arXiv:2603.02484v1 [cs.RO] 3 Mar 2026

符合国际海上避碰规则的自主海上航行避碰与防搁浅

Mayur S. Patil[1†], **Nataraj Sudharsan**[1†], **Veneela Ammula**[2], **Jude Tomdio**[2], **Jin Wang**[2], **Michael Kei**[2], **Sivakumar Rathinam**[1], **Prabhakar R. Pagilla**[1]

[1]德克萨斯农工大学机械工程系，美国大学城[2]美国船级社，得克萨斯州斯普林，美国

[†]作者贡献相同

电子邮箱：srathinam@tamu.edu

摘要：
海上自主水面船舶（MASS）日益被视为应对船员短缺、提升航行安全并提高海事行业运营效率的一种有前景的解决方案。然而，MASS在现实环境中的可靠部署仍是一项重大挑战，尤其是在大多数海事事故发生的拥挤水域。这凸显了对能够在动态海上条件下运行的、安全且具备法规意识的MASS运动规划策略的需求。本文提出一种面向MASS的统一运动规划方法，可实现实时避碰、遵守国际海上避碰规则（COLREGs）以及防搁浅。所提出的工作引入一种凸优化方法，将基于速度障碍（VO）的碰撞约束、基于国际海上避碰规则的方向约束以及基于水深测量的搁浅约束相结合，以生成计算高效且符合规则的最优速度选择。为增强鲁棒性，经典速度障碍法被扩展以考虑目标船位置与速度估计中的不确定性。由水深数据获得的不可航行浅水区域本质上是非凸的，通过整数线性规划（ILP）用凸几何体进行近似，从而使搁浅约束能够纳入运动规划。所得优化生成最优且动态可行的输入速度，满足避碰、法规合规性、运动学与动力学限制以及防搁浅要求。涉及多船会遇的仿真结果证明了所提方法在产生安全且符合法规的操纵方面的有效性，凸显了该方法适用于实时自主海上导航。

1 引言

海上自主水面船舶（MASS）的安全运行从根本上依赖于能够在复杂海上环境中有效运行的可靠导航系统，这些环境包括密集交通场景、不确定的船舶动力学、受限水道以及恶劣天气条件。事故统计数据表明，碰撞、搁浅、失控和接触事件在这些动态情形下的已报告事故中占很大比例 [1]。此类运行风险凸显了对先进运动规划方法的需求，这些方法能够在考虑环境不确定性和航行约束的同时，主动防止碰撞与搁浅。安全的自主航行要求生成连续且可行的航路点，以避免碰撞、遵守国际海上避碰规则 [2], ，并尊重浅水区域和受限航道等环境限制。与地面和空中载具相比，船舶具有较大惯性、缓慢的响应动态以及有限的操纵性，从而导致较长的规划时域，并降低快速纠正动作的能力。因此，自主船舶的运动规划必须提前预判潜在危险，并将避碰与防搁浅同运行及环境背景相结合，以确保安全可靠的航行。

文献中已提出许多方法来解决这一问题。基于优化的策略，尤其是基于模型预测控制（MPC）的策略，在滚动时域框架中明确考虑船舶动力学和运行约束。虽然此类方法能够系统地处理约束并具备预测能力，但随着交通密度增加和预测时域延长，其计算复杂度可能显著上升 [3, 4, 5]。此外，包括深度强化学习在内的数据驱动技术近年来受到广泛关注，这是因为它们能够学习复杂的避碰行为。然而，这些方法依赖大规模训练数据，且学习策略的透明度有限，因此在安全关键型海事作业中的部署面临挑战 [6, 7, 8]。同样，A*算法和快速探索随机树（RRT）等基于采样的规划器能够在复杂环境中生成轨迹。然而，这些方法通常需要额外的基于规则的模块来确保法规合规性，并且在高度动态的条件下适应性有限 [9]。这些局限性促使人们重新关注反应式方法，尤其是人工势场（APF） [10] 和速度障碍法，其在保持有效避碰性能的同时，优先考虑计算效率和实时可行性 [11]。

尽管已有大量研究聚焦于避碰，防搁浅仍相对缺乏深入研究。在海洋环境中，水深数据可标示水深不足的区域；由于龙骨下富余水深减少以及船舶下沉等浅水效应，船舶在这些区域面临搁浅危险。因此，有效的运动规划必须超越船舶间交互，并明确考虑航行环境中的搁浅相关危险。然而，将水深约束纳入实时规划面临重大挑战。浅水区域通常具有不规则非凸几何形状，因而将其直接整合到基于优化的规划器中会带来较高的计算开销。对于依赖凸优化形式来确保计算效率和实时可行性的方案而言，这一问题尤为关键。因此，开发一种可行的实时方法，同时兼顾防搁浅与动态障碍物避碰，并遵守国际海上避碰规则，对于实现稳健的海上运动规划至关重要。

