

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311961

融合 A* 与 DWA 算法的水面船艇动态路径规划*

孙岩霆¹, 王荣杰^{1,2}, 蒋德松^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室 厦门 361021)

摘要:为解决水面船艇路径规划同时要求全局最优、实时避障和航迹安全可靠的问题,提出了一种基于融合 A* 算法与动态窗口算法(DWA)的水面船艇路径规划方法。首先通过引入启发函数动态加权策略,提高 A* 算法的搜索效率;然后综合考虑水面船艇的运动特性,采用一种路径转角节点角度削弱策略,减少转角,缩短全局路径长度;最后,基于全局因素影响与航迹安全约束对 DWA 算法的轨迹评价函数进行改进,并以全局路径提供子目标点引导 DWA 算法进行局部规划的方式完成算法融合。实验结果表明,融合算法相比于现有算法的总转向角度分别减少了 45.6%、46.0%,验证了融合算法的有效性与可行性,并且相较于其他传统算法更具优越性。

关键词: 路径规划;水面船艇;全局最优;实时避障;航行安全;A* 算法;动态窗口法;融合算法

中图分类号: TH166 U675.79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Dynamic path planning of surface ship by combining A* and dynamic window algorithm

Sun Yanting¹, Wang Rongjie^{1,2}, Jiang Desong^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: To solve the problem of requiring global optimization, real-time obstacle avoidance, and safe and reliable trajectory in surface ship path planning, a surface ship path planning method based on A* algorithm and DWA algorithm is proposed. Firstly, the heuristic function dynamic weighting strategy is introduced to improve the search efficiency of A* algorithm. Then, considering the motion characteristics of surface ships, an Angle weakening strategy of the path Angle node is adopted to reduce the angle and shorten the global path length. Finally, the trajectory evaluation function of the DWA algorithm is improved based on the influence of the global factors and track safety constraints, and the algorithm fusion is completed by providing subentry points of global path to guide the DWA algorithm to carry out local planning. Experimental results show that the total steering Angle of the proposed algorithm is reduced by 45.6% and 46.0%, respectively, compared with the existing fusion algorithms, which verifies the effectiveness and feasibility of the proposed fusion algorithm, and has more advantages over other traditional algorithms.

Keywords: path planning; surface ship; global optimum; real-time obstacle avoidance; navigation safety; A* algorithm; dynamic window algorithm; fusion algorithm

0 引言

随着无线通信技术和人工智能的发展,水面船艇的智能航行问题受到了广泛的关注^[1]。路径规划问题一直以来都是水面船艇智能航行领域的重点研究内容之

一^[2-3]。路径规划分为全局路径规划和局部实时路径规划,全局路径规划是指根据预先已知的全局地图信息,通过路径规划算法得到水面船艇行进的全局最优路径。局部实时路径规划是指水面船艇行进过程中通过自身传感器不断获取周围环境信息,得到从局部起点到局部目标点的最优路径。目前,得到广泛应用的全局路径规划的

收稿日期:2023-09-24 Received Date: 2023-09-24

* 基金项目:国家自然科学基金(51879118)、机器视觉检测安徽省重点实验室开放基金(KLMVI-2023-HIT-14)项目资助

主要算法有A*算法^[4]、RRT*算法^[5]、粒子群算法^[6]、蚁群算法^[7](ant colony optimization, ACO)等;局部路径规划的主要算法有人工势场法、滚动时域法、动态窗口法等。

针对水面船艇的路径规划问题,国内外学者已经给出许多不同的解决方案。文献[8]提出了一种自适应遗传算法,在无人船的路径规划中能够准确的规划出最优全局路径,节省了能源和时间成本;文献[9-10]提出的改进快速行进算法在保留速度的同时,能够生成一条距静态障碍物有一定距离的路径,减少了碰撞风险;文献[11]引入方向信息和余弦相似性对A*算法进行改进,提高了全局搜索的速度和目标性。前述研究侧重于得到水面船舶的全局最优路径,仅考虑到水面船舶行进过程中的航行成本、航行效率、静态避障等因素的影响,忽略了环境中动态因素所产生的潜在航行风险,在实际航行中遭遇动态障碍物与未知障碍物时不能及时做出应对,难以确保航行安全。文献[12]运用人工势场法,可有效完成水面船艇的局部动态避障;文献[13]对动态窗口算法(DWA)进行改进,通过限制水面船艇的搜索角,降低了转向角度,提高了轨迹预测效率。前述研究侧重于局部路径规划,规划过程中由于缺少全局因素引导,在动态环境下完成局部避障的同时,往往难以做到航行路径全局最优,导致全局航行效率较低。文献[14]提出了一种融合了改进蚁群算法(improved ant colony optimization, IACO)和DWA的路径规划方法,虽然能够保证全局最优和动态环境中的避障能力,但由于蚁群算法的全局规划速度较慢且规划出的全局路径多次触碰静态障碍物,可行度不高。文献[15-16]均提出了一种融合A*与动态窗口法的路径规划方法,但文献[15]未充分考虑运动对象自身的物理条件约束,难以在复杂的动态环境中达到理想的动态避障效果;文献[16]仅对未知静止障碍物进行实时避障,缺少对未知移动障碍物避障能力的考虑;文献[17]提出了一种融合改进蜉蝣优化算法与DWA的路径规划方法,能对未知移动障碍物进行实时避障,但航行时对全局路径过于粘合,在遭遇未知移动障碍物时转向突兀,转角过大,在多未知障碍物的环境中航行可靠性不足。

基于以上路径规划研究现状与算法分析可知,已有的路径规划研究普遍未能同时达到全局最优、实时避障、航迹安全可靠的规划要求。考虑到A*算法具有运算速度快、适应性强等优点,DWA算法可在充分考虑水面船艇运动学模型的前提下,完成局部避障且局部规划路径平滑。为了使水面船舶路径规划同时满足全局最优、实时避障、航迹安全可靠的要求,本文提出了一种基于改进A*算法与DWA算法融合的水面船艇路径规划方法,旨在使水面船艇在航迹全局最优、能够对航行环境中障碍物的变化情况做出应对的同时,航

