

文章编号: 1007-7294(2025)08-1239-11

基于改进 PRM 算法和事件触发机制的 无人船动态避碰轨迹规划

王子铭^{a,b}, 陈顺怀^{a,b}, 郑 龙^{a,b}

(武汉理工大学 a. 船海与能源动力工程学院; b. 高性能船舶技术教育部重点实验室, 武汉 430063)

摘要: 无人船的轨迹规划是无人船自主航行的重要环节。本文基于改进 PRM 算法和事件触发机制提出一种无人船动态避碰的轨迹规划方法。首先, 将 PRM 和 A* 结合得到 PRM-A* 算法, 并基于 PRM-A* 算法建立无人船轨迹规划模型。根据当前时刻的环境态势建立栅格地图, 通过 PRM-A* 算法规划无人船的避碰路径, 并建立该避碰路径的 $S-T$ 栅格图。通过 PRM-A* 算法对 $S-T$ 栅格图规划无人船航速, 从而得到当前时刻的无人船避碰轨迹。其次, 基于事件触发机制建立无人船的动态避碰模型。根据无人船的 TCPA 和 DCPA 建立无人船碰撞危险度评估模型, 并以此为基础设置事件触发条件; 事件触发后, 根据当前时间窗的环境态势规划无人船避碰轨迹。最后, 分别进行开阔水域和限制水域的无人船轨迹规划仿真试验。结果显示, 本算法可使无人船能有效地避开局部水域中静态障碍物和移动障碍物, 并节省计算资源, 提升计算性能。

关键词: 无人船; 轨迹规划; PRM-A* 算法; 事件触发机制; TCPA; DCPA

中图分类号: U675.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.08.006

Dynamic collision avoidance trajectory planning for unmanned ships based on improved PRM algorithm and event triggering mechanism

WANG Zi-ming^{a,b}, CHEN Shun-huai^{a,b}, ZHENG Long^{a,b}

(a. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering; b. Key Laboratory of High-Performance Ship Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The trajectory planning of unmanned ships is an important part of unmanned ships autonomous navigation. A trajectory planning method for unmanned ship dynamic collision avoidance was proposed based on improved PRM algorithm and event triggering mechanism. Firstly, PRM and A* were combined to obtain the PRM-A* algorithm, and a trajectory planning model for unmanned ships was established based on the PRM-A* algorithm. A grid map was established based on the current environmental situation, the PRM-A* algorithm was used to plan the collision avoidance path of unmanned ships, and an $S-T$ grid map of the collision avoidance path was established. The PRM-A* algorithm was used to plan the speed of unmanned ships on the $S-T$ grid map, thus obtaining the collision avoidance trajectory of unmanned ships at the current time. Secondly, a dynamic collision avoidance model was established for unmanned ships based on the event

收稿日期: 2025-02-23

基金项目: 广西重大科技专项(桂科 AA23023013; AA23062037)

作者简介: 王子铭(1996-), 男, 博士; 陈顺怀(1966-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: shchen@whut.edu.cn;

郑 龙(1997-), 男, 博士。

triggering mechanism. An unmanned ship collision risk assessment model was established based on the TCPA and DCPA of unmanned ships, based on which event triggering condition was set. When the event was triggered, the unmanned ship collision avoidance trajectory was planned based on the current time window environmental situation. Finally, simulation experiments were conducted on the trajectory planning of unmanned ships in open and restricted waters. The results show that the algorithm can effectively make an unmanned ship avoid static and moving obstacles in waters, save computational resources, and improve computational performance.

Key words: unmanned ship; trajectory planning; PRM-A* algorithm; event triggering mechanism; TCPA; DCPA

0 引 言

无人船(Unmanned Surface Vehicle, USV)作为可以在水面上无人化、自主化航行,并具有高机动性的水上机器人,经常被用于在复杂海域执行海事巡航、气象监测、反潜以及扫雷等特定任务,在军用和民用领域均具有重要的研究价值和广泛的研究前景^[1]。无人船航行的水域中存在正在航行的船舶等移动障碍物,以及浮标、岛屿等静态障碍物。因此,根据船载传感器获取的局部信息和全局先验环境信息,动态地规划无人船轨迹,使其可以同时避开水域内的静态障碍物和移动障碍物,对无人船实现自主航行具有重要的意义。

