

兼顾启停特性和转角时耗的移动机器人路径规划

李逸飞, 王书亭, 熊体凡, 谢远龙, 李虎
(华中科技大学机械科学与工程学院, 430074, 武汉)

摘要: 针对传统移动机器人路径规划算法在考虑启动、制动以及转向姿态调整等实际约束的情况下, 规划结果存在机器人运行时间长、任务执行效率低且在大场景下易陷入局部拥堵甚至导致运行瘫痪等问题, 提出一种兼顾启停特性和转角时耗的移动机器人路径规划算法。对移动机器人启动、制动及运行过程进行数学建模, 分类构建栅格化 A^* 算法运动代价函数; 针对移动机器人姿态调整导致任务耗时长的问题, 结合地图二维向量坐标下方位角与位置向量分布关系, 设计转角时耗代价函数; 提出考虑信息素轨迹跟踪与启发项比例均值化的动态启发函数, 对规则路网下潜在的局部拥堵问题进行处理。仿真与实验结果表明: 所提改进 A^* 算法相较传统 A^* 算法, 机器人平均运行时间减少了 11.4%, 有效缩短了移动机器人任务运行时间; 所提算法经过启发项比例均值化调整, 在仅微量增加机器人运行时间的情况下, 使信息素矩阵标准差降低了 96.9%, 有效预防了移动机器人局部拥堵情况的发生。

关键词: 移动机器人; 启停特性; 姿态调整; A^* 算法; 路径规划

中图分类号: TK421.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302020 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0192-11

Mobile Robot Path Planning Considering Start-Stop Characteristics and Corner Time Consumption

LI Yifei, WANG Shuting, XIONG Tifan, XIE Yuanlong, LI Hu

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Considering the actual constraints of starting, braking and steering attitude adjustment, traditional mobile robot path planning is prone to problems such as prolonged robot running time, low task execution efficiency, local congestion and even operation breakdown in large scenes. To address these problems, a path planning algorithm taking into accounts both start-stop characteristics and angular time consumption is proposed for mobile robot. Firstly, mobile robot's starting, braking, and operating processes are modeled mathematically, and the rasterized motion cost function is constructed by classification. Secondly, aiming at the problem of time-consuming task caused by mobile robot attitude adjustment, the distribution relationship between azimuth angle and position vector in two-dimensional vector coordinates of the map is constructed, and the cost function at the angle is designed. In the end, a dynamic heuristic function considering pheromone trajectory tracking and heuristic term proportional averaging is proposed to solve the problem of potential local congestion in regular road network. Simulation and experi-

收稿日期: 2022-08-25。 作者简介: 李逸飞(1998—), 男, 硕士生; 谢远龙(通信作者), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105019, U21A20151); 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1708300)。

网络出版时间: 2022-11-04

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221104.1041.002.html>

mental results show that, with the improved A* algorithm, the average robot running time is reduced by 11.4% compared with the traditional A* algorithm, so that the task running time of the mobile robot is effectively shortened. In addition, the heuristic adjustment of the algorithm lowers the standard deviation of the pheromone matrix by 96.9% with only a small increase in robot running time, so that local congestion of the mobile robot can be avoided.

Keywords: mobile robot; start-stop characteristics; attitude adjustment; A* algorithm; path planning

智能移动机器人具有自动化程度高、柔性高、部署时间短等优点,可实现工厂物料及仓库货物的搬运,是智能制造车间的主要运载工具^[1-3]。对智能移动机器人系统,如何保证每台机器人高效运行以提高系统运行效率,是当前移动机器人领域的核心问题之一,而移动机器人运行路径的规划与决策是解决该问题的关键因素。

依据适用范围及算法原理,路径规划算法主要包括传统算法^[4-5]、图形搜索算法^[6]、智能仿生学算法^[7-9]以及其他算法^[10]。传统路径规划算法(如模拟退火算法、人工势场法等)具有描述简单、使用灵活、路径平滑安全等特点,但存在计算量大、收敛速度慢、随机性高等缺点^[11]。仿生学的发展促使了机器人智能仿生路径规划算法的研究,如蚁群算法、遗传算法等。这些算法易与其他算法相结合,但存在计算烦琐、运行效率不高且易于陷入局部最优等缺点^[12]。其他算法中,人工智能领域强化学习等系列算法在高随机动态障碍物环境下寻路效果好,但收敛速度慢、空间复杂度、需进行大量模型训练、应用成本过高^[13]。

相较之下,图形搜索算法因其原理简洁、实现方便等优势得到广泛应用^[14]。常见算法包括 Dijkstra 算法、A* 算法等。得益于启发式搜索的高效,A* 算法在移动机器人路径规划领域得到了众多学者的青睐^[15-17]。

总体而言,A* 算法具备较好的路径规划效果,但目前研究对移动机器人在真实场景中的运动特性及其执行时间效率的考量不够充分。河南工业大学的 Zhang 等从移动机器人的运动特性以及车辆结构角度分析了运行能耗,提出了一种基于节能优化的路径规划算法,但忽略了运动特性对移动机器人任务执行时间的影响,存在任务执行效率低等问题^[18]。北京科技大学的赵盼等在传统路径规划算法基础上引入了转角约束进行路径规划,但没有考虑转角对任务执行时间的影响^[19]。华南理工大学的袁洋等^[20]针对移动机器人在大场景下存在局部

冲突拥堵的问题,提出了结合负载均衡的路径规划算法,但缺乏对算法本身规划性能的重视。综上所述可知,移动机器人在真实运动中的加速、减速运动特性以及转角姿态调整将导致实际运行时间长、车辆能耗大,甚至导致无法完成运行任务,这是移动机器人路径规划研究的重点和难点问题之一。通过剖析不同运行情况对移动机器人任务时间规划的影响,结合车辆转角姿态调整特性建立合理且有效的转角时耗代价函数,避免局部拥堵,是解决该问题的关键之处。

