\}$ ，完成工件 j 加工需要使用到刀具子集 $T_j (j \in J)$ ，在进行工件 j 加工前需完成加工设备的刀具调配，其中， $|T_j| \leq C$ ；工件 j 的总加工时间为 p_j ，其中，使用刀具 $i (i \in T_j)$ 的加工时长为 p_{ij} ；当刀库中的刀具无法不间断执行工件加工任务时，需对刀库中的刀具进行切换工作，一次刀具移除/插入耗时为 \bar{t} 。联合调度的目标是制定合理的任务、刀具调度方案，进而提升加工单元的生产效率。为简化所研究的问题，进行如下假设。

- 1) 一台加工设备仅有一个刀库，刀库有多个刀槽，刀槽之间不存在差异；
- 2) 一个刀槽仅可安装一把刀具，一把刀具仅占

用一个刀槽；

3) 工件加工所需的刀具数量小于加工设备刀库容量；

4) 刀具移除/插入的操作时间是一个固定值，与刀具种类无关；

5) 一次只能进行移除/插入一把刀具，不可进行批量移除/插入操作；

6) 刀具初始可用时长服从随机分布，且基于加工时间阈值来判断刀具是否可继续使用，每次换刀均为新刀；

7) 不考虑加工过程中对刀具的意外磨损情况。

1.2 优化模型

使用元组表示法^[17-18]，可将所研究问题描述为 $[M/ST_{si}/SO/Tool_{ho}/Seq_k/|T_j| \leq C|/TW_{yes}]$ 。如图 2 所示，通过进行结构化分析，可将原问题转化为具有强耦合关系的两个子问题。1) 任务调度问题：当刀具供应充足且迅速时，问题随即转化为单工序同等并行机调度问题；2) 刀具调度问题：当工件在设备上的加工顺序确定且不变时，问题随即转化为已知任务序列考虑有限刀具寿命的多机刀具调度问题，并据此完成原问题数学模型的构建。

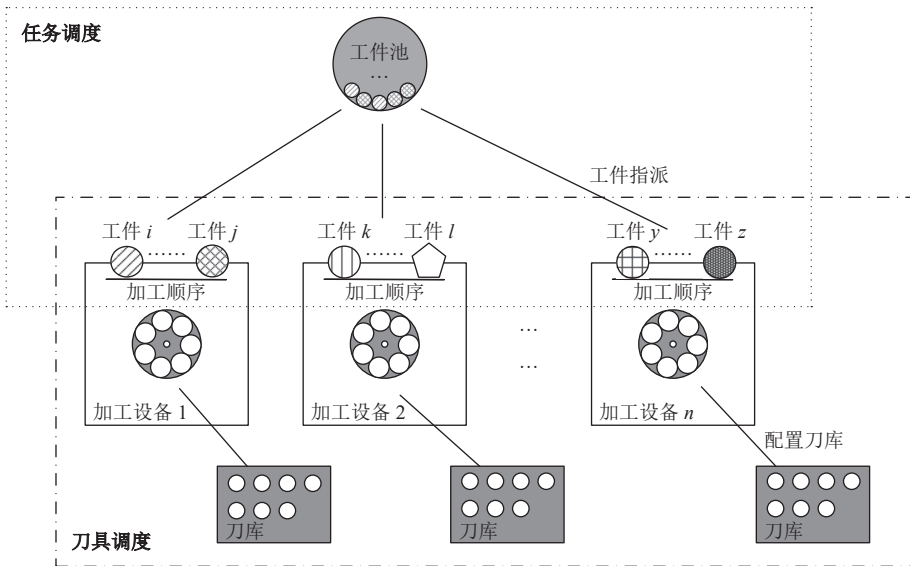


图 2 原问题分解示意图

Figure 2 The decomposition diagram of original problem

1.2.1 参数定义

对 $[M/ST_{si}/SO/Tool_{ho}/Seq_k/|T_j| \leq C|/TW_{yes}]$ 问题模型的相关参数进行定义，如表 2 所示。

1.2.2 模型构建

1) 决策变量。

C_{max} 为当前任务集合的最大完工时间。

C_i 为任务 i 的完工时间。

S_{ij} 为任务 i 在设备 j 的开始加工时间。

$ST_{ij}^{h_k}$ 为在设备 j 开始处理任务 i 时刀具 h_k 的剩余可用时长。

表 2 参数定义
Table 2 Parameter definition

输入参数	定义
i, q	工件序号
j	设备序号
k	刀具种类序号
h_k	刀具在 k 类刀具的序号
p_{ij}	工件 i 在设备 j 上的总加工时间
q_{ij}^k	工件 i 在设备 j 上使用 k 类刀具的总加工时间
$q_{ij}^{h_k}$	工件 i 在设备 j 上使用刀具 h_k 的加工时间
r_k	k 类刀具的数量
$l(i)$	任务 i 需要刀具种类集合
$TC(j)$	设备 j 刀库的刀槽数量
M	极大值

$ET_{ij}^{h_k}$ 为设备 j 完成任务 i 的处理后刀具 h_k 的剩余可用时长。

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 在设备 } j \text{ 上进行加工处理;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$Z_{ih_k j} = \begin{cases} 1, & \text{刀具 } h_k \text{ 被用于在设备 } j \text{ 上加工任务 } i; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$Y_{iqj} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 在任务 } q \text{ 前在设备 } j \text{ 上进行加工处理;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$A_{iqh_k} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 和任务 } q \text{ 均使用了刀具 } h_k; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$b_{iqh_k} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 比任务 } q \text{ 先使用刀具 } h_k; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

