

文章编号:1671-1637(2026)06-0209-12

考虑路网负载均衡的AGV分拣系统动态路径规划方法

刘志硕*, 许俊哲, 李艳华, 李 鑫

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要:为解决大规模自动化分拣系统中自动导引车(AGV)的路径规划和路网拥堵问题,考虑路网负载均衡性和利用率,提出了一种基于滑动时间窗的任务级全局规划与动作级局部调整相结合的路径规划框架;设计考虑了转弯次数的多终点 $A^*(A^*-I)$ 算法,以规划进入系统的AGV的全局路径;基于滑动时间窗框架更新系统内运行中的AGV位置信息,帮助其进行动作选择以避免路径冲突;通过每隔一定周期计算路网各路段的平均通行速度,更新路网各区域的路阻因子矩阵,在 A^*-I 算法基础上设计了考虑路阻因子的 A^*-II 算法,用于调整AGV的局部路径;通过结合 A^*-I 和 A^*-II 算法,实现自动化分拣系统中多AGV的无冲突路径规划,并提高了分拣系统路网均衡性和利用率;基于元胞自动机方法,确定了系统内AGV运行和状态更新规则,构建了一种大规模AGV分拣系统仿真框架。研究表明:所提出的路径规划方法相较于传统的全局路径规划方法,路网高负载节点负载量占比下降17%,整体路网负载标准差下降6.7%,有效提高单位时段的商品分拣数量;路阻因子权重和路网状态更新周期是影响系统作业效率的主要因素,当路阻因子权重大于4、路网状态更新周期取5个时间步时系统分拣效率最佳。所提方法能够有效缓解大规模AGV分拣系统的路网拥堵,提升系统吞吐量与运行稳定性,可为智能仓储与自动化分拣场景下的实时路径调度提供可行技术方案。

关键词:物流工程;多智能体路径规划;改进 A^* 算法;自动分拣系统;自动导引车;路网负载均衡

中图分类号:U491.71 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.120

Dynamic path planning method considering load balancing of road network for AGV sorting system

LIU Zhi-shuo*, XU Jun-zhe, LI Yan-hua, LI Xin

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To solve the path planning and road network congestion problems of automated guided vehicles (AGVs) in large-scale automatic sorting systems, by considering the load balancing and utilization rate of the road network, a path planning framework based on a sliding time window that integrated task-level global planning and action-level local adjustment was proposed. A multi-endpoint $A^*(A^*-I)$ algorithm considering the number of turns was designed to plan the global paths of AGVs entering the system. Based on the sliding time window framework, the

出版历程:2025-05-19 收稿, 2025-10-11 修回, 2025-11-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(U2333206)

* **作者简介:**刘志硕(1977-),男,湖南安仁人,副教授,工学博士, E-mail: zhslu@bjtu.edu.cn.

引用格式:刘志硕, 许俊哲, 李艳华, 等. 考虑路网负载均衡的AGV分拣系统动态路径规划方法[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(6): 209-220.

Citation: LIU Zhi-shuo, XU Jun-zhe, LI Yan-hua, et al. Dynamic path planning method considering load balancing of road network for AGV sorting system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 209-220.

position information of running AGVs in the system was updated to help them select actions to avoid path conflicts. By calculating the average passing speed of each road section in the road network every certain period, the road resistance factor matrix of each region in the road network was updated, and an A^* -II algorithm considering the road resistance factor was designed based on the A^* -I algorithm to adjust the local paths of AGVs. By combining the A^* -I and A^* -II algorithms, the conflict-free path planning of multiple AGVs in the automatic sorting system was realized, and the road network balancing and utilization rate of the sorting system were improved. Based on the cellular automata method, the operation and status update rules of AGVs in the system were determined, and a simulation framework for a large-scale AGV sorting system was constructed. Research results indicate that compared with the traditional global path planning method, the proposed path planning method reduces the load ratio of high-load nodes in the road network by 17% and the standard deviation of the overall road network load by 6.7%, effectively increasing the sorting quantity of goods per unit time. The road resistance factor weight and the road network status update cycle are the main factors affecting the system operation efficiency, and the system sorting efficiency is the best when road resistance factor weight is greater than 4, and road network status update cycle takes five time steps. The proposed method can effectively alleviate the road network congestion of large-scale AGV sorting systems, improve the system throughput and operation stability, and provide a feasible technical scheme for real-time path scheduling in intelligent warehousing and automatic sorting scenarios.

Keywords: logistics engineering; multi-agent path planning; improved A^* algorithm; automatic sorting system; automated guided vehicle; road network load balancing

Publication history: Received 2025-05-19; Received in revised form 2025-10-11; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (U2333206)

* **Corresponding author:** LIU Zhi-shuo, associate professor, PhD, E-mail: zhslu@bjtu.edu.cn.

0 引 言

社区团购是当前生活消费品网购的重要模式,一般采用“中心仓-网格站-自提点”三级仓配网络模式。中心仓的商品分拣作业具有小批量、多批次的特点,对物流效率要求极高,是决定仓配成本和效率的关键环节。传统人工分拣模式下,商品错分、人工成本高、效率低下等问题严重制约了社区团购模式的进一步拓展。随着物流技术向无人化方向发展,自动化设备被广泛应用于物流作业的各个环节,其中基于自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)的自动化分拣系统是解决上述问题的有效工具,而通过优化任务调度、路径规划等方式,可进一步促进分拣系统的降本增效。

AGV 无冲突路径规划是指根据多台 AGV 的行驶起点和终点,规划一条能够避开障碍物、避免 AGV 间发生碰撞冲突的路径,以高效完成分拣任务。它通常被归类为多智能体路径寻路问题(MAPF)^[1]。根据对环境信息的掌握程度和处理方

式,MAPF 可以分为静态和动态路径规划。静态路径规划通常是在离线状态下进行,需要预先获取完备环境信息再确定多台 AGV 从各自起点到终点的全局最优路径。如李昆鹏等^[2]以 AGV 完工时间和任务延迟惩罚加权和最小化为目标,建立混合整数线性规划模型,基于双重有限规则对任务进行指派,设计了指派算法和改进 A^* 算法求解路径。Cao 等^[3]和 Zhong 等^[4]针对自动化码头的 AGV 无冲突路径问题,建立了混合整数规划模型,设计了双层差分进化算法、混合遗传-粒子群优化算法。周琛谔等^[5]针对自动化码头大规模 AGV 车队易发生死锁的问题,提出了两阶段在线算法,确保车辆无冲突通行,在 500 辆 AGV 规模下仍能实现毫秒级实时决策。黄岩松等^[6]和 Luo 等^[7]均研究了基于深度 Q 网络的 AGV 路径规划方法。上述研究以最短路径原则进行静态路径规划,而现实场景中商品不断到达,AGV 在不断执行各项任务,因而是一个动态路径规划问题。并且,静态路径规划忽略了多 AGV 动态交互场景下的局部拥堵问题以及对临时障碍的

