

7-20-2022

## Multi-Stage Multi-AGV Path Planning with Walk under Shelves for Robotic Mobile Fulfillment Systems

Teng Li

*1. Management School, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; liteng\_ha@126.com*

Peipei Ding

*1. Management School, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; dingpeipei\_2020@163.com*

Jinfang Liu

*2. School of Computer and AI Education, LingNan Normal University, Zhanjiang 524048, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Multi-Stage Multi-AGV Path Planning with Walk under Shelves for Robotic Mobile Fulfillment Systems

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the problem of increasing travel time due to *turning and obstacle avoidance* in robotic mobile fulfillment systems(RMFS) with large-scale multi-AGV path planning, *a path planning model with the shortest task completion time is established. A path planning model considering no-load AGV that can pass through the shelf is proposed, and the model is solved by an improving A\* algorithm. The AGV operation stage is divided, an turning penalty value is introduced into the A\* algorithm to reduce the turning times, and the obstacle avoidance priority with the obstacle avoidance waiting time is set.* The simulation results show that the new path planning method considering turning and obstacle avoidance can reduce task completion time and travel path length, and improve order picking efficiency of the warehouse of a distribution center.

## Keywords

RMFS (robotic mobile fulfillment systems), multi-AGVs path planning, walk under shelves, turning time, obstacle avoidance strategy, A\* algorithm

## Recommended Citation

Teng Li, Peipei Ding, Jinfang Liu. Multi-Stage Multi-AGV Path Planning with Walk under Shelves for Robotic Mobile Fulfillment Systems[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1512-1523.

## 货到人拣选系统多阶段可穿行多 AGV 路径规划

李腾<sup>1</sup>, 丁佩佩<sup>1\*</sup>, 刘金芳<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨商业大学 管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 岭南师范学院 计算机与智能教育学院, 广东 湛江 524048)

**摘要:** 针对货到人拣选系统大规模多 AGV (automated guided vehicle) 路径规划中由于转弯和避障导致行驶时间增长的问题, 考虑空载 AGV 可穿行货架, 建立以任务完成时间最短为目标的路径规划模型, 并通过改进 A\* 算法对该问题进行求解。对 AGV 运行阶段进行划分, 在 A\* 算法中引入转弯惩罚值减少转弯次数, 利用避障等待时间设置避障优先级。仿真实例结果表明考虑转弯和避障的可穿行货架路径规划方法能够降低任务完成时间和行走路径长度, 在提高拣选系统作业效率方面具有参考价值。

**关键词:** 货到人拣选系统; 多 AGV 路径规划; 可穿行; 转弯; 避障策略; A\* 算法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)07-1512-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1060

## Multi-Stage Multi-AGV Path Planning with Walk under Shelves for Robotic Mobile Fulfillment Systems

Li Teng<sup>1</sup>, Ding Peipei<sup>1\*</sup>, Liu Jinfang<sup>2</sup>

(1. Management School, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. School of Computer and AI Education, LingNan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of increasing travel time due to *turning and obstacle avoidance* in robotic mobile fulfillment systems(RMFS) with large-scale multi-AGV path planning, *a path planning model with the shortest task completion time is established. A path planning model considering no-load AGV that can pass through the shelf is proposed, and the model is solved by an improving A\* algorithm. The AGV operation stage is divided, an turning penalty value is introduced into the A\* algorithm to reduce the turning times, and the obstacle avoidance priority with the obstacle avoidance waiting time is set.* The simulation results show that the new path planning method considering turning and obstacle avoidance can reduce task completion time and travel path length, and improve order picking efficiency of the warehouse of a distribution center.

**Keywords:** RMFS (robotic mobile fulfillment systems); multi-AGVs path planning; walk under shelves; turning time; obstacle avoidance strategy; A\* algorithm

## 引言

通过提高设施设备的智能化水平和运行效率来实现降本增效提质是物流行业发展的必然趋势。随着仓库订单数量的增加, 采用传统的人工拣选

方式时效性和准确性受到了巨大挑战, 利用自动引导运输车(automated guided vehicle, AGV)与人工协同的货到人拣选方式(robotic mobile fulfillment systems, RMFS<sup>[1]</sup>)被广泛采用。使用 AGV 可以提高拣选效率和准确率, 合理的调度和

收稿日期: 2021-10-19

修回日期: 2022-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划(2018YFB1402500); 黑龙江省自然科学基金(LH2021G014); 湛江市科技计划(2021B01045)

第一作者: 李腾(1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智慧物流, 复杂系统仿真。E-mail: liteng\_ha@126.com

通讯作者: 丁佩佩(1997-), 女, 硕士生, 研究方向为智慧仓储, AGV 路径规划。E-mail: dingpeipei\_2020@163.com

路径规划<sup>[2-3]</sup>是实现多AGV高效拣选的前提。

众多学者针对多AGV路径规划进行了研究。Vivaldini等<sup>[4]</sup>采用Dijkstras算法和时间窗方法生成无冲突路径; Ma等<sup>[5]</sup>基于仿真模型实现AGV无碰撞路径规划; Kamoshida等<sup>[6]</sup>提出一种深度强化学习的方法解决RMFS系统中的AGV路径规划问题; 邓向阳等<sup>[7]</sup>提出双向汇聚引导蚁群算法实现机器人路径规划。利用遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等优化算法进行路径规划虽具有良好的收敛性但是收敛速度较慢, 而机器学习算法在AGV数量较多的情况下实现完整路径规划存在一定的困难。A\*算法能够实现动态避障并能够快速完成全局路径规划, 在AGV路径规划中应用最为广泛<sup>[8]</sup>。Lee等<sup>[9]</sup>根据AGV当前状态采用改进A\*算法规划路径, 利用时间最短作为规划目标。Guo等<sup>[10]</sup>提出将Dijkstras算法和A\*算法结合解决路径规划问题。李荣华<sup>[11]</sup>提出了时域协作的A\*路径规划算法, 在规划阶段避免路径交错以杜绝冲突。Merschformann等<sup>[12]</sup>用时间窗结合A\*算法实现多AGV路径规划。张丹露等<sup>[13]</sup>利用改进A\*算法结合预约表和交通规则实现无冲突多AGV路径规划。

随着AGV数量的增加, 利用无冲突路径规划解决RMFS系统中AGV路径规划问题的计算时效性将大大降低, 因此部分学者研究事后避障。Roy等<sup>[14]</sup>建立通道协议, 当有AGV经过该通道时其它AGV不允许进入。其他学者<sup>[15]</sup>通过设置优先级进行避障, Dou等<sup>[16]</sup>利用剩余任务数量设置AGV优先级, Yuan等<sup>[17]</sup>利用车辆到达时间设置优先级。