受这些挑战的启发，本文提出了一种统一且考虑法规要求的运动规划框架，可在状态不确定的情况下同时实现避碰、自动遵守《国际海上避碰规则》和防搁浅。其核心贡献在于

通过将运动规划问题表述为速度空间中的高效凸优化问题，并将避碰约束和基于《国际海上避碰规则》的方向性规则高效地整合为线性半平面。为实现防搁浅，本文采用基于整数线性规划的集合覆盖表述，通过几何近似将根据水深数据得出的非凸浅水区域凸化，从而将深度相关安全约束直接纳入同一优化表述。在此框架下，本文对经典速度障碍法进行鲁棒重构，明确考虑邻近船舶位置和速度估计中的有界不确定性，从而提升在真实感知条件下的安全性。所提出的统一表述在保持计算效率的同时，确保所选速度在动态上可行且符合规则。本文通过基于 IMAZU 会遇场景 [12] 的仿真验证了所提方法的有效性。结果表明，该方法能够计算动态可行速度，在目标导向运动与安全要求之间实现最优平衡，同时确保避碰、遵守《国际海上避碰规则》并防止搁浅。这些结果凸显了该方法在拥挤及浅水环境中用于自主实时导航的鲁棒性和实际可行性；在此类环境中，可靠且符合规则的导航至关重要。为进行更广泛、更严格的评估，所提方法将集成到一个正在开发的先进仿真框架中。该框架由德克萨斯农工大学与美国船级社（ABS）通过合作计划共同开发 [12, 13]。此类集成将有助于在多种环境条件和复杂作业情形下开展评估，进一步增强该方法在实际部署中的适用性。

本文其余部分安排如下。第 2 节介绍本文所需的基础知识和预备内容。第 3 节阐述所提方法的公式构建及其发展过程。第 4 节给出具有代表性的仿真结果，并进行讨论，以突出所提方法的主要特点。第 5 节总结全文并展望未来工作。

2 背景

本节介绍构建和分析所提出的避碰与防搁浅方法所需的基础知识和预备内容。

2.1 经典速度障碍算法

经典速度障碍（VO）方法由 [11, 14]，提出，通过直接在速度空间中基于位置空间进行运算，为实时避碰提供了一种几何方法。速度障碍确定速度空间中的一个子集，其中的速度可能导致未来发生碰撞，并选择这些集合之外的可行速度。

考虑两个圆形智能体 A 和 B，其位置分别为 p_A，$p_B \in \mathbb{R}^2$，速度分别为 v_A，v_B，半径分别为 r_A，r_B。相对位置和相对速度定义为

$$p_{AB} = p_B - p_A, \quad v_{AB} = v_A - v_B. \tag{1}$$

为构造碰撞锥，将智能体 B 映射到智能体 Aˆ的构型空间中：将 A 缩减为一个点 A，并将 B 的几何形状按 A的半径进行扩张，从而得到 ˆ修改后的集合 B。基于这一几何构造，碰撞锥 CC_{AB} 定义如下：

$$CC_{AB} = \{\, v_{AB} \mid \lambda_{AB} \cap \hat{B} \neq \emptyset \,\}. \tag{2}$$

其中， $\lambda_{AB} = \{p_A + tv_{AB} \mid t \geq 0\}$ 是 v_{AB}的一条直线。然后，以 A 的绝对速度表示由 B引起的 A 对应的速度障碍（VO）：

$$VO_{A|B} = \{\, v_A \mid v_A \in CC_{AB} \oplus v_B \,\}. \tag{3}$$

其中， $\oplus$ 表示闵可夫斯基和。在恒定相对速度假设下，智能体 A 在 $VO_{A|B}$ 内的所有速度都会导致碰撞，而其外部的速度则保证不会发生碰撞。对于多个动态障碍物$\{B_i\}_{i=1}^{n}$，可将其推广如下：

$$\mathcal{V}_A^{\text{safe}} = \mathbb{R}^2 \setminus \bigcup_{i=1}^{n} VO_{A|B_i}. \tag{4}$$

上述表述假设速度会发生瞬时变化。为纳入动态约束， [11] 提出了速度障碍（VO）中的可达速度概念。设可行加速度集为

$$FA(t) = \{\ddot{x} \mid \ddot{x} = f(x, \dot{x}, u),\, u \in \mathcal{U}\}, \tag{5}$$

其中， f（·）表示系统动力学， $\mathcal{U}$ 表示允许的控制输入。在有限时间区间 Δt内的可达速度集为

$$RV(t + \Delta t) = \{\, v_A(t) + \ddot{x}\Delta t \mid \ddot{x} \in FA(t) \,\}. \tag{6}$$

可达避碰速度（RAV）集定义为

$$RAV(t + \Delta t) = RV(t + \Delta t) \setminus VO(t), \tag{7}$$

w其表示瞬时动态可行且无碰撞的速度集合 s.

