

基于混合离散状态转移算法的大型制造车间生产物流 AGV 综合调度方法研究

刘静静¹ 李明慧¹ 刘恩贤²

LIU Jingjing LI Minghui LIU Enxian

摘要

新质生产力赋能制造业是推进中国式现代化改革重要的一环。针对大型智能制造车间生产物流 AGV 运送效率和智能化程度偏低的问题,设计了一种基于改进的混合离散状态转移算法的综合优化调度方法。首先,将 AGV 综合调度问题拆分为上层任务分配问题和下层路径规划问题;接着,采用引入二次状态转移变换和破坏重构操作的离散状态转移算法完成任务定序分配,同时针对紧急加单情况,设计插入算子;然后,利用路径专家库和双向同步 A* 算法规划 AGV 路径,生成禁忌列表约束上层任务分配;最后,对比仿真结果表明基于改进混合离散状态转移算法的综合优化调度方法运送效率和智能化程度更高。

关键词

混合离散状态转移算法;禁忌列表;双向同步 A* 算法;AGV 综合调度

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.01.044

0 引言

在全球经济格局深度调整、持续迈向转型升级的关键进程中,推动制造业迈向高质量发展阶段,已然成为世界各国聚焦的重要战略目标。新质生产力作为一种新兴的生产力形式,在推动工业高质量发展中发挥着至关重要的作用。2021 年,工业和信息化部等八部门联合印发《“十四五”智能制造发展规划》,其中明确提出“到 2035 年,重点行业骨干制造企业基本实现智能化”的发展愿景;2023 年,习近平总书记作出重要指示,强调要积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业,前瞻性布局未来产业,旨在加快催生出新质生产力,为经济社会的持续进步注入澎湃发展新动能。

新质生产力赋能制造业是推进中国式现代化改革重要的一环,传统制造业智能化转型升级是新质生产力赋能制造业的重要表征。智能化与自动化是先进制造业内涵特征之一,利用自动导引车(AGV)实现物料自动运送和智能综合调度是制造业突破传统生产模式,向新质生产力迈进的必由之路。

然而,现今大部分制造生产车间采用 AGV 固定运送加工机台物料,调度方案柔性差、智能化水平低。回顾以往研究,涉及大规模 AGV 集群综合调度方案的理论研究不多,基本集中于解决综合调度中任务定序分配、路径规划、冲突管理三个方面的问题。针对任务分配问题,冯开团等人^[1]提出一种改进的注水算法进行 AGV 任务分配,综合考虑未运送工件、AGV 速率、费用;王杰等人^[2]建立以粒计算为基础的任务分配模型,缩短了仓库的拣选时间;李晓萌等人^[3]将 MaxQ 递阶强化学习算法用于学习多智能体各个层次的子任务,通过与其它智能体的交互获取当前的高层子任务,进而调整自身的任务策略,以避免任务冲突;针对路径规划问题,肖金壮等人^[4]提出一种改进的蚁群算法进行 AGV 路径规划;张晓熠^[5]融合了改进 A* 算法与改进动态窗口法满足 AGV 全局路径最优性和动态避障能力。刘建娟等人^[6]提出基于模糊控制蚁群算法的移动机器人路径规划;针对 AGV 冲突问题,温惠英等人^[7]基于冲突搜索的双层算法(CBS)解决码头多 AGV 协同作业产生的冲突问题;赵钰银等人^[8]设计模糊神经网络控制器找出 AGV 避障最佳路径。

上述研究成果大多是基于理想状态构建的理论模型,落地难度大,且在综合调度方面,研究中任务分配、路径规划和冲突管理或未综合考量或未形成完整闭环,冲突结果无法约束任务分配。如裘柯钧等人^[9]提出的 AGV 任务分配与路径规划两阶段优化实现方法;Singh 等人^[10]研究的电量约束

1. 河南交通职业技术学院物流学院 河南郑州 451460

2. 东风物流集团有限公司 河南郑州 450000

[基金项目] 2023 年河南省职业教育教学改革研究与实践项目“数智供应链物流开放型区域产教融合实践中心建设研究”(豫教(2024)05753);2024 年中国物流学会、中国物流与采购联合会研究课题“大型智能制造车间生产物流 AGV 综合调度研究”(2024CSLKT3-526);河南省公路物流工程研究中心研究成果