迹亦符合水面船艇的运动学特性,提高水面船艇航迹规划的安全性、可行性。

1 环境地图栅格化

考虑到在常规水面船艇路径规划实验中可忽略水面船艇的纵高,于二维平面上进行,本文选择将环境地图进行栅格化处理。栅格法是常用的环境模型搭建方法,用若干等大方块模拟代替环境地图得到栅格地图^[18],在水面船艇路径规划中可将连续的地图数据转换为离散的栅格数据,具有简化数据处理、方便坐标定位、适应不同分辨率等优点。

1) 栅格地图二值化

本文中,黑色栅格为已知障碍物区域,用数字“1”表示;白色栅格为可航行区域,用数值“0”表示。

2) 栅格位置的标记方法

以栅格地图相邻的两条边建立笛卡尔直角坐标系,如图1所示,栅格位置可表示为:

$$(x_i, y_j) = [(i-1) \cdot l + 0.5l, (j-1) \cdot l + 0.5l] \quad (1)$$

式中: x_i 为横坐标点; y_j 为纵坐标点; l 为单格边长。

3) 栅格补一取整处理

为确保水面船艇航行时的安全性,生成栅格地图时,将面积不满足一个栅格的障碍物采取补一取整处理,面积膨胀至填满一个栅格。

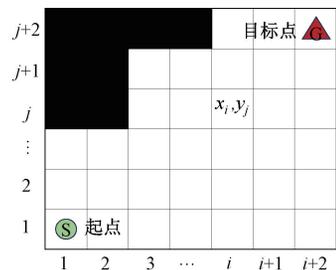


图1 栅格化地图及栅格位置标记示意图

Fig. 1 Rasterized maps and location markers

2 全局路径规划

2.1 A*算法原理描述

A*算法是在Dijkstra算法的基础上进行拓展,是一种典型的启发式智能算法,广泛的应用在路径规划、人工智能等领域。传统A*算法运用栅格思想,其评价函数综合考虑了当前栅格节点到起点的代价、当前栅格节点到目标点的代价,通过不断寻找低代价节点进行范围扩展,直到达到目标点。其一般形式为:

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (2)$$

式中: $F(n)$ 为当前栅格节点 n 的总代价; $G(n)$ 为当前栅格节点 n 到起点的航行代价; $H(n)$ 为当前栅格节点 n 到终点的预估航行代价, 也称为启发函数。启发函数 $H(n)$ 的估值大小直接影响算法搜索的效率和精确度, 常用的估值方式有曼哈顿距离、切比雪夫距离、欧氏距离等, 本文采用欧氏距离作为启发函数的估值方式。

$$H(n) = \text{sqrt}[(X_n - X_g)^2 + (Y_n - Y_g)^2]$$

2.2 改进A*算法

传统A*算法虽然实现起来较为简单, 在搜索的过程中可以剪除大量无用节点, 能够在短时间内得到最优路径, 但规划出的路径一般存在路线曲折、复杂环境中效率较低、不符合水面船艇的运动特性等缺点, 实际应用性差。为使规划出的全局路径的局部路线更贴合水面船艇的实际航线特征, 本文分别从启发函数动态加权和路径节点优化两个方面对其进行了如下改进。

1) 启发函数动态加权策略

本文的启发函数 $H(n)$ 采用欧氏距离进行当前栅格节点到目标点的航行代价预估, 其值不会大于实际航行代价值, $H(n)$ 的预估值越小, 搜索额外扩展的节点越多, 速度越慢。因此在搜索初期, 提高 $H(n)$ 函数的权重量可以提高搜索效率, 快速向目标点靠近; 接近目标点时, 降低 $H(n)$ 函数的权重, 此时的欧几里得距离预估代价接近实际代价, A*算法仅寻找接近目标点的最佳路径而不扩展其他多余节点, 使搜索路径能够尽快到达目标点, 完成搜索任务。同时, 当全局已知障碍物数量较多、环境信息较为复杂时, 适当降低启发函数的权重系数, 增大搜索范围, 避免陷入局部最优解。因此本文对原启发函数赋予动态加权, 其函数如下:

$$H'(n) = (C_1 + \text{dis}(n)/\text{dis}(\text{start}) - [\exp(B^{-1})]^{-1})H(n) \quad (3)$$

式中: C_1 为常数项; $\text{dis}(n)$ 为当前栅格节点到目标点的欧氏距离; $\text{dis}(\text{start})$ 为起点到目标点的欧几里得距离; B 为全局已知障碍物数量。

2) 路径节点优化

水面船艇的横倾现象: 横倾是船舶自正浮位置向右舷或左舷倾斜使左右舷吃水不等的浮态, 由横倾现象产生的横倾角在各种情况下都有一定的限制^[19]。当以一定速度在水面行驶的水面船艇进行大舵角转向时, 船体所受横倾力作用点高度不同, 形成横倾力矩, 常产生横倾现象(图2), 过大的横倾角不仅会影响水面船艇的适航性, 还会严重威胁水面船艇自身的航行安全^[20]。为避免水面船艇在航行过程中因大舵角转向、过频繁转向产生较大的横倾角, 保证水面船艇在一定速度下航行时的适航性与航行安全, 航迹路线需满足式(4)的方向约束和式(5)的回转距离约束^[21]。

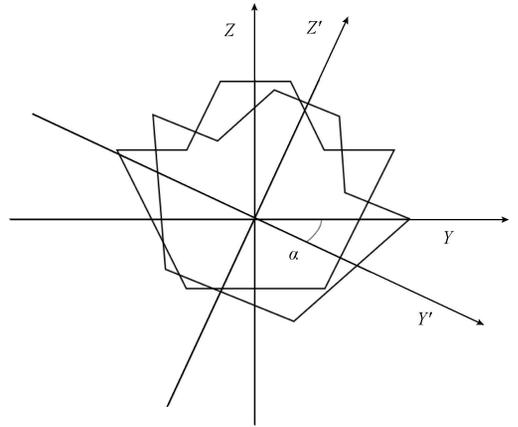


图2 横倾现象示意图

Fig. 2 Heeling phenomenon

$$\frac{l_i^h}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} \leq \theta_{\max} - \theta_s \quad (4)$$

$$2R \cdot \sin\theta < L_\theta \quad (5)$$

式中: l_i^h 为某时刻的目标点到此刻船艏朝向所在直线的垂直距离; θ_{\max} 为水面船艇的最大转向角; θ_s 为安全预留转向角度; x_i, y_i 分别为某时刻水面船艇的横、纵坐标点; R 为水面船艇回转半径; θ 为与当前节点相邻线段的夹角; L_θ 为当前节点到达下一节点的距离。