为此,本文提出一种兼顾启停特性及转角时耗的最短时间移动机器人路径规划算法,以实现提高移动机器人的任务执行效率,并降低局部拥堵的发生。本文针对传统 A* 算法主要改进如下:通过分析实际移动机器人栅格化地图运行微分方程,对启动、制动过程进行数学建模,分类构建了栅格化地图运动代价函数;针对移动机器人位姿调整导致任务耗时长的问题,利用地图二维向量坐标分析,建立了方位角与位置向量分布关系,构建了转角时耗代价函数;针对多台移动机器人运行时的场景适应性问题,对非适应性局部拥堵进行算法适配性调整。通过实验验证了本文算法的有效性与优越性。

1 基于真实运动特性的改进 A* 算法

1.1 速度启停特性及转角时耗约束构建

A* 算法是一种常用于静态图的启发式直接搜索算法,其应用特点是通过启发函数来引导搜索方向,被搜索的图的权值不随时间而变化,可直接在地图中进行搜索,无需任何预处理。A* 算法的核心为其代价函数,每一次搜索都以代价函数为依据进行节点扩展,即

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

式中: $f(n)$ 为实际估计代价; $g(n)$ 为起始顶点到中间顶点 n 的实际运行代价; $h(n)$ 为中间某一顶点 n 到结束顶点的最小估计代价。

由代价函数可知,传统 A* 算法把简单的几何路径长度作为实际代价,没有考虑移动机器人的直线运动以及姿态调整情况。为此,文献 [18] 将移动机器人在栅格化地图中的运动划分为加速、匀速以及减速阶段共 3 个阶段。加/减速阶段类似,可近似为镜像关系。根据实际路段的长度差异,移动机器人在直线边上的运动可分为有无匀速阶段两种情况,如图 1 所示。当实际路段长度大于加速、减速过程所运行的总路程时,移动机器人在该路段上运行包含匀速阶段。当实际路段长度小于加速、减速过程移动机器人所运行的总路程时,由于加速时间过短,速度还没达到该路段的限速就开始减速,故不含匀速阶段。

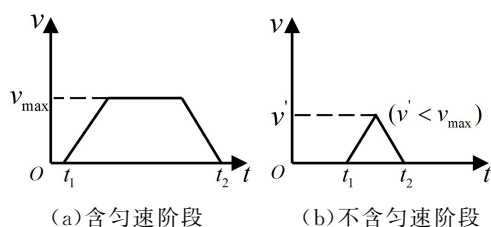


图 1 移动机器人运动阶段

Fig. 1 The moving stages of the mobile robot

移动机器人在实际运行当中,当两条路段间夹角不一致时,为继续在下一个路段直线行驶,机器人需事先调整好运动角度。然而,该过程较为耗时,并且实际运行过程中移动机器人经常发生姿态调整,故需要考虑姿态调整的时间。为此,建立二维地图向量来表征当前移动机器人在某一站点的位姿信息,如图 2 所示。在当前 0 号站点建立二维平面坐标系,连接坐标原点与各个即将可能到达的站点形成地图向量,使用各个向量与 X 轴正方向的夹角即 $\theta_1 \sim \theta_4$ 来表征当前站点可能的姿态方位角,以便进行转角姿态调整代价函数的构建。

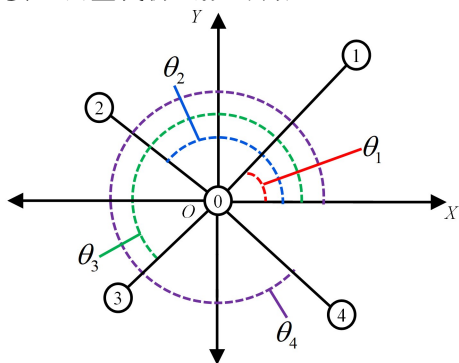


图 2 移动机器人的姿态调整方位角

Fig. 2 Attitude adjustment diagram of the mobile robot

1.2 栅格化运动代价函数构建

对于移动机器人在栅格化地图中的运动,由于启停速度特性的存在会对其通行时间产生影响,故需要对移动机器人在栅格化地图运动时的实际路程运行代价进行分析。为了使移动机器人的加速曲线均匀平滑且更贴合实际,设计递代表式来表征移动机器人启动与制动过程中的速度变化关系,具体公式为

$$v_{af} = \alpha v + (1 - \alpha) v_{\max} \quad (2)$$

式中: v_{af} 表示移动机器人在未来极短一段时间后的速度; v 表示移动机器人在当前时刻的瞬时速度; $v_{\max}$ 表示移动机器人经过当前路段的最大可通行速度; $\alpha \in [0, 1]$ 为加速系数。将该递增表达式进行连续化,得到

$$v + \Delta t \frac{dv}{dt} = \alpha v + (1 - \alpha) v_{\max} \quad (3)$$

式中 Δt 表示一段很短的时间,在这段极小的时间段内,本文认为移动机器人加速度是恒定的。

为表征移动机器人加速阶段的速度与时间关系,求解微分方程式(3)并带入初始条件,可得

$$v = v_{\max} - v_{\max} e^{-\frac{1-\alpha}{\Delta t} t} \quad (4)$$

由上式可知,该加速曲线在加速过程中速度只能逼近所设置的最大速度,而无法真正达到理论上的最大速度。而且,越靠近最大速度,曲线斜率越小,越接近匀速阶段,曲线越平滑。这贴合实际移动机器人运行情况。一般地,当 v 达到 $\lambda v_{\max}$ 时,即可视为移动机器人完成加速阶段,进入匀速阶段,表达式为

$$\lambda v_{\max} = v_{\max} - v_{\max} e^{-\frac{1-\alpha}{\Delta t} t_{acc}} \quad (5)$$

式中 t_{acc} 为完成整个加速或减速阶段所需要的加速时间,且 $0 < \lambda < 1$ 。可以看出,加速时间 t_{acc} 为一与最大速度无关的常量,表达式为

$$t_{acc} = \frac{\Delta t}{1 - \alpha} \ln \frac{1}{1 - \lambda} \quad (6)$$

根据所求出的加速时间,通过积分可得到加速或减速阶段在固定加速时间 t_{acc} 内的加速或减速路程

$$S = v_{\max} t_{acc} + \frac{\Delta t}{1 - \alpha} v_{\max} e^{\frac{1-\alpha}{\Delta t} t_{acc}} - \frac{\Delta t}{1 - \alpha} v_{\max} \quad (7)$$

