

基于多智能体的某柔性作业车间调度方案设计

吴星汉 姜珊 刘巍巍

沈阳工业大学 机械工程学院 辽宁 沈阳 110870

【摘要】：在我国智能制造与产业升级的时代背景下，离散制造业对柔性作业车间动态调度能力的要求较高，而现有调度方法存在适配性弱、决策精准度不足等问题，难以适配动态生产调度场景。本文针对 X 企业发动机零部件加工车间的痛点问题，以构建面向动态扰动事件的双端到端模型为核心，设计了基于多智能体深度强化学习的动态调度优化方案。该方案通过系统分析车间现状、构建约束体系、实时监控动态事件、融合静态动态特征、多智能体协同调度等步骤加以实施，并通过实验与实例应用验证有效性。研究表明，所提优化方案可有效解决调度易失衡、机器故障修复效率低、工序与机器的资源分配易冲突以及调度策略僵化等问题，在提升设备利用率与订单按期交付率，保障柔性作业车间生产流程的连续性与稳定性方面具有重要的实践价值。

【关键词】：柔性作业车间；动态调度；多智能体；优化方案

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.082

1 引言

在我国智能制造与产业升级深度推进的时代背景下，离散制造业生产环境日趋复杂，订单波动、机器故障、工艺调整等动态扰动事件频发。现有调度方法多以静态逻辑应对动态生产场景，存在适配性不强、决策精准度不足、时序特征挖掘不充分等问题，难以有效支撑柔性作业车间的动态调度需求，进而制约生产流程的连续性与稳定性。多智能体具备分布式协同、自主决策与实时响应的核心优势，依托其构建高效调度机制，对提升车间自适应调度水平、增强生产系统韧性、优化资源配置效率、推动离散制造行业智能化升级具有重要理论与应用价值。

近年来，国内外学者围绕柔性作业车间调度问题开展了大量研究，李雅明等（2023）提出改进 Q-learning 强化学习方法，通过重新设计状态空间与动作集，结合随机可行工序编码与随机贪婪策略选取最优机器编码，有效提升了调度方案的可行性。Panzer 等（2024）提出了半分层生产系统中的超启发式控制模型，其中多个制造和分销代理分布在预定义的模块中，代理采用深度强化学习算法来学习策略，以特定情况的方式选择低级启发式，从而利用系统性能和适应性，模块化设计降低整个系统的复杂性，并促进与其他场景的快速无缝集成。Liu 等（2023 年）提出了一种新的基于深度强化学习的 PMS 方法，模型考虑了 PMS 的特征来设计状态和奖励，它可以根据当前环境或意外事件有效地选择一系列调度规则。在协同调度方

向，Moon 等（2021）提出基于多访问边缘计算结构的调度方法，通过边缘设备协同协作实现网络边缘独立调度，优化了调度响应效率。尽管现有研究已取得一定进展，但结合企业实际生产需求与复杂动态扰动场景来看，仍存在进一步深化与拓展的研究空间。

本文以 X 企业主轴加工车间为研究对象，针对动态扰动下的资源配置、协同调度核心需求，设计适配企业实际的调度优化方案，明确实施流程与关键环节，实现工序与机器资源合理匹配、多智能体协同调度，为柔性作业车间动态调度方案设计提供了实践参考。

2 问题分析

2.1 作业车间现状

本文通过调研 X 数控装备零件制造有限公司的主轴加工车间的实际生产数据，发现该车间采用订单驱动式柔性制造模式，产品转速跨度大，应用场景多样，主要涵盖 14 种电主轴产品型号，月产能约 320 件，其中数控车床主轴 S04 和卧式加工中心主轴 S09 为主力产品，占总产量的 26.6%。

车间按工艺划分为 6 个加工单元，共 20 台设备，月均接收订单约 30 个，单批次数量不等。稳定生产状态下，标准订单交付平均周期 20 天，普通主轴按 8 个平均批量计算，19 天左右可完成，超精密主轴按需时效处理，生产周期约 22 天。2024 年第四季度生产数据显示，在作业随机到达、设备故障等动态扰动下，实际交付周期波动 3~5 天。

