

面向柔性制造的智能物流穿梭车自适应调度策略与仿真分析

马 良

极兔速递集团上海奥索斯自动化科技有限公司 上海市 201705

【摘 要】：柔性制造产线存在多品种、小批量和工序频繁切换等特征，传统静态调度难以及时响应任务插入、设备阻塞和路径占用变化。围绕智能物流穿梭车调度问题，本文构建由感知层、决策层和执行层组成的自适应调度框架，利用 RFID 定位、物联网通信和滚动决策机制实现任务、车辆与路径状态协同更新。在任务分配环节，建立以紧急度和物料类型为核心的优先级模型，并结合车辆负载、电量和到达时间进行匹配；在路径优化环节，引入冲突成本和时间窗控制机制，降低多车并行运行中的节点争用。FlexSim 仿真结果表明，相较传统静态调度，自适应调度策略使任务平均完成时间由 150s 降至 120s，穿梭车利用率由 70% 提升至 85%，路径冲突率由 15% 降至 5%，验证了该策略在提升调度效率和运行稳定性方面的有效性。

【关键词】：柔性制造；智能物流穿梭车；自适应调度；动态任务分配；路径冲突避免

0 引言

柔性制造模式下，车间物流任务呈现动态到达、需求波动和路径资源竞争等特征，物料配送效率直接影响生产节拍与订单响应能力。传统静态调度依赖固定规则，难以适应紧急任务插入和通道占用变化。因此，研究融合实时感知、动态分配和路径协同的智能物流穿梭车自适应调度策略，对提升车间物流柔性化和制造系统稳定性具有重要意义。

1 智能物流穿梭车调度的研究背景与理论基础

鉴于柔性制造产线存在多品种、小批量以及工序频繁切换的运行特性，智能物流穿梭车调度需要把物料需求、工位状态以及设备负载纳入同一决策链路中进行协同响应。智能物流穿梭车指在车间轨道或巷道内执行搬运、缓存以及转运任务的自动化载具，其运行效率直接关联生产节拍稳定性。进一步观察当前车间物流组织方式，固定规则驱动的静态调度在订单插入、设备阻塞、路径占用等情境下适应性偏弱，动态任务到达后容易出现任务重排滞后以及车辆空驶增加等问题。自适应调度把实时感知当作状态更新基础，借助 RFID 定位获取车辆以及物料位置，依靠物联网通信完成任务、路径以及设备信息的持续交互，并在动态决策机制中对任务优先级、车辆可用性以及通道冲突进行滚动调整，由此为后续策略构建提供理论支撑。

2 面向柔性制造的智能物流穿梭车自适应调度策略设计

2.1 自适应调度策略的框架构建

鉴于柔性制造产线任务到达具有随机性以及工位需求具有波动性，智能物流穿梭车调度框架需要把现场感知、方案生成以及执行反馈纳入连续闭环。本文构建感知层、决策层以及执行层组成的自适应调度框架，见图 1。感知层把 RFID 定位、车载传感器以及物联网通信模块当作状态采集基础来使用，实时获取任务紧急度、物料类型、穿梭车位置、电量以及占道状态，

并且把异构信息整理为统一状态向量。决策层依靠滚动更新机制开展调度方案调整工作，围绕任务优先级、车辆可用性以及工位负载关系进行匹配计算，把动态任务插入对原有队列造成的扰动控制在可接受范围内。执行层承担路径规划、速度控制以及任务确认工作，在多辆穿梭车并行运行场景下对交叉口通行顺序进行协同安排。该框架并不把调度视为单次静态分配，而是把每一次任务完成、车辆状态变化以及通道占用变化转化为下一轮决策输入，从而契合柔性制造多任务并行、工序频繁切换的运行需求。

