

面向复杂封闭水域的 USV 安全高效 路径规划方法

伊善强¹, 姚绪飞², 杜新¹, 王力¹, 田佰军^{3*}

(1. 烟台大学 航海技术系, 山东烟台 264005; 2. 交通运输部 水运科学研究院, 北京 100088; 3. 大连海事大学 航海学院, 辽宁大连 116026)

摘要: [目的]为解决无人水面艇 (USV) 在复杂封闭水域路径规划中安全性与计算效率难以兼顾的问题, 研究一种面向通航风险约束的高安全性路径规划方法。[方法]构建风险梯度驱动的栅格地图 (RG-Map), 依据障碍物邻域距离量化通航风险梯度; 在跳点搜索 (JPS) 框架下, 提出融合路径长度与累积风险的混合代价函数实现全局引导, 设计安全优先剪枝策略与启发函数动态加权机制以自适应调节搜索过程; 进而采用 3 次 B 样条曲线对规划路径进行平滑处理, 以满足 USV 运动学约束。[结果]在多组典型封闭水域场景下的仿真表明, 与传统 JPS 算法相比, 所提改进跳点搜索 (IJPS) 算法在累积通航风险上降低约 45%, 安全裕度显著提升; 计算耗时与传统 JPS 方法保持同一量级, 效率损失在可接受范围内; 经 B 样条平滑后的路径曲率连续、航向过渡平顺。[结论]结果表明, 所提方法在封闭水域复杂环境中能够有效协调路径安全性与计算效率, 提升了 USV 规划路径的可执行性, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 无人水面艇 (USV); 封闭水域; 路径规划; 风险梯度; 改进跳点搜索算法 (IJPS)

中图分类号: U664.82; TP242.6 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.08.20

Safe and Efficient Path Planning Methods for USV in Complex Confined Waters

YI Shanqiang¹, YAO Xufei², DU Xin¹, WANG Li¹, TIAN Baijun^{3*}

(1. Department of Navigation Technology, Yantai University, Yantai 264005, Shangdong, China; 2. China Waterborne Transport Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: [Purpose] To address the difficulty of reconciling navigational safety with computational efficiency in unmanned surface vehicle (USV) path planning in complex confined waters, a safety-oriented path planning method under navigational risk constraints is investigated. [Method] First, a risk-gradient-driven grid map (RG-Map) is constructed, in which the navigational risk gradient is quantified according to the distance to obstacle neighborhoods. Within the jump point search (JPS) framework, a hybrid cost function combining path length and cumulative risk is proposed to provide global guidance; a safety-prioritized pruning strategy and a dynamic weighting mechanism for the heuristic function are further designed to adaptively regulate the search process. A cubic B-spline curve is then applied to smooth the planned path so as to satisfy the kinematic constraints of the USV. [Result] Simulation results in multiple representative enclosed-water scenarios show that, compared with the conventional JPS algorithm, the proposed improved jump point search (IJPS) algorithm reduces the cumulative navigational risk by

收稿日期: 2025-09-23; 修回日期: 2026-01-04; 录用日期: 2026-04-21

作者简介: 伊善强 (1988—), 男, 硕士、讲师。研究方向: 船舶智能控制技术、船舶货运理论与技术。

通信作者: 田佰军 (1970—), 男, 博士、教授。研究方向: 航海安全保障、船舶货运理论与技术等。

E-mail: bjtian2025@126.com

approximately 45%, yielding a markedly enlarged safety margin. The computational time remains within the same order of magnitude as that of the conventional JPS method, indicating an acceptable efficiency trade-off. The B-spline-smoothed path exhibits continuous curvature and smooth heading transitions. [Conclusion] The proposed method is shown to effectively balance path safety and computational efficiency in complex confined waters, enhancing the executability of USV planned paths and offering promising engineering applicability.

Key words: unmanned surface vehicle (USV); confined waters; path planning; risk-gradient; improved jump point search (IJPS)

0 引言

随着海洋探索、水域环境监测、水上应急救援及安防巡逻等领域的快速发展,无人水面艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)作为一种多功能、智能化的水上作业平台,正发挥着日益重要的作用,见图1^[1-2]。自主导航技术是实现USV智能化的核心,而路径规划作为导航系统的“大脑”,其性能直接

决定了USV在复杂环境中执行任务的效率与安全^[3]。特别是在湖泊和港口等存在大量静态(如岛屿和暗礁)和动态(如其他船只)障碍物的封闭水域中,如何为USV快速规划出一条既能有效规避潜在威胁,保持足够安全裕度,又符合其自身运动学约束的最优或次优路径^[4],是当前USV智能航行研究亟待解决的核心技术难题。



(a) 封闭水域船只 (Google Map)



(b) USV 在封闭水域航行

图1 USV 在封闭水域航行

Fig. 1 USV Navigation in Confined Waters

在现有的USV路径规划算法中,以A*算法为代表的传统栅格地图搜索算法因其理论上的完备性和最优性保证,得到了广泛应用^[5]。然而,传统A*算法在处理大规模、高分辨率地图时,需要逐一扩展和评估邻近节点,导致其搜索节点数量庞大,计算开销随地图尺寸呈指数级增长,难以满足USV在多变环境中对路径快速重规划的实时性要求^[6]。跳点搜索(Jump Point Search, JPS)算法作为A*算法的重大改进,通过引入一套高效的“跳点”剪枝与识别规则,能够一次性跳过大量对称且冗余的节点,在均匀代价地图中搜索效率有进一步提升^[7]。尽管如此,标准JPS算法的卓越效率建立在移动代价均一的理想假设之上,这使其在路径决策中“只见距离,不见风险”^[8]。当直接应用于复杂的封闭水域环境时,JPS算法倾向于生成紧贴岛屿、岸壁或礁石的最短路径。这种“贴边航行”策略在通航中是极其危险的,极大地增加了USV的搁浅与碰撞风险,制约了JPS算法在实际场景中的应用价值。

