

基于正六边形栅格和 A* 算法的船舶路径规划方法

刘 钊^{1,2*}, 康子悦^{1,2}, 杨 帆³, 罗辰汉^{1,2}

1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 青岛引航站, 山东 青岛 266011)

摘要:针对传统正方形栅格在船舶路径规划中存在的安全裕度不足、搜索效率不高以及难以满足船舶运动特性的缺陷,提出一种基于六边形栅格与改进 A* 算法的船舶路径规划方法。根据正六边形栅格的几何特性与船舶避碰安全距离,构建六边形栅格邻域模型,并设计适用于六边形栅格的节点编码方法;结合船舶惯性运动特性与转向约束,建立船舶在六边形栅格中的运动代价模型;在此基础上,对传统 A* 算法进行启发函数与转向代价改进,提出面向船舶路径规划的六边形栅格搜索算法。对比试验结果表明:与正方形栅格 8 邻域方法相比,六边形栅格可在保持安全距离的前提下使路径长度缩短 5.51%,搜索次数减少 30.7%;与正方形栅格 4 邻域方法相比,路径长度缩短 17.0%,转向点数量减少 38.6%。基于六边形栅格地图生成的路径更平滑、转向更符合船舶操纵特性。

关键词:智能航行;船舶路径规划;六边形栅格;改进 A* 算法;船舶操纵性

中图分类号:U697 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.004

Ship path planning method based on hexagonal grid and A* algorithm

LIU Zhao^{1,2*}, KANG Ziyue^{1,2}, YANG Fan³, LUO Chenhan^{1,2}

- (1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. Qingdao Pilot Station, Qingdao 266011, China)

Abstract: To address the limitations of the conventional square grid in ship path planning—such as insufficient safety margins, low search efficiency, and poor adaptability to ship maneuvering characteristics—this study proposes a ship path planning method based on a regular hexagonal grid and an improved A* algorithm. A hexagonal grid neighborhood model is constructed according to the geometric properties of the regular hexagonal grid and the required ship-obstacle safety clearance, together with an encoding scheme suitable for hexagonal cells. A ship motion cost model is developed by incorporating ship inertia and turning constraints. Based on this model, the traditional A* algorithm is improved by optimizing the heuristic function and introducing a turning-penalty mechanism, thereby forming a hexagonal-grid-based search algorithm for ship path planning. Comparative experiments show that, compared with the square-grid 8-neighborhood method, the proposed method shortens the path by 5.51% and reduces the number of search nodes by 30.7%; compared with the 4-neighborhood method, the path length is reduced by 17.0% and the number of turning points decreases by 38.6%. The paths generated on the hexagonal grid are smoother and more consistent with ship maneuvering characteristics.

Key words: intelligent navigation; ship path planning; hexagonal grid; improved A* algorithm; ship maneuverability

近年来,随着船舶智能化的日益发展,船舶路径规划作为船舶智能化研究的重要组成部分,众多学

者采用多种算法进行深入的研究^[1]。船舶路径规划要求在起点和目标点之间规划出一条安全可行的

收稿日期:2025-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52171351);湖北省自然科学基金杰出青年项目(2024AFA042)资助

作者简介:刘 钊(1986—),男,副教授,博士,研究方向为群船智慧挖掘与应用、无人艇自主航行。*通信作者:zhaoliu@whut.edu.cn

引用格式:刘钊,康子悦,杨帆,等.基于正六边形栅格和 A* 算法的船舶路径规划方法[J].中国航海,2026,49(1):38-45.

LIU Z, KANG Z Y, YANG F, et al. Ship path planning method based on hexagonal grid and A* algorithm[J]. Navigation of China, 2026, 49(1):38-45. (in Chinese)

航线,使船舶能避开碍航物到达目标点。同时,也要求规划出的路径尽可能短,转向角度尽可能小,以保证规划出路径的经济性、符合船舶的操纵性能和船员的操船习惯。如何在多碍航物水域内快速规划出一条安全且符合船舶航行习惯的路径成为目前研究的重点和难点。

