基于四叉树与改进 A*的沿海航道合规路径规划

赖佳亿[1a]，李荣辉[1a*]，黄应邦[1b,2,3]，李佳文[1a]，吴馥谧[1a]

（1. 广东海洋大学，a. 船舶与海运学院；b. 海洋与气象学院，广东湛江 524000；2. 中国水产科学研究院南海水产研究所，广州 510300；3. 三亚热带水产研究院，海南三亚 572024）

摘 要：[目的]为提升智能船舶在沿海航道中路径规划的合规性，[方法]以湛江港水域为例，提出一种融合多策略四叉树与改进 A*算法的路径规划方法。构建多策略四叉树栅格环境模型，通过差异化细分策略（航道区域统一深度细分、障碍物边界触发细分），兼顾关键区域的建模精度和非关键区域的计算效率。提出一种航道分区机制，将不规则航道划分为主通行带与过渡带，并结合航道偏好因子与航向一致性判别函数，引导改进 A*算法生成严格遵循“航道内航行”与“靠右舷外缘行驶”规则的路径。在此基础上，采用基于航道形态特征的分段式 Ramer-Douglas-Peucker 算法进行后优化，以增强路径平滑度与简洁性。[结果]结果表明：相较传统 A*算法，该方法在路径长度仅增加约 5% 的情况下，可有效避免路径偏离航道并实现航行合规；且经分段优化后，路径点与拐点数减少了 90% 以上，可显著提升路径的实用性与可执行性。[结论]研究成果可为智能船舶的自主航行提供一定参考。

关键词：路径规划；智能船舶；沿海航道；四叉树；A*算法

中图分类号：U675.79;U692.3 **文献标志码：**A 【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.12

Regulatory-Compliant Path Planning in Coastal Fairways Based on Quadtree and Improved A*

LAI Jiayi[1a], LI Ronghui[1a*], HUANG Yingbang[1b,2,3], LI Jiawen[1a], WU Fumi[1a]

(1. Guangdong Ocean University, a. Naval Architecture and Shipping College; b. College of Ocean and Meteorology, Zhanjiang 524000, Guangdong, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 3. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572024, Hainan, China)

Abstract: [Purpose] To enhance the compliance of intelligent ships in coastal waterway path planning, [Method] Taking the waters of Zhanjiang Port as an example, a path planning method that integrates multi strategy quadtree and improved A* algorithm is proposed. A multi strategy quadtree grid environment model is constructed, which balances the modeling accuracy of key areas and the computational efficiency of non key areas through differentiated subdivision strategies (unified depth subdivision of channel areas, obstacle boundary triggered subdivision). A channel zoning mechanism has been proposed, which divides irregular channels into main traffic zones and transition zones, and combines channel preference factors and heading consistency discriminant functions to guide the improved A* algorithm to generate paths that strictly follow the rules of "navigation within the channel" and "driving near the starboard outer edge". On this basis, the segmented Ramer Douglas Peucker algorithm based on channel morphology features is used

收稿日期：2025-10-14；**修回日期：**2026-02-06；**录用日期：**2026-03-20

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52571405，52171346）；广东省普通高校高端装备制造（智能机器人）重点领域专项（2023ZDZX3003）；广东省联合培养研究生示范基地项目（040510132301）；广东省青年创新人才资助计划（2022KQNCX024）；湛江市哲学社会科学规划项目（ZJ25YB01）；湛江市非资助科技攻关计划项目（2025B01095）。

作者简介：赖佳亿（1998—），男，硕士。研究方向：船舶智能化。

通信作者：李荣辉（1976—），男，博士、教授、博士生导师。Email：Lironghui@163.com。

for post optimization to enhance path smoothness and simplicity. [Result] The results indicate that compared to the traditional A* algorithm, this method can effectively avoid path deviation and achieve navigation compliance with a path length increase of only about 5%; After segmented optimization, the number of waypoints and turning points has been reduced by more than 90%, which can significantly improve the practicality and feasibility of the path. [Conclusion] The research results can provide some references for the autonomous navigation of intelligent ships.

Key words: path planning; autonomous ship; coastal fairway; quadtree; improved A* algorithm

0 引言

随着智能航运技术的发展，路径规划作为智能船舶自主航行的核心关键技术，其重要性日益凸显。与陆上无人驾驶路径规划不同，船舶航行必须严格遵循 *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*（COLREGs）[1]等国际海事法规。特别是在沿海狭水道水域，COLREGs 第 9 条明确要求船舶应尽量靠近其右舷的该水道或航道的外缘行驶，不得妨碍其他船舶安全通行。因此，智能船舶的路径规划不仅需要满足静态避障和经济性的需求，更须具备严格的规则合规性，这是实现安全、可靠自主航行的先决条件。