动态避障,一般是对所有AGV规划无冲突的全局路径,而在运行时不再对路径加以动态调整,这使得问题的求解复杂度高、规划时间长,难以在实时系统中高效应用。

国内外对于动态路径规划研究也较为丰富^[8-9]。余娜娜等^[10]考虑动态分拣环境,将AGV作为分布式决策的智能体,通过融合栅格堵塞度的A*算法进行多AGV路径规划,可以避免拥堵与冲突问题,但缺少对路网整体负载的优化分析。Yang等^[11]提出了一种基于时间窗的多AGV路径规划集中式决策方法,通过设置AGV优先级和防碰撞策略规划AGV路径在各栅格的时间窗,实现多个AGV的无冲突路径规划,提升了冲突处理效率,但未考虑路网负载均衡。一些学者在路径规划中考虑了路网负载均衡^[12]。如温惠英等^[13]基于冲突搜索双层算法,在下层A*算法中引入负载因子,使得AGV规划路径时避开拥堵点,通过仿真验证了算法能够有效解决多AGV路径规划冲突问题,并均衡路网负载。袁洋等^[14]考虑了多AGV行驶路网中的局部拥塞和负载均衡问题,将路网中的交通流分为自由流、稳定流、不稳定流和拥堵流4类,作为负载因素引入A*算法。张丹露等^[15]通过设置行驶规则和AGV的行驶时空预约表,基于改进的A*算法和动态加权地图解决交通拥堵和路径冲突问题。Fransen等^[16-17]考虑了AGV转弯对路径效率的影响,以权重反映特定节点处的拥堵情况,并结合改进的A*算法进行路径搜索,以避开权重较高的节点。Si等^[18]聚焦于时钟漂移、动态障碍物等不确定扰动对多AGV路径的时空偏差影响,构建了两阶段鲁棒优化模型,在多种扰动场景下与确定性模型的最优贴进度平均提高8%。

MAPF问题的求解算法主要包括遗传算法、粒子群算法、A*算法等,其中A*算法应用最为广泛。考虑到A*算法在静态规划中的优异性能,研究人员逐步将时间因素(如滑动时间窗)集成到A*算法中,使其能够有效地处理动态实时调度^[19]。如Lian等^[20]根据动态随机网络理论,在A*算法的处理过程中加入了一个概率时间约束,并根据概率理论给出了求解方法。官祥锦等^[21]提出一种改进的A*算法并将其与时间窗模型结合,有效提高多AGV路径搜索效率。刘春等^[22]提出一种改进时间窗的有界次优A*算法,用于求解大规模AGV路径规划问题。

总之,现有研究尚存在以下不足:一是应用于商品分拣的AGV往往高速运行,对调度系统的响应

速度和实时性要求很高。现有的动态路径规划方法,无论采用集中式还是分布式决策架构,通常每隔一个固定时间对所有AGV进行路径重规划,这无疑带来了很高的计算负担,导致不得不增加时间间隔,从而降低系统在大规模任务或密集交通场景下的实时调度能力。二是,在考虑路网负载因素时,多以节点或边的历史通行频次作为拥堵判据,主要从静态流量分布或路径冲突角度出发,仅粗略刻画路网负载状态,而未结合AGV实际运行速度、流量变化等动态信息进行更精准建模,因而未能有效反映不同区域的真实运行效率。

针对上述问题,本文提出一种融合任务级全局规划与动作级局部调整的AGV实时路径规划方法。在新任务到达时,仅对执行该任务的AGV进行一次全局路径规划。运行过程中,系统每隔一个时间步判断多个AGV的状态,仅在AGV发生死锁事件时,才对它的路径重新规划,否则维持既有路径,从而有效减少计算开销,提升调度的实时性。并且,本文基于速度与流量因素建立动态“路阻”指标,以综合反映路段通行效率,并将该指标融入改进的A*算法中,以引导AGV优先进入低流量、高速度的区域,从而实现更合理的资源分配与路网负载均衡,提升系统整体运行效率。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

AGV分拣系统主要包括取货区、投递口、预留区(工作人员检修区)、出口、路段、AGV。图1为AGV分拣系统作业流程示意。上位机对AGV进行集中控制,并实时掌握分拣系统的所有信息。上位机将投递任务信息传输给取货区,到达的商品通过供件终端识别后,由AGV运输至投递口,投递口下方为缓存箱;AGV完成投递任务后,驶离投递区域并等待下一次任务分配。

AGV在系统内的运行步骤为:首先,到达取货口取货,并驶入分拣平台;然后,负载的AGV行驶到卸货口停靠并将商品投递进缓存箱,完成一次分拣;最后,空载的AGV通过系统出口驶离系统,等待下一次分拣任务。

上述场景中的AGV实时路径规划问题可以描述为:在固定大小的分拣场地中,设置了一定数量的投递口,当多台AGV在系统中同时执行分拣任务时,如何实时规划AGV路径,使得路网负载均衡,避免系统出现拥堵和死锁情况,确保AGV高效运行。

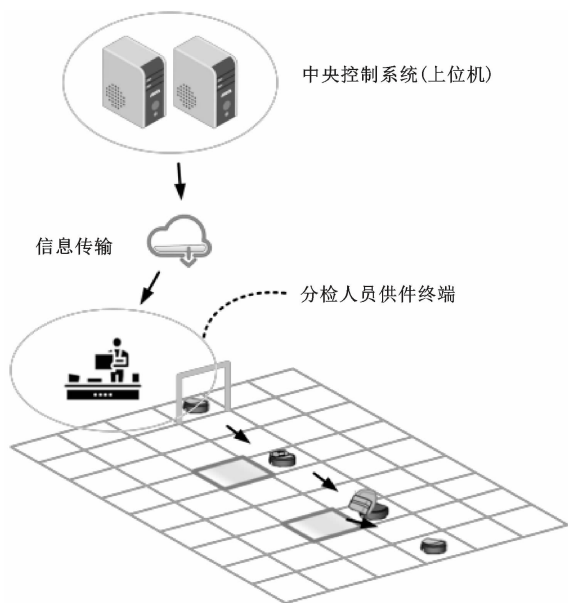


图 1 AGV 分拣系统作业示意

Fig. 1 Schematic of AGV sorting system operations

根据分拣系统的实际情况,问题的基本假设如下:AGV 尺寸小于单位栅格面积,忽略尺寸对转弯的影响;不考虑 AGV 之间的任务协作;AGV 均同质,匀速行驶时的速率恒定;AGV 只在路网中行驶,不能斜向行驶;AGV 路径优先级根据进入系统的时间先后顺序动态调整。

1.2 环境建模

采用栅格法和拓扑法对 AGV 分拣系统进行环境地图建模,如图 2 所示。本文建模时,栅格精度为 1 m,AGV 匀速速率为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,以 AGV 行驶 1 个单位栅格所花费的时间 0.5 s 为一个时间步,对系统内 AGV 时空状态进行采样。将取货口设置于分拣平台的两端,当有新的分拣任务时,AGV 在取货口取货,然后驶入分拣平台。白色栅格为 AGV 可行驶的路段,每行或每列路段只允许单向行驶(如箭头所示)。投递口周围有 4 个可供 AGV 临时停靠进行投递的位置。AGV 完成分拣任务后,选择任一出口离开平台等待下一次分拣任务开始。用有向图 $G=(V,E)$ 表示拓扑网络结构, V 表示网络中的各个节点(各栅格的中心), E 表示节点之间的连边,边权为 AGV 匀速通过时所需要的时间。

