

引文格式: 杨博见, 杜丽, 郭景仁. 基于多Agent的柔性作业车间动态调度方法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 99-107.

YANG Bojian, DU Li, GUO Jingren. Research on dynamic scheduling of flexible job-shop based on multi-agent[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 99-107.

## 基于多 Agent 的柔性作业车间动态调度方法研究\*

杨博见<sup>1,2</sup>, 杜 丽<sup>1</sup>, 郭景仁<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学, 成都 611731;

2. 中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院高空模拟技术重点实验室, 绵阳 621703)

[摘要] 为提高调度策略对工件到达密度变化的适应能力, 对柔性作业车间内的动态调度方法进行了研究。首先根据调研结果以及 Agent 建模方法构建了基于多 Agent 系统的柔性制造动态调度系统; 然后结合柔性制造背景下的复杂结构件加工特点对调度过程中任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤的运行机制进行了改进, 形成了基于工序块的任务分解机制、基于加工精度的机床选择机制以及基于调度规则的动态时间窗调度方法; 最后通过试验验证了该动态调度方法在工件到达密度变化场景下的可行性, 对当前实际的柔性作业车间生产活动具有一定的指导意义。

关键词: 多Agent系统; 柔性作业车间; 动态调度; 动态时间窗; 规则调度方法

## Research on Dynamic Scheduling of Flexible Job-Shop Based on Multi-Agent

YANG Bojian<sup>1,2</sup>, DU Li<sup>1</sup>, GUO Jingren<sup>1</sup>

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory, Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang 621703, China)

[ABSTRACT] In order to improve the adaptability of scheduling strategy to the change of the arrival density of the workpiece, the dynamic scheduling method in flexible job-shop was studied. Firstly, the dynamic scheduling system of flexible manufacturing based on multi-agent system is constructed according to the investigation results and agent modeling method. And combining with the complex structure processing characteristics of flexible manufacture, the operation mechanism of scheduling task decomposition, machine tool selection and task allocation is improved, and forming the task decomposition mechanism based on the process, machine tool selection mechanism based on the machining accuracy and dynamic time windows scheduling method based on scheduling rules. Finally, the feasibility of the proposed dynamic scheduling method in the scenario of work-piece density change is verified by experiments, which has a certain guiding significance for the current actual flexible job-shop production activities.

**Keywords:** Multi-agent systems; Flexible job-shop; Dynamic scheduling; Dynamic time window; Rule-based scheduling method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.099

调度是整个制造系统的核心环节<sup>[1]</sup>, 其目的是满足一系列约束前提下对资源进行合理分配使作业过程中某些指标达到最优。随着制造企业生产力逐渐提升, 传

统集中控制的静态调度方式在动态多变的生产场景下显得格格不入。一方面, 小批量、多品种、个性化生产模式逐渐兴起, 工艺路径愈加灵活<sup>[2]</sup>, 柔性作业车间逐步

\* 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX04002001)。

取代以往的流水车间,针对柔性生产的调度研究愈发迫切<sup>[3]</sup>;另一方面,制造过程本质上是动态的,诸如订单数量波动、设备故障、原料紧缺等计划外的扰动是不可避免的<sup>[4]</sup>,如何设计调度策略使外部扰动对系统的影响降到最低成为生产调度研究中的另一个热点问题<sup>[5]</sup>。

在生产组织方式从静态集中的层次结构向动态分布式网络结构转变的趋势下,制造系统呈现出动态、复杂、自治等新特点<sup>[6]</sup>。多 Agent 系统 (Multi-agent system, MAS) 作为一种新兴智能计算技术,其自治性、拓展性、移动性的特点与当前分布式、动态化的生产环境高度契合<sup>[7]</sup>,被认为是实现智能制造系统最有前景的方法之一,受到国内外学者的广泛关注<sup>[8]</sup>。目前框架设计与建模和协商机制是 MAS 的两个主要研究方向。Wang 等<sup>[9]</sup>采用基于物理的映射方式将车间内实体划分为机床、运输、产品、物料库 4 类 Agent,搭建了一种结合工业互联网与云端监控的多层次智能工厂框架。梁慰乐<sup>[10]</sup>搭建了一种混合架构的多车间动态调度系统,基于功能的映射方式划分了管理、资源、工艺、算法和监控 5 类 Agent 对象,实现了生产任务与扰动事件的跨区域处理。魏鑫<sup>[11]</sup>针对多目标作业车间调度问题提出了一种基于简化 CNP (Contract net protocol) 的区间协同拍卖协同策略,有效解决了传统 CNP 下调度中通信量大、Agent 间劣质竞标以及调度结果全局性较差等问题。Zhang 等<sup>[12]</sup>建立了基于蚁群优化的 Agent 协商机制,将蚁群算法中信息素的特征融入智能体决策模型中,通过信息素积累和蒸发产生的差异信息素图来解决常规调度与重调度问题。曹乐<sup>[13]</sup>应用内嵌 Q-Learning 的 CNP 作为上下层协商机制,搭建了基于多 Agent 的信息物理融合生产系统,实现硬件间的异构集成与生产任务的合理分配。

本文结合柔性作业车间特点对 MAS 进行了改进,从实际柔性生产中的物理实体和逻辑功能映射出 5 类 Agent 并形成一种混合式组织结构,在此基础上根据典型柔性生产中的任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤对多 Agent 协商机制进行改进,最后设计试验对该调度方案的有效性进行了验证。

### 1 多 Agent 柔性作业车间动态调度系统组织架构

图 1 所示的柔性生产线一般包含加工中心、立体刀库、有轨制导小车 (Rail guided vehicle, RGV) 或机械手、立体物料库、上下料站、控制系统等设备。完整的柔性制造生产调度应包含的流程与功能总体可概括为工单输入与处理、工单任务分解、柔性生产调度规划、异常调度、数据管理。