下异构 AGV 综合求解任务分配和路径规划问题,并提出了一种自适应大邻域搜索算法。

在实际应用时,任务定序分配、路径规划、冲突管理三个方面相互依存,AGV 综合调度不是简单的问题拆分求解,需要综合考量。胡恩泽等人^[11]提出基于分层规划的综合优化调度方法,但其精英解未实现深度搜索和路径规划部分刻板无法应对突发状况。

基于此,本文提出了一种改进的混合离散状态转移算法用于 AGV 综合调度,引入二次状态转移变换和破坏重构操作提升算法深度搜索能力,设计插入算子应对紧急加单状况,利用双向同步 A* 算法提升 AGV 路径规划能力,并且对比仿真结果表明了基于改进混合离散状态转移算法的综合优化调度方法运送效率和智能化程度更高。

1 AGV 调度问题描述

大型制造车间生产物流 AGV 综合调度过程是使用有限的 AGV 从存料区取待加工工件,运送至指定机器加工,并将完工工件运送至成品区。在满足生产车间产能同时缩短 AGV 运送时长;在生产车间出现紧急加单任务时,AGV 能优先运送加单任务;AGV 在运送工件的过程中互不影响,不会发生碰撞等现象,AGV 从存料区取待加工工件的时间相同,AGV 放置完工工件至成品区的时间相同。

2 数学模型

采用栅格法构建制造车间地图,定义栅格地图 $G=(N, E)$, $N=\{1, 2, \dots, n\}$ 是地图中所有节点的集合, $E=\{(i, j, p): i, j \in N, i \neq j\}$ 是节点间路径集合,其中, i, j 为节点, p 是路径;定义离线阶段构建的路径专家库为 N_k ;定义 AGV 请求为 $R=T \cup B \cup D$, T 是任务集合, B 是充电请求集合, D 是突发状况集合;调度优化目标为最小化所有工件完工被运送至成品区的时间,正比于 AGV 运送时长:

$$f = \min \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} (Z_k^u - Z_k^d) \quad (1)$$

式中: k 是 AGV 编号; r 是请求编号; Z_k^u 为 AGV k 运送终止时间; Z_k^d 为 AGV k 的运送开始时间。

在 AGV 整个运送过程中满足以下约束条件:

(1) 每一个运送请求只能分配给 1 个 AGV, 并且 AGV 只能选择一条路径。

(2) 限定每个充电请求最多由 1 个 AGV 提出。

(3) 每个充电请求对应一条路径。

(4) 每个 AGV 都有进入任务路径、任务执行路径和离开任务路径的运行过程。

(5) 工件的加工顺序不分先后。

3 综合优化调度方法

本文提出了一种改进的混合离散状态转移算法用于智能制造车间生产物流 AGV 综合调度,该算法将 AGV 综合调度问题拆分为聚合的上层任务定序分配问题和下层路径规划问题,上层生成任务定序分配的精英解集,下层根据任务进行路径规划,并记录碰撞冲突生成禁忌列表约束上层问题求解,通过上下两层综合迭代搜索计算得到最优的调度方案。

3.1 上层任务定序分配

针对制造生产中经常出现的紧急加单情况,任务分配算法设计时必须考虑插入加单请求,本文设计加单插入算子,找到即将完成运送任务请求的 AGV,插入加单任务。考虑到 AGV 充电情况,设计非临界插入算子,计算每个 AGV 任务序列中的每个请求完成后的电量水平,找到在电量水平介于临界阈值 bl_k 和非临界阈值 bu_k 间的请求,并在请求中找到离充电站最近且不会增加充电次数的位置插入充电任务,其中,临界阈值 bl_k 在设置时能确保 AGV 能从任意位置到达充电站,如果 AGV 电量低于阈值 bl_k ,则 AGV 必须进行充电。非临界阈值 bu_k 表示只有当 AGV 电量低于 bu_k 时才有访问充电站的权限。