优化目标函数为

$$\min C_{\max} \quad (1)$$

任务调度约束如下

$$C_{\max} \geq C_i, \forall i; \quad (2)$$

$$C_i = \sum_j (S_{ij} + p_{ij} X_{ij}), \forall i; \quad (3)$$

$$S_{ij} \geq r_i - M \left(1 - \sum_j X_{ij} \right), \forall i, j; \quad (4)$$

$$X_{ij} \leq \sum_{h_k} Z_{ih_k j}, \forall i, j, \forall h_k | k \in l(i); \quad (5)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1, \forall i; \quad (6)$$

$$S_{qj} \geq S_{ij} + p_{ij} - M(Y_{iqj}) - M(1 - X_{qj}) - M(1 - X_{ij}), \forall q, \forall i \neq q, \forall j; \quad (7)$$

$$X_{ij} + X_{qj} \geq 2(Y_{iqj} + Y_{qij}), \forall q, \forall i \neq q, \forall j; \quad (8)$$

$$X_{ij} + X_{qj} \leq Y_{iqj} + Y_{qij} + 1, \forall q, \forall i \neq q, \forall j. \quad (9)$$

2) 刀具调度约束条件。

$$\sum_j (Z_{ih_k j} + Z_{qh_k j}) \geq 2(A_{iqh_k}), \forall q, \forall i \neq q, \forall h_k | k \in l(i) \cap l(q); \quad (10)$$

$$\sum_j (Z_{ih_k j} + Z_{qh_k j}) \leq A_{iqh_k} + 1, \forall q, \forall i \neq q, \forall h_k | k \in l(i) \cap l(q); \quad (11)$$

$$A_{iqh_k} \leq b_{iqh_k} + b_{qih_k}, \forall q, \forall i \neq q, \forall h_k | k \in l(i) \cap l(q); \quad (12)$$

$$b_{iqh_k} + b_{qih_k} \leq 1, \forall q, \forall i \neq q, \forall h_k | k \in l(i) \cap l(q); \quad (13)$$

$$\sum_j S_{ij} \geq \sum_j (S_{qj} + p_{qj} X_{qj}) - M(1 - Y_{qij}), \forall q, \forall i \neq q; \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_{h_k} Z_{ih_k j} \leq 1, \forall i, k \in l(i); \quad (15)$$

$$q_{ij}^k = \sum_j \sum_{h_k} (Z_{ih_k j} q_{ij}^{h_k}), \forall i, \forall h_k | k \in l(i); \quad (16)$$

$$ET_{ij}^{h_k} = ST_{ij}^{h_k} - q_{ij}^{h_k}, \forall i, \forall h_k | k \in l(i); \quad (17)$$

$$p_{ij} \geq \sum_k q_{ij}^k, k \in l(i); \quad (18)$$

$$ET_{ij}^{h_k} \geq 0; \quad (19)$$

$$TC(j) \geq |l(i)|, \forall i, j. \quad (20)$$

式 (1) 表示优化目标为最小化最大完工时间; 式 (2) 表示 C_{\max} 值为所有工件中最大完工时间值; 式 (3) 表示工件完工时间为工件开始时间与加工时间之和; 式 (4) 表示工件开始加工时间不可早于其到达系统的时间; 式 (5) 表示刀具配置完备是设备进行工件加工的前提; 式 (6) 表示工件仅可被一台设备加工; 式 (7)~(9) 为关联约束, 以保证一台设备同时仅可进行一个工件的加工作业; 式 (10)~(14) 表示刀具不可进行跨设备间的共享; 式 (15)~(16) 为关联约束, 表示工件对应类型的刀具操作仅可由一把刀具完成, 不接受多把同类型刀具的协作; 式 (17) 表示刀具剩余可用时长的更新操作; 式 (18) 表示工

件的加工耗时为所使用全部刀具的时间和；式 (19) 表示不可超刀具可用时长用刀；式 (20) 表示工件需要使用的刀具种类不可超过设备的刀库容量上限。

2 基于启发式规则的联合调度策略设计

考虑到实际生产过程中，任务工件以动态的方式进入生产系统，且在工件进入系统前，其部分加工信息处于未知状态，出于有效应对可能出现的波动情况考虑，所研究的调度算法应当具有强时效性。文献[19]表明调度规则具有低时间复杂度的特征在动态场景中具有较强适应性，且通过一定方式

对一些简单规则进行重新组合有可能取得较简单规则更优的求解效果，故本文采用规则组合的方式完成求解算法的构建。

2.1 组合调度规则算法框架设计

基于前文对问题的结构化分析发现，原问题为以加工任务为强耦合因子的联合优化问题。如图3所示，以任务为耦合因子将原问题拆解为任务调度和刀具调度两个子问题；随后，对各子问题进行特征提取与分析，构建规则算法集合；最后，对子问题算法进行重组，并生成求解原问题的组合算法集合。

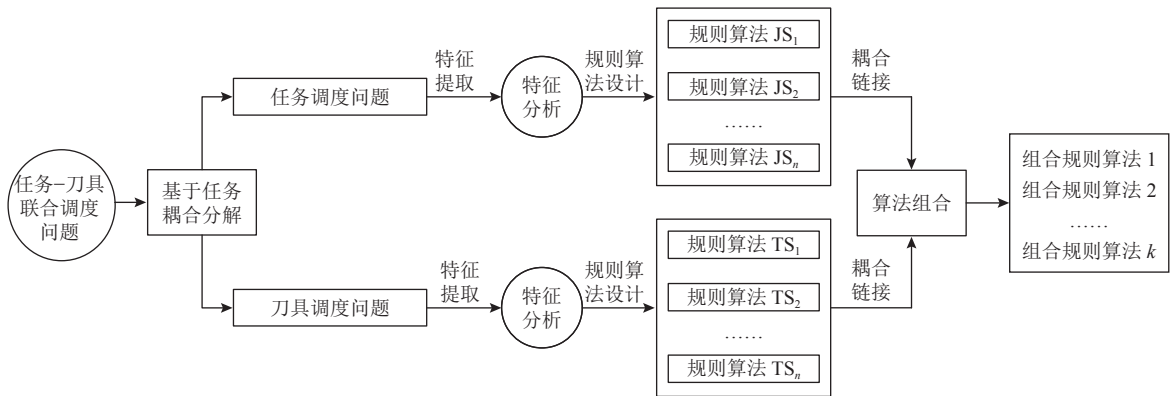


图 3 组合调度算法设计框架

Figure 3 The framework of combinatorial scheduling algorithm

2.2 规则算法设计

2.2.1 任务调度规则设计

通过对任务调度流程进行分析发现，可将任务调度转化为空闲设备选择加工任务的过程。在设备产能释放时刻，基于任务特征信息和加工设备特征信息，通过任务调度规则计算可调度任务集合中待加工任务的优先级，并选择优先级最高的任务加工。