目前,基于电子海图的船舶路径规划方法已被广泛研究,取得了大量的研究成果。许多学者使用蚁群算法^[2]、遗传算法^[3]、粒子群算法^[4]和 A* 算法^[5]等启发式算法以及深度学习算法进行船舶路径规划研究。黄国良等^[6]将人工势场算法引入至蚁群算法的初始迭代阶段,使算法的迭代速度获得提升。白响恩等^[7]提出双向蚁群算法用于船舶路径规划,并使用 A* 算法改进蚁群算法的评价函数,提升算法的收敛速率。栾志玲^[8]改进遗传算法的交叉概率、变异概率和种群多样性的度量方式,优化最优路径的成功率和迭代次数。关巍等^[9]使用决斗网络和噪声网络改进深度 Q 网络(Deep Q Network, DQN)结构,降低路径规划时间和减小路径长度。张金奋等^[10]将船舶航行风险与栅格地图相结合,设置每一栅格中的风险值,并将风险加到 A* 算法的代价函数计算中,使规划出的船舶路径风险最小。目前,船舶路径规划研究主要集中在算法的改进上,针对栅格地图的改进研究较少。

基于此,本文针对目前路径规划中存在的路径适用性不高的问题,结合现有的研究成果,提出基于正六边形栅格的 A* 算法船舶路径规划方法。该方法使用正六边形栅格对环境进行建模,船舶可沿栅格向 6 个方向进行移动,在移动的同时可与左右两舷保持合理的安全间距,更符合船舶的航行习惯。采用 A* 算法在正方形栅格地图和正六边形栅格地图上进行船舶路径规划,对比分析路径规划的效率、规划出的路径长度和适用性,验证方法的性能,其研究框架见图 1。

1 栅格环境建模方法

为准确表达船舶路径规划过程,解析船舶可航水域和碍航物位置,并获取规划出的船舶路径地图,首先进行环境建模^[11]。目前,常用于路径规划的地图建模方法包括栅格法、空间法和拓扑图法等^[12]。其中:栅格地图由于其具有可直观地表示障碍物、易于并行处理、计算效率较高和算法适应性高的特点,成为船舶路径规划中常用的环境建模方法。栅格地图根据电子海图信息将水深满足船舶航行需求且不存在碍航物的水域设置为可航水域,存在碍航物或

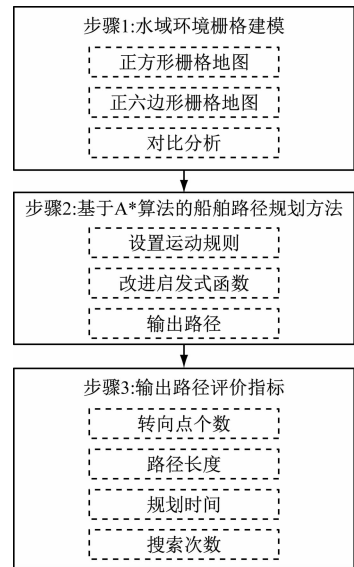


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

水深不足水域设置为不可航水域,通过二值信息进行表示。

1.1 正方形栅格地图

在栅格地图的构建与应用领域,正方形栅格被广泛应用。正方形栅格地图建模步骤包括:

1) 栅格大小选择。由于栅格大小影响着环境建模的精细化程度,进而影响船舶路径规划的质量和效率,因此需对栅格的尺度进行选择。栅格尺度越小,栅格地图包含的信息越丰富,地图精细化程度越高;栅格尺度越大,地图特征越少,规划出的路径越粗糙。然而,过小的栅格尺度不仅会增加路径规划的运算时间,同时也可能产生较多的连续转向,不符合船舶的转向能力和船员的操船习惯^[13]。因此,需综合考虑船舶尺度、操纵性能和水域环境特征选择合适的栅格尺度。为了给船舶操纵留取一定的冗余空间,通常选取栅格的尺度略大于船长。

2) 栅格编码规则。选择合适的栅格尺度后,按照一定规则对栅格进行编号,建立相应的栅格坐标系,以利于对路径进行描述和分析,栅格编码规则见图 2。

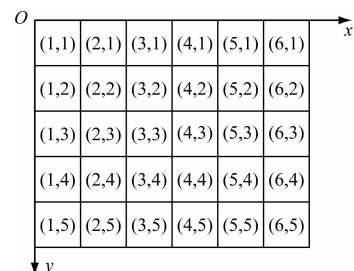


图 2 栅格编码规则

Fig. 2 Raster coding rules

3) 水域划分。根据电子海图信息将水域划分为可航水域和不可航水域。根据水域划分的结果为每个栅格分配适当的属性值,通常使用0和1进行标注和区分。正方形栅格地图见图3。图3中:将不可航水域栅格标记为黑色,其他栅格标记为白色。