目前的多数研究没有充分考虑AGV不同运行阶段的运行约束和运行状态特征导致的运行时间变化。首先, AGV不同运行阶段可选择行走的路径区域不同; 其次, 一次AGV转弯或避障过程即会包含匀速、减速、停止转弯/等待避障、加速、匀速运行模式的转换, 同时AGV在转弯、避障过程中会导致运行状态不连续, 冲突发生的概率提高; 最后, AGV在等待过程中消耗时间却不产生位移。本文针对RMFS作业中双向通道路径规划问题, 建立以任务完成时间最短为目标的多AGV

无冲突路径规划模型, 模型中按照流程将AGV工作阶段进行划分, 在车辆空载阶段可穿行货架, 同时考虑AGV在转弯过程以及避障等待过程中的时间消耗, 通过对比等待时间设计避障优先级改进A\*算法, 以期提出一种在RMFS中规划多AGV无冲突路径的高效方法, 为企业实践提供参考。

## 1 问题描述

货到人拣选方式是指客户下单后, 系统将客户订单积累到一定数量后调度AGV执行拣选任务, AGV按照系统规划的路径将货架搬运至指定的拣选台, 拣选人员将货架上的货物拣选出来后AGV再将货架放回原来位置。

本文研究中考虑空载状态AGV可以在货架下穿行, 同时通过计算避障等待情况下AGV任务完成时间设置避障策略, 系统根据任务和AGV的位置选择调度距离任务最近的空闲机器人, 同时有多个拣选台时, 多拣选台同步工作, 系统根据距离分配拣选台。本文研究的货到人拣选系统AGV作业流程如图1所示, 任务完成时间构成如图2所示。

当AGV和拣选台分配完成之后, 将AGV完成任务的过程划分为4个阶段, 各个阶段行走的路径具有马尔科夫性, 因此按照每一阶段的起始点和目标点依次进行规划。第1阶段为前往任务阶段, 此阶段以AGV当前位置为起始点, 任务所在位置为目标点, 并且此阶段AGV处于空载状态, 可以在货架底部穿行; 第2阶段为前往拣选台阶段, 此阶段以任务所在位置为起始点, 拣选工区入口为目标点, 此阶段AGV为重载状态; 第3阶段为拣选阶段, 为避免多AGV在拣选工作台附近出现冲突, 将拣选工作台前的一定范围设置为拣选工作区, AGV在拣选工作区行驶的路线及行驶方向固定, 为避免时间的浪费货物在拣选过程中AGV不会将货架放下; 第4阶段为返回阶段, 此阶段以拣选工作区的出口为起始点, 以任务所在货架位置为目标点。

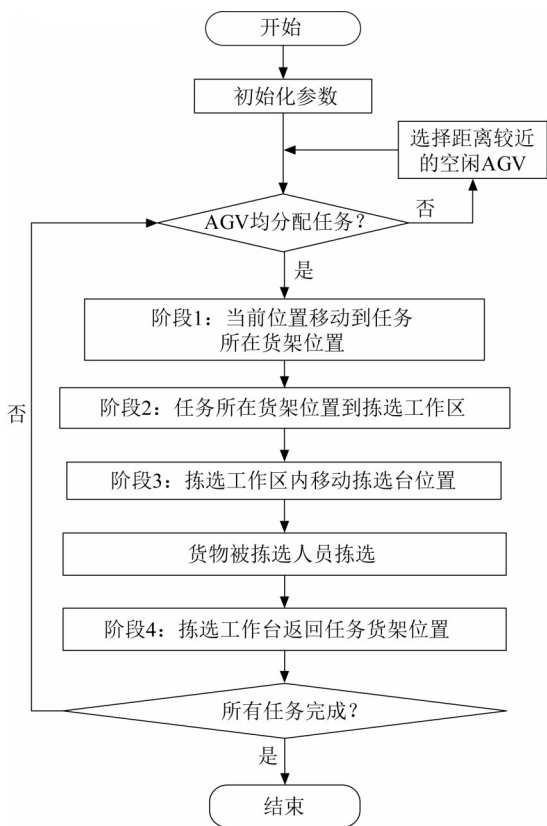


图1 货到人拣选系统中AGV作业流程图

Fig. 1 Flow chart of AGV operation in RMFS system

路径规划完成后检测 AGV 之间是否会出现碰撞冲突并计算两个 AGV 分别进行避障等待的时长，为保证任务在最短时间内完成，使避障等待时间短的 AGV 停止，避障时间长的 AGV 优先通行。AGV 行走过程中遇到的碰撞类型有垂直碰撞和相向碰撞，垂直碰撞是指两个运行方向垂直的 AGV 在交叉口的同一位点发生碰撞，这种冲突碰撞的解决方式是使优先级低的 AGV 在冲突点前的栅格中停止等待，优先级高的 AGV 通行后再通行。相向冲突是指两个运行方向相反的 AGV 在同一通道内行走在通道中的某一点发生碰撞，这种冲突碰撞的解决方式是使优先级低的 AGV 在能够实现避让的前一个点进行等待，让优先级高的 AGV 通行后再通行。对每一个 AGV 规划无碰撞的路径，当仓库中运动的最后一个 AGV 将货架放回，拣选任务完成，其行走时间为本批次任务完成时间。