传统A*算法作为全局规划算法所规划出的路径由连续栅格连线组成。在临近障碍物搜索时, 所规划出的路径往往拐角过多, 转角过大, 不符合水面船艇的运动特性, 在实际应用中有较大的碰撞风险。为减少路径曲折度, 保证水面船艇的航行安全, 本文综合考虑水面船艇的运动特性, 提出一种路径节点转角角度削弱策略, 对规划路径进行再处理, 提高规划路径的可行性和安全性。

步骤1) 优化路径节点, 获取路径所有节点建立集合 $\text{Dot} = \{S, \dots, M_n, \dots, G\}$, 其中 S 为起点, M_n 为各个中间节点, G 为目标点。遍历所有节点, 保留直线路径两端各两个节点, 删除其余共线冗余节点。剩余节点进入集合 $\text{Se-Dot}\{\}$ 。

步骤2) 在集合 $\text{Se-Dot}\{S, \dots, N_i, \dots, G\}$ 中, 从起点开始遍历节点, 当前节点 N_i 与后面节点连接为短路径, 组成集合 $\text{Path}\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ 。遍历路径并判断: 若当前路径与最近障碍栅格中心距离小于等于安全距离 D_s , 删除当前路径并删除剩余孤立节点。

步骤3) 在剩余在节点之间生成新节点 D_n 。当前节点 N_i 与 D_i 相连不经过障碍, 则 N_i 继续与下一节点 N_{i+1} 相连, 直到不满足条件时, 选择前一节点作为当前节点重复以上操作, 直到到达末端节点。删除多余节点后, 从末端节点开始反向循环, 判断是否满足式(5), 重复上述操作, 优化效果如图3所示。

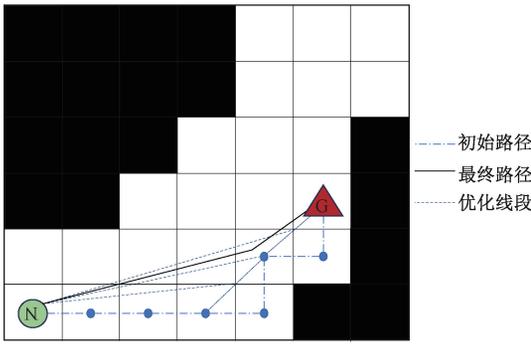


图3 路径节点优化效果

Fig. 3 Diagram of path node optimization effect

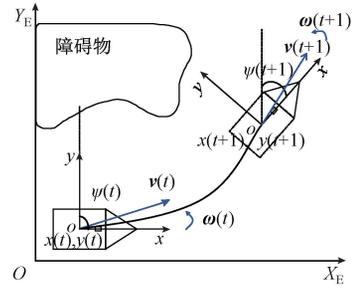


图4 水面船艇运动学模型

Fig. 4 Surface ship kinematic model diagram

3 局部路径规划

3.1 传统DWA算法

传统DWA算法常用于局部路径规划。在实际的路径规划应用中,通常包含未知的障碍物信息,DWA算法通过将位置约束问题转化为速度约束问题,可在充分考虑水面船艇的运动模型的前提下,将避碰问题转化为最优速度执行问题,实现局部动态避碰。DWA算法一般包括运动学模型建立、速度样本采集、轨迹评价函数3个部分。

3.2 水面船艇运动学模型

通常情况下,为了降低水面船艇的整体重量和制造成本,常见的水面船艇往往只有船艏的两个推进器或者单艏单桨,只能提供纵荡推力和艏摇力矩,而水面船艇航行过程中存在横荡、纵荡、艏摇3种运动,使得水面船艇本身具有欠驱动性^[22]。水面船艇运动学模型是描述水面船艇运动的数学模型,水面船艇运动学模型可由一个单质点运动学模型近似表示,此模型具有一定的线速度约束、加速约束和转向角约束。DWA算法通过建立水面船艇的运动学模型,可以限制候选速度空间,采取可行速度,预测合理的水面船艇运动轨迹。水面船艇的二维运动学模型如图4所示。在大地坐标系 $Y_E O X_E$ 中, Y_E 轴指向正北方向; X_E 轴指向正东方向;黑色矩形为障碍物。在船体坐标系 yox 中, x 轴指向船头, y 轴与 x 轴垂直; $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为 t 时刻水面船艇的横坐标与纵坐标; ψ_t 为船艏向角,以正北方向为零度与船头的夹角; $\mathbf{v}(t)$ 为 t 时刻水面船艇的线速度; $\boldsymbol{\omega}(t)$ 为 t 时刻水面船艇的艏摇角速度。在 $t+1$ 时刻水面船艇在坐标系下的坐标为:

$$x(t+1) = x(t) + \mathbf{v}(t) \Delta t \cos \psi_t \quad (6)$$

$$y(t+1) = y(t) + \mathbf{v}(t) \Delta t \sin \psi_t \quad (7)$$

$$\psi_{t+1} = \psi_t + \boldsymbol{\omega}(t) \Delta t \quad (8)$$

3.3 速度样本采集

DWA算法根据水面船艇的运动学模型,通过在候选

速度空间集中进行多次采集,预测水面船艇的航行轨迹。水面船艇在航行时,候选速度空间集合同时受到自身的运动能力限制和环境中的障碍物的约束。

1) 线速度、角速度最大值约束

候选速度空间集中的速度应满足水面船艇自身的极限运动能力限制,不得超出极限速度:

$$V_l = \{(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \mid \mathbf{v} \in [\mathbf{v}_{\min}, \mathbf{v}_{\max}], \boldsymbol{\omega} \in [\boldsymbol{\omega}_{\min}, \boldsymbol{\omega}_{\max}]\} \quad (9)$$