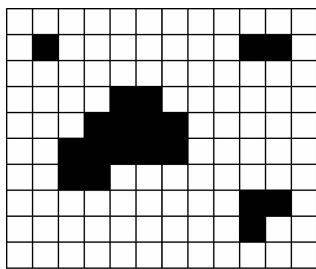


图3 正方形栅格地图

Fig. 3 Traditional square raster map

1.2 正六边形栅格地图

在船舶路径规划中,正六边形栅格地图也是常用的环境建模方法之一,1个正六边形栅格有6个相邻栅格,且到6个相邻栅格中心位置的距离相同,相较于正方形栅格有以下优点。

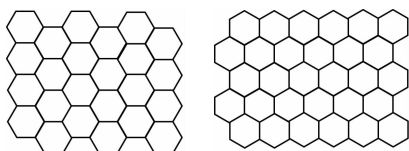
1) 船舶在栅格移动过程中避免了直角和锐角转向,更接近实际的船舶运动模式。

2) 可有效地减少转向点的个数,使规划出的路径更加平滑。

3) 正六边形栅格可更精细地表示不规则障碍物。

1.2.1 正六边形栅格排布方式

正六边形栅格作为正方形栅格的发展和变种,与正方形栅格在建模步骤中存在相似之处。由于正六边形栅格的形状属性与正方形栅格不同,其排列方式及编码方式与正方形栅格存在差异。正六边形栅格在水平方向或垂直方向上错开,其栅格排布方式见图4。根据方向的不同,正六边形栅格排列方式可分为平顶排列和尖顶排列。其中:平顶排列是指每个正六边形的平顶指向上方,相邻的正六边形在水平方向上并排排列;尖顶排列是指每个正六边形的顶点指向上方,相邻的正六边形在水平方向上错开排列。



(a) 平顶排列 (b) 尖顶排列

图4 正六边形栅格排布方式

Fig. 4 Hexagonal grid layout

1.2.2 正六边形栅格地图建模

正六边形栅格地图建模方法与正方形栅格地图建模步骤相似。但由于正六边形栅格的排布方式的不同,使栅格的编码方法与正方形栅格地图存在较大差异。目前,常采用立方体坐标系和偏移坐标系^[14]等方式对正六边形栅格地图进行编码。

1) 立方体坐标系是一种使用3个坐标轴(x, y, z)来表示正六边形网格的方法。该坐标系允许使用标准的算数运算,如加法、减法、乘法、除法、缩放和距离计算。在立方体坐标系中,每个正六边形可被视为一个立方体的一个顶点,而所有这些立方体的顶点都位于一个特定的斜切面上,该斜切面满足 $x + y + z = 0$,正六边形栅格立方体坐标系编码见图5。

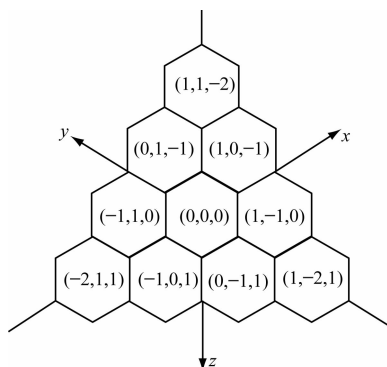
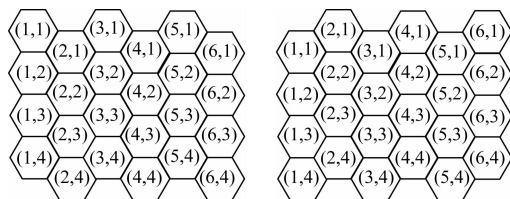


图5 六边形栅格立方体坐标系的编码方法

Fig. 5 Encoding method of the hexagonal grid cube coordinate system

2) 立方体坐标系虽然具有便于计算的优势,但对矩形地图进行描述时存在理解困难的缺陷。因此,在对矩形轮廓地图建模时常采用偏移坐标系(q, r)对正六边形栅格进行编码。以平顶排列的正六边形栅格为例,偏移坐标系编码方式见图6。