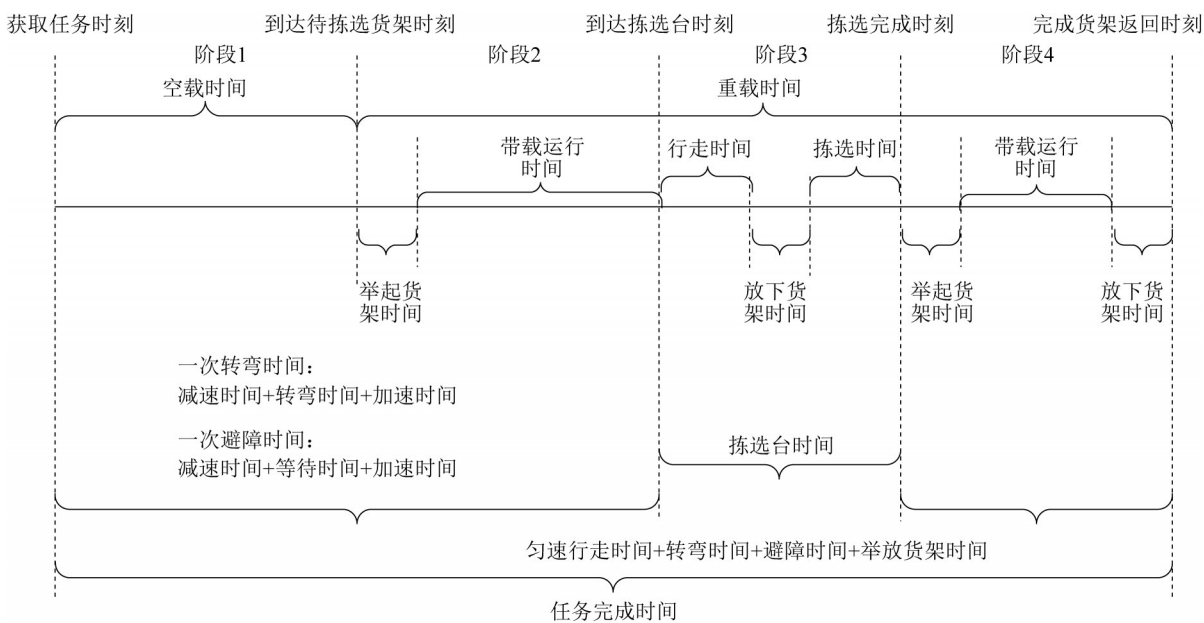


图2 AGV 任务完成时间构成

Fig. 2 Composition of completion time for a AGV

本文研究货到人拣选系统为双向单行通道，即 AGV 可以在货架之间的自由通道中双向行驶，通道

中只能容纳一个 AGV。图3为栅格化处理的仓库布局图，其中包括货架存储区、货物拣选区和 AGV 充

电和停放区。将左下角的第一个栅格标记为1, 从左到右、从下到上依次由小到大对栅格进行标号, 右上角最后一个栅格标记为2 500, 左下角的局部放大大显示了栅格的具体标号方式。

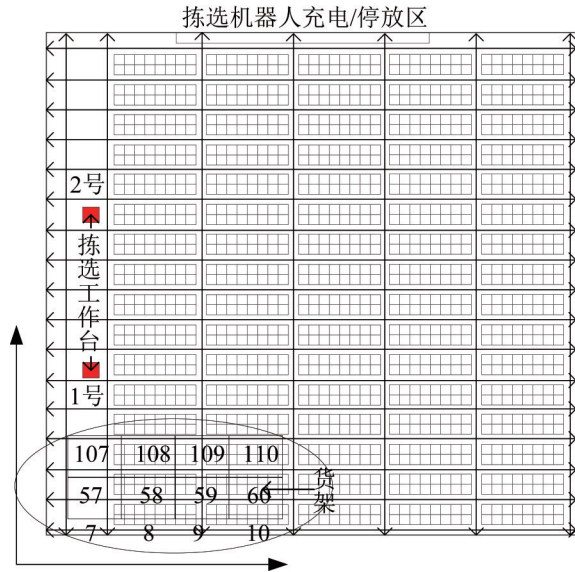


图3 仓库布局图及路网规划

Fig. 3 Warehouse layout and road network

## 2 模型建立与求解

### 2.1 假设与符号说明

在模型建立中做如下假设:

- (1) 拣选人员单次完成拣选任务的时间为定值, 且遵循先到先服务的原则;
- (2) 举起和放下货架的时间为定值;
- (3) 货架规格相同, 每个货架只有一个拣选任务;
- (4) 所有 AGV 规格相同, 匀速行驶的速度为  $v$ ;
- (5) 不考虑 AGV 需要充电情况;
- (6) AGV 搬运的货架重量均在其载重范围之内;
- (7) 任务下发时 AGV 均可被调度。

模型中使用的符号说明如表 1 所示。

表1 模型符号说明

Table 1 Symbol explanation in model

符号	含义	符号	含义
$T_p$	AGV 完成任务的时间	$d$	AGV 一次加减速行走距离
$i$	第 $i$ 个任务, $i \in [1, M]$	$q_{Zij}$	第 $j$ 个 AGV 完成第 $i$ 个任务转弯总次数
$j$	第 $j$ 个 AGV, $j \in [1, N]$	$q_{Kij}$	第 $j$ 个 AGV 完成第 $i$ 个任务避障等待总次数
$r_j$	第 $j$ 个 AGV 完成任务的数量	$S$	值为 1 时表示前往拣选台阶段, 值为 2 时表示放回货架阶段
$v$	AGV 匀速运行速度	$u$	系统中第 $u$ 条路段, $u \in [1, G_{ij}]$
$t_j$	拣选人员拣货时间	$(y_l, x_l)$	编号为 $l$ 的栅格位置位置, 栅格总数为 $L$
$t_1$	AGV 举起货架花费的时间	$H_{Kabij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务时, 空载阶段行走的路段
$t_d$	AGV 放下货架花费的时间	$H_{Zabij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务时, 重载阶段行走的路段
$T_{skij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务过程中第 $k$ 次避障等待开始时间点	$U_1$	除拣选台外, 相邻栅格中心构成的路段集合
$T_{enkij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务过程中第 $k$ 次避障等待结束时间点	$U_2$	除拣选台和货架外, 相邻栅格中心构成的路段集合
$t_{wkij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务过程中第 $k$ 次避障等待时间	$G_{ij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务时行走路段总数
$t_{pl}$	AGV 加减速消耗时间	$\vec{r}_{abij}$	第 $j$ 个 AGV 执行第 $i$ 个任务时, 行走的路段 $H_{ab}$ 构成的向量
$t_p$	AGV 转弯过程消耗时间	$R_{abij}$	决策变量, 表示是否经过路段 $H_{ab}$ , 1 表示经过, 0 表示不经过
$h$	路段长度	$H_{ab}$	编号分别为 $a, b$ 的栅格中心构成的路段, 且栅格 $a, b$ 相邻

## 2.2 模型建立

多AGV运行情况下，考虑到AGV的转弯时

$$T_p = \min \left\{ \max \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{r_j} h \cdot R_{abij} + \sum_{S=1}^2 \sum_{u \in U_2} h \cdot R_{abij} - (q_{Zij} + q_{Kij}) \cdot d}{v} + \right. \right. \\ \left. \left. q_{Zij}(t_{pl} + t_p) + \sum_{k=1}^{q_{Kij}} (t_{wkij} + t_{pl}) + t_J + t_1 + t_d, (i \in [1, M]) \right\} \right\} \quad (1)$$

任务下发时所有AGV均处于空闲状态，所有AGV会同时被调度，因此任务完成时间等于从任务下发时刻到最晚完成任务的AGV的时间。

AGV行走的路段构成的向量：

$$\vec{r}_{abij} = (x_b - x_a, y_b - y_a) \quad (2)$$

AGV在完成一个订单任务过程中经历的转弯次数：

$$q_{Zij} = \sum_{u=1}^{G_j} \sin \left\langle \vec{r}_{uij}, \vec{r}_{(u+1)ij} \right\rangle \quad (3)$$

由行走路径中相邻两路段夹角的正弦值计算得到，栅格地图中AGV只能平行或垂直于x轴行走，因此相邻两条路段组成的夹角为0°或90°，若相邻两条路段的夹角为90°则AGV发生了转弯，转弯次数加1，若两条路段组成的夹角为0°时则未发生转弯。