2) 加、减速度能力约束

水面船艇的运动控制能力有限,不仅受自身船体结构、外界环境因素影响,而且船舵转角存在极限值、推进系统存在额定功率,其线加速度与角加速度的变化速率有界。因此候选速度集中的当前动态窗口约束为:

$$V_m = \left\{ (\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \mid \begin{aligned} &\boldsymbol{\omega} \in [\boldsymbol{\omega}_n - \mathbf{a}_{\omega d \max} \Delta t, \boldsymbol{\omega}_n + \mathbf{a}_{\omega i \max} \Delta t] \\ &\mathbf{v} \in [\mathbf{v}_n - \mathbf{a}_{v d \max} \Delta t, \mathbf{v}_n + \mathbf{a}_{v i \max} \Delta t] \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中: $\mathbf{a}_{v d \max}$ 为线减速度的最大值; $\mathbf{a}_{v i \max}$ 为线加速度的最大值; $\mathbf{a}_{\omega d \max}$ 为角减速度的最大值; $\mathbf{a}_{\omega i \max}$ 为角加速度的最大值; \mathbf{v}_n 为水面船艇的当前动态窗口线速度; $\boldsymbol{\omega}_n$ 为水面船艇的当前动态窗口角速度。

3) 制动能力约束

在式(10)的条件下,需保证水面船艇在行驶过程中不与环境中障碍物发生触碰:

$$V_n = \left\{ (\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \mid \begin{aligned} &\boldsymbol{\omega} \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \cdot |\mathbf{a}_{\omega d \max}|} \\ &\mathbf{v} \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \cdot |\mathbf{a}_{v d \max}|} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: $\text{dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为对应动态窗口速度与角速度下的预测轨迹与障碍物的最小距离。

综上所述,水面船艇的速度动态窗口可总结为线速度、角速度最大值约束,加、减速度能力约束以及制动能力约束三者的交集:

$$V_o = \{V_l \cap V_m \cap V_n\} \quad (12)$$

3.4 轨迹评价函数

DWA算法在候选速度空间集中采集多组速度样

本后,可根据水面船艇的运动学模型预测水面船艇未来一段时间内的多条可能轨迹。建立轨迹评价函数,遍历每条轨迹,将得到的 $dist(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 代入验证,舍去不可行轨迹,在剩余的可行轨迹中选取最优轨迹并执行。轨迹评价函数通常如下式所示:

$$G(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) = \alpha \cdot \text{Heading}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \beta \cdot \text{Dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \gamma \cdot \text{Velocity}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \quad (13)$$

式中: $\text{Heading}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为航向评价子函数,代表水面船艇到达预测轨迹末端时与目标点之间的角度偏差; $\text{Dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为障碍物威胁评价子函数,代表当前预测轨迹末端与最近障碍物的距离; $\text{Velocity}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为速度评价子函数,代表在安全行驶的前提下,当前预测轨迹所用速度样本到达目标点的快慢; α, β, γ 均为权重系数。

4 融合算法路径规划

改进 A* 算法可以根据已知静态环境信息进行全局路径规划,规划出一条合理的全局路线,但并不能规避环境中的未知障碍。DWA 算法作为局部路径规划算法,虽然具有较好的局部避障能力,但是在应用过程中往往因缺少全局因素引导而陷入局部最优,导致实际行驶路径过长且部分过于曲折,难以获得理想最优路径。如图 5 所示,本文将改进 A* 算法所得全局路径的节点集合作为全局因素,以子目标点的形式引导 DWA 算法进行局部规划,规划出的实际路径在保证全局最优的同时,可完成局部避障。

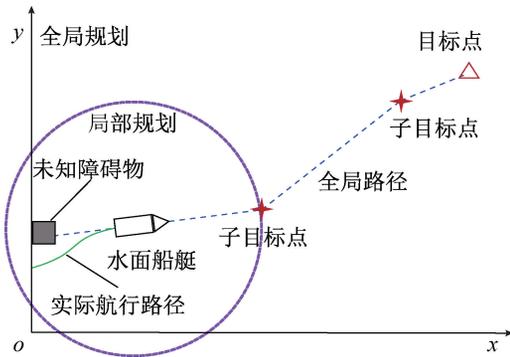


图 5 水面船艇某阶段航迹示意图

Fig. 5 Course diagram of a surface ship at a certain stage

为了提高全局规划改进 A* 算法与局部规划 DWA 算法的耦合度,增强融合算法的综合性能。本文对 DWA 算法做如下改进:在轨迹评价函数中引入全局路径偏离评价因子,增强水面船艇对全局路径的追踪性能,且当附近出现未知障碍物时,能够不受全局路径影响,进行局部避障。在轨迹评价函数中添加转向角速度评价因子,使

航迹尽量贴合符合水面船艇的运动学特性,保证适航性。公式如下:

$$G'(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) = \alpha \cdot \text{Heading}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \beta \cdot \text{Dist}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \gamma \cdot \text{Velocity}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \delta \cdot \text{Dist}_{path}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) + \varepsilon \cdot \text{Pal}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) \quad (14)$$

$$\text{Dist}_{path}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) = \begin{cases} \text{Dist}_{path}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}), & \text{dist}_t \geq L_\theta \\ 0, & \text{dist}_t < L_\theta \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Pal}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}) = (|\boldsymbol{\omega}_{max}| - |\boldsymbol{\omega}\Delta t|) / |\boldsymbol{\omega}_{max}| \quad (16)$$

式中: $\text{Dist}_{path}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为全局路径偏离评价因子,代表当前预测轨迹末端到全局路径的最短距离; $\text{Pal}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 为转向角速度评价因子,代表水面船艇转向的角速度大小; δ, ε 为权重系数; dist_t 代表当前时刻水面船艇与最近未知障碍物中心点的最短距离; $L_\theta = 2R \cdot \sin\theta$ 为式(5)中的回转距离限制。

