

9-15-2024

## Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach

Peng Ji

*School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China*

Xinyuan Zhang

*School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China*

Shuaixuan Gao

*Beijing U-Precision Tech Co., Ltd., Beijing 100176, China*

Shuorang Wei

*Jikai(Hebei) Mechatronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, 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. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

## Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach

### Abstract

**Abstract:** In response to the low efficiency, redundant turning points, and collision issues of the traditional A\* algorithm, a smart vehicle path planning algorithm that integrates an improved A\* algorithm with a dynamic window approach has been proposed. The algorithm has enhanced the search point selection method, optimized the evaluation function, selected key turning points based on the slope values between turning points, and removed redundant turning points. Between every two optimized key turning points, a dynamic window approach that balances speed and safety is used for local obstacle avoidance. Experiments show that compared to the traditional A\* algorithm, this algorithm has increased retrieval speed by 45%, reduced turning points by 91%, and improved path smoothness. The integrated algorithm can achieve local optimality while ensuring global path optimality and can achieve real-time obstacle avoidance.

### Keywords

optimization A\* algorithm, optimizing dynamic window approach, fusion algorithms, path planning, real time obstacle avoidance

### Recommended Citation

Ji Peng, Zhang Xinyuan, Gao Shuaixuan, et al. Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2171-2180.

## 融合改进A\*算法与动态窗口法的路径规划研究

姬鹏<sup>1</sup>, 张新元<sup>1\*</sup>, 高帅轩<sup>2</sup>, 魏铄让<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 北京华卓精科科技股份有限公司, 北京 100176;  
3. 冀凯(河北)机电科技有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 针对传统A\*算法搜索效率较低、拐点冗余和易碰撞等问题, 提出了一种融合改进A\*算法与动态窗口法的智能车辆路径规划算法。改进了搜索点筛选方法, 优化了评价函数, 根据拐点间的斜率值筛选出关键拐点, 并去除冗余拐点。在优化后的每两个关键拐点间采用兼备速度与安全的优化动态窗口法进行局部避障。实验表明: 该算法相较传统A\*算法在检索速度上提升了45%, 拐点数量减少了91%, 提高了路径平滑度。融合后的算法能在确保全局路径最优的情况下达到局部最优, 可以实现实时避障。

**关键词:** 优化A\*算法; 优化动态窗口法; 融合算法; 路径规划; 实时避障

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)09-2171-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0619

**引用格式:** 姬鹏, 张新元, 高帅轩, 等. 融合改进A\*算法与动态窗口法的路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2171-2180.

**Reference format:** Ji Peng, Zhang Xinyuan, Gao Shuaixuan, et al. Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2171-2180.

### Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach

Ji Peng<sup>1</sup>, Zhang Xinyuan<sup>1\*</sup>, Gao Shuaixuan<sup>2</sup>, Wei Shuorang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
2. Beijing U-Precision Tech Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. Jikai(Hebei) Mechatronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In response to the low efficiency, redundant turning points, and collision issues of the traditional A\* algorithm, a smart vehicle path planning algorithm that integrates an improved A\* algorithm with a dynamic window approach has been proposed. *The algorithm has enhanced the search point selection method, optimized the evaluation function, selected key turning points based on the slope values between turning points, and removed redundant turning points. Between every two optimized key turning points, a dynamic window approach that balances speed and safety is used for local obstacle avoidance.* Experiments show that compared to the traditional A\* algorithm, this algorithm has increased retrieval speed by 45%, reduced turning points by 91%, and improved path smoothness. The integrated algorithm can achieve local optimality while ensuring global path optimality and can achieve real-time obstacle avoidance.

**Keywords:** optimization A\* algorithm; optimizing dynamic window approach; fusion algorithms; path planning; real time obstacle avoidance

收稿日期: 2023-05-24

修回日期: 2023-07-21

基金项目: 河北省引进留学人员(CL201704); 河北省高等学校科学技术研究(ZD2019023)

第一作者: 姬鹏(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向为车辆系统动力学建模及仿真控制。

通讯作者: 张新元(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为移动机器人SLAM建图与规划。

## 0 引言

路径规划是智能车导航的核心技术<sup>[1]</sup>，实际复杂多变的交通环境下，智能车的前进道路上会随机出现车辆、行人等障碍物的干扰，易导致碰撞。因此，需要一种能兼顾全局最优规划路径与局部随机避障路径的算法<sup>[2-3]</sup>。

A\*算法是一种较经典的启发式搜索算法，在进行全局路径规划时被广泛应用<sup>[4]</sup>。该算法的特点是判断最优路径的节点时考虑了全局信息，但没有考虑车辆的运动约束，所以，规划出的行驶路线不平滑，易产生突变<sup>[5-6]</sup>。动态窗口法(dynamic window approach, DWA)是一种较常用的局部路径规划算法<sup>[7]</sup>，可根据传感器感知的环境信息实时避障，通过对速度空间施加约束以确保动力学模型和避障的要求，在速度空间中搜索智能车最优控制速度，快速安全地到达目的地<sup>[8]</sup>。王志中<sup>[9]</sup>将A\*与人工势场法相结合，在复杂场景下实现了避障，但人工势场法所规划的路线曲率不平滑。王凡等<sup>[10]</sup>将A\*与DWA结合，规划路径平滑且具备避障的功能，但利用A\*算法进行全局规划时，搜索效率较低，实时性较差。徐玉琼等<sup>[11]</sup>采用蚁群路径规划算法，按照求解情况对信息素进行自适应更新，在存在多种步长的情况下挑选出最优步长，使全局搜索效率得到较大提升，但A\*以及传统蚁群算法只能在静态环境下进行路径规划<sup>[12-13]</sup>，无法在未知环境下规避动态避障。

本文提出一种改进A\*与DWA融合的路径规划算法，经优化后的A\*算法规划出最优全局行进轨迹后，在每相邻的两节点间采用改进的局部路径规划算法，智能车在预规划的最优轨迹上出现动、静态障碍物时，可以规避障碍物并重回全局最优路径，既保证了车辆的安全性，又保证了全局轨迹最优。