式中 S 为确定最大限行速度路段的加速或减速路程。

根据实际路段边长度,分类讨论确定移动机器人在具体路段上的时间消耗。当实际路段边长度 d 大于等于加速、减速路程之和 $2S$ 时,移动机器人在

路段边上存在匀速运动阶段,且匀速运动速度为 $v_{\max}$,此时移动机器人在该边上的实际时间花费为

$$t = 2t_{\text{acc}} + \frac{d - 2S}{v_{\max}} \quad (8)$$

当实际路段边长度 d 小于加速、减速路程之和 $2S$ 时,移动机器人在路段边不存在匀速运动阶段,将 $d/2$ 代入加速距离公式中解得

$$e^{-\frac{1-g}{\Delta t}} + t - \frac{\Delta t}{1-\alpha} = \frac{d}{2v_{\max}} \quad (9)$$

由式(9)可知,单个加速或减速过程的时间消耗无法求出解析解,可使用数值分析的方法估计其数值解。将估计出的误差小于一定范围的 t 作为加速、减速时间,故无匀速运动阶段情况的实际时间花费为 $2t$ 。根据上述分析推导,得到直线运动时改进 A^* 算法两个顶点间的实际时间代价为

$$g_1(i) = \begin{cases} 2t_{\text{acc}} + \frac{d_i - 2S}{v_{\max}}, & d_i \geq 2S \\ 2t, t \in e^{-\frac{1-g}{\Delta t}} + t - \frac{\Delta t}{1-\alpha} = \frac{d_i}{2v_{\max}}, & d_i < 2S \end{cases} \quad (10)$$

1.3 姿态调整代价函数构建

车轮姿态调整代价函数的构建,关键在于计算当前顶点与待搜索顶点之间的运动方位角以及上一个当前顶点与当前顶点之间的运动方位角之差。拓扑路径图中的每个顶点都有唯一二维坐标 (x, y) ,通过计算起始点与终止点之间坐标的差值来估算两点之间的运动方位角。两顶点之间的运动方位角 θ_i 的计算表达式为

$$\theta_i = \begin{cases} \arctan \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, & x_i - x_{i-1} > 0, \\ & y_i - y_{i-1} \geq 0 \\ \pi - \arctan \frac{y_i - y_{i-1}}{|x_i - x_{i-1}|}, & x_i - x_{i-1} \leq 0, \\ & y_i - y_{i-1} > 0 \\ \pi + \arctan \frac{|y_i - y_{i-1}|}{|x_i - x_{i-1}|}, & x_i - x_{i-1} < 0, \\ & y_i - y_{i-1} \leq 0 \\ 2\pi - \arctan \frac{|y_i - y_{i-1}|}{x_i - x_{i-1}}, & x_i - x_{i-1} \geq 0, \\ & y_i - y_{i-1} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

可以看出,方位角是一个相对角度,即确定两个顶点中的某一个顶点位于坐标原点,另一个顶点位于坐标轴或 4 个象限中,该点与坐标原点的连线与 X 轴正方向的夹角为两点之间的方位角。

根据以上分析,归纳出从当前顶点到下一个当前顶点之间的车轮姿态调整实际时间代价为

$$g_2(i) = \min\{|\theta_i - \theta_{i-1}|, 2\pi - |\theta_i - \theta_{i-1}|\} / v_{\text{rotate}} \quad (12)$$

车轮旋转角度取 $|\theta_i - \theta_{i-1}|$ 与 $2\pi - |\theta_i - \theta_{i-1}|$ 间的最小值。移动机器人每次的姿态调整应该小于等于 180° 。当大于 180° 时,可以通过更换旋转方向而使调整角度小于 180° 。得到需要调整的旋转角度之后,除以车轮旋转速度,即可得到车轮姿态调整的实际时间代价。

1.4 启发项比例均值化拥塞跟踪调整

宏观基本图 (macroscopic fundamental diagram, MFD)^[21] 用于描述路网交通流宏观变量间的关系模型,能够体现一定区域内车辆流出量和车辆累积数量的关系,如图 3 所示。

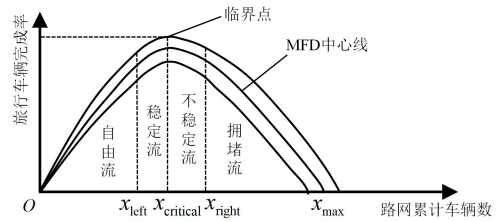


图 3 宏观基本图

Fig. 3 Macroscopic fundamental diagram

宏观基本图形状类似于抛物线,当区域车辆累计数达到临界点后,局部路网中的交通流由稳定流变为不稳定流,此时随着累计车辆数的增加,车辆流出率逐渐下降,当累计车辆数达到某一最大值后,道路进入完全拥堵状态,此时无车辆流出。在此基础上的研究表明,产生局部拥堵的最大原因是路网交通流的不均匀分布,即某些路段处于饱和状态而其他有些路段处于车流稀疏的状态^[22]。因此,避免单个顶点附近产生过大非均衡的车流量是解决拥堵问题的关键。

针对以上改进存在潜在的大场景适应性不足、易发生局部拥堵等问题,本文提出算法启发项比例均值化拥塞跟踪调整。具体地,当移动机器人规划出的路径每经过一个顶点,便令该顶点的相应标记数值加 1,类似蚂蚁觅食时会在觅食路径上留下信息素,来通知其他蚂蚁能更快地找到食物。这样,在多台移动机器人进行路径规划后,通过统计在路径图上所留下的信息素,形成信息素矩阵,来定量表示路径图局部区域的移动机器人拥堵情况,当某个顶点信息素浓度过高,说明该顶点附近发生拥堵的概率更大。

传统 A^* 算法启发项 $h(n)$ 表示其在搜索路径时的方向导航指引,故在此基础上考虑信息素浓度对寻路方向的影响,并对启发项进行相应修改,适应性

调整后的改进 A* 算法启发函数为

$$h(n) = h_1(n) + h_2(n) \quad (13)$$

$h_1(n)$ 表示传统算法的路径搜索方向指引, 其值为两个欧氏距离的比值, 分子为当前顶点到终止顶点的欧氏距离, 分母为起始顶点到终止顶点的欧氏距离, $h_1(n)$ 表达式为

$$h_1(n) = \frac{\sqrt{(x_e - x_n)^2 + (y_e - y_n)^2}}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2}} \quad (14)$$

