

# 逼近姿态约束下的船舶智能跟踪航行规划算法

黄靖添<sup>1</sup>, 娄月新<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 楼建坤<sup>1</sup>, 王鸿东<sup>1\*</sup>

(1. 上海交通大学 a. 海洋智能装备与系统教育部重点实验室; b. 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240;  
2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

**摘要:** [目的]针对船舶逼近跟踪水面动态目标航行场景中的避碰路径规划与运动约束协同优化难题, [方法]提出一种融合改进 A\*算法、快速反向搜索迭代规划 (RRSIP) 方法和 Hybrid A\*精细规划方法的分层路径规划方法, 实现高效且符合运动学规律的动态目标跟踪规划。采用基于动态规划和有向包围盒障碍检测的改进 A\*算法规划路径, 减少路径长度和冗余路径点; 针对动态路径终点提出基于 RRSIP 的路径迭代方法, 通过反向搜索复用节点信息快速迭代预测抵近点, 避免重复搜索, 提升搜索效率; 在路径转向点附近引入 Hybrid A\*算法进行局部精细规划, 快速生成满足船舶操纵运动学要求和抵近艏向约束的可行路径。通过多组仿真试验验证各方法及整体算法的性能, [结果]结果表明: 改进 A\*算法相比其他典型算法路径长度分别平均减少 4.17%和 1.79%; RRSIP 方法相比 FR 方法能使迭代规划耗时至少缩短 33.9%; 局部 Hybrid A\*规划相比全局应用, 能在保证路径可行性的同时, 使耗时至少缩短 72.1%。[结论]所提方法能有效解决动态目标跟踪中的实时性和运动可行性问题, 显著提升船舶在拖船伴航和海警执法等场景下的自主跟踪能力。

**关键词:** 路径规划; A\*算法; 船舶导航; 智能跟踪

**中图分类号:** U664.82; U675.96 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.02

## Intelligent Tracking Navigation Planning Algorithm for Ships with Close-Quarters Posture Constraints

HUANG Jingtian<sup>1</sup>, LOU Yuexin<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, LOU Jiankun<sup>1</sup>, WANG Hongdong<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Jiao Tong University, a. Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Ministry of Education; b. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China; 2. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** [Purpose] To address the challenge of coordinated optimization between collision avoidance planning and motion constraints in the scenario where ships navigate close to dynamic surface targets, a hierarchical path planning method integrating the improved A\* algorithm, rapid reverse search iterative planning (RRSIP), and Hybrid A\* fine-grained planning, aiming to achieve efficient and kinematically compliant dynamic target tracking planning is proposed. [Method] An improved A\* algorithm based on dynamic programming and oriented bounding box obstacle detection is used to plan a global reference path, reducing path length and redundant waypoints. For the dynamic target point, the RRSIP method is proposed, which reuses node information from prior searches via reverse search to quickly iterate and predict the approach point, avoiding global replanning and improving efficiency. Hybrid A\* algorithm is introduced near turning points for local refined planning, quickly generating a feasible path that satisfies ship kinematics and approach heading constraints. [Result] Compared with other typical algorithms, the

收稿日期: 2025-08-02; 修回日期: 2025-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB4302304); 大型远洋船舶智能航行技术研究 (CBG4N21); 中央高校青年教师科研创新能力支持项目 (ZYGXQNJSKYCXNLZCXM-O4)。

作者简介: 黄靖添 (2001—), 男, 硕士研究生。研究方向: 智能船舶路径规划。

通信作者: 王鸿东 (1989—), 男, 博士、教授。研究方向: 海洋智能与无人技术。E-mail: whd302@sju.edu.cn

path length of the improved A\* algorithm proposed is reduced by an average of 4.17% and 1.79% respectively. The RRSIP method reduces the iterative planning time by at least 33.9% compared with the FR method. While ensuring path feasibility, the local Hybrid A\* planning reduces the time consumption by at least 72.1% compared with the global application. [Conclusion] The proposed method can effectively solve the problems of real-time performance and kinematic feasibility in dynamic target tracking, and significantly improve the autonomous tracking capability of ships in scenarios such as tugboat escort and maritime police law enforcement.

**Key words:** path planning; A\* method; ship navigation; intelligent tracking; intelligent tracking

## 0 引言

在拖船伴航、海警执法和海上救援等场景中，常常需要船舶抵近水面运动目标，并与其保持稳定的相对方位和相对距离，以实现对接和跟踪等功能。在这些场景中，亟须一种船舶跟踪抵近水面目标航行的路径规划算法，在保证船舶抵近目标之后满足持续跟踪条件（艏向一致）的同时，具有较高的路径规划效率，能在动态场景中快速滚动规划路径，实现对动态目标的抵近跟踪。路径规划算法主要解决船舶航行过程中，从船舶初始状态空间到目标状态空间的运动规划问题，同时考虑避免碰撞障碍物。现有的船舶路径规划方法主要包括快速搜索随机树（Rapidly-Exploring Random Tree, RRT）法<sup>[1]</sup>、人工势场法（Artificial Potential Field, APF）<sup>[2]</sup>和A\*算法<sup>[3]</sup>等，主要考虑固定起点和固定目标点的规划问题，很少考虑动态目标点的规划<sup>[4]</sup>，难以直接应用于船舶抵近水面动态目标航行场景中。RRT法的随机特性导致其即使在2个输入条件和计算环境完全相同的规划中，也会得到不同的结果<sup>[5]</sup>，在本文所述动态目标规划中易导致路径振荡；APF在真实的海图环境中应用存在路径易陷入局部最优解<sup>[6]</sup>、路径并非最短<sup>[7]</sup>和狭窄通道振荡<sup>[8]</sup>等问题，在动态目标点规划中可能会导致路径非最优，进而抵近效率下降。A\*算法<sup>[9]</sup>是一种基于栅格地图搜索的规划方法，可规划出海图上固定起点与终点之间的最短路径，对于本文所述船舶跟踪路径规划场景的终点连续运动的情况，能保持路径相对稳定而不发生振荡。

但是，采用经典A\*算法规划出的路径转向点过多，可能出现“锯齿”<sup>[10]</sup>，不符合船舶操纵运动特性，难以直接应用于船舶航行路径规划中；同时，该算法无法考虑船舶运动特性，难以对船舶抵近航行过程中的艏向进行规划，以保证最终船舶与目标的艏向一致。更重要的是，在动态跟踪场景中，目标位置是随时间变化的，经典A\*算法需针对每个新预测的目标点进行全局重规划，其计算耗时较长，对栅格地图尺寸和障碍物数量较为敏感，难以满足滚动规划对实时性的要求。

Hybrid A\*算法在A\*算法的基础上融合运动学模型生成可行路径<sup>[11]</sup>，能在复杂障碍环境中生成可直

接执行的平滑路径，且能规划艏向，适用于本文所述船舶跟踪路径规划场景。但该算法的时间复杂度较高<sup>[12]</sup>，适合在小栅格地图尺度范围内应用，在复杂障碍物环境中进行长距离规划会导致规划耗时大幅增加<sup>[13]</sup>，难以应用于须频繁快速响应的动态跟踪滚动规划中。

对此，本文提出一种基于分层架构的船舶智能跟踪航行规划算法，以适应船舶跟踪路径规划场景的需求。首先，建立船舶运动与跟踪规划数学模型，对研究的问题进行描述；其次，详细阐述提出的分层规划算法，包括改进A\*算法、快速反向搜索迭代规划（Rapid Reverse Search Iterative Planning, RRSIP）方法和Hybrid A\*精细规划方法；最后，通过多组仿真试验验证各方法及整体算法的性能，并对未来的研究方向进行展望。