## 1 优化A\*算法

### 1.1 优化启发函数

传统A\*算法基于代价函数在地图中进行全局搜索规划出最优路径：

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

式中： $f(n)$ 为初始状态由状态 $n$ 到目标状态的估计代价； $g(n)$ 为状态空间中从初始状态到状态 $n$ 的实际代价； $h(n)$ 为状态 $n$ 到目标状态的最佳估计代价。

$h(n)$ 的选取是规划最优路径的关键，若 $h(n) < g(n)$ 会导致关键拐点数量较少，难以规划出最优路线<sup>[14]</sup>；若 $h(n) > g(n)$ 则关键拐点较多会导致计算资源浪费。针对上述算法不足对代价函数进行优化，在初期增加 $h(n)$ 值，提高搜索速度，当目前节点位置接近终点时， $g(n)$ 与 $h(n)$ 大小接近，达到最优执行效率。当障碍物数量占比较多时，动态减小搜索速度，增加关键拐点数目，提高安全性能。因此，改进后的启发函数为

$$f(n) = g(n) + (1 + d/D + \lg(1 - p))h(n) \quad (2)$$

式中： $d$ 为当前时刻所在节点 $n$ 与终点的距离； $D$ 为起点到终点的距离； $p$ 为环境中障碍率。

### 1.2 提高搜索效率

A\*算法在进行节点搜索时会扩展以当前节点为中心的相邻8个栅格<sup>[15]</sup>，如图1所示， $n_1 \sim n_8$ 为当前节点可探索的所有方向，因目标点方位已确定，存在较多可探索方向造成了算法运算资源的浪费。因此，本文根据已确定目标点的大致方位，只使用其中5个方向。假设目标点与当前节点的连线与 $n_2$ 指示方向的夹角度数为 $\theta$ ，则保留与舍弃方向的规则如表1所示。

### 1.3 节点优化

传统A\*算法规划出的路径含有较多冗余节点，导致机器人行驶路径不连续且耗时较长<sup>[16]</sup>。本文将传统A\*算法规划的路径中重要的节点予以



保留, 将多余节点去除, 减少了路径长度, 节点去除原理如图 2 所示。

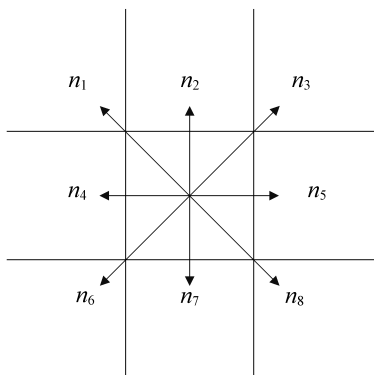


图 1 节点移动方向  
Fig. 1 Node moving direction

表 1 节点方向舍弃对应表

Table 1 Corresponding table of node direction discards

$\theta$	保留的 5 个方向	去除的 3 个方向
$[330^\circ, 360^\circ) \cup [0^\circ, 30^\circ)$	$n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$	$n_6, n_7, n_8$
$[30^\circ, 90^\circ)$	$n_1, n_2, n_3, n_5, n_8$	$n_4, n_6, n_7$
$[90^\circ, 150^\circ)$	$n_3, n_5, n_6, n_7, n_8$	$n_1, n_2, n_4$
$[150^\circ, 210^\circ)$	$n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$	$n_1, n_2, n_3$
$[210^\circ, 270^\circ)$	$n_1, n_4, n_6, n_7, n_8$	$n_2, n_3, n_5$
$[270^\circ, 330^\circ)$	$n_1, n_2, n_3, n_4, n_6$	$n_5, n_7, n_8$

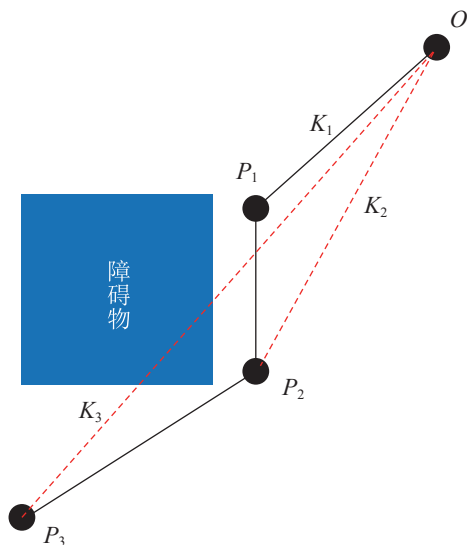


图 2 冗余节点去除  
Fig. 2 Removing redundant nodes

冗余节点去除步骤如下。

step 1: A\* 算法规划出的路径节点记作  $P_i, i=1, 2, \dots, P_0$  为初始点,  $P_n$  为目标点,  $T$  为关键节点集。

step 2: 分别计算起始点  $P_0$  与  $P_i$  点的斜率值  $K_i$ 。

step 3: 若  $K_{i+1}=K_i, P_0, P_i, P_{i+1}$  三点共线, 则去除  $P_i$ , 计算  $K_{i+2}$ ; 若  $K_{i+2}=K_i$ , 去除节点  $K_{i+1}$ , 计算  $K_{i+3}$ 。

step 4: 若存在  $K_{i+j} \neq K_i, P_0$  与  $P_{i+j}$  连线穿过障碍物, 那么  $P_{i+j-1}$  为必要拐点并放于集合  $T$  中, 将  $P_{i+j}$  设置为新的初始点  $P_0^{new}$ ,  $P_{i+j+1}$  设置为  $P_i$ , 循环 step 2~4, 直至终点; 若  $P_0$  与  $P_{i+j}$  相连未穿过障碍物, 去除节点  $P_{i+j}$ , 继续进行 step 3 计算  $K_{i+j+1}$ 。

step 5: 集合  $T$  中所有关键点按顺序依次连接即为去除冗余点后的全局最优路径。

为验证优化 A\* 算法全局路径规划效果, 在 MATLAB 中建立栅格地图作为仿真环境地图进行实验, 其中黑色格子为障碍物, 白色区域为可通行区域<sup>[17]</sup>。对传统 A\* 算法和优化后的 A\* 算法进行了仿真对比实验, 如图 3 所示, 算法改进前后性能如表 2 所示。

