

# 基于改进 A\* 算法的海上风电场运维船舶路径规划

李珍尧<sup>1,2,3,4</sup>, 万祥<sup>5</sup>, 吕洁印<sup>6</sup>, 吴兵<sup>1,2,3</sup>

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
5. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205;
6. 深圳中集智能科技有限公司, 广东 深圳 518057

**摘要:**针对传统 A\* 算法应用于海上风电场运维船舶路径规划时未考虑动态障碍物、水流和穿越航道等因素的问题,提出考虑航行风险、航向角约束和路径平滑的路径规划方法。在使用栅格法构建海上风电场水域环境地图的基础上,引入权重系数改变估计代价值在 A\* 算法总代价函数中的比例,达到平衡启发式信息强度和缩短寻路时间的目的,并通过考虑含水流的障碍物风险改进 A\* 算法的实际代价函数,提升规划路径安全性。同时在 A\* 算法中考虑航向角约束以减少遍历节点总数,将八邻域搜索设定为符合路径走向的 3 个相邻节点,提取各拐点并进行通视性检查以删除路径中的冗余拐点,使用均匀 B 样条曲线得到平滑的规划路径。以东海大桥 5 号、6 号风电场水域为例,建立涨潮路径规划场景,运维船舶需通过 9 个风机以完成运维任务;利用 4 个指标(路径长度、路径总风险值、遍历节点总数、拐点总数)对规划路径进行评价,以此验证改进 A\* 算法的有效性。仿真结果表明:在涨潮场景中,改进的 A\* 算法规划路径平滑性提升了 77.69%,规划路径总风险值降低了 52.83%,遍历节点总数降低了 30.58%,但改进的 A\* 算法规划路径比传统 A\* 算法规划路径长 252.89 m。

**关键词:**交通安全;海上风电场;路径规划;A\* 算法;运维船舶

中图分类号:U676.1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.017

## Ship path planning in offshore wind farm waters based on improved A\* algorithm

LI Zhenyao<sup>1,2,3,4</sup>, WAN Xiang<sup>5</sup>, LYU Jieyin<sup>6</sup>, WU Bing<sup>1,2,3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. Wuhan Second Ship Design Institute, Wuhan 430205, China;
6. CIMC Intelligent Technology Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** The traditional A\* algorithm applied to the path planning of offshore wind farm operation and maintenance ships has not yet taken into account the dynamic obstacles, water currents, and crossing navigation channels, therefore, this paper proposes a path planning method that considers navigational risks, heading angle constraints, and path smoothing.

收稿日期:2023-11-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB4301802);国家自然科学基金项目(52272422);湖北省科技厅项目(2024CSA093)

作者简介:李珍尧(1998—),女,硕士,研究方向为路径规划。E-mail:zhenyao.li@whut.edu.cn

通信作者:吴兵(1986—),男,研究员,研究方向为智能船舶航行安全、海事安全监管与仿真等。E-mail:bing.wu@whut.edu.cn

引用格式:李珍尧,万祥,吕洁印,等.基于改进 A\* 算法的海上风电场运维船舶路径规划[J].中国航海,2025,48(1):132-140.

LI Z Y, WAN X, LYU J Y, et al. Ship path planning in offshore wind farm waters based on improved A\* algorithm[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 132-140. (in Chinese)

On the basis of constructing the map of offshore wind farm water environment by raster method, weight coefficients are introduced to change the proportion of estimated surrogate value in the total cost function of the A\* algorithm to achieve the purpose of balancing the strength of heuristic information and shortening the pathfinding time, and the risk of obstacles containing water currents is taken into account in order to improve the actual cost function of the A\* algorithm and enhance the security of the planned paths. Meanwhile, the heading angle constraint is considered in the A\* algorithm to reduce the total number of traversal nodes, the eight-neighborhood search is constrained to three neighboring nodes conforming to the path direction, the inflection points are extracted and visibility check is performed to remove the redundant inflection points in the path, and the smooth planning path is obtained using a uniform B-spline curve. Taking the Donghai Bridge No. 5 and No. 6 wind farm waters as an example, a high tide path planning scenario is established, and the operation and maintenance ship needs to pass through 9 wind turbines in order to complete the operation and maintenance tasks; 4 indexes (path length, total risk value of the path, total number of traversed nodes, and total number of inflection points) are utilized for evaluating the planning path, so as to validate the effectiveness of the improved A\* algorithm. The simulation results show that in the high tide scenario, the planning path smoothness of the improved A\* algorithm is improved by 77.69%, the total risk value of the planning path is reduced by 52.83%, and the total number of traversal nodes is reduced by 30.58%, but the planning path length of the improved A\* algorithm is 252.89 m longer than that of the traditional A\* algorithm.

**Key words:** traffic safety; offshore wind farms; path planning; A\* algorithm; operation and maintenance ships

截至 2021 年底,中国海上风电累计装机容量达到 27.456 GW<sup>[1]</sup>。随着海上风电装机量的增长,海上风机运维的需求也随之增大<sup>[2]</sup>。在运维过程中,运维船舶需避让障碍物以安全到达指定风机,且人为失误容易导致运维船舶处于危险局面。因此,对运维路径提前进行规划,可提升运维安全性与效率,降低运维成本。

