

大型容器制造车间生产调度智能化研究

李亚男

(山东翔天重工科技有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要 针对大型容器制造车间因工序长、设备专用、订单个性化及动态扰动频繁而导致的传统人工调度效率低下、延期严重的问题, 本文提出了一种基于深度强化学习的智能调度方法, 通过构建贴合实际的状态感知模型、设计融合领域知识的调度动作空间与奖励机制, 并完成模型的训练与部署, 实现了自动排产与实时动态调整。结果表明, 该方法能显著降低平均延期量、提升设备平均利用率至 81% 左右, 并将调度反应时间缩短至毫秒级, 整体性能明显优于传统人工规则与经典智能算法。

关键词 大型容器制造; 生产调度; 智能化; 动态调度

中图分类号: TH186; TP278

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.021

0 引言

大型容器作为石油、化工及能源行业的核心装备, 以其体积庞大、重量沉重及加工精度严格著称, 其生产流程涵盖下料、卷圆、焊接、热处理、探伤及组装等十余道复杂工序, 且高度依赖大型焊接机、热处理炉等专用稀缺设备, 由于设备数量有限且成本高昂, 一旦调度失当极易引发长时间等待、资源闲置或过度损耗^[1]。加之此类产品多为单件小批量定制化生产, 各订单在尺寸、材质及工艺上差异显著, 且生产过程中频繁遭遇临时加单、设备故障、原料延误及工艺变更等突发扰动, 使得生产调度面临极大的复杂性与不确定性^[2]。

目前, 多数制造车间仍沿用依赖人工经验的排产模式, 调度员仅凭主观直觉安排工序与设备, 导致排产效率低下且难以应对突发状况, 常出现设备忙闲不均、工期延误及生产成本攀升等弊端, 同时过度依赖老员工经验致使知识难以标准化传承与持续优化^[3]。随着智能制造的深入发展, 引入人工智能技术替代人工进行自动决策已成为解决上述痛点的关键路径, 其中深度强化学习凭借其类似人类的“学习”能力, 能通过模拟车间规律自动挖掘最优调度策略, 并在面对动态变化时迅速调整决策, 展现出解决动态调度问题的独特优势^[4]。

尽管深度强化学习在普通加工车间已有应用, 但在大型容器制造这一具有长工序、强约束及高动态特征的特定场景中, 相关研究仍相对匮乏。鉴于此, 本文聚焦大型容器制造车间的实际痛点, 致力于构建一套简单实用、易于落地的智能调度技术体系, 旨在通

过理论与实践的结合, 为企业实现生产调度的智能化转型提供参考。

1 大型容器制造调度的特点与难点

1.1 制造特征与调度约束

大型容器制造呈现出显著的复杂性与特殊性, 其生产过程需历经下料、焊接、热处理等十余道紧密衔接的工序, 且关键工序往往耗时数小时乃至数天, 具有极强的连续性与不可中断性^[5]。同时, 由于产品体积庞大导致转运必须依赖行车吊运, 工序间的移动耗时不可忽略, 加之设备专用性强、资源稀缺致使“多工序争抢单设备”的瓶颈现象频发, 以及订单高度定制化引发的工艺路线千差万别, 使得传统的固定模板排产难以适用, 给生产调度带来了巨大的资源约束与协调难度。

1.2 动态环境与优化目标

在实际运行中, 车间常面临临时加单、设备故障、原料延误及工艺变更等多重突发扰动, 极易打乱既定计划, 因此智能化调度的核心目标在于构建具备高鲁棒性的动态响应机制, 旨在通过自动化的决策体系在确保交货期零延误的前提下, 实现设备资源的均衡负载与高效利用, 并具备在遭遇突发状况时无需人工干预即可毫秒级重排计划的能力, 从而彻底解决人工调度反应滞后与经验依赖的痛点。

2 基于深度强化学习的智能调度方法

2.1 状态感知与环境建模

深度强化学习的核心在于构建一个能够映射真实车间动态的智能体, 该智能体通过实时接入生产管理

作者简介: 李亚男 (1990-), 女, 本科, 研究方向: 容器制造。

系统，自动采集并解析包括待处理订单集合、各订单当前工序进度、设备实时工况（含空闲、运行及故障状态）以及工序等待时长等关键状态信息，从而精准构建车间的实时状态空间，为后续的调度决策提供完整、准确的数据底座，彻底摒弃了传统人工录入的低效与滞后。