AGV 在系统内行驶时,路网状态会动态变化。根据栅格的属性和占用状态,对栅格赋予不同的状态编码,如表 1 所示。

系统中 AGV 的冲突类型可以分为 3 种,分别为节点冲突、同向冲突、死锁,如图 3 所示。

(1) 节点冲突。当 2 辆 AGV 匀速行驶至同一

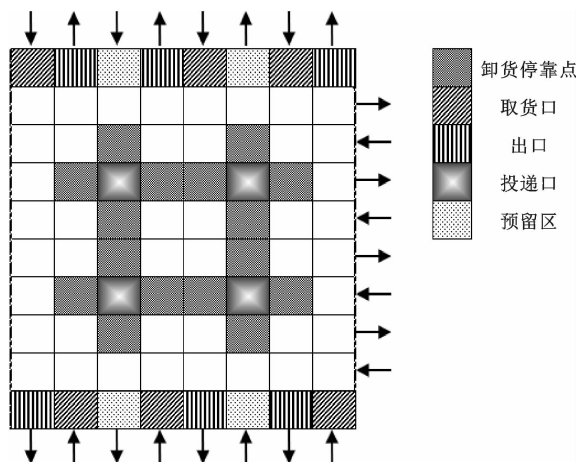


图 2 AGV 分拣系统的栅格地图

Fig. 2 Grid map of the AGV sorting system

表 1 栅格属性编码

Table 1 Grid attribute coding

属性	编码
取货口	3
出口	2
投递口	4
预留区	5
路段	0
负载 AGV 占用	-1
空载 AGV 占用	1

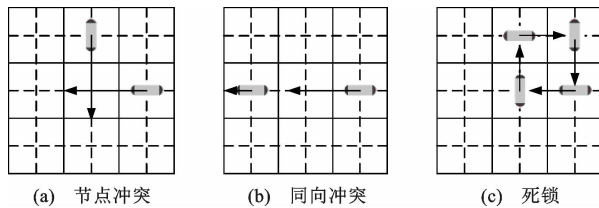


图 3 冲突类型

Fig. 3 Conflict type

交叉口时,交叉口处会发生节点冲突。

(2) 同向冲突。当前车原地停留等待或转弯时,速度为 0,后车向前行驶时会发生冲突。

(3) 死锁。当多台 AGV 行驶的道路被相互占用时,陷入循环等待。

2 基于滑动时间窗的 AGV 实时路径规划方法

2.1 考虑转弯成本的多终点 A* 算法

当新任务到达时,执行任务的 AGV 规划一条全局最优的最短路径。A* 算法是一种基于图搜索的启发式算法,根据启发式信息遍历节点,可以快速搜索起点到终点的最短路径。在遍历节点时,A* 算

法采用最佳优先搜索方式,选择代价估算最优的节点。节点的代价估算函数 $f(n)$ 为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $g(n)$ 为起点到当前节点 n 的实际代价; $h(n)$ 为当前节点 n 到目标节点的预估代价,在栅格地图中,通常表示为两点之间的曼哈顿距离或欧氏距离。

在分拣系统中,AGV 转弯时需要减速,造成了额外的时间成本和能耗成本,因此,通过在代价估算中引入一项转弯成本因子 $t(n)$,即

$$f(n) = g(n) + h(n) + t(n) \quad (2)$$

$$t(n) = \sum_{i=s}^n r(i, m)$$

式中: $t(n)$ 为 A^* 算法中起点到当前节点需要转弯的总次数; s 为起点; $r(i, m)$ 为当前搜索节点 i 上行驶方向和前序节点 m 是否一致,若不一致则取 1,表示发生一次转弯,否则取 0。

在分拣系统中,每台 AGV 的路径上有 3 个关键节点,分别为入口、投递口、出口。进行路径规划时,AGV 需要先后经过投递口和出口,即 2 个终点。传统 A^* 算法在搜索路径时,找到终点节点停止搜索并输出最短路径,而在多终点场景中,当算法搜索到第 1 个终点节点时,不终止路径搜索,直到搜索到第 2 个终点节点,输出从起点经过投递停靠点并到达出口的全局最优路径。因此,将上述 A^* 算法进一步扩展至适应多终点的算法,称为 A^*-I 算法,其步骤如下。

步骤 1:初始化算法的开放集合和关闭集合,将起点 (x, y) 的可行相邻节点添加至开放集合中,以投递口为必经节点,出口为终点节点,计算相邻节点的代价函数 $f(n)$ 。

步骤 2:从开放集合中取出 $f(n)$ 最小的节点加入至关闭集合。若该节点是投递口,后续节点的 $f(n)$ 以当前节点为起点,以出口节点为终点进行计算,否则继续搜索相邻节点。

步骤 3:重复步骤 2,直到开放集合为空或找到出口节点输出路径,算法终止。

本文中 AGV 实际上并不经过投递口,而只需经过其周边的 4 个停靠点中的任意一个。因此,在算法计算路径时,分别以 4 个停靠点中的一个点作为途经点生成 4 条最短路径,选择最短的作为该 AGV 的全局最优路径。

2.2 引入路阻因子的实时路径规划算法

在取货口取得货物的 AGV 采用 A^*-I 算法规划转弯次数最少的全局最优路径。然而,当分拣系

统内同时有多台 AGV 在运行时,彼此之间的路径可能存在冲突。此外,随着 AGV 数量的增加,可能导致局部路段的负载过高,整体路网负载不均衡,容易引发交通拥堵和死锁问题,使得系统整体分拣效率急剧下降。

为解决上述问题,设计 A^*-II 算法来调整 AGV 局部路径以实现动态避障和路网负载均衡。对于避免路径冲突,中央控制系统实时掌握分拣系统的状态,根据设计的系统规则检测下一时间步 AGV 路径间是否存在冲突,若存在冲突则根据优先级进行等待避让。另一方面,系统计算并动态更新路网拥堵状态,对处于死锁状态(原地等待超过一定时长)和拥堵路段的 AGV,根据当前的路网拥堵状态重新规划路径,确保 AGV 能够实时适应变化,应对各种扰动和偏差,例如物品掉落、故障车等情况,从而提高系统分拣效率。算法基于时间滑块方法来实现,具体方法如下。

2.2.1 系统规则

设置路径规划优先级、AGV 运行规则,具体如下。

(1)优先级规则:根据 AGV 进入系统的时间,先进入的具有更高的路径规划优先级,已驶离系统的 AGV 则从当前优先级队列中剔除。并且采用优先级动态调整策略,对处于死锁状态、拥堵区域的 AGV 可提高其优先级。

(2)加减速规则:AGV 的最大行驶速度为每单位时间行驶 1 个栅格距离,忽略加减速时间。令 d_k 为 AGV 在其行驶方向上的空闲栅格数量,则其行驶速度 $v_k = \min\{1, d_k\}$ 。当需要进行转弯时,需在原地停留等待 1 个时间步。

(3)位置更新规则:每单位时间根据 AGV 速度以及扰动,更新并记录 AGV 位置 and 该 AGV 路径规划的优先级,生成路网状态。

2.2.2 AGV 的局部冲突消解算法

根据优先级从高到低逐个取 AGV,判断其在未来一个时间步内,与优先级更高的 AGV、掉落物品、故障车之间是否有冲突。如果有,则生成该 AGV 的避撞动作。避撞动作为原地等待一个时间步,而 AGV 的路径保持不变。