## 1 问题描述

定义描述船舶运动的参考坐标系为笛卡尔二维大地坐标系，将规划区域地图左下角的点作为坐标系原点，正东方向为x轴正方向，正北方向为y轴正方向。定义船舶运动状态

$$\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{p}, \boldsymbol{\psi}]^T \in \mathbb{R}^3, \boldsymbol{p} = [x, y]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{V} = [\boldsymbol{v}, r]^T \in \mathbb{R}^3, \boldsymbol{v} = [u, v]^T \quad (2)$$

式（1）和式（2）中： $\boldsymbol{\eta}$ 为船舶状态向量； $\boldsymbol{V}$ 为船舶速度向量； $\boldsymbol{p}$ 为船舶位置向量； $\boldsymbol{v}$ 为平动速度向量； $x$ 和 $y$ 为船舶位置坐标； $\boldsymbol{\psi}$ 为艏向角，正东方向为0。逆时针增加； $u$ 和 $v$ 分别为船舶x方向的速度和y方向的速度； $r$ 为艏向角速度。

路径规划的初始状态定义为 $\boldsymbol{\eta}_i(0)$ ，目标状态为 $\boldsymbol{\eta}_g(T)$ ， $T[s]$ 为路径总耗时；目标船的状态定义为 $\boldsymbol{\eta}_t(t)$ 。本文研究的核心问题是规划引导船舶从 $\boldsymbol{\eta}_i(0)$ 到 $\boldsymbol{\eta}_g(T)$ 抵近水面运动目标的安全路径，该路径能遵循船舶运动学模型。 $\boldsymbol{\eta}_g(T)$ 的定义为

$$\boldsymbol{\eta}_g(T) = [\boldsymbol{p}_g, \boldsymbol{\psi}_g]^T \quad (3)$$

满足保持跟踪航行的条件

$$\begin{cases} \|\boldsymbol{p}_g - \boldsymbol{p}_t\| = R_t \\ \boldsymbol{p}_g = [x_g, y_g]^T, \boldsymbol{p}_t = [x_t, y_t]^T \end{cases} \quad (4)$$

$$\arctan\left[\frac{(y_g - y_t)}{(x_g - x_t)}\right] - \psi_t = \theta_t \quad (5)$$

$$\psi_g = \psi_t \quad (6)$$

式(3)~式(6)中:  $p_g$ 为逼近时跟踪点位置;  $\psi_g$ 为跟踪点期望艏向;  $p_t$ 为逼近时刻目标期望位置,  $\psi_t$ 为逼近时刻目标艏向;  $R_t$ 为跟踪航行的期望相对距离,  $m$ ;  $\theta_t$ 为跟踪航行相对于目标船舶艏向的舷角,  $^\circ$ 。

在路径规划中使采用船舶动力学模型预演船舶运动路径, 用于推演船舶运动轨迹的操纵运动模型参考FOSSSEN<sup>[14]</sup>的船舶操纵运动预测模块。

## 2 改进的算法模型

为实现对目标船舶的逼近跟踪路径规划, 应对海洋环境约束、目标运动动态性和船舶运动特性等多方面因素的影响, 提出一种基于分层架构的船舶智能跟踪航行规划算法, 其总体框架见图1。该框架以海洋地图信息和目标运动信息为输入, 建立海洋栅格地图, 通过多阶段算法和滚动规划机制, 逐步生成满足要求的跟踪路径: 首先, 采用改进A\*算法生成初始路径; 其次, 通过反向搜索迭代得到逼近跟踪路径; 最后, 结合船舶的运动特性进行精细规划, 得到考虑船舶运动特性的精细跟踪路径。同时, 针对逼近过程中目标船舶的航速和航向发生变化的情况, 采用逼近跟踪路径滚动规划方法, 以适应动态的航行环境。船舶在沿着规划的路径航行过程中, 当检测到目标机动航行时(航速和航向的变化大于阈值), 会触发反向搜索迭代, 重新规划逼近跟踪路径。

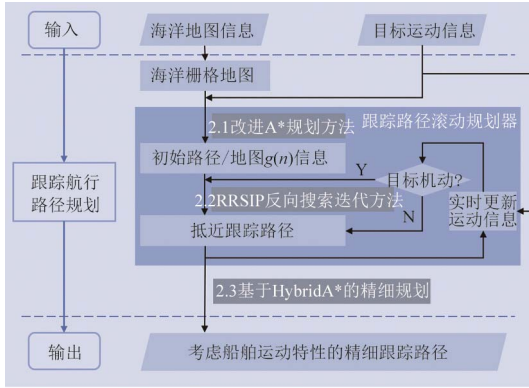


图1 船舶智能跟踪航行路径规划法框架

Fig. 1 Framework for Ship Tracking Path Planning Method

基于上述流程的关键算法环节进行研究, 具体包含:

1) 提出基于动态优化的改进A\*算法, 用于快速生成从本船状态到目标跟踪点的初始路径。

2) 设计基于RRSIP的逼近跟踪路径迭代方法, 高效求解满足“目标按当前运动状态到达预测点时, 本船恰好执行完路径逼近该点”的同步性逼近跟踪路径。

3) 采用基于Hybrid A\*的精细规划方法, 快速得到考虑船舶运动特性的可行跟踪路径。

### 2.1 基于动态优化的改进A\*算法

由于经典A\*算法在节点移动扩展过程中只能向附近8个节点移动, 因此规划的路径会包含大量冗余节点, 一条长的直线路径被表示为由若干个连续节点组成的路径; 同时, 受节点扩展方向限制, 路径可能出现锯齿折线。因此, 直接采用经典A\*算法规划的逼近跟踪路径可能导致船舶出现频繁转向和航行距离增加等问题。

针对上述路径冗余问题, 通过动态优化机制实现对采用经典A\*算法所得路径的优化。通过对路径建立动态规划模型, 求解全局最优路径拓扑, 动态规划建模采用逆向递推策略, 定义优化函数

$$dp[j] = \min_{i \in [0, j]} [dp[i] + \|p_j - p_i\| \cdot \ell_s(i, j)] \quad (7)$$

式中:  $i$ 和 $j$ 为采用经典A\*算法规划出的路径节点编号;  $\ell_s(i, j)$ 为碰撞安全指示函数, 在路径段 $pp_j$ 与障碍物无碰撞时取1, 否则置为 $\infty$ 。

在对算法进行初始化时, 设置起始点路径长度 $dp[0]=0$ , 通过 $i$ 和 $j$ 双重循环遍历所有A\*算法规划出的节点组合。当检测到可行的优化路径时, 更新目标节点的最小累积路径长度和前索引 $i$ , 每次 $j$ 循环结束之后, 直接将可行的优化路径 $pp_j$ 连接, 从而得到简化的路径。对于安全指示函数 $\ell_s(i, j)$ 的计算, 通过宽度为本船避碰半径的有向包围盒 $\Omega$ 快速筛选与路径段 $pp_j$ 有关的栅格区域, 以减少障碍栅格的检查数量, 提升规划的时效性。有向包围盒的构建过程如下。