近年来,海上风电场路径规划研究得到广泛关注。谭任深等<sup>[3]</sup>提出了通用性运维路径规划模型,其中考虑了风机、电缆、能见度等因素。IRAWAN 等<sup>[4]</sup>以最小化运维成本为目标,考虑了风机、船只可用性等因素,研究了多个海上风电场和运维基地之间的运维路径规划与调度问题。ALLAL 等<sup>[5]</sup>采用蚁群算法优化了海上风机维护任务的路径,其考虑了风机、能见度、资源等因素。XIE 等<sup>[6]</sup>和薛双飞等<sup>[7]</sup>分别考虑了静态海上基础设施、电缆等因素和船舶与风机间的距离、船舶附近雷达阴影区等因素。以上作者在海上风电场路径规划的研究中考虑了静态障碍物、能见度和电缆等因素,见表 1,但缺乏对动态障碍物、水流和是否穿越航道等因素的考虑。

表 1 研究现状分析

Tab. 1 Analysis of current research status

| 因素     | 谭任深<br>等 | IRAWAN<br>等 | ALLAL<br>等 | XIE<br>等 | 薛双飞<br>等 |
|--------|----------|-------------|------------|----------|----------|
| 静态障碍物  | √        | √           | √          | √        | √        |
| 动态障碍物  | ×        | ×           | ×          | ×        | ×        |
| 水流     | ×        | ×           | ×          | ×        | ×        |
| 能见度    | √        | ×           | √          | ×        | ×        |
| 是否穿越航道 | ×        | ×           | ×          | ×        | ×        |
| 电缆     | √        | ×           | ×          | √        | ×        |

在海上风电场路径规划方法研究中,余梅等<sup>[8]</sup>融合了遗传算法与蚁群算法来求解风电场最优维护路径,融合算法避免了陷入局部最优且提升了收敛速度。ZHU 等<sup>[9]</sup>在海上风电场运维路径规划中考虑了时间窗约束,并使用动态规划算法求解路径,提升了运维路径的经济性。NIELSEN 等<sup>[10]</sup>以海上风电场运维成本最低为优化目标,使用改进遗传算法求解风电场运维问题,在算法设置中直接保留适应度高的个体,提高了算法的求解速度。以上算法虽可提高路径规划效率,但如果初始参数选择不当会削弱算法的优化能力,且在迭代次数不充分的情况下容易陷入局部最优。而 A\* 算法无须设置初始参数和迭代次数,通过设定合适的代价函数评估各扩展搜索节点的代价值,通过比较各扩展节点的代价值大小选择代价值最小的节点作为当前节点并加以扩展,其对环境信息反应快且搜索路径直接。

A\* 算法被有效应用于海上风电场路径规划中,XIE 等<sup>[6]</sup>提出了多方向 A\* 算法,扩展运维船舶可能的移动方向,以提升航行安全性并缩短路径长度。薛双飞等<sup>[7]</sup>将人工势场法与 A\* 算法结合,建立威胁势场,使船舶远离障碍物。以上作者在风电场路径规划中考虑了路径长度与航行安全,而缺乏对路径规划效率的考虑。此外,A\* 算法也被应用于各种类型的路径规划中<sup>[11]</sup>,如无人驾驶汽车领域<sup>[12]</sup>、移动机器人领域<sup>[13-14]</sup>和航海领域<sup>[15-17]</sup>。

为了保证运维船舶的航行安全和效率,本文提出了一种基于改进 A\* 算法的海上风电场水域运维船舶路径规划方法。该方法考虑了水流、动态障碍物等因素,且在路径规划过程中兼顾了运维路径长度、航行安全及规划效率。具体而言,该方法引入权

重系数和含水流的障碍物风险改进代价函数,加入航向角约束提高遍历效率,采用通视性检验和均匀B样条曲线平滑路径,并以东海大桥5号、6号风电场水域为例,考虑静态和动态障碍物、水流、是否穿越航道及电缆因素,对改进A\*算法的有效性进行了验证。

## 1 改进A\*算法的风电场水域运维船舶路径规划方法

### 1.1 风电场水域运维船舶路径规划总体框架

提出的基于改进A\*算法的海上风电场水域运维船舶路径规划总体框架包括3个步骤,如图1所示。

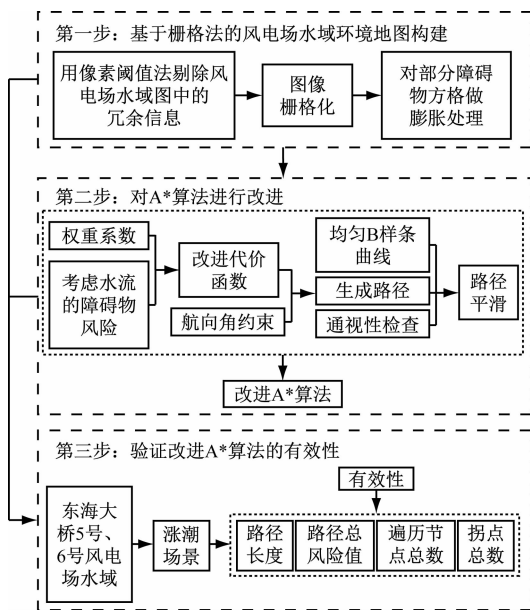


图1 船舶路径规划总体框架

Fig. 1 The framework of ship path planning

首先,采用栅格法构建风电场水域运维船舶的行驶环境。用像素阈值法对风电场水域图进行处理,然后将图像栅格化并对部分障碍物方格做膨胀处理。

其次,对A\*算法进行改进。引入权重系数和含水流的障碍物风险分别对A\*算法的总代价函数和实际代价函数进行改进;并考虑航向角约束将八邻域搜索设定为符合路径走向的3个相邻节点;利用通视性检查和均匀B样条曲线对规划路径进行平滑处理。

最后,以东海大桥5号、6号风电场水域为例,设置涨潮场景进行路径规划,利用路径长度、路径总风险值、遍历节点总数和拐点总数四个指标对规划路径进行评价,以此验证改进A\*算法的有效性。