任务定序分配采用基于二次状态转移和破坏重构的离散状态转移算法,离散状态转移算法在一次状态转移后每一代种群中的候选解会高度相似,无法满足任务分配的精英性和多样性要求,在离散状态转移算法中引入二次状态转移和破坏重构操作使得迭代搜索的候选解更为丰富,能满足任务分配的精英性和多样性要求,并且引入二次状态转移和破坏重构操作的离散状态转移算法的稳定性和全局搜索能力也更强。

任务定序分配算法流程如下:

(1) 定义精英解集合 $Q=\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, $r \in R$, 随机生成初始化解集 r_{best} , 计算评价函数值 f_{best} 。

(2) 对初始化解集 r_{best} 依次进行一次状态转移(替换、平移、交换)、二次状态转移、破坏重构操作获得候选解集 r'_{best} 。

(3) 遍历候选解集 r'_{best} , 判断选解集 r'_{best} 中的任务序列是否存在于禁忌列表,若候选解集 r'_{best} 中的任务序列是存在于禁忌列表,则执行(2)。

(4) 计算候选解集 r'_{best} 的评价函数值 f'_{best} , 对比 f_{best} 和 f'_{best} 大小;

(5) 若 $f_{best} > f'_{best}$, 迭代次数加 1, 执行(2)~(4)过程,直至满足算法停止条件,完成迭代。

3.2 下层路径规划算法

利用路径专家库和双向同步 A* 算法进行 AGV 路径规划, 算法流程如图 1 所示, 首先, 根据任务定序分配方案从路径专家库中找到目标函数值最小的 AGV 路径集合, 接着使用冲突检测程序计算冲突路径位置与冲突造成的延时时间, 并记录冲突信息生成禁忌列表, 若无冲突则当前路径就是最优路径, 若存在冲突有两种解决方案, 一是以最小化冲突导致的延迟时间为目标函数, 搜索路径专家库, 取得延迟时间最小的路径 p_1 ; 二是采用双向同步 A* 算法在线规划路径, 算法迭代搜索时用时间窗检测冲突类型, 至搜索到无冲突路径 p_2 , 比对 p_1 和 p_2 目标函数值, 目标函数值最小的路径为最优路径。

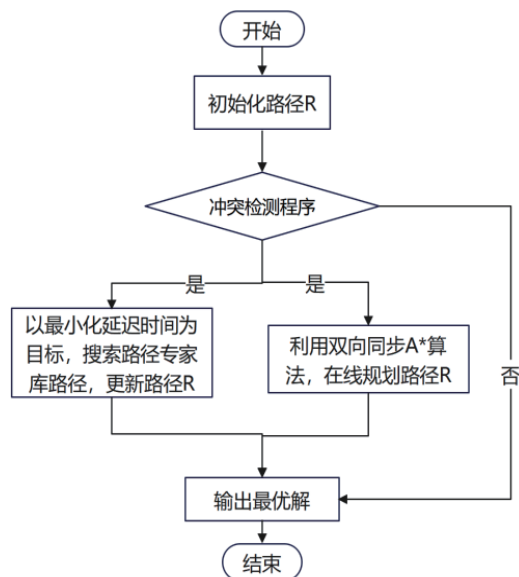


图 1 下层路径规划算法

3.3 混合离散状态转移算法

本文提出的改进混合状态转移算法 (HDSTA), 如图 2 所示, 算法流程如下:

(1) 初始化 HDSTA 参数。

(2) 在禁忌列表的约束下, 利用引入二次状态转移和破坏重构操作的离散状态转移算法 (HSTA) 获取到精英解集 Q 。

(3) 遍历精英解集, 对每一个精英解进行基于路径专家库和双向同步 A* 算法的路径规划, 同时更新禁忌列表, 约束任务定序分配算法求解精英解集。

(4) 迭代搜索直至满足其中一个终止条件, 输出最优任务定序分配 r_{best} 和执行路径 p_{best} 。

为了获取性能最优的调度方案, 本文设计了 3 个终止条件: 精英解 r_i 的规划路径无冲突; 精英解 r_i 的规划路径中延迟时间小于目标值; 迭代 10 次后目标函数值没有减少, 算法结束。