通过表 2 可以看出, 优化后的路径较传统算法规划出的路径长度缩短了 3.65%, 搜索时间缩短了 45%, 节点数量明显减少且无冗余节点, 但规划后的路径无法在突变情况下实现动态避障, 因此, 融合优化后的动态窗口法十分必要。

## 2 优化动态窗口法

DWA 算法在控制空间中多次采样获得多组速度信息, 根据每次采样的速度向量, 模拟智能车在这种车速下对其前进一个或多个采样时间段的路径进行预测, 并对所有前进预测路径分析评分, 从而选取最优轨迹<sup>[18-19]</sup>。由于智能车所处未知环境复杂, 评价函数中固定的权值系数不能较好适应动态障碍物环境, 因此, 本文提出一种改进的 DWA 评价函数。

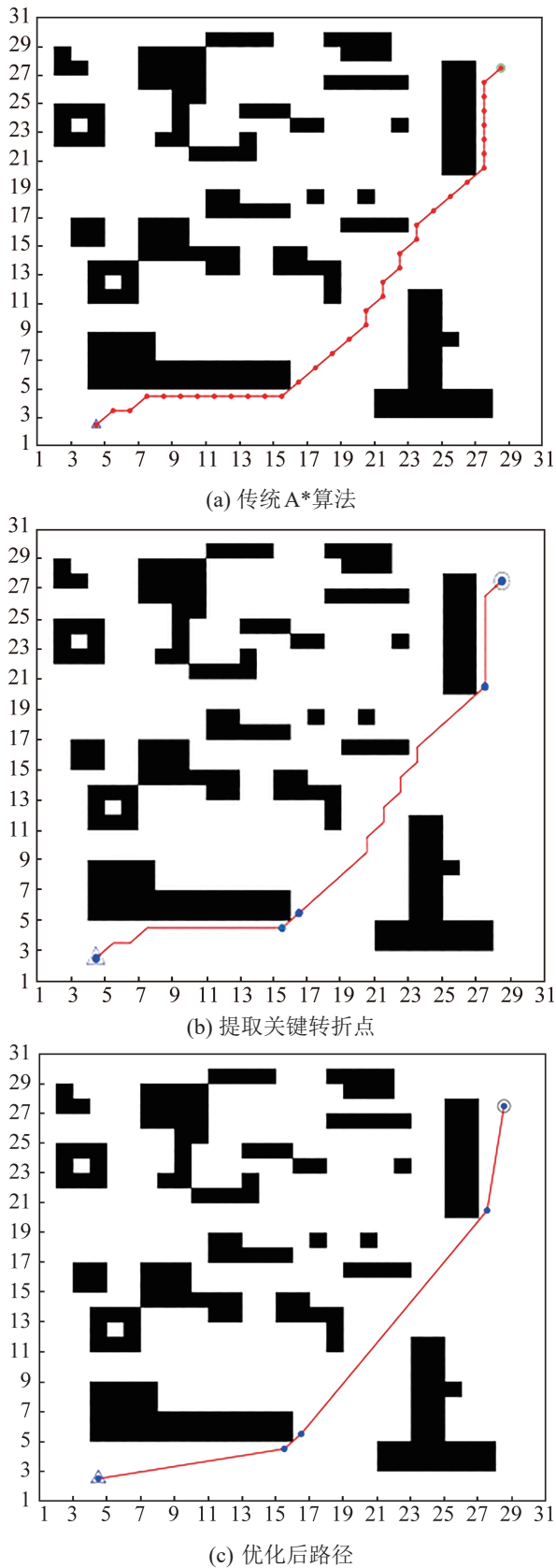


图3 路径规划算法对比

Fig. 3 Comparison of path planning algorithms

表2 算法对比

Table 2 Algorithm comparison			
路径规划算法	路径长度/m	规划时间/s	拐点数量
传统A*算法	46.560 3	0.685 3	33
改进A*算法	44.860 9	0.376 8	3

## 2.1 建立运动模型

假设  $t$  时刻智能车的线速度为  $v(t)$ , 角速度为  $\omega(t)$ , 机器人  $t$  时刻的位姿信息为  $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $\theta(t)$ , 则相邻两时刻的位姿变化为

$$\begin{cases} \Delta x = v_t \Delta t \cos \theta_t \\ \Delta y = v_t \Delta t \sin \theta_t \\ \Delta \theta = \omega \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

下一时刻位姿为

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + v_t \Delta t \cos \theta_t \\ y(t+1) = y(t) + v_t \Delta t \sin \theta_t \\ \theta(t+1) = \theta(t) + \omega \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为两时刻的时间间隔。

## 2.2 速度限制

在速度  $(v, \omega)$  空间中, 智能车行驶速度受自身速度、电机性能约束、安全制动距离3个因素的影响。

(1) 自身速度约束

$$v_m = \{(v, \omega) | v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\} \quad (5)$$

(2) 电机性能约束

$$\begin{aligned} v_d = \{(v, \omega) | v \in [v_c - v_b \Delta t, v_c + v_a \Delta t], \\ \omega \in [\omega_c - \omega_b \Delta t, \omega_c + \omega_a \Delta t]\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $v_d$  为智能车能够达到的速度空间;  $v_c$ 、 $\omega_c$  为智能车的当前速度;  $v_a$ 、 $\omega_a$  为最大加速度;  $v_b$ 、 $\omega_b$  为最大减速度。

(3) 为保证智能车的安全性, 确保智能车在出现的随机障碍物之前停下, 此时速度集合为

$$\begin{aligned} v_a = \{(v, \omega) | v \leq (2 \times \text{dist}(v, \omega) v_b)^{1/2}, \\ \omega \leq 2 \times \text{dist}(v, \omega) \omega_b)^{1/2}\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\text{dist}(v, \omega)$  为距离评价子函数, 表示当速度为  $(v, \omega)$  时的轨迹与障碍物的最小距离。

设智能车的速度集合为  $v_r$ , 智能车受上述 3 个因素约束的速度范围为

$$v_r = v_m \cap v_d \cap v_a \quad (8)$$

### 2.3 改进评价函数

智能车依据评价函数确定最优路径, 传统 DWA 评价函数为

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \text{head}(v, \omega) + \beta \text{dist}(v, \omega) + \gamma \text{vel}(v, \omega)) \quad (9)$$