无人船的轨迹规划需要在已知的环境态势下,规划得到一系列可连成路径的坐标点以及无人船到达这一系列坐标点的时间。同时,规划得到的轨迹需满足无人船航行安全性的要求,从而使无人船能在环境态势复杂的局部水域中避开移动障碍物,完成其特定任务。换言之,无人船的轨迹规划不但要规划出无人船在各时刻的位置坐标,还要规划出无人船在各时刻的速度。张丹红等^[2]利用多角度搜索的 A*算法得到两个巡逻点间的最短路径,并通过改进的平滑蚁群算法得到多个巡逻点的巡逻顺序,实现了无人艇的避碰巡逻; Song 等^[3]提出了一种基于改进人工势场法的多子目标人工势场法确定性算法,对无人船的航行路径进行了规划;向金林等^[4]通过对新延伸点添加转角约束、改变连接点条件和设置动态步长的方式改进了双向 RRT 算法,并以此规划局部路径,实现了无人船局部避碰;刘正锋等^[5]对避碰路径转向点的转向角改变量进行约束来改进 PRM 算法,规划出多条从起点到终点的可航路径,并选取一条最短路径作为避碰路径;汪咏等^[6]基于人工势场法和船舶操纵方程规划得到了满足无人船操纵性的光滑避碰路径。以上研究均实现了无人船对静态障碍物的避碰,但未有效实现无人船避碰移动障碍物。

王立鹏等^[7]考虑船舶操纵性约束,设计的一种二次遗传算法寻优的路径规划算法规划了一条无人船可以避开静态障碍物和移动障碍物的航线;周凤杰^[8]使用粒子群-遗传(PSO-GA)混合算法优化无人船的航路点,实现了无人船在两船会遇场景下的避碰;陈天元等^[9]基于集合制导和动态窗口约束算法规划得到了无人船可以自动避开移动障碍物的路径;杨娇^[10-11]和王群^[12]针对限制水域中的内河水域,分别基于 TD3 算法和 DQN 算法实现了内河船舶两船避碰时的自主路径规划。上述研究均实现了无人船在两船会遇时对移动船舶的避碰。无人船有时会在具有多个航行轨迹难以预测的移动船舶的水域中航行,上述研究对于解决具有多个移动障碍物的复杂航行环境的避碰问题仍有一定局限性。

综合以上分析可以发现,无人船对静态障碍物的避碰研究已取得重要进展,实现无人船在不同水域环境下对多个移动障碍物的避碰仍是实现无人船自主航行的难点。同时,现有的研究成果大多聚焦在规划避碰的路径,而忽略了规划无人船到达路径上各点的时间。为实现无人船能动态地避碰,通常的做法是每隔固定时间进行轨迹规划,这样延长了计算时间,增加了计算资源消耗,不利于高机动性无人船的实际航行。事件触发机制^[13]可对轨迹规划的效果和计算性能进行平衡,通过设置触发条件减少轨迹规划求解的次数,有效节省计算资源,提升计算性能。

本文为实现无人船能有效避开水域内的静态、移动障碍物,并节省计算资源,提出一种动态的无人船轨迹规划方法。首先,基于 A*算法和概率路线图算法(RPM)算法建立无人船的轨迹规划模型,分别对无人船航行路径和航速进行规划;随后,基于事件触发机制建立无人船动态避碰模型,根据船舶碰撞危险度设置轨迹规划模型触发的条件,从而规划得到无人船航行过程中各时刻的空间坐标和速度;最后,设计仿真试验对算法的有效性进行验证。

1 无人船轨迹规划模型

无人船通过规划路径和航速来避开局部水域中的移动障碍物,从而完成特定任务。随着无人船环境感知技术的发展,无人船可通过其自身安装的激光雷达、摄像头等传感器,结合目标检测、多目标跟踪等技术和全局的先验信息,获得水域中静态障碍物的具体位置以及移动障碍船的位置、速度和航向^[1]。同时,无人船也可通过其自身安装的高精度 GPS 和 IMU 等惯性测量装置获取自身的位置、速度和航向角。这些表示环境态势的数据为无人船的避碰轨迹规划研究带来了便利。同时,移动障碍船的路径和航速的未知性也为无人船避碰移动障碍物带来挑战。以上述表示环境态势的数据为基础,深度学习等现代智能算法为预测移动障碍船的轨迹带来了可能^[14-15]。为方便描述无人船运动,建立如图 1 所示的全局坐标系。