2.2 碰撞触发因素：到达最近会遇点时间（*TCPA*）和最接近会遇距离（*DCPA*）

在海上碰撞风险评估中，通常使用两个预测指标来评估两艘船舶之间发生危险会遇的可能性：最接近会遇时间（TCPA）和最接近会遇距离（DCPA）。在假设稳态运动学条件且速度恒定的情况下，这些指标描述本船与目标船之间预期的相对运动。通过估算最接近会遇时的时间和空间距离，TCPA 和 DCPA 为评估碰撞风险提供了定量依据。如需深入了解这些概念及其正式的数学推导，请参阅 [15, 16]。

3 方法

本节介绍所提出的、用于海上导航中避碰和防搁浅的统一基于优化的运动规划方法。该方法利用速度障碍（VO）框架，在速度空间中求解凸二次规划（QP），综合考虑几何避碰、法规要求和船舶操纵限制，从而计算出无碰撞且符合国际海上避碰规则的速度。在确定性表述中，假设周围船舶的位置和速度均已准确获知，并使用超平面表示环境约束。在这些假设下，允许速度区域为凸集，因此可以通过凸二次规划（QP）高效地计算安全速度。

为适应实际运行条件，该方法进一步扩展，以考虑感知不确定性和复杂的环境几何形状。对周围船舶估计位置的不确定性

和速度的不确定性均纳入考虑，以构建鲁棒速度障碍锥。此外，还将浅水区域作为环境约束；当这些区域具有高度非凸的形状时，则使用凸基元进行近似，从而将其作为静态障碍物无缝集成到优化框架中。

下面介绍用于计算安全速度的确定性二次规划公式。在速度障碍框架中（图 1），每艘周围船舶都会在速度空间中定义一个区域；若本船选择该区域内的速度，将导致未来发生碰撞。仅当预测的到达最近会遇点时间和最接近会遇距离低于预设安全阈值时，才构建速度碰撞锥。随后，通过求解一个约束优化问题来获得安全速度，其可行集由碰撞规避、国际海上避碰规则和物理操纵约束定义，并将这些约束表示为线性不等式约束。

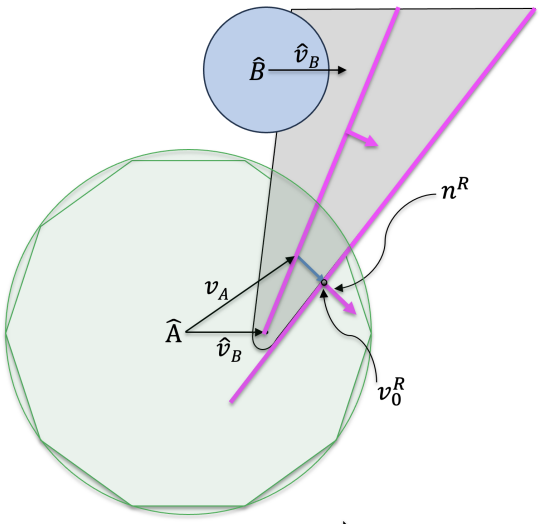


图 1：基于二次规划的速度空间安全速度选择几何解释。

避碰和国际海上避碰规则约束：对于每艘交互船舶 i，都会构建相应的速度障碍 VO_i。边界 ∂VO_i 给出与左右切线对应的两个候选支撑半平面。设 $(n_i^L,\ v_{0,\ i}^L)$ 和 $(n_i^R,\ v_{0,\ i}^R)$，其中 $v_{0,\ i}^L,\ v_{0,\ i}^R \in \partial VO_i$，分别表示定义这两个支撑半平面的外向单位法向量和边界点。

船舶 i 所产生的避碰约束表示为所选支撑半空间

$$(n_i^{\sigma_i})^\top (v - v_{0,i}^{\sigma_i}) \geq 0, \tag{8}$$

其标准线性形式为

$$-(n_i^{\sigma_i})^\top v \leq -(n_i^{\sigma_i})^\top v_{0,i}^{\sigma_i}. \tag{9}$$

侧向索引 $\sigma_i \in \{L, R\}$ 根据会遇几何关系和国际海上避碰规则要求确定：

$$\sigma_i = \begin{cases} R, & \text{if a starboard-side maneuver is required,} \\ L, & \text{if a port-side maneuver is required,} \\ \arg\max\limits_{\sigma \in \{L,R\}} (n_i^\sigma)^\top \left(v_{\text{curr}} - v_{0,i}^\sigma \right), & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{10}$$