近年来，船舶路径规划研究已取得显著进展。在环境建模方面，张成等[2]采用四叉树自适应分辨率栅格模型提升了计算效率。张策等[3]通过引入船舶自动识别系统（Automatic Identification System, AIS）轨迹密度数据，使规划路径趋近于习惯航路。在算法改进方面，XU 等[4]双向 A*与动态窗口法（Dynamic Window Approach, DWA）相融合，有效增强了动态避障能力。关巍等[5]利用深度 Q 网络（Deep Q-Network, DQN）提升了解空间搜索能力。WANG 等[6]提出了结合快速行进法（Fast Marching Method, FMM）与 B 样条曲线的多层规划框架。张金奋等[7]引入了 POLARIS 风险模型和海冰风险损失函数，平衡不同冰情下的安全与效率。CHIANG 等[8]在快速扩展随机树（Rapidly-Exploring Random Tree, RRT）中结合轨迹预测和虚拟障碍物以满足避碰规则。LIANG 等[9]在蚁群算法中引入“领航蚁”机制和顶点优化以减少航点。SONG 等[10]综合考虑动态海流和船舶性能，改进了 A*和 B 样条生成路径。GU 等[11]利用 AIS 信息改进 RRT 采样策略，有效提升了收敛效率。HAN 等[12]提出了 COLREGs-Hybrid A*，在搜索过程中动态判别会遇类型，并通过虚拟障碍将 COLREGs 约束嵌入路径生成，实现了多场景下的合规避碰。WANG 等[13]将 COLREGs 会遇规则以转向评价函数形式融入 DWA 局部避碰决策，实现典型会遇场景下的合规避碰。

综上，现有研究大多聚焦于避障效率和算法性能优化，未能系统性地将沿海航道的强制性航行规则嵌入路径生成的决策逻辑中。这可能导致规划出的“最优”路径在实际航行中因违反规则而无法执行，存在安全隐患。

为此，本文面向沿海航道智能船舶的航行合规需求，提出一种融合多策略四叉树建模与改进 A*算法的路径规划方法。主要贡献包括：1）构建一种兼顾精度与效率的多策略四叉树环境模型；2）设计航道分区机制，并创新性地将航道偏好因子与航向一致性判别引入 A*算法的代价函数，从搜索层面保障路径合规；3）提出一种分段式路径后优化策略，可有效提升最终路径的实用性与可执行性。

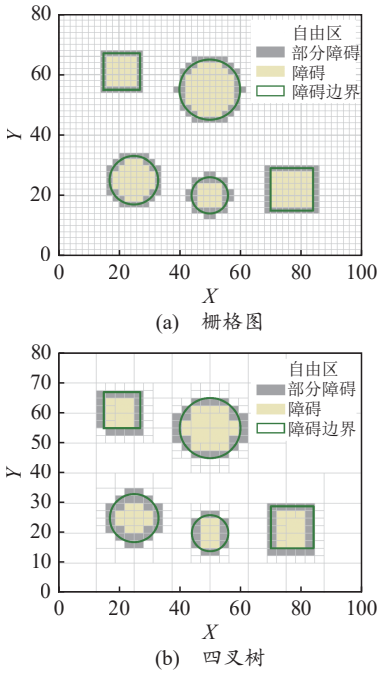
1 基于四叉树与电子海图的环境建模

1.1 电子海图（ENC）数据预处理

本文采用遵循 S-57 标准的电子海图（Electronic Navigational Chart, ENC）[14]，该标准为国际间的水文测量和航海提供了标准化、可靠的数据传输机制。然而，在路径规划研究中，直接使用符合 S-57 标准的电子海图进行环境建模存在局限，其基于 ISO 8211 的数据结构复杂，不利于快速计算与空间分析。为此，本文将符合 S-57 标准的电子海图数据转换为 ESRI Shapefile 格式，该格式具有良好的兼容性和清晰的几何属性结构，在大规模数据处理中效率较高。转换过程依托开源跨平台的 GDAL 库，该库支持包括 S-57 和 Shapefile 在内的多种地理数据格式，转换稳定可靠。在具体实现的过程中，使用 GDAL 的 ogr2ogr 工具读取 S-57 文件，提取与路径规划相关的对象类别及关键属性，并按对象类别和几何类型（点、线、面）分别输出为独立的 Shapefile 图层，用于后续的环境建模与路径搜索。

1.2 基于四叉树的多策略建模方法

船舶路径规划首先需要构建环境模型。传统栅格法将环境均匀划分为网格单元，其建模结果见图 1(a)。该方法虽然实现简便，但在追求较高精度时须引入大量网格，导致存储与计算成本显著增加。相比之下，本文采用的基于四叉树的栅格模型通过递归细分机制，在保证精度的同时有效提升了计算效率，建模结果见图 1(b)。



(a) 栅格图

(b) 四叉树

图 1 环境建模

Fig. 1 Environmental Modeling

然而，传统四叉树方法[15]采用统一的细分规则，难以准确刻画不同地理要素的特征差异。如航道区域需要较高的建模精度，而对陆地或深水区过度细分则会产生冗余节点，增加不必要的计算负担。为此，本文在四叉树基础上提出一种多策略建模方法，具体有以下 3 种。

1）航道区域：采用统一细分策略，将四叉树节点细分至预设深度，生成尺寸一致的叶子节点，并标记为“航道”。

2）不可通航区域（浅水区与陆地）：应用边界触发细分策略，仅在与地理边界相交处进行递归细分，达到指定深度后，将对应叶子节点标记为不可通航。

3）可通航区域（深水区）：使用分层标记策略，将深水区内的节点细分至指定深度，将该区域的叶子节点标记为可通航。若前两步细分出的叶子节点位于该区域且未被标记，也标记为可通航。

该方法在关键区域实现精细化表达的同时，有效避免了非关键区域中的冗余节点生成。以湛江港沿海航道水域的电子海图（见图 2）为例，该区域地理跨度（南北距离×东西距离）约为 52.3 km×34.0 km。