(a) 偏移奇数列 (b) 偏移偶数列

图6 偏移坐标轴编码方式

Fig. 6 Encoding method of the offset coordinate system

立方体坐标在获取邻近栅格和进行距离计算时有较大优势,而偏移坐标系可以更直观地对栅格地图进行描述。因此,在计算和表述时可在2个坐标中进行转换,以偏移奇数列坐标为例,其转换方法见式(1)和式(2)^[15]。

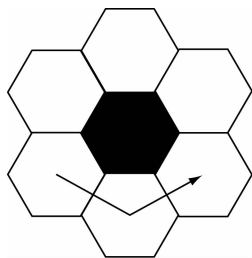


图10 正六边形栅格路径

Fig. 10 Hexagonal raster path

表2 不同类型栅格地图对比

Tab. 2 Comparison of different types of raster maps

栅格类型	运动方向	转向角度/(°)
正方形栅格 (4邻接)	4	90
正方形栅格 (8邻接)	8	45
正方形栅格 (改进8邻接)	8	45/90
正六边形栅格	6	60

地图8邻接运动规则下船舶的转向角度最小,但无法保证与碍航物之间的安全距离,因此需对船舶与碍航物之间的安全距离进行约束,以满足规划出路径的安全需求。采取4邻接规则避开碍航物时,船舶需要转向90°来避让碍航物,该状态下船舶转向角度过大,不符合船舶的操纵习惯。正六边形栅格具有较多的运动方向和较小的转向角度,规划出的路径灵活性高。

2.2 改进A*算法

A*算法的高效率主要得益于其启发式机制,在搜索前创建启发式函数,见式(3)。A*算法流程见图11。

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (3)$$

式(3)中: $F(n)$ 为节点 n 的总成本; $G(n)$ 为从起点到节点 n 的实际成本; $H(n)$ 为对从节点 n 到目标节点成本的预测。

通过计算 F 值来评估每个节点的总成本,优先扩展具有最低 F 值的节点。

$G(n)$ 和 $H(n)$ 可通过欧氏距离计算得出,有

$$H(n) = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2} \quad (4)$$

式(4)中: (x_n, y_n) 为当前节点坐标; (x_0, y_0) 为目标节点坐标。

为减少规划出的路径的转向点数量,从而减少船舶不必要的转向,对A*算法的启发式函数进行

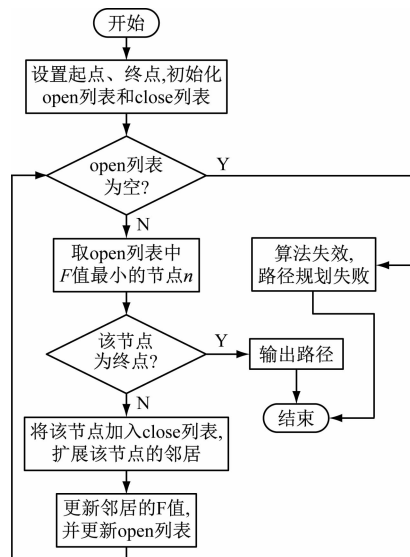


图11 A*算法流程

Fig. 11 A* algorithm flowchart

改进。根据父节点、当前节点与子节点方向的变化增加转向成本 $T(n)$ 见式(5),改进A*算法节点选择示意图12。

$$T(n) = \sin\left(\arccos \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{C}}{\|\mathbf{P}\| \times \|\mathbf{C}\|}\right) \quad (5)$$

式(5)中: $T(n)$ 为从节点 n 到目标节点的转向成本; \mathbf{P} 为父节点到当前节点的向量; \mathbf{C} 为当前节点到子节点的向量。