同步检测更新 AGV 的状态,当检测到进入路网拥堵区域(例如 AGV 待在原地超过 π , π 为用于判断 AGV 是否死锁或处于拥堵状态的时间阈值),结合当前交通密度,动态调整路径避让。对于处于死锁状态的 AGV,将其周边的 AGV 视为障碍物,

使用 A*-II 算法重新规划其路径。

2.2.3 路网拥堵状态动态更新

在 A*-I 算法中的节点代价中引入路阻因子,将该算法记为 A*-II 算法。每隔 δ 个时间步,对路网拥堵状态进行一次更新。为均衡路网负载,减少系统中拥堵情况的发生,通过栅格 i 在 δ 个时间步内的平均通行速度 $\bar{v}_i(\delta)$ 和流量 $N_{i\delta}$ 来衡量该栅格的通行能力,进而动态地反映整体路网拥堵状态。 $\bar{v}_i(\delta)$ 的计算如下

$$\bar{v}_i(\delta) = \begin{cases} \sum_k \bar{v}_{ik} / N_{i\delta} & N_{i\delta} > 0 \\ v_{\max} & N_{i\delta} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{v}_{ik} = l / t_{ik}$$

式中: $\bar{v}_{ik}$ 为通过栅格 i 的 k 车的平均速度; t_{ik} 为 k 车通过栅格 i 所花费的时间。

由栅格的平均通行速度和栅格流量确定路阻因子 $S_i(\delta)$,即

$$S_i(\delta) = \frac{\bar{v}_i(\delta)}{N_{i\delta} + \epsilon} \quad (4)$$

式中: ϵ 为一个正的常数,以应对 $N_{i\delta}$ 为 0 的情形。

为避免对路径的选择完全由拥堵程度主导,而忽略了转向次数、行驶距离等其他条件,需要将 $S_i(\delta)$ 压缩至一个合理区间。采用 Sigmoid 函数达到上述目的,当 $\alpha=10, \beta=15$ 时, $u(n)$ 的取值为 $(0, 1]$ 。 $u(n)$ 计算为

$$u(n) = \sigma[S_i(\delta)] = \frac{1}{1 + e^{\alpha S_i(\delta) - \beta}} \quad (5)$$

节点的代价估算函数调整为

$$f(n) = g(n) + h(n) + t(n) + \gamma u(n) \quad (6)$$

式中: γ 为路阻因子项的权重,用于平衡算法路径选择时的最短路径策略和避免拥堵策略。

2.3 仿真框架

上述算法共同构成了基于滑动时间窗的 AGV 实时路径规划方法(Split Time Windows Real-time Routing Planning, STW-RRP)。为验证算法有效性,需要对 AGV 分拣系统的运行进行仿真,元胞自动机在研究复杂路网,特别是针对交叉口交通状态的运行和推演中被大量运用^[23-24],因此,基于第 2.2 节中提出的系统规则,将算法嵌入元胞推演模型,构建仿真框架。系统仿真框架流程如图 4 所示,其中 $T_{\max}$ 为设定的仿真时长。其步骤如下。

步骤 1:采用固定步长仿真钟,每次滑动一个时间步,首先按照 AGV 运行规则对 AGV 的位置、状态进行更新,并更新 AGV 在同一位置停留的时间。然后,检测当前是否有新的任务生成,若有则读取任

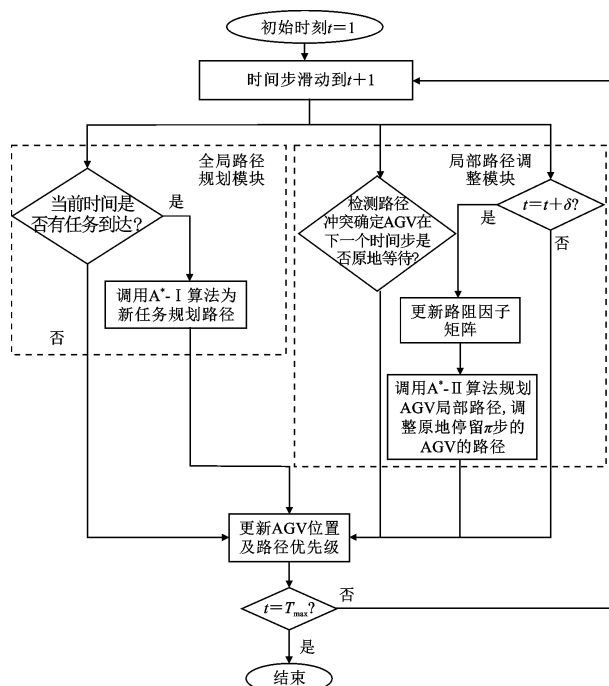


图 4 STW-RRP 算法流程

Fig. 4 STW-RRP algorithm process

务的起点和终点信息,并选取 1 辆空闲 AGV,利用 A*-I 算法为其规划完成分拣任务的全局路径。最后,按照优先级从高到低逐个取 1 辆 AGV,判断它在未来一个时间步内,与其优先级更高的 AGV、故障车以及掉落物品之间是否有冲突。如果有,则让该 AGV 原地等待一个时间步,否则按规划的路线继续行驶。

步骤 2:每间隔 δ 个时间步,计算并更新路网拥堵状态。当 AGV 在同一位置等待时间超过 π 时,检查当前路网状态,若存在未被占用的相邻节点,则调用 A*-II 算法重新规划其路径;否则继续原地等待。

步骤 3:当 AGV 完成分拣任务驶离系统时,从 AGV 路径优先级队列中剔除该 AGV。当 AGV 处于死锁或路网拥堵区域时,提高优先级至队列头,并更新 AGV 路径优先级队列。

步骤 4:不断重复步骤 1~3,直至达到仿真终止条件,输出仿真结果。

3 仿真试验

根据某电商企业的区域分拨中心的内部布局,AGV 分拣系统的环境设置为 28×32 大小的栅格地图,如图 5 所示。系统上下侧为出入口,内部分布 80 个投递口,路网由水平和垂直方向相互垂直的单向路段构成,相邻路段通行方向相反。AGV 在系统

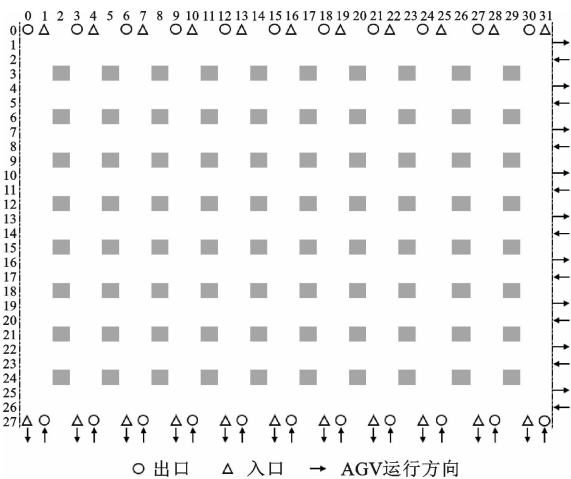


图 5 AGV 分拣系统栅格地图
Fig. 5 AGV sorting system grid map

内匀速行驶,每个时间步移动 1 个栅格单位。

3.1 多 AGV 冲突和死锁避免仿真试验

3.1.1 路径冲突消解试验

路网中多台 AGV 运行时可能发生 3 类路径冲突。针对节点冲突和同向冲突,设置了 3 辆 AGV 行驶场景以验证算法对于冲突消解的有效性。AGV 参数如表 2 所示,其中坐标指的是栅格位置。