确定包围盒主方向:

$$d = (d_x, d_y) = (p_j - p_i) / \|p_j - p_i\| \quad (8)$$

包围盒法线方向为

$$d_n = (-d_y, d_x) \quad (9)$$

包围盒原点为

$$(x_c, y_c) = 0.5(p_i + p_j) \quad (10)$$

对于任意障栅格位置, 将其位置坐标转换为有向包围盒相对坐标之后, 即可快速判断该栅格是否位于包围盒内部。

$$x' = (x_o - x_c)d_x + (y_o - y_c)d_y \quad (11)$$

$$y' = (x_o - x_c)d_n + (y_o - y_c)d_n \quad (12)$$

安全指示函数 $\ell_s(i, j)$ 的定义为

$$\ell_s(i, j) = \begin{cases} \infty, & \exists p_o \text{ s.t. } |x'| \leq w_\Omega, |y'| \leq r_o \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $w_\Omega$ 为包围盒半宽;  $r_o$ 为本船避碰半径。

$$w_\Omega = \|p_j - p_i\| / 2 \quad (14)$$

### 2.2 基于RRSIP的逼近跟踪路径迭代方法

采用2.1节所述改进A\*算法能规划出从本船状

态 $\eta_i(0)$ 到当前跟踪状态 $\eta_g(0)$ 的初始路径。但是，若本船沿着初始路径航行，在抵达路径终点时，目标已离开 $p_i(0)$ 。因此，须综合考虑目标航速和航向与本船航速的限制，规划一条抵近跟踪路径，使目标按当前速度运动到 $p_i(T)$ 时，本船恰好到达 $p_g(T)$ 。为实现该目标，在每次规划时基于目标匀速直线运动的假设进行跟踪路径迭代计算。迭代过程示意图见图2，该过程通过多次迭代调整预测抵近点。当所得抵近跟踪路径航行耗时与假设的目标运动时间的差值在容许范围内时，迭代终止。相比采用追踪导引法的跟踪航行形式（以目标实时位置作为终点的规划形式），本文所述线性预测抵近航行策略能直接向预测点前进见图3，以更短的路径高效抵近目标。

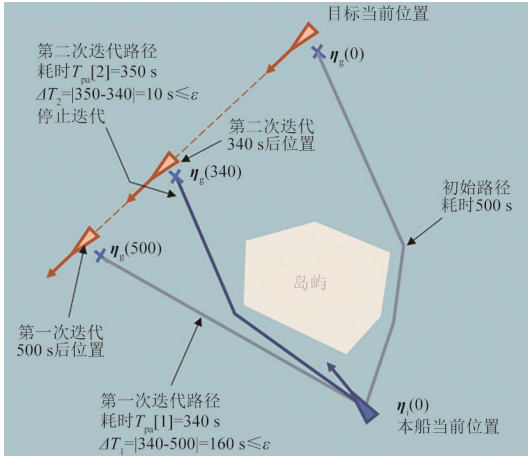


图2 抵近跟踪路径迭代过程示意图

Fig. 2 Schematic of the Iterative Process for Tracking Path

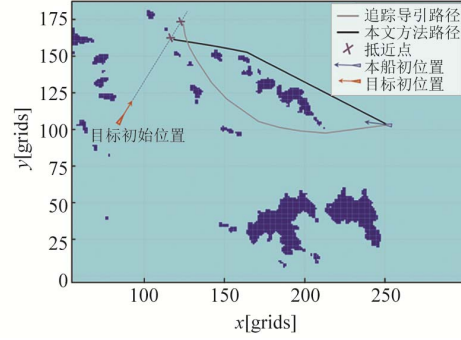


图3 本文所述抵近跟踪规划方法与追踪导引法对比图

Fig. 3 Comparative Analysis Between Proposed Tracking Planning Method and Tracking Guidance Approach

本文所述船舶智能跟踪航行规划算法的路径迭代部分整体流程见算法1。为提升滚动规划器对目标变速、变向航行的响应能力，必须缩短改进A\*算法及路径迭代过程的整体计算耗时。为避免在每次迭代过程中进行全局重规划，在改进A\*算法的基础上提出RRSIP方法，实现对抵近跟踪路径的快速求解。

在抵近跟踪路径迭代过程中，须假设目标船航行不同的 $T_{pa}$ ，以获取路径终点 $p_g(T_{pa})$ 进行多次规划，并在多次规划中保持路径的起点 $p_i$ 不变。由于路径终点 $p_g$ 沿着当前 $\psi_g$ 方向移动的范围相比整条路径长度较短（尤其是当本船的最大航速远高于目标的速度时），初始路径规划中获取的栅格实际成本信息 $g(n)$ 可在后续规划中复用。基于该前提，RRSIP方法在初始路径的基础上对运动目标点 $p_g$ 进行反向搜索迭代，避免多次执行从 $p_i$ 至运动目标点 $p_g$ 的全局搜索，显著缩短迭代搜索耗时。

表1 目标抵近跟踪路径迭代计算方法（算法1）

Tab. 1 Target Approach Tracking Path Iterative Calculation Method (Algorithm 1)

输入：本船初位置 $p_i(0)$ 、目标船初位置 $p_g(0)$ 、目标速度 $V_j$ 、本船航速限制 $V_{lim}$ 、收敛阈值 $\epsilon$ 和最大迭代次数 $N$ 。输出：抵近跟踪路径 $p_{path}$ 。			
1	初始化路径耗时列表 $T_{pa} \leftarrow [0]$	10	$T_{pa}[i_i] \leftarrow l_{length}(p_{path}[i_i])/V_{lim}$
2	迭代次数 $i_i \leftarrow 0$	11	$p_g(T_{pa}[i_i+1]) \leftarrow \text{predict}(p_g(0), T_{pa}[i_i+1], V_j)$
3	收敛符号 $b \leftarrow \text{False}$	12	$\Delta T \leftarrow  T_{pa}[i_i+1] - T_{pa}[i_i] $
4	<b>While</b> $b == \text{False}$ and $i_i < N$ <b>do</b>	13	<b>if</b> $\Delta T < \epsilon$ <b>do</b>
5	<b>if</b> $i_i == 0$ <b>do</b>	14	$b \leftarrow \text{True}$
6	$p_{path}[i_i], g_e \leftarrow \text{improved\_A}(p_i, p_g, obs)$	15	<b>end if</b>
7	<b>else do</b>	16	$i_i \leftarrow i_i + 1$
8	$p_{path}[i_i], g_e \leftarrow \text{RRSIP}(g_e, p_i, p_g, obs)$	17	<b>end while</b>
9	<b>end if</b>	18	<b>return</b> $p_{path}[i_i]$

具体而言，RRSIP方法在初始规划开始之前生成一个数组 $g_e(n)$ ，用以存储初始路径规划与迭代过程中每次反向搜索经过的栅格 $g(n)$ 值信息，对于未搜索过的节点，其 $g(n)$ 值视为无穷大。当路径终点

移动到新位置 $p_{gn}$ 时，不再运行全局A\*搜索，而是执行以 $p_{gn}$ 为起点，以 $p_i$ 为终点的反向A\*搜索。在反向搜索过程中，节点的成本函数定义为

$$f_r(n) = g_r(n) + h_r(n) \quad (14)$$

式中:  $g_r(n)$ 为 $p_{gn}$ 到节点 $n$ 的实际成本;  $h_r(n)$ 为节点 $n$ 到 $p_i$ 的估计成本。 $h_r(n)$ 的定义为

$$h_r(n) = \begin{cases} g_c(n), & g_c < \infty \\ \left(1 + \frac{\|p_i - p_n\|}{\|p_i - p_{gn}\|}\right) \|p_i - p_n\|, & g_c \geq \infty \end{cases} \quad (15)$$

从 $p_{gn}$ 反向搜索到 $p_i$ 之后, 将该路径反转, 得到从 $p_i$ 到 $p_{gn}$ 的新路径, 同时更新反向搜索中探索过的节点 $g_c(n)$ , 以便进行下一次反向搜索迭代。RRSIP算法流程见表2。

表2 RRSIP算法(算法2)

Tab. 2 RRSIP Algorithm (Algorithm 2)