对任务调度场景进一步挖掘，任务特征信息包含到达时间、加工时间和用刀信息等；加工设备特征信息包含刀具种类和刀具寿命等，并基于此进行任务调度规则设计。

1) 先到先服务 (first come first serve, FCFS)^[12]: 优先加工到达系统早的任务；

2) 加工时间短优先 (shortest processing time, SPT)^[12]: 优先处理加工耗时短的任务；

3) 刀具任务数少优先 (fewest number of operations, FNOP)^[12]: 优先加工使用刀具数量少的任务；

4) 刀具任务数多优先 (most number of operations, MNOP)^[12]: 优先加工使用刀具数量多的任务；

5) 换刀数量少优先 (fewest tools change, FTCT): 优先加工刀具更换数量少的任务；

6) 可用刀具寿命短优先 (shortest lifetime tool, SLT): 优先加工需求刀具寿命短的任务；

7) 可用刀具种类多优先 (most tools available, MTA): 优先加工刀库中与任务需求刀具种类契合度高的任务；

8) 精加工含粗加工所需刀具任务优先 (finishing includes rough finishing, FIRF): 先按工件类型进行分类，先以使用刀具种类由多到少对精加工类型任务进行排序，后进行粗加工类型插空式排序——与精加工任务刀具类型契合度越高，任务越优先加工；

9) 基于短工时优先的精加工含粗加工刀具优先 (finishing includes rough finishing based on shortest processing time, FIRFSPT): 在 FIRF 规则的基础上，当存在多可选任务时优先加工耗时短的任务。

2.2.2 刀具调度规则设计

通过对刀具调度流程进行分析发现，可将刀具调度转化为加工设备上刀具的装、卸载过程：在执

行刀具切换前, 基于任务用刀特征信息和设备刀具特征信息, 通过刀具调度规则计算各刀具的装、卸载优先级, 并选择卸载优先级最高的刀具与装载优先级最高的刀具执行刀具切换操作。

对刀具调度场景进一步挖掘, 用刀特征信息包含用刀序列、用刀时长和用刀频次信息等; 设备刀具特征信息包含种类占比和剩余寿命等, 并基于此进行刀具调度规则设计。

1) 最快响应刀具优先 (keep tool needed soonest, KTNS)^[9]: 根据任务序列, 优先卸载较晚使用的刀具, 装载即刻使用的刀具;

2) 前3任务最快响应优先 (keep tool needed 3 soonest, KTN3): 根据任务序列, 叠加序列中前3个任务的刀具使用时间, 优先卸载时长短的刀具, 装载时长长的刀具;

3) 剩余寿命长优先 (keep tool highest lifetime, KTHL): 以刀库中刀具剩余寿命为基准, 优先卸载寿命短的刀具, 装载寿命长的刀具;

4) 剩余寿命短优先 (keep tool lowest lifetime, KTLL): 以刀库中刀具剩余寿命为基准, 优先卸载寿命长的刀具, 装载寿命短的刀具;

5) 使用频率高优先 (keep tool utilization frequency, KTUF): 以刀具已使用情况为基准, 优先卸载低频使用的刀具, 装载高频使用的刀具;

6) 高累积使用时长优先 (keep tool accumulated time, KTAT): 以刀具已使用情况为基准, 优先卸载累计使用时长短的刀具, 装载累计使用时长长的刀具;

7) 剩余刀具类型少优先 (keep tool remain, KTR): 以加工单元现存刀具类型数量为基准, 优先卸载刀具类型多的刀具, 装载类型少的刀具;

8) 当前刀具优先 (keep tool current time, KTCT): 以待加工任务工件使用刀具为基准, 卸载无关刀具, 装载任务相关刀具。

2.3 组合调度规则算法生成

基于前文所提的组合调度算法设计框架, 结合问题分析及规则设计, 对提出的9种任务调度规则和8种刀具调度规则进行重组, 共生成FIRF_KTNS、FTCT_KTNS等72种组合调度算法。如图4所示, 该72种组合调度算法在系统中执行的步骤均一致, 现对其流程进行说明。

步骤1 初始化时间 t 。

步骤2 若有任务到达, 记录其到达时间。

步骤3 若无任务等待加工, 则算法结束; 否则转至步骤4。

步骤4 若有设备空闲, 转入步骤5; 反之, 更新时间 $t = t + 1$, 转至步骤2。

步骤5 选择一台空闲设备, 确定加工任务。

步骤5.1 定义任务集合 J ;

步骤5.2 根据任务调度规则确定任务集合 J 中各任务的优先级;

步骤5.3 选择优先级最高的任务 j_{\max} 。

步骤6 确定所选任务加工所需的刀具需求 D_j 。

步骤7 判断当前机器的刀库内的刀具是否满足所选工件 j_{\max} 的刀具需求。

步骤8 若设备刀库内的刀具不满足加工需求, 则确定要换上的刀具类型 d_j 。

步骤8.1 定义刀库中的刀具集合 D ;

步骤8.2 根据刀具调度规则确定刀具集合 D 中刀具的优先级;

步骤8.3 选择优先级低的刀具 d_{\min} ;

步骤8.4 将刀具 d_{\min} 更换为 d_j , 并更新刀库状态信息, 转至步骤6。

步骤9 若设备刀库内刀具无法满足加工需求, 则更改设备状态为繁忙并更新设备所属刀库的状态信息, 将设备空闲时间更新为任务 j_{\max} 完工时间。

3 算例仿真与结果分析

为进一步了解前文生成算法的求解质量与适应性, 通过仿真试验的方式对比、分析不同系统指标下各算法的表现情况。图5为某企业重载汽车冲压模具智能生产线的标准智能生产单元, 其系统参数配置如表3所示。