其中 v_{curr} 表示当前速度。

速度约束：船舶速度受 $|v| \le v_{\max}$限制。为保留线性约束二次规划表述，将此圆形边界近似为一个内接多边形：

$$\tilde{n}_k^\top v \le \tilde{c}_k, \qquad k = 1, \dots, N_{\text{poly}}, \tag{11}$$

其中 N_{poly} 决定近似精度。

将基于速度障碍的约束、国际海上避碰规则方向约束和多边形速度限制叠加后，可得到一个凸可行集

$$\mathcal{V}_{\text{feasible}} = \{v \in \mathbb{R}^2 \mid Av \le b\}. \tag{12}$$

目标函数： 在 $\mathcal{V}_{\text{feasible}}$中的所有可行速度中，以下二次优化问题可求得与期望参考速度 v_{ref}最接近的速度：

$$\min_{v} \ \|v - v_{\text{ref}}\|_2. \tag{13}$$

参考速度表示本船在不存在冲突时的标称运动，也可以对应预定义的速度曲线。所得带线性不等式约束的二次规划使用 MATLAB 的 quadprog 求解，从而得到安全速度 v^*。如果环境约束过多，导致不存在可行解，则最佳做法是降低速度并使船舶停下，即设置 $v^* = 0$。

加速度限制更新： 由于船舶无法立即达到最优安全速度 v^*，因此每个时间步长内指令速度的变化均受最大允许变化量限制。设 v_{curr} 表示当前速度， $d_{\max}$ 表示最大速度的增量。实际采用的速度为

$$v_{\text{next}} = \begin{cases} v_{\text{curr}} + d_{\max} \dfrac{v^* - v_{\text{curr}}}{\|v^* - v_{\text{curr}}\|}, & \|v^* - v_{\text{curr}}\| > d_{\max}, \\ v^*, & \|v^* - v_{\text{curr}}\| \le d_{\max}. \end{cases} \tag{14}$$

3.1 不确定性下的碰撞锥

根据式（2）和（3）构造的速度障碍假设能够精确获知障碍物的状态，即智能体 B 的位置和速度均已知。然而，在现实场景中，这些状态是通过雷达及其他船载传感方式获取的，难免受到估计误差、环境扰动和测量噪声的影响。因此，假设状态信息完全准确并不现实。为确保在此类条件下实现可靠避碰，必须构造能够明确考虑状态不确定性的鲁棒速度障碍。尽管 [15]将速度不确定性纳入速度障碍方法，但文献尚未探讨位置不确定性的影响。本文的方法通过扩展速度障碍的构造，明确考虑位置和速度不确定性，从而弥补了这一空白。

位置不确定性：设 $\hat{}p_B \in \mathbb{R}^2$ 表示智能体 B的估计位置， $\delta_p \in \mathcal{U}_p$表示该估计中的有界不确定性。因此，智能体 B 的真实位置表示为

$$p_B = \hat{p}_B + \delta_p.$$

通过将这种不确定性直接纳入碰撞锥的几何构造（式 (2)），我们得到考虑位置不确定性的碰撞锥：

$$CC^{\mathcal{U}}_{AB} = \left\{ v_{AB} \;\middle|\; \lambda_{AB} \cap \left(\hat{B} \oplus \mathcal{U}_p \right) \neq \emptyset \right\}. \tag{15}$$

从几何角度看，这种表述对应于在智能体 A 的构型空间中表示智能体 B，并以 A 的形状和有界不确定性集合 $\mathcal{U}_p$ 对其几何形状进行膨胀。膨胀的效果是扩大碰撞区域，具体表现为碰撞锥内角增大。因此，更广泛的相对速度集合会被归类为可能导致碰撞，从而保守地刻画了可能导致碰撞的相对速度。

速度不确定性： 我们还考虑智能体 B 的速度估计不确定性，采用 [15] 提出的方法。令 $\hat{}v_B \in \mathbb{R}^2$ 表示估计速度，$\delta_v \in \mathcal{U}_v$ 表示智能体 B 的有界速度不确定性，则