AGV避障等待时间：

$$t_{wkij} = T_{cnkij} - T_{stkij} \quad (4)$$

决策变量：

$$R_{abij} \in \{0, 1\}, (i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

AGV是否经过路段 $H_{Kabij}$ 或 $H_{Zabij}$ ，1表示经过路段，0表示未经过路段。

空载和载重情况下行走的路段均在各自的可行路段集合范围内。

$$H_{Kabij} \in U_1 \quad (6)$$

$$H_{Zabij} \in U_2 \quad (7)$$

AGV在空载和重载状态的可行区域不同，按

间。加减速时间和避障等待时间，建立最小化任务完成时间的多阶段多AGV路径规划模型：最小化任务完成时间。

照AGV所处的状态分阶段规划路径，任务完成时间为空载行驶和重载行驶时间之和。AGV转弯、避障时间包括加减速时间、转向时间或等待时间。

## 2.3 模型求解

AGV路径规划是一个NP-hard难题，只能从起始点到终点寻找一条满意路径而非最优路径。A\*算法在已知全局环境信息情况下，按照启发式函数有选择性地从起始节点开始搜索周围节点，选择搜索过程中最优的节点再进行扩展，直到搜索到目标节点，生成一条完整路径。

针对本文应用场景，首先改进A\*算法中的预估函数，将转弯因素作为预估函数的一部分，从起始节点到达第n个父节点的子节点，再从该子节点到达目标节点的预估时间代价：

$$F(n) = G_H(n) + G_T(n) + H(n) \quad (8)$$

式中： $G_H(n)$ 为从起始节点到达第n个父节点的扩展节点的实际行驶时间代价； $G_T(n)$ 为AGV在第n个父节点处的转弯惩罚值，若AGV沿着某方向行走，如果探索的子节点需要在第n个父节点处发生转弯才能到达，转弯惩罚值 $G_T(n) > 0$ ，若不需要转弯则转弯惩罚值为0； $H(n)$ 为从第n个父节点扩展的子节点到达目标节点的最优路径估计时间代价，其值为该子节点到达目标节点的曼哈顿距离所行驶的时间。

其次改进A\*算法中的搜索策略，AGV完成拣

选任务的 4 个阶段中第 1、2、4 阶段均分别由 A\* 算法进行规划。用简化仓储空间表示改进 A\* 算法路径搜索过程如图 4 所示。AGV 在不同状态节点扩展范围不同, 空载状态从节点 D1(星号标记)开

始, 扩展区域为除拣选工作台外的所有栅格, 空载状态可规划穿行货架路径。重载状态从节点 P1(星号标记)开始, 扩展区域为通道中的自由栅格, 重载状态规划的路径只能在通道中行驶。

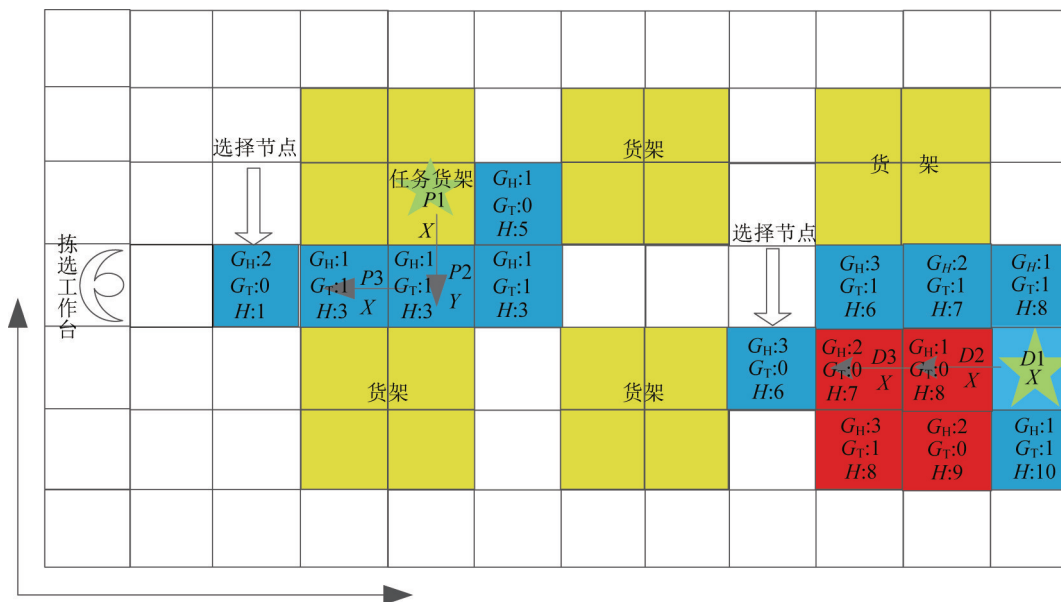


图 4 改进 A\* 算法节点搜索图  
Fig. 4 Node search graph of improved A\* algorithm

改进 A\* 算法路径搜索步骤如图 5 所示。A\* 算法路径搜索时将起始节点加入到 Open list 和 Close list 中并作为父节点计算上、左、下、右 4 个方向可行点的  $F(n)$  值, 同时将已搜索的节点加入到 Open list 中, 当周围 4 个方向的可行节点搜索完毕后选择 Open list 中  $F(n)$  值最小的节点作为下一次扩展的父节点加入到 Close list 中, 直到将目标点加入到 Close list 中, 按照 Close list 中父节点的扩展顺序形成一条时间最短的完整路径。

$F(n)$  值分别由  $G_H(n)$ 、 $G_T(n)$  和  $H(n)$  组成, 其中  $G_H(n)$  和  $H(n)$  由实际行驶路径和最优行驶路径时间决定,  $G_T(n)$  由 AGV 的运行方向和节点的扩展方向确定, 运行方向由扩展节点的父节点及父节点的父节点确定, 即扩展节点和 AGV 的运行方向垂直时, AGV 到达该扩展节点需要在第  $n$  个父节处进行转弯才能到达,  $G_T(n)$  为 1, 否则  $G_T(n)$  为 0, 计算完成后将 Open list 中预估函数值

最小的点移除, 加入到 Close list 中并作为下一次搜索的父节点, 通过循环搜索直到将目标节点加入到 Close list 中, 搜索结束。

最后, 优化避障策略。设置以避障等待时间为优先级参数的避障策略。AGV 局部 3 种避障过程如图 6 所示。A1, A2 为相向冲突情况, 经过 1 个时间步长后 A1、A2 分别到达 C11 和 C02, 此时 A1 完成转向, 为实现避障, A1 在图中位置停止等待 3 个时间步长或 A2 到 C02 位置等待 A1 转弯、直行、转弯完全离开冲突区域, A2 需要等待时间为 3 个时间步长及 2 个转弯时间, 为保证避障时间最短, A2 优先通行。A3, A4 会在栅格 C3 发生垂直碰撞冲突, 两 AGV 解决冲突等待时间相同, 编号小的 A3 优先通行。A6 减速停止在图中位置还未转向, A5 紧跟其后出现追赶碰撞冲突, 为实现避障, A5 在图 6 中位置等待 1 个时间步长或初始时 A6 在 M6 位置停止等待 A5 驶离 C6 后再通行,