为了研究方便同时考虑生成案例的随机性, 对生产单元进行如下假设。1) 刀具缓存架可随时保证加工过程中加工设备所需刀具的供应; 2) 任务工件为精加工要求时, 加工设备上对应刀具类型需为全新刀具; 3) 任务工件的到达时间服从负指数分布; 4) 车间中刀具初始可用时长服从负指数分布; 5) 任务使用的刀具类型数量服从均匀分布; 6) 任务工件对应刀具的加工耗时服从均匀分布。

3.1 算例设计

因仿真模型基于实际生产车间构建, 其生产环境已具备一定的复杂性, 在以往研究中难以找到相

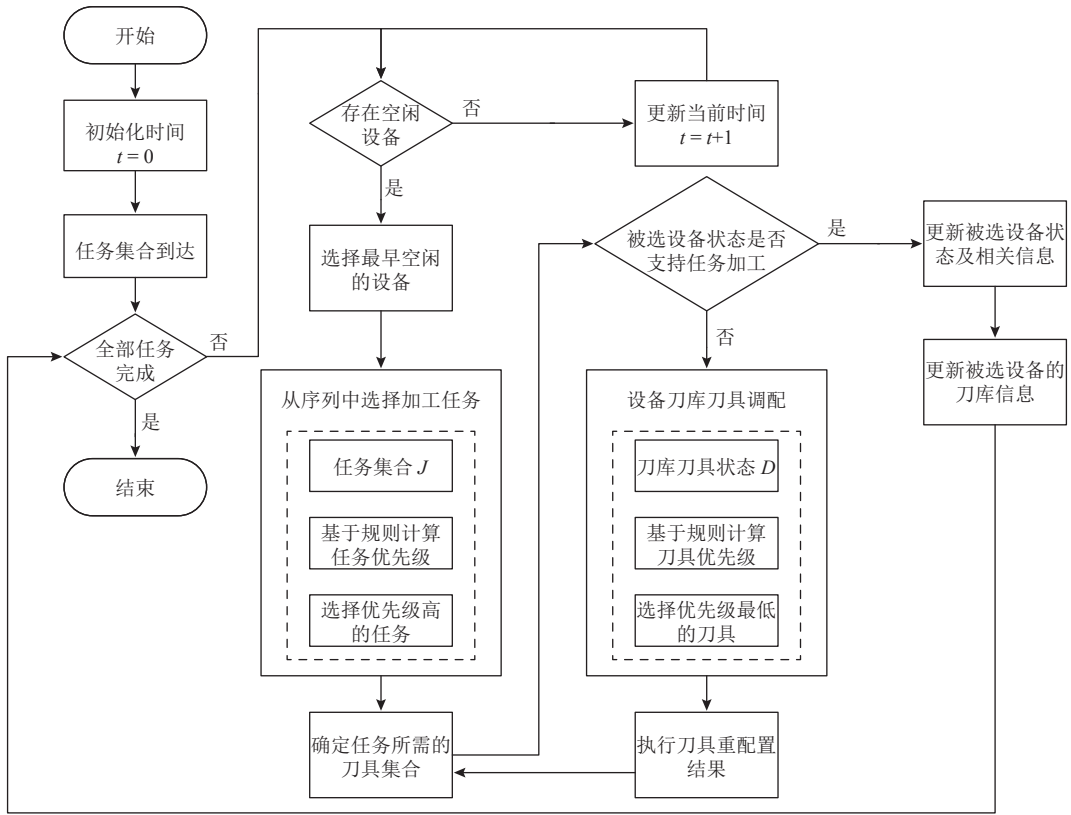


图 4 组合调度算法流程

Figure 4 Flow chart of combinatorial scheduling algorithm

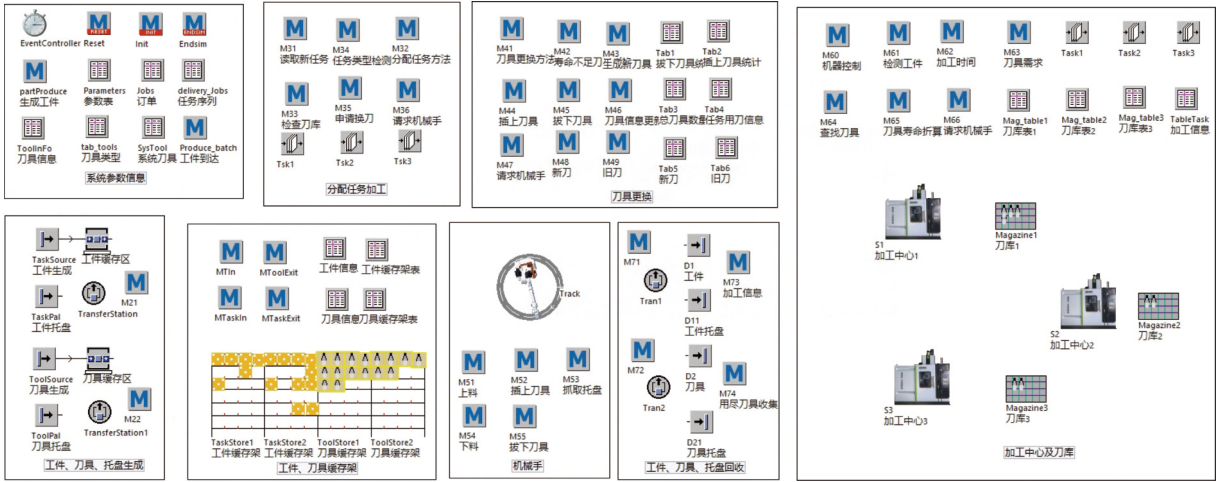


图 5 联合调度仿真模型

Figure 5 Simulation model of joint scheduling

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

加工中心数	加工中心刀库容量	托盘装载量	加工中心内部换刀时间/s	机械手上料时间/s	拔下一把刀具时间/min	插上一把刀具时间/min
3	22	1	5	20	2	2

匹配的测试数据集，故采用文献[19]提及的分割试验法来生成本文的测试算例集。通过查阅相关文献

[12-14]并结合实地调研结果，总结出可能对调度策略执行性能产生影响的因子有刀具任务数量、刀具

种类、工件数量和加工类型比例。具体设计信息如表4所示。

表 4 影响因子设计
Table 4 Impact factor design

影响因子	影响因子水平	影响因子水平值		
工件的刀具任务数量	2	U[2,7]	U[8,12]	
刀具种类	3	40	80	100
工件数量	3	100	200	500
加工类型比例	3	3/7	5/5	7/3