表 2 路径冲突试验参数

AGV 编号	开始运行的时间步	入口坐标	投递位置坐标	出口坐标
1	1	(0,3)	(11,11)	(27,12)
2	3	(27,22)	(14,11)	(27,9)
3	4	(27,22)	(3,22)	(0,22)

仅采用全局路径规划方法 A*-I 算法时,3 辆 AGV 运行的路线如图 6 所示。可以看出:所得到的 3 辆车辆的路径存在 2 个冲突点;在时间步个数为 26 时,AGV1 和 AGV2 在坐标(14,12)处发生节点冲突;在时间步为 17 时,AGV2 和 AGV3 在坐标(14,22)处发生同向冲突。

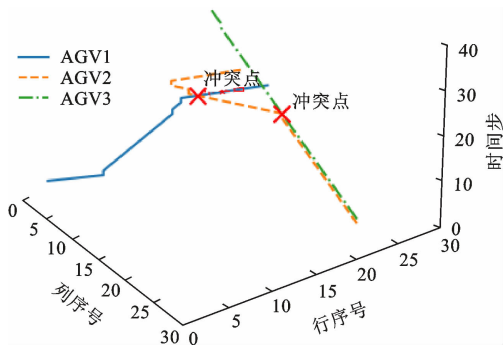


图 6 节点冲突路径
Fig. 6 Path of node conflict

采用 STW-RRP 中的冲突消解算法后(图 7),对于坐标(14,12)处的节点冲突,由于 AGV1 的优先级高于 AGV2,因此 AGV2 在原地等待 AGV1 通过冲突点后才继续行驶,从而消解了该冲突。对于坐标(14,22)处的同向冲突,AGV2 的优先级高于 AGV3,因此 AGV3 在原地等待 AGV2 完成转弯后,继续按原路径行驶。

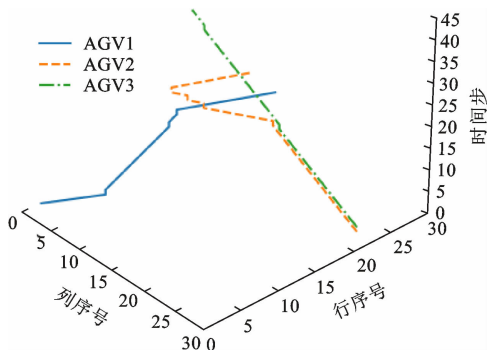


图 7 STW-RRP 算法路径
Fig. 7 Path of STW-RRP algorithm

3.1.2 死锁 AGV 的解锁试验

为验证算法对死锁的解锁能力,设置了 10 辆 AGV 环形死锁场景。AGV 的当前位置坐标、投递位置坐标、出口坐标如表 3 和图 8 所示。

表 3 死锁参数

Table 3 Deadlock parameter			
AGV 编号	当前坐标	投递位置坐标	出口坐标
1	(5,3)	(6,3)	(0,1)
2	(6,3)	(9,3)	(27,3)
3	(7,3)	(7,5)	(0,7)
4	(5,4)	(5,2)	(0,1)
5	(6,4)	(2,2)	(0,1)
6	(7,4)	(3,4)	(0,4)
7	(8,4)	(3,4)	(0,4)
8	(9,4)	(6,4)	(0,4)
9	(8,3)	(3,4)	(0,4)
10	(7,2)	(5,6)	(0,4)

如图 8 所示,10 辆 AGV(红色)前进的路段均被另一辆 AGV 占用。根据优先级策略,因为陷入相互等待的状态,所有 AGV 原地不动从而导致该路段无法通行。后续驶入该区域的 AGV 不得不停留等待,进而导致周围路段的负载不断升高,使得拥堵范围进一步扩大,演化为死锁。图 9 为死锁场景,可以看出:10 辆 AGV 产生死锁后,造成该区域路网堵死,随着其他 AGV 驶入,导致死锁区域被进一步扩大,最终系统瘫痪。

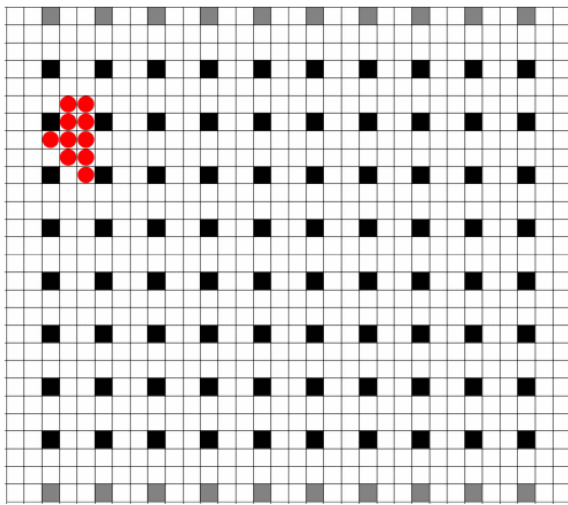


图 8 AGV 位置示意

Fig. 8 Schematic of position of AGVs

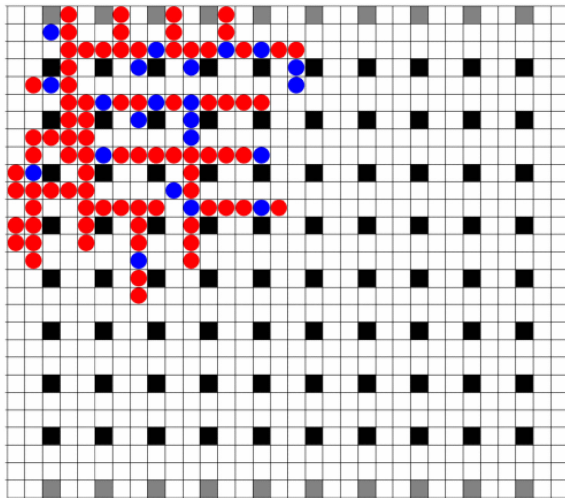


图 9 死锁场景

Fig. 9 Deadlock scene

假设当 AGV 在原地等待时长超过 5 个时间步时,被判定为死锁状态。AGV2 和 AGV5 由于周围的路段均被占用,只能原地等待,而其他 4 辆 AGV 通过算法选择相邻节点作为下一时间步的目标位置并以其为起点重新规划路径,完成解锁,每个时间步 AGV 的动作选择如图 10 所示。由此可见,STW-RRP 算法可以有效地解决 AGV 分拣系统中存在的节点冲突、同向冲突和死锁问题。

3.1.3 故障车试验

为检验 STW-RRP 算法应对系统实时运行过程中突发事件的能力,例如 AGV 故障、电量耗尽造成的临时停车,设置了 3 辆 AGV 开展故障车试验。假设 AGV1 在坐标(14,12)处发生故障,停在原地不动,参数如表 4 所示。