A6 需要等待 3 个时间步长, 因此 A6 优先通行。避障结果如图所示, 虚线和实线分别指示优先级高和优先级低的 AGV 行驶方向及路径。

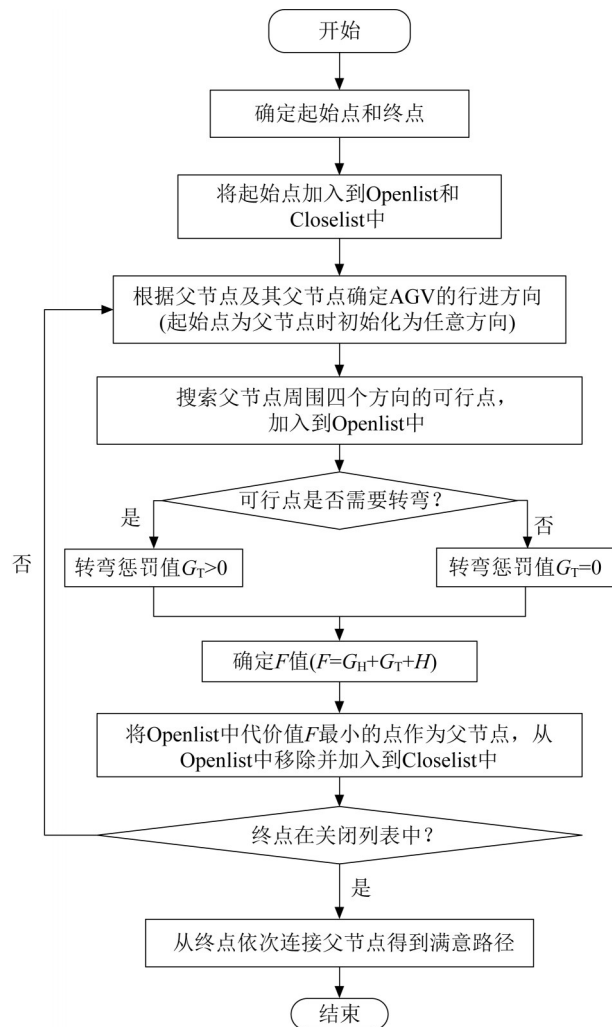


图 5 改进 A\* 算法路径规划算法步骤

Fig. 5 Steps of improved A\* path planning algorithm

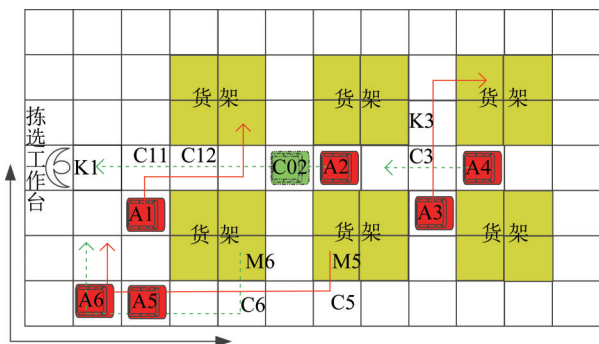


图 6 基于等待时间优先级的避障策略

Fig. 6 Obstacle avoiding strategy based on priority level in waiting time

### 3 实例仿真与结果分析

#### 3.1 实例描述

以某仓库货到人拣选系统为例, 拣选区域面积为  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。仓库中有 2 个拣选台, 分别为 1 号和 2 号, 所在位置栅格编号分别为 703 和 1953, 坐标分别为 (15, 3) 和 (36, 3)。布局为  $16\text{ m} \times 5\text{ m} \times 8\text{ m}$  的 2 排货架, 即仓库中有 16 排、5 列货架组, 一个货架组由 16 个货架背靠背摆放组成, 每个货架有 5 层, 每层有 3 个储位, 货架的尺寸为  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。AGV 匀速运行状态的速度为  $1\text{ m/s}$ , 加速度为  $\pm 1\text{ m/s}^2$ , 每转弯耗时为 4 s, 转弯动作耗时 2 s, 取放货架的顶升和落放时间消耗为 3 s。初始时 AGV 随机停放在仓库的可行区域内, 位置坐标如表 2 所示。随机生成一组 30 个任务, 任务所在位置坐标如表 3 所示, 其中栅格序号表示所在位置的栅格编号, 栅格地图中从左下角第一个栅格坐标为 (0, 0), 括号中第一个坐标为 y 方向坐标值, 第二个坐标为 x 方向坐标值。

表 2 AGV 初始位置

Table 2 Position coordinates of AGV

AGV 路径规划	栅格号	位置
1	1 084	(22,34)
2	2 413	(49,13)
3	1 845	(37,45)
4	788	(16,38)
5	2 129	(43,29)

#### 3.2 仿真结果分析

##### 3.2.1 多阶段无碰撞路径规划实现

使用 Matlab2016(a) 进行仿真, 考虑转弯时间和最短避障时间, 空载状态下可以在货架底部穿行, 以任务完成时间最短为优化目标对多 AGV 规划多阶段无碰撞路径。图 7 为多 AGV 同时运行时某一时刻系统的运行状态, 从图中规划得到的路线可看出, 本文模型中的 AGV 可以在货架底部穿行, 多 AGV 同时运行时存在冲突点。

表 3 任务位置  
Table 3 Position coordinates of tasks

任务编号	栅格序号	位置	任务编号	栅格序号	位置
1	866	(18,16)	16	121	(3,21)
2	1 315	(27,15)	17	72	(2,22)
3	383	(8,33)	18	1 877	(38,27)
4	447	(9,47)	19	1 312	(27,12)
5	1 860	(38,10)	20	425	(9,25)
6	821	(17,21)	21	137	(3,37)
7	746	(15,46)	22	1 858	(38,8)
8	2 366	(48,16)	23	285	(6,35)
9	1 179	(24,29)	24	1 618	(33,18)
10	1 634	(33,34)	25	1 270	(26,20)
11	696	(14,46)	26	1 885	(38,35)
12	1 789	(36,39)	27	656	(14,6)
13	2 306	(47,6)	28	1 497	(30,47)
14	2 338	(47,38)	29	883	(33,18)
15	1 487	(30,37)	30	268	(6,18)