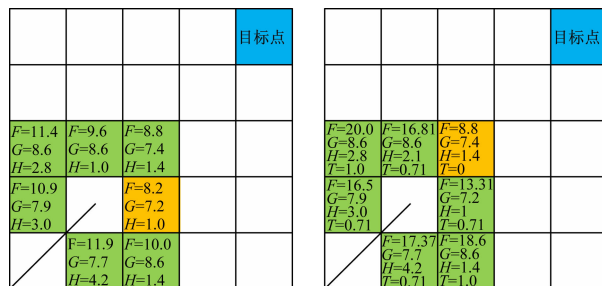


图12 改进A*算法节点选择示意

Fig. 12 Schematic diagram of node selection for improved A* algorithm

改进后的启发式函数见式(6),根据转向角度的大小,增加实际代价 G 的权重,使A*算法更偏向于实际代价,从而减少转向点的数量。

$$F(n) = (1 + T(n))G(n) + H(n) \quad (6)$$

2.3 评价指标

规划路径的评价指标主要包括转向点个数、路径长度、规划时间和搜索次数等。

1) 转向点个数:指路径中运动方向发生改变的位置点数量。转向点个数越少,路径越平滑,算法越好。

2) 路径长度:将规划结果路径表示有序栅格点序列,路径总长度 L 通过累加相邻点间的欧氏距离计算。路径越短,船舶航行距离越短,算法越好。

$$L = \delta \sum_{i=1}^{n-1} \| P_{i+1} - P_i \| \quad (6)$$

式(6)中: L 为路径长度; δ 为栅格分辨率,表征每个栅格单元对应的实际物理尺寸; $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 为从起点到终点依次经过的转向点序列。

3) 规划时间:指算法从接收规划指令到输出最终可行路径所需的计算耗时。规划时间越少,算法效率越高。

4) 搜索次数:在 A^* 算法中,若节点未访问过或未找到更优路径,每次扩展节点时,会将其邻居加入开放列表;而搜索次数是指在搜索过程中从开放列表中取出并处理的节点总数。搜索次数直接反映搜索规模,越小说明算法效率越高。

3 试验及结果分析

3.1 试验水域

试验水域为舟山群岛附近水域,其经纬度位置见表 3。试验水域示意图 13。

表 3 试验水域范围

Tab. 3 Latitude and longitude ranges of experimental waters

编号	经度/(°)	纬度/(°)
A	122.141 533	29.837 116
B	122.245 388	29.837 116
C	122.245 388	29.780 677
D	122.141 533	29.780 677



图 13 试验水域示意

Fig. 13 Charts of experimental waters

3.2 试验水域采用栅格化

1) 根据试验船舶的数据对栅格大小进行划分。由于试验船船长为 130 m,综合考虑船舶的操纵性能和最大航速,本文选择正方形栅格边长为 200 m。基于此,将试验水域划分为 34×50 的栅格地图,为

保证对比试验的合理性,按比例设置 30×50 的正六边形栅格地图。

2) 将栅格地图进行编号,根据编号规则对正方形栅格地图按照栅格中心坐标对应的二维坐标系坐标进行编号;正六边形栅格地图采用偏移奇数列编码方式进行编号。

3) 根据水域海图信息,设置可航水域和不可航水域。为方便处理,先使用 Matlab 将海图进行二值化转换为仅有黑白两色的二值图像方便后续进行地图栅格化,白色部分为可航水域,黑色部分为不可航水域,见图 14。



图 14 水域划分后的二值海图

Fig. 14 Binary charts after water delineation

4) 根据不可航区域的位置分别构建正方形栅格地图和正六边形栅格地图,对于占据栅格不完全的不可航区域进行膨胀处理,最终得到正方形栅格地图和正六边形栅格地图分别见图 15 和图 16。

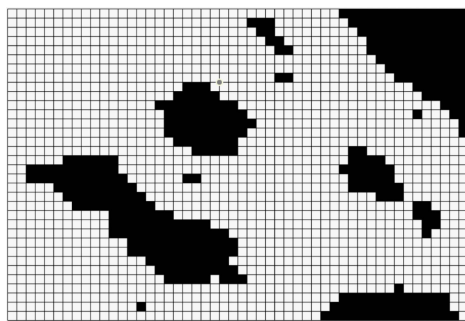


图 15 正方形栅格地图

Fig. 15 Traditional raster map

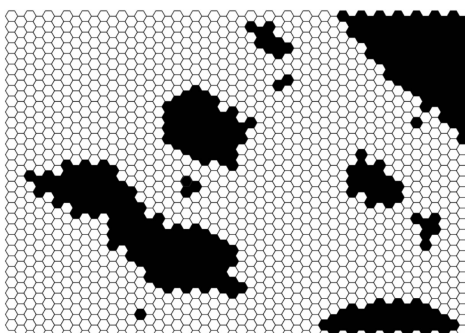


图 16 正六边形栅格地图

Fig. 16 Hexagonal raster map

3.3 试验验证

试验的起止点分别为(1,1)和(50,27),使用改进A*算法在4邻接、8邻接规则正方形栅格地图、改进安全距离的8邻接规则正方形栅格地图和正六边形栅格地图的试验结果分别见图17~图20,试验结果参数对比见表4。