若 AGV1 未发生故障,3 辆 AGV 之间的路径

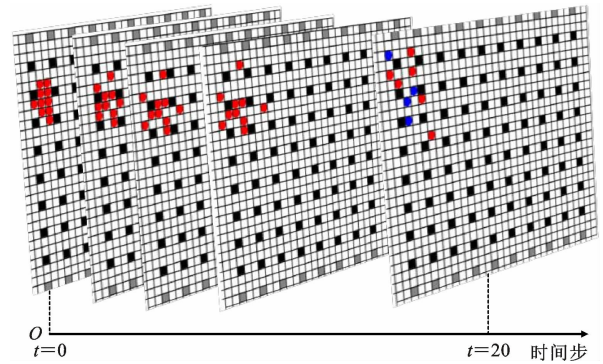


图 10 STW-RRP 算法解锁过程

Fig. 10 Unlocking process of the STW-RRP algorithm

表 4 故障试验参数

Table 4 Fault test parameters

AGV 编号	当前坐标	投递位置坐标	故障点	出口坐标
1	(0,0)	(9,12)	(14,12)	(27,12)
2	(27,13)	(14,11)		(27,9)
3	(27,10)	(9,10)		(0,10)

并无冲突;而当 AGV1 发生故障时,AGV2 无法到达原投递位置,产生冲突点。若所有 AGV 均按原路径行驶,则路径上包含故障车辆位置及其临近区域的 AGV 均会在故障点附近停滞,最终导致该区域发生死锁。采用 STW-RRP 算法进行冲突消解后的路径如图 11 所示。可以看出,重新规划路径后,AGV2 绕行至新投递位置(15,10)进行投递。然而新路径又与 AGV3 的原路径存在冲突,因此,算法在计算 AGV3 路径时,让其在冲突点前执行等待。

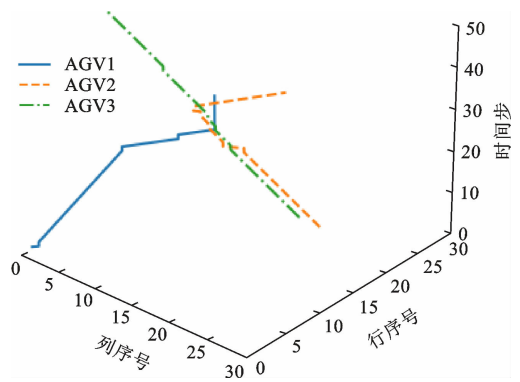


图 11 故障冲突消解后路径

Fig. 11 Path after fault conflict resolution

3.2 仿真试验

3.2.1 测试案例仿真

为进一步验证 STW-RRP 算法对均衡路网负载和同时解决多种冲突问题的有效性,按系统 AGV 容量和任务数量分别构建 8 个不同规模的案例,比较传统 A* 算法、引入路阻因子前的 STW-RRP* 算法、STW-RRP 算法在各案例下运行结果。以系统

完工时间(System Completion Time, SCT)、高负载区域负载量占比(Load Rate, LR)、路网负载标准差(Load Standard Deviation, LSD)3 项指标对比算法性能,如表 5 所示。其中,LR 为高负载节点的负载量占路网总负载量比例,高负载节点指负载量高于路网节点平均负载量 2 倍以上的节点,LSD 反映路网内各节点负载量的标准差。

仿真测试结果表明,当系统内 AGV 运行密度较小时,路网中未产生严重拥堵和死锁,AGV 能够按照全局规划的最短路径行驶并完成全部分拣任务,3 类算法得到的路网负载分布差别较小。随着

AGV 运行密度的提高和任务数量的增加,系统路网的拥堵繁忙程度快速上升,更易发生死锁导致大量路段被占用。传统 A* 算法在高密度运行环境下极易发生死锁导致系统瘫痪。未引入路阻因子的 STW-RRP* 算法虽然能够通过死锁解锁算法消解路径冲突,但是高密度环境下,会不断有 AGV 进入拥堵区域,从而导致路网高负载一直集中在死锁发生区域,影响系统效率。引入路阻因子后,AGV 能够识别当前路网状态下的拥堵区域,进而规划一条绕行路线,避免进一步加剧该区域的拥堵,从而起到均衡路网负载的目的。

表 5 测试案例仿真参数

Table 5 Actual case simulation parameters

案例编号	AGV 数量/veh	任务数量	LR/%			LSD/veh			SCT/时间步		
			A*	STW-RRP*	STW-RRP	A*	STW-RRP*	STW-RRP	A*	STW-RRP*	STW-RRP
S1	50	500	7.80	6.13	5.33	13.63	10.56	10.66	489	389	364
S2	60	700	8.72	6.46	5.62	17.70	15.98	10.85	516	406	379
S3	70	900	9.26	7.20	4.72	21.63	17.32	13.26	546	409	383
M1	80	1 300	9.80	7.58	3.48	24.50	19.65	15.84	570	446	417
M2	90	1 400	16.42	7.72	1.84	27.64	23.92	19.80		450	427
M3	100	1 500	16.81	7.96	1.82	27.49	24.27	20.13		453	430
L1	120	1 800	17.51	8.03	1.53	27.35	26.73	21.36		448	424
L3	140	2 000	18.37	8.24	1.24	28.46	27.40	21.58		461	431

3.2.2 实例仿真

以社区团购电商平台的实际分拣数据为案例进行仿真,并分析比较不同算法参数下对系统分拣性能的影响。试验参数见表 6。根据场地大小,设置系统内可同时运行的 AGV 数量上限为 130 veh,分拣任务数量为 2 000 件,按每个时间步 6 件的泊松流到达,每间隔 5 个时间步计算一次路网拥堵状态和检测一次死锁。除了比较 LR、LSD、SCT 指标外,统计了每台 AGV 完成各自分拣任务所花费的时间步长之和(Sum of Time Steps, STS)、AGV 路径总长(Sum of Route Length, SRL),结果见表 7。

从表 7 可以看出,采用传统 A* 算法仅进行全局规划时,AGV 仅按照最短路径原则行驶,且不进

表 7 实际案例仿真结果

Table 7 Simulation results of actual cases

算法	LR/%	LSD/veh	SRL/m	STS/时间步	SCT/时间步
A*	18.16	28.60	17 860	15 698	
STW-RRP*	7.84	27.63	50 805	37 251	447
STW-RRP	1.14	21.97	51 009	37 346	421

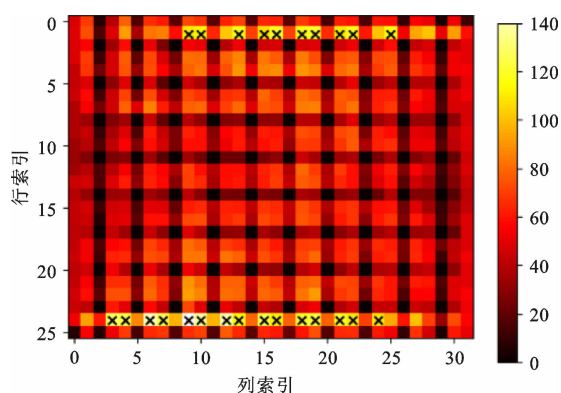
行死锁解锁,当局部区域发生死锁时,拥堵范围快速扩大,大片路段被占用,导致后续 AGV 无法进入系统。因此,系统不能完成所有任务,系统完工时间无限大,仅分拣了 872 件,其 SRL 和 STS 分别只有 17 860 m、15 698 个时间步。STW-RRP 引入路阻因子前后,路网总负载量分别为 38 571、38 917 veh。引入路阻因子后,LR 的比例由 7.84% 大幅下降至 1.14%,LSD 亦下降了 5.66 veh。这意味着,在总负载变化不大的情况下,高负载区域的负载量分散到了其他区域。优化前后,系统整体效率偏差较小,SRL 和 STS 的偏差分别为 -0.4% 和 -0.26%,在 0.5% 范围内。