对应以上设备分布与流程特征,基于多 Agent 理

论,从制造环境中映射出 5 种 Agent,可划分为基于物理的任务池 Agent (Task pool agent, TPA)、任务 Agent (Task agent, TA)、机器 Agent (Machine agent, MA),分别与车间中的立体物料库、加工工件、加工中心对应;以及基于功能的调度 Agent (Scheduling agent, SA) 和监控 Agent (Real-time monitoring agent, RMA),其内部分别封装了规则调度方法和异常调度策略。TPA 主要完成工单输入与处理、工单任务分解;TA、MA、SA 3 者通过协商完成柔性生产调度规划;RMA 负责完成异常调度;数据管理则由 5 个 Agent 共同完成。

本文设计的混合式组织结构的柔性制造动态调度系统基本架构如图 2 所示。常规调度时,系统内除监控 Agent 以外的所有 Agent 共同构成集中式的组织结构,其中 TPA 处于管理层,接收与释放上层系统的计划任务;TA 与 SA 处于处理层,对释放的任务进行排程;MA 处于执行层,负责执行上层产生的调度计划。当出现扰动事件使系统进入异常调度状态时,RMA 将与除 TPA 以外的所有 Agent 共同构成分布式的组织结构,各 Agent 之间通过信息互通,只需对其自身做出局部调整即可完成对扰动事件的处理。该结构具有易拓展、高鲁棒性和低成本的优点。

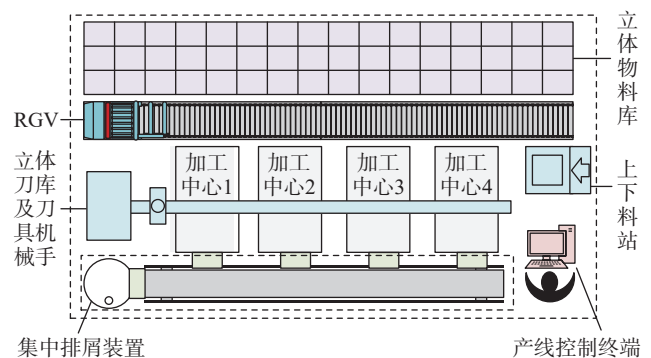


图 1 柔性生产线设备组成及分布示意图  
Fig.1 Flexible production line equipment composition and distribution diagram

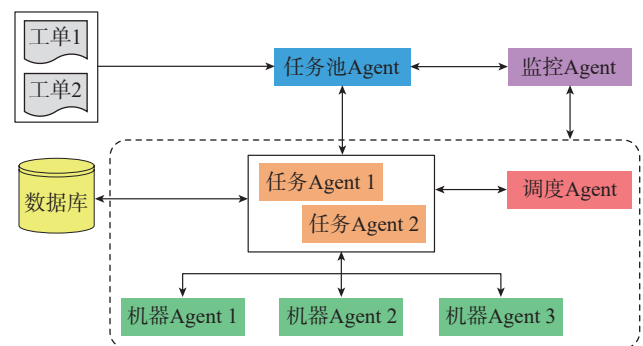


图 2 多 Agent 柔性作业车间动态调度系统组织结构  
Fig.2 Organization structure of dynamic scheduling system of multi-agent flexible job-shop

## 2 柔性作业车间动态调度策略

合同网协议 (Contract net protocol, CNP) 在复杂环境下具有较好的灵活性和实用性, 整体逻辑较为简单, 能够对大规模任务进行分解执行。在基于传统 CNP 的多 Agent 调度方法中, 通常采用具备任务性质和具备处理能力的两类 Agent 进行招投标交互, 完成加工任务在加工设备之间的分配, 最终得到调度计划。一个完整调度流程的协商过程如图 3 所示, 整个过程中 TA 与  $m$  个 MA 之间至少经过  $4m$  次通信才能完成任务分配, 当多个 TA 对自身任务进行释放时, 系统内的信息流将会急剧增长; 除此之外 Agent 的贪婪性驱使其只根据自身当前的状态做出决策, 造成实际招投标过程缺乏一定全局能力, 并且协商过程中缺乏应急处理机制, 出现异常时可能会导致调度系统出现锁死甚至故障。由此可知, 该协商流程存在通信量大、单步优化以及动态性能较差等缺陷。

本文从调度过程中任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤的运行机制入手, 改进得到基于工序块的任务分解机制、基于加工精度的机床选择机制以及基于调度规则的动态时间窗调度方法, 保证动态任务的合理分配, 提升系统的动态性能以及对特定加工环境的适应力。