输入: 节点成本数组 $g_c(n)$ , 本艇位置 $p_i$ , 搜索起点 $p_{gn}$ , 障碍物栅格地图信息 obs。输出: 迭代跟踪路径 $p_{path,i}$ , 更新后的 $g_c(n)$ 。			
1	初始化 $OpenSet$	10	<b>continue</b>
2	节点化起点 $n_{gn}$ , 加入到 $OpenSet$	11	<b>end if</b>
3	<b>While</b> $OpenSet$ is not empty <b>do</b>	12	$g_r(n) \leftarrow g_r(n) + \ p_{gn} - p_n\ $
4	$n \leftarrow OpenSet.heappop(OpenSet)$	13	$f_r(n_n) \leftarrow \min[f_r(n_n), g_r(n_n) + h_r(n_n)]$
5	<b>if</b> $p_i$ in $n$ <b>do</b>	14	$heapq.heappush\{OpenSet, [f_r(n_n), n_n]\}$
6	<b>break</b>	15	<b>end for</b>
7	<b>end if</b>	16	$p_{path,i} = \text{reconstruct}(n_i, n_{gn})$
8	<b>for</b> $n_n$ in $neighbor(n)$ <b>do</b>	17	更新 $g_c(n)$
9	<b>if</b> $n_n \in obs$ <b>do</b>	18	<b>return</b> $p_{path,i}$

### 2.3 基于 Hybrid A\* 的精细规划方法

由于上述逼近跟踪路径未考虑逼近姿态约束和船舶的操纵运动特性, 因此该路径的转向点处可能存在图形学上可行但运动学上无法实现的问题。下面引入考虑逼近姿态和船舶运动模型的 Hybrid A\* 算法, 对采用改进 A\* 算法规划的路径的转向点前  $l_d$  至转向点后  $l_d$  范围内的路径进行精细规划。采用该精细规划方法既能生成符合船舶运动特性的路径, 又能减小 Hybrid A\* 算法的规划长度, 提升规划效率。在路径最后阶段, 设置精细规划终点  $\eta_{sg} = \eta_g(T)$ , 以保证本船逼近跟踪路径的最终航向与目标航向相同。

Hybrid A\* 算法将经典 A\* 算法的离散网格与连续的船舶运动相融合, 实现 A\* 算法对欠驱动系统的运动规划。与一般 A\* 算法不同的是, Hybrid A\* 算法进行节点扩展运算时选取不同的舵角控制量, 将船舶速度和舵角作用于船舶操纵运动预测模块, 从而预演一段船舶运动轨迹, 进而得到抵达下一个节点的扩展路径, 见图4 (虚线为采用改进 A\* 算法得到的路径; 红色实线为采用 Hybrid A\* 算法的路径)。

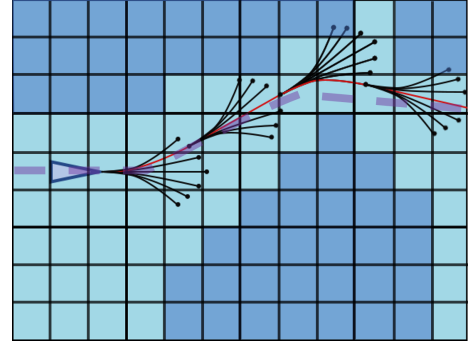


图4 Hybrid A\*方法节点扩展示意图

Fig. 4 Hybrid A\* Node Expansion Schematic

同时, 该方法须对 A\* 算法的节点实际成本函数  $g(n)$  进行改进, 有

$$g(n) = \sum (l_{step} + k_r |\delta| + k_{cr} |\Delta\delta|) \quad (16)$$

式中:  $l_{step}$  为扩展路径长度;  $\delta$  为舵角控制输入;  $\Delta\delta$  为2次节点扩展中舵角的差值;  $k_r$  和  $k_{cr}$  分别为舵角成本参数和舵角变化成本参数。

改进后的  $g(n)$  使规划的路径需同时考虑减小路径长度、减少船舶转向角度总和以及舵角变化的次数和幅度。Hybrid A\* 算法实现过程见表3。

表 3 船舶路径规划 Hybrid A\*算法 (算法 3)

Tab. 3 Hybrid A\* Algorithm for Ship Path Planning (Algorithm 3)

输入：起点终点状态 $\eta_{sb}, \eta_{sg}$ ，障碍物栅格地图信息 $Obs$ ，操纵行为集合 $S_{cz}$ 。输出：规划路径 $p_{path}$ 。			
1	使用计算启发式地图 $h(n)$	15	<b>if</b> $n_i \in Obs$ <b>or</b> $n_i \in ClosedSet$ <b>do</b>
2	初始化 $OpenSet, ClosedSet$	16	<b>continue</b>
3	节点化起点 $n_i$ ，加入到 $OpenSet$	17	<b>end if</b>
4	初始化优先级队列 $pq$ ，加入 $n_i$ 索引信息	18	<b>if</b> $n_i \notin OpenSet$ <b>do</b>
5	<b>While True do</b>	19	$OpenSet.push(n_i)$
6	$n_c \leftarrow OpenSet[pq.get()]$	20	$pq.push\{[n_i, g(n_i)]\}$
7	$ClosedSet[pq.get()] \leftarrow n_c$	21	<b>else</b>
8	$OpenSet.pop[pq.get()]$	22	<b>if</b> $g(n_i) < pq.get().priority$ <b>do</b>
9	尝试直接扩展更新 $n_c$ 到终点 $\eta_{sg}$	23	$pg.get().priorityg(n_i)$
10	<b>if</b> 成功更新 <b>do</b>	24	<b>end if</b>
11	$n_c \leftarrow n_{sg}$ , <b>break</b>	25	<b>end if</b>
12	<b>end if</b>	26	<b>end for</b>
13	<b>for</b> $cz$ <b>in</b> $S_{cz}$ <b>do</b>	27	<b>end while</b>
14	$n_i \leftarrow pred(cz, n_c)$	28	<b>return</b> 路径回溯( $ClosedSet$ )

### 3 仿真结果与对比分析

设计抵近跟踪规划案例测试上述基于分层架构的船舶智能跟踪航行规划算法，具体包括：

1) 测试基于动态优化的改进A\*算法与其他优化方法的对比结果。

2) 测试本文所述反向搜索迭代方法对抵近跟踪路径规划的搜索效果。

3) 测试基于Hybrid A\*算法的路径精细规划方法，并验证该方法相比全局使用Hybrid A\*算法规划耗时下降。

4) 设置完整的抵近跟踪任务场景，测试本文所述方法实现跟踪航行的完整流程。

令本船对目标船的期望跟踪点参数 $R_t=400$  m,  $\theta_t=-2\pi/3$ 。仿真试验中采用搭载12th Gen Intel i7-12700H CPU与Kingston 16 GB内存的设备计算。

#### 3.1 改进 A\*算法试验

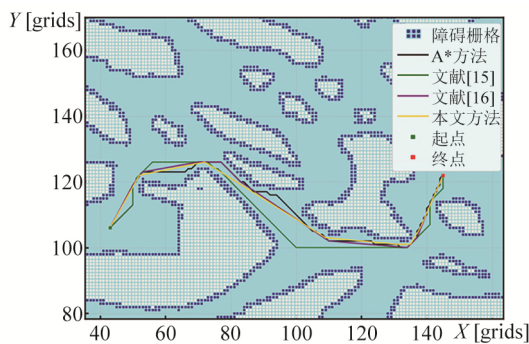
为验证分层架构中的改进A\*算法在算法性能要

求较高的跟踪规划场景中应用的可行性，设置4组起点和终点，采用随机生成的栅格地图障碍物，取栅格大小为94 m，起点和终点设置见表4。对比本文所述算法与经典A\*算法、基于跳点搜索的改进A\*算法<sup>[15]</sup>和基于线性冗余简化与碰撞检测的改进A\*算法<sup>[16]</sup>规划的路径长度、转折点数量和规划耗时，采用多种算法在多种场景下进行路径规划，规划的路径见图5，其中坐标中网格长度为94 m/grid。规划的路径长度、转折点数量和规划耗时见表5。