为了弥补这一缺陷,部分研究尝试将环境风险

因素纳入路径规划考量^[9]。如:人工势场法通过构建引力与斥力场来引导路径,但易于陷入局部最优解且难以通过狭窄通道^[10];模糊逻辑和神经网络等方法虽然能处理不确定性,但其规则制定复杂或需要大量训练数据,且算法稳定性难以保证^[11]。另一些改进的图搜索算法通过在代价函数中简单叠加障碍物距离惩罚项,虽然能在一定程度上远离障碍物,但并未从根本上改变搜索机制,难以在安全性和效率之间取得理想平衡,甚至可能因为代价的非均匀性而牺牲JPS等算法的剪枝效率^[12]。因此,如何在保留JPS算法高计算效率的核心优势框架下,深度融合对航行环境风险的精确感知与主动规避能力,使其能够在保障安全的前提下进行高效决策,成为一个亟待解决的研究课题。

为应对上述挑战,本文提出一种融合风险梯度的改进跳点搜索(Improved Jump Point Search, IJPS)算法,旨在实现USV在复杂封闭水域中安全与效率的有效平衡。首先,构建构建风险梯度策略驱动的栅格图像(Risk-Gradient Strategy Driven Grid Image,

RG-Map)作为环境模型以量化障碍物周边的通航风险,为路径规划提供决策依据;其次,提出一种融合风险梯度的IJS搜索策略,将路径长度与累积风险整合为混合代价函数,并嵌入JPS的跳点扩展与剪枝规则,通过动态调整启发函数权重,实现对安全性与指向性的自适应平衡,从搜索源头规避高风险区域;最后,集成3次B样条平滑机制,对离散航点进行优化,生成满足USV非完整运动学约束的可执行轨迹。

1 风险梯度策略驱动的栅格地图

栅格图是一种在机器人领域广泛应用的环境建模方法。该方法通过将连续空间的环境地图离散化,

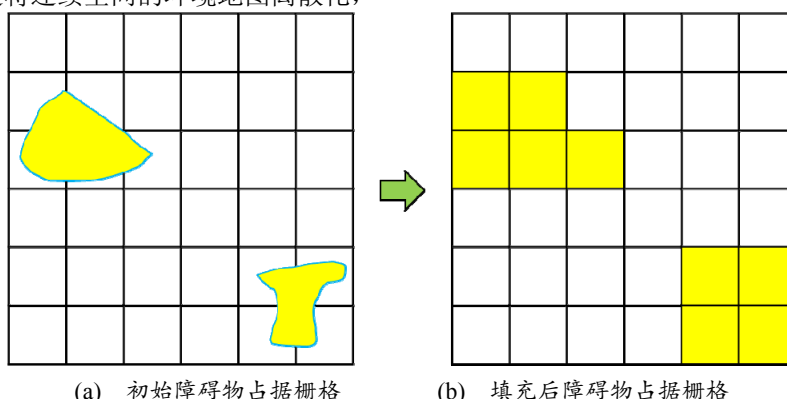


图2 不规则障碍物填充

Fig. 2 Irregular Obstacle Filling

选取千岛湖作为地图环境建模地点,其复杂的水域环境和众多岛屿为USV的路径规划提供了理想的测试环境^[15]。本文选择千岛湖中1个9.5 km×5.6 km的复杂水域作为实验区域,并将其卫星图像

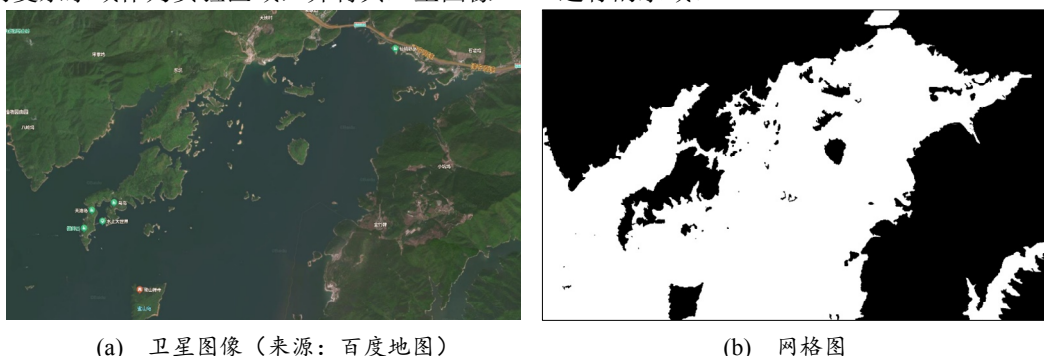


图3 卫星图像离散为网格图

Fig. 3 Satellite Imagery Discretized into a Grid Map

为了提升USV在复杂水域中的航行安全性,提出一种RG-Map环境建模方法。该方法通过对障碍物进行安全膨胀,并结合欧氏距离变换构建随距离单调递减的风险代价函数,从而生成分层风险栅格图。具体而言,首先,对障碍物集合实施形态学扩张以

划分为可通行单元和不可通行单元,从而实现对复杂环境的结构化表达^[13]。环境地图本质上由像素构成,在具体操作中,将像素点转化为二进制数值,其中,值为0的单元表示可通行区域,值为1的单元表示静态障碍物区域,这样连续环境被转换为一个二值矩阵,便于计算机高效存储与处理^[14]。为了构建有效的栅格图,需要对没有完全占据整个单元格的障碍物进行填充,使其完全覆盖其所在的单元格,见图2,这一处理将不规则形状的障碍物栅格化为完整的单元格,确保每个单元格的状态(可通行或被占据)都清晰明确,简化环境信息,为路径规划算法奠定地图基础。

离散化为栅格图,见图3(a)。图3(b)为栅格化后的结果,其中每个栅格单元的分辨率为1 m,图中的黑色区域代表被视为障碍物的岛屿,白色区域则代表可通行的水域。

保证安全裕度;随后,计算自由栅格点到最近扩张障碍物的最小距离;最后,利用风险映射函数将距离转化为分层或连续的风险代价值。该风险成本函数 $R(c)$,通常被定义为与单元格 c 到最近的扩展单元格的距离 d 相关的分段函数,见式(1)。

$$R(c) = \begin{cases} 5 & d \leq S_1 \\ 4 & S_1 < d \leq S_2 \\ 3 & S_2 < d \leq S_3 \\ 2 & S_3 < d \leq S_4 \\ 1 & d > S_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中： d 为自由栅格单元与最近障碍物扩展单元之间的欧氏距离； S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 为界定不同风险层级的距离阈值。