2.2 动作空间与规则设计

针对大型容器制造的特殊工艺需求，本研究构建了包含七类核心策略的调度动作空间，旨在引导智能体在复杂的生产环境中寻找最优解：涵盖基于交货期紧迫度的“紧急优先”策略、旨在缩短流转时间的“短工序优先”与处理长周期工序的“长工序优先”策略、优化资源配置的“设备均衡”与“少走路优先”策略、应对动态扰动的“突发处理”策略，以及引入探索机制的“随机尝试”策略，通过这七类规则的有机组合，赋予系统灵活适应多变更生产场景的能力。

2.3 奖励机制与模型训练

为驱动智能体实现“越学越好”的自适应优化，系统建立了一套基于调度绩效的奖励评价机制，即在每一次调度动作执行后，依据实际产生的延期时长、设备利用率及等待时间等指标给予相应的正向或负向反馈。智能体通过持续的试错与迭代学习，在最大化累积奖励的目标驱动下，不断修正其策略网络参数，从而逐步掌握在不同车间状态下做出最优调度决策的内在规律，最终形成一套成熟的、具备高度泛化能力的智能调度模型。

2.4 实施路径与应用流程

本方法的落地实施遵循“离线训练—在线应用”的闭环流程，首先在数字孪生环境中模拟各类极端及常规生产场景对模型进行离线预训练，待策略收敛后，将模型无缝接入真实车间系统进行在线推理。系统在实时读取生产数据后，自动输出包含工序分配与设备指派的最优排产方案，并在遭遇设备故障或紧急插单等突发状况时，毫秒级触发重排机制，实现无需人工干预的全自动化、动态化实时调度。

3 实验测试与效果对比

3.1 实验设计与评价体系

为验证本文所提智能调度方法在实际生产环境中的有效性，本研究基于某大型压力容器制造车间的真实历史数据构建了对比实验框架，系统性地对比了包括人工经验规则（先来先做、交货期优先）、传统智能优化算法以及本文基于深度强化学习的智能调度模

型在内的多种调度策略在稳定生产（无突发扰动）与动态生产（含临时加单、设备故障等突发情况）两种典型场景下的性能表现，并选取平均延期量（反映交货期保障能力）、设备平均利用率（衡量资源利用效率）以及调度反应时间（体现系统响应速度）三个核心指标作为量化评价依据，确保实验结果的客观性与可比性。

3.2 实验结果与对比分析

实验结果如表1与表2所示，在稳定生产环境下（见表1），传统人工调度规则（先来先做、交货期优先）由于缺乏全局优化能力，导致平均延期量最高且设备利用率仅维持在62%～65%的较低水平。传统智能算法虽在设备利用率方面有所提升（约73%），但其调度反应时间达到秒级，在实时性要求较高的生产场景中仍显不足。相比之下，本文提出的智能调度方法不仅能将平均延期量降至最低，设备平均利用率也提升至81%左右，实现了毫秒级的调度反应速度，展现出显著的综合优势。

表 1 稳定生产调度效果对比

调度方式	平均延期量	设备平均利用率	调度反应时间
先来先做	最高	62% 左右	一般
交货期优先	较高	65% 左右	一般
传统智能算法	中等	73% 左右	很慢（秒级）
本文智能调度	最低	81% 左右	极快（毫秒级）

表 2 动态生产调度效果对比

调度方式	平均延期量	设备平均利用率	调度反应时间
先来先做	非常高	58% 左右	慢
交货期优先	很高	61% 左右	慢
传统智能算法	较高	69% 左右	非常慢
本文智能调度	最低	77% 左右	极快

在扰动因素更为复杂的动态生产场景中（见表2），当车间遭遇临时插单、设备突发故障等不可预见的生产冲击时，依托人工经验制定的传统调度规则会出现平均延期量大幅上升至非常高区间、设备利用率回落至58%～61%区间且调度调整响应速度严重滞后的问题。传统智能优化算法虽可将设备利用率维持在69%左右的相对稳定水平，但受限于秒级乃至更长周期的计算耗时，无法匹配现场生产节奏快速更迭的实时性要求。本文所提出的智能调度方法依托在线自主学习与快速重排优化能力，在持续保持最低平均延期量的

基础上, 可将设备利用率稳定控制在 77% 左右, 同时始终保持毫秒级的高效响应速度, 证实该方法在多扰动、高动态生产环境下的优异鲁棒性与场景适配能力。

3.3 结论与应用价值

综合多组对比实验数据可以明确, 本文构建的基于深度强化学习的大型容器制造车间智能调度方法, 在平均延期量、设备利用率、调度响应速度等核心评价指标上均全面优于人工经验调度规则与传统经典智能优化算法, 该方法不仅能够切实缩减生产交付延期时长、最大化挖掘设备资源利用潜力, 还可凭借毫秒级实时响应能力快速化解各类生产突发状况。该技术方案能够大幅弱化企业生产调度对资深调度员个人经验的过度依赖, 为制造企业在动态多变、约束复杂的生产场景中搭建智能化、高效化调度管理体系提供了可落地、可复制、可推广的技术支撑。