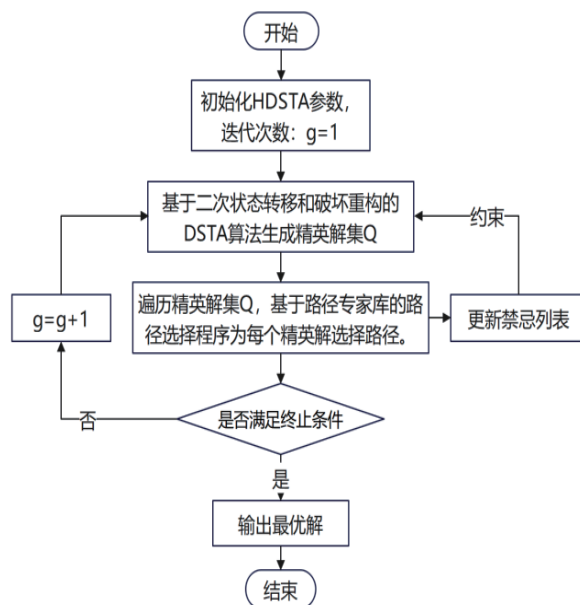


图 2 混合离散状态转移算法

4 仿真实验与结果分析

通过 Python3.8 完成 AGV 调度算法的仿真实验, 并将所提出调度算法 (实验组) 与文献 [11] 中的调度算法 (对照组) 进行对比。

仿真实验的车间布局为某大型制造企业 CNC 加工车间真实布局如图 3 所示, CNC 加工车间分为 4 个区域: 待加工物料区、机台区、AGV 充电区、成品区, 其中机台区分 A 区、B 区、C 区、D 区每个区域包含 8 台 CNC 机台, 完成加工 8 种工艺加工, 充电区仅支持一辆 AGV 充电。

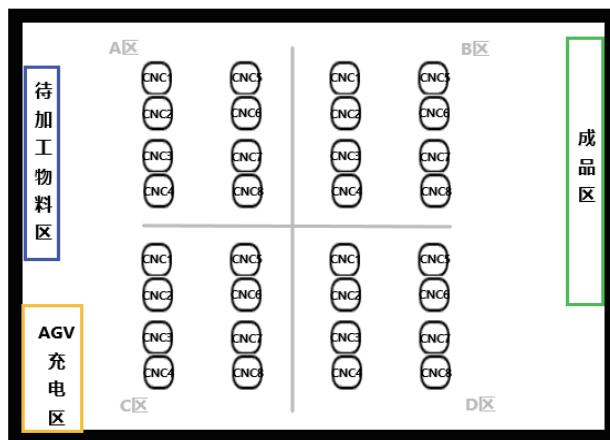


图 3 CNC 加工车间布局

初始化调度算法参数, 设置种群数量为 30; 精英解集中精英解的数量为 40; 禁忌列表长度为 150; 最大延迟时间为 50 s; 最大迭代次数为 50; AGV 数量为 8 台。实验组和对照组 AGV 的运送工件数量均为 50、75、100、125、150、175、200, 两组运送完成时间如图 4 所示, 碰撞冲突造成的冲突延迟时间如图 5 所示。