### 2.1 基于工序块的任务分解机制

近几年, 以工序集中原则为基础的复合加工技术

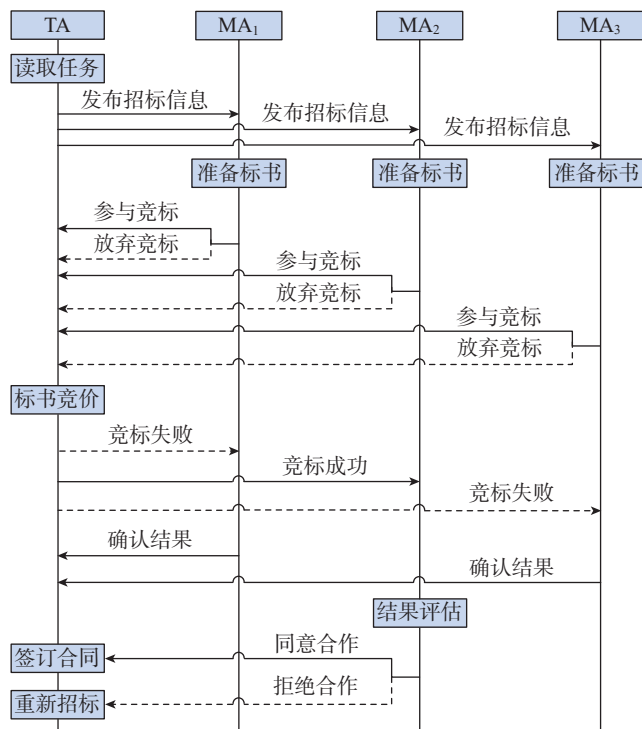


图 3 基于传统 CNP 的调度协商流程

Fig.3 Scheduling and negotiation process based on traditional CNP

快速发展, 车铣复合中心、五轴加工中心等复合加工机床应运而生。传统的柔性作业车间调度问题 (Flexible job-shop scheduling problem, FJSP) 求解方法往往以工序离散的原则处理工艺路径中的工序, 即系统在调度的过程中按照工件的工序顺序逐项释放、逐项加工。因此, 在得到的调度结果中, 同一工件的加工过程总是离散化的, 其相邻的两道工序通常不在同一台机床上进行。这与当前复杂工件的实际加工方式是不符的, 各工序加工准备时间的存在也会导致大量加工工件在多台设备间转移的用时不可忽视, 如果调度计算得到的调度解与实际调度情况的偏差较大, 调度解将会失去参考性。

本文基于工序集中处理原则提出一种基于工序块的任务分解机制。在分解工单时, 将同一工件工艺路线中工艺类型相近、工序顺序相邻的工序组合成为 1 个工序块一次性释放, 利用加工过程中必要的翻转装夹、在机检测等步骤自然地隔离不同的工序块, 单个工序块内的所有工序将在同一台满足所有工序加工条件的机床上进行加工。以表 1 所示的工艺路线为例 (其中翻转装夹、在机检测等准备步骤视作工序, 但不会作为任务 Agent 释放), 按工序块进行分解, 工件会由原先的 8 道加工工序合并为 3 个工序块参与调度计算。

采用基于工序块的任务分解机制主要有以下优点。

(1) 任务分解方式与实际加工方式对应, 考虑了工序的加工准备时间, 提高了调度解的参考性与可执行性。以上述工艺路线为例, 加工前的准备时间将由单工序的分解机制下的 7 段减小为 2 段, 且并入加工时间期望。

(2) 该机制与原先单工序处理机制的适应性相同, 基于工序块的任务分解机制在本质上没有改变原先任务分解机制的主要流程, 仅在任务总量上有所变化, 原

表 1 示例工艺路线

Table 1 Example process routes

工序号	工序块号	工序内容	需求精度	加工时间期望/min
1	1	粗铣 A 面外形	IT11	19
2		精铣 A 面外形	IT8	32
3	2	翻转装夹	0	5
4		粗铣 B 面外形	IT11	28
5		精铣 B 面外形	IT8	43
6		精铣凹槽	IT7	17
7	3	精铣台阶面	IT8	14
8		在机检测	0	2
9		钻底孔	IT9	13
10		倒角	IT10	7

有的调度求解方法仍旧可用。(3)减轻了 MAS 系统内的通信负担,以  $m$  台设备加工上述工件为例,单工序的分解机制下,系统至少需经过  $8 \times (2m+2)$  次通信才能完成所有工序任务的释放,但在基于工序块的分解机制下,系统只需经过  $3 \times (2m+2)$  次通信。(4)可以更好地适应未来工序顺序柔性这一趋势。基于工序块的任务分解机制下工序顺序仅需在工序块内部进行调整即可,并不会影响到调度计算,整体调度流程的柔性将得到提高。

### 2.2 基于加工精度的机床选择机制

加工质量是制造过程中重点关注的问题,在调度过程中应当采取适当的措施来保障复杂结构件的加工精度,提高首件加工合格率。目前复杂结构件的制造过程一般根据加工任务中工件的尺寸、加工类型提前选择合适的生产线,因此机床精度就成为唯一的机床选择决策指标。一般会对生产线进行周期性检测和评估其整体加工精度,并更新生产系统内对应信息以便于进行机床选择。

在传统的 FJSP 案例中,一般采用的是单工艺型或半全能型机床,但现阶段的柔性生产线已采用全能型的加工中心,以往基于加工能力的机床选择机制已不再适用。因此,根据当前柔性作业车间的设备情况,本文提出一种基于加工精度的机床选择机制。新机制下 TA 与 MA 之间协商的流程如图 4 所示,当 TA 将加工任务需求以招标请求的方式发送至 MA 时,MA 将任务对应的工序块内需求的最高精度与自身精度进行比较,根据比较结果选择是否参与竞标。本文机床精度与 TA 内

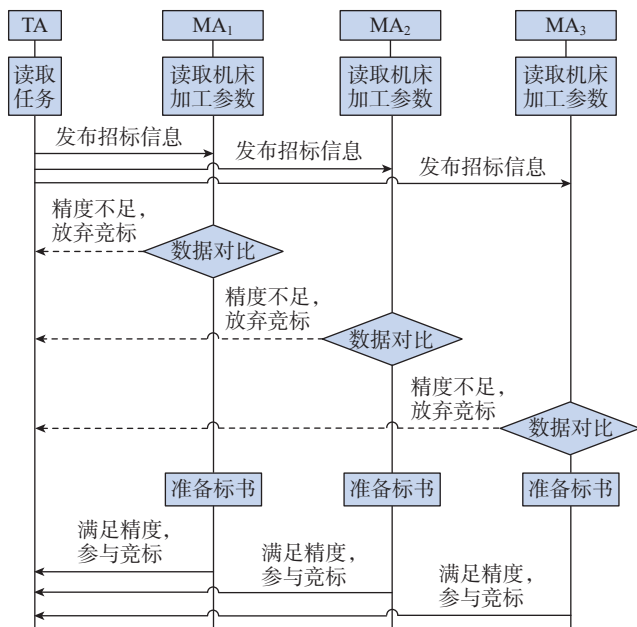


图 4 基于加工精度的机床选择机制下 TA 与 MA 的协商流程  
Fig.4 Negotiation process between TA and MA under machine tool selection mechanism based on machining accuracy