式中:  $\text{head}(v, \omega)$  为当前节点与目标节点方向偏差;  $\text{dist}(v, \omega)$  为路线与障碍物的最近距离;  $\text{vel}(v, \omega)$  用来评价此时速度;  $\sigma$  为平滑函数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为加权系数。式中固定的权值系数不能较好地适应动态障碍物环境, 因此, 对式中系数进行调整, 当智能车附近没有障碍物时, 提高方向权重, 使智能车朝终点前进, 当智能车移动到障碍物附近时, 提高速度权重, 使智能车迅速躲避障碍物, 根据智能车与障碍物距离自适应调节权重系数, 改进后的函数为

$$G(v, \omega) = \sigma \left( \left( 1 + \frac{\text{dist}(v, \omega)}{2R} \right) \alpha \text{head}(v, \omega) + 2\beta \text{dist}(v, \omega) + \left( 2 - \frac{\text{dist}(v, \omega)}{2R} \right) \gamma \text{vel}(v, \omega) \right) \quad (10)$$

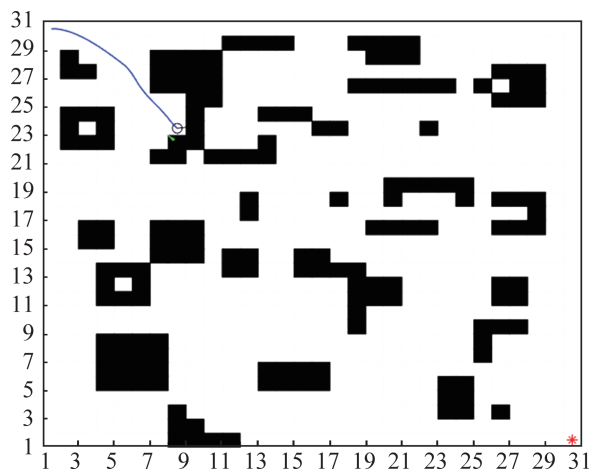
式中:  $R$  为障碍物半径。

为保证路径无障碍物时,  $\text{dist}(v, \omega)$  权值占比不至于太大, 设定  $\text{dist}(v, \omega) \in (0, 2R)$ , 对比效果如图 4 所示, 算法性能对比结果如表 3 所示。

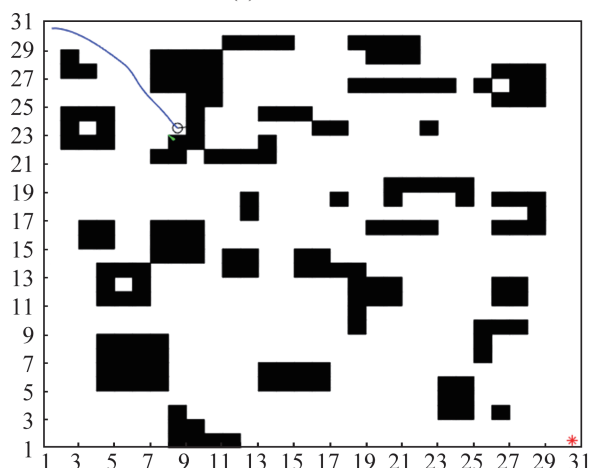
通过表 3 结果分析, 改进后的算法路径长度缩短了 0.55%, 规划时间缩短了 12%, 明显地提升了规划效率。

## 3 改进 A\* 与 DWA 融合

在智能车行进过程中, 除地图中已知障碍物外, 还会出现很多随机障碍物, 为了在最优行进路线的基础上保证自身安全, 改进 A\* 算法在去除冗余节点, 规划出最优路线的基础上, 在相邻的两个关键拐点之间采用改进后的 DWA 进行局部动态路径规划, 使其具有动态避障能力, 具体算法流程如图 5 所示。



(a) 传统 DWA



(b) 改进 DWA

图 4 DWA 对比

Fig. 4 DWA comparison

表 3 算法性能对比

Table 3 Algorithm performance comparison

路径规划算法	路径长度/m	规划时间/ms
传统 DWA	19.212	133.478
改进 DWA	19.106	117.461

## 4 仿真与分析

### 4.1 改进 A\* 算法仿真

传统 A\* 算法、改进 A\* 算法、融合算法运行效果如图 6 所示。

改进的 A\* 算法相比传统 A\* 算法拐点较少, 改融合算法曲率连续且平滑, 整体规划出的轨迹更符合实际车辆行进路线。

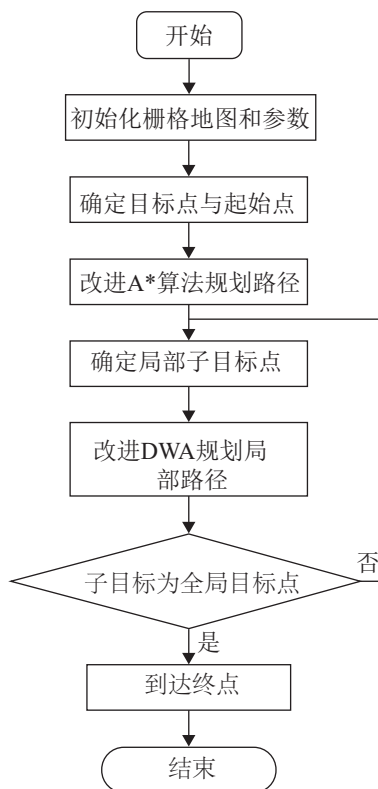


图5 融合算法流程图

Fig. 5 Flowchart of fusion algorithm

## 4.2 融合算法随机避障实验

该实验在优化A\*算法规划的行进路线上随机设置障碍物用以验证该融合算法的安全性，包含无随机固定障碍物、1个随机固定障碍物、2个随机固定障碍物、动静混合障碍物等仿真环境，起点为三角形，目标点为圆形，图中虚线部分为改进后的A\*全局最优轨迹，在A\*算法的关键节点之间进行自适应动态路径规划，使智能车辆在全局最优路线行进的同时确保自身的安全，如图7~10所示。