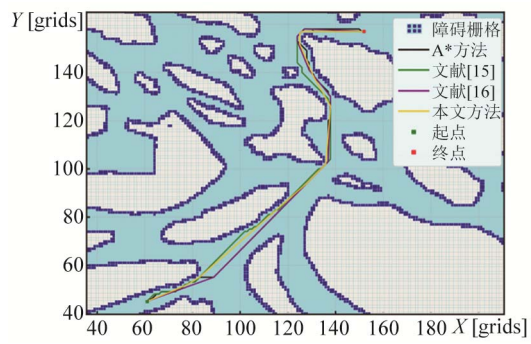
表 4 不同场景下的改进 A\*算法试验起点和终点设置

Tab. 4 Settings for Different Improved A\* Experiments

场景编号	起点格栅坐标	终点格栅坐标
1	(43, 106)	(145, 122)
2	(61, 45)	(152, 157)
3	(150, 35)	(200, 140)
4	(60, 168)	(229, 67)



(a) 场景 1 规划路径图



(b) 场景 2 规划路径图

图 5 各场景下不同改进 A\*算法的路径规划图

Fig. 5 Planning Paths of Different Improved A\* Algorithms in Multi-Scenario Environments

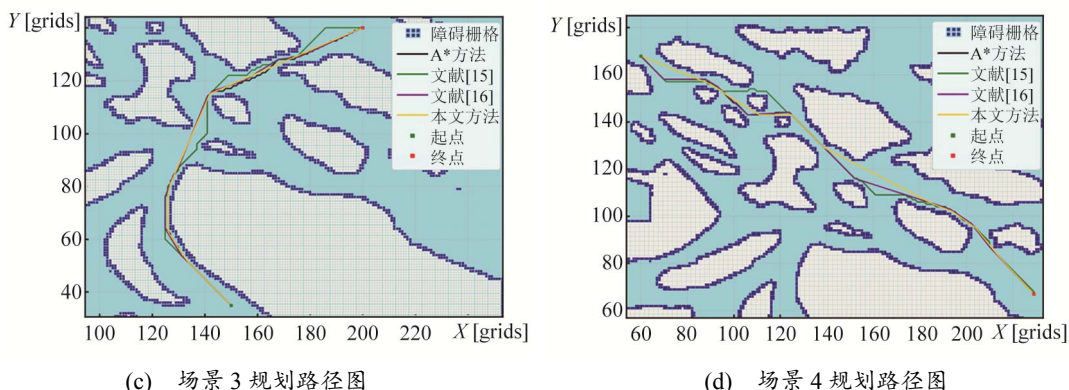


图 5 各场景下不同改进 A\*算法的路径规划图 (续)

Fig. 5 Planning Paths of Different Improved A\* Algorithms in Multi-Scenario Environments (Continued)

表 5 不同改进 A\*算法的性能对比

Tab. 5 Performance Comparison of Different Improved A\* Algorithms

场景编号	参数	经典 A*算法	文献[15]算法	文献[16]算法	本文所述算法
1	路径长度/m	13 226	12 892	12 587	12 380
	转折点数/个	44	14	6	5
	规划耗时/s	0.591	0.755	0.604	0.668
2	路径长度/m	17 663	17 140	17 211	16 892
	转折点数/个	30	33	7	8
	规划耗时/s	0.815	0.725	0.824	0.840
3	路径长度/m	15 576	15 423	14 758	14 617
	转折点数/个	61	29	10	6
	规划耗时/s	0.745	0.771	0.775	0.840
4	路径长度/m	20 060	20 197	19 505	18 978
	转折点数/个	39	41	8	9
	规划耗时/s	0.596	0.457	0.601	0.621

由图5和表5可知, 在全部4种测试场景中, 采用本文所述算法规划出的路径长度均最短, 显示出了稳定的优化性能。本文所述算法相比几种典型算法的路径长度下降率见表6。由表6可知: 与经典A\*算法相比, 本文所述算法的路径长度平均下降5.58%, 最大降幅达6.40%; 与文献[15]中的算法相比, 本文

所述算法的路径长度平均下降4.17%, 且在场景四中下降最明显, 因为本文所述算法能避免该场景中跳点搜索可能跳过最优路径的问题; 与文献[16]中的算法相比, 本文所述算法在多场景中均保持长度优势, 表明本文算法在缩短路径长度方面具备有效性。

表 6 本文所述算法相比几种典型算法的路径长度下降率

Tab. 6 Performance Comparison of Different Improved A\* Algorithms

算法	本文所述算法路径长度下降率/%				平均下降/%
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	
经典 A*算法	6.40	4.37	6.16	5.39	5.58
文献[15]	3.97	1.45	5.23	6.04	4.17
文献[16]	1.64	1.85	0.96	2.70	1.79

在路径平滑性方面, 本文所述方法在4个场景中获得的路径转折点数显著小于经典A\*算法, 平均减少超过80%, 与文献[16]中的算法相近, 表明其能有效减少路径中的冗余转向, 更符合船舶的实际操纵需求。

本文所述算法的规划耗时略高于经典A\*算法和文献[16]中的算法, 但幅度有限(平均增加6%~8%)。这表明, 采用的动态优化与碰撞检测机制虽会带来一定的计算开销, 但能避免文献[16]中所述算法存在的“简化了可能组成更短路径的中间节点”的问

题，保证路径的全局最优性，适用于对抵近效率要求较高的船舶跟踪场景。

### 3.2 抵近跟踪路径迭代方法试验

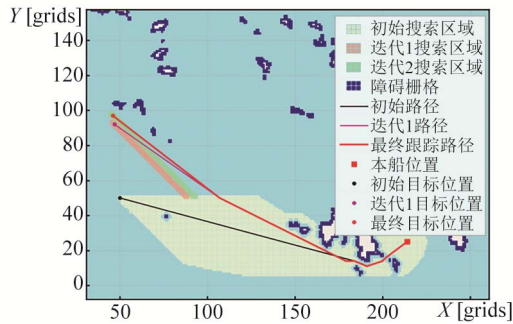
为验证基于RRSIP的抵近跟踪路径规划方法（称RRSIP方法）的性能优势，设计动态目标抵近跟踪路径迭代试验，重点对比RRSIP方法与改进A\*全局重规划（Full Replanning, FR）方法在迭代过程中的搜索节点数变化和规划性能。试验海域选择东海某近海海域，海域参数见表7。通过设置多组跟踪场景，统计分析2种方法在规划性能上的差异。试验

结果见图6~图8，多场景下本船与目标船的运动参数设置见表8。

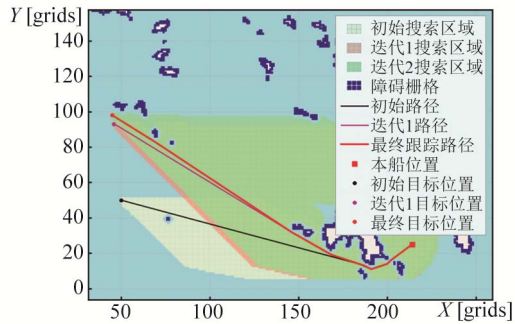
表 7 试验海域参数

Tab. 7 Test Area Parameters

参数	数值
边界坐标	(122.577°E,122.841°E) (30.683°N,30.844°N)
原点坐标	(122.577°E,30.683°N)