作者简介：

吴星汉(2000-)，男，硕士研究生，研究方向：车间调度。

姜珊(2002-)，女，硕士研究生，研究方向：车间调度。

刘巍巍(1973-)，女，教授，博士生导师，研究方向：企业资源优化。

2.2 主轴加工工艺流程分析

车间主轴加工遵循标准化工艺路线：首先对原材料进行入厂检验，检验合格后开展粗车外圆工序；随后进行热处理以改善材料内部组织、优化综合力学性能，之后依次完成半精车加工、铣键槽、内孔精镗工序；再通过表面淬火与回火处理，有效提升主轴表面硬度与耐磨使用寿命，接着经粗磨外圆、精车成形去除加工余量，再实施时效处理以消除内部应力、稳定工件尺寸精度；后续依次进行精磨、超精磨削加工，显著提升主轴的尺寸精度与表面光洁度，通过动平衡检测保障主轴高速旋转的平稳性，再经表面处理强化工件防腐防锈性能，最终完成精密装配与成品最终检测，全面确保主轴各项性能指标均达到设计与质量标准要求。主轴加工流程图如图1所示：

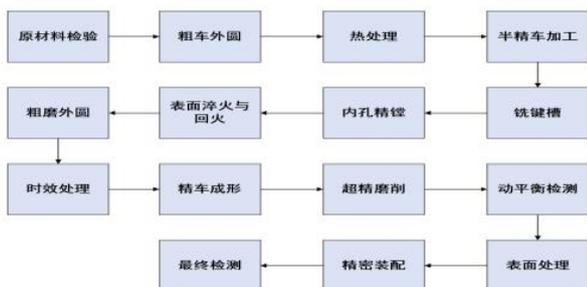


图1 主轴加工流程

2.3 作业车间问题分析

该车间已部署 ERP 系统实现生产计划排产，并依托 MES 系统完成生产过程数据的实时采集，构建了基础数字化生产管理框架。然而，现有调度体系对动态生产事件的响应仍高度依赖人工干预，生产计划日均调整频次达 3.2 次，导致设备综合效率（OEE）偏低，生产交付延误风险显著提升。经系统调研，车间生产扰动主要源于作业随机到达与机器突发故障两类动态事件，具体问题可归纳为以下四点：

（1）动态订单冲击引发调度失衡第四季度该车间累计接收加急订单 39 个，月均 13 个。由于加急订单的到达时间具有强随机性，现有调度系统需每 48 小时被动调整一次排产计划，导致加急订单的平均响应时间长达 2.1 小时，相关工序的交付延误率达 21%。频繁的计划调整不仅打破了原有生产节奏，还造成工序衔接中断，进一步加剧了生产波动。

（2）设备故障处置效率低下，生产连续性受损第四季度车间共发生设备故障 15 次，月均 5 次，单次故障平均修复时长为 1.08 小时，其中五轴联动加工中心为故障高发设备。故障发生后，相关工序需临时转移至替代设备生产，直接导致加工效率下降 19%；同时，人工重调度方案的平均生成耗时同样为 1.08 小时，双重延迟效应进一步放大了生产中断的影响范围与持续时间。

（3）工序—设备资源分配冲突凸显由于工序与设备间缺

乏实时信息共享机制，第四季度因决策冲突引发的设备空置或过载事件共 12 次。当多工序竞争同一空闲设备时，现有局部优化策略仅关注单工序优先级，导致设备负载率波动幅度高达 $\pm 35\%$ ，车间整体设备利用率仅为 74%，生产资源配置的全局协同性不足。

（4）动态特征缺失导致调度策略僵化现有调度模型未有效整合机器可靠性、订单动态优先级等关键生产特征，导致调度方案与实际生产场景严重脱节。例如，高优先级订单常被分配至低可靠性设备，因未纳入设备故障概率的预判逻辑，最终引发交付延误，反映出调度决策对动态生产要素的适配能力不足。