$$v_B = \hat{v}_B + \delta_v.$$

将这一表示代入速度障碍的定义（式 (3)），可得到以智能体 A 的绝对速度表示的鲁棒速度障碍：

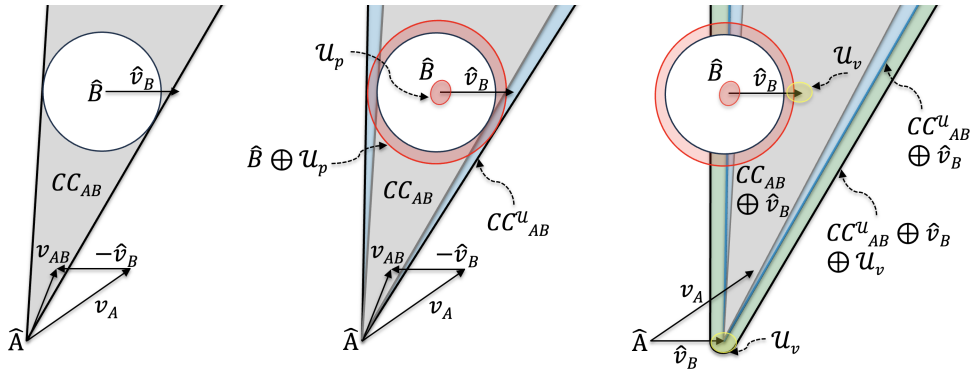
$$VO^{\mathcal{U}}_{A|B} = \left\{ v_A \;\middle|\; v_A \in CC^{\mathcal{U}}_{AB} \oplus \hat{v_B} \oplus \mathcal{U}_v \right\}. \tag{16}$$

这种构造可解释为对速度障碍进行有界集合 $\mathcal{U}_v$ 的闵可夫斯基扩张，从而扩大速度障碍区域。该扩张直接反映了位置和速度估计误差的最坏情况，从而确保对有界扰动的鲁棒性。图 2 展示了同时纳入位置和速度不确定性后，速度障碍锥所产生的几何变化。

3.2 浅水区域的凸化

所提出的方法使用一组凸几何基元（具体为圆）来近似非凸浅水区。在基于速度障碍的避碰方法中，障碍物通常表示为圆盘。因此，使用圆对浅水区域进行建模，可直接集成到现有的速度障碍公式中，而无需修改底层避碰结构。

主要目标是构造一种近似表示，在完全覆盖每个浅水区域的同时，尽量减少所用圆的数量，以及近似表示中包含的额外可航行空间。为此，需要优化圆的位置和半径，使这些圆的并集以尽可能小的过近似程度逼近目标区域。该问题的建模对应于经典集合覆盖问题的一种变体，而众所周知，集合覆盖问题是 NP难的，尤其是在允许圆连续放置的情况下。因此，对于大规模实例，精确求解在计算上难以实现，必须采用近似方法、启发式算法或松弛技术。为此，我们将圆心的位置



(a) (b) (c)

图 2：碰撞锥的几何表示。(a) 在完美状态信息下推导的标准碰撞锥；(b) 考虑智能体 B 位置不确定性有界的扩展碰撞锥；(c) 反映位置和速度不确定性有界的综合影响的鲁棒碰撞锥。

及其半径限制在有限候选集中，从而将该问题表述为离散优化问题。通过这种离散化，可将问题表示为整数线性规划（ILP），并使用标准求解器高效求解。

问题设置：令 $\mathcal{P} \subset \mathbb{R}^2$ 表示一个用于近似浅水区域的非凸平面多边形区域。考虑由以下定义的有限候选圆心集合

$$\mathcal{C} = \{c_i \in \mathbb{R}^2 \mid i = 1, \ldots, M\}, \tag{17}$$

以及由以下指定的离散允许半径集合

$$\mathcal{R} = \{R_k \mid k = 1, \ldots, K\}. \tag{18}$$

为评估覆盖情况，在 $\mathcal{P}$ 的紧致矩形包围盒内对均匀点网格进行采样，生成两个点集：

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_{\text{in}} &= \{p_j : p_j \in \text{interior}(\mathcal{P})\}, \\ \mathcal{X}_{\text{out}} &= \{q_l : q_l \notin \mathcal{P}\}. \end{aligned} \tag{19}$$

其中，内部点是必须覆盖的位置，而外部点用于量化不希望出现的溢出区域。对于内部网格 p_j 上的每个点，我们预先计算其是否被每个候选圆覆盖：

$$A_{\text{in}}(j, (i,k)) = \begin{cases} 1, & \|p_j - c_i\| \le R_k, \\ 0, & \text{otherwise}. \end{cases} \tag{20}$$

类似地，对于每个外部点 q_l，

$$A_{\text{out}}(l, (i,k)) = \begin{cases} 1, & \|q_l - c_i\| \le R_k, \\ 0, & \text{otherwise}. \end{cases} \tag{21}$$

这些二元矩阵编码了候选圆与空间点之间的覆盖关系，构成相关线性约束和目标函数的基础。此外，每个候选圆都被分配一个二元决策变量 $z_{ik} \in \{0, 1\}$，用于表示