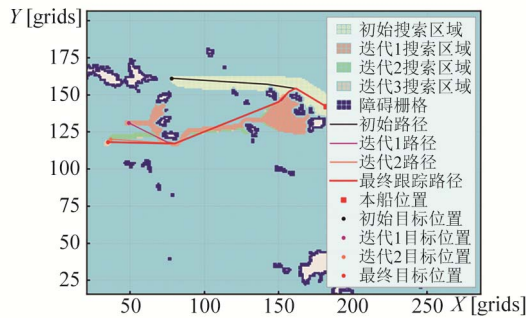
(a) 场景 1 RRSIP 方法示意图



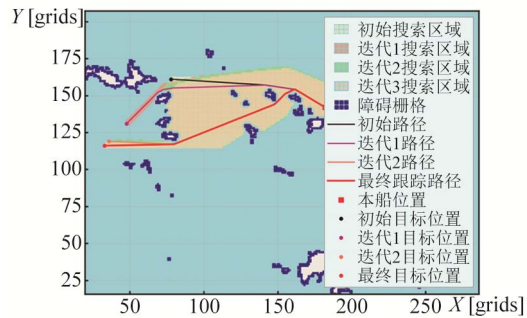
(b) 场景 1 FR 方法示意图

图 6 场景 1 不同迭代方法对比 (坐标中网格长度为 94 m/grid)

Fig. 6 Comparison of RRSIP & FR in Scenario 1 (Grid Length is 94 m/grid)



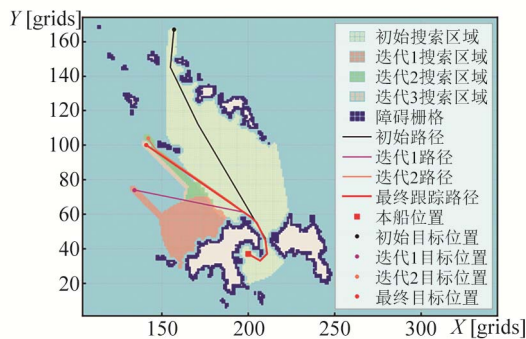
(a) 场景 2 RRSIP 方法示意图



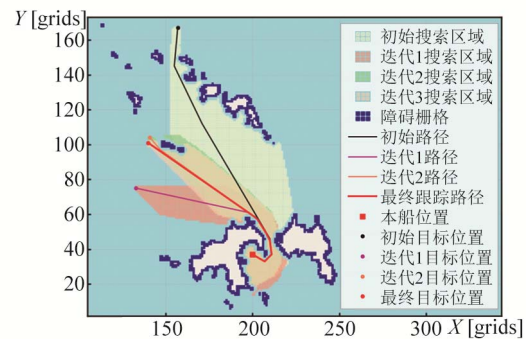
(b) 场景 2 FR 方法示意图

图 7 场景 2 不同迭代方法对比 (坐标中网格长度为 94 m/grid)

Fig. 7 Comparison of RRSIP & FR in Scenario 2 (Grid Length is 94 m/grid)



(a) 场景 3 RRSIP 方法示意图



(b) 场景 3 FR 方法示意图

图 8 场景 3 不同迭代方法对比

Fig. 8 Comparison of RRSIP & FR in Scenario 3

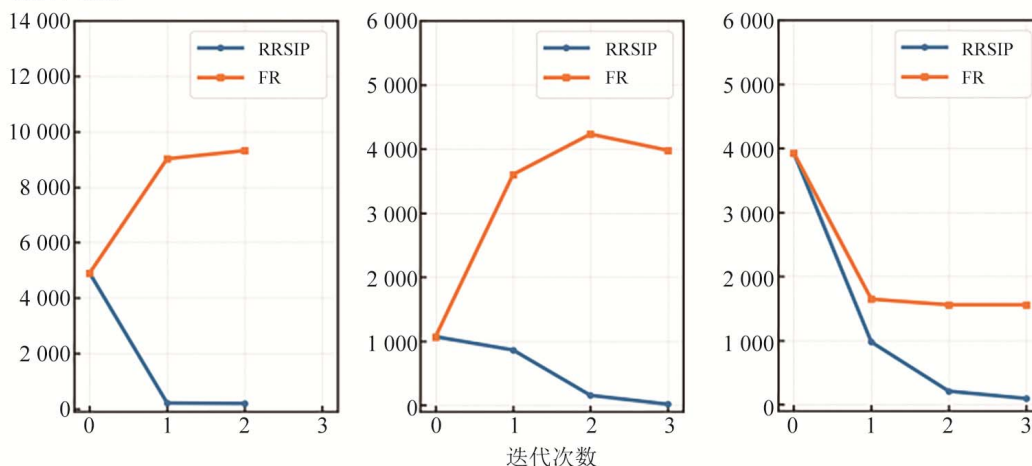
表 8 多场景下本船与目标船的运动参数

Tab. 8 Motion Parameters of Ships in Multiple Scenarios

场景	参数	数值	
		本船	目标船
1	初始位置/m	(20 116,2 350)	(4 700,4 700)
	航速/(m/s)	20.58	5.14
	艏向/(°)	180.0	95.4
2	初始位置/m	(17 108,13 348)	(7 332,15 134)
	航速/(m/s)	20.58	8.23
	艏向/(°)	180.0	-135.0
3	初始位置/m	(18 800,3 478)	(14 758,15 698)
	航速/(m/s)	20.58	12.35
	艏向/(°)	-90.0	-104.3

由图6~图8可知, 2种方法均以保证最终跟踪路径相同且最优为前提, 主要从搜索节点数和规划耗时2个方面进行评估。表9为不同场景下RRSIP方法与FR方法规划耗时对比。由表9可知, RRSIP方法在迭代过程中表现出显著的效率优势。在3个场景中,

搜索节点数



(a) 场景 1 搜索节点数对比 (b) 场景 2 搜索节点数对比 (c) 场景 3 搜索节点数对比

图 9 不同场景下 RRSIP 方法与 FR 方法搜索节点对比

Fig. 9 Comparison of Explored Nodes During Iterations

整体而言, RRSIP方法能至少缩短规划耗时33.9%, 有效缓解迭代计算中的时间开销问题, 证明RRSIP方法在逼近跟踪任务场景中, 在保证路径质量的前提下, 具有更好的时效性, 能提升滚动规划的效率, 其秒级响应时间满足高动态船舶跟踪任务的实时性要求。

### 3.3 路径精细规划

在3.2节所述3种场景下的逼近跟踪路径的基础上, 采用Hybrid A\*算法对路径转向点前后 $l_d$ 范围内的路径进行精细规划, 试验中取 $l_d=940$  m,  $R_f=400$  m,  $\theta_f=180^\circ$ , 采用表5所述3个场景下的目标和本船运动

RRSIP方法的迭代总耗时分别为FR方法的33.0%、40.8%和66.1%。由此可见, RRSIP方法的规划耗时有显著下降, 但下降幅度会随着反向搜索中搜索节点规模的变化而波动。这是因为在这3种场景中, 目标的速度依次增加, 导致在反向搜索中 $p_g$ 的移动范围变大, 须探索更多新节点(见图9), 且 $g_c(n)$ 的复用率下降, 导致RRSIP方法对规划耗时的优化作用减弱。

表 9 不同场景下 RRSIP 方法与 FR 方法规划耗时对比

Tab. 9 Comparison of Planning Time Between RRSIP and FR Methods in Different Scenarios

场景	方法	规划耗时/s				总时间/s
		初规划	迭代 1	迭代 2	迭代 3	
1	RRSIP	0.615	0.160	0.157	—	0.932
	FR	0.620	1.087	1.121	—	2.828
2	RRSIP	0.245	0.226	0.169	0.103	0.743
	FR	0.242	0.486	0.585	0.509	1.822
3	RRSIP	0.512	0.154	0.113	0.102	0.881
	FR	0.507	0.285	0.257	0.283	1.332