为了保护环境建模的物理合理性和工程适用性，本文依据USV的物理属性与运动学约束对 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 进行了具体定义。

1) 硬约束边界 S_1 。 S_1 对应最高风险区域（风险值5），其取值由USV的船体外接圆半径 R_{body} 与定位系统误差 δ_{gps} 决定，即 $S_1 \approx R_{\text{body}} + \delta_{\text{gps}}$ 。这代表了防止发生物理碰撞的底线安全距离。

2) 机动感知边界 S_4 。 S_4 对应风险梯度的最外层（风险值2），其取值依据USV在巡航速度下的最小转弯半径 R_{min} 设定，即 $S_4 \geq R_{\text{min}} + S_1$ 。这一设定确保了当USV进入 $d \leq S_4$ 的区域时，规划算法能够感知到潜在风险，并预留出足够的物理空间供USV执行转向或减速等规避动作。

3) 梯度过渡层 S_2 和 S_3 。在 S_1 与 S_4 之间进行等间距划分（或线性插值），构建逐级递减风险缓冲带。

通过上述设定，计算所有未被占据单元格的危险成本 $R(c)$ ，构建出一个带有物理安全梯度的完整栅格图。扩展单元格附近会形成一个风险值梯度逐渐降低的层次结构，表示不同区域的风险等级，见图4。

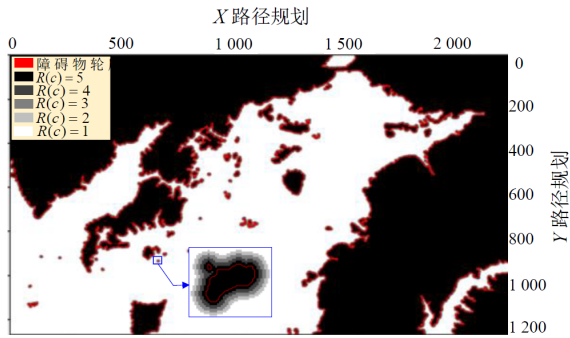


图4 风险梯度策略驱动的栅格图像

Fig. 4 Grid Map Driven by a Risk Gradient Strategy

与传统二值栅格建模相比，RG-Map通过引入分层风险梯度场实现了通行风险的量化，并可在大尺度场景中高效生成，可作为全局搜索的代价函数或局部优化的排斥势场，同时支持硬约束与软约束建模。在应用中，RG-Map表现为由内向外逐级递减的风险环带，不同层级对应从禁区到低风险区的渐变等级，从而在规避高风险区域的同时，兼顾搜索效率。

2 改进跳点搜索算法的路径规划

JPS算法由于假设移动代价均匀，仅依靠识别“强迫邻居”和“跳点”进行空间剪枝，虽能提升搜索效率，但难以体现不同区域的风险差异，从而在复杂封闭水域中容易产生冗余路径，且安全性不足^[16]。针对这一挑战，本文提出一种IJPS算法，将其核心代价函数和搜索规则引入环境风险模型，将路径规划与风险梯度场深度融合，从而在保持高效搜索性能的同时，能够主动规避高风险区域，生成兼顾安全性与计算效率的全局最优路径。

2.1 融合安全风险的混合代价函数

为实现USV在封闭水域的航行规划对安全风险的感知和量化，对传统几何距离代价函数进行改进，构建综合考虑距离与风险的混合代价函数 $g'(n)$ 。

$$g'(n) = g_{\text{dist}}(n) + \omega \sum_{c_i \in \text{Path}(\text{start}, n)} R(c_i) \quad (2)$$

式中： $g_{\text{dist}}(n)$ 为起点到节点 n 的传统几何路径长度； $\sum_{c_i \in \text{Path}(\text{start}, n)} R(c_i)$ 为起点到节点 n 路径上所有单元格的

累积风险成本，其中， $\text{Path}(\text{start}, n)$ 为路径上的单元格集合， $R(c_i)$ 为单元格 c_i 的风险成本； ω 为风险权重系数，用于调节算法对安全的敏感度。

当 ω 较高时，算法会倾向于更安全的路径；当 ω 较低时，算法则侧重于寻找最短路径，该参数的引入使算法能够根据不同任务需求（如紧急任务和常规巡航等）灵活调整路径规划策略。

通过混合代价函数，算法在节点扩展时主动规避高风险区域，使路径规划由“最短路径”转变为“综合最优路径”，在兼顾计算效率的同时提升安全性。

2.2 动态通行风险的跳点搜索策略

JPS算法依赖均匀代价地图，其效率主要来源于“强迫邻居”和“跳点”的空间剪枝^[17]。然而，在非均匀代价地图中，标准JPS的搜索规则易失效。本文提出的IJPS算法通过引入通行风险的自适应搜索机制，以提升复杂水域中的路径安全性与效率。

2.2.1 安全优先的邻居剪枝策略

在识别“跳点”时，不仅考虑物理障碍物，还将风险成本作为剪枝依据。当搜索路径趋近高风险区时，算法自动舍弃“高成本”路径，从而在狭窄水道内保持安全间距，有效避免危险贴边航行。

2.2.2 启发函数动态加权

为兼顾搜索效率和路径安全性，在启发函数 $h(n)$ 中引入风险相关的动态权重 $\varepsilon(n)$ ，并构建新的代价函数，其中， $\varepsilon(n)$ 根据节点所在区域的风险水平自适应调整。

$$\varepsilon(n) = 1 + \varepsilon_{\text{max}} \left[1 - \frac{R(c_n)}{R(c_{\text{max}})} \right] \quad (3)$$

$$f'(n) = g'(n) + \varepsilon(n)h(n) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: c_n 为节点 n 所在栅格单元; $\varepsilon_{\max}$ 为预设的最大权重增益; $R(c_{\max})$ 为地图中的最大风险值; $f(n)$ 为总代价函数。

当USV在开阔安全水域时, $\varepsilon(n)$ 接近 $(1+c_{\max})$, 权重趋于放大, 搜索过程更具方向性, 显著提升计算效率; 在复杂或狭窄水域时, $\varepsilon(n)$ 接近1, 权重逐渐回归常规值, 搜索更为谨慎, 从而保证路径的安全性与可行性。