在规划出的路线上添加一个随机障碍物如图8中灰色物块所示，智能车在快到达静态障碍物时快速规避障碍物，在最优路径上前行直至目标点。图7~10中黄色栅格为随机动态障碍物，虚线尾迹线为其前进轨迹，前进轨迹仍能较好地规避障碍物。融合算法在行进路线上可局部调整路线躲避-静态障碍物并继续在全局最优路线上前行直至终点，自身安全性得到保证的同时路径平滑。

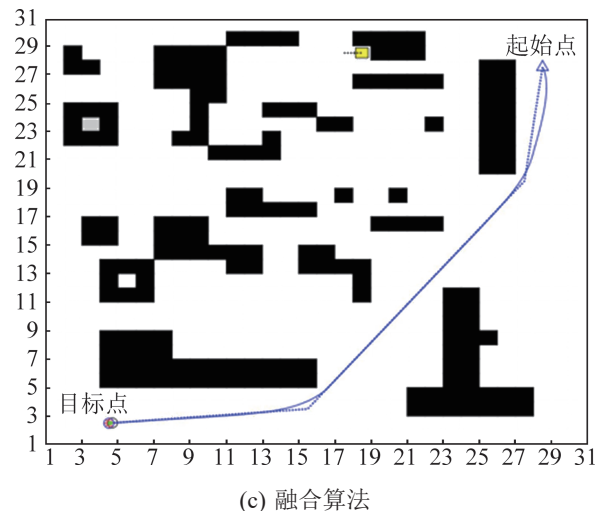
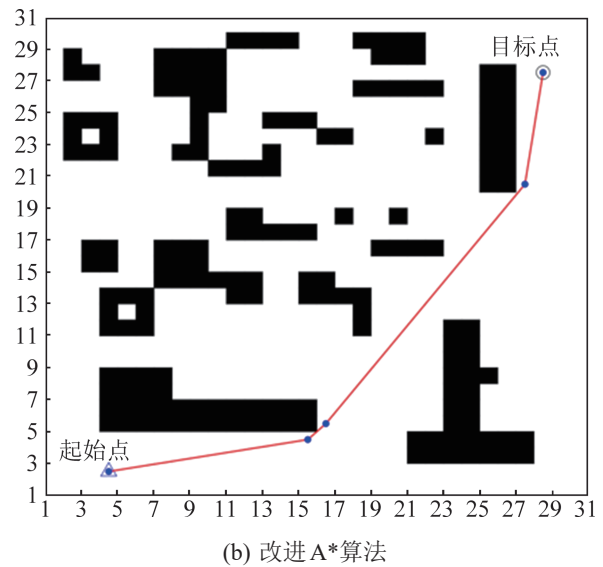
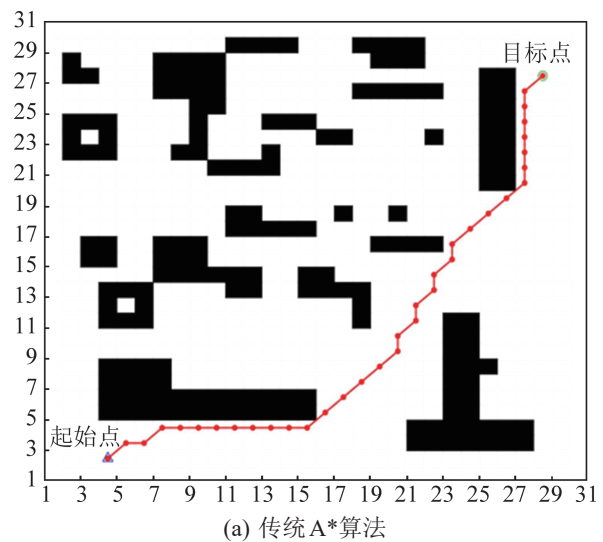


图6 算法优化过程

Fig. 6 Algorithm optimization process

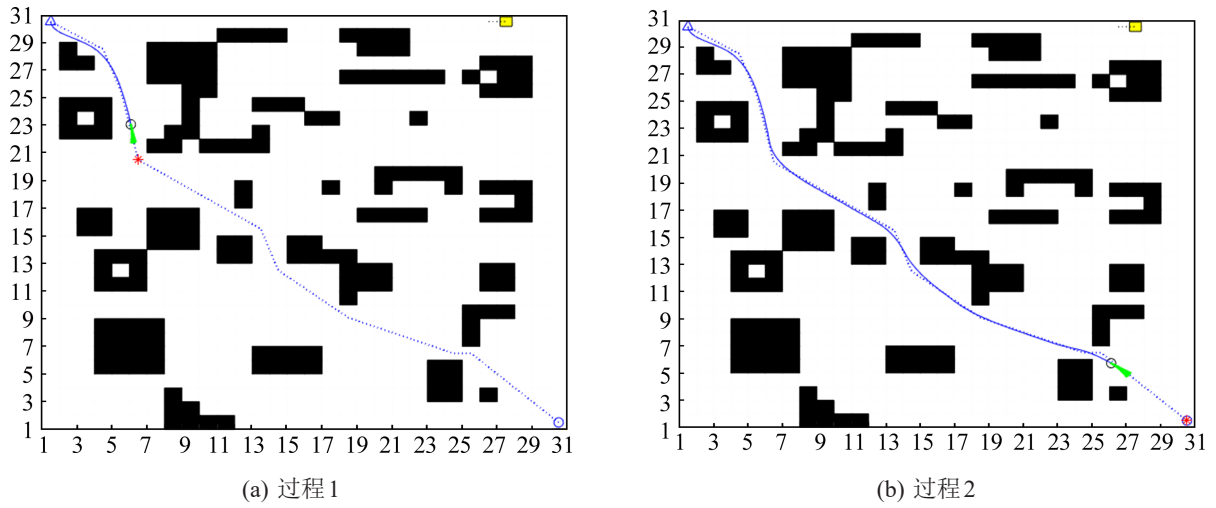


图 7 无随机障碍下融合算法路径规划图  
Fig. 7 Path planning diagram for fusion algorithm without random obstacles