携带的加工任务规定的工件尺寸精度均采用 IT 公差等级进行描述。

基于加工精度的机床选择机制在调度过程中能够保障工件的加工质量,并且 MA 会定期访问生产系统的机床精度数据库获取机床最近时段的精度,将获取到的数据存储在自身知识库,从而使调度系统能够对动态的环境做出良好的反应。

### 2.3 基于调度规则的动态时间窗调度方法

上层系统下达的工单任务经过分解和机床选择之后,还需按一定的方法对任务进行分配才能产生最终的调度解,任务分配的方法将直接决定调度解的优劣。传统 CNP 协商过程中的单步优化会导致劣质调度解的出现,为解决此问题,国内外学者在 CNP 的基础之上引入了时间窗的概念,同时在 MAS 中设置全局管理型的 Agent,形成了一种基于周期调度的预反应式调度策略。但随之引入了时间窗长度的选取问题,选取过长会导致任务堆积,过短会退化为单步优化,尤其在时间窗长度固定时,其无法适应工件到达密度多变的小批量生产场景。

根据以上情况,本文提出一种动态时间窗的策略。其具体执行逻辑如图 5 所示,其中  $Z$  为表征产线状态的决策变量; $\min(e_{B_m})$  为开启时间窗的时刻下产线内所有机床的最早完工时刻; $T_{now}$  为开启时间窗的时刻; $L$  为单个时间窗内参与调度的工序块数量上限,以避免待调度的工序块过多导致调度系统瞬时计算负担过大。 $Z$

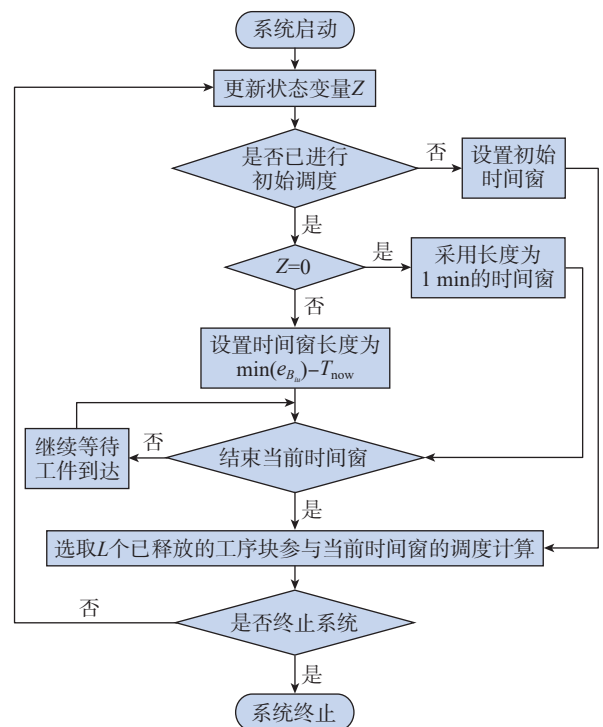


图 5 动态时间窗策略的具体执行逻辑  
Fig.5 Specific execution logic of dynamic time window strategy

与  $L$  的计算方法分别如式 (1) 和 (2) 所示。

$$Z = \begin{cases} 1, & \text{产线中机床均被占用(包含损坏)} \\ 0, & \text{产线中机床未被全部占用} \end{cases} \quad (1)$$

$$L = 2 \times (m - m_B) \quad (2)$$

式中,  $m$  为产线内机床的总数;  $m_B$  为更新变量  $Z$  时产线内损坏机床的总数。

在整个动态时间窗运行的过程中, 单个时间窗内等待调度的工序块数量会逐渐大于  $L$ , 此时应采取一定的措施来选择符合条件的工序块参与调度计算, 否则会使所有工件的等待时间及完工时间难以得到保证。调度规则具有较低时间复杂度, 动态性能较好的特点, 是解决实际生产中动态调度问题的一个有效方法。本文采用基于到达时刻的最先到达最先加工规则 (First come first service, FCFS) 对工序块进行选取, 以保证工件的等待时间以及完工时间。FCFS 的具体执行逻辑如图 6 所示。

#### 2.4 柔性作业车间异常调度策略

任何制造过程都避免不了异常事件的发生, 本文针对设备故障与急件插单两类扰动设计了异常调度策略, 其异常处理流程如图 7 所示。

由于急件插单扰动下插单工件需要尽早完工, TPA 将会以新的方式释放加工任务, 在其知识库中设置一个用于表征插单状态的决策变量  $D$ , 其具体描述见式 (3)。单个时间窗内参与调度的工序块数量上限  $L$  也将变更为式 (4) 的计算方式。