为确保栅格单元能够精细刻画航道并满足船舶对安全通航宽度的要求，本文设定航道区域叶子节点尺寸约为船舶型宽的 2 倍。依据四叉树递归剖分原理，细分深度 D 的计算式为

$$D = \log_2\left(\frac{L_{\max}}{L_{\text{grid}}}\right) \tag{1}$$

式中：$L_{\max}$ 为区域最大边长；L_{grid} 为栅格尺寸。

由式（1）可得 D=10，此时最大栅格边长 $L_{\max}$ 约为 51.1 m，该尺寸约为实验船舶型宽（22.6 m）的 2.3 倍。进一步地，将浅水与陆地边界细分深度设为 7（栅格边长约 408 m）以拟合障碍物轮廓，将深水区细分深度设为 4（栅格边长约 3.2 km）以减少冗余计算。所得环境建模结果见图 3。

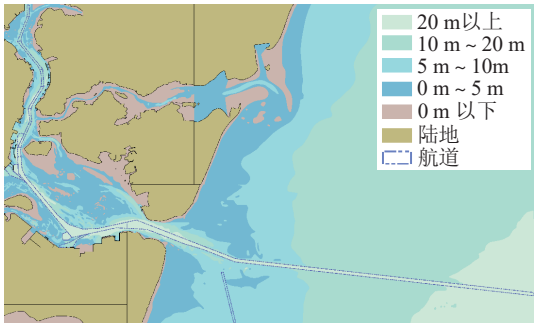


图 2 湛江港沿海航道水域电子海图

Fig. 2 ENC of Fairways in Zhanjiang Port

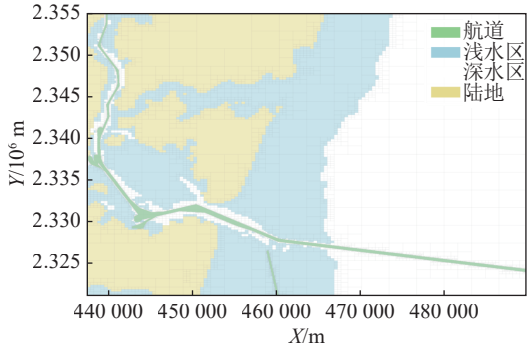


图 3 环境建模结果

Fig. 3 Results of Environmental Modeling

1.3 航道划分

在电子海图中，航道通常设立于交通密集、环境复杂或水域狭窄的海域，用于规范船舶航行。如图 4(a) 所示，蓝色虚线区域标识了航道范围。航道一般为双向通航，船舶在航道内航行时须严格遵守 COLREGs。依据该规则第 9 条对狭水道的航行要求，船舶应尽可能靠近其右舷一侧的航道外缘行驶，且禁止随意横越航道。

电子海图中的航道多以整体区域的形式存在，形态不规则且边界复杂。在直线段尚可大致识别航道方向，而在弯曲或形态不规则区段，则缺乏明确的方向定义。这一特点导致在路径规划中难以判断船舶航向是否与航道走向一致，也难以保证船舶始终符合靠右舷外缘航行的规定。为解决上述问题，本文首先对原始航道进行分段规整处理，见图 4(b)。依据几何形状与外边界走向，当航道局部走向的转

折角或航道边界走向的变化角超过 10°时，将该位置定义为关键分段节点。以此节点为界，将连续的不规则航道离散化为若干个形态相对规整的子区段，从而简化原始不规则航道的表达。

在分段基础上，进一步对每一航道子区段划分方向与通行区域。具体方法如下：以中心线为基准，将每个航道段划分为左、右 2 个单向通行的半幅航道，以实现靠右通行规则。每个单向半幅航道再细分为 3 个带状区域：中间为主通行带，两侧为过渡带。路径规划时优先使用主通行带生成航迹，在必要时可短暂进入过渡带。航道划分结果见图 4(c)，绿色区域代表单向主通行带，其两侧灰色区域为过渡带。为满足航行安全要求，本文将过渡带宽度设置为不小于一倍船宽，即确保船舶右舷外缘与航道右侧边界的最小距离满足 $d_{\min} > W_{\text{ship}}$，以避免贴边航行风险（见图 5）。通过分段规整和区域划分，该方法在保持航道几何特征的同时，提升了路径规划的规范性和可行性。

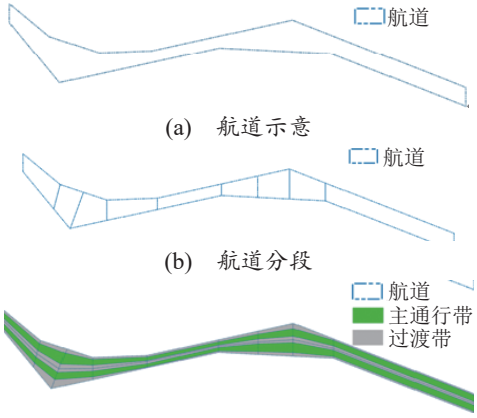


图 4 航道划分

Fig. 4 Fairway Division

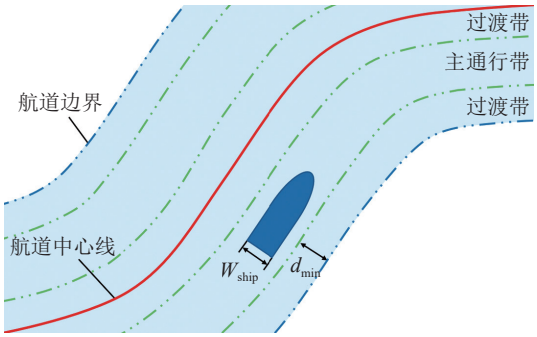


图 5 船舶靠右航行及右侧安全间距示意

Fig. 5 Illustration of Starboard-Side Navigation and Right-Side Safety Distance

2 A*算法改进

传统 A*算法[16]是一种经典启发式搜索算法，通过最小化代价函数 $f(n)$ 来寻找从起点到终点的最优路径。本文代价函数的计算式为

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{2}$$

式中：$g(n)$ 为实际代价函数；$h(n)$ 为启发式函数；n 为当前节点。

为适应船舶在沿海航道环境中对合规路径的规划需求，本文引入航道偏好因子 $C_{\text{fairway}}(m)$，提出一种新的代价函数 $f(m)$，表达式为