4 技术优势与适用场景

4.1 核心技术优势

本套智能调度系统最核心的竞争力体现在全流程自动化运行与多场景强适配特性, 可完全脱离人工干预完成从排产方案生成、工序执行跟踪到动态扰动调整的全链路调度工作, 从根本上减轻调度岗位的工作负荷; 系统依托毫秒级实时重排优化机制, 能够对设备故障、紧急插单、工艺调整等动态生产事件做出即时反馈, 保障车间生产流程连续稳定推进。同时, 借助全局化优化决策逻辑, 有效压缩工序间等待耗时、降低订单交付延期风险, 全面提升车间设备综合运行效率。尤为重要的是, 该方案采用轻量化集成架构设计, 可与企业现有 MES、ERP 等生产管理系统实现无缝对接, 无需对车间现有生产设备与产线布局进行大规模改造, 显著降低了企业智能化升级的实施难度与改造成本。

4.2 典型适用场景

本技术方案高度适配大型容器、压力容器、工业储罐、化工塔器等重型装备制造车间的生产调度需求, 这类生产场景普遍存在工艺流程链条长、专用核心设备资源稀缺、订单定制化程度高的特征, 对调度方案的灵活性与应变能力提出严格要求; 尤其是针对日常生产中频繁出现紧急加单、设备非计划停机、工艺路线临时调整等不确定事件的生产环境, 本系统可提供稳定可靠的调度保障。因此, 所有以提升生产效率、缩短交付周期、控制运营成本为目标, 且积极推进数字化、智能化转型的离散型制造企业, 均可将本方案作为精益生产推进与智能制造升级的优选解决方案。

5 结束语

本研究围绕大型容器制造车间长期存在的生产调度逻辑复杂、人工排产效率偏低、动态扰动应对不足等核心痛点, 通过理论构建与实践验证相结合的方式, 系统论证了深度强化学习技术应用于车间智能调度的可行性与实用价值; 研究结果充分证实, 传统调度模式在应对工序繁多、设备专用性强、订单定制化特征显著的大型容器制造场景时, 已难以适配现代制造业对生产效率、柔性调度与智能决策的核心需求; 而本文提出的智能调度方法通过搭建状态实时感知、动作自主选择、奖励闭环反馈的完整学习机制, 实现了自动排产、动态调整、实时优化的全流程智能化管控, 在实际应用中展现出降低交付延期率、提升设备综合利用率、实现毫秒级快速响应的突出优势; 该技术方案还具备极强的工程落地属性, 可依托低成本改造模式与企业现有生产管理系统完成融合对接, 为大型容器制造车间的智能化升级提供了务实可行的解决路径。未来, 该技术体系仍具备持续拓展与深度优化的广阔空间, 需深度融合数字孪生技术, 搭建高保真虚拟车间仿真模型, 完成排产方案的前置仿真验证与生产趋势精准预测, 进一步强化调度决策的科学性与可靠性; 融入自然语言处理与智能人机交互技术, 支持语音指令操控、文本信息查询等轻量化操作模式, 提升调度系统的智能性与易用性, 降低一线操作人员的使用门槛。随着工业 4.0 战略与智能制造理念的深度落地, 智能调度技术将成为大型容器制造企业实现降本增效、锻造核心竞争力的关键技术支撑, 持续推动整个重型装备制造行业向更高层级的数字化、智能化方向转型升级。

参考文献:

- [1] 商宁, 贾海利. 单件流转的多装配级联产线车间调度技术研究 [J]. 天津职业技术师范大学学报, 2026, 36(01): 1-7, 18.
- [2] 贺杰, 陈梦洋. 基于数字孪生技术的柔性智能制造车间调度研究 [J]. 今日制造与升级, 2024(08): 44-46.
- [3] 罗亚波, 柳莎, 张峰, 等. 带有限缓冲区的可重入混合流水车间调度研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(12): 20-27.
- [4] 宁国宇, 陶汉桥, 宋国鹏, 等. 具有顺序柔性的车间调度问题的变邻域禁忌搜索算法 [J]. 控制与决策, 2026, 41(01): 31-43.
- [5] 王瀚鹏. 含并行批处理工序的作业车间调度问题策略与方法研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2025.