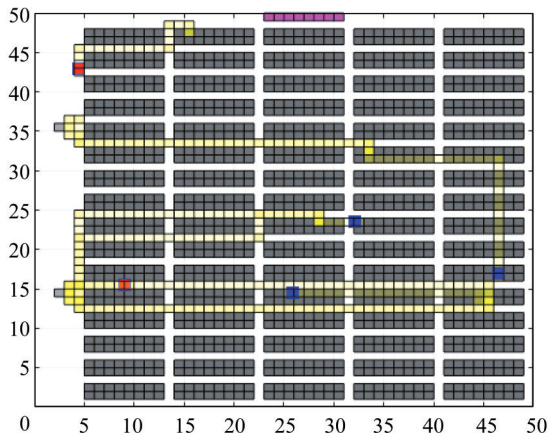


图 7 AGV 完成任务过程中行走的路径  
Fig. 7 Path of AGVs in completing the task

为便于观察 AGV 在不同阶段行驶的路径, 图 8 为第 5 号 AGV 完成第 5 号任务时行走的完整路径, 栅格 S1, S2, S3 和 S4 分别为 AGV 当前位置。任务所在位置、拣选区入口和拣选区出口。S1 到 S2 表示第一阶段空载前往任务位置的路径, 此阶段 AGV 可以穿行货架; S2 到 S3 表示第 2 阶段重载前往拣选工作区的路径, S3 到 S4 表示第 3 阶段从拣选工作区入口 S3 进入, 按照逆时针方向经过拣选台完成拣选工作后从拣选工作区出口 S4 驶出的路径, 拣选工作区中将入口和出口设置在不同行不同列可

以减少冲突的发生; S4 到 S2 表示第 4 阶段 AGV 载重将货架放回到原来位置的路径。

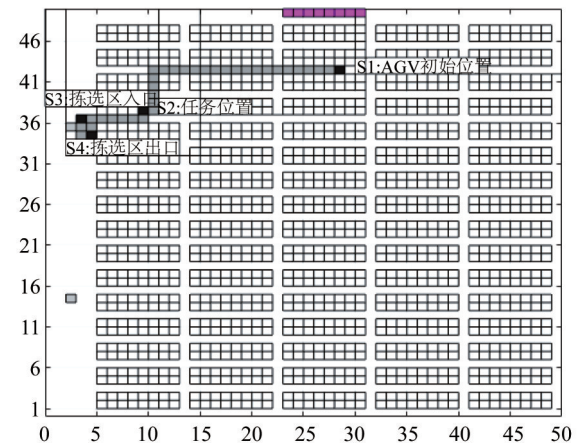


图 8 5 号 AGV 完成任务过程中行走的路径  
Fig. 8 Path of No.5 AGV

5 个 AGV 完成所有任务过程中的转弯次数、避障等待时间、拣选任务分配结果等如表 4 所示。5 个 AGV 将表 3 中的 30 个任务拣选完成花费的时间为 662 s, 所有 AGV 行走的总距离为 2 611 m, 所有 AGV 行走花费的总时间为 3 211 s。

### 3.2.2 结果对比分析

为验证考虑转弯和最短避障时间且空载状态下可

以在货架底部穿行对任务完成时间优化的有效性, 对其进行进一步分析。表5显示分别为考虑不同的避障和转弯处理方式, 以及是否可穿行下的仿真结果。其中按照AGV执行任务序号进行避障处理的方式指当遇到需要避障情况时, 任务序号大的AGV停止等待避障。通过比较结果看出, AGV空载状态穿行货架比空载状态不穿行货架任务完成时间、所有AGV运行总时间、所有AGV行驶总路程、转弯消耗时间和避障等待时间均少, 因此空载状态穿行货架具有一定的优化效果。路径规划中考虑转弯惩罚, 既能减少路径中转弯次数又能减少任务完成过程中的避障等待时间。改变避障规则后, 避障等待时间短的AGV优先级高, 任务完成时间和行走路径进一步得到优化。

表4 AGV完成任务过程  
Table 4 Turns and obstacle avoidance waiting time during AGV running

序号	转弯次数/ 次	避障时间/ s	任务分配 结果	目标拣选台
1	26	52	1,7,13,18, 22,25	1,1,2,2,2,1
2	26	62	2,8,12,17, 23,29	2,2,2,1,1,1
3	27	56	4,10,15,19, 24,26	1,2,2,2,2,2
4	30	96	1,9,14,20, 27,30	1,1,2,1,1,1
5	29	58	5,6,11,16, 21,28	2,1,1,1,1,2

表5 不同优化目标下任务完成情况对比  
Table 5 Task completion time under different optimization objectives

避障及转弯处理			优化结果		时间统计		
避障处理	转弯处理	可否穿行 货架	任务完成 时间	AGV行走总 时间	转弯时间	避障时间	转弯避障总 时间
任务序号优先级	无	否	782	3 591	322	444	766
任务序号优先级	无	是	722	3 284	246	313	559
任务序号优先级	有	否	707	3 360	312	269	581
任务序号优先级	有	是	684	3 203	262	241	503
避障时间优先级	有	否	701	3 349	310	249	559
避障时间优先级	有	是	662	3 211	276	234	510

首先, 比较不同避障及转弯处理下AGV完成任务过程中的转弯时间和避障等待时间。A\*算法中考虑转弯代价, AGV转弯时间消耗和避障时间消耗均降低。避障过程通过考虑避障等待时间设置优先级在降低避障等待时间中有效。

其次, 验证穿行货架的必要性。为避免选取任务的特殊性, 按照仓储系统拣选任务热度分布规律, 随机生成10批任务, 比较在距离最短(空载不可穿行货架为优化目标)和时间最短(空载可穿行货架为优化目标)下任务的完成时间和运行距离, 如图9所示。AGV空载状态穿行货架减少仓储空间移动障碍物, 是降低任务完成时间和行驶距离的显性原因。

再次, 验证优化目标的优越性。仿真结果

图10(a)是以距离最短为优化目标且AGV在空载状态下不可穿行货架底部时1号AGV的行走路径, 图10(b)是考虑转弯时间和最短避障时间以时间最短为优化目标且AGV在空载状态可穿行货架底部时1号AGV的行走路径。AGV在同一地点出发, 不同优化目标下行走的路径不同, 10(a)中行驶路径仅为通道栅格, 而10(b)中路径包含全部栅格, 10(a)中路径长度和转弯数量均大于10(b)中路径。

进一步比较可穿行货架情况下, 距离最短、时间最短(含是否考虑转弯、避障时间)为优化目标的仿真结果, 如图11~13所示。在货到人拣选应用场景, 考虑转弯因素可以减少不必要的转弯从而使任务完成时间和行驶距离减少,