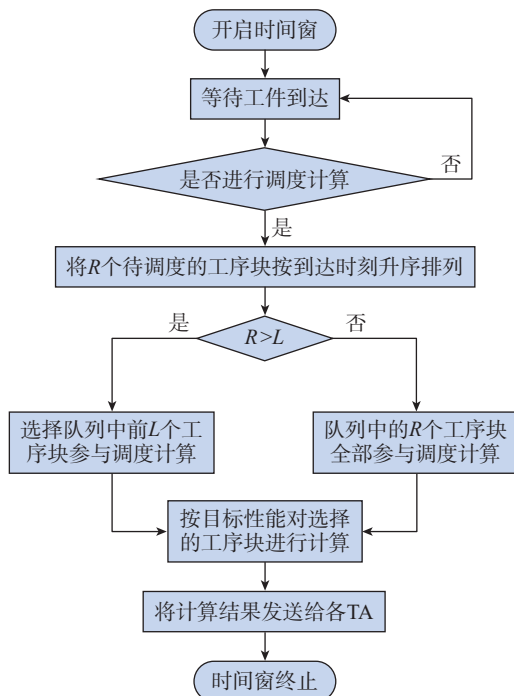


图 6 FCFS 的具体执行逻辑

Fig.6 Specific execution logic of FCFS

$$D = \begin{cases} 1, & \text{当前系统内有插单工件参与调度} \\ 0, & \text{当前系统内无插单工件参与调度} \end{cases} \quad (3)$$

$$L = (2 - D) \times (m - m_B) \quad (4)$$

### 3 仿真试验与结果分析

本文在 JDK 4.5.0 (Java development kit) 环境下借助 Eclipse 4.14.0 开发工具与 JADE 4.5.0 (Java agent development framework) 搭建调度平台, 调度平台的功能主界面如图 8 所示, 该平台主要包含用户管理、任务管理、调度控制、生产监控、帮助 5 个模块。将主要借助调度控制和生产监控模块进行基于固定时间窗调度策略 (Scheduling strategy based on fixed time window, SSBFTW) 与基于动态时间窗调度策略 (Scheduling strategy based on dynamic time window, SSBDTW) 的对比试验, 以及 SSBDTW 处理扰动事件的有效性试验, 仿真结果将由甘特图展示, 甘特图显示界面如图 9 所示。

#### 3.1 试验环境设置

试验中模拟柔性生产线由 4 台全能型加工中心组成, 加工能力如表 2 所示, 其基础数据来源于文献 [11], 可处理包括人工翻转装夹、在机检测在内的 10 种工艺

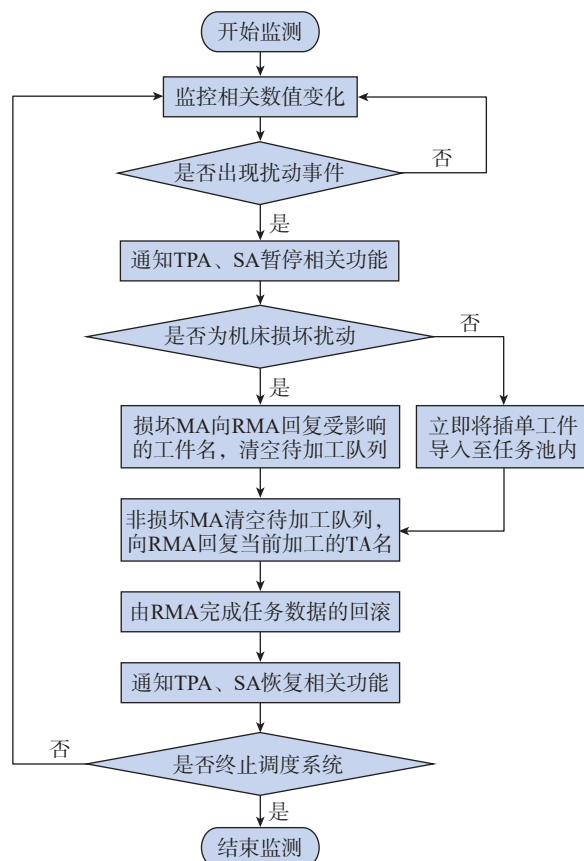


图 7 设备故障与急件插单扰动下的异常处理流程

Fig.7 Exception handling process under disturbance of equipment malfunction and urgent order

类型。人工翻转装夹、在机检测的加工系数固定为 1.0, 其余工艺类型的加工系数由区间 [0.7, 1.3] 内取随机数并精确到小数点后一位得到。

工单任务将以下述规则从如表 3 所示的 5 种工艺路线各不相同的示例工件中产生: 在区间 [1, 4] 取每种工件的个数  $\beta_i$  ( $1 \leq i \leq 5$ ), 使每个工单均包含上述 5 种示例工件, 工单内总工件数  $\alpha = \sum_{i=1}^5 \beta_i$ , 且工件的到达顺序随机。各示例工件的工艺路线原始数据主要来源于文献 [14]~[16]。



图 8 调度平台功能主界面

Fig.8 Main interface of scheduling platform

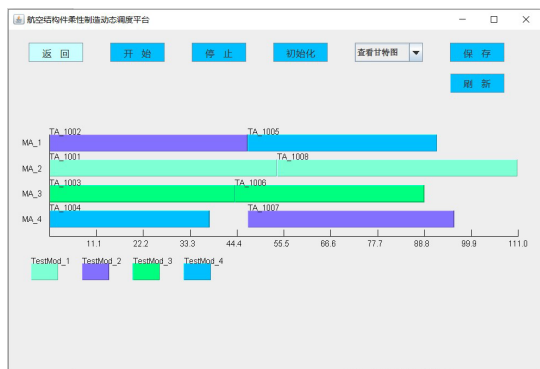


图 9 调度平台甘特图显示界面

Fig.9 Gantt chart interface of scheduling platform

实际生产过程中, 由于各工件的状态不完全相同, 不同工序块的加工前准备时间可能不相同, 当这些实际的准备时间与试验设定的准备时间产生偏差并累积, 试验结果便会与实际结果产生差异。但由于在实际生产中, 工件的加工前准备时间一般仅为数十秒, 而加工总时长可达数百分钟, 加工前准备时间的偏差对试验结果造成的影响较小, 在此忽略不计。