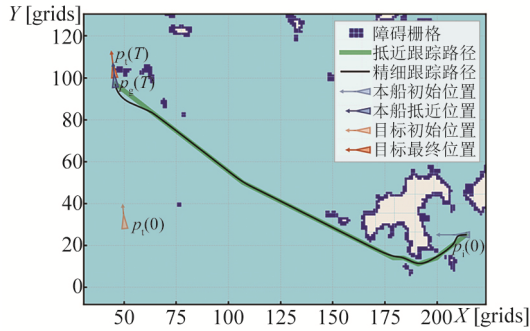
参数, 不同规划策略的计算耗时见表10, 得到的路径见图10。由表10和图10可知, 本文所述考虑逼近姿态约束的跟踪路径规划方法能规划出逼近目标时本船航向与目标航向一致的可行路径。由于本文所述精细规划只考虑路径转向点前后距离 $l_d$ 的范围, 减少了每次Hybrid A\*算法规划的路径长度和需考虑的障碍栅格数。采用本文所述精细规划方法相比直接采用Hybrid A\*算法进行从 $\eta_1(0)$ 到 $\eta_g(T)$ 的路径规划, 计算耗时至少缩短72.1%, 时效性更满足跟踪规划场景需求。同时, 采用该策略能在考虑船舶操纵运动模型的基础上进行跟踪航行路径规划, 可避

免出现无法航行的路径。

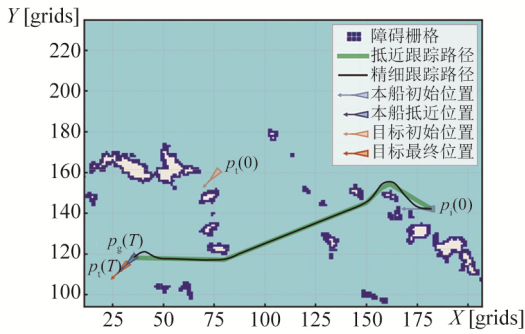
表 10 不同规划策略的计算时间对比

Tab. 10 Computational Time Comparison of Strategies

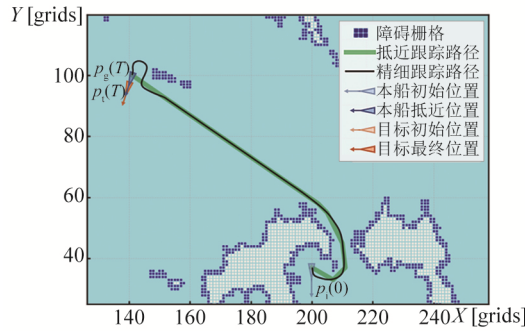
场景	规划耗时/s		下降率/%
	纯 Hybrid A* 算法	本文方法	
1	10.476	2.544	75.7
2	9.584	2.167	77.4
3	14.708	4.103	72.1



(a) 场景 1 精细路径规划图



(b) 场景 2 精细路径规划图



(c) 场景 3 精细路径规划图

图 10 路径精细规划测试图

Fig. 10 Refined Global Path Planning

### 3.4 逼近跟踪任务测试

在表4所示海域内设置运动水面目标，采用本文提出的船舶智能跟踪航行规划算法进行逼近跟踪航行虚拟试验，以验证本文所述方法在完整任务流程下的有效性。取 $l_d=940$  m,  $R_t=400$  m,  $\theta_t=180^\circ$ ，水面目标按预定的折线航线航行（见图11），在途中进行多次大幅度转向，模拟目标的正常航行机动行

为，以检验本船能否在监测到被跟踪目标机动航行时启动滚动规划，快速刷新逼近跟踪路径，引导本船进入跟踪位置 $p_g(T)$ 。在此过程中，关键节点的两船位置与路径见图12。

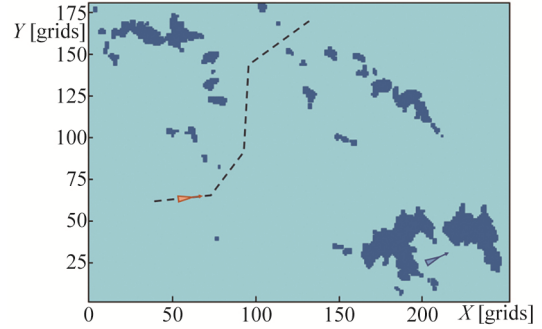
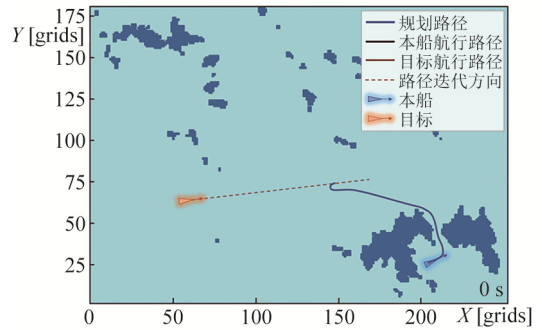
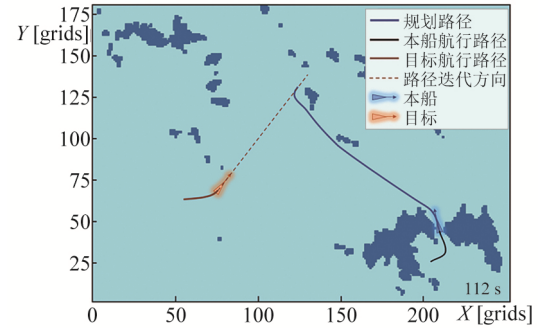


图 11 测试任务水面目标航线示意图

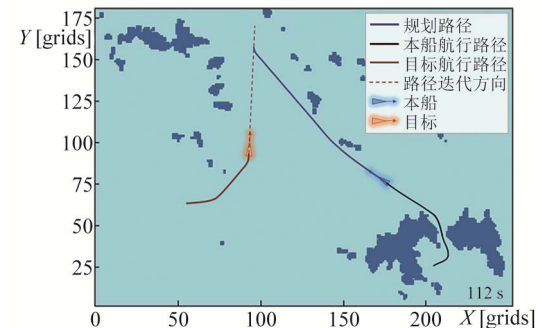
Fig. 11 Route Diagram of Surface Target for Test Mission



(a) 场景开始时刻逼近跟踪路径示意图



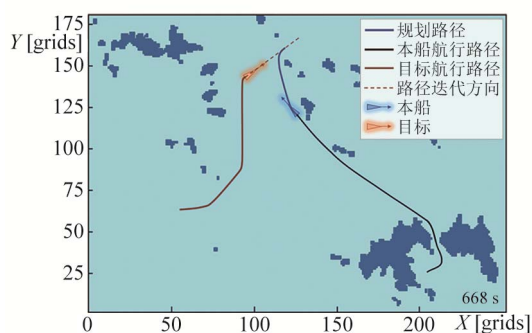
(b) 场景 112 s 逼近跟踪路径更新示意图



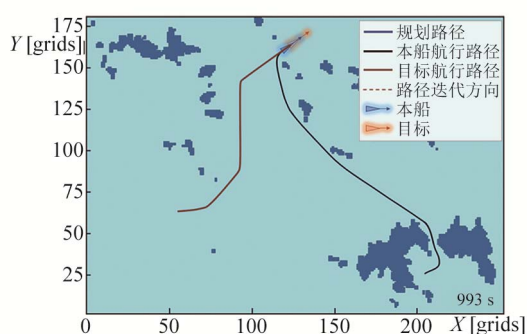
(c) 场景 343 s 逼近跟踪路径更新示意图

图 12 逼近跟踪测试任务关键节点示意图

Fig. 12 Schematic of Key Points in the Tracking Mission



(d) 场景 668 s 抵近跟踪路径更新示意图



(e) 成功抵近目标示意图

图 12 抵近跟踪测试任务关键节点示意图 (续)

Fig. 12 Schematic of Key Points in the Tracking Mission (Continued)