3.2 仿真结果与分析

如前文所述, 仿真试验将在2水平刀具任务数量、3水平刀具种类、3水平工件数量以及3水平加工类型比例参数设定的情况下展开, 并在每一个环境参数组合情况下生成10组随机仿真案例, 验证所设计的由9种任务调度规则和8种刀具配置规则重组成的72种组合调度算法在多个系统指标下的表现。即将72种调度算法在54种环境参数下, 进行10次随机仿真实验(共计38 800次试验)。以上试验均在eM-Plant仿真平台(仿真软件及其版本为Tecnomatix Plant Simulation 15.1)上进行, 运行平台的机器配置

为Intel®2.1GH(2处理器), 内存128 GB。

本文将在最大完成时间、最大流程时间、总换刀次数以及总使用刀具数量等性能指标下对算法性能进行分析。但鉴于所研究问题的复杂性和研究现状, 暂时没有可用于对比的最优解, 故采用式(21)计算相对偏差百分比(relative deviation index, RDI)来评价不同组合算法的表现情况: RDI值越小, 对应组合算法越优。

$$RDI_{Ia} = \frac{T_{Ia} - T_{IB}}{T_{Iw} - T_{IB}} \quad (21)$$

其中, RDI_{Ia} 表示组合策略 a 在配置参数 I 下的相对偏差百分比; T_{Ia} 表示组合策略 a 在配置参数 I 下的仿真结果; T_{IB} 表示配置参数 I 下72种组合策略下的最优结果; T_{Iw} 表示配置参数 I 下72种组合策略下的最差结果; RDI值在0和1之间。

3.2.1 不同性能指标下的算法表现

图6为分别以最小化 C_{max} 、换刀总数、总流程时间和最大流程时间为评价指标, 算法取得较优解(在同一水平参数配置下, 调度方案质量可进入前三)频次的统计图。对图6进行分析可知: 1) 在换刀数量和最小化 C_{max} 系统指标下, 取得优解的算法具

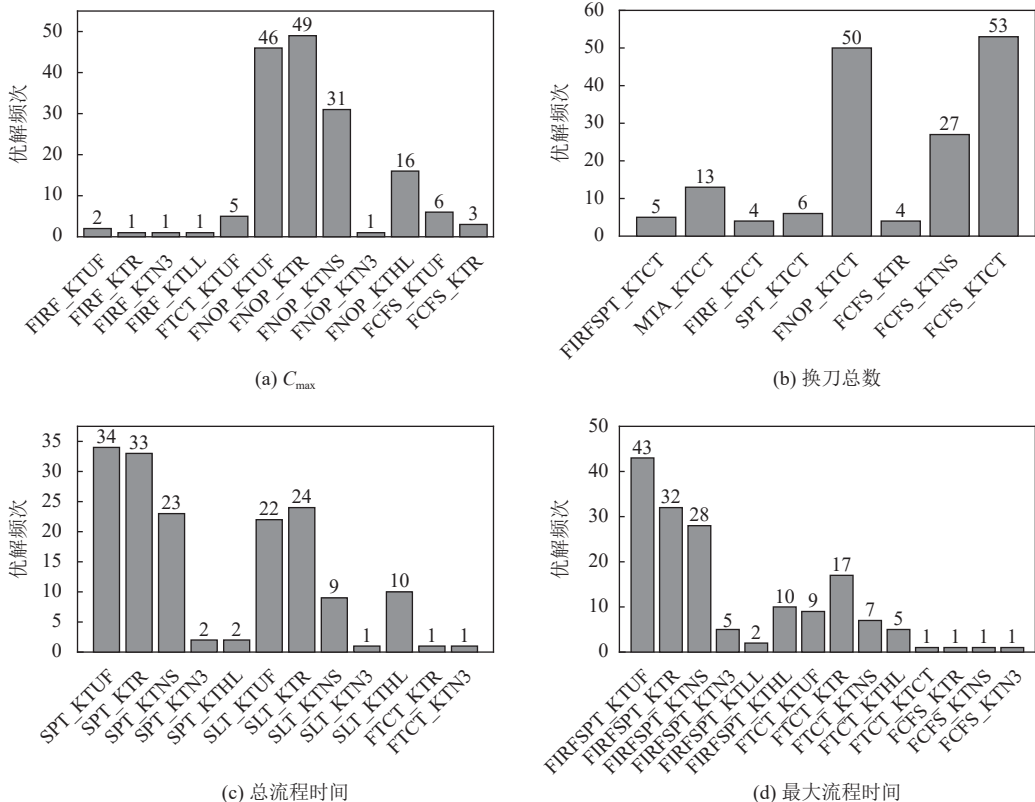


图 6 不同系统指标下的优解分布情况

Figure 6 The distribution of optimal solutions under different system indicators

有较高的重合度 (88.9%)，而在其余指标的重合度较低；2) 基于SPT任务调度规则构建的调度算法在总流程之间和最大流程时间指标下取得了较好的求解质量。

3.2.2 C_{max} 指标下的算法性能分析

为进一步分析算法在不同因素水平下 C_{max} 的表现，同时考虑到展示方便，选择其中10种组合算法进行分析。图7为各因素在不同组合规则下多次仿真试验平均RDI值的95%置信度的箱线图，每个箱

线图表示在同一参数设置下，10次试验的 C_{max} 的取值集合。对图7进行分析可知：1) 随着工件的刀具任务数量增加，调度算法的整体求解质量均有所下降；2) 相较于考虑历史加工信息，考虑当前状态(如FIRF_KTNS、FIRF_KTR、FTCT_KTNS等)的调度算法求解质量受刀具种类数量变化影响较小；3) 随着工件数量的增加，算法求解质量受到的波动效应减弱；4) 当精加工与粗加工任务比例偏离等分线($T=5/5$)，算法质量波动呈增大的趋势。