### 1.2 基于栅格法的风电场水域环境地图构建

常用的环境建模方法有栅格法、拓扑法和可视

图法<sup>[18-19]</sup>。栅格法环境建模结构简单<sup>[20-21]</sup>,故采用栅格法建立环境地图。栅格法将环境空间S划分为 $x \times y$ 个大小相同的栅格,每个栅格对应一个环境状态,用 $N_{ij}$ 表示,则环境空间

$$S = \sum N_{ij}, i \in [1, x], j \in [1, y] \quad (1)$$

地图栅格化后,可能出现完全障碍方格、部分障碍方格和无障碍方格3种方格状态。在实际应用中,通常对部分障碍方格做膨胀处理<sup>[22]</sup>,只要方格中存在障碍就认为此方格不可达,如图2所示。每个栅格的环境状态信息

$$N_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{自由空间(可达白色方格)} \\ 0, & \text{障碍物(不可达黑色方格)} \end{cases} \quad (2)$$

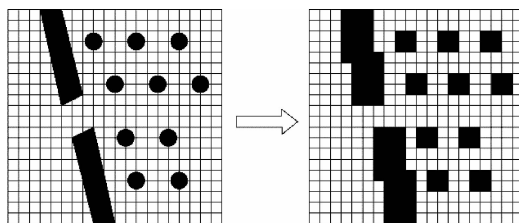


图2 部分障碍方格的膨胀处理

Fig. 2 The expansion operation of partial obstacle grids

以海上风电场水域图作为环境底图,在此基础上对图像栅格化,具体步骤如下:①利用像素阈值法剔除水域图中的冗余信息;②将水域图像转换为二值图像;③将二值图像栅格化;④对部分障碍物方格做膨胀处理。

### 1.3 改进A\*算法的代价函数

在A\*算法启发式搜索的过程中,若估计代价值 $h$ 所占比例较大,总代价函数 $f$ 的启发式信息强,虽可减少路径搜索的工作量,但规划的路径一般不是最佳;反之则启发式信息较弱,虽可优化生成路径,但会增加路径搜索工作量<sup>[23]</sup>。因此,引入权重系数改变估计代价值在A\*算法总代价函数中的比例,达到平衡启发式信息强度和缩短寻路时间的目的,公式为

$$f_n(N_k) = g_n(N_k) + \varepsilon \cdot h_n(N_k) \quad (3)$$

式中: $f_n(N_k)$ 为新定义的第 $k$ 个节点的总代价值; $g_n(N_k)$ 为考虑风险的从起始节点( $N_{st}$ )到第 $k$ 个节点( $N_k$ )的实际代价值; $\varepsilon > 0$ ,为权重系数; $h_n(N_k)$ 为从第 $k$ 个节点 $N_k$ 到目的节点 $N_{de}$ 的估计代价值。

A\*算法旨在以最小的代价找到从起始节点( $N_{st}$ )到目的节点( $N_{de}$ )的最短路径<sup>[24]</sup>,但该最短路径可能非常接近障碍物,同时,如果水流推动船舶接近某障碍物,也会增加碰撞风险。在路径规划中,既要考虑船舶到障碍物的距离,又要考虑水流的影响,因此,引入含水流的障碍物风险对实际代价函数进

行改进,提高规划路径安全,改进后的公式为

$$g_n(N_k) = g(N_k) + \beta \cdot r_o(N_k) \quad (4)$$

式中: $\beta > 0$ ,为常数。采用欧几里得距离,假设目的节点  $N_{de}$  的坐标为  $(x_{N_{de}}, y_{N_{de}})$ ,则

$$h_n(N_k) = \sqrt{(x_{N_{de}} - x_{N_k})^2 + (y_{N_{de}} - y_{N_k})^2} \quad (5)$$

$$g(N_k) = \sum_{k=1}^{q-1} d_k \quad (6)$$

式中: $q \geq 1$ , $q$  为从第  $k$  个节点  $N_k$  到起始节点  $N_{st}$  的节点数量,例如  $N_k, N_{k, \text{parent}}, N_{k, \text{parent, parent}}, \dots, N_{st}$ ,其中  $N_{k, \text{parent}}$  为  $N_k$  的父节点; $d_k$  为第  $k$  个节点到第  $k+1$  个节点的欧几里得距离。

LIU 等<sup>[15]</sup>提出了可航行节点的风险度公式,本文在风险度公式的基础上,将  $r_o(N_k)$  定义为考虑水流的障碍物风险函数,则

$$r_o(N_k) = \frac{e^{-a} p}{b} + \frac{v \cdot c}{a} \quad (7)$$

假设第  $k$  个节点  $N_k$  的坐标为  $(x_{N_k}, y_{N_k})$ 。 $a$  为从可航行节点到障碍物节点的欧几里得距离; $b$  为不同类型障碍物的风险系数,风电场运维中存在运维船舶穿越航道时,航道内有其他正常航行船舶的现象,因而在本文中设定动态船舶这一障碍物,则风电场水域的障碍物类型可分为 5 种:动态船舶、东海大桥、风力涡轮机、升压站和航标,对应的  $b$  分别为 5、5、4、4、3; $p > 0$ ,是一个常数; $v, c$  分别为水流速度和方向系数。其表达式为

$$d_k = \sqrt{(x_{N_{k+1}} - x_{N_k})^2 + (y_{N_{k+1}} - y_{N_k})^2} \quad (8)$$

$$v = \begin{cases} 1 + 0.001u, & u \leq 4l \\ 2, & u > 4l \end{cases} \quad (9)$$

$$c = \begin{cases} 0, & \cos(\theta_s - \theta_o) \geq 0 \\ -\cos(\theta_s - \theta_o), & \cos(\theta_s - \theta_o) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u$  为可航行节点到区域上边界的垂直距离; $l$  为网格长度; $\theta_s$  为水流方向与正北方向的夹角, $\theta_s \in [0, 2\pi]$ ; $\theta_o$  为障碍物与可航行节点的连线与正北方向的夹角, $\theta_o \in [0, 2\pi]$ 。