以 c_i 为圆心、半径为 R_k 的圆是否被选入最终近似。随后将离散覆盖问题表述如下：

$$\begin{aligned} \min_{z} \quad & \alpha \sum_{i=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} z_{ik} \;+\; \beta \sum_{i=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{N_{\text{out}}} A_{\text{out}}(l,(i,k))\, z_{ik} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} A_{\text{in}}(j,(i,k))\, z_{ik} \geq 1, \qquad \forall j = 1,\ldots,N_{\text{in}}, \\ & z_{ik} \in \{0,1\}, \qquad \forall i = 1,\ldots,M,\ \forall k = 1,\ldots,K. \end{aligned} \tag{22}$$

系数 α 和 β 分别是以下两项的调节参数：(i) 选择额外圆所产生的惩罚项；(ii) 对浅水区域进行过近似所产生的惩罚项。适当调节这些参数，可以在圆的数量与过近似误差之间取得平衡。求解该优化问题可得到最优圆集

$$\mathcal{C}^{\star} = \{(c_i, R_k) \mid z_{ik} = 1\}, \tag{23}$$

它为非凸浅水区域 $\mathcal{P}$提供了多半径凸分解。

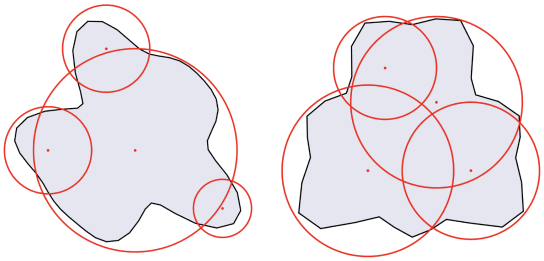


图3：用于非凸几何体凸化的整数线性规划结果

图3展示了对两个具有代表性的非凸浅水区域得到的圆覆盖近似。在这两种情况下，均在域上采用分辨率为25 m的均匀采样网格，以分别获得离散的内部点集和外部点集 $\mathcal{X}_{\text{in}}$和 $\mathcal{X}_{\text{out}}$。候选圆心 $\mathcal{C}$ 位于覆盖同一域的较粗网格上，网格间距为100 m，由此得到 $M = 1681$ 个潜在圆心位置。采用了离散半径集合$\mathcal{R} = \{100, 200, \ldots, 1200\}$ m（包含 $K = 12$ 个半径），以及加权系数 $\alpha = 10$和 $\beta = 0.1$，以实现灵活的多尺度覆盖。

在图 3 (a) 中，整数线性规划求解器用时 2.81 s 得出解，共进行了 135 次迭代。所得近似由四个圆组成，其半径分别为 300、300、700 和 200 m。相应的过度近似误差定义为圆覆盖面积与非凸浅水区域面积之差除以非凸浅水区域面积，约为 33%。

在图 3(b) 中，求解器经过 87 次迭代，在 2.26 秒内获得了最优解。与案例 (a) 类似，最终选取了四个圆，其半径分别为 500、400、300 和 500 米。本案例中的相关过度近似误差约为非凸浅水区域面积的 30%。这一相对较高的近似误差主要是由于代表性几何图形尺寸较小，以及候选圆心采用了较粗的 100 米采样分辨率所致。在实际海事环境中，浅水区域通常更大，因此在采用相同离散半径集的情况下，预计相对

溢出误差会更低。将采样分辨率细化至 40 米进一步证实了这一趋势，此时案例 (a) 和 (b) 的近似误差分别降至 23% 和 25%。通过采用更密集的采样以及更大的允许半径集合，还可以进一步改善结果。

需要注意的是，可以事先对非凸浅水区域进行凸化，以便针对已知水深区域获得最优圆集，$\mathcal{C}^\star$ 也可以在实时运行时对动态定义的感兴趣区域进行凸化。该区域可通过船舶在有限预测时域内的可达集确定，也可利用 TCPA/DCPA 空间限制来限定近似域。

4 仿真结果与讨论

本文在根据 IMAZU 基准测试案例 [12]改编的典型海事场景中评估所提出方法的性能。具体而言，评估包括（i）单船对遇，以及（ii）结合对遇和交叉相遇的多船场景；这两种场景均设置了水深区域中的浅水区。由于国际海上避碰规则未明确规定对遇的角度阈值，先前研究采用过诸如 $\pm 15^\circ$ 或 $\pm 5^\circ$等数值。本文采用 $\pm 5^\circ$ 准则。此外，利用随机化的傅里叶扰动径向模型程序化生成严格非凸的浅水区域，并将其置于感兴趣区域内，以构建测试场景。评估场景的完整配置详情汇总于表1。