$$f(m) = g(n) + C_{\text{fairway}}(m)\,d(n,m) + h(m) \tag{3}$$

$$d(n,m) = \sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2} \tag{4}$$

式（3）和式（4）中：m 为邻居节点；$h(m)$ 为节点 m 到终点的欧式距离；$d(n, m)$ 为节点 n 到节点 m 的欧氏距离；(x_n, y_n) 和 (x_m, y_m) 分别为节点 n 和节点 m 的坐标。

2.1 航道偏好因子

为引导船舶优先沿航道航行，本文在代价函数中引入了航道偏好因子。航道偏好因子的计算流程见图 6。

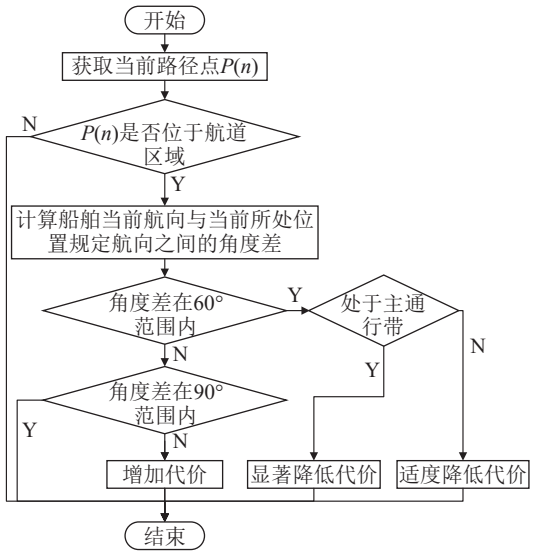


图 6 航道偏好因子计算流程

Fig. 6 Calculation Flowchart for Fairway Preference Factor

首先判断当前路径点 P_n 是否位于航道区域内，若不在航道内，则保持原代价不变；若位于航道内，则进一步计算船舶当前航向与该航道规定航向之间的夹角差 $\Delta\theta$，计算式为

$$\Delta\theta = \min\left(\left|\theta_{\text{ship}} - \theta_{\text{current}}\right|, 360^\circ - \left|\theta_{\text{ship}} - \theta_{\text{current}}\right|\right) \tag{5}$$

$$\theta_{\text{ship}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}}\right) \tag{6}$$

式（5）和式（6）中：θ_{current} 为当前航道规定航向；θ_{ship} 为当前船舶航向。

若 $\Delta\theta \leqslant 60^\circ$，视为航向一致。此时若路径点位于主通行带，则显著降低代价；若位于过渡带，则适度降低代价，但其值仍高于主通行带。

若 60°＜Δθ≤90°，视为航向可接受，不调整该路径点代价。

若 Δθ＞90°，则视为航向偏离严重，将显著增加代价，以避免船舶逆行或严重偏离航道方向。

综上，航道偏好因子 $C_{\text{fairway}}(m)$ 的计算式为

$$C_{\text{fairway}}(m)=\begin{cases}C_0\omega_a & \Delta\theta\leqslant 60^\circ\\ C_0 & 60^\circ<\Delta\theta\leqslant 90^\circ\\ \infty & \Delta\theta>90^\circ\end{cases} \tag{7}$$

式中：C_0 为基本代价；ω_a 为权重。

2.2 改进 A*算法伪代码

本文提出的改进 A*算法伪代码见表 1。

表 1 船舶参数

Tab. 1 Ship Parameters

算法：改进A*算法
输入：起点节点s，目标节点g
输出：路径P
初始化队列open_set←{s}，集合closed_set←$\varnothing$
设定$g(s)$←0，$f(s)$←$g(s)$+$h(s,g)$
While (open_set非空) **do:**
从open_set弹出f最小的节点n
If (n=g) **then:**
回溯parent，返回路径P
将n加入closed_set
从四叉树邻接图中获取节点n的所有邻居节点m
For each 邻居节点m **do:**
计算航道偏好因子$C_{\text{fairway}}(m)$
计算n到m的欧式距离$C_{\text{ost}}(n,m)$
计算临时代价值g_{tmp} g_{tmp}=$g(n)$+ $C_{\text{fairway}}(m)C_{\text{ost}}(n,m)$
If [$m\in$ closed_set and $g_{\text{tmp}}\geqslant g(m)$] **then** continue
If [$g_{\text{tmp}}<g(m)$ or $m\notin$ open_set] **then:**
parent(m)←n
$g(m)$←g_{tmp}
$f(m)$←$g(m)$+$h(m,g)$
If ($m\in$ closed_set) **then** 从closed_set移除m
将m插入/更新到open_set
End While
返回路径不存在（Failure）

3 路径分段优化策略

本文使用 Ramer-Douglas-Peucker（RDP）算法[17-18]，对改进 A*算法规划的路径进行优化。由于不同区域的航行环境复杂度存在明显差异，若采用统一的 RDP 阈值，阈值过大容易丢失关键路径特征，阈值过小则难以充分简化冗余节点。为此，本文提出一种基于 RDP 的分段优化策略，根据各路径段所处环境的特点自适应地设定差异化阈值，在保留关键路径结构的同时提升简化效果与路径平滑度。