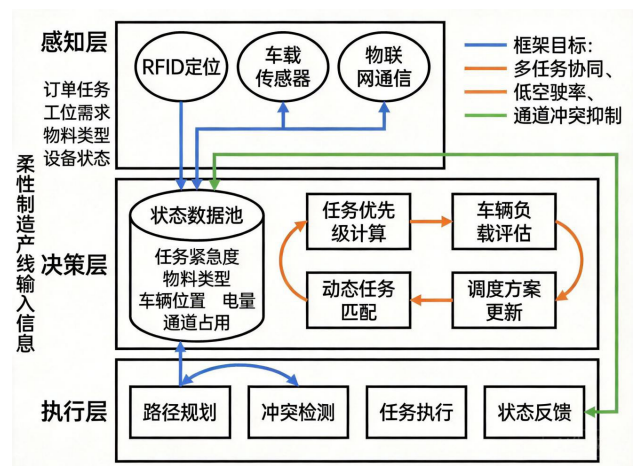


图1 智能物流穿梭车自适应调度策略框架流程图

2.2 动态任务分配算法设计

面向多品种小批量生产场景，动态任务分配算法需要同时回应任务时效差异以及车辆资源差异，避免仅按距离就近派车造成紧急物料等待。本文把任务优先级当作任务排序的核心指标来使用，紧急度反映工位缺料、订单插入以及工序衔接压力，物料类型系数则反映关键零部件、普通在制品以及缓存物料在生产链路中的影响差异。结合柔性制造中紧急需求对节拍扰动

更为敏感的特性，紧急度权重设为0.6，物料类型权重设为0.4，任务优先级计算模型如下：

$$P = 0.6 \times E + 0.4 \times T$$

其中， P 表示任务优先级， E 表示任务紧急度， T 表示物料类型系数。

在获得任务优先级后，算法进一步引入穿梭车负载评价，负载由当前任务数以及剩余电量共同刻画，当前任务数越多意味着可调度余量越低，剩余电量越低则说明连续执行能力受限。决策层把优先级较高的任务优先放入候选队列，再对候选穿梭车进行加权匹配，综合考察车辆当前位置、待执行任务数量、电量水平以及到达目标工位的预估时间。若多辆穿梭车评分接近，系统倾向选择任务队列更短且电量储备更稳定的车辆，以降低后续任务重排频率。该算法把任务属性以及设备负载置于同一评价链路中，有助于调度方案随现场状态变化进行柔性调整。

2.3 路径优化与冲突避免机制

车间轨道网络存在交叉口、会车段以及缓存区出入口等高冲突节点，路径优化机制不能仅把最短距离作为唯一目标。本文在 Dijkstra 算法基础上开展路径搜索工作，把轨道节点抽象为图结构中的顶点，把可通行轨道段抽象为带权边，边权初始值由路径距离确定。当相邻穿梭车在同一时间窗内可能占用同一轨道段或交叉口时，系统对该边附加冲突成本，使路径选择从单纯距离最短转向距离与运行安全约束协同最优。路径综合成本计算模型如下：

$$C = d + 0.8 \times C_{\text{conflict}}$$

其中， C 表示路径综合成本， d 表示路径距离， C_{conflict} 表示冲突成本。

冲突成本依据相邻穿梭车距离以及预计到达时间动态调整，车辆间距越小、到达交叉口时间越接近，冲突成本越高。针对交叉口碰撞风险，执行层为每辆穿梭车分配可通行时间窗，并且把时间窗写入路径执行指令，使车辆在进入关键节点前完成速度调整或短暂停靠。若新任务插入导致原路径时间窗失效，决策层马上重新计算受影响车辆的局部路径，而非推翻全局调度队列。该机制能够把路径距离、节点占用以及车辆运行节奏纳入统一约束，有利于降低穿梭车在密集搬运环境中的等待与

绕行压力。

3 自适应调度策略的仿真分析与效果评估

3.1 仿真实验设计

鉴于柔性制造车间内任务到达节奏不均以及通道资源受限的运行情境，本文选用 FlexSim 仿真平台来开展智能物流穿梭车调度场景构建工作。仿真模型把车间物流区域抽象为 10×10 网格轨道网络，网格节点对应工位、缓存区以及交叉口，网格边对应穿梭车可通行轨道段，以此刻画多车辆并行运行时的路径占用关系。模型中配置 5 台智能物流穿梭车，车辆初始位置分布在缓存区附近，运行速度、电量消耗以及任务装卸时间按照统一参数进行设定，避免车辆基础性能差异对调度结果形成额外干扰。任务集合设置为 20 个搬运任务，其中 5 个任务被定义为紧急任务，主要对应工位缺料以及订单插入引发的高优先级物料需求。对照组运用传统静态调度规则，把任务队列在仿真初始阶段完成一次性分配，后续不随现场状态进行主动调整；实验组运用前文构建的自适应调度策略，把任务优先级、车辆负载以及路径冲突信息纳入滚动决策过程。评价指标选取任务平均完成时间、穿梭车利用率以及路径冲突率，分别反映调度时效、资源占用充分性以及多车协同安全水平。