综上所述, IJPS算法通过融合安全风险代价函数与动态通行风险的跳点搜索策略, 在封闭水域路径规划中兼顾计算效率与航行安全性。

2.3 考虑路径的平滑性

IJPS算法生成的离散路径点存在不平滑、导数不连续的问题, 难以满足USV的运动学约束并影响航行稳定性。为解决该问题, 采用3次样条插值(Cubic Spline Interpolation, CSI)方法对离散路径进行平滑处理。该方法确保插值曲线的2阶连续性, 即曲线本身、1阶导数(速度和航向等)和2阶导数(曲率)均连续, 从而满足USV平稳跟踪的要求。为了平衡路径的平滑度与拟合精度, 引入关键点提取步长 λ 对IJPS生成的原始路径点集 P_{raw} 进行降采样处理。当 $\lambda=1$ 时, 所有栅格点均被选为控制点, 路径紧贴栅格但曲率突变严重; 当 λ 增大时, 控制点稀疏, 平滑效果增强但可能产生较大的拟合偏差。经试验验证, 选取 $\lambda=5$ 作为最佳提取步长。设提取后的离散路径点(即样条插值控制点)为

$$\begin{cases} P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\} \\ p_i = \{x_i, y_i\} \end{cases} \quad (5)$$

3次样条插值的目标是找到1组分段3次多项式函数 $S_i(t)$, 其中每一段 $S_i(t)$ 定义在区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 上, 并连接点 p_i 和 p_{i+1} 。对于 x 和 y 坐标, 可分别表示为

$$\begin{cases} S_{x,i}(t) = a_i(t-t_i)^3 + b_i(t-t_i)^2 + c_i(t-t_i) + d_i \\ S_{y,i}(t) = e_i(t-t_i)^3 + f_i(t-t_i)^2 + g_i(t-t_i) + h_i \\ t \in [t_i, t_{i+1}] \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 、 e_i 、 f_i 、 g_i 和 h_i 为分段3次样条插值

的系数, 由边界条件与连续性条件唯一确定; $[t_i, t_{i+1}]$ 为第 i 段路径对应的参数区间端点; $S_{x,i}(t)$ 和 $S_{y,i}(t)$ 分别为区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 内路径点的 x 和 y 坐标插值函数。

通过求解线性方程组生成平滑路径, 实现曲线连续, 保证USV航迹可行性与跟踪鲁棒性。路径经采样校验, 如侵入障碍物则插入中间节点并重新插值, 最终将修正后的离散路径转为符合运动学约束的连续航迹, 为精准控制提供保障。

3 仿真试验与结果分析

通过仿真试验验证所提出的IJPS算法在封闭水域环境下为USV路径规划的有效性。试验基于Intel Core i7-12700K处理器(4.5 GHz)和32 GB DDR5内存的硬件平台, 采用Python 3.11作为主要仿真环境, 地图环境使用第2节构建的千岛湖水域RG-Map。通过在2种代表性场景下与基准算法的对比分析, 以及路径平滑处理后的性能评估, 验证IJPS算法在路径安全性、计算效率和实际可行性方面的优势。

3.1 对比算法与试验场景设计

为系统评估IJPS算法在封闭水域USV路径规划中的性能, 本文在统一的RG-Map环境下, 将A*算法及经典JPS算法进行对比。此举旨在分别验证风险梯度策略的有效性与“跳点”加速机制在风险约束下的表现。性能评判依据4项定量指标: 1) 路径长度衡量规划路径的几何最优性; 2) 路径累积风险值 $\Sigma R(c)$ 通过累加路径所经所有栅格单元的风险成本以量化安全性, 数值越低表明路径越安全; 3) 计算时间反映算法从启动到找到目标节点的执行效率, 以ms为单位; 4) 扩展节点数作为硬件无关指标, 通过统计搜索过程中从OPEN列表中取出并扩展的节点数量来衡量搜索空间规模与效率。该对比框架旨在从几何最优性、安全性与计算效率3个维度验证IJPS算法相较于基准算法的有效性与优势。

仿真试验设计2个典型测试场景, 见图5。图5(a)为开阔水域长距离导航场景, 其特点为起终点间隔较远, 中间存在大片可通行水域, 主要用于评估算法的搜索效率。

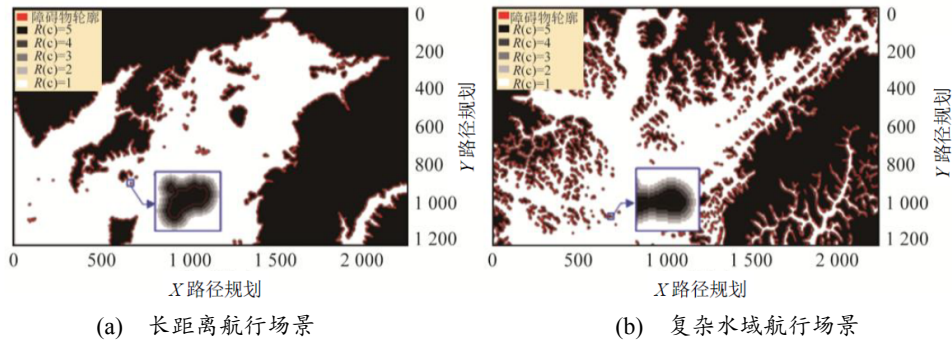


图5 2个典型的测试场景

Fig. 5 Two Typical Test Scenarios

图5(b)为复杂水域穿越场景,其特点是路径需穿越岛屿间的狭窄通道,主要用于评估算法在复杂环境中的路径安全性。

3.2 试验结果与分析

为评估所提出的IJPS算法的综合性能,将基于第3.1节所设计的试验场景与评价指标,对IJPS算法、A*算法和JPS算法的路径规划结果进行对比分析。随后,将对IJPS生成的路径进行平滑处理,并验证其

在实际USV导航任务中的可行性。

3.2.1 路径规划结果对比分析

千岛湖水域的2种典型场景:场景1起点为(386, 886)、终点为(1 680, 358);场景2中起点为(460, 290)、终点为(1 170, 280)。场景1下3种算法的路径规划结果见图6,场景2下3种算法规划的结果见图7,不同算法规划的路径结果数据见表1。