### 3.2 动态时间窗与固定时间窗调度方法对比试验

本试验以最大完工时间及设备利用率作为性能评价指标对比 SSBFTW 与 SSBDTW 随工件到达密度的变化情况 (SSBFTW 方法中取示例工件所有工序的平均加工时间为时间窗长度)。为尽可能保证得到的变化趋势具有普遍性, 根据工单规则构建如表 4 所示的 3 个批量分别为 10、15、20 的示例工单进行 3 组试验, 每组试验工件到达密度由大到小设置为 [0, 5]、[5, 10]、[10, 15]、[15, 20]、[20, 25] (相邻两工件的到达时间差在对应区间内随机取得, 首个工件默认初始时刻到达), 考虑平台启动时间、Agent 通信延误等偶然因素对试验的影响, 以每个工单每个档位进行 5 次试验取平均值作为对应档位的结果。

SSBFTW 与 SSBDTW 对比试验结果由图 10 所示, 分析可知: (1) 调度结果的最大完工时间与工件到达密度呈负相关, 在工件到达密度较大时两种方法最大完工时间较接近, 但 SSBDTW 调度结果的最大完工时间随工件到达密度的变化将显著优于 SSBFTW; (2) 调度结果的设备利用率随工件到达密度减小而减小, 但 SSBDTW 调度结果的设备利用率均优于 SSBFTW; (3) 总体上, SSBDTW 受工件到达密度变化的影响相比 SSBFTW 小。由此可见, SSBDTW 在工件到达密度变化的小批量、多品种生产场景下具有更好的调度性能和适应性。

### 3.3 异常调度策略有效性验证试验

本文选取工单 2 设置两组试验分别验证 SSBDTW 在设备故障、急件插单扰动下的有效性。处理设备故障

表 2 机床加工能力信息<sup>[11]</sup>

Table 2 Machine tool processing capacity information<sup>[11]</sup>

设备号	加工精度	加工系数									
		工艺类型 0	工艺类型 1	工艺类型 2	工艺类型 3	工艺类型 4	工艺类型 5	工艺类型 6	工艺类型 7	工艺类型 8	工艺类型 9
MA <sub>1</sub>	IT7	1.0	0.9	0.7	1.0	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3	1.0
MA <sub>2</sub>	IT6	1.0	1.0	1.0	1.3	0.8	1.1	0.9	1.3	0.7	1.0
MA <sub>3</sub>	IT5	1.0	1.0	0.7	1.0	0.7	1.1	0.7	0.9	0.7	1.0
MA <sub>4</sub>	IT6	1.0	0.7	0.9	0.9	1.3	0.8	1.2	1.0	1.3	1.0

表 3 示例工件工艺路线<sup>[14-16]</sup>  
Table 3 Process routes for sample artifacts<sup>[14-16]</sup>

示例工件		工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6	工序 7	工序 8	工序 9	工序 10	工序 11	工序 12
工件名	工艺信息												
TestMod_1	工艺类型	1	2	6	3	0	1	2	7	2	5	—	—
	需求精度	IT10	IT8	IT9	IT7	0	IT10	IT8	IT7	IT7	IT10	—	—
	时间期望/min	20	24	22	15	5	18	24	16	18	7	—	—
TestMod_2	工艺类型	1	2	0	1	2	0	2	0	3	9	8	5
	需求精度	IT11	IT8	0	IT11	IT8	0	IT8	0	IT8	0	IT7	IT10
	时间期望/min	25	32	5	28	43	5	14	5	24	2	13	10
TestMod_3	工艺类型	1	6	0	1	2	0	m	2	9	7	5	—
	需求精度	IT11	IT9	0	IT11	IT8	0	IT9	IT8	0	IT8	IT10	—
	时间期望/min	30	28	5	25	31	5	35	29	2	21	14	—
TestMod_4	工艺类型	1	3	4	0	3	9	4	5	—	—	—	—
	需求精度	IT10	IT8	IT7	0	IT8	0	IT7	IT10	—	—	—	—
	时间期望/min	18	22	27	5	16	2	27	10	—	—	—	—
TestMod_5	工艺类型	1	4	2	0	2	4	9	3	5	—	—	—
	需求精度	IT12	IT7	IT8	0	IT8	IT7	0	IT8	IT10	—	—	—
	时间期望/min	29	33	16	5	24	20	2	25	6	—	—	—

表 4 各示例工单内的工件信息  
Table 4 Artifact information in each sample worksheet

工单序号	工件代号	对应的示例工件
1	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10}	{TestMod_3, TestMod_1, TestMod_1, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_5, TestMod_1, TestMod_5}
2	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10, TestJob_11, TestJob_12, TestJob_13, TestJob_14, TestJob_15}	{TestMod_5, TestMod_2, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_4}
3	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10, TestJob_11, TestJob_12, TestJob_13, TestJob_14, TestJob_15, TestJob_16, TestJob_17, TestJob_18, TestJob_19, TestJob_20}	{TestMod_1, TestMod_4, TestMod_4, TestMod_5, TestMod_3, TestMod_5, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_2, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_1, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_3, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_4}