3.2 调度效果对比分析

从仿真统计结果来看，自适应调度策略在任务响应效率、车辆资源发挥以及路径冲突抑制方面均表现出较为明显的改善，具体对比结果见表 1。传统静态调度下，任务平均完成时间为 150s，主要缘由在于任务分配完成后难以及时回应紧急任务插入以及局部通道拥堵，部分车辆在原有队列中持续执行低紧急度任务，造成高优先级物料等待时间延长。自适应策略把任务优先级以及车辆实时负载纳入同一匹配过程后，任务平均完成时间降至 120s，降幅达到 20%，说明滚动调度能够把紧急物料更快推送至可执行车辆。车辆利用率方面，传统静态调度为 70%，实验组提升至 85%，提高幅度为 15%，该变化反映出动态任务重排减少了车辆空驶以及等待。路径冲突率由 15% 降至 5%，降幅达到 66.7%，说明附加冲突成本以及时间窗管控能够降低交叉口争用频次，使多台穿梭车在密集搬运条件下保持更稳定的运行节奏。

表1 不同调度策略性能指标对比表

调度策略	任务数量	紧急任务数量	任务平均完成时间	穿梭车利用率	路径冲突率	指标变化说明
传统静态调度	20	5	150s	70%	15%	任务队列固定，紧急任务插入后响应滞后，局部路径争用较多
自适应调度策略	20	5	120s	85%	5%	任务优先级动态更新，车辆负载匹配更均衡，冲突成本约束降低拥堵



调度策略	任务数量	紧急任务数量	任务平均完成时间	穿梭车利用率	路径冲突率	指标变化说明
改善幅度	20	5	降低20%	提升15%	降低66.7%	调度时效、车辆利用以及路径协同效果均得到改善

4 结语

本文围绕柔性制造车间智能物流穿梭车调度需求，提出了集状态感知、任务匹配和路径协同于一体的自适应调度策略。该策略通过任务优先级评价、车辆负载匹配和冲突成本约束，

实现了调度方案随现场状态变化的滚动优化。仿真结果说明，该方法能够缩短任务完成时间，提高车辆利用率，并有效降低路径冲突。后续研究可进一步结合多目标优化算法和实时生产数据，增强策略在复杂车间场景中的泛化能力与工程应用价值。

参考文献

[1]杜娟,刘宇航,晋美娟,南晓林,宋文辉.面向柔性制造车间的生产调度研究[J].机床与液压,2025,53(11):138-143.

[2]郑婷婷,王东,刘伟静,徐文丽,党兴,王俊德.面向智能AGV调度系统的软件自适应机制研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(04):74-82.

[3]董海,鲁婷婷.基于DRL-PP0求解柔性作业车间调度问题[J].计算机应用研究,2025,42(09):2722-2729.

[4]高恒睿.基于深度强化学习的柔性作业车间批调度问题研究[D].导师:姜兴宇;董文辉.沈阳工业大学,2024.

[5]程怡安.基于单片机智能物流巡检小车的设计[J].机械工程与自动化,2025,54(05):166-167+170.

[6]张思涵,车阿大,冯建广,郭玉婷.基于ALNS算法的柔性自动化制造单元调度优化[J].工业工程与管理,2025,30(03):214-226.

[7]车华,薛奕曦.大型物流仓储分拣机器人防碰撞调度方法仿真[J].计算机仿真,2025,42(04):411-416.

[8]董元发,唐韬,王昊琪,安友军,李浩平,彭巍.基于LLM和IDDQN的柔性作业车间工件-机器-天车协同调度研究[J].计算机集成制造系统,2025,31(12):4593-4607.

[9]李鑫,黎良,何舟.基于时延Petri网与代价函数的柔性制造系统优化调度[J].控制理论与应用,2026,43(02):415-424.

作者简介:马良(1992—),男,汉族,本科,研究方向为智能物流设备。