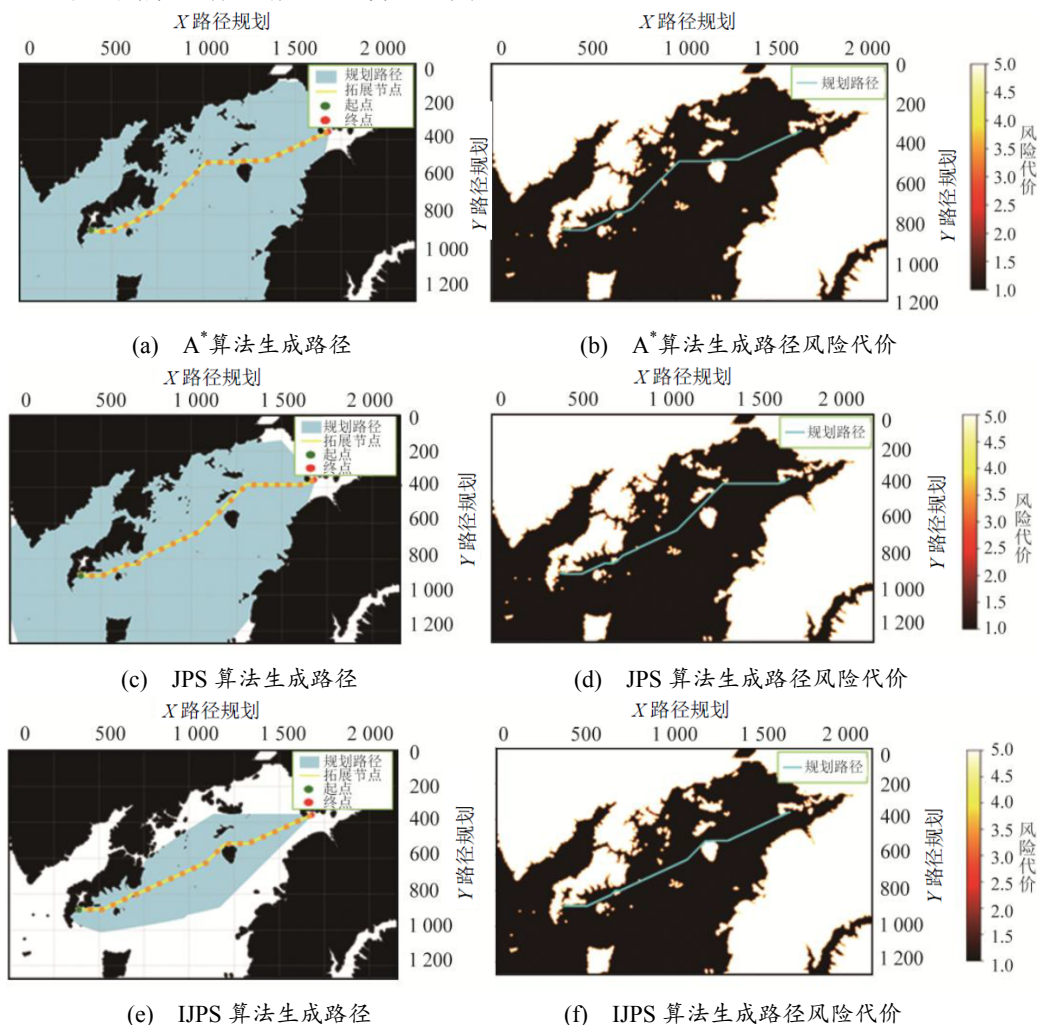


图6 场景1中路径规划结果

Fig. 6 Path Planning Results in Scenario 1

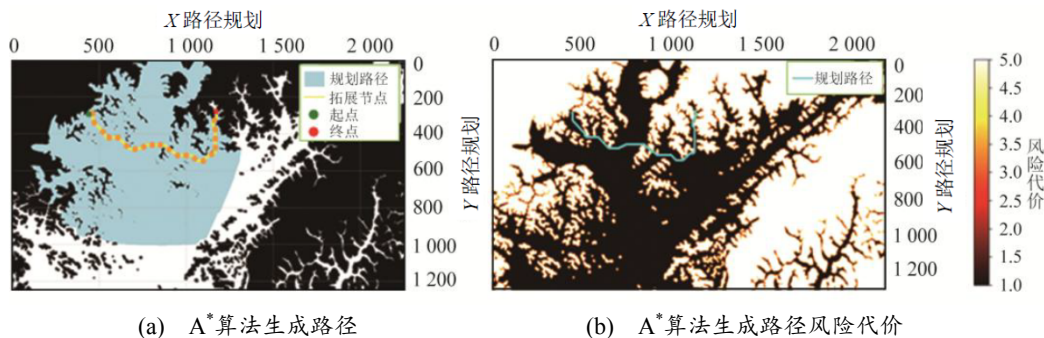


图7 场景2中路径规划结果

Fig. 7 Path Planning Results in Scenario 2

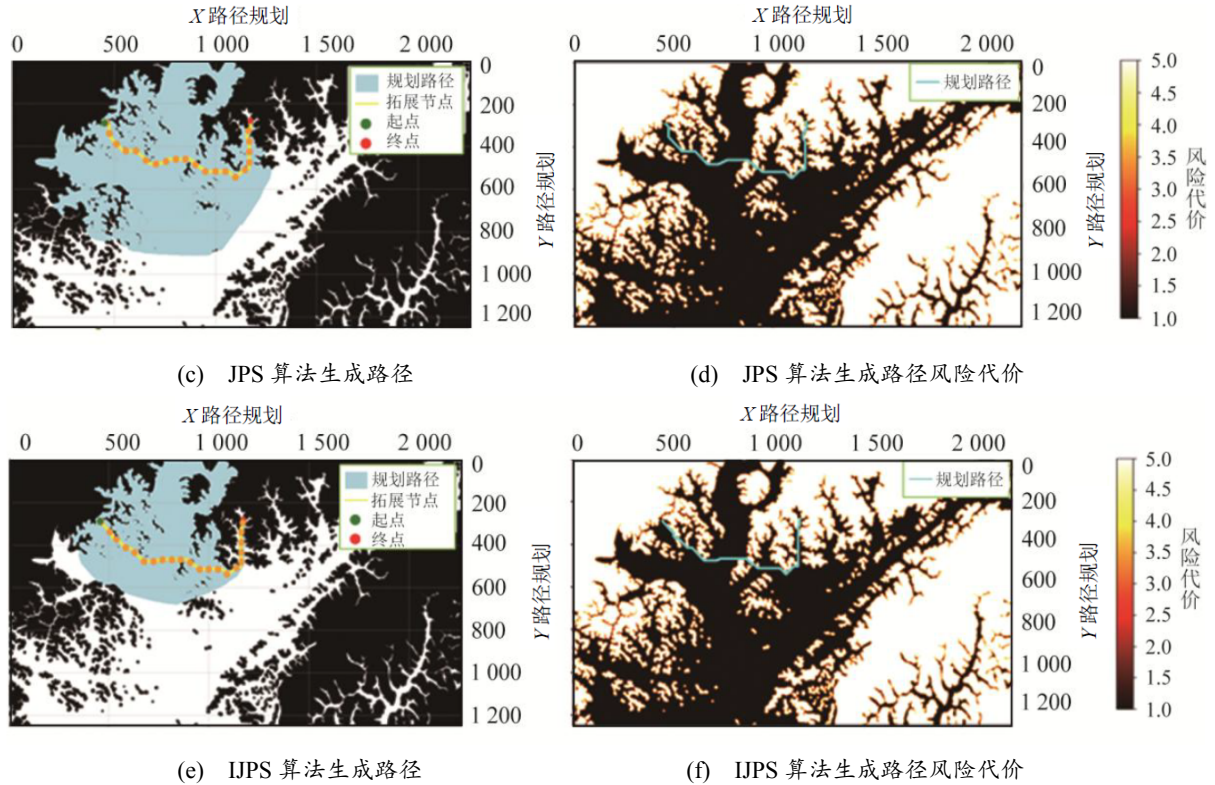


图 7 场景 2 中路径规划结果 (续)

Fig. 7 Path Planning Results in Scenario 2 (Continued)

表 1 路径参数对比结果

Tab. 1 Comparison Results of Path Parameters

场景	算法	路径长度/m	路径积累风险值 $\Sigma R(c)$	计算时间/ms	扩展节点数
场景 1 (开阔水域)	A*	1 517	1 351	2 958	1 187 517
	JPS	1 503	1 324	2 614	1 092 541
	IJPS	1 435	1 295	1 236	369 894
场景 2 (复杂水域)	A*	1 145	1 065	3 021	634 817
	JPS	1 132	1 003	2 951	564 817
	IJPS	1 059	980	1 436	292 874

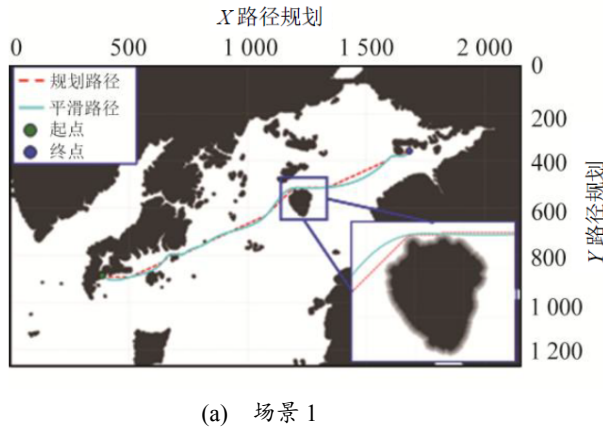
场景1用于评估算法在大范围、低密度障碍物环境下的搜索效率。图6为3种算法的路径规划结果及性能对比, 其中: 左侧图像中绿色原点为起点, 红色点为终点, 蓝色区域表示搜索过程中的扩展节点; 右侧图像为规划路径的通行风险, 柱状为通行风险分布。