根据式(5),若可航行节点附近存在  $m$  个障碍物,则此节点具有  $m$  个风险度值,此时将选择最大值作为此节点的最终风险值。因此,可航行节点的最终风险值为

$$r_o[k] = \max\{r_o[k, 1], r_o[k, 2], \dots, r_o[k, m]\} \quad (11)$$

#### 1.4 航向角约束建模

如果不考虑方向问题,A\* 算法搜索过程中会对当前节点的 8 个相邻节点进行逐一遍历,

SOULIGNAC<sup>[25]</sup>和 DANIEL 等<sup>[26]</sup>通过限制船舶仅沿网格中心移动,解决了寻路期间的航向角问题,并减少了不必要的节点搜索。因此,为减少遍历节点总数,提升 A\* 算法的寻路效率,在算法中考虑航向角约束,通过此约束,每个可航行节点的搜索邻域被约束为三个。假设  $P_{k-1}, P_k, P_{k+1}$  为父节点、当前节点、相邻节点,则航向角约束为

$$0 \leq \theta(\overrightarrow{P_{k-1}P_k}, \overrightarrow{P_kP_{k+1}}) \leq \frac{\pi}{4} \quad (12)$$

式中: $\theta(\overrightarrow{P_{k-1}P_k}, \overrightarrow{P_kP_{k+1}})$  为向量  $\overrightarrow{P_{k-1}P_k}$  与向量  $\overrightarrow{P_kP_{k+1}}$  的夹角。

#### 1.5 规划路径平滑

考虑到智能船舶的控制较为精确,路径规划作为控制智能船舶航行的前一步,应为其规划出一条经济、可行、安全的路径,使智能船舶按照规划好的路径航行。因加入障碍物风险与航向角约束的 A\* 算法规划出的路径仍然会存在冗余拐点,这种拐折不利于船舶的平稳航行,因此,需对规划路径做平滑处理以提升路径平稳性与可行性。同时考虑到航海实践中的规划路径通常为连接航路点的直线段,文中会对平滑规划路径与折线规划路径均进行展示,为智能船舶与人工操纵船舶的路径规划提供参考。

王中玉等<sup>[23]</sup>采用垂距限值法删除冗余拐点,LIU 等<sup>[27]</sup>和 ELBANHAWI 等<sup>[28]</sup>采用 B 样条曲线局部调整而不改变整个路径形状,使路径更平滑。垂距限值法是指根据中间节点到上节点与下节点连线的距离大小来确定是否保留该节点,因垂距限值法可快速删除冗余节点<sup>[20]</sup>,且具有易于编程实现和算法简单等优点,本文基于垂距限值法的思想,首先提取路径拐点,将起始点作为当前节点,依次遍历拐点序列,对当前节点与拐点序列中其他节点之间的距离做通视性检查,若距离符合船舶航行安全距离要求且两点连线之间无障碍物,则保留该拐点,反之则删除该点,可得到拐点优化后的折线规划路径。再使用均匀 B 样条曲线对路径进行拟合,最终得到平滑的规划路径。

基于改进 A\* 算法的路径规划流程如图 3 所示。

## 2 东海风电场水域运维船舶的路径规划

### 2.1 东海风电场水域环境描述

为验证改进 A\* 算法的有效性,将其应用于东海大桥 5 号、6 号风电场水域,并与传统 A\* 算法、A\* 算法(文献[7])进行比较。东海大桥 5 号、6 号风电场水域(见图 4),含有 47 台风力涡轮机,中部 5 000