传统A*算法采用4邻接规则、8邻接规则和改进8邻接规则的正方形栅格进行仿真试验,转向点个数分别为52、8和6;利用正六边形栅格地图进行仿真试验,转向点为4个,见图21。

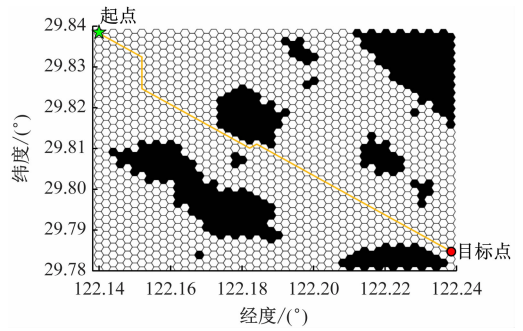


图20 正六边形栅格试验结果

Fig. 20 Experimental results on hexagonal grids

表4 试验结果参数对比

Tab. 4 Parameter comparison of simulation results

地图环境	转向点 个数/个	路径长度/ n mile	规划时间/ s	搜索 次数/次
正方形栅格 (4邻接)	19	8.21	0.65	1 036
正方形栅格 (8邻接)	7	6.50	0.61	633
正方形栅格 (改进8邻接)	6	6.50	0.59	597
正六边形栅格	4	6.14	0.45	636

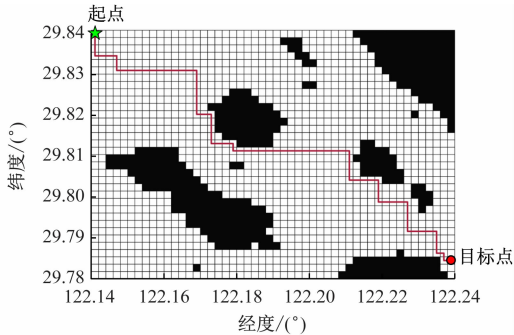


图17 正方形栅格试验结果(4邻接)

Fig. 17 Traditional raster simulation results (4 raster search neighborhood)

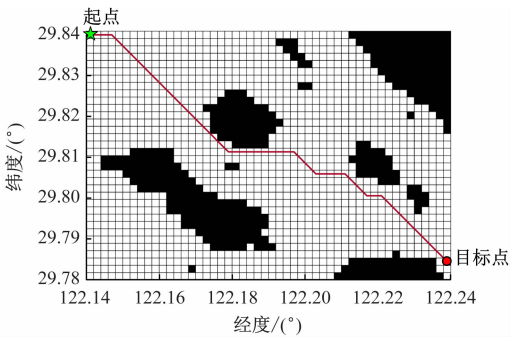


图18 正方形栅格试验结果(8邻接)

Fig. 18 Traditional raster simulation results (8 raster search neighborhood)

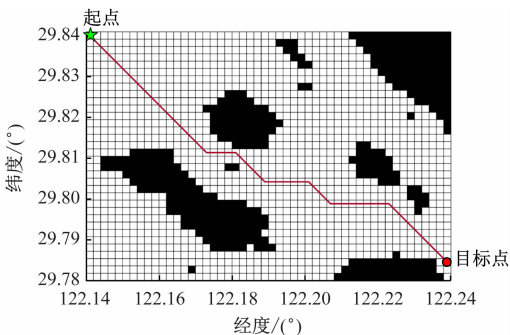


图19 正方形栅格试验结果(改进8邻接)

Fig. 19 Traditional raster simulation results (improved 8 raster search neighborhood)