3.1 RDP 算法

RDP 算法通过递归分割实现折线简化，以尽可能少的关键点逼近原始路径。其优化过程见图 7。连接起点 P_1 与终点 P_n 构成线段 P_1P_n，计算所有中间点到 P_1P_n 的距离，并找出最大距离 $d_{\max}$ 对应的点 $P_{\max}$。点 P 到线段 AB 的距离 t 的计算式为

$$t=\frac{(P-A)\cdot(B-A)}{\|B-A\|^2} \tag{8}$$

若 0≤t≤1，则投影点 $Q=A+t(B-A)$，距离 $d=\|P-Q\|$；若 t＜0，则 $d=\|P-A\|$；若 t＞1，则 $d=\|P-B\|$。若 $d_{\max}$ 不超过阈值 ε，则整段路径可简化为 P_1P_n；若 $d_{\max}$ 超过阈值 ε，则保留 $P_{\max}$ 作为关键点，并分别对子段 $P_1P_{\max}$ 和 $P_{\max}P_n$ 递归执行上述过程。最终得到的简化路径由起点、终点及一系列关键点组成，在保证几何偏差不超过 ε 的前提下显著减少路径点数。

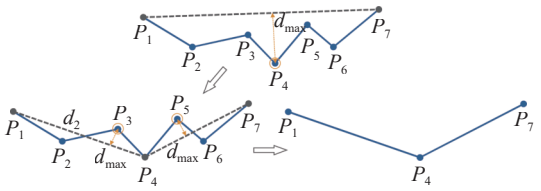


图 7 RDP 优化过程

Fig. 7 Optimization Process of RDP

3.2 路径分段优化策略

路径分段优化策略见图 8。在应用 RDP 算法优化路径之前，须首先把初始路径（见图 8(a)）按航道划分结果进行分段处理。将路径 P 划分为航道分段和自由空间分段，划分结果见图 8(b)。

使用有序列表 S 对整个路径的各分段进行描述：

$$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_n\} \tag{9}$$

式中：S_i 为第 i 个路径分段。

根据各分段 S_i 所处区域的环境特征，设定不同的简化阈值：

1）对于形状规则的航道内路径段，采用较大阈值进行简化，使优化后的路径更贴合航道走向；反之，若航道形态复杂，则采用较小阈值，以避免简化后的路径偏离航道区域。

2）对于自由空间中的路径段，若所处环境复杂，则设定较小阈值，防止过度简化导致路径安全性降低；若环境较为简单，则可采用较大阈值，以显著减少路径点数量。

最终优化结果见图 8(c)。

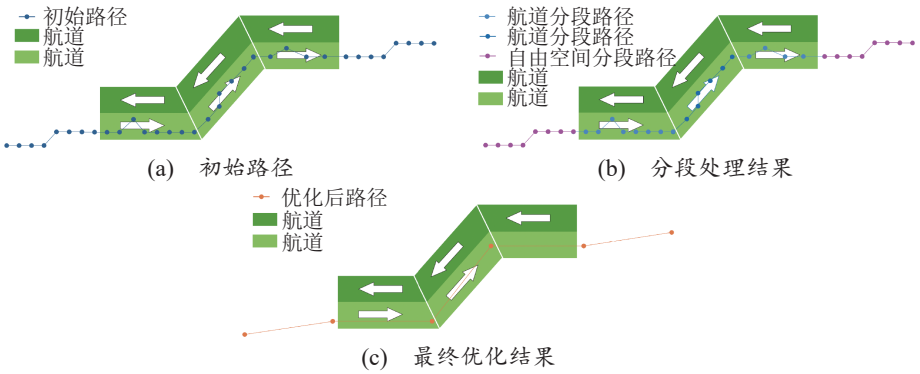


图 8 路径分段优化策略

Fig. 8 Path Segmentation Optimization Strategy

4 试验与结果分析

4.1 试验环境设置

试验采用湛江港区域的电子海图数据，通过集成 CN203315、CN488103 和 CN488102 海图构建研究区域，该区域位于 110.398°E～110.901°E，北纬 20.99°N～21.296°N。为确保建模与路径规划的精度，试验统一采用通用横轴墨卡托（Universal Transverse Mercator, UTM）投影坐标系。

试验所用船舶的主要参数见表 2，富裕水深为船舶吃水的 20%，安全水深为船舶吃水和富裕水深之和，据此计算得到该船的安全水深为 9.84 m。为贴合实际船舶航行的水深约束，将水深小于 10 m 的区域划分为浅水区。