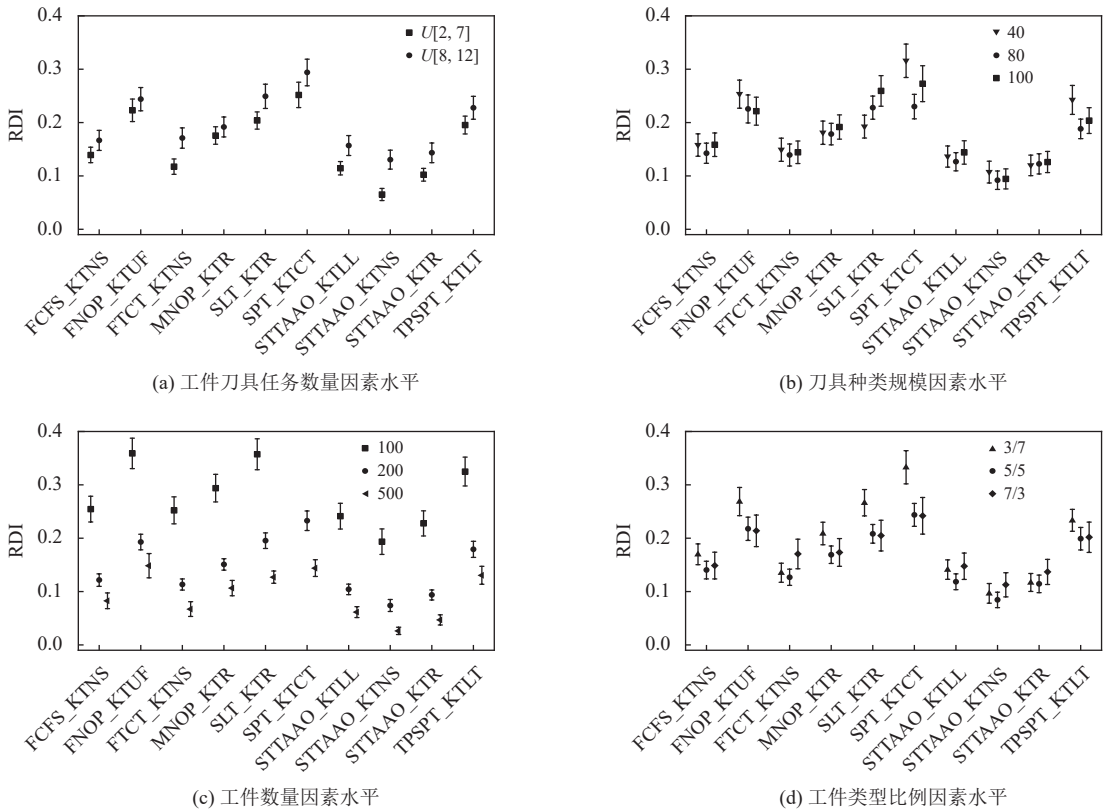


图 7 C_{max} 指标的平均RDI箱线图

Figure 7 Average RDI chart for C_{max}

3.2.3 最大流程时间指标下的算法性能分析

对分析任务调度规则进行进一步的分析，图8中IQR (inter-quartile range) 为内距，或称为四分位差；每个箱型表示在同一任务调度规则参数下，多次仿真实验最大流程时间的标值集合。通过对图8的观察可以发现：1) 基于FCFS构建的调度算法求解质量受环境变化的影响最小；2) 基于SPT和FIRFSPT规则构建的调度算法，不仅在求解质量上表现不佳，且受环境变化影响较大。

3.2.4 总换刀次数指标下的算法性能分析

图9为以总换刀次数为指标，8种组合算法在

4种因子下的95%区间图。通过对图9的观察可以知：1) 随着工件刀具任务数量的增加，各组合算法的求解质量均呈现下降的趋势；2) 在多个因子环境下，仅少数算法能获得较好的求解质量(各因子下均只有2种算法的RDI值较小，其余算法的RDI值较大)。

3.2.5 总使用刀具数量指标下的算法性能分析

图10为分别在任务调度规则和刀具调度规则下，总使用刀具数量随各组合因子变化的折线图。通过分析图10可以发现：1) 在各因子水平下，任务调度规则和刀具调度规则求解质量的优劣排名具有较大的相似性，且其RDI值随工件数量和刀具种类

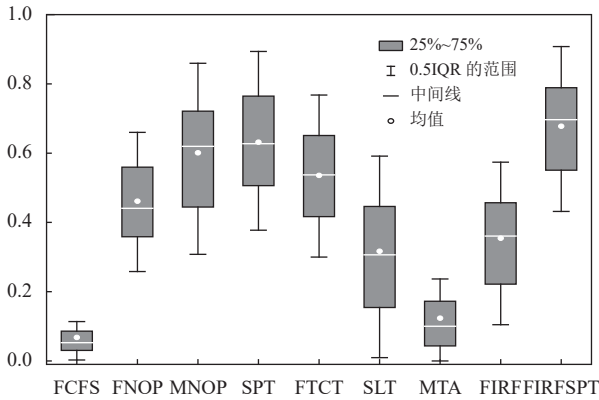


图 8 最大流程时间随任务调度规则变化箱图

Figure 8 Box diagram of the maximum process time under different job scheduling rules

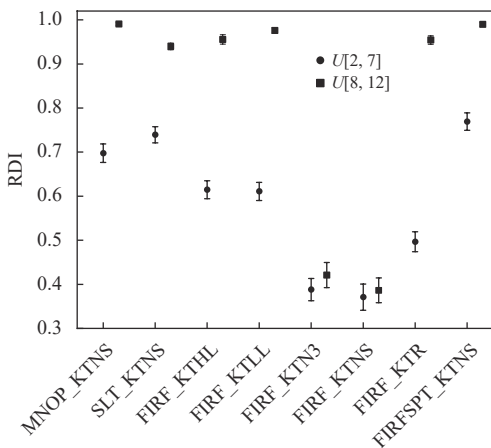
变化表现出相同的变化趋势; 2) 基于FIRFSPT任务调度规则和KTCT刀具调度规则构建的调度算法在各因子水平下均表现优异, 以MTA任务调度规则和