$h_2(n)$ 表示当前待搜索顶点的信息素浓度 p_n 与其周围邻近 9 个顶点信息素浓度 p_i 的平均值的比值, 为当前顶点周围局部拥堵情况的反馈指引, $h_2(n)$ 表达式为

$$h_2(n) = \frac{p_n}{\left(\sum_{i=1}^9 p_i\right)/9} \quad (15)$$

因算法代价函数的核心实际代价在于 g 的计算, h 在算法中作为启发项主要进行搜索方向导航, 故本文将 $h_1(n)$ 与 $h_2(n)$ 都实现为比重的形式, 令其在 1 附近小范围波动。这样可以避免随着搜索次数的增加, 代价函数中 h 过大, 从而导致 g 值搜索失效, 大幅增加移动机器人运行时间。

1.5 改进 A* 算法流程

根据以上分析计算, 可归纳整理出改进 A* 算法对于搜索中间某个待搜索顶点 n 的实际估计代价函数, 表达式为

$$f(n) = h_1(n) + h_2(n) + \sum_{i=1}^n (g_1(i) + g_2(i)) \quad (16)$$

式(16)具体含义是从规划起点经由中间某一顶点 n 到达终止顶点的最小实际估计代价。其中, 实际代价由启停时间代价与转角时间代价组成, 估计代价为算法启发项, 由路径搜索方向指引项与局部拥堵情况反馈指引项组成。

改进 A* 算法总体流程如图 4 左半部分所示, 图中 openList 与 closeList 为两个点集, 前者表示待搜索顶点的集合, 后者表示已搜索顶点的集合, 每一个顶点都维护了一个 parent 指针表示该顶点的前驱路径点。算法每循环一次, 会从 openList 中选出代价函数值最小的顶点作为当前点 curPoint, 并根据当前顶点 curPoint 以及具体路径图获取当前点临近可到达顶点的点集 sPoints。sPoints 中的每一个点都是当前顶点可能到达的待搜索节点 target, 根据 target 是否已经在 openList 中, 算法会有不同的处理流程。若 target 不在 openList 中, 则其没有被搜索过, 直接计算代价函数值即可; 否则, 到达 target 存在多条可能路径, 需要比较 g 来进行取舍。最后, 通过判断目标顶点 endNode 是否在 closeList 中来选择是否继续循环或者结束算法。

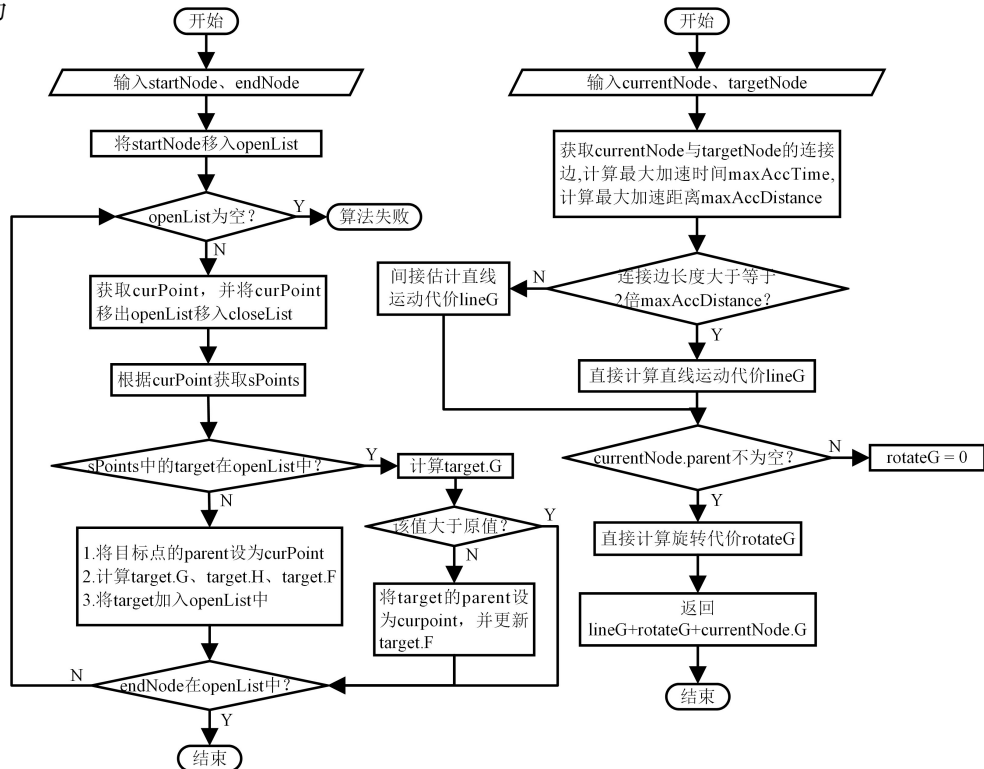


图4 改进的 A* 算法流程

Fig. 4 The process of improved A* algorithm

改进 A* 算法的 g 计算流程如图 4 右半部分所示。在计算旋转实际时间代价 rotateG 时,首先需要判断当前顶点 $\text{currentNode.parent}$ 是否为空,即判断 currentNode 是否为起始点,若不是起始点则需计算 rotateG ,否则 rotateG 为 0。最后,将 3 部分 g 加起来作为 targetNode 的总 g 返回。

2 实验验证

2.1 改进 A* 算法最优时间搜索验证

为了保证仿真实验模拟的随机性,在 x - y 平面上随机生成了 40 个顶点与相应的边,组成测试用拓扑路径图,设置移动机器人在各边上所允许通行的最大速度为 0.5 m/s,所生成的拓扑路径图如图 5 所示。图中,顶点 1 位于 x - y 平面坐标原点,各路径边的长度均有标注。

2.1.1 改进 A* 算法单次最短时间规划验证

在图 5 所示的路径图中,以 7 号顶点作为规划起始顶点、37 号顶点作为规划终点,分别使用传统 A* 算法与改进 A* 算法进行路径规划,所得到的路由选择结果如图 5 所示。可以看出,传统 A* 算法与改进 A* 算法路径选择差异明显。