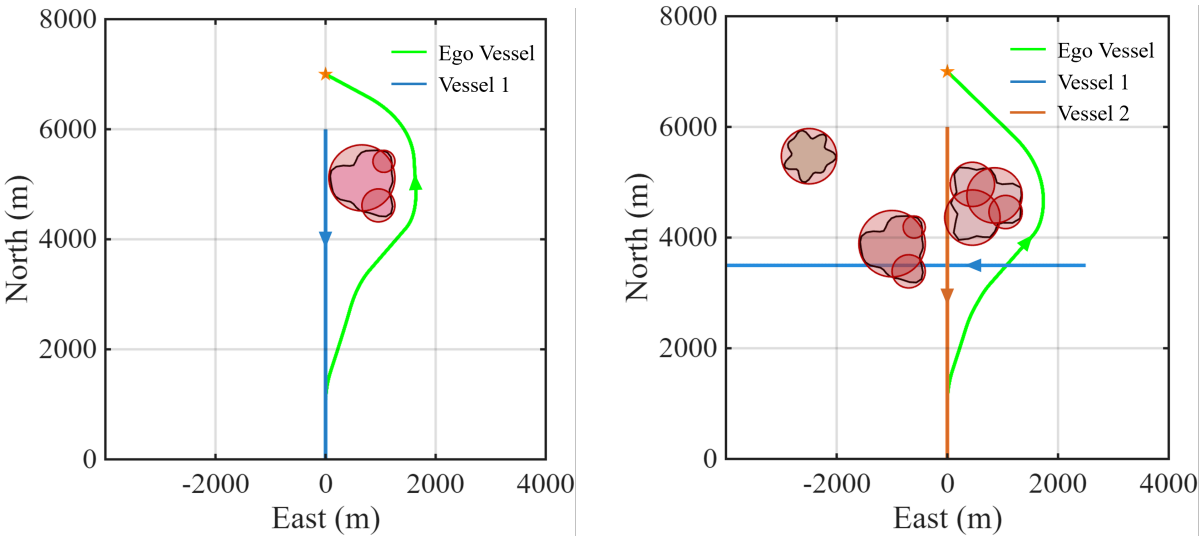
表1：四种会遇场景下目标船舶的初始条件。

场景	船舶	起点 (N,E) [米,米]	航向 [°]	速度 [米/秒]	
(a)	V1	(6000, 0)	180	10	
(b)	V1	(3500, 2500)	270	10	
	V2	(6000, 0)	180	10	

在所有仿真中，本船的初始位置设为 (0，0)，名义巡航速度为 10 米/秒。控制框架以 10 Hz（$\Delta t = 0.1$ 秒）的频率运行，固定仿真时域为 1000 秒，因此共进行 10，000 次优化迭代。指定的目标位置为 (7000，0)。

(a) 单船对遇情形：图4a展示了单船对遇情形下的航迹：本船在遵守《国际海上避碰规则》第14条的同时驶向目标点。水深约束包含一个非凸区域，并通过整数线性规划公式使用三个圆进行近似；该公式求解耗时1.75秒，迭代了81次。航行路径长度约为7840米，船舶始终保持巡航速度。该算法与目标船保持了约552米的最小间距。计算性能依然高效，二次规划求解时间平均为0。62毫秒，最大为4。83毫秒。

(b) 对遇与交叉相遇：图4b展示了同时存在对遇船舶和右舷交叉船舶的配置。在这种情况下，水深约束包含三个非凸区域，并用总计八个圆近似；整数线性规划在5.48秒内求解完成，共进行了151次迭代。本船在仿真期间航行约7818米，并保持安全航行，最小间距为597米。尽管该场景触发了更多避碰约束，优化过程仍保持较高的计算效率，二次规划平均求解时间为0.65毫秒，最长约为5.79毫秒。



(a) 对遇场景　　(b) 对遇与交叉相遇场景

图 4：代表性相遇场景的仿真结果。

总体而言，尽管存在非凸浅水约束和动态多船交互，所提出的方法在两种相遇场景中均实现了稳健且符合规则的避碰。本船始终保持超过550米的间距，并遵守相应的《国际海上避碰规则》操纵。值得注意的是，底层二次规划计算量小且效率高，求解时间始终未超过6毫秒，证实了所提方法在动态海上环境中实现可靠、高效、安全航行的实时可行性。

5 结论

本文提出了一种统一且计算高效的海上自主水面船舶运动规划方法，可在状态不确定性下同时解决避碰、遵守《国际海上避碰规则》和防止搁浅问题。该方法将基于《国际海上避碰规则》的方向约束、基于鲁棒速度障碍表述的碰撞约束，以及凸化后的水深表示整合到单一凸规划框架中，从而能够在动态海事场景中持续执行安全机动。