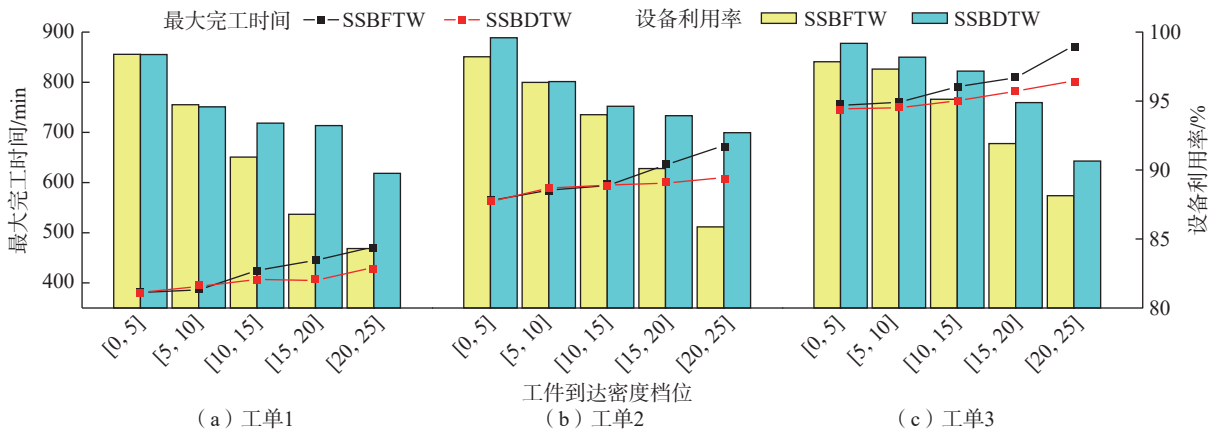


图 10 SSBFTW 和 SSBDTW 对比试验结果  
Fig.10 Comparison of SSBFTW and SSBDTW experimental results

的试验中,随机取得故障发生时刻为第 93 min,故障机床为 MA<sub>4</sub>,故障维护时间为 137 min, MA<sub>4</sub> 维护后的精度将由 IT6 下降至 IT8; 处理急件插单的试验中,随机取得插单时刻为第 85 min,插单工件为示例工件 3。设备故障、急件插单及无扰动状态下调度结果性能对比如图 11 所示,3 种状态下以档位 [0,5] 为例的调度结果甘特图如图 12 所示。

由上述试验可知:(1)设备故障扰动的调度结果相比无扰动的,最大完工时间由 562 min 增加到 575 min,性能下降约 2.31%,减少的 4 个工序块为直接受机器损坏影响的工件 TestJob\_11 的剩余未加工工序块,即设备发生故障后系统停止加工受损坏影响的工件,对剩余任务重新规划且与损坏前衔接较好, MA<sub>4</sub> 在结束维修

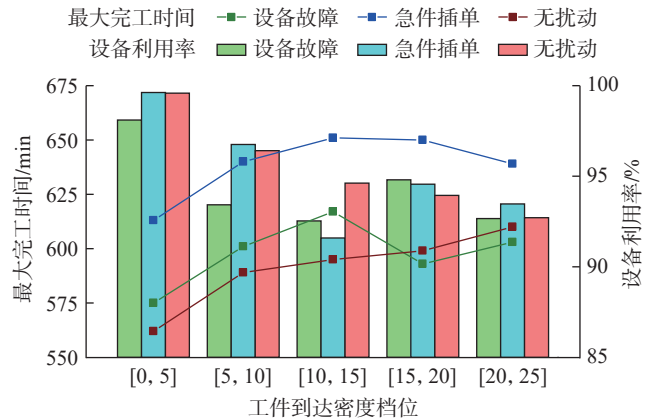


图 11 设备故障、急件插单与无扰动状态下的调度结果性能对比  
Fig.11 Performance comparison of dispatching results under equipment failure, urgent order and undisturbed state