从路径长度角度, IJPS算法表现最优, 规划路径长度为1 435 m, 相比A*和JPS算法缩短4.5%以上, 如图6(e)中路径长度小于图6(a)和图6(c)中的路径长度。就计算效率来说, JPS算法凭借其“跳点”机制, 通过压缩搜索空间, 其计算时间(2 614 ms)与扩展节点数(1 092 541)远优于传统的A*算法。IJPS算法继承了这一优势, 计算时间(1 236 ms)和扩展节点数(369 894)优于JPS和A*算法, 这一优势在图6的可视化结果中得到直观印证: IJPS算法的搜索扩展区域远小于A*和JPS算法。在安全性方面,

IJPS的路径累积风险值(1 295)比A*(1 351)和JPS(1 324)分别降低了4.1%和2.2%。如图6所示, A*与JPS算法为追求最短距离, 其路径紧贴岛屿边缘, 进入了高风险区域, 见图6(a)和图6(c)。相比之下, IJPS算法通过将风险梯度集成到其启发式函数和代价函数中, 成功规划出一条主动远离障碍物、安全性更高的航线, 见图6(e), 验证了其在复杂环境下路径规划的综合优越性。

场景2用于验证算法在复杂岛屿群环境下的路径规划能力, 该场景对风险规避与精细寻径提出了更高要求。图7为3种算法的结果与性能对比。在路径长度方面, IJPS生成的路径为1 059 m, 略短于A*和JPS, 且在图7(e)与图7(a)和图7(c)的对比中直观可见。在计算效率方面, 尽管障碍物数量增多缩短了“跳点”间距, JPS与IJPS的效率仍显著优于A*, 其

中, IJPS耗时1 436 ms, 相较A* (3 021 ms) 和JPS (2 951 ms) 均缩短逾50, 验证了“跳点”搜索在复杂约束下的高效性。在路径安全性方面, IJPS的累积风险值为980, 明显低于A* (1 065) 和JPS (1 003), 风险降幅分别达到35.4%和34.5%。如图7(a)和图7(c)所示, A*和JPS在穿越狭窄水道时路径贴近岛屿边缘, 潜在风险更高。