为纳入水深约束，我们通过一种基于离散圆覆盖的公式化方法，预先获得了高度非凸浅水区域的凸且紧密的外近似，该方法采用整数线性规划求解。这一预处理步骤生成了紧凑的凸地图表示，适用于实时运动规划。在具有代表性的对遇与多船相遇场景中，仿真结果表明，最小间距超过 550m，同时始终满足法规要求。在每种场景的 10，000 个控制周期内，以 10 Hz 的更新频率运行时，优化问题的平均求解时间为 0.7 ms，最坏情况下也不到 6 ms，证实了其实时可行性和可扩展性。未来的工作将着重于把该方法扩展到大规模多船协同场景，并纳入协同决策策略。此外，还将研究凸化水深表示的自适应细化，以及与更高层级的航线规划和感知模块的集成，以支持在复杂运营水域中的部署。

致谢
作者感谢美国船级社（ABS）给予的支持。本研究构想于与 ABS 合作开展的项目中，该项目隶属于德克萨斯农工大学海洋创新实验室。

参考文献

[1] E. Eliopoulou、A. Alissafaki 和 A. Papanikolaou，“客船事故统计分析与安全水平评估综述”，《海洋科学与工程杂志》，第 11 卷，第 2 期，第 410 页，2023 年。[2]国际海事组织，《style id='5'>《国际海上避碰规则公约》（1972 年）（国际海上避碰规则），国际海事组织（IMO），英国伦敦，1972 年；1972年10月20日通过，1977年7月15日生效。[在线]。网址：https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/colreg.aspx[3] T. A. Johansen、A. Cristofaro 和 T. Perez，“基于场景的模型预测控制在船舶避碰中的应用”，*IFAC-PapersOnLine*，第 49 卷，第 23 期，第 14–21 页，2016 年。[4] D. K. M. Kufoalor、T. A. Johansen 和 E. F. Brekke，“采用模型预测控制的水面航行器自主避碰”，*IFAC-PapersOnLine*，第 51 卷，第 29 期，第 239–246 页，2018 年。[5] B.-O. H. Eriksen、M. Breivik 和 E. F. Wilthil，“自主船舶避碰的模型预测控制：遵守《国际海上避碰规则》的系统方法”，*IEEE Access*，第 7 卷，第 157 144–157 156 页，2019 年。[6] S. Penttinen，“利用强化学习实现符合《国际海上避碰规则》的避碰”，2020 年。[7] R. Sawada、K. Sato 和 T. Majima，“连续动作空间中采用长短期记忆网络的深度强化学习用于船舶自动避碰”，《海洋科学与技术杂志》，第 26 卷，第 2 期，第 509–524 页，2021 年。[8] W. Guan、M.-y. Zhao、C.-b. Zhang 和 Z.-y. Xi，“通过强化学习方法实现船舶避碰的通用行为决策模型”，《海洋科学与工程杂志》，第 11 卷，第 2 期，第 273 页，2023 年。[9] S. Campbell 和 W. Naeem，“用于无人水面航行器符合《国际海上避碰规则》的避碰的基于规则的启发式方法”，*IFAC*会议论文集，第 45 卷，第 27 期，第 386–391 页，2012 年。[10] O. Khatib，“机械臂和移动机器人的实时避障”，《国际机器人研究杂志》，第 5 卷，第 1 期，第 90–98 页，1986 年。[11] P. Fiorini 和 Z. Shiller，“利用速度障碍在动态环境中进行运动规划”，《国际机器人研究杂志》，第 17 卷，第 7 期，第 760–772 页，1998 年。[12] M. S. Patil、N. Sudharsan、A. Saaiby、J. Xing、J. Chan、V. Ammula、J. Tomdio、J. Wang、S. Rathinam、P. Pagilla等，“用于自主海上导航验证与确认的虚拟框架”，载于*SNAME*海事会议。SNAME，2025 年，第 D031S019R001 页。

[13] M.S. Patil、N.Sudharsan、A.Saaiby等，“用于受限环境中自主海上导航验证与确认的稳健仿真框架”，2026 年，已投稿，待发表。[14] P. Fiorini 和 Z. Shiller，“利用相对速度范式在动态环境中进行运动规划”，载于 *[1993] IEEE*机器人与自动化国际会议论文集。IEEE，1993 年，第 560–565 页。[15] Y. Kuwata、M. T. Wolf、D. Zarzhitsky 和 T. L. Huntsberger，“利用速度障碍实现符合《国际海上避碰规则》的安全海上导航”，载于*2011 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议。IEEE，2011 年，第 4728–4734 页。[16] X. Gai、Q. Zhang、Y. Hu 和 G. Wang，“融合商船与渔船信息的多船避碰决策模糊融合方法”，《海洋科学与工程杂志》，第 12 卷，第 10 期，第 1822 页，2024 年。