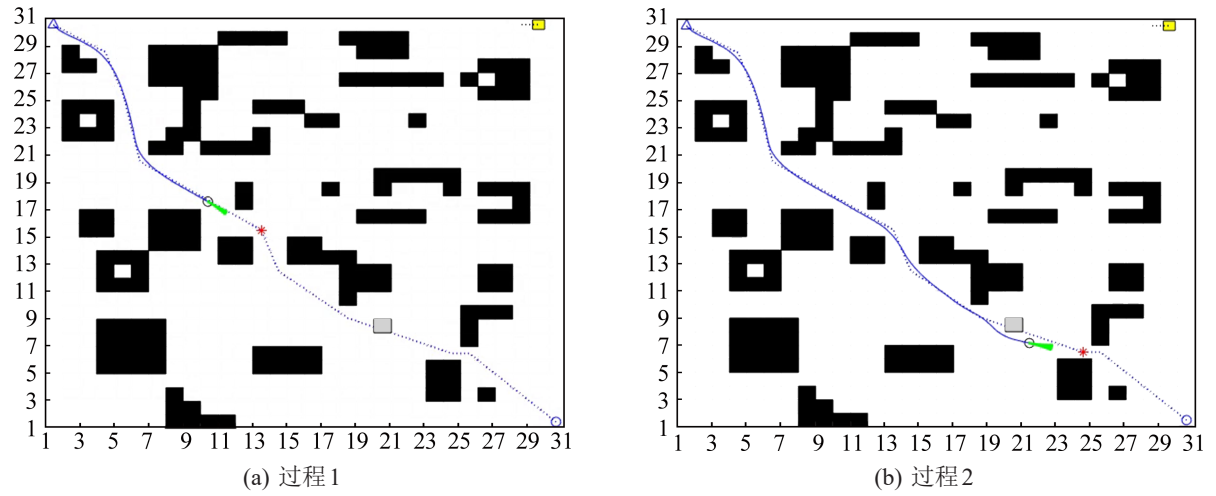


图 8 一个随机障碍下融合算法路径规划图  
Fig. 8 Path planning diagram for a fusion algorithm under a random obstacle

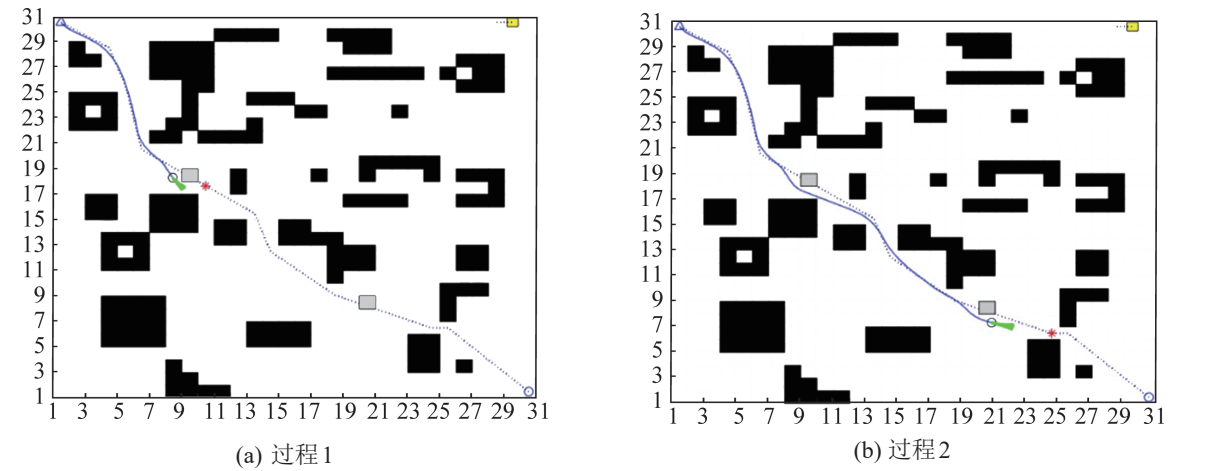


图 9 两个随机障碍下融合算法路径规划图  
Fig. 9 Path planning diagram for fusion algorithm under two random obstacles

<http://www.china-simulation.com>



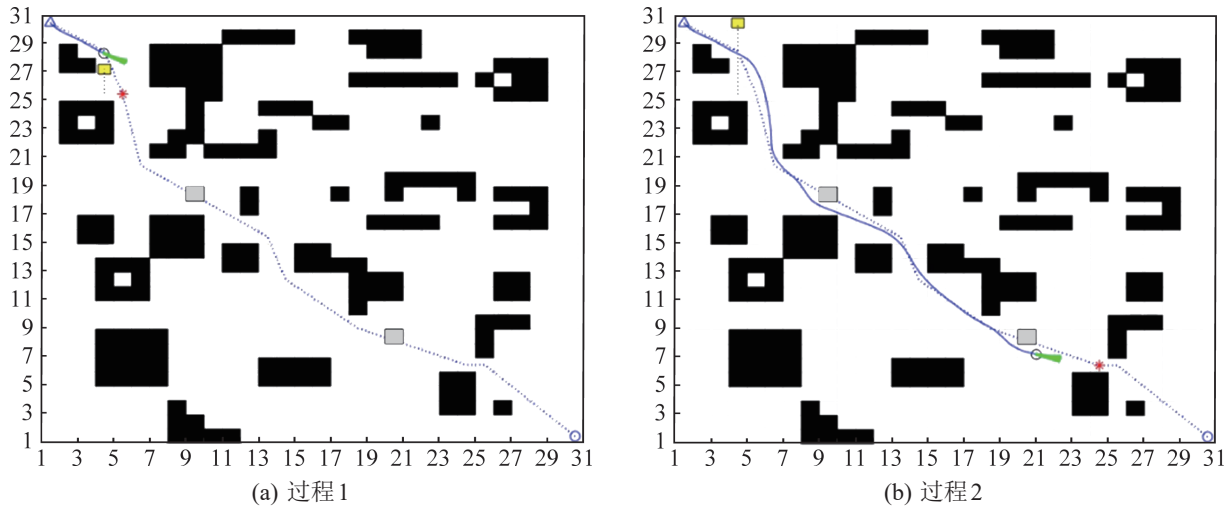


图 10 动-静态障碍下融合算法路径规划

Fig. 10 Fusion algorithm path planning under dynamic-static obstacles

### 5 实验验证

为验证该融合算法在实际环境中的稳定性、安全性和鲁棒性，将该算法应用于智能车中进行试车论证，智能车各参数如表4所示。图11为对实验场地进行环境建图，图12为智能车在随机障碍物附近规划轨迹的实验过程图，绿线为智能车规划的路线。