综上所述, IJPS算法在封闭水域USV路径规划任务中, 尤其是在需要兼顾高安全性和高效率的场景下, 具有显著的综合优势。



3.2.2 路径平滑与可行性验证

栅格法规划的路径由一系列连接栅格中心的折线段构成, 包含大量的锐角转弯, 这不符合USV的运动学和动力学约束, 无法被直接执行。为解决此问题, 采用3次B样条曲线对IJPS算法生成的原始路径进行平滑处理, 以生成曲率连续且适合USV跟踪的航行轨迹。

B样条曲线具有良好的局部控制性, 调整一个控制点仅影响曲线的局部形状, 这使得平滑后的路径能很好地逼近原始路径, 避免与障碍物发生碰撞。

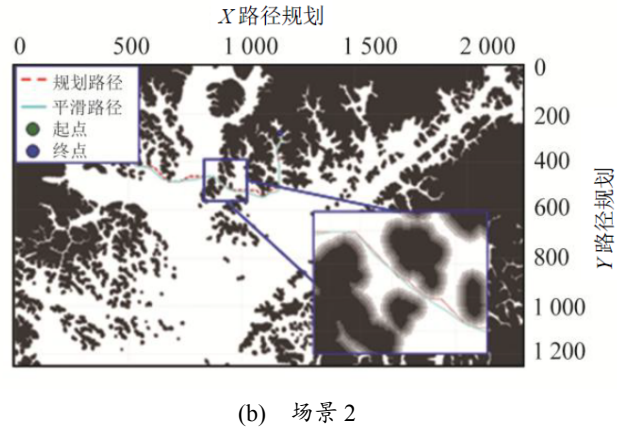


图8 IJPS 路径平滑处理前后对比

Fig. 8 Comparison of IJPS Paths Before and After Smoothing Processing

表2 IJPS 路径平滑前后性能对比

Tab. 2 Performance Comparison of IJPS Paths Before and After Smoothing

场景	性能指标	原始路径	平滑后路径	变化率
场景1 (开阔水域)	路径长度/m	1 435.00	1 473.01	2.65%
	路径风险值累计	1 295	520	-59.99%
	最大曲率	—	0.117 4	—
场景2 (复杂水域)	路径长度/m	1 059.00	1 105.00	4.34%
	路径风险值累计	980	863	-11.94%
	最大曲率	—	0.132 1	—

路径平滑处理对航行安全性和路径质量的提升效果显著, 但其影响程度因环境复杂性而异。如表2所示, 在开阔水域 (场景1), 平滑后的路径长度仅增加了2.65%, 而路径风险累计值则实现了高达59.99%的显著下降。这种“低成本、高收益”的权衡关系, 其内在机理在于3次样条插值的几何特性与 λ 参数的调控作用:

1) 长度增加的必然性 (几何代价)。原始IJPS路径由离散栅格中心连线构成, 包含大量无法执行的锐角转向。样条插值为了保证2阶导数 (曲率) 连续, 必须在转角处生成满足 C^2 连续性的过渡弧线。这种由“折线”向“曲线”的拓扑变换, 本质上是通过增加弧长来换取有限的曲率半径, 因此, 路径长度的微量增加是满足USV运动学约束的必要物理

代价。

2) 风险降低的机理 (平滑收益)。原始栅格路径受限于网格分辨率, 往往呈锯齿状紧贴障碍物的高风险边缘 (RG-Map的高梯度区)。通过设定合理的提取步长 ($\lambda=5$), 插值曲线能够滤除原始路径中的高频抖动 (锯齿噪声)。依据样条函数的最小曲率能量原理, 生成的轨迹会自动在控制点之间寻找最平滑的过渡带, 从而使USV的航迹从障碍物边缘的锯齿尖端 (高风险点) 向外侧回撤, 自然地规避了高风险梯度的累积。

综上所述, 平滑处理将路径转化为曲率连续的曲线, 量化数据显示其最大曲率 (场景1为0.117 4, 场景2为0.132 1) 均在USV的运动学约束范围内。这一改进不仅证明了平滑轨迹的可行性, 更确保了路

径规划能与底层控制器无缝衔接, 为精确跟踪提供可靠输入。

3.2.3 噪声干扰下的鲁棒性分析

实际水面环境中, 受风浪扰动及传感器精度限制, USV的定位信息与障碍物感知往往存在不确定性。为了验证IJPS算法在非理想感知条件下的工程实用性, 在仿真环境中引入高斯白噪声以模拟传感器误差, 对比不同算法的鲁棒性表现。试验设定定位误差 δ_p 和感知偏差 δ_s 均服从高斯分布 $N(0, \sigma^2)$, 在场景2(复杂水域)中进行100次蒙特卡洛模拟, 在每次路径搜索过程中, 对USV的当前坐标及障碍物边界施加随机扰动。若规划路径在扰动后与障碍物发生重叠, 则判定为“碰撞失效”。

图9为在不同噪声强度 δ (0.5 m~3.0 m)下的路径规划成功率变化曲线。由图9可知: 随着定位噪声标准差 σ 的增加, 2种算法的规划成功率呈现出截然不同的演变趋势。

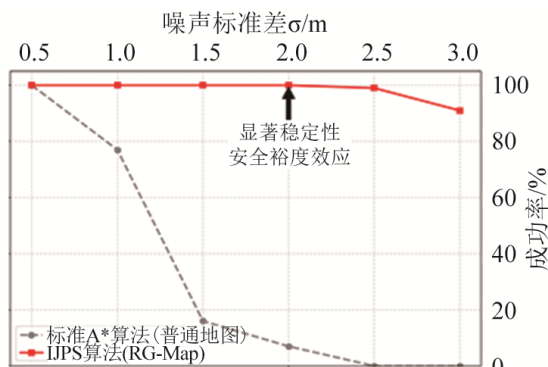


图9 噪声干扰下的算法鲁棒性测试

Fig. 9 Robustness Test of Algorithm Under Noise Interference

1) 传统算法的脆弱性。成功率随 σ 增大呈断崖式下降: $\delta=0.5$ m时为100%, $\delta=1.0$ m时降至约82%, $\delta=1.5$ m时骤降至20%, $\delta \geq 2.5$ m后几乎归零。根本原因在于A*严格遵循最短路径原则, 航迹紧贴障碍物边缘、安全距离接近零, 与之同量级的定位漂移即可触发碰撞判据。