表 2 船舶主要参数

Tab. 2 Main Parameters of the Ship

参数	数值
总长/m	147
型宽/m	22.6
型深/m	11.2
吃水/m	8.2

4.2 试验结果

4.2.1 路径规划结果对比

传统 A*算法与改进 A*算法路径规划结果对比见图 9 和表 3。

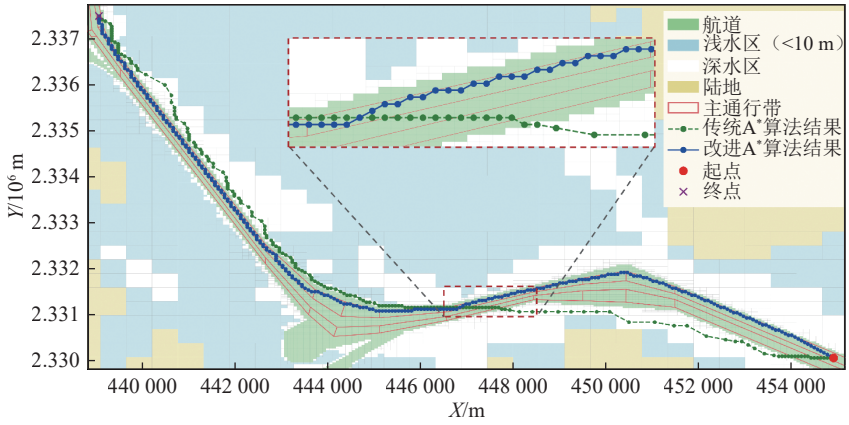


图 9 传统 A*算法与改进 A*算法的路径规划结果

Fig. 9 Path Planning Results of Traditional A* and Improved A* Algorithms

由图 9 和表 3 可知，传统 A*算法虽能规划出较短的路径，但大部分路径偏离航道，甚至出现横穿航道的行为，存在明显的安全隐患。相比之下，本文提出的改进 A*算法生成的路径在长度仅增加约 5% 的情况下，能够优先选择航道主通行带航行，并严格遵循船舶应尽量靠右舷的航道外缘行驶的规则，显著提升了路径的规范性与航行安全性。然而，受航道规则约束以及四叉树栅格模型在航道区域采用更精细离散表达的影响，同时考虑规划路径主要分布于高分辨率航道栅格内，初始路径拐点数量相对较多，仍须进一步优化以提升路径平滑度与实用性。

4.2.2 分段优化策略

本文以改进 A*算法生成的初始路径为基础，分

别开展整体优化与分段优化的对比研究。采用统一 RDP 阈值对路径进行整体简化，结果见图 10。路径分段优化结果见表 4。由表 4 可知，当阈值为 50 m 时，路径长度减少约 6.0%，节点数和拐点数下降近 90%，但路径仍较为曲折；当阈值增大至 180 m 时，路径长度减少 6.9%，节点数和拐点数降幅近 97%，路径更为简洁，但部分路径偏离航道，对航行安全造成潜在风险。该偏离主要发生在相邻保留点间距接近、局部几何变化不明显的区段；统一较大阈值易过度删减关键点，导致简化线段跨越航道边界。

表 3　传统 A*算法与改进 A*算法路径规划结果对比

Tab. 3　Comparison of Path Planning Results Between Traditional A* and Improved A* Algorithms

指标	传统A*算法	改进A*算法
路径长度/km	19.75	20.75
节点数/个	195	321
拐点数/个	95	199
是否选择航道	否	是
是否遵守航道规则	否	是

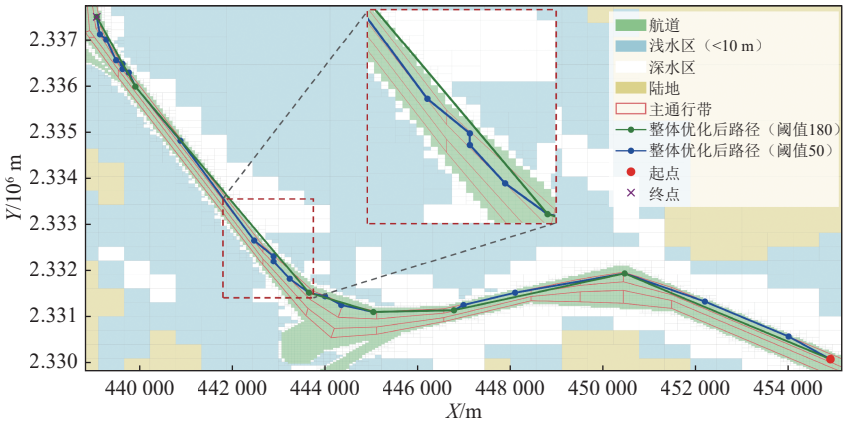


图 10　路径整体优化结果

Fig. 10　Results of Overall Optimization

表 4　路径分段优化结果

Tab. 4　Results of Path Segmentation Optimization

指标	改进A*结果	整体优化		分段优化
		阈值50 m	阈值180 m	
路径长度/km	20.75	19.51	19.33	19.27
节点数/个	321	24	7	13
拐点数/个	199	22	5	11
是否偏离航道	否	否	是	否

相比之下，分段优化方法首先依据航道结构将初始路径划分为多个区段，分段结果见图 11。随后针对不同区段特性设定差异化 RDP 阈值：转弯及不规则航道段采用 50 m，直线型航道段采用 180 m，其余区段设为 120 m，优化结果见图 12。该方法在保持路径简化的同时显著提升合理性：路径总长度减少 7.1%，节点数与拐点数下降约 95%，且整条路径始终位于航道范围内，有效避免了整体优化中可能出现的偏离问题。

综上所述，整体优化虽可显著降低路径复杂度，但优化效果受单一阈值影响较大，难以兼顾简化质量与航行约束。分段优化通过差异化阈值策略实现对不同航道特征的适应性处理，能够在确保路径简洁平滑的同时保留关键航行信息，更加适用于沿海航道环境下的船舶路径优化。

4.2.3　湛江港进出港路径规划

为验证所提方法在实际航道环境中的适用性，本文以湛江港进出港航行任务为背景开展路径规划试验，进港试验起点和终点坐标分别为（21.061°N，110.764°E）和（21.137°N，110.413°E）；出港试验起点和终点坐标分别为（21.138°N，110.411°E）和（20.997°N，110.855°E）。2 组起终点分别布设在港外航道口（外海侧）与港内航道/港池入口附近（港内侧），以表征典型进出港航行场景。