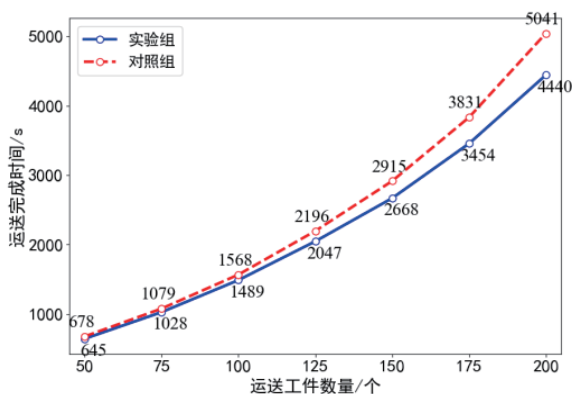


图4 AGV 运送完成时间仿真对比结果图

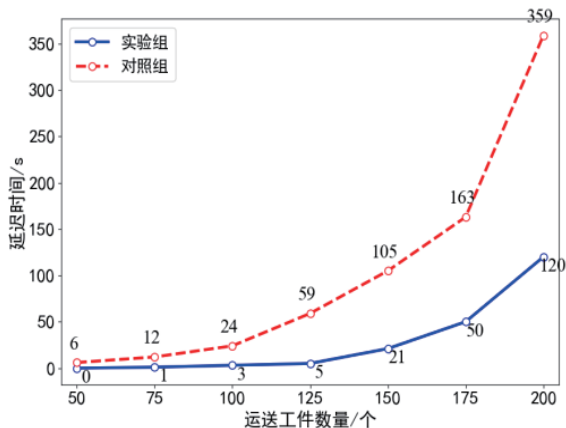


图5 AGV 延迟时间仿真对比结果图

从图4可以看出,在工件数量为50个时,实验组运送完成时间比对照组小33s;在工件数量为100个时,实验组运送完成时间比对照组小79s;在工件数量为200个时,实验组运送完成时间比对照组小601s;在各个运送工件数量下,实验组的运送完成时间均小于对照组。

从图5可以看出,在工件数量为100个时,实验组因碰撞冲突造成的冲突延迟时间比对照组小21s;在工件数量为175个时,实验组的冲突延迟时间比对照组小113s;在各个运送工件数量下,实验组的冲突延迟时间均小于对照组。

实验组的AGV综合调度算法考虑了紧急加单的情况,对照组并未考虑,因此本文提出的调度算法运送效率和智能化程度更高。

5 结语

本文以大型智能制造车间生产物流为研究对象,提出了一种改进的混合离散状态转移算法用于AGV综合调度。在离散状态转移算法的基础上引入二次状态转移变换和破坏重构操作提升算法深度搜索能力,获取更优的精英解集;利用双向同步A*在线算法在线规划AGV路径,提升AGV路径规划规避冲突的能力,并且设计插入算子应对紧急加单状况。通过对比仿真实验可知:在不同生产产能下,基于改进混合

离散状态转移算法的综合优化调度方法运送完成时间短因碰撞冲突造成的冲突延迟时间少,且设计插入算子应对紧急加单状况,使得综合优化调度方法展现出更高的效率与智能化水平。

参考文献:

- [1] 冯开团,袁杰.在离散车间下的AGV任务分配规划研究[J].现代电子技术,2022,45(18):69-74.
- [2] 王杰,马廷伟,刘兵,等.粒计算在AGV任务分配中的应用研究[J].福建质量管理,2020(20):262-263.
- [3] 李晓萌,杨煜普,许晓鸣.基于递阶强化学习的多智能体AGV调度系统[J].控制与决策,2002(3):292-296.
- [4] 肖金壮,余雪乐,周刚,等.一种面向室内AGV路径规划的改进蚁群算法[J].仪器仪表学报,2022,43(3):277-285.
- [5] 张晓熠.融合动态窗口法与A*算法的港口AGV路径规划方法研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [6] 刘建娟,刘忠璞,张会娟,等.基于模糊控制蚁群算法的工业机器人路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023(1):20-24.
- [7] 温惠英,元显青,林译峰.考虑道路负载均衡的码头多AGV无冲突路径规划[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(10):1-10.
- [8] 赵钰锟,顾文龙.基于模糊神经网络的AGV避障路径研究[J].科技信息,2011(27):55-56.
- [9] 裴柯钧,鲍中凯,陈璐.AGV任务分配与路径规划两阶段优化实现方法:CN202111178969.4[P].2023-04-07.
- [10] SINGH N, DANG Q V, AKCAY A, et al. A matheuristic for AGV scheduling with battery constraints[J]. European journal of operational research, 2022, 298(3): 855-873.
- [11] 胡恩泽,贺建军,申帅,等.面向大型工业仓库的多AGV综合优化调度方法[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(5):1779-1790.

【作者简介】

刘静静(1991—),通信作者(email:2414538119@qq.com),女,河南郑州人,硕士研究生,助教,研究方向:职业教育、控制科学与工程。

李明慧(1985—),女,河南巩义人,硕士研究生,副院长、副教授,研究方向:智慧物流。

刘恩贤(1989—),男,河南封丘人,本科,系长,研究方向:生产物流。

(收稿日期:2024-10-09)