2) IJPS的强鲁棒性。相比之下, IJPS算法展现了显著的宽域稳定性。在 $\delta \in [0.5, 2.0]$ m内成功率恒为100%, $\delta=2.5$ m时仍保持约95%, $\delta=3.0$ m强噪声工况下仍达约88%; 在 $\delta=1.5$ m处2种算法成功率差距达80%。这一稳定性源于RG-Map构建的风险梯度场: 代价函数中的 $R(c_n)$ 项迫使规划路径向低风险区域偏移, 形成隐式的“容错缓冲带”, 其宽度与可容忍噪声阈值相当——故 $\delta \leq 2.0$ m时扰动被完全吸收, $\delta > 2.0$ m后成功率才缓慢下降。

3) 工程适配结论。试验结果验证了本文策略通

过“以空间换安全”的机制, 有效补偿了感知系统的精度缺陷。相较于传统方法, IJPS算法在包含不确定性的实际工程环境中具有更强的鲁棒性与环境适应能力。

4 结论

本文针对无人水面艇(USV)在复杂封闭水域中兼顾航行安全与计算效率的难题, 提出了一种融合风险梯度IJPS算法。首先, 构建了RG-Map, 通过静态障碍物膨胀和距离变换生成分层风险场, 为路径规划提供量化的环境风险信息; 其次, 提出了融合几何距离与累积风险的混合代价函数, 并引入动态通行风险的跳点搜索策略, 使算法在高风险区域更加谨慎, 在开阔水域保持高效。仿真结果表明: IJPS在典型水域场景下的路径累积风险值较对比传统算法最高降低35.4%, 同时保持与JPS相当的计算效率, 优于带A*算法; 经过3次B样条平滑处理, 生成路径能满足USV的运动学约束。综上所述, 所提算法实现了效率与安全性的平衡, 为USV在复杂水域的自主、安全导航提供了有效技术支撑。

未来工作可从4个方面推进: 1) 扩展至包含船只和浮动障碍物等动态场景, 结合轨迹预测与动态风险评估实现实时避障; 2) 引入水流、风场和水深等多源环境要素, 构建更贴近实际的综合风险场; 3) 将USV的运动学与动力学约束直接嵌入搜索过程, 避免后处理带来的次优路径; 4) 面向实艇部署, 通过多源传感器感知与现场试验验证算法在真实水域中的鲁棒性与实用性。

参考文献:

- [1] LIU Z X, ZHANG Y M, YU X, et al. Unmanned Surface Vehicles: an Overview of Developments and Challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71-93.
- [2] 张树凯, 刘正江, 张显库, 等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运, 2015, 38(9): 29-36.
ZHANG S K, LIU Z J, ZHANG X K, et al. Development and Prospect of Unmanned Surface Vessels (USVs)[J]. World Shipping, 2015, 38(9): 29-36.
- [3] ZHOU C H, GU S D, WEN Y Q, et al. The Review Unmanned Surface Vehicle Path Planning: Based on Multi-Modality Constraint[J]. Ocean Engineering, 2020, 200: 107043.
- [4] 高炳, 王林, 张少明, 等. 应用粒子群优化算法改进无人船航行路径规划研究[J]. 船舶, 2022, 33(6): 47-54.
GAO B, WANG L, ZHANG S M, et al. On

- Improvement of Path Planning of Unmanned Ship Using Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. *Ship & Boat*, 2022, 33(6): 47-54.
- [5] 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.
- [6] CHEN Y D, PANG J H, GOU Y C, et al. Research on the A* Algorithm for Automatic Guided Vehicles in Large-Scale Maps[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(22): 10097.
- [7] 刘荣华, 王欣, 吴迪, 等. 改进双向动态 JPS 算法的机器人全局路径规划[J]. *计算机应用研究*, 2024, 41(4): 1117-1122.
- LIU R H, WANG X, WU D, et al. Improved Bidirectional Dynamic JPS Algorithm for Global Path Planning of Mobile Robot[J]. *Application Research of Computers*, 2024, 41(4): 1117-1122.
- [8] 张庆, 刘旭, 彭力, 等. 融合 JPS 和改进 A* 算法的机器人路径规划[J]. *计算机科学与探索*, 2021, 15(11): 2233-2240.
- ZHANG Q, LIU X, PENG L, et al. Path Planning for Mobile Robots Based on JPS and Improved A* Algorithm[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2021, 15(11): 2233-2240.
- [9] WANG H B, MAO S W, MOU X G, et al. Path Planning for Unmanned Surface Vehicles in Anchorage Areas Based on the Risk-Aware Path Optimization Algorithm[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2025, 11: 1503482.
- [10] SONG J, HAO C, SU J C. Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Based on Predictive Artificial Potential Field[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(2): 1729881420918461.
- [11] GUO N, LI C H, WANG D, et al. Local Path Planning of Mobile Robot Based on Long Short-Term Memory Neural Network[J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2021, 55: 53-65.
- [12] 黄健萌, 吴宇雄, 林谢昭. 移动机器人平滑 JPS 路径规划与轨迹优化方法[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 21-29.
- HUANG J M, WU Y X, LIN X Z. Smooth JPS Path Planning and Trajectory Optimization Method of Mobile Robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 21-29.
- [13] 冯铂凯, 张阳. 基于栅格地图的复杂地形建模与仿真技术研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2021, 34(3): 15-18.
- FENG B K, ZHANG Y. System Modelling and Simulation for Autonomous Following Vehicles via Grid-Map-Method[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2021, 34(3): 15-18.
- [14] 束磊. 基于栅格地图的月球车任务层路径规划及平滑处理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- SHU L. Mission-Level Path Planning and Smoothing of Lunar Rover Based on Grid Map[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [15] HAN S, WANG L, WANG Y T, et al. A Dynamically Hybrid Path Planning for Unmanned Surface Vehicles Based on Non-Uniform Theta* and Improved Dynamic Windows Approach[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111655.
- [16] 陈奕虎, 苏珉, 闭金杰, 等. 基于改进 JPS 的移动机器人路径规划算法[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(7): 88-93.
- CHEN Y H, SU M, BI J J, et al. Path Planning Algorithm of Mobile Robot Based on Improved JPS Algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(7): 88-93.
- [17] HARABOR D, GRASTIEN A. Improving Jump Point Search[C]//International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2014.