进港路径规划试验结果见图 13 和表 5。传统 A*算法生成的路径长度最短，但未沿航道航行且不符合规则要求；改进 A*算法优先在航道主通行带内规划路径，并满足靠右舷外缘行驶的规则，路径长度增加 6.7%，节点数与拐点数也有所增加；经分段优化后，路径节点数减少至 18 个，拐点数降至 14 个，且全程保持在航道范围内。

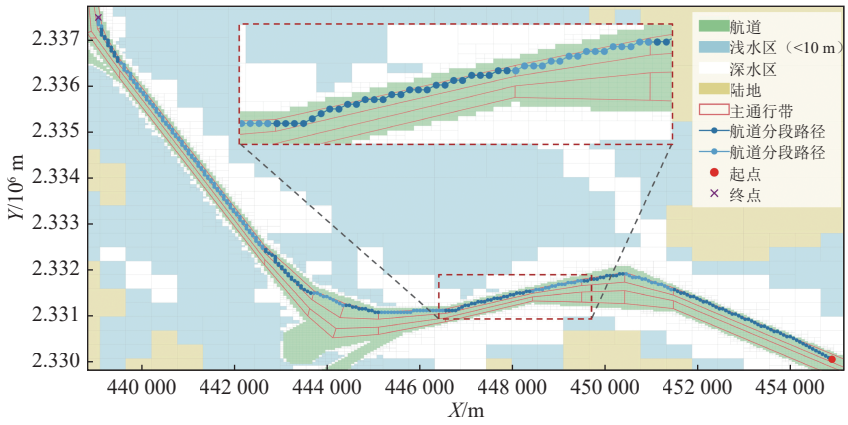


图 11　路径分段结果

Fig. 11　Results of Path Segmentation

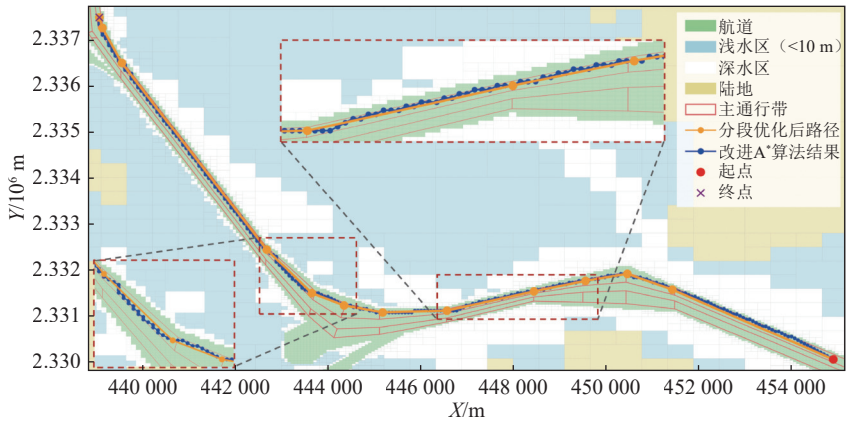


图 12　路径分段优化结果

Fig. 12　Results of Path Segmentation Optimization

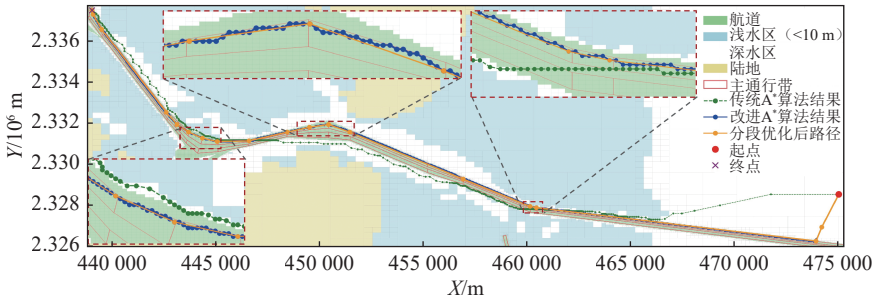


图 13　湛江港进港路径规划结果

Fig. 13　Path Planning Results for Inbound Navigation in Zhanjiang Port

出港路径规划试验结果见图 14 和表 6，呈现出与进港试验一致的规律：传统 A*算法路径最短但偏离航道；改进 A*算法生成合规路径，但节点与拐点数较多；分段优化在略微缩短路径长度的同时，显著将节点数与拐点数分别减少至 28 和 26 个。

试验表明，传统 A*算法虽在路径长度方面表现较优，但因未能满足航道约束与航行规则，缺乏实际应用价值；改进 A*算法能够实现航道内合规路

表 5　湛江港进港路径规划结果对比

Tab. 5　Comparison of Path Planning Results for Inbound Navigation in Zhanjiang Port

指标	传统A*算法	改进A*算法	分段优化
路径长度/km	39.4	43.3	39.6
节点数/个	344	776	18
拐点数/个	157	431	14
是否选择航道	否	是	是
是否遵守航道航行规则	否	是	是