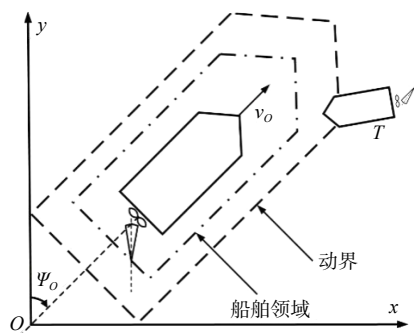


图 1 全局坐标系

Fig.1 Global coordinate system

如图 1 所示,以正北方向为 y 轴,正东方向为 x 轴,建立无人船的空间固定坐标系。其中, ψ_0 为无人船的航向角, v_0 为无人船的航速。本文假设:无人船已通过环境感知技术和全局的先验信息获取无人船和移动障碍船的位置、速度和航向角实时数据;已知无人船航行起点坐标和终点坐标;已知航行水域静态障碍物具体坐标。同时,无人船已获取移动障碍船的预测路径和速度。故而,基于上述假设,本文将 PRM 和 A*算法结合,从而对 PRM 改进得到 PRM-A*算法,并以此建立无人船的轨迹规划模型。

故而,基于上述假设,本文将 PRM 和 A*算法结合,从而对 PRM 改进得到 PRM-A*算法,并以此建立无人船的轨迹规划模型。

1.1 PRM-A*算法

概率路线图算法(RPM)算法与 A*算法在机器人的路径规划中已经得到了广泛的应用^[16]。原始的 PRM 算法计算复杂度低,但有时规划路径的转向角过大,不满足无人船航行安全性的要求。A*算法通过评价函数 F 规划的路径更符合航行要求,但计算复杂度相对较高。故而,可将 PRM 算法与 A*算法结合得到 PRM-A*算法。PRM-A*算法的主要思想为:在栅格图中随机采样生成包括起点和终点的多个节点,并将这些节点两两相连,从而构成路径图。其中,若两节点连线穿过障碍物,则减去该连接。使用评价函数 F 来评价路径图中与当前节点相连的各节点的好坏,通过选择 F 函数值最小的相连节点作为下一节点,从而实现从起点到终点的搜索。PRM-A*算法的具体步骤为:

Step 1: 在地图的非障碍物区域随机生成包括起点和终点的 N 个节点。若两个节点 P_i 与 P_j 之间的连线没有与栅格图中的障碍物相交,则将节点 P_i 与 P_j 相连。对于节点 P_i ,与其相连的节点组成节点 P_i 的点集 Set_i 。

Step 2: 创建一个 Open 列表和 Close 列表,将起点 P_1 作为当前检查节点加入 Open 列表。

Step 3: 计算当前检查节点 P_i 的点集 Set_i 中不在 Close 列表的节点 P_j 的代价函数 $G(P_i, P_j)$ 、 $H(P_j, P_N)$ 以及 $F(P_i, P_j)$ 。其中, i 和 j 为节点的编号, $G(P_i, P_j)$ 表示当前待检查节点 P_i 到节点 P_j 的代价。 $H(P_j, P_N)$ 表示节点 P_j 到终点 P_N 的代价。 $F(P_i, P_j)$ 与 $G(P_i, P_j)$ 和 $H(P_j, P_N)$ 存在如下关系:

$$F(P_i, P_j) = G(P_i, P_j) + H(P_j, P_N) \quad (1)$$

Step 4: 若节点 P_j 不在 Open 列表中, 则将当前待检查节点 P_i 设为节点 P_j 的父节点, 并将节点 P_j 加入 Open 列表。若节点 P_j 已在 Open 列表中, 且当前待检查节点 P_i 到节点 P_j 的 $G(P_i, P_j)$ 函数值更小, 则节点 P_j 的父节点重设为当前待检查节点 P_i , 同时更新节点 P_j 的 $H(P_j, P_N)$ 函数值和 $F(P_i, P_j)$ 函数值。

Step 5: 删除 Open 列表中的节点 P_i , 并将其加入 Close 列表, 从而完成了对该节点的检查。

Step 6: 选择 Open 列表中 F 函数值最小的节点作为下一个待检查节点。

Step 7: 重复 Step 2~ Step 5, 直到当前检查节点是终点。

Step 8: 从终点开始, 依次向父节点移动回到起点, 得到规划的路径。

1.2 无人船轨迹规划流程

移动障碍船的路径和航速很多时候是无法精确预测的, 这对无人船避碰移动障碍物带来了巨大挑战。可根据当前时刻航行水域的环境态势, 将无人船的轨迹规划解耦成对静态障碍物的路径规划和航速规划, 并每隔一段时间根据当前时刻的环境态势规划轨迹, 从而动态地规划轨迹。当各轨迹规划之间的时间间隔设置合理时, 这种动态轨迹规划的方式为无人船有效地避开移动障碍物提供了可能性。同时, 影响无人船航行安全性和经济性的因素有很多。通常认为无人船航行过程中没有出现较大的转向, 即航行轨迹越平滑, 无人船航行越安全; 航行里程越短, 无人船航行经济性越好。故而, 应使无人船在航行过程中能有效地避开水域中的障碍物, 并以安全、经济的方式通过水域, 从而完成特定任务。无人船在当前时刻环境态势下的轨迹规划模型的计算流程示意图如图 2 所示。