融合算法流程分为两部分。

第 1 部分

(1) 获取环境位置信息,创建栅格地图;改进 A* 算法初始化参数,建立起点与目标点。

(2) 优化启发函数计算当前节点 $F(n)$, 获取下一节点位置并计算 $F(n)$, 更新搜索节点。

(3) 判断是否到达目标点,是则获取全局路径节点,并用路径节点转角角度削弱策略进行处理,更新后的全局路径给第 2 部分(3)~(4)部分提供子目标点与全局路径信息,进入第 2 部分;否则返上一步。

第 2 部分

(1) 改进 DWA 算法参数初始化。

(2) 速度样本采集并进行轨迹预测。

(3) 判断是否满足制动约束,是则进入下一步;否则返回上一步。

(4) 改进轨迹评价函数根据当前航行阶段的子目标点,选择出最优路径。

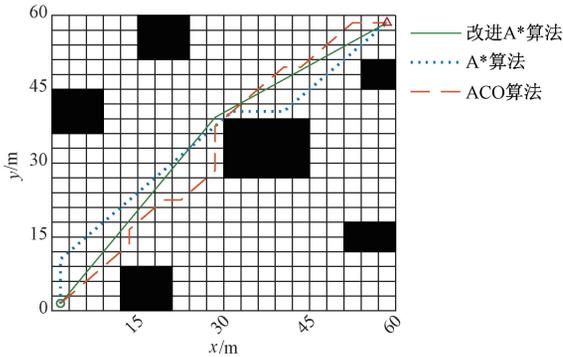
(5) 判断是否到达最终目标点,是则结束流程;否则返回第 2 部分(2)。

5 实验与分析

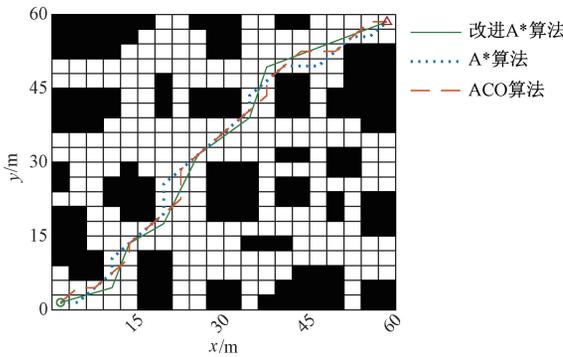
5.1 改进 A* 算法对比仿真实验

为了验证在已知的静态环境中本文所提出的改进 A* 算法的有效性与优越性,从路径总长度、转向次数、总转向角度、时间效率 4 个方面与传统八方向搜索 A* 算法和文献[23]的 ACO 算法进行对比仿真实验。仿真实验在 MATLAB 2021a 平台进行,建立 20×20 的栅格地图,最小栅格大小为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。在地图中,“O”为起点;“Δ”为目标点。相关参数为 $C_1 = 2, \theta_s = 10^\circ, \theta_{max} = 60^\circ, R_{min} = 14 \text{ m}$,安全距离 $D_s = 3 \text{ m}$ 。

由图6和表1可知,在简单环境和复杂环境地图中,改进A*算法对比原A*算法,规划时间分别缩短了12.9%、13.6%;路径长度分别减短了4.1%、2.0%;总转向角度分别减少了79.4%、44.6%,转向次数更少,接触障碍物次数均降为0,更适用于水面船艇的实际航行;ACO算法的规划路径各方面数据均差于改进A*算法,改进A*算法显然优于ACO算法。



(a) 简单环境中规划结果对比
(a) Comparison of planning results in a simple environment



(b) 复杂环境中规划结果对比
(b) Comparison of planning results in a complex environment

图6 全局规划仿真结果对比图

Fig.6 Comparison of global planning simulation results

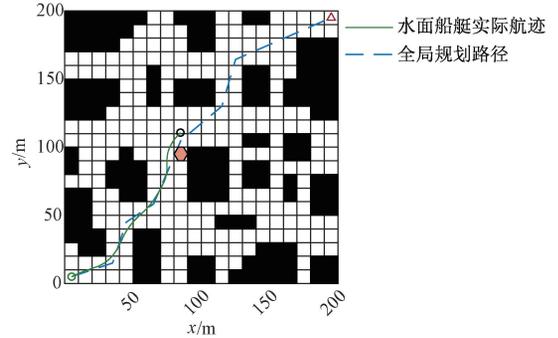
表1 全局规划算法性能对比

Table 1 Performance comparison of global planning algorithms

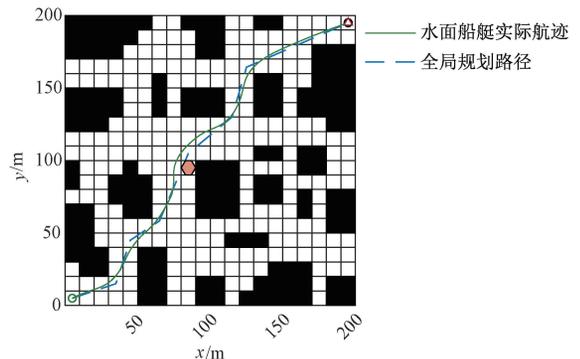
环境	规划算法	路径长度/m	总转向角度/(°)	转向次数	规划时间/s	触障次数
简单环境	A*	85.9	136	3	0.85	1
	ACO	84.6	405	9	1.54	1
	改进A*	82.4	28	1	0.74	0
复杂环境	A*	88.6	498	11	0.88	5
	ACO	87.6	499	11	1.88	5
	改进A*	86.9	276	6	0.76	0

5.2 融合算法航迹仿真实验

水面船艇路径规划仿真实验在复杂地图环境下进行,栅格地图20×20,最小栅格大小为10m×10m。分别进行融合算法避障仿真实验和对比仿真实验,结果如图7~9所示。其中,六边形为未知静止障碍物;实心三角形为未知移动障碍物;“x”为引导局部路径规划的子目标点;“○”为起点,坐标为(1.5, 1.5);空心“△”为目标点,坐标为(20.5, 20.5)。α = 0.1, β = 0.2, γ = 0.2, δ = 0.3, ε = 0.2, v_{max} = 12 m/s, a_{vi max} = 2 m/s², ω_{max} = 6/π rad/s, a_{oi max} = 2π/9 rad/s²,线速度分辨率=0.1 m/s,角速度分辨率=π/180 rad/s。