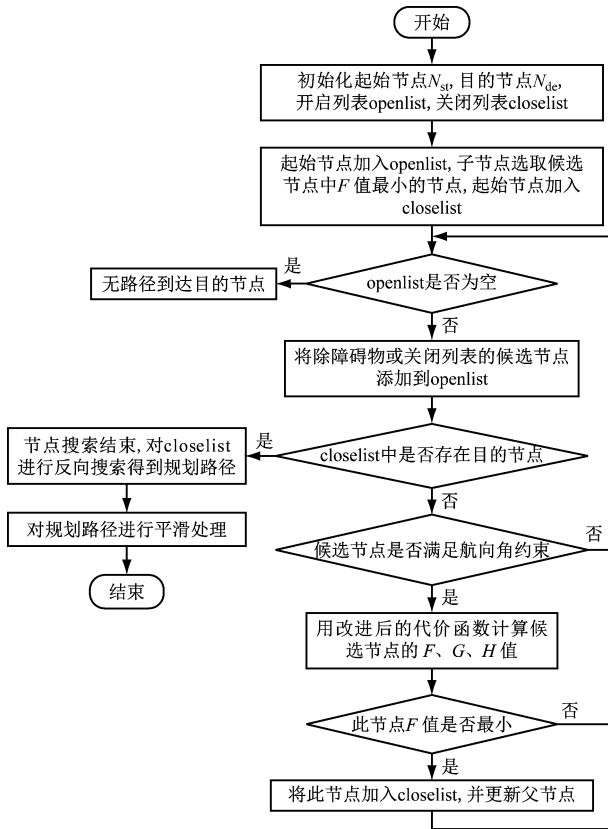


图3 改进A\*算法路径规划流程

Fig. 3 The flow chart of path planning based on improved A\* algorithm

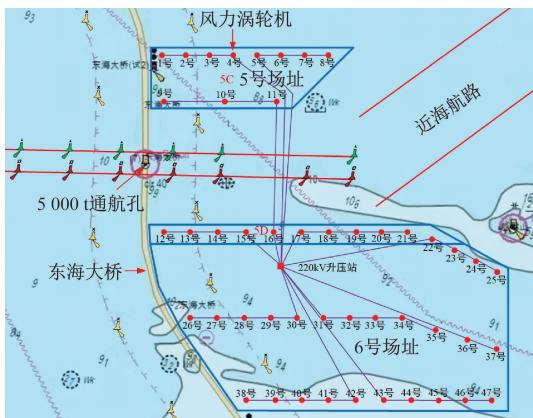


图4 东海大桥5号、6号风电场区示意图

Fig. 4 The chart of 5# and 6# wind farm waters of Donghai Bridge

载重吨及以下主通航孔附近大潮涨急流向为 $286^\circ \sim 298^\circ$ ,通航孔附近涨潮最大流速均在 $1 \text{ m/s}$ 以上。风电场西侧是东海大桥,实线包围区域是风电场的场区范围,圆点是风机的位置。当运维船舶在风电场水域内航行时,环境较复杂,需要综合考虑以上因素<sup>[6]</sup>。涨潮场景中运维船舶需到达的位置见表2。

## 2.2 东海风电场水域环境地图构建

该风电场水域为1个矩形区域( $[30^\circ 45.149' \text{N}$ ,

$121^\circ 56.874' \text{E}]$ 和 $[30^\circ 40.869' \text{N}, 122^\circ 03.198' \text{E}]$ 之间的矩形区域),见图4。对图4进行等比简化并采用1.2节的环境地图处理方法,可得到带有障碍物信息的栅格图,见图5。该区域图像尺寸为 $1540 \text{ 像素} \times 1320 \text{ 像素}$ ,每个像素点对应1个大小为 $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ 的正方形,1个方格包含100个像素点,则方格边长为 $35 \text{ m} \times 35 \text{ m}$ 。

表2 运维船舶需到达的位置

Tab. 2 The locations that the ship needs to traverse

| 场景 | 序号 | 运维船舶需到位置 | 经度                           | 纬度                          |
|----|----|----------|------------------------------|-----------------------------|
| 涨潮 | 1  | 起始节点     | $121^\circ 58.643' \text{E}$ | $30^\circ 43.463' \text{N}$ |
|    | 2  | 14号      | $121^\circ 59.492' \text{E}$ | $30^\circ 42.463' \text{N}$ |
|    | 3  | 40号      | $122^\circ 01.559' \text{E}$ | $30^\circ 40.512' \text{N}$ |
|    | 4  | 45号      | $122^\circ 02.498' \text{E}$ | $30^\circ 40.520' \text{N}$ |
|    | 5  | 32号      | $122^\circ 01.402' \text{E}$ | $30^\circ 40.520' \text{N}$ |
|    | 6  | 18号      | $122^\circ 01.185' \text{E}$ | $30^\circ 42.430' \text{N}$ |
|    | 7  | 6号       | $122^\circ 00.503' \text{E}$ | $30^\circ 44.466' \text{N}$ |
|    | 8  | 10号      | $121^\circ 59.534' \text{E}$ | $30^\circ 44.930' \text{N}$ |
|    | 9  | 目的节点     | $121^\circ 58.167' \text{E}$ | $30^\circ 43.525' \text{N}$ |

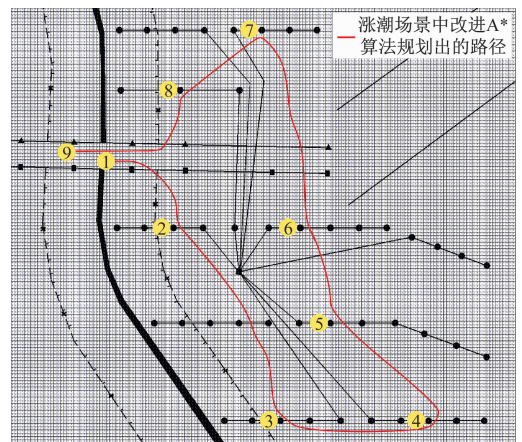


图5 涨潮场景中改进A\*算法的平滑规划路径

Fig. 5 Smooth planning path of improved A\* algorithm in the flood tide scenario

## 2.3 确定代价函数

获得带有障碍物信息的栅格图后,则可计算每个网格的代价值。为使用改进的代价函数,需确定相关参数的值,见表3。

对于式(4)中的风险函数,此案例中还存在桥梁限制区风险和穿越海底电缆风险。首先,距离桥梁边界 $1000 \text{ m}$ 范围内的区域被视为限制区,设置其风险值( $r_{li}$ )为100,普通船舶不能驶入该区域,运维船舶尽量远离该区域;其次,穿越海底电缆虽然不会给航行带来太大风险,但也不建议运维船舶频繁

表 3 参数初始化

Tab.3 Parameter initialization

| 参数                 | 值       |
|--------------------|---------|
| X 轴范围              | [1,154] |
| Y 轴范围              | [1,132] |
| 网格长度 $l/m$         | 35      |
| 涨潮水流方向/ $^{\circ}$ | 290     |
| $p$                | 100     |
| $\beta$            | 0.2     |
| $\varepsilon$      | 0.5     |