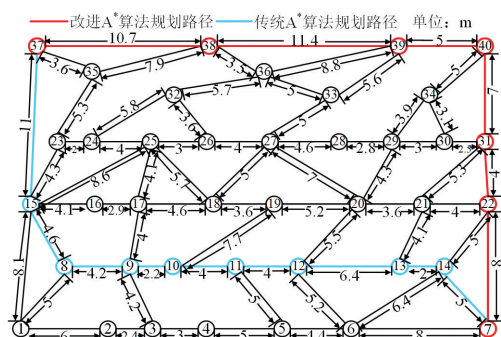


图 5 测试用拓扑路径及单次规划路径选择结果

Fig. 5 The topology path for test and the result of single path planning

表 1 为两种算法单次规划结果的对比。可以看出,传统 A* 算法选择了 7 号顶点到 37 号顶点的几何最短路径,但该路径的移动机器人实际运行时间却比改进 A* 算法所选路径长。改进 A* 算法所选路径几何长度虽大于传统 A* 算法,但其路径的顶点密度较小,即触发移动机器人启停次数较少,移动机器人多数时间处于匀速运动状态,路径耗时短,且该路

径移动机器人需要进行车轮方位调节的次数也较少,故最终移动机器人的实际运行时间明显短于传统 A* 算法所规划路径。

表 1 算法单次规划结果对比

Table 1 Comparison of algorithm single planning results

算法	路径	路径总长/m	时间/s
传统 A*	7—14—13—12—11—	43.4	114
	10—9—8—15—37		
改进 A*	7—22—31—40—	46.1	109
	39—38—37		

2.1.2 改进 A* 算法多次最短时间规划验证

在图 5 所示的路径图中,分别使用传统 A* 算法与改进 A* 算法进行 10、20、……、100 次路径规划。为了增加规划的真实性与随机性,每次规划在路径图上下左右 4 条出入边上选择任意顶点作为起始顶点,并在剩余 3 条出入边上随机选择任意顶点作为终止点。移动机器人总体运行时间如图 6 所示。可以看出,传统 A* 算法折线在改进 A* 算法折线上方,改进 A* 算法的移动机器人实际运行时间短于传统 A* 算法。

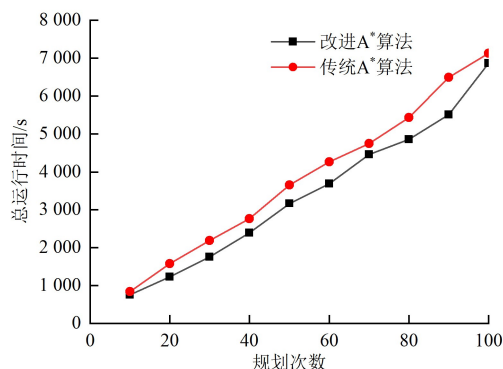


图 6 多次规划时移动机器人的总运行时间

Fig. 6 The overall running time of mobile robot multiple path planning

表 2 为两种算法多次规划结果的对比。可以看出,对于不同规划次数,改进 A* 算法移动机器人运行时间较传统 A* 算法都有明显减少。传统 A* 算法的总计单次平均运行时间为 71.1 s,改进 A* 算法为 63.0 s,缩短了 11.4%。说明改进 A* 算法规划出的路径对移动机器人整体运行效率有很大程度的改善。

表 2 算法多次规划结果对比

Table 2 Comparison of algorithm multiple planning results

规划次数	算法	总运行时间/s	单次运行平均时间/s	改进后运行时间减少比例/%
10	传统 A*	839	83.9	9.9
	改进 A*	756	75.6	
20	传统 A*	1 574	78.7	22.0
	改进 A*	1 228	61.4	
30	传统 A*	2 182	72.7	19.7
	改进 A*	1 751	58.4	
40	传统 A*	2 760	69.0	13.5
	改进 A*	2 388	59.7	
50	传统 A*	3 654	73.1	13.4
	改进 A*	3 167	63.3	
60	传统 A*	4 268	71.1	13.5
	改进 A*	3 693	61.5	
70	传统 A*	4 746	67.8	6.0
	改进 A*	4 463	63.7	
80	传统 A*	5 438	70.0	13.3
	改进 A*	4 858	60.7	
90	传统 A*	6 492	72.1	15.0
	改进 A*	5 514	61.3	
100	传统 A*	7 131	71.3	3.8
	改进 A*	6 862	68.6	
总计	传统 A*	39 083	71.1	11.4
	改进 A*	34 677	63.0	

2.2 改进 A* 算法拥塞适应性验证

图 7 为双向多入多出路网模型^[23],其中路网出入端共包含 10 个顶点,且每条路径边长度相等。令起点为地图左上角顶点,终点为地图右下角顶点,分别使用传统 A* 算法与启发项比例均值化调整前的改进 A* 算法进行路径规划,结果如图 7 所示。

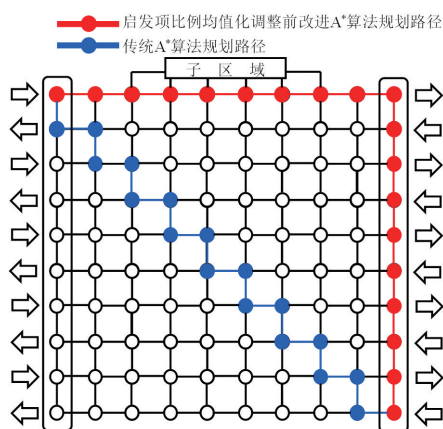


图 7 双向多入多出路网及单次规划结果

Fig. 7 Two-way MIMO network and the result of single path planning

由图 7 可知,在单次路径规划中,传统 A* 算法由其代价函数启发项的指引,规划路径为图中蓝色路径,而启发项比例均值化调整前的改进 A* 算法为了减少路程中移动机器人姿态调整的次数、降低移动机器人运行时间,选择了红色路径。但是,对于大型智能制造车间系统,如果每台移动机器人使用启发项调整前的改进 A* 算法进行路径规划,将导致单台车辆的规划路径单一性严重,继而增大局部路网发生区域拥堵的风险,严重时甚至会导致移动机器人运行系统瘫痪^[24]。启发项比例均值化调整前的改进 A* 算法在规划时,尽量将行径路线调整为直线来减少时间消耗,会选择在路网出口边上进行大量的移动,这势必会造成路网出口边处移动机器人流量过大,从而导致拥堵。