(a) 遭遇并避开未知障碍物
(a) Encounter and avoid unknown obstacles



(b) 到达目标点
(b) Reach the target

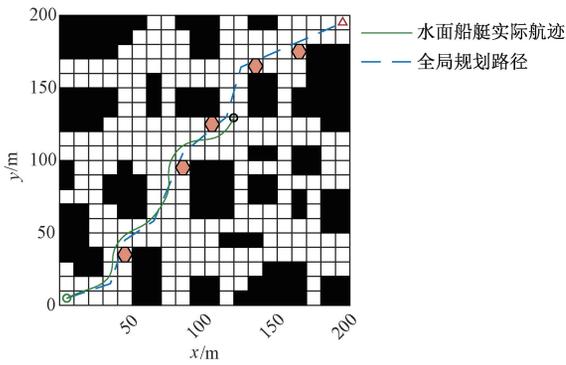
图7 情况1下融合算法仿真

Fig.7 Fusion algorithm simulation diagram of case 1

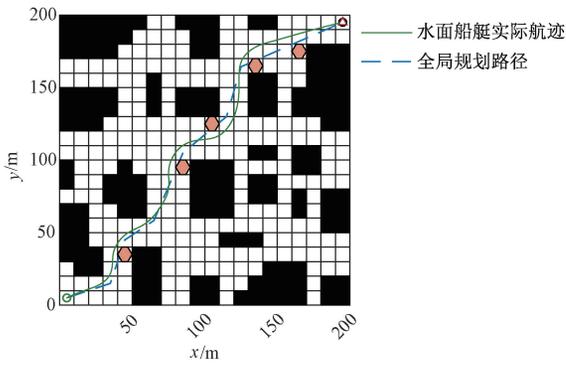
1) 融合算法避障仿真实验

为了验证此融合算法下水面船艇的避障性能。分别在:单个随机未知静止障碍物、多个随机未知静止障碍物、随机未知静止障碍物与未知移动障碍物,3种情况下进行。其中,实线为水面船艇实际航行轨迹;虚线为全局规划路径;点线为未知移动障碍物的移动路线。

通过3种情况下的融合算法仿真实验结果(图7~9)可知:当全局路径不经过未知障碍物时,水面船艇航迹平滑且几乎不偏离全局路径;当全局路径靠近或经过未知障碍物时,水面船艇可有效避开未知障碍物并继



(a) 连续避开未知障碍物
(a) Continuously avoid unknown obstacles



(b) 到达目标点
(b) Reach the target

图 8 情况 2 下融合算法仿真

Fig. 8 Fusion algorithm simulation diagram of case 2

续以平滑航迹向目标点航行;当水面船艇接近未知移动障碍物时,水面船艇可提前改变航行并避开未知移动障碍物。仿真实验结果证明了此融合算法的可行性和有效性。

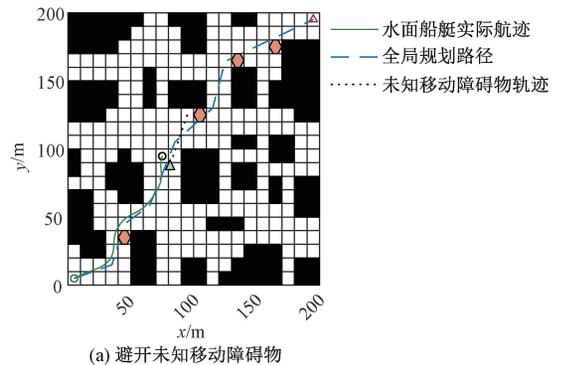
情况 1,单个随机未知静止障碍物位于全局路径上。

情况 2,多个随机未知静止障碍物位于全局路径上与全局路径周边。

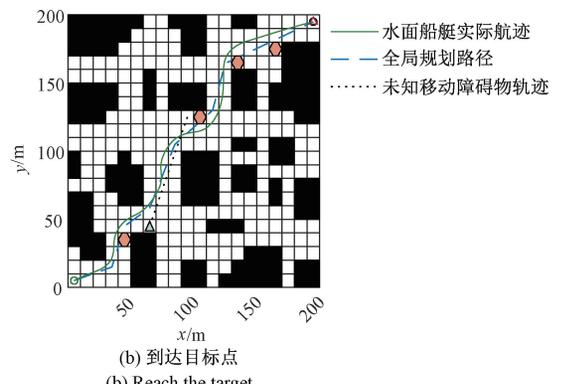
情况 3,在情况 2 的基础上添加移动路径与全局路径相交的未知移动障碍物。

2) 融合算法对比仿真实验

为了验证本融合算法相较于普通全局规划算法、普通局部规划算法和其他现有普通融合算法具有较大的优越性,规划航迹更加安全可靠,分别在以下两种不同的环境地图下,将此融合算法规划航迹和普通全局算法规划航迹、普通局部算法规划航迹以及现有的融合算法规划航迹进行比较。全局规划算法选用 IACO^[24],局部规划算法选用改进人工势场算法(improved artificial potential field, IAPF)^[25],现有融合算法选用融合改进蜉蝣-动态窗口算法(improved mayfly optimization algorithm based on Q-learning and dynamic window approach, IMOA-QL-DWA)^[17]。