图 12 为 STW-RRP 算法引入路阻因子前后路网负载的仿真结果。可以看出,引入路阻因子后,AGV 通过路径调整绕开某一时段相对拥堵的区域,

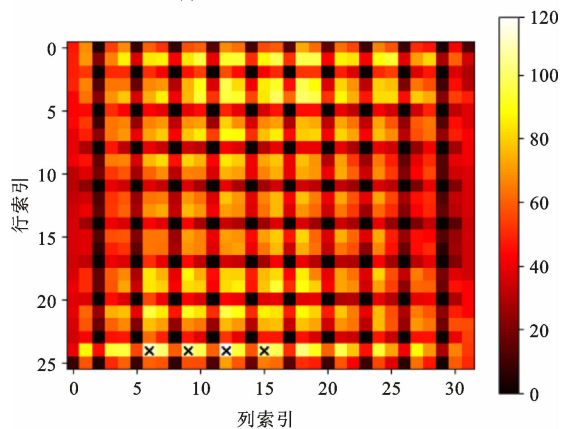
表 6 实际案例仿真参数

Table 6 Actual case simulation parameters

参数	值
系统容量/veh	130
路阻因子权重 γ	3
任务数量/件	2 000
路网状态更新周期 δ /时间步	5
死锁检测频率 π /时间步	5



(a) 引入路阻因子前



(b) 引入路阻因子后

图 12 路网负载对比(单位:veh)

Fig. 12 Comparison of road network loads (unit: veh)

使得整个路网的各区域负载达到均衡状态。将高负载节点负载量定义为平均负载量的 2 倍。引入路阻因子前,平均负载量为 51.75 veh,高负载节点数量为 25 个;引入路阻因子后,平均负载量为 51.29 veh,高负载节点为 4 个。引入路阻因子后,原来的拥堵区域负载量被有效地分配到其他节点。

选取 10 个负载最高的节点,统计引入路阻因子前后节点负载量的变化,如图 13 所示。引入路阻因子后,这些节点的平均负载率降低了约 32.6%。

3.3 参数分析

3.3.1 改变路阻因子权重

路阻因子权重 γ 的取值影响 AGV 路径选择的准则。当 γ 较大时,路径规划时会选择绕行拥堵程度轻的区域,而当 γ 较小时,则以最短路径、转弯次数最少为原则规划路径。通过改变 γ ,随机产生分拣任务,测试了不同 AGV 数量下的系统分拣效率,结果如图 14 所示。可以看出, γ 较小时,在路径规划时优先选择距离最短的节点,重新规划后的路径变化不大,导致系统更容易发生拥堵和死锁,分拣效率不高。随着 γ 的增大,在调整路径时优先选择当

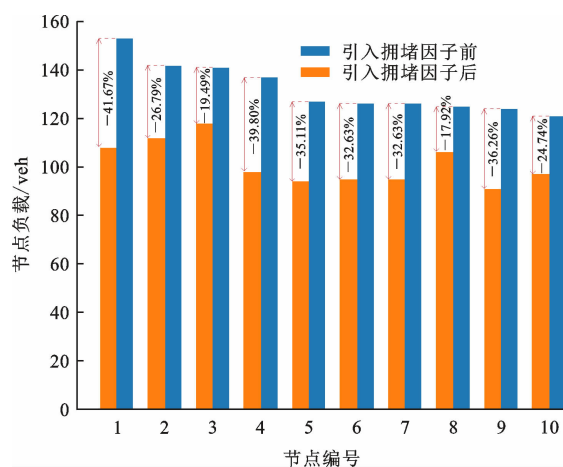
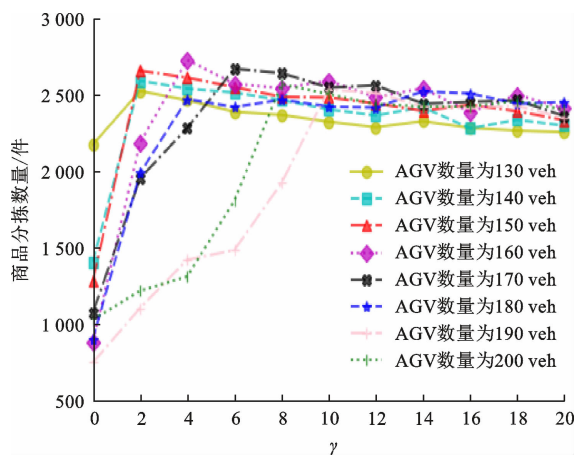


图 13 节点负载对比

Fig. 13 Comparison of node loads

图 14 γ 对分拣系统效率的影响Fig. 14 Influence of γ on the efficiency of sorting system

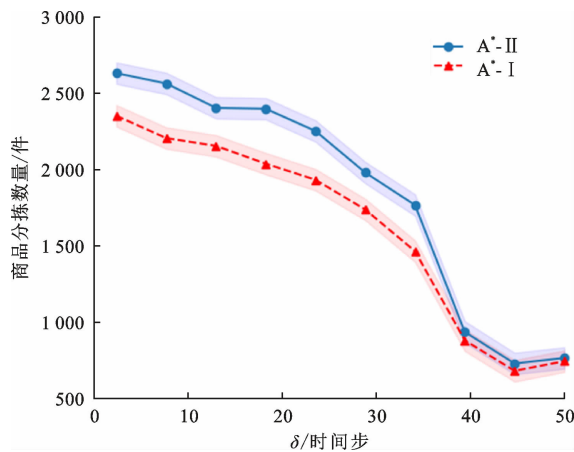
前通行速度最高的节点,即使绕行的距离远,但是减少了路网拥堵和死锁发生的频率,提高了分拣效率,当 $\gamma \geq 4$ 时系统的分拣效率最佳。

3.3.2 改变路网状态更新周期

路网状态更新周期影响算法计算路网状态和死锁解锁的频次。当系统内有大量 AGV 运行时,会频繁发生死锁和拥堵,较高的更新频率能够在拥堵和死锁范围尚未恶化时,对区域内 AGV 进行路径调整。然而当更新频率较低时,系统内可能已经形成范围较大的拥堵、死锁区域,解锁所需要的时间相应增加,导致分拣效率下降,如图 15 所示,当更新频率大于每次 40 个时间步时, A^* -II 与 A^* -I 算法下系统分拣效率接近。

4 结 语

(1)针对电商企业自动化分拣系统中多 AGV 路径规划问题,提出了一种融合任务级全局规划与

图15 δ 对分拣系统效率的影响Fig. 15 Influence of δ on the efficiency of the sorting system

动作级局部调整的动态路径规划方法,即 STW-RRP。该方法的核心思想在于:新任务到达时仅为对应 AGV 进行一次全局路径规划,运行过程中仅在 AGV 发生死锁或长时间等待时触发重规划,从而大幅降低计算负担;同时,通过引入基于平均通行速度和流量的动态路阻因子,引导 AGV 优先选择低拥堵区域行驶。这一设计有效解决了传统方法因固定时间窗重规划带来的计算压力与实时性的矛盾。