穿越,因此,将海底电缆水域的风险值( $r_{ca}$ )设置为10;最后,根据式(7)计算可航行节点与障碍物碰撞的风险值( $r_o$ )。海上风电场水域中可航行节点的总风险值

$$r_{total} = r_{li} + r_{ca} + r_o \quad (13)$$

此外,案例中设定了动态船舶这一障碍物,本文对于动态船舶的处理方式为:以栅格为载体,每隔 11.34 s 提取一次动态船舶的位置及其对应的栅格,仅把动态船舶当前位置对应的栅格做为障碍物栅格。在 A\* 算法的每一次探索中动态船舶位置所对

应的障碍物栅格就可作为静态障碍物处理,而在整个寻路过程中会存在变动的障碍物栅格,其对可航行栅格的风险值产生影响,进而影响规划路径的走向。

## 2.4 东海风电场水域运维船舶路径规划结果

涨潮场景中改进 A\* 算法的平滑规划路径见图 5。如图 5 所示,运维船舶从起始节点出发,依次通过需运维风机,最终到达目的节点。图 6 显示了涨潮场景中传统 A\* 算法和改进 A\* 算法的折线规划路径以及穿越区域的局部放大图。从图 6 可看出相较于传统 A\* 算法,改进 A\* 算法规划路径的拐点数量明显减少,也与障碍物保持安全距离。同时,由穿越区域局部放大图可知,传统 A\* 算法与改进 A\* 算法规划路径均径直穿越航道。在传统 A\* 算法规划路径穿越航道示意图中,当运维船舶准备穿越时,航道内有两艘距离较近的同向航行船舶(图 6 中用长划线和短划线表示),传统 A\* 算法规划不考虑航行风险从而径直穿越,易与航行船舶发生碰撞;但在改进 A\* 算法规划路径穿越航道示意图中,运维船舶采取减速措施,避免与航道内航行船舶发生碰撞,随后再径直穿越航道,在保证航行安全的前提下尽量减少运维船舶停留在航道内的时间。

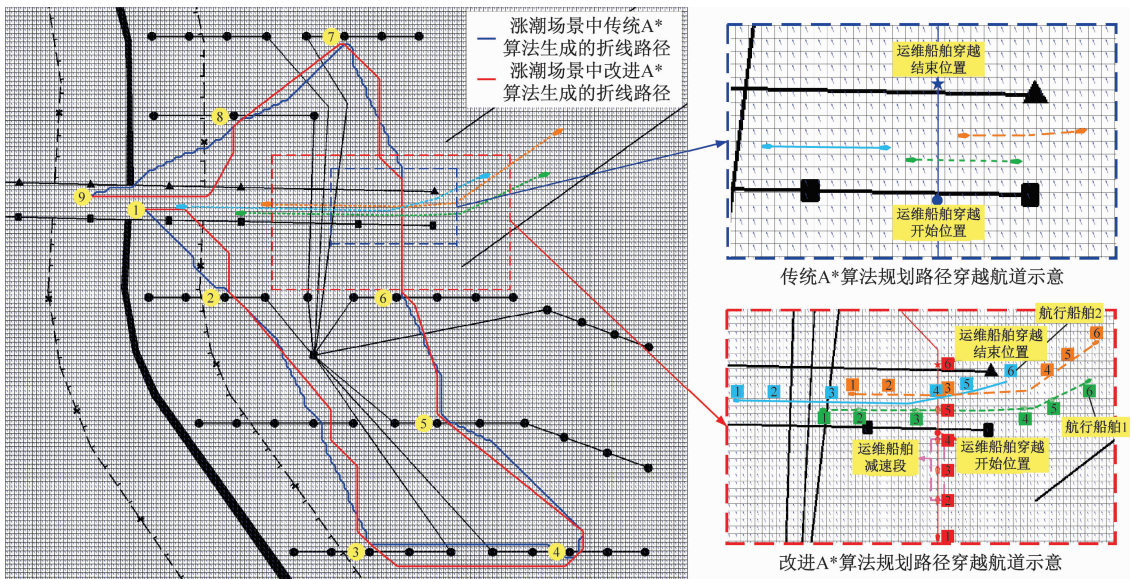


图 6 涨潮场景中传统 A\* 算法和改进 A\* 算法的折线规划路径

Fig. 6 Line planning path of traditional A\* algorithm and improved A\* algorithm in the flood tide scenario

具体而言,当运维船舶航行到竖向排列的位置 2 时,若继续正常前行则易与航行船舶 1 发生碰撞。从避碰规则的角度来说,运维船舶在穿越航道时位于航行船舶 1 右舷,运维船舶为直航船,航行船舶 1 应采取措施避让运维船舶,但因其其在航道内航行受限,无法采取有效的避让措施,因此,运维船舶采取

减速措施在航行船舶 1 驶过后再穿越航道,从而避免碰撞。同理,当运维船舶减速航行至竖向排列的位置 3 时,若按减速后速度向前行驶则易与航行船舶 2 发生碰撞,因此,运维船舶继续减速。当运维船舶减速航行至位置 4 时,航行船舶 1 已从运维船舶前方驶过,航行船舶 2 也驶至运维船舶正前方且两

船相隔一定距离,碰撞风险较小,此时运维船舶停止减速,并提速穿越航道,且由运维船舶航行至位置5时可以看出,航行船舶2已从运维船舶前方驶过,运维船舶可安全穿越航道。运维船舶穿越航道过程的速度变化见图7。