随机生成出入口是评价路网宏观效率以及安全性中常用的方法^[25]。使用图 7 所示的双向多入多出路网,进行改进 A* 算法启发项比例均值调整前与调整后的仿真实验比较。设置路径图中每条边的长度为 2 m,且各边所允许通行的最大速度为 1 m/s。仿真实验步骤如下:

- (1)初始化,总任务数量为 5 000,信息素矩阵为全 0 矩阵,累计任务执行次数 $i=0$;
- (2)在路网左右两侧随机生成任务起始位置;
- (3)根据起始侧,在对侧随机生成任务终止位置;
- (4)根据起始位置与终止位置进行单移动机器人路径规划;
- (5)规划结束后更新信息素矩阵,任务执行次数 i 加 1,返回步骤(2),直到任务执行次数达到总任务数量后终止实验。

当所有移动机器人完成了路径规划后,根据信息素矩阵的元素分布来观察拥塞分布的规律。传统 A* 算法实验测试结果如图 8 所示,改进 A* 算法启发项比例均值化调整前实验结果如图 9 所示。

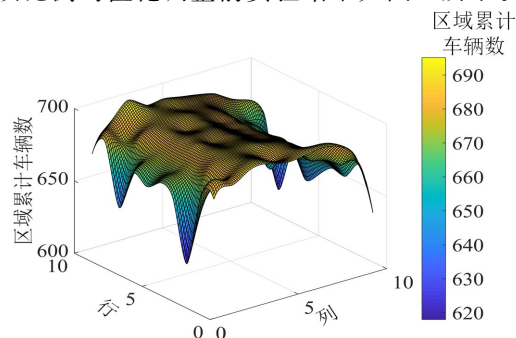


图 8 传统 A* 算法路网交通载荷量分布

Fig. 8 Traditional A* algorithm traffic load distribution map

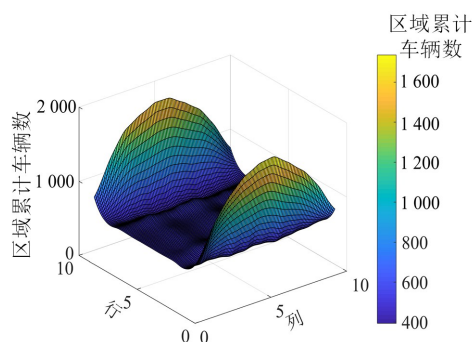


图9 改进A*算法启发项比例均值化调整前路网交通载荷量分布

Fig. 9 The traffic load distribution map of the road network before the heuristic proportion averaging adjustment of the improved A* algorithm

由图8、图9可以看出,为尽可能减少移动机器人方位调整的次数、减少运行时间,改进A*算法在启发项比例均值化调整前相较于传统A*算法,在任务起始位置与终止位置边进行大量的纵向移动,导致任务发生与结束侧附近交通载荷量远高于其他区域,整体图像曲面在两侧凸起严重,类似马鞍状分布。由于交通载荷量高的区域发生局部堵塞的概率更高,故该情况会在出入口处造成移动机器人阻塞等待,严重影响机器人系统的运行效率。

改进A*算法启发项调整后,实验测试结果如图10所示。

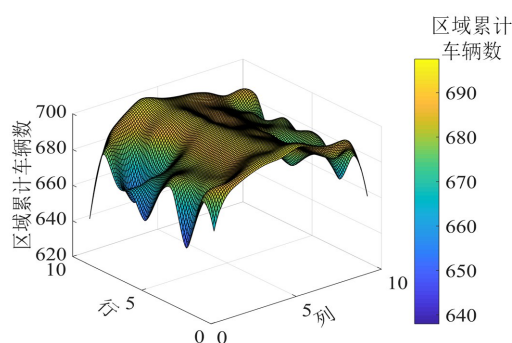


图10 改进A*算法启发项比例均值化调整后路网交通载荷量分布

Fig. 10 The traffic load distribution map of the road network after the heuristic proportion averaging adjustment of the improved A* algorithm

由图10可看出,改进A*算法在启发项调整后,交通载荷量曲面分布明显平缓,说明算法在调整后所规划路线较为均匀,降低了移动机器人发生局部

拥堵的概率。传统A*算法、改进A*算法启发项比例均值化调整前后移动机器人的运行结果对比如表3所示。

表3 传统A*算法、改进A*算法启发项比例均值化调整前后移动机器人运行结果的对比

Table 3 Comparison of the running results of mobile robot before and after the improved A* algorithm heuristic item proportion averaging adjustment and the traditional A* algorithm

算法	信息素矩阵 标准差	单次平均 运行时间/s
传统A*算法	15.6	63.7
改进A*算法启发项 比例均值化调整前	361.2	49.7
改进A*算法启发项 比例均值化调整后	11.3	52.2

由表3可知,在改进A*算法启发项比例均值化调整后,信息素矩阵元素标准差下降了96.9%,且低于传统A*算法,故算法对局部堵塞情况控制较好,大幅提升了场景适应性。在改进A*算法启发项比例均值化调整后,单次平均运行时间增加了4.9%,增量微小,远少于传统A*算法,改进算法的最优时间搜索性能得到了保障。综上所述可知,改进A*算法引入启发项比例均值化调整后,在保证原算法最优时间搜索效果的情况下,能够有效降低路网局部堵塞情况的发生概率。