表4 智能小车硬件  
Table 4 Smart cart hardware

硬件名称	具体型号
激光雷达	思岚雷达 RPLIDAR A1
深度相机	奥比中光 Astra pro
ROS 主机	英伟达 Jetson Nano
底盘控制	STM32F103RCT6
惯导测量单元	MPU6050
电机	直流有刷电机

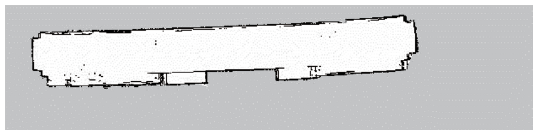


图 11 激光雷达扫描地图  
Fig. 11 Lidar scanning map

智能车的起始点分别设置在图中的左侧，设置好后智能车规划出全图行进路线。在智能车的行进路线上随机放置障碍物，当激光雷达检测到

随机障碍物时，智能车进行动态路径规划，通过减速并调整行进方向成功躲避障碍物，且规划出的轨迹较为平滑，避障效果较好。智能车绕开随机障碍物后继续按照全局路径朝终点行驶。

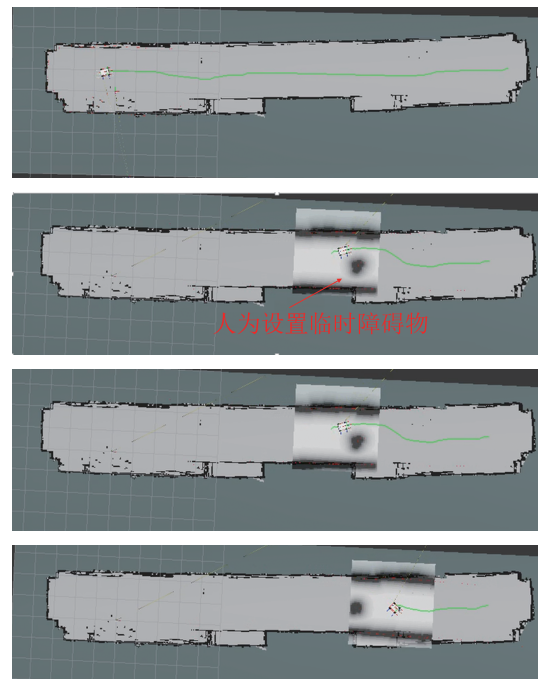


图 12 实验过程  
Fig. 12 Experimental procedures

利用 origin 对智能车行进过程的实时位姿、速度数据进行离线绘制，如图 13 所示，在 30~40 s



时, 实验车的线速度、角速度和角度产生了较大波动, 此时智能车处于减速和转向阶段。实验表明, 本文算法应用于实车可达到高效、精准避障, 规划路径曲率平滑, 且行进轨迹达到全局最优。

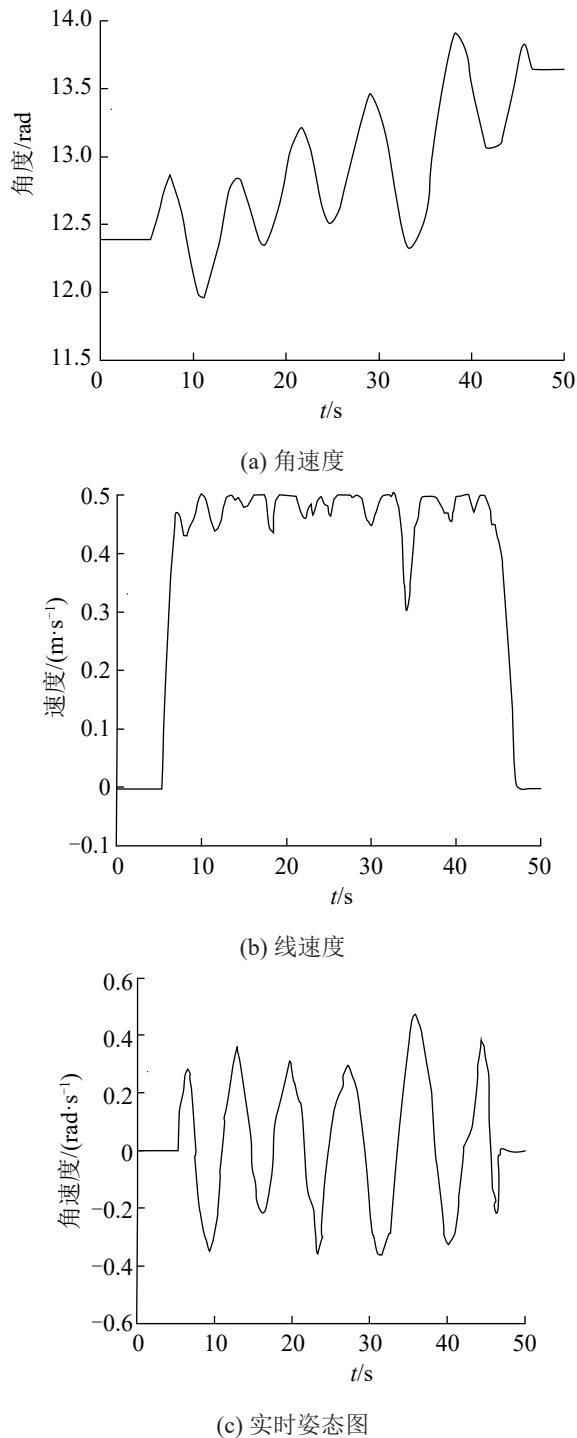


图13 智能车运行数据

Fig. 13 Intelligent vehicle operating data

## 6 结论

本文对A\*算法存在节点冗杂等问题进行改进, 依据相邻节点之间斜率大小, 保留关键节点, 删除冗杂节点, 优化了评价函数。

对于复杂工况下基本A\*算法无法规避动态随机避障以及动态窗口法存在安全性较低等问题, 将动态窗口法速度、方向权重进行动态参数自适应调节, 并与改进后的A\*算法融合, 改进后的A\*与动态窗口法在规避多个动-静态障碍物时兼顾高效性与安全性, 前进路线曲率更加平滑。