(a) 避开未知移动障碍物
(a) Avoid unknown moving obstacles



(b) 到达目标点
(b) Reach the target

图 9 情况 3 下融合算法的仿真过程

Fig. 9 Fusion algorithm simulation diagram of case 3

多未知静止障碍物环境 (Map1) 下的规划航迹对比结果、多未知移动障碍物与静止障碍物环境 (Map2) 下的规划航迹对比结果分别如图 10、11 所示。由图 10、11 以及表 2 可知,在多未知障碍物的情况下,普通全局规划算法虽然规划路径长度较短、总转向角度不大,但由于缺少局部规划功能,不能实现动态避碰,触障次数分别为 7 次、9 次,不能保证水面船艇的航行安全;普通局部规划算法触障次数为 0,虽然能够做到动态避碰,但是由于缺乏全局引导因素,水面船艇航行时目标性差、转向频繁,导致最终航迹路线较长且总转向角度过大,水面船艇的航行效率偏低,适航性较差;IMOA-QL-DWA 融合算法^[17]触障次数为 0,能够做到动态避碰且航迹路线较短,但转向突兀,全局总转向角度过大,转向次数过多,最终航迹路线多棱角、不平滑;本文融合算法触障次数为 0,航迹长度与普通全局规划算法的航迹长度相差不大,在两种环境地图中的总转向角度均远小于普通局部规划算法的总转向角度,且相比于 IMOA-QL-DWA 融合算法^[17]分别减少了 45.6%、46.0%,航行航迹平滑,能够保全局最优且实现动态避碰,具有较大的优越性和较高的安全性。

3) 实验验证

为了验证本文融合算法在实际应用中的可行性,选

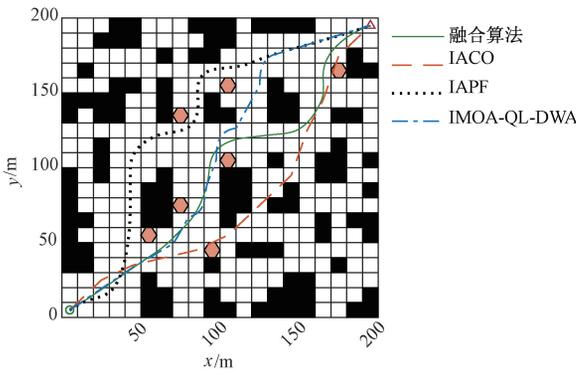


图 10 Map1 下的规划航迹对比

Fig. 10 Planned track comparison in the map1

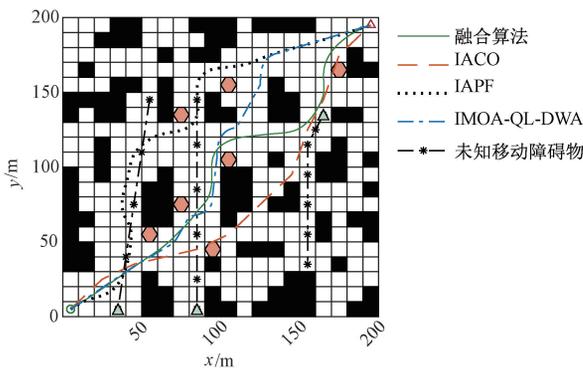


图 11 Map2 下的规划航迹对比

Fig. 11 Planned track comparison in the map2

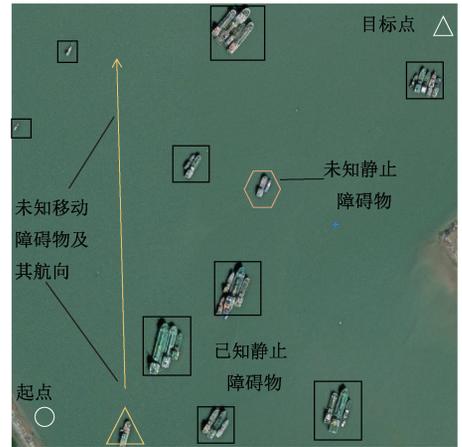
表 2 本文融合算法与其他算法性能对比

Table 2 The fusion algorithm in this paper is compared with other algorithms

环境地图	规划算法	航迹长度 /m	总转向角 度/(°)	转向次数	触障次数
Map1	融合算法	306.67	242	5	0
	IACO	293.88	205	7	7
	IAPF	362.22	372	9	0
	IMOQA-QL-DWA	303.41	445	11	0
Map2	融合算法	319.84	268	5	0
	IACO	293.88	205	7	9
	IAPF	390.54	464	11	0
	IMOQA-QL-DWA	315.61	496	12	0

择厦门市近海某日的海域实况图进行水面船艇航迹规划实验,结果如图 12 所示。图 12(a)为该海域实况图,若干船体停泊于该海域,为了兼顾实验符合水面船艇实际航行状况和实验安全性,从已知静止障碍物中分配出未知静止障碍物和未知移动障碍物,黄色箭头为未知移动

障碍物的航行方向。为了验证融合算法的实时避障性能,设置合适的移动速度保证水面船艇与未知移动障碍物在海面相遇。图 12(b)中,点线为未知移动障碍物的移动路线;实线为水面船艇的最终航迹。实验结果表明,在遭遇未知静止障碍物与未知移动障碍物时,水面船艇均能提前改变航向躲避障碍物,顺利达到目标点,本文算法可以保证水面船艇航行航迹兼具全局最优、实时避障、路径可靠,证明了本文融合算法的可行性。



(a) 海域说明图
(a) Sea area diagram



(b) 规划航行结果
(b) Planned voyage result

图 12 实验验证结果俯视图

Fig. 12 Top view of experimental verification results

6 结 论

本文针对传统 A* 算法效率低、拐点多、实用性能差等问题,综合考虑水面船艇的运动特性,对传统 A* 算法提出了相应的改进策略,提高了 A* 算法的搜索效率、削弱了路径曲折度。引入并改 DWA 法,采用了一种融合改进 A* 与 DWA 算法的规划方法用于解决现有路径规划算法的局限性。通过改进 A* 对比仿真实验与航迹仿

真实验,验证了本文改进策略的有效性和所提出的融合算法的可行性。又将所提出的融合算法与IACO算法、IAPF算法和IMOA-QL-DWA算法进行对比,本文算法能够在保证水面船艇航迹全局最优的前提下完成动态避碰,维持航行高效率的同时,减小了航行风险,且规划出的航迹更贴合水面船艇的实际航迹,明显优于其他对比算法,证明了本文融合算法的优越性。实验结果表明,本文研究具有一定的应用价值,但仅针对单一水面船艇,具有局限性。未来预计可从多水面船艇编队路径规划与控制、自主智能航行等方面进行更深入的研究。