3 优化方案设计

3.1 优化目标的确定

为确保调度优化方案设计的靶向性、实操性及评价科学性，本文设定四个调度优化核心目标，为后续调度优化方案的构建与实施提供基本准则。

（1）应对动态扰动时保障生产节拍稳定，降低工件等待时间，提升设备利用率与订单按期交付率。

（2）缩短故障修复与生产恢复时间，降低故障对生产节拍的冲击，保障生产流程连续性与稳定性。

（3）消除资源浪费与调度冲突，提升资源配置效率，保障生产流程顺畅高效。

（4）挖掘并利用生产动态特征，构建自适应动态调度策略，替代传统静态调度模式，提升调度系统对动态生产环境的适配能力。

3.2 优化方案流程设计

本文设计基于多智能体深度强化学习的动态调度优化方案，分 9 个核心步骤实施，实现从现状分析到实际应用的全流程落地，具体流程如下：

步骤 1：对 X 企业柔性作业车间的实际运营现状展开系统分析，明确核心问题后，设计针对性调度优化流程；

步骤 2：构建工序—资源约束体系，界定工序加工的先后逻辑顺序，以及机器资源与工序的适配集合；

步骤 3：实时监测车间生产过程中是否出现动态事件，并精准识别动态事件的具体类型；

步骤 4：结合订单交货期紧迫度、工件剩余工序数量等关键指标进行动态赋权，计算得出工序的基本优先级；

步骤 5：引入邻居交互机制，定义智能体邻居集合，改进传统 Paxos 交互协议，实现多智能体协同调度——在保障全局信息有效交互的前提下降低通信开销，进而构建基于分层交互机制的柔性作业车间调度模型；

步骤6: 智能体依据上述模型与算法输出具体调度决策;

步骤7: 开展实验验证, 通过与传统模型及算法进行对比, 以最大完工时间为核心测试指标, 验证所提模型与算法的有效性;

步骤8: 基于验证后的模型与决策结果, 生成最终调度方案;

步骤9: 进行实例应用分析, 进一步验证算法解决实际生产调度问题的可行性与实用性。

4 结论

本文以多智能体深度强化学习为核心, 设计包含现状分析、约束构建、动态监测、特征融合、协同调度、实验验证、实例应用的全流程动态调度优化方案, 通过构建分层交互机制、实现动态特征融合, 有效提升调度系统的自适应能力与决策精准度。该方案可解决企业现有调度痛点, 提升设备利用率与订单按期交付率, 保障柔性作业车间生产流程的连续性与稳定性, 为离散制造业柔性作业车间的动态调度优化提供实践参考。

参考文献:

- [1] 刘乐,唐文娜.作业外包与单机批调度联合优化问题的确定型启发式算法[J].工业工程与管理,2024,29(02):140-150.
- [2] 朱焜秋,沈良瑜.采用改进遗传算法优化 LS-SVM 逆系统的外转子无铁心无轴承永磁同步发电机解耦控制[J].中国电机工程学报,2024,44(05):2037-2047.
- [3] 刘洋,曹立佳,杨旭.改进遗传算法在多 AGV 调度中的应用[J].计算机应用与软件,2024,41(04):86-89+105.
- [4] 徐嘉琦,田野.基于改进遗传算法的柔性流水车间调度研究[J].制造技术与机床,2024(4):181-187.
- [5] 金秋,王清岩,原博文.基于改进遗传算法的柔性作业车间调度研究[J].制造技术与机床,2024(4):167-172.
- [6] 屈新怀,纪飞,孟冠军,等.超启发式遗传算法柔性作业车间绿色调度问题研究[J].机电工程,2022,39(02):255-261.
- [7] 张佳朋,庄存波,刘检华,等.基于超启发式算法的可重构装配车间调度[J].计算机集成制造系统,2025,31(02):399-410.
- [8] AMIRTEIMOORI A,KIA R.Concurrent scheduling of jobs and AGVs in a flexible job shop system:a parallel hybrid PSO-GA meta-heuristic[J].Flexible Services and Manufacturing Journal,2023,35(3):727-753.
- [9] MOMENIKORBEBKANDI A,ABBOD M F.A Novel metaheuristic hybrid parthenogenetic algorithm for job shop scheduling problems:applying an optimization model[J].IEEE Access,2023,11:56027-56045.