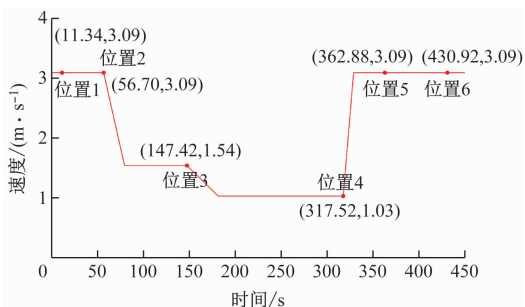


图7 运维船舶穿越航道过程的速度变化

Fig. 7 The speed change of operation and maintenance ship when crossing channel

本文利用路径长度、路径总风险值(路径节点障碍物风险之和)、遍历节点总数和拐点总数四个评价指标验证改进A\*算法的有效性。由表4可知,

表4 规划路径结果对比

Tab. 4 Comparison of the results of the planned path

| 场景 | 路径生成             | 路径长度/m       | 与风机的最小距离/m | 路径总风险值 | 遍历节点总数 | 拐点总数 |
|----|------------------|--------------|------------|--------|--------|------|
| 涨潮 | 传统A*算法           | 11 596.656 5 | 24.748 7   | 513    | 8 109  | 130  |
|    | A*算法(文献[7])      | 12 943.090 1 | 96.250 0   | 246    | 7 850  | 41   |
|    | 改进A*算法<br>(折线路径) | 11 849.543 7 | 74.777 5   | 242    | 5 629  | 29   |
|    | 改进A*算法<br>(平滑路径) | 11 641.162 3 | 68.373 9   | 240    |        |      |

此外,本文对改进A\*算法规划出的平滑路径进行反算,以确保平滑路径的安全性。由表4可知,平滑路径较折线路径而言,路径长度与路径总风险值分别减小了208.38 m和2,且两种路径与风机的最小距离均为传统A\*算法的3倍左右,这表明平滑路径也可保证运维船舶的航行安全。

综上所述可知本文对A\*算法的改进效果明显,能在略微增加路径长度的情况下提高船舶航行安全性和路径可行性。

在实际应用中,对运维船舶进行路径规划的目的是在运维船舶到达指定风机的过程中,在保持航行安全的前提下提高运维效率。在改进A\*算法的平滑路径中,运维船舶与风机的最小距离较传统A\*算法提高63.80%(见表4),利用该距离来验证改进A\*算法规划的路径满足运维船舶航行安全需求。

改进A\*算法规划路径比传统A\*算法规划路径长252.89 m,但路径总风险值、遍历节点总数和拐点总数均明显减少。具体而言,在改进A\*算法中路径总风险值、遍历节点总数和拐点总数分别减少了271、2 480和101,即规划路径总风险值下降了52.83%,遍历节点总数降低了30.58%,规划路径平滑性提升了77.69%。这表明传统A\*算法仅以最短路径长度为目标,规划的路径与障碍物碰撞的风险很高;改进A\*算法同时考虑了路径长度、航行安全、航向角约束和路径平滑性,避免船舶无法采用规划路径。

同样,由表4可知改进A\*算法与A\*算法(文献[7])规划路径的总风险值分别为242和246,可近似认为规划路径的安全性是一致的。在规划路径安全性一致的基础上,改进A\*算法规划路径比A\*算法(文献[7])规划路径短1 093.55 m,且遍历节点总数与拐点总数分别减少了2 221和12,这表明改进A\*算法中的航向角约束与路径平滑处理可有效提高A\*算法的遍历效率和规划路径的平稳性与可行性。

此外,本文中运维船舶与航道内航行船舶的避让过程符合COLREG规则,验证了改进A\*算法规划的路径在运维船舶实际航行时的可行性。针对运维船舶航行效率,可以通过量化运维船舶实际航行路径长度、航行时间来验证。

### 3 结束语

针对A\*算法在船舶路径规划中存在的缺陷,本文引入权重系数改进A\*算法的总代价函数,以平衡实际代价值和估计代价值。同时引入考虑水流及障碍物风险改进A\*算法的实际代价函数,使运维船舶能够感知前方路径中的潜在碰撞风险,并提前采取预防措施。在算法中考虑航向角约束,提高算法的遍历效率,最后对规划路径进行平滑处理。在东海大桥5号、6号风电场水域的路径规划中,本文提出

的改进 A\* 算法能够有效降低运维船舶与障碍物之间的碰撞风险,遍历的节点数量明显减少,且路径更平滑,说明了改进 A\* 算法具有良好的路径规划性能。

本文方法可为运维船舶在风电场水域航行提供参考,但在基于栅格法的风电场水域环境地图构建中,其栅格密度对空间信息描述精确度、搜索时间等有较大影响,在未来研究中可在运算允许的情况下细化栅格,提高空间信息描述精确度,进而改善规划路径质量。此外,改进后的 A\* 算法在考虑动态障碍物时会存在一定的延迟,在未来研究中可每隔 2 s 或 1 s 提取动态航行船舶的位置,使其位置近似连续变化。因此,未来研究将考虑在平衡好路径规划时间与空间描述信息精确度的基础上如何进一步提升规划路径的安全性、可行性和平滑性。此外,也将进一步考虑风、浪等因素对船舶航行安全的影响。