但 AGV 长时间行驶于某一通道内, 会导致多 AGV 之间路线重合范围增加, 造成避障等待时间增长, 因此在考虑转弯的同时还要优化避障时间。

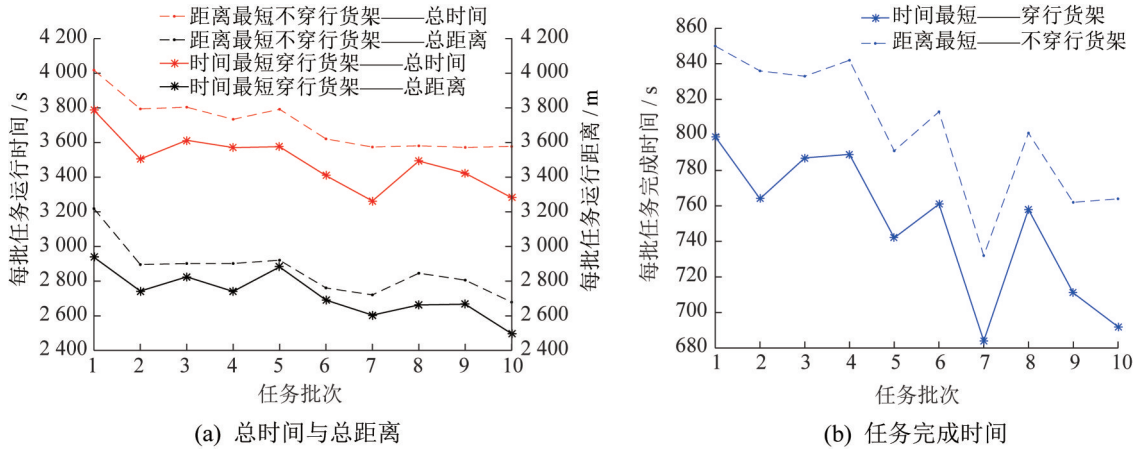


图 9 穿行货架下 10 批任务完成所需总时间、总距离及任务完成时间

Fig. 9 Total time and total distance and complete time for 10 batches of tasks under constraint walking under shelf

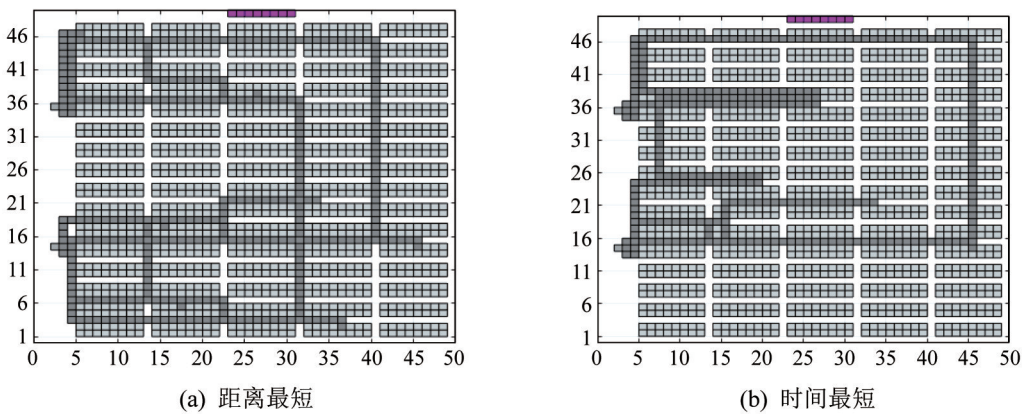


图 10 不同目标下 1 号 AGV 完成所有任务行走路径

Fig. 10 Path of No.1 AGV for all tasks under different object

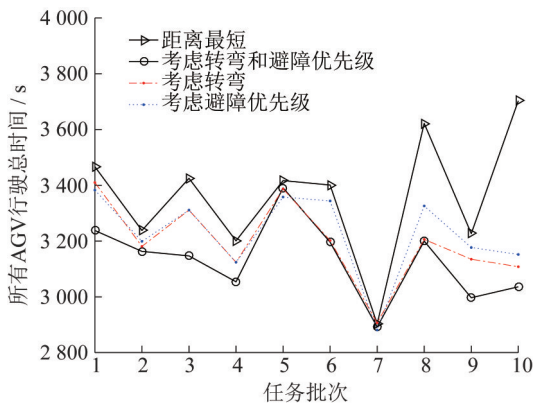


图 11 不同优化目标下 10 批任务完成行驶总时间图  
Fig. 11 Total time for 10 batches of tasks under different optimization objectives

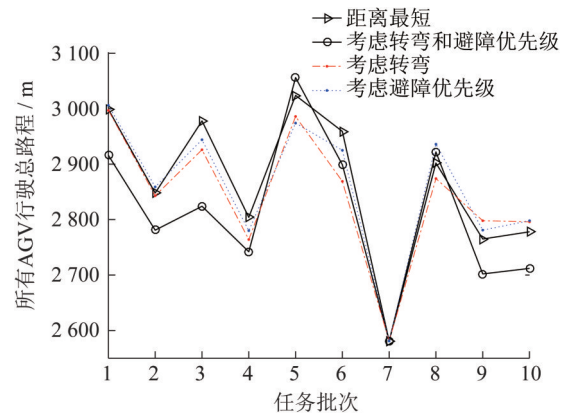


图 12 不同优化目标下 10 批任务完成行驶总路程图  
Fig. 12 Total distance for 10 batches of tasks under different optimization objectives

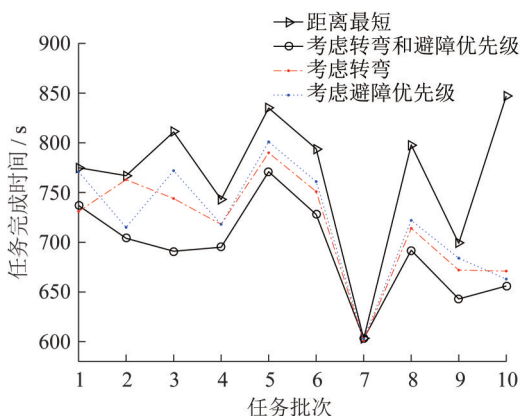


图 13 不同优化目标下 10 批任务完成时间  
Fig. 13 Complete time for 10 batches of tasks under different optimization objectives

最后，进一步对比计算表 3 中的任务在不同数量 AGV 配置情形下任务完成情况。在实际运营过程中，订单数量会影响配置的 AGV 数量，为减少 AGV 初始位置对任务完成时间的影响，AGV 的初始位置密集分布在停放区的中心位置，AGV 初始位置如表 6 所示。

表 6 AGV 初始位置  
Table 6 Initial position coordinates of AGV

AGV 号	栅格序号	位置	AGV 号	栅格序号	位置
1	2474	(59.24)	6	2477	(59.27)
2	2475	(59.25)	7	2471	(59.21)
3	2473	(59.23)	8	2478	(59.28)
4	2476	(59.26)	9	2470	(59.20)
5	2472	(59.22)	10	2479	(59.29)