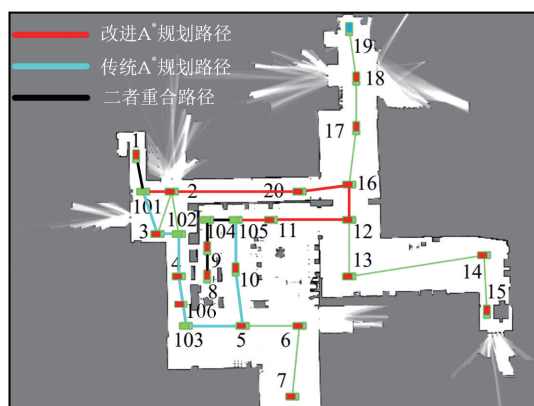
进一步地,以华中科技大学工程实训中心教学车间为实验环境,选用无轨自动导引运输车(AGV)进行智能移动机器人路径规划真实场景测试。本文实验使用的无轨AGV主要任务是从起始点到终止点进行移动,从而完成物料的搬运、CNC机床的上下料等工作,无轨AGV如图11所示。



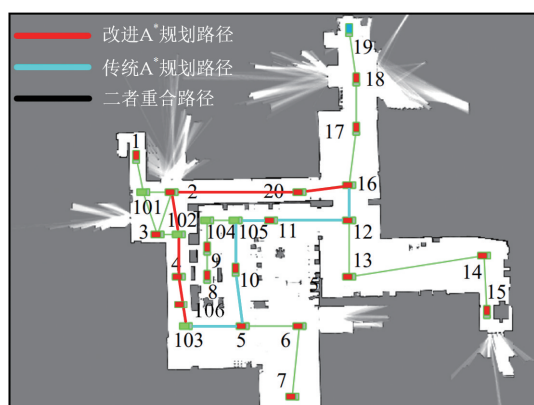
图11 真实测试场景中的无轨AGV

Fig. 11 Trackless AGV in real test scenarios

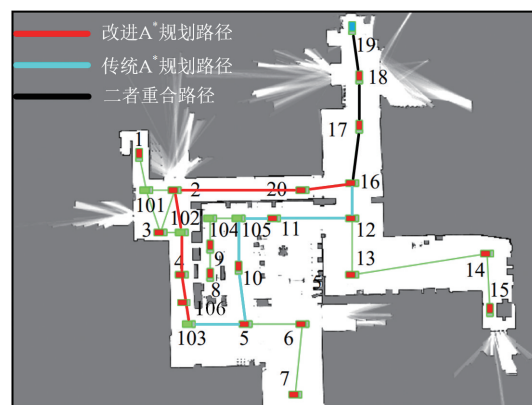
在实际场景中建图、确认站点后,以实际站点、路径边等地图信息为输入条件,在无轨 AGV 软件系统的路径规划模块下,调用不同的路径规划算法,完成算法在真实场景下的测试。一共进行了 4 组路径规划测试:实验 1 起点为 1 号、终点为 8 号;实验 2 起点为 16 号、终点为 103 号;实验 3 起点为 103 号、终点为 19 号;实验 4 起点为 15 号、终点为 106 号。实验结果如图 12 所示。



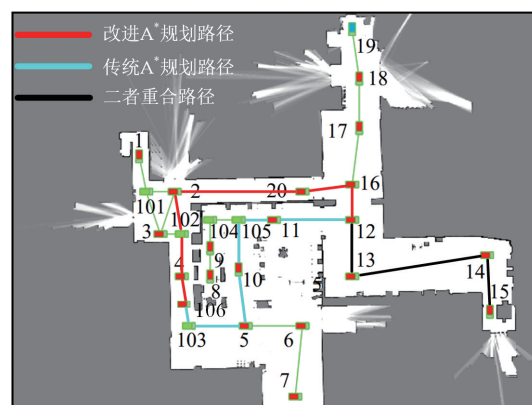
(a) 实验 1



(b) 实验 2



(c) 实验 3



(d) 实验 4

图 12 真实场景测试结果

Fig. 12 Real scene test results

表 4 为 4 组规划实验所规划的路径长度与无轨 AGV 运行时间的对比。可以看出,虽然传统 A* 算法所选路径几何距离较短,但改进 A* 算法所规划的路径实际运行时间更短、效率更高。本文基于改进 A* 算法且兼顾启停特性和转角时耗的移动机器人路径规划算法的有效性得到了验证。

表 4 真实场景测试结果的对比

Table 4 Comparison of real scene test results

实验编号	算法	规划路径	路径长度/m	运行时间/s
1	传统 A*	1—101—3—102—4—106—103—5—10—105—104—9—8	38.1	73.9
	改进 A*	1—101—2—20—16—12—11—105—104—9—8	43.3	65.8
2	传统 A*	16—12—11—105—10—5—103	28.4	48.2
	改进 A*	16—20—2—102—4—106—103	30.2	39.8
3	传统 A*	103—5—10—105—11—12—16—17—18—19	43.9	66.1
	改进 A*	103—106—4—102—2—20—16—17—18—19	45.7	61.1
4	传统 A*	15—14—13—12—11—105—10—5—103—106	50.3	87.8
	改进 A*	15—14—13—12—16—20—2—102—4—106	54.3	82.4

3 结 论

本文针对移动机器人在真实路段上运行时存在的启动、制动过程以及转向方位调整等影响实际运行时间的问题,提出了考虑移动机器人启停速度特性及转角时耗的改进A*算法。该算法通过将移动机器人启停速度变化情况以及转向方位调整时长转化为A*算法代价函数的实际代价来进行路由选择。实验结果表明,所提算法在实际移动机器人路径规划中能显著降低运行时间,大大提升了移动机器人的任务执行效率。在此基础上,分析了启发项均值比例调整前改进A*算法在双向多人多出路网模型下潜在的局部拥堵不适应性,并通过改进A*算法进行启发项比例均值化拥塞跟踪调整,在保证移动机器人单次平均运行时间仅微量增加,即保证启停特性与转角时耗最优时间搜索效果的前提下,有效降低了局部拥堵发生的概率,大大提升了移动机器人系统的运行效率。

参考文献:

- [1] 姚锡凡, 马南峰, 张存吉, 等. 以人为本的智能制造: 演进与展望 [J/OL]. 机械工程学报 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220811.1509.004.html>.
YAO Xifan, MA Nanfeng, ZHANG Cunji, et al. Human-centered intelligent manufacturing: evolution and prospects [J]. Journal of Mechanical Engineering [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220811.1509.004.html>.
- [2] 武星, 翟晶晶, 楼佩煌, 等. 考虑任务行程时间的多载量自动导引车系统防死锁任务调度 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(23): 2840-2849.
WU Xing, ZHAI Jingjing, LOU Peihuang, et al. Deadlock-free task scheduling with task traveling time for a multi-load AGV system [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23): 2840-2849.
- [3] 周亚勤, 汪俊亮, 吕志军, 等. 密集仓储环境下多AGV/RGV调度方法研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 245-256.
ZHOU Yaqin, WANG Junliang, LÜ Zhijun, et al. Research on multi-AGV/RGV scheduling method in intensive storage environment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 245-256.
- [4] ZHANG Ruijin, YANG Zhiyong, JIANG Shan, et al. An inverse planning simulated annealing algorithm with adaptive weight adjustment for LDR pancreatic brachytherapy [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2022, 17(3): 601-608.
- [5] ROSTAMI S M H, SANGAIAH A K, WANG Jin, et al. Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 70.
- [6] 王硕, 段蓉凯, 廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 1-8.
WANG Shuo, DUAN Rongkai, LIAO Yuhe. Research on improvement of rapidly exploring random tree algorithm in robot path planning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 1-8.
- [7] HAMZHEEI M, FARAHANI R Z, RASHIDI-BAJGAN H. An ant colony-based algorithm for finding the shortest bidirectional path for automated guided vehicles in a block layout [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1): 399-409.
- [8] ZACHARIA P T, XIDIAS E K. AGV routing and motion planning in a flexible manufacturing system using a fuzzy-based genetic algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(7): 1801-1813.
- [9] 刘志强, 何丽, 袁亮, 等. 采用改进灰狼算法的移动机器人路径规划 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 49-60.
LIU Zhiqiang, HE Li, YUAN Liang, et al. Path planning of mobile robot based on TGWO algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 49-60.
- [10] GUO Xiaowei, PENG Gongzhuang, MENG Yingying. A modified Q-learning algorithm for robot path planning in a digital twin assembly system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(5): 3951-3961.
- [11] LIU Ye, DU Yanping, DOU Shuihai, et al. Research summary of intelligent optimization algorithm for warehouse AGV path planning [C]//LISS 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 96-110.
- [12] 梁军, 韩冬冬, 盘朝奉, 等. 基于移动机器人的智能车库关键技术综述 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 1-20.
LIANG Jun, HAN Dongdong, PAN Chaofeng, et al. Review on critical technologies of robot-based intelligent garages [J]. Journal of Mechanical Engineering,

- 2022, 58(3): 1-20.
- [13] 唐恒亮, 唐滋芳, 董晨刚, 等. 基于启发式强化学习的 AGV 路径规划 [J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(8): 895-903.
TANG Hengliang, TANG Zifang, DONG Chengang, et al. AGV path planning based on heuristic reinforcement learning [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(8): 895-903.
- [14] 王洪斌, 郝策, 张平, 等. 基于 A* 算法和人工势场法的移动机器人路径规划 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2489-2496.
WANG Hongbin, HAO Ce, ZHANG Ping, et al. Path planning of mobile robots based on A* algorithm and artificial potential field algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2489-2496.
- [15] 赵晓, 王铮, 黄程侃, 等. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划 [J]. 机器人, 2018, 40(6): 903-910.
ZHAO Xiao, WANG Zheng, HUANG Chengkan, et al. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Robot, 2018, 40(6): 903-910.
- [16] 王洪斌, 尹鹏衡, 郑维, 等. 基于改进的 A* 算法与动态窗口法的移动机器人路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42(3): 346-353.
WANG Hongbin, YIN Pengheng, ZHENG Wei, et al. Mobile robot path planning based on improved A* algorithm and dynamic window method [J]. Robot, 2020, 42(3): 346-353.
- [17] CHEN Jiaying, LUO Yi. Dynamic path planning for mobile robots based on the improved A-star algorithm [J]. Academic Journal of Computing & Information Science, 2021, 4(8): 73-77.
- [18] ZHANG Zhongwei, WU Lihui, ZHANG Wenqiang, et al. Energy-efficient path planning for a single-load automated guided vehicle in a manufacturing workshop [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 107397.
- [19] 赵盼, 杜兆才, 刘江, 等. 基于改进 RRT* 算法的超冗余度机器人末端避障路径规划 [J/OL]. 航空制造技术 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20220305.1157.002.html>.
ZHAO Pan, DU Zhao Cai, LIU Jiang, et al. Obstacle avoidance path planning at end of super redundant robot based on improved RRT* algorithm [J/OL]. Aeronautical Manufacturing Technology [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20220305.1157.002.html>.
- [20] 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 Yizong, et al. Multi-AGV path planning combined with load balancing and A* algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(5): 251-256.
- [21] 丁恒, 郭放, 蒋程镔, 等. 多个 MFD 子区边界协调控制方法 [J]. 自动化学报, 2017, 43(4): 548-559.
DING Heng, GUO Fang, JIANG Chengbin, et al. Coordinated method of perimeter control for multiple MFD sub-regions [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(4): 548-559.
- [22] 朱海峰, 刘畅, 温熙华, 等. 均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 816-824.
ZHU Haifeng, LIU Chang, WEN Xihua, et al. Traffic bottleneck control with flow equilibrium and saturation equilibrium [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(5): 816-824.
- [23] 杨智飞, 苏春, 胡祥涛, 等. 面向智能生产车间的多 AGV 系统多目标调度优化 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1033-1040.
YANG Zhifei, SU Chun, HU Xiangtao, et al. Multi-objective scheduling optimization for multi-AGV systems of intelligent jobshop [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 1033-1040.
- [24] 余娜娜, 李铁克, 王柏琳. 自动化分拣仓库中多 AGV 在线协同调度算法 [J/OL]. 计算机集成制造系统 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211112.1616.016.html>.
YU Nana, LI Tiek, WANG Bailin. Multi-AGV online collaborative scheduling algorithm in automated sorting warehouse [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211112.1616.016.html>.
- [25] MA Zian, XIE Jianbo, QI Xiao, et al. Two-dimensional simulation of turning behavior in potential conflict area of mixed-flow intersections [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(5): 412-428.

(编辑 陶晴 刘杨)