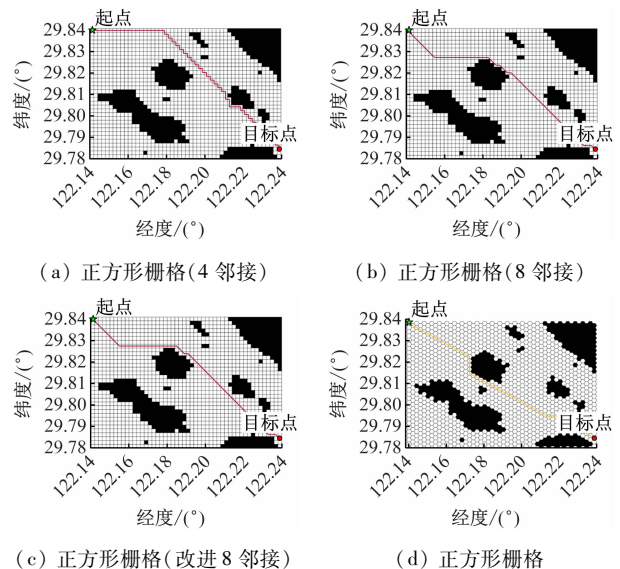


图21 传统A*算法仿真结果

Fig. 21 Simulation results of traditional A* algorithm

通过试验可以看出,改进A*算法可有效地减少转向点数量,且减少短距离内的连续转向情况。使用改进A*算法进行船舶路径规划,基于正六边形栅格在搜索次数上与基于8邻接运动规则的正方形栅格地图相近,但在路径规划的效率上基于正六边形栅格地图规划路径耗时比基于正方形栅格地图

短 26.20%, 路径长度短 5.51%; 且基于正六边形栅格地图的规划路径可始终与碍航物保持安全间距, 与 4 邻接运动规则的正方形栅格地图相比, 正六边形栅格地图上规划出的路径长度短 17.0%, 耗时减少 30.7%, 搜索次数少 38.6%; 且基于正六边形栅格地图规划出的路径更平滑, 转向点更少, 每次转向的角度为 60° , 更符合船舶的操纵习惯; 与改进安全距离的 8 邻接运动规则正方形栅格地图相比, 基于正六边形栅格地图规划出的路径短 5.51%, 用时少 23.7%。使用正六边形栅格地图进行船舶路径规划不仅保证船舶路径的安全性, 同时也具有更高的效率, 且路径的长度、转向角度和转向点的个数都更为合理。

4 结束语

本文提出一种基于正六边形栅格的改进 A* 算法船舶路径规划方法, 旨在提高船舶路径规划的质量和效率。通过对比传统正方形栅格和正六边形栅格在船舶路径规划中的应用, 发现正六边形栅格在描述障碍物信息、规划路径长度和规划效率等方面具有明显优势。试验结果表明: 采用正六边形栅格地图规划出的路径相比于正方形栅格地图, 路径长度、规划时间和搜索次数方面均有所优化, 且路径更平滑, 转向点更少, 可优先规划路径, 始终与碍航物保持安全距离, 更符合船舶的操纵习惯; 采用偏移坐标轴编码方式可有效提高路径规划的效率, 且更便于理解坐标信息。

未来的研究可以在以下几个方面进行深入探讨:

- 1) 针对不同类型的船舶和不同的航行环境, 进一步优化正六边形网格的尺寸和排布方式, 以适应更多的实际场景;
- 2) 结合船舶特征和实时海况数据, 对栅格风险进行赋值, 使规划出的路径更适合通航环境。

参 考 文 献

[1] 孟凡齐, 孙潇潇, 朱金善, 等. 基于双向 A* -APF 算法的船舶路径规划研究[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(3): 506-515.
MENG F Q, SUN X X, ZHU J S, et al. Ship path planning based on bidirectional A* -APF algorithm[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(3): 506-515. (in Chinese)

[2] 童帮裕, 胡坚堃. 基于改进蚁群算法的船舶冰区航行路径规划[J]. 中国航海, 2020, 43(1): 24-28.

TONG B Y, HU J K. Improved ant colony optimization for navigation path planning in ice zone[J]. Navigation of China, 2020, 43(1): 24-28. (in Chinese)

[3] 郑广成. 基于遗传算法的船舶导航路径规划研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(10): 76-78.
ZHENG G C. Research on ship navigation path planning based on genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(10): 76-78. (in Chinese)

[4] 刘浩. 基于改进粒子群法的船舶路径规划研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
LIU H. Research on ship route planning based on improved particle swarm optimization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[5] 胡智焕, 杨子恒, 张卫东. 基于混合 A* 搜索和贝塞尔曲线的船舶进港和靠泊路径规划算法[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 220-229.
HU Z H, YANG Z H, ZHANG W D. Path planning for auto docking of underactuated ships based on Bezier curve and hybrid A* search algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 220-229. (in Chinese)