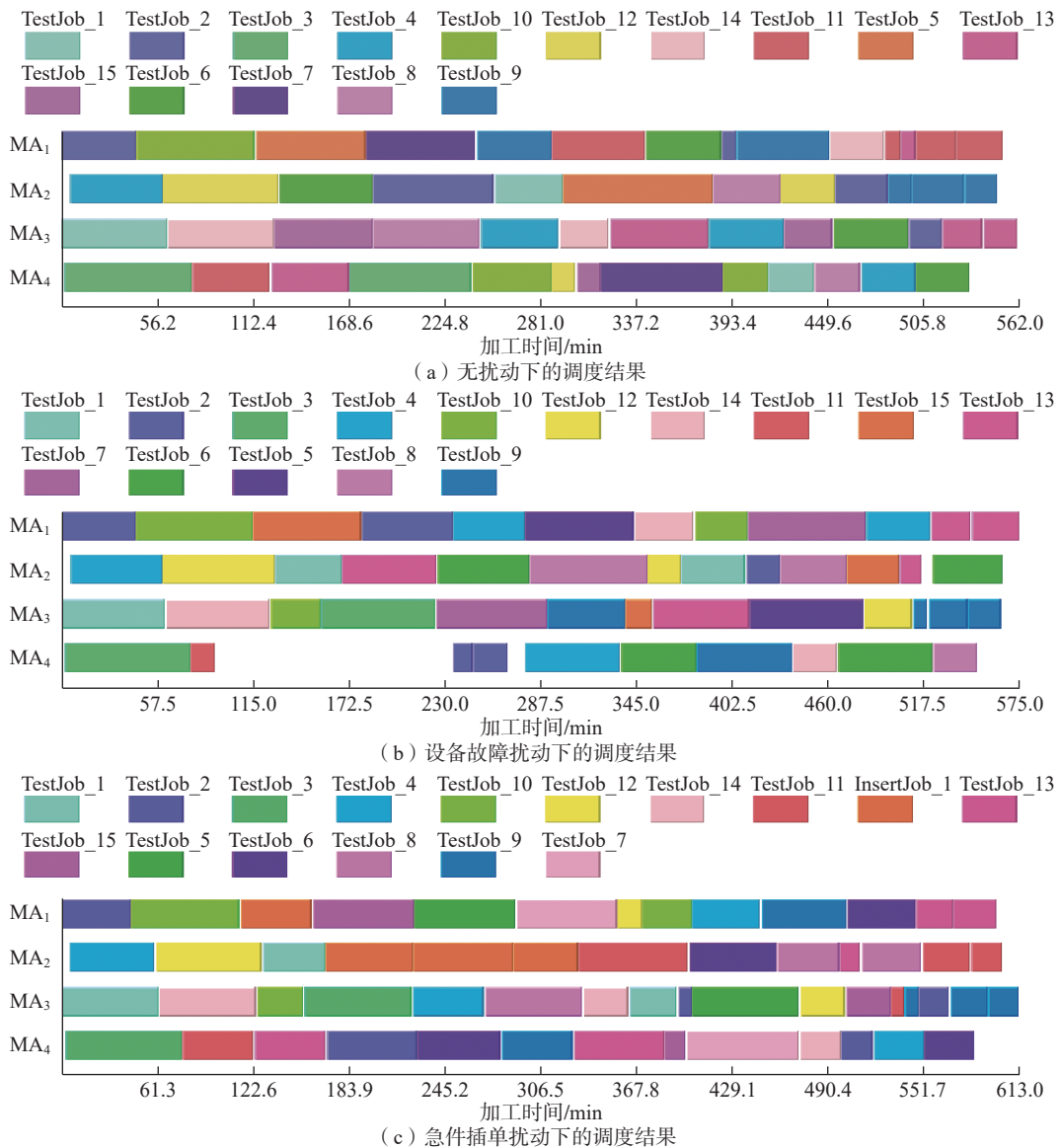


图 12 工单 2 [0,5] 档位调度结果甘特图

Fig.12 Gantt chart of scheduling results of work order two [0, 5] stalls

恢复使用后处理的工序块的精度需求也均未高于 IT8；(2) 急件插单扰动下的调度结果相比无扰动的,最大完工时间由 562 min 增加到 613 min,性能下降约 9.10%,增加的 4 个工序块为插单工件 InsertJob\_1 的所有工序块,插单工件到达后系统便将其安排在最早可以开始加工的机床上进行加工,且插单工件的后续工序块均被连续释放,保证插单工件的优先完成。证明了本文调度策略处理异常扰动的有效性。

## 4 结论

本文通过分析生产调度问题的现状,发现其在当前柔性生产场景下应用效果并不理想,未充分利用加工环境中的动态数据,导致系统的实时性、灵活性较差。因此结合实际柔性作业车间生产流程,基于多 Agent 构建了柔性制造动态调度系统,并根据柔性作业加工特点以及调度过程中不同阶段的运行机制对传统 CNP 进行了改进,形成了以基于调度规则的动态时间窗调度方法为核心的动态调度策略。最后借助具备可视化交互界面的动态调度平台设计试验验证了本文动态调度策略的可行性,对当前实际柔性作业车间的生产活动具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] ZHANG J, DING G F, ZOU Y S, et al. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4): 1809–1830.
- [2] 桂林,张春江,李新宇.具有工序顺序柔性的车间调度问题研究综述[J].工业工程,2020,23(2):116–123.
- GUI Lin, ZHANG Chunjiang, LI Xinyu. A review of research on shop scheduling problem with flexible process sequence[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(2): 116–123.
- [3] CHAUDHRY I A, KHAN A A. A research survey: Review of flexible job shop scheduling techniques[J]. International Transactions in Operational Research, 2016, 23(3): 551–591.
- [4] MOHAN J, LANKA K, RAO A N. A review of dynamic job shop scheduling techniques[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 30: 34–39.
- [5] 闫纪红,李柏林.智能制造研究热点及趋势分析[J].科学通报,2020,65(8):684–694.
- YAN Jihong, LI Baibin. Research hotspots and tendency of intelligent manufacturing[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(8): 684–694.
- [6] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等.动态车间作业调度问题中调度规则算法研究综述[J].计算机应用研究,2016,33(3):648–653.
- FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, et al. Survey of dispatching rules for dynamic job-shop scheduling problem[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 648–653.
- [7] 管晨丞,唐敦兵,魏鑫,等.基于区间协同拍卖策略的改进多 Agent 车间调度模型研究[J].航空制造技术,2019,62(7):34–42.
- GUAN Chencheng, TANG Dunbing, WEI Xin, et al. Research on modified multi-agent model for job-shop scheduling based on interval-synergy-auction scheduling strategy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 34–42.
- [8] 江海凡,丁国富.基于 Agent 的制造系统建模与仿真研究[J].航空制造技术,2018,61(1/2):54–61.
- JIANG Haifan, DING Guofu. Survey of agent-based manufacturing system modeling and simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1/2): 54–61.
- [9] WANG S Y, WAN J F, ZHANG D Q, et al. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination[J]. Computer Networks, 2016, 101: 158–168.
- [10] 梁慰乐.基于多 Agent 的柔性生产动态调度系统研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- LIANG Weile. Research on multi-agent based flexible production dynamic scheduling system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [11] 魏鑫.面向多目标优化的改进型多 Agent 车间调度技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- WEI Xin. Research on multi-objective optimization for job-shop scheduling based on modified multi-agent system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [12] ZHANG S C, WONG T N. Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: A hybrid MAS/ACO approach[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(11): 3173–3196.
- [13] 曹乐. CPPS 的多智能体架构与动态调度机制研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- CAO Le. Research on multi-agent architecture and dynamic scheduling mechanism of CPPS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 李超,路朝留,唐鸿雁,等.卧式五轴加工中心钛合金件加工工艺的设计[J].中国高科技,2018(2):44–46.
- LI Chao, LU Chaoliu, TANG Hongyan, et al. Design of machining technology for titanium alloy parts in horizontal five-axis machining center[J]. China High-Tech, 2018(2): 44–46.
- [15] 肖潇.航空结构件车间调度系统的研究与实现[D].成都:电子科技大学,2020.
- XIAO Xiao. Research and implementation of aviation structural parts production workshop scheduling system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [16] 吴继浩.面向航天产品的多目标动态生产调度方法研究及应用[D].绵阳:西南科技大学,2019.
- WU Jihao. Research and application of multi-objective dynamic production scheduling method for aerospace products[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.

通讯作者:杜丽,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能制造装备及其控制技术。

(责编 晓月)