得到不同数量 AGV 完成所有任务的运行总时间和总距离如图 14 所示。随着 AGV 数量增加，以时间最短为优化目标所有 AGV 完成任务花费的总时间和行驶的总路程更短，并且随着 AGV 数量的增多，两条曲线之间的间隙呈现增大趋势，以时间最短为优化目标降低转弯和避障时间效果越显著。

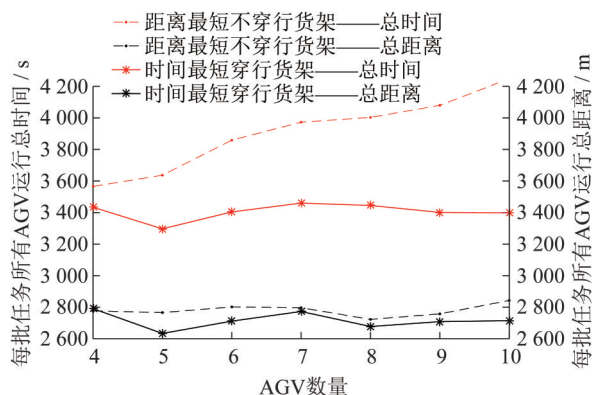


图 14 不同数量 AGV 运行总时间/距离图  
Fig. 14 Total operating time/distance of different quantity of AGVs

### 4 结论

本文针对货到人拣选系统多 AGV 路径规划问题，基于不同阶段 AGV 运行状态，建立了以任务完成时间最短为目标的可穿行货架的多阶段多 AGV 路径规划模型。在启发式函数中引入转弯惩罚值改进 A\* 算法实现了转弯次数的减少；同时通过设置最短避障等待时间优先级实现局部避障。最后通过多组任务及不同数量 AGV 仿真实验表明，本文的空载状态可穿行货架、改进 A\* 算法和局部避障策略实现了降低转弯、避障和任务完成时间，相比以距离最短为优化目标且空载状态不可穿行货架规划的路径，以时间为评价指标，效率平均提升 17%，对仓储企业提高拣选作业效率具有指导意义，同时本文所建立的模型对其它应用场景 AGV 的路径规划也具有一定的指导意义。

### 参考文献:

[1] ENRIGHT J, WURMAN P. Optimization and Coordinated Autonomy in Mobile Fulfillment Systems [C]// Automated Action Planning for Autonomous Mobile Robots. the 2011 AAAI Workshop, San Francisco, California, USA, August 7, 2011. AAAI Press, 2011: 33-38.

[2] 徐翔斌, 马中强. 基于移动机器人的拣货系统研究进展 [J]. 自动化学报, 2022, 48(1): 1-20.  
Xu Xiangbin, Ma Zhongqiang. Robotic Mobile Fulfillment Systems: State-of-the-art and Prospects[J]. Acta Automatica Sinica. 2022, 48(1): 1-20.

- [3] Da Costa Barros Ítalo Renan, Do Nascimento Tiago Pereira. Robotic Mobile Fulfillment Systems: A Survey on Recent Developments and Research Opportunities[J]. *Robotics and Autonomous Systems* (S0921-8890), 2021, 137: 1-5.
- [4] Vivaldini K, Rocha L, Martarelli N, et al. Integrated Tasks Assignment and Routing for the Estimation of the Optimal Number of AGVs[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (S0268-3768), 2016, 82(4): 719-736.
- [5] Ma H, H-nig W, Cohen L, et al. Overview: A Hierarchical Framework for Plan Generation and Execution in Multirobot Systems[J]. *IEEE Intelligent Systems* (S1541-1672), 2017, 32(6): 6-12.
- [6] Kamoshida R, Kazama Y. Acquisition of Automated Guided Vehicle Route Planning Policy Using Deep Reinforcement Learning[C]// 6th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport. Washington, D C, USA: IEEE, 2017: 1-6
- [7] 邓向阳, 张立民, 方伟, 等. 基于双向汇聚引导蚁群算法的机器人路径规划[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(5): 1101-1108.  
Deng Xiangyang, Zhang Limin, Fang Wei, et al. Robot: Path Planning Based on Bidirectional Aggregation Ant Colony Optimization[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(5): 1101-1108.
- [8] 王梓强, 胡晓光, 李晓筱, 等. 移动机器人全局路径规划算法综述[J]. *计算机科学*[J]. 2021, 48(10): 19-29.  
Wang Ziqiang, Hu Xiaoguang, Li Xiaoxiao, et al. Overview of Global Path Planning Algorithms for Mobile Robots[J]. *Computer Science*, 2021, 48(10): 19-29.
- [9] Lee C K M, Lin Bingbing, Ng K K H, et al. Smart Robotic Mobile Fulfillment System with Dynamic Conflict-free Strategies Considering Cyber-physical Integration[J]. *Advanced Engineering Informatics* (S1474-0346), 2019, 42(13): 1-12.
- [10] Guo Lixiao, Yang Qiang, Yan Wenjun. Intelligent Path Planning for Automated Guided Vehicles System Based on Topological Map[C]// 2012 IEEE Conference on Control Systems & Industrial Informatics. Washington, D C, USA: IEEE, 2012: 69-74.
- [11] 李荣华. 面向智能仓储的多机器人任务分配与路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
LI Ronghua. Research on Task Assignment and Path Planning for Multi-robots for Intelligent Warehouse[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] Merschformann M, Lamballais T, Koster M D, et al. Decision Rules for Robotic Mobile Fulfillment Systems [J]. *Operations Research Perspectives* (S2214-7160), 2019, 6: 1-15.
- [13] 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 Danlu, Sun Xiaoyong, Fu Shun, et al. Cooperative Path Planning in Multi-robots for Intelligent Warehouse[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(2): 410-418.
- [14] Roy D, NIGAM S, DE KOSTER R, et al. Robot-storage Zone Assignment Strategies in Mobile Fulfillment Systems[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (S1366-5545), 2019, 122: 119-142.
- [15] 张新艳, 邹亚圣. 基于改进A\*算法的自动导引车无碰撞路径规划[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(1): 240-246.  
Zhang Xinyan, Zou Yasheng. Collision-free Path Planning for Automated Guided Vehicles Based on Improved A\* Algorithm[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41(1): 240-246.
- [16] Dou Jiajia, Chen C hunlin, Yang Pei. Genetic Scheduling and Reinforcement Learning in Multirobot Systems for Intelligent Warehouses[M/OL]// *Mathematical Problems in Engineering*, 2015: 1-10[2021-8-10]. [https:// doi.org/ 10.1155/2015/597956](https://doi.org/10.1155/2015/597956).
- [17] Yuan Ruiping, Dong Tingting, Li Juntao. Research on the Collision-free Path Planning of Multi-AGVs System Based on Improved A\*algorithm[J]. *American Journal of Operations Research* (S2160-8849), 2016, 6(6): 442-449.