试验结果表明, 目标船每次机动变向时, 本文所述方法都能成功触发滚动规划机制。该机制以最新的目标位置、航向和航速为输入, 以本船当前的位置为起点, 在平均2.7 s内快速生成一条新的抵近跟踪路径。本文所述方法在面对目标多次突发机动时表现出了良好的实时性和鲁棒性, 所有重规划过程耗时都满足动态跟踪任务的实时性要求。

#### 4 结论

本文针对水面船舶对运动目标的抵近跟踪路径规划问题, 构建了分层架构的船舶智能跟踪航行规划算法总框架, 将规划任务分解为基于改进A\*算法的初始路径规划、基于RRSIP方法的跟踪路径搜索和基于Hybrid A\*算法的运动学精细规划, 解决传统方法存在的路径点冗余和路径较长的问题, 并提升计算效率, 满足高动态场景下的路径实时性需求。

1) 改进A\*算法基于动态规划和有向包围盒障碍检测, 通过动态优化模型消除冗余节点和锯齿折线, 在保障安全的同时, 缩短路径长度。在仿真试验中, 该算法的路径长度相比经典A\*算法平均减少5.58%, 转折点数大幅减少, 且该算法的路径相比其他典型算法是最短的。

2) 基于RRSIP的迭代方法通过保存初始全局规

划栅格成本信息, 以反向搜索替代完整全局重规划提升效率, 在动态场景测试中相比FR方法迭代总耗时至少缩短33.9%, 满足滚动规划器的实时性需求。

3) 基于Hybrid A\*的局部精细规划策略, 在转向点附近考虑船舶运动学和抵近姿态约束, 生成同向抵近的平滑路径。该策略通过限定局部规划范围, 计算耗时相比全局应用至少缩短72.1%, 能有效平衡精度与效率。

本文的研究仍存在一定的不足, 有待进一步深化研究, 具体如下:

1) 当前的动态目标建模基于匀速直线运动假设, 目标曲线航行或复杂海域下的位置预测置信度较低, 采用融合内部动态特征与外部参考轨迹的预测框架, 如Ref-DLSTM模型, 通过双并行LSTM单元处理目标轨迹差分特征和历史相似轨迹特征, 能有效校正轨迹急转等复杂场景下的预测偏差。

2) 目前的研究主要聚焦静态海图障碍, 未来可在分层框架中增加动态障碍局部避碰规划, 并融合《国际海上避碰规则》, 提升自主避障能力和算法的实用性。

3) 本文未针对拖船伴航和海警执法等核心应用场景的差异化需求设计算法和测试, 后续研究可针对不同场景建立跟踪航行性能评估体系, 针对不同应用场景设定差异化的指标权重, 通过量化分析, 进一步验证算法与不同场景的适配性。

#### 参考文献:

- [1] KELNER M J, BURZYNSKI W, STECZ W. Modeling UAV Swarm Flight Trajectories Using Rapidly-Exploring Random Tree Algorithm[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2024, 36(1): 101909.
- [2] WANG D, WANG P, ZHANG X, et al. An Obstacle Avoidance Strategy for the Wave Glider Based on the Improved Artificial Potential Field and Collision Prediction Model[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107356.
- [3] SINCLAIR J B. Optimal Assignments in Broadcast Networks[J]. IEEE Trans Computers, 1988, 37(5): 521-531.
- [4] VAGALE A, OUCHEIKH R, BYE T R, et al. Path Planning and Collision Avoidance for Autonomous Surface Vehicles I: a Review[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(4): 1-15.
- [5] HUANG T, FAN K, SUN W. Density Gradient-RRT: An Improved Rapidly Exploring Random Tree Algorithm for UAV Path Planning[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 252(PB): 124121.

- [6] LYU H G, LIU W, GUO S Y, et al. Autonomous Collision Avoidance Method for MASS Based on Precise Potential Field Modelling and COLREGs Constraints in Complex Sailing Environments[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116530.
- [7] SARKAR R, BARMAN D, CHOWDHURY N. Domain Knowledge Based Genetic Algorithms for Mobile Robot Path Planning Having Single and Multiple Targets[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2020, 34(7): 4269-4283.
- [8] WU E M, SUN Y D, HUANG J Y, et al. Multi UAV Cluster Control Method Based on Virtual Core in Improved Artificial Potential Field[J]. *IEEE Access*, 2020: 131647-131661.
- [9] SVEN K, MAXIM L. Real-Time Adaptive A\*[C]// *Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2006.
- [10] ZHANG H X, TAO Y D, ZHU W L. Global Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Improved A-Star Algorithm[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2023, 23(14): 6647.
- [11] TAO X, CAO Y Y, ZHAO Y M, et al. Hybrid A\*-Based Valley Path Planning Algorithm for Aircraft[J]. *Aerospace*, 2024, 11(7): 516-516.
- [12] XU N, LI Z H, GUO N, et al. Global Path Planning for Articulated Steering Tractor Based on Multi-Objective Hybrid Algorithm[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2024, 24(15): 4832.
- [13] QIU J D, XIAO S Q. Large-Scale Stealth Trajectory Optimization Based on Hybrid A\*-Gauss Pseudospectral Method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 1: 012054.
- [14] FOSSEN T I. *Handbook of Marine Craft Hydro-Dynamics and Motion Control*[M]. Singapore: John Wiley & Sons, Ltd., 2021.
- [15] 赵晓, 王铮, 黄程侃, 等. 基于改进 A\*算法的机器人路径规划[J]. *机器人*, 2018, 40(6): 903-910.
- ZHAO X, WANG Z, HUANG C K, et al. Mobile Robot Path Planning Based on an Improved A\* Algorithm[J]. *Robot*, 2018, 40(6): 903-910.
- [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. Research on Robot Random Obstacle Avoidance Method Based on Fusion of Improved A\* Algorithm and Dynamic Window Method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 132-140.
- [19] 祁涛, 李江浩, 赵阳, 等. 基于 IESO 的内河船舶自抗扰控制[J]. *船舶工程*, 2025, 47(增刊 2): 273-278.
- QI T, LI J H, ZHAO Y, et al. Self-Disturbance-Resistant Control for Inland Waterway Vessels Based on IESO[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(Suppl. 2): 273-278.
- [20] 吴真真, 袁超, 谢宗琳, 等. 一种恶劣海况下船舶辅助靠泊装置: CN202410788398.3[P]. 2024-09-20.
- WU Z Z, YUAN C, XIE Z L, et al. A Ship Auxiliary Berthing Device for Severe Sea Conditions: CN202410788398.3[P]. 2024-09-20.
- [21] YUAN S, LIU Z, SUN Y, et al. An Event-Triggered Trajectory Planning and Tracking Scheme for Automatic Berthing of Unmanned Surface Vessel[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113964.
- [22] 贾欣乐, 张显库. 船舶运动智能控制与  $H_\infty$  鲁棒控制 [M]. 辽宁大连: 大连海事大学出版社, 2002.
- JIA X L, ZHANG X K. *Intelligent Control of Ship Motion and  $H_\infty$  Robust Control*[M]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University Press, 2002.
- [23] PEREZ T, FOSSEN T I. Kinematic Models for Maneuvering and Seakeeping of Marine Vessels[J]. *Modeling, Identification and Control*, 2007, 28(1): 19-30.
- [24] FOSSEN T. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, 15: 2717-2746.
- [25] XU H, XIANKU Z, HUGAN Z. Trajectory Planning of USV: On-Line Computation of the Double S Trajectory Based on Multi-Scale A\* Algorithm with Reeds-Shepp Curves[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 153-153.
- [26] LIU Y, IM N, ZHANG Q, et al. Adaptive Auto-Berthing Control of Underactuated Vessel Based on Barrier Lyapunov Function[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 279.
- [27] 沈智鹏. 船舶运动自适应滑模控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- SHEN Z P. *Adaptive Sliding Mode Control for Ship Motion* [M]. Beijing: Science Press, 2019.