本文将融合算法移植ROS智能小车进行测试, 实验结果表明, 智能车处于较为复杂的环境时也可以兼顾安全和速度, 高效规避障碍物。综上, 本文研究的融合避障算法在一定程度上能够为智能车辆提供高效、安全可行的行进策略, 为无人驾驶高效、安全避障提供可靠前提。

## 参考文献:

- [1] B K Patle, Ganesh Babu L, Anish Pandey, et al. A Review: On Path Planning Strategies for Navigation of Mobile Robot[J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 582-606.
- [2] Patience I Adamu, Hilary I Okagbue, Pelumi E Oguntunde. Fast and Optimal Path Planning Algorithm (FAOPPA) for a Mobile Robot[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 106(2): 577-592.
- [3] 劳彩莲, 李鹏, 冯宇. 基于改进A\*与DWA算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14-22.  
Lao Cailian, Li Peng, Feng Yu. Path Planning of Greenhouse Robot Based on Fusion of Improved A\* Algorithm and Dynamic Window Approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14-22.
- [4] Min Haitao, Xiong Xiaoyong, Wang Pengyu, et al. Autonomous Driving Path Planning Algorithm Based on Improved A\* Algorithm in Unstructured Environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235 (2/3): 513-526.
- [5] 段书用, 王启帆, 韩旭, 等. 具有确保安全距离的A\*路径优化方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 205-215.

- Duan Shuyong, Wang Qifan, Han Xu, et al. Improved A-star Algorithm for Safety Insured Optimal Path with Smoothed Corner Turns[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 205-215.
- [6] Xiong Xiaoyong, Min Haitao, Yu Yuanbin, et al. Application Improvement of A\* Algorithm in Intelligent Vehicle Trajectory Planning[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021, 18(1): 1-21.
- [7] 张瑜, 宋荆洲, 张琪祁. 基于改进动态窗口法的户外清扫机器人局部路径规划[J]. *机器人*, 2020, 42(5): 617-625.
- Zhang Yu, Song Jingzhou, Zhang Qiqi. Local Path Planning of Outdoor Cleaning Robot Based on an Improved DWA[J]. *Robot*, 2020, 42(5): 617-625.
- [8] 王彬, 聂建军, 李海洋, 等. 优化A\*与动态窗口法的移动机器人路径规划[J/OL]. *计算机集成制造系统*. (2022-03-08) [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220305.1932.024.html>.
- Wang Bin, Nie Jianjun, Li Haiyang, et al. Based on Optimized A\* and Dynamic Window Approach for Mobile Robot Path Planning[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. (2022-03-08) [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220305.1932.024.html>.
- [9] 王志中. 复杂动态环境下自主机器人路径规划研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(1): 64-68.
- Wang Zhizhong. Automatic Robot Path Planning Under Complicit Dynamic Environment[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(1): 64-68.
- [10] 王凡, 李铁军, 刘今越, 等. 基于BIM的建筑机器人自主路径规划及避障研究[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(17): 224-230.
- Wang Fan, Li Tiejun, Liu Jinyue, et al. Research on Autonomous Path Planning and Obstacle Avoidance of Building Robot Based on BIM[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(17): 224-230.
- [11] 徐玉琼, 娄柯, 李婷婷, 等. 改进自适应蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(10): 89-95.
- Xu Yuqiong, Lou Ke, Li Tingting, et al. Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Adaptive Ant Colony Algorithm[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(10): 89-95.
- [12] 张松灿, 普杰信, 司彦娜, 等. 蚁群算法在移动机器人路径规划中的应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(8): 10-19.
- Zhang Songcan, Pu Jiexin, Si Yanna, et al. Survey on Application of Ant Colony Algorithm in Path Planning of Mobile Robot[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(8): 10-19.
- [13] Dai Xiaolin, Long Shuai, Zhang Zhiwen, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Ant Colony Algorithm With A\* Heuristic Method[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2019, 13: 15.
- [14] 曹毅, 周轶, 张亚宾. 基于优化A\*和DWA算法的移动机器人避障路径规划[J]. *机床与液压*, 2020, 48(24): 246-252.
- Cao Yi, Zhou Yi, Zhang Yabin. Path Planning for Obstacle Avoidance of Mobile Robot Based on Optimized A\* and DWA Algorithm[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(24): 246-252.
- [15] 石英托, 陈华, 张连新, 等. 基于改进A\*算法的AGV转运机器人路径规划研究[J]. *制造技术与机床*, 2022(5): 19-22.
- Shi Yingtuo, Chen Hua, Zhang Lianxin, et al. Research on Path Planning of AGV Transport Robot Based on Improved A\* Algorithm[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022(5): 19-22.
- [16] 高鹏, 姜军生, 白阳, 等. 基于改进A\*算法的果园移动机器人建图定位与路径规划方法与试验[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(1): 142-149.
- Gao Peng, Jiang Junsheng, Bai Yang, et al. Method and Experiment of Map Building and Path Planning for Mobile Robot in Orchard Based on Improved A\* Algorithm[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(1): 142-149.
- [17] 陈娇, 徐菱, 陈佳, 等. 改进A\*和动态窗口法的移动机器人路径规划[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(6): 1650-1658.
- Chen Jiao, Xu Ling, Chen Jia, et al. Path Planning Based on Improved A\* and Dynamic Window Approach for Mobile Robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(6): 1650-1658.
- [18] Mai Xiquan, Li Di, Ouyang Jian, et al. An Improved Dynamic Window Approach for Local Trajectory Planning in the Environment with Dense Objects[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1884(1): 012003.
- [19] 槐创锋, 郭龙, 贾雪艳, 等. 改进A\*算法与动态窗口法的机器人动态路径规划[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(8): 244-248.
- Huai Chuangfeng, Guo Long, Jia Xueyan, et al. Improved A\* Algorithm and Dynamic Window Method for Robot Dynamic Path Planning[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(8): 244-248.