参考文献

- [1] LAHTINEN J, KUJALA P, HIRDARIS S, et al. Remote piloting in an intelligent fairway-A paradigm for future pilotage[J]. *Safety Science*, 2020, 130: 104889.
- [2] POLVARA R, SHARMA S, WAN J, et al. Obstacle avoidance approaches for autonomous navigation of unmanned surface vehicles [J]. *Journal of Navigation*, 2018, 71(1): 241-256.
- [3] CAMPBELL S, NAEEM W, IRWIN G W. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres [J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36(2): 267-283.
- [4] LIN Y Z, FENG C H, WANG Z X, et al. UAV design and control with A * algorithm [J]. *International Core Journal of Engineering*, 2021, 7(12): 212-224.
- [5] ZHANG Y, REN B A, CHEN J. An modified rrt-based real-time route planning algorithm for early warning airplane [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(9): 106-112.
- [6] 郝琨, 邓晁硕, 赵璐, 等. 基于区域搜索粒子群算法的机器人路径规划 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(12): 126-135.
HAO K, DENG CH SH, ZHAO L, et al. Robot path planning based on area search particle swarm optimization [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(12): 126-135.
- [7] 杨立祎, 付丽霞, 王倩, 等. 多层优化蚁群算法的移动机器人路径规划研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 10-18.
YANG L Y, FU L X, WANG Q, et al. Path planning of mobile robot based on multi-layer optimization ant colony algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(9): 10-18.
- [8] 李艳生, 万勇, 张毅, 等. 基于人工蜂群-自适应遗传算法的仓储机器人路径规划 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 282-290.
LI Y SH, WAN Y, ZHANG Y, et al. Path planning of storage robot based on artificial bee swarm-adaptive genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 282-290.
- [9] TAN G G, ZOU J, ZHUANG J Y, et al. Fast marching square method based intelligent navigation of the unmanned surface vehicle swarm in restricted waters [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 95(2): 18-33.
- [10] SUN X J, WANG G F, FAN Y S, et al. An automatic navigation system for unmanned surface vehicles in realistic sea environments [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(2): 193-220.
- [11] SHI J, SU Y, BU C, et al. A mobile robot path planning algorithm based on improved A+ [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1486(3): 032018.
- [12] WANG T F, YAN X P, WANG Y, et al. Ship domain model for multi-ship collision avoidance decision-making with COLREGs based on artificial potential field TransNav [J]. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2017, 11: 85-92.
- [13] 谭智坤, 张隆辉, 刘正锋, 等. 融合改进动态窗口法与速度障碍法的无人船局部路径规划 [J]. *船舶力学*, 2023, 27(3): 311-322.
TAN ZH K, ZHANG L H, LIU ZH F, et al. Local path planning of unmanned ship based on improved dynamic window method and velocity barrier method [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(3): 311-322.
- [14] JIN Q, TANG C, CAI W. Research on dynamic path planning based on the fusion algorithm of improved ant colony optimization and rolling window method [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 28322-28332.
- [15] CHENG CH Q, HAO X Y, LI J SH, et al. Global dynamic path planning based on fusion of improved A * algorithm and dynamic window approach [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(11): 137-143.
- [16] 迟旭, 李花, 费继友. 基于改进A*算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 132-140.
CHI X, LI H, FEI J Y. Stochastic obstacle avoidance method of robot based on the fusion of improved A * algorithm and dynamic window method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 132-140.
- [17] ZOU A, WANG L, LI W, et al. Mobile robot path planning using improved mayfly optimization algorithm and dynamic window approach [J]. *Journal of Supercomputing*, 2023, 79(8): 8340-8367.
- [18] MIAO CH W, CHEN G ZH, YAN CH L, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on

adaptive ant colony algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107230.

- [19] 白秀琴, 宋金阳, 袁裕鹏, 等. 大型豪华邮轮泵控式抗横倾系统仿真分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(1): 88-96.
BAI X Q, SONG J Y, YUAN Y P, et al. Simulation analysis of the pump-controlled anti-heeling system for large cruise ships [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(1): 88-96.
- [20] LIANG L H, WEN Yu. Rudder roll stabilization with disturbance compensation model predictive control [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 24(1): 249-259.
- [21] 唐元东. 基于 CFD 方法的船舶旋回仿真研究[D]. 大连:大连海事大学, 2016.
TANG Y D. Research on ship turning simulation based on CFD method [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [22] 何红坤, 王宁. 欠驱动无人船单目视觉伺服镇定控制[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 166-174,183.
HE H K, WANG N. Monocular visual servo stabilization control for underactuated unmanned ship [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 166-174,183.
- [23] SONG Q, LI S, YANG J, et al. Intelligent optimization algorithm-based path planning for a mobile robot [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, DOI:10.1155/2021/8025730.
- [24] 江明, 王飞, 葛愿, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 113-121.
JIANG M, WANG F, GE Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 113-121.
- [25] LUO J, WANG ZH X, PAN K L. Reliable path planning

algorithm based on improved artificial potential field method [J]. IEEE Access, 2022, 10: 108276-108284.

作者简介



孙岩霆, 现为集美大学本科生, 主要研究方向为路径规划、智能算法、水面船舶智能航行。

E-mail: 1556514004@qq.com

Sun Yanting is currently an undergraduate at Jimei University. His main research interests include path planning, intelligent algorithms, and intelligent navigation of surface ships.



王荣杰, 2012 年于中山大学获得博士学位, 现为集美大学教授、博士生导师, 主要研究方向为群体智能优化算法、智能信息处理、盲源分离和电力系统故障诊断。

E-mail: roger811207@163.com

Wang Rongjie received his Ph. D. degree from Sun Yat-sen University in 2012. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Jimei University. His main research interests include swarm intelligence optimization algorithm, intelligent information processing, blind source separation and fault diagnosis of power system.



蒋德松 (通信作者), 2004 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为集美大学副教授, 主要研究方向为动力装置自动化及测试。

E-mail: jiangdesong@jmu.edu.cn

Jiang Desong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2004. He is currently an associate professor at Jimei University. His main research interests include power plant automation and testing.