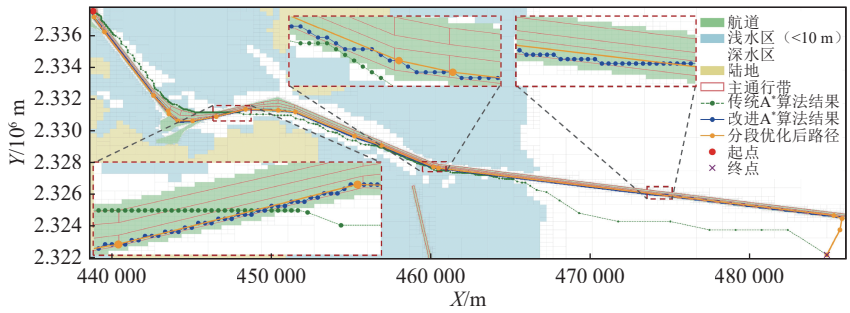


图 14　湛江港出港路径规划结果

Fig. 14　Path Planning Results for Outbound Navigation in Zhanjiang Port

表 6　湛江港出港路径规划对比结果对比

Tab. 6　Comparison of Path Planning Results for Outbound Navigation in Zhanjiang Port

指标	传统A*算法	改进A*算法	分段优化
路径长度/km	41.35	44.4	42.4
节点数/个	325	825	28
拐点数/个	157	419	26
是否选择航道	否	是	是
是否遵守航道航行规则	否	是	是

径规划，但路径平滑度不足；分段优化策略在保持路径合规性的基础上，显著提升了路径的简洁性与平滑度，更符合实际船舶航行的需要。

5　结论

本文针对智能船舶在沿海航道水域中的合规路径规划问题，提出了一种融合多策略四叉树环境建模、改进 A*算法及分段后优化的综合解决方法。本文主要得出以下结论：

1）多策略四叉树建模有效平衡了建模精度与计算效率，克服了栅格法计算冗余大、传统四叉树对复杂航道表征能力不足的缺陷，为合规路径规划提供了高质量的环境模型基础。

2）基于航道分区与规则嵌入的改进 A*算法是保障路径合规性的核心。通过航道偏好因子和航向一致性判别机制，成功引导搜索算法生成严格遵循“靠右航行”规则的路径，解决了传统规划方法仅求最短路径而忽视规则约束的根本问题。

3）分段式 RDP 优化策略依据航道特征自适应调整简化阈值，在最大限度减少路径点与拐点数（优化率＞90%）、提升路径平滑度的同时，确保了优化后的路径仍完全位于航道安全区域内，兼具了简洁性与安全性。

综上所述，本文方法所生成的路径不仅满足 COLREGs 规则约束，而且具有高度的实用性和可执行性，为智能船舶在沿海航道内的自主安全航行提供了可靠的技术方案。未来工作将围绕动态障碍物避碰、多船会遇态势下的规则协同决策以及算法在更大范围海域的适用性展开进一步研究，同时考虑在规划过程中引入风流潮等环境扰动的影响，使路径在真实海况下更具鲁棒性与适应性。

参考文献：

[1] IMO. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea[S]. 1972.

[2] 张成, 刘美芳, 曹军旗, 等. 基于四叉树自适应分辨率算法的智能船舶路径规划[J]. 中国航海, 2024, 47(增刊 1): 284-292.
ZHANG C, LIU M F, CAO J Q, et al. Intelligent Ship Path Planning Based on Quadtree Adaptive Resolution Algorithm[J]. Navigation of China, 2024, 47(Suppl.1): 284-292.

[3] 张策, 刘钊, 张明阳, 等. 考虑交通轨迹密度的船舶路径规划方法[J]. 中国航海, 2025, 48(增刊 1): 72-79.
ZHANG C, LIU Z, ZHANG M Y, et al. A Ship Route Planning Method Considering Traffic Trajectory Density[J]. Navigation of China, 2025, 48(Suppl.1): 72-79.

[4] XU D, YANG J, ZHOU X, et al. Hybrid Path Planning Method for USV Using Bidirectional A* and Improved DWA Considering the Manoeuvrability and COLREGs [J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117210.

[5] 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. Ship Global Path Planning Based on Improved DQN Algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 107-114.

[6] WANG N, JIN X, ER M J. A Multilayer Path Planner for a USV Under Complex Marine Environments[J]. Ocean Engineering, 2019, 184: 1-10.

[7] 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.

[8] CHIANG H T, TAPIA L. COLREG-RRT: an RRT-Based COLREGS-Compliant Motion Planner for Surface Vehicle Navigation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2024-2031.

[9] LIANG C, ZHANG X, HAN X. Route Planning and Track Keeping Control for Ships Based on the Leader-Vertex Ant Colony and Nonlinear Feedback Algorithms[J]. Applied Ocean Research, 2020, 101: 102239.

[10] SONG Z, ZHANG J, WU D, et al. A Novel Path Planning Algorithm for Ships in Dynamic Current Environments[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116091.

[11] GU Q, ZHEN R, LIU J, et al. An Improved RRT Algorithm Based on Prior AIS Information and DP Compression for Ship Path Planning[J]. Ocean Engineering, 2023, 279: 114595.

[12] HAN Z, WU D, ZHANG J, et al. COLREGs-Adaptive Trajectory Planning and Decision-Making in Maritime Autonomous Surface Ships[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119308.

[13] WANG Y, LI J, ZHAO S, et al. Hybrid Path Planning for USV with Kinematic Constraints and COLREGS Based on Improved APF-RRT and DWA[J]. Ocean Engineering, 2025, 318: 120128.

[14] IHO. Transfer Standard for Digital Hydrographic Data [M]// Oxford: Pergamon, 1997.

[15] FINKEL R A, BENTLEY J L. Quad Trees a Data Structure for Retrieval on Composite Keys[J]. Acta Informatica, 1974, 4(1): 1-9.

[16] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.

[17] RAMER U. An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1972, 1(3): 244-256.

[18] DOUGLAS D H, PEUCKER T K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature[J]. Cartographica, 1973, 10(2): 112-122.