[6] 黄国良, 周毅, 郑坤, 等. 基于改进蚁群算法的全局船舶路径规划方法[J]. 船海工程, 2023, 52(2): 97-101.
HUANG G L, ZHOU Y, ZHENG K, et al. Ship path planning and collision avoidance based on improved ant colony algorithm[J]. Ship & Ocean Engineering, 2023, 52(2): 97-101. (in Chinese)

[7] 白响恩, 江明哲, 徐笑锋, 等. 基于双向搜索的改进蚁群算法的船舶路径规划[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 13-20.
BAI X E, JIANG M Z, XU X F, et al. Ship route planning using improved ant colony algorithm with bi-directional search strategy[J]. Navigation of China, 2022, 45(3): 13-20. (in Chinese)

[8] 栾志玲. 改进遗传算法的船舶航行路径规划方法[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 31-33.
LUAN Z L. Ship navigation path planning based on improved genetic algorithms[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(10): 31-33. (in Chinese)

[9] 关巍, 曲胜, 张显库, 等. 基于改进 DQN 算法的船舶全局路径规划研究[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 107-114.
GUAN W, QU S, ZHANG X K, et al. Research on global path planning of ships based on improved DQN algorithm[J/OL]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 107-114. (in Chinese)

46521-46545.

- [22] 吴峻江, 储珺, 卢昂, 等. 基于感知监督和多层次特征融合的去雾算法 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(21): 204-213.

WU J J, CHU J, LU A, et al. Perceptual supervision-guided and multi-hierarchical feature fusion for image dehazing [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(21): 204-213. (in Chinese)

- [23] LI R, PAN J, LI Z, et al. Single image dehazing via conditional generative adversarial network [C]. Proceedings of the Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 8202-8211.

- [24] CHAITANYA B S, MUKHERJEE S. Single image dehazing using improved cycleGAN [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2021,

74: 1-10.

- [25] 潘玉恒, 刘泽帅, 鲁维佳, 等. 基于生成式对抗网络与 ResNeXt 的车道线检测算法 [J]. 公路交通科技, 2024, 41(12): 39-47.

PAN Y H, LIU Z S, LU W J, et al. Traffic line detection algorithm based on generative adversarial networks and ResNeXt [J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2024, 41(12): 39-47. (in Chinese)

- [26] GUO C, LIAN J, LI W. Single image dehazing based on multi-scale channel attention mechanism [C]. Proceedings of the 2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA), New York: IEEE, 568-573.

(上接第 45 页)

- [10] 张金奋, 王志康, 吴达, 等. 考虑极地船舶航行风险的 A* 路径规划算法 [J]. 中国航海, 2024, 47(2): 19-24.

ZHANG J F, WANG Z K, WU D, et al. Risk-A path planning algorithm for Arctic shipping [J]. Navigation of China, 2024, 47(2): 19-24. (in Chinese)

- [11] 程杰, 陈姚节. 基于正六边形建模的无人水面艇路径规划 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(11): 37-41.

CHENG J, CHEN Y J. Path planning of unmanned surface vehicle based on regular hexagon modeling [J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(11): 37-41. (in Chinese)

- [12] 张浩, 庞宁林, 胡安康, 等. 基于改进 A* 算法融合角度信息的船舶路径规划 [J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(2): 6-10.

ZHANG H, PANG N L, HU A K, et al. Ship path planning based on improved A* algorithm and adding angle information [J]. Journal of Shanghai Maritime

University, 2023, 44(2): 6-10. (in Chinese)

- [13] 刘钊, 罗辰汉, 张明阳. 多碍航物水域救援船路径规划方法 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 90-97.

LIU Z, LUO C H, ZHANG M Y. Path planning method of rescue ships in waters with multiple obstacles [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 90-97. (in Chinese)

- [14] 陶哲, 高跃飞, 郑天江, 等. 基于 A* 算法在蜂巢栅格地图中的路径规划研究 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 310-317.

TAO Z, GAO Y F, ZHENG T J, et al. Research on path planning in honeycomb grid map based on A* algorithm [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 310-317. (in Chinese)

- [15] HER I. Geometric transformations on the hexagonal grid [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1995, 4(9): 1213-1234.