KTLL刀具调度规则构建的调度算法表现最差。

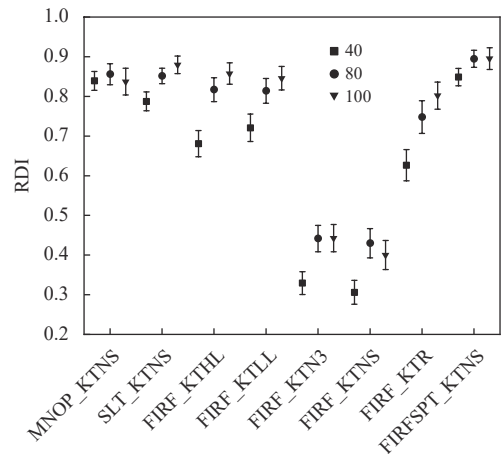
4 总结

本文针对复杂型面自动化单元中的任务-刀具联合的动态调度问题进行研究, 提出通过组合规则算法框架来生成求解问题的组合规则算法集合, 通过仿真实验对比分析生成的算法在不同系统性能指标下的性能表现, 得到如下结论。

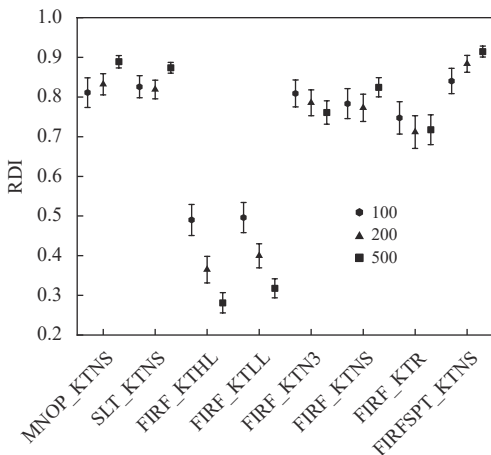
- 1) 通过组合调度算法框架能高效、便捷地产生一系列具有低运算复杂度的算法。
- 2) 虽然有些算法在大多数环境参数下能取得较优方案, 但是依然没有一种算法能保证在全部预设环境参数下均取得最优解。
- 3) 不同系统评价指标对应的较优算法也存在差异, 并未发现有一种算法保证能在所有评价指标中



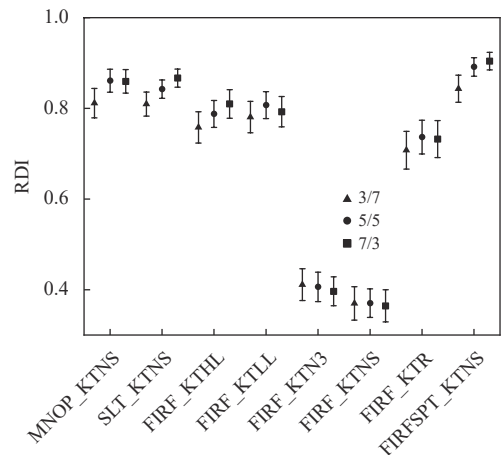
(a) 工件刀具任务数量因子



(b) 刀具种类规模



(c) 工件数量



(d) 工件类型比例

图 9 总换刀次数指标的平均RDI箱线图

Figure 9 Average RDI chart for total tool switching number

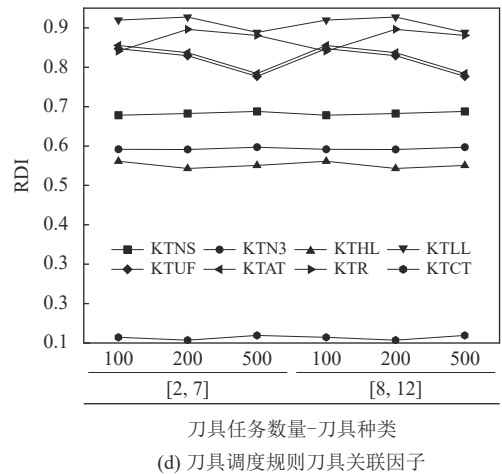
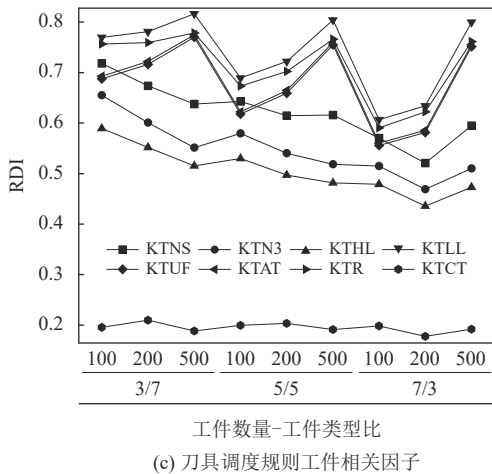
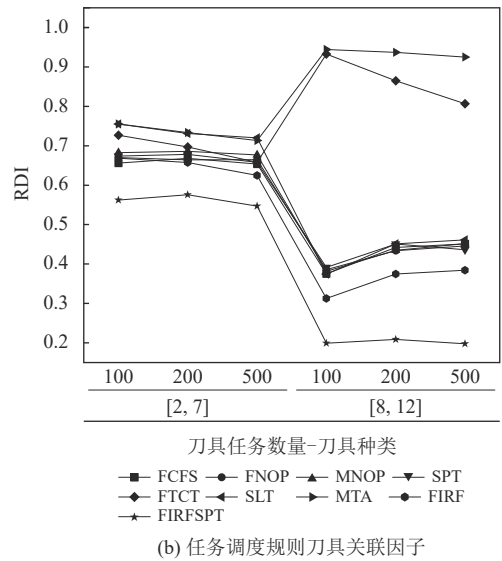
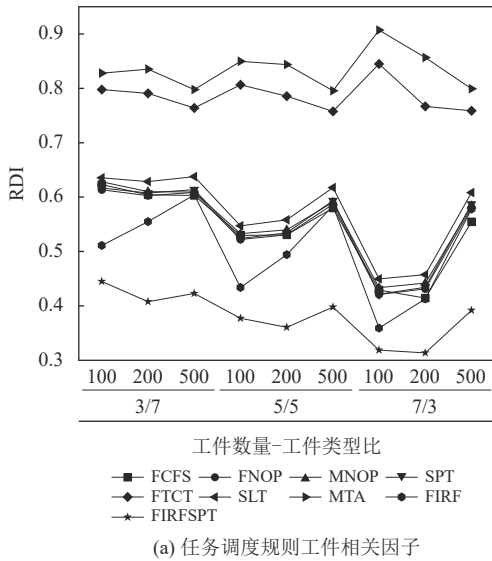