### 参 考 文 献

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2022 [R]. Lisbon: Global Wind Energy Council, 2022.
- [2] WU X N, HU Y, LI Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104(4): 379-393.
- [3] 谭任深,徐龙博,周冰,等. 海上风电场通用运维路径规划模型优化及仿真[J]. *计算机科学*, 2022, 49(增刊1): 795-801.
- TAN R S, XU L B, ZHOU B, et al. Optimization and simulation of general operation and maintenance path planning model for offshore wind farms[J]. *Computer Science*, 2022, 49(Suppl. 1): 795-801. (in Chinese)
- [4] IRAWAN C A, OUELHADJ D, JONES D, et al. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(1): 76-89.
- [5] ALLAL A, SAHNOUN M, ADJOUJ R, et al. Multi-agent based simulation-optimization of maintenance routing in offshore wind farms [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 157: 107342.
- [6] XIE L, XUE S F, ZHANG J F, et al. A path planning approach based on multi-direction A\* algorithm for ships navigating within wind farm waters [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 184: 311-322.
- [7] 薛双飞,谢磊,王树武,等. 海上风电场区船舶 A\* 避碰寻路算法[J]. *中国航海*, 2018, 41(2): 21-25.
- XUE S F, XIE L, WANG S W, et al. A\* Algorithm for ships avoiding offshore wind farm facility[J]. *Navigation of China*, 2018, 41(2): 21-25. (in Chinese)
- [8] 余梅,盛余洋,李红阳,等. 基于 GA-PACO 的海上风电场运维策略研究[J]. *无线电工程*, 2022, 52(10): 1834-1841.
- YU M, SHENG Y Y, LI H Y, et al. Research on operation and maintenance strategy of offshore wind farm based on GA-PACO[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(10): 1834-1841. (in Chinese)
- [9] ZHU W J, CASTANIER B, BETTAYEB B. A dynamic programming-based maintenance model of offshore wind turbine considering logistic delay and weather condition [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 190: 106512.
- [10] NIELSEN J J, SORENSEN J D. On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(1): 218-229.
- [11] 姜媛媛,张阳阳. 改进 8 邻域节点搜索策略 A\* 算法的路径规划[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(5): 234-241.
- JIANG Y Y, ZHANG Y Y. Improved path planning of A\* algorithm of domain node search strategy 8 [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(5): 234-241. (in Chinese)
- [12] 许伦辉,曹宇超,林培群. 基于多影响因素 RDMA\* 算法的无人驾驶动态路径规划[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(2): 24-36.
- XU L H, CAO Y C, LIN P Q. Dynamic path planning for unmanned driving based on multi-influencing factors RDMA\* algorithm[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38(2): 24-36. (in Chinese)
- [13] 高民东,张雅妮,朱凌云. 应用于机器人路径规划的双向时效 A\* 算法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(3): 792-795.
- GAO M D, ZHANG Y N, ZHU L Y. Bidirectional time-efficient A\* algorithm for robot path planning [J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(3): 792-795. (in Chinese)
- [14] 周自维,李长乐,赵洁,等. 复杂局部地形中的实时路径规划算法设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 46(8): 65-71.
- ZHOU Z W, LI C L, ZHAO J, et al. A real time path planning algorithm based on local complicated environment [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(8): 65-71. (in Chinese)
- [15] LIU C G, MAO Q Z, CHU X M, et al. An improved A-Star algorithm considering water current, traffic separation and berthing for vessel path planning [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): 1057.
- [16] SINGH Y, SHARMA S, SUTTON R, et al. A constrained A\* approach towards optimal path planning

- for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 169: 187-201.
- [17] LEE T, KIM H, CHUNG H, et al. Energy efficient path planning for a marine surface vehicle considering heading angle [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 107: 118-131.
- [18] 郭银景,侯佳辰,吴琪,等. AUV 全局路径规划环境建模算法研究进展[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(9): 12-18.
- GUO Y J, HOU J C, WU Q, et al. Research progress of AUV global path planning environment modeling algorithm[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(9): 12-18. (in Chinese)
- [19] 庄佳园,万磊,廖煜雷,等. 基于电子海图的水面无人艇全局路径规划研究[J]. *计算机科学*, 2011, 38(9): 211-214.
- ZHUANG J Y, WAN L, LIAO Y L, et al. Global path planning of unmanned surface vehicle based on electronic chart[J]. *Computer Science*, 2011, 38(9): 211-214. (in Chinese)
- [20] 王宇,王文浩,徐凡,等. 基于改进蚁群算法的植保无人飞机路径规划方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 103-112.
- WANG Y, WANG W H, XU F, et al. Path planning approach based on improved ant colony optimization for sprayer UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 103-112. (in Chinese)
- [21] MARCJAN K, GUCMA L. A concept of a ship domain for the use of navigational safety assessment[J]. *Journal of Konbin*, 2015, 33(1): 19-28.
- [22] 邓博文,张春华,李娟,等. 局部路径规划在无人工程机械作业中的应用[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(10): 70-73.
- DENG B W, ZHANG C H, LI J, et al. Application of local path plan for unmanned construction machinery autonomous task [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(10): 70-73. (in Chinese)
- [23] 王中玉,曾国辉,黄勃,等. 改进 A\* 算法的机器人全局最优路径规划[J]. *计算机应用*, 2019, 39(9): 2517-2522.
- WANG Z Y, ZENG G H, HUANG B, et al. Global optimal path planning for robots with improved A\* algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(9): 2517-2522. (in Chinese)
- [24] 舒伟楠,赵建森,谢宗轩,等. 基于改进 A\* 算法的水面无人艇路径规划[J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(2): 1-6.
- SHU W N, ZHAO J S, XIE Z X, et al. Path planning for unmanned surface vessels based on improved A\* algorithm[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2022, 43(2): 1-6. (in Chinese)
- [25] SOULIGNAC M. Feasible and optimal path planning in strong current fields [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(1): 89-98.
- [26] DANIEL K, NASH A, KOENIG S, et al. Theta\*: any-angle path planning on grids[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2010, 39: 533-579.
- [27] LIU D, GU D, SMYL D, et al. B-spline-based sharp feature preserving shape reconstruction approach for electrical impedance tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, 38(11): 2533-2544.
- [28] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R. Randomized bidirectional B-spline parameterization motion planning [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(2): 406-419.