(2)通过仿真试验,得出以下主要结论:STW-RRP 能够有效消解节点冲突、同向冲突及环形死锁,并在 AGV 故障等突发事件下实现路径动态调整,保障系统连续运行;与仅采用全局路径规划方法 A^*-I 算法相比,STW-RRP 使高负载节点的平均负载量下降了 32.60%,路网负载标准差降低 5.66 veh,显著改善了路网均衡性;参数分析表明,路阻因子权重 $\gamma \geq 4$ 、路网状态更新周期 $\delta = 5$ 个时间步时系统分拣效率最优。上述结论验证了所提方法在动态、高密度 AGV 作业场景下的实用价值,可为电商分拨中心、智能仓储等场景的调度系统设计提供理论依据和算法参考。

(3)本文研究的局限性在于,算法假设所有 AGV 同质且匀速行驶,未考虑不同车型、载重及加减速过程中的差异;另外,路阻因子的计算依赖于历史通行数据,在交通流剧烈波动时可能存在滞后性。

(4)后续研究可从以下方向展开:将 AGV 能耗、电池续航等因素纳入路径代价函数,构建多目标动态规划模型;引入深度强化学习方法,使路阻因子能够在线自适应学习,提升对突发拥堵的响应能力;拓展至异构 AGV 系统及动态订单分配与路径规划的协同优化,进一步提升系统整体柔性效率。

参考文献:

References:

- [1] FRAGAPANE G, DE KOSTER R, SGARBOSSA F, et al. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 294(2): 405-426.
- [2] 李昆鹏,韩雪芳.智能仓库中多 AGV 在线任务指派与全局路径规划问题研究[J].中国管理科学,2025,33(3):264-276.
LI Kun-peng, HAN Xue-fang. Research on online task assignment and global path planning problem of multi-AGV in intelligent warehouses[J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33(3): 264-276.
- [3] CAO Y, YANG A, LIU Y, et al. AGV dispatching and bidirectional conflict-free routing problem in automated container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 184: 109611.
- [4] ZHONG M S, YANG Y S, DESSOUKY Y, et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106371.
- [5] 周琛昊,焦俊玲,车阿大.自动化码头 AGV 无死锁在线路径规划算法[J].管理科学学报,2026,29(4):104-117.
ZHOU Chen-hao, JIAO Jun-lin, CHE A-da. Deadlock-free online path planning algorithm for AGVs in automated terminals[J]. Journal of Management Sciences in China, 2026, 29(4), 104-117.
- [6] 黄岩松,姚锡凡,景轩,等.基于深度 Q 网络的多起点多终点 AGV 路径规划[J].计算机集成制造系统,2023,29(8): 2550-2562.
HUANG Yan-song, YAO Xi-fan, JING Xuan, et al. DQN-based AGV path planning for situations with multi-starts and multi-targets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(8): 2550-2562.
- [7] LUO L, ZHAO N, ZHU Y, et al. A^* guiding DQN algorithm for automated guided vehicle pathfinding problem of robotic mobile fulfillment systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 178: 109112.
- [8] WANG K, LIANG W, SHI H G, et al. Driving line-based two-stage path planning in the AGV sorting system [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 169: 104505.
- [9] LI S Q, FAN L B, JIA S. A hierarchical solution framework for dynamic and conflict-free AGV scheduling in an automated container terminal [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 165: 104724.
- [10] 余娜娜,李铁克,张文新,等.自动分拣仓库中多载量 AGV 调度与路径规划算法[J].计算机集成制造系统,2024,30(4): 1458-1471.
YU Na-na, LI Tie-ke, ZHANG Wen-xin, et al. Multi-load AGVs scheduling and routing algorithm in automatic sorting warehouse[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(4): 1458-1471.

- [11] YANG G P, LI M Y, GAO Q. Multi-automated guided vehicles conflict-free path planning for packaging workshop based on grid time windows[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(8): 3341.
- [12] 付建林,张恒志,张 剑,等.自动导引车调度优化研究综述[J].*系统仿真学报*,2020,32(9):1664-1675.
FU Jian-lin, ZHANG Heng-zhi, ZHANG Jian, et al. Review on AGV scheduling optimization [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1664-1675.
- [13] 温惠英,元昱青,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.
WEN Hui-ying, YUAN Yu-qing, LIN Yi-feng. Conflict-free path planning for multi-AGVs in automated terminals considering road load balancing[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(10): 1-10.
- [14] 袁 洋,叶 峰,赖乙宗,等.结合负载均衡与 A* 算法的多 AGV 路径规划[J].*计算机工程与应用*,2020,56(5):251-256.
YUAN Yang, YE Feng, LAI Yi-zong, et al. Multi-AGV path planning combined with load balancing and A* algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(5): 251-256.
- [15] 张丹露,孙小勇,傅 顺,等.智能仓库中的多机器人协同路径规划方法[J].*计算机集成制造系统*,2018,24(2):410-418.
ZHANG Dan-lu, SUN Xiao-yong, FU Shun, et al. Cooperative path planning in multi-robots for intelligent warehouse[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(2): 410-418.
- [16] FRANSEN K J C, VAN EEKELEN J A W M, POGROMSKY A, et al. A dynamic path planning approach for dense, large, grid-based automated guided vehicle systems[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 123: 105046.
- [17] FRANSEN K, VAN EEKELEN J. Efficient path planning for automated guided vehicles using A* (astar) algorithm incorporating turning costs in search heuristic [J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(3): 707-725.
- [18] SI M, LIU M F, CAO X G, et al. A two-stage robust optimization method for multi-AGV path planning under uncertain disturbances[J]. *Control and Decision*, 2026.
- [19] 孙毛毛,匡 兵.基于时间窗的 AGV 动态避碰路径规划方法[J].*计算机应用研究*,2022,39(1):54-58.
SUN Mao-mao, KUANG Bing. Path planning method for AGV dynamic collision avoidance based on time window[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(1): 54-58.
- [20] LIAN Y D, XIE W, ZHANG L W. A probabilistic time-constrained based heuristic path planning algorithm in warehouse multi-AGV systems [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 2538-2543.
- [21] 官祥锦,陈 娟,张为民.基于改进 A* 算法的多 AGV 路径规划研究[J].*航空制造技术*,2023,66(5):76-85,90.
GUAN Xiang-jin, CHEN Juan, ZHANG Wei-min. Research on multi-AGV path planning based on improved A* Algorithm [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(5): 76-85, 90.
- [22] 刘 春,彭太平.大规模 AGV 的改进时间窗路径规划[J].*计算机应用研究*,2023,40(1):52-56.
LIU Chun, PENG Tai-ping. Improved time window path planning for large-scale AGV [J]. *Application Research of Computers*, 2023, 40(1): 52-56.
- [23] 赵红星,王钰捷,聂江龙,等.元胞推演多步决策的交叉口深度强化学习信号连续控制[J].*交通运输工程学报*,2025,25(4): 296-310.
ZHAO Hong-xing, WANG Yu-jie, NIE Jiang-long, et al. Deep reinforcement learning signal continuous control of intersection based on cellular deduction multi-step decision mechanism [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(4): 296-310.
- [24] 黄 玮,胡 洋.考虑交叉口渠化区排队特征的元胞传输模型[J].*交通运输工程学报*,2023,23(2):212-224.
HUANG Wei, HU Yang. Cell transmission model considering queuing characteristics of channelized zone at intersections [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(2): 212-224.