图 10 总换刀次数指标的平均RDI折线图

Figure 10 Line chart of average RDI for total tool switching number

均得到较优解。

4) 任务调度规则相比于刀具调度则对调度方案的质量具有较大影响, 在对调度算法进行优化时, 优先考虑从任务属性尝试挖掘可取得较其他特征属性更好的优化效果。

5) 基于加工类型属性构建的组合调度算法在刀具关联相关系统指标(刀具使用数量等)取得较优的调度方案。

本文针对复杂型面自动化单元中的任务-刀具联合动态调度问题提出了一个简易的组合调度算法设计框架, 但是仅从任务属性和刀具属性两方面展开设计, 后续还需对问题进行更加深入的研究, 以发掘更多能提升算法运算性能的特征属性, 从而得到更优的调度算法以生成更高质量的调度方案。

参考文献:

- [1] 李泽龙, 焦勇清, 鲁一凡. 任务顺序刀库更新策略对加工中心换刀频率的仿真优化[J]. *模具工业*, 2018, 44(7): 6-10.
LI Zelong, JIAO Yongqing, LU Yifan. Simulation optimization of tool changing frequency in machining center considering the magazine update strategy of task sequence[J]. *Die & Mould Industry*, 2018, 44(7): 6-10.
- [2] PAIVA G S, CARVALHO M A M. Improved heuristic algorithms for the Job Sequencing and Tool Switching Problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 88: 208-219.
- [3] FARUGHII H, DOLATABADIAA M, MORADI V, et al. Minimizing the number of tool switches in flexible manufacturing cells subject to tools reliability using genetic algorithm[J]. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2017, 10(Special Issue on Quality Control and Reliability): 17-33.
- [4] AMAYA J E, COTTA C, FERNÁNDEZ-LEIVA A J, et al. Deep memetic models for combinatorial optimization problems: application to the tool switching problem[J]. *Memetic Comput-*

- ing, 2020, 12(1): 3-22.
- [5] MAUERGAUZ Y. Job and tool group scheduling for a machining center[J]. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, 12(4): 280-287.
- [6] BAYKASOĞLU A, OZSOYDAN F B. Minimisation of non-machining times in operating automatic tool changers of machine tools under dynamic operating conditions[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(4): 1548-1564.
- [7] HIRVIKORPI M, SALONEN K, KNUUTILA T, et al. The general two-level storage management problem: A reconsideration of the KTNS-rule[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 171(1): 189-207.
- [8] DADASHI H, MOSLEMI S, MIRZAZADEH A. Optimization of a new tool switching problem in flexible manufacturing systems with a tool life by a genetic algorithm[J]. *International Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*, 2016, 1(3): 52-58.
- [9] 曾创锋, 刘建军, 陈庆新, 等. 求解一类无关并行机调度的遗传迭代贪心算法[J]. *工业工程*, 2021, 24(2): 110-118.
ZENG Chuangfeng, LIU Jianjun, CHEN Qingxin, et al. A genetic algorithm-iterative greedy algorithm for a kind of unrelated parallel machine scheduling problem[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2021, 24(2): 110-118.
- [10] ÖZPEYNIRCI S, GÖKGÜR B, HNICHT B. Parallel machine scheduling with tool loading[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(9-10): 5660-5671.
- [11] GÖKGÜR B, HNICHT B, ÖZPEYNIRCI S. Parallel machine scheduling with tool loading: a constraint programming approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(16): 5541-5557.
- [12] KUMAR N S, SRIDHARAN R. Simulation modelling and analysis of part and tool flow control decisions in a flexible manufacturing system[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 25(4): 829-838.
- [13] KUMAR N S, SRIDHARAN R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2006, 23(4): 361-370.
- [14] ROH H K, KIM Y D. Due-date based loading and scheduling methods for a flexible manufacturing system with an automatic tool transporter[J]. *International Journal of Production Research*, 1997, 35(11): 2989-3004.
- [15] CRAMA Y, MOONEN L S, SPIEKSMAN F C R, et al. The total switching problem revisited[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(2): 952-957.
- [16] BARTZ-BEIELSTEIN T, CHIARANDINI M, PAQUETE L, et al. Experimental methods for the analysis of optimization algorithms[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010.
- [17] GRAHAM R L, LAWLER E I, LENSTRA J K, et al. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey[J]. *Annals of Discrete Mathematics*, 1979, 5: 287-326.
- [18] DOROTHEA C. The job sequencing and tool switching problem: state-of-the-art literature review, classification, and trends[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(15-16): 5005-5025.
- [19] TANG C S, DENARDO E V. Models arising from a flexible manufacturing machine, part I: minimization of the number of tool switches[J]. *Operations Research*, 1988, 36(5): 767-777.

(责任编辑: 郑穗华)

(上接第 135 页)

- [15] RIGDON S E. A double-integral equation for the average run length of a multivariate exponentially weighted moving average control chart[J]. *Statistics and Probability Letters*, 1995, 24(4): 365-373.
- [16] RUNGER G C, PRABHU S S. A markov chain model for the multivariate exponentially weighted moving averages control chart[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1996, 91(436): 1701-1706.
- [17] CROWDER S V. A simple method for studying run-length distributions of exponentially weighted moving average charts[J]. *Technometrics*, 1987, 29(4): 401-407.
- [18] KNOTH S. ARL numerics for MEWMA charts[J]. *Journal of Quality Technology*, 2017, 49(1): 78-89.

(责任编辑: 郑穗华)