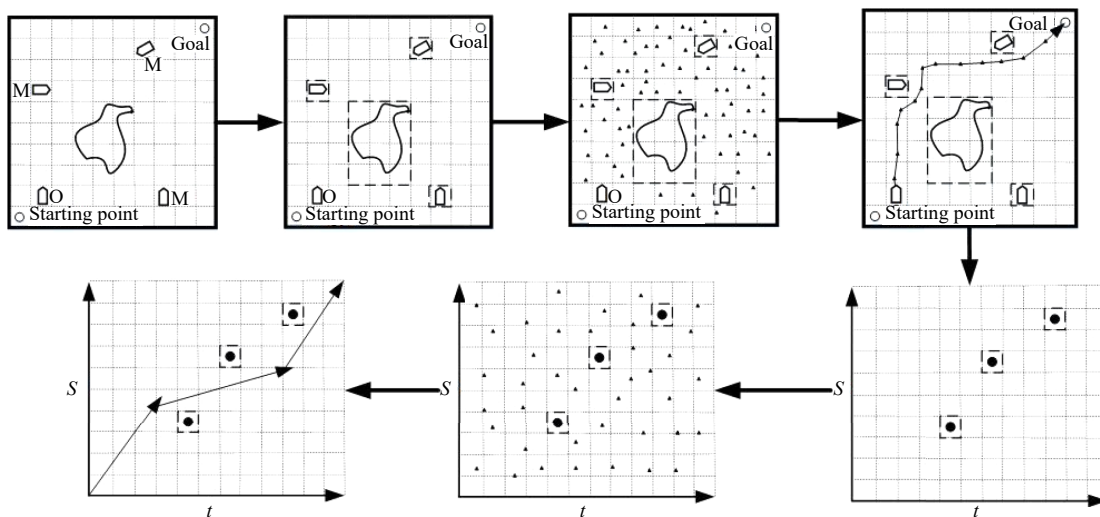


图 2 无人船的轨迹规划示意图

Fig.2 Schematic diagram of unmanned ships trajectory planning

如图 2 所示, 本文对无人船的轨迹规划解耦为路径规划与航速规划, 并根据当前时刻的环境态势, 使用 PRM-A* 算法分别规划无人船的路径和航速。轨迹规划模型的具体流程为:

Step 1: 获取当前时刻无人船(O)、移动障碍船(M)和静态障碍物的位置坐标。

Step 2: 将当前时刻的移动障碍船(M)作为静态障碍物。对航行水域横向和纵向分别以 d_x 和 d_y 为单元长度划分网格, 并对各障碍物进行凸型化、膨胀化^[17] 处理, 从而得到当前时刻环境态势的栅格地图。

Step 3: 在当前时刻栅格地图中的非障碍物区域随机生成 N 个点。考虑到无人船很少出现向目标点反方向航行的情况, 并且为了提升计算性能, 对 N 个节点与栅格地图的起点和终点构成的路径图进行减枝操作, 若路径图中两节点 $P_i(x_i, y_i)$ 和 $P_j(x_j, y_j)$ 存在 $x_j < x_i$, 则将节点 P_j 从节点 P_i 的点集 Set_i 中移除。

Step 4: 使用 PRM-A* 算法对当前时刻栅格地图进行规划, 得到无人船避碰路径。为使规划的路径在保证安全性的同时具有较好的经济性, PRM-A* 算法在规划路径时的 $G(P_i, P_j)$ 和 $H(P_j, P_N)$ 设置如下:

$$G(P_i, P_j) = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_{\text{end}})^2 + (y_i - y_{\text{end}})^2}} \quad (2)$$

$$H(P_j, P_N) = \frac{\sqrt{(x_j - x_{\text{end}})^2 + (y_j - y_{\text{end}})^2}}{\sqrt{(x_i - x_{\text{end}})^2 + (y_i - y_{\text{end}})^2}} + \frac{1}{2\pi} \left| \arctan\left(\frac{y_{\text{end}} - y_j}{x_{\text{end}} - x_j}\right) - \arctan\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) \right| \quad (3)$$

式中, (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 、 (x_1, y_1) 和 $(x_{\text{end}}, y_{\text{end}})$ 分别为节点 P_i 、 P_j 、起点和终点的位置坐标。

Step 5: 以无人船避碰路径的航行里程为纵轴、时间为横轴建立当前时刻无人船的 $S-T$ 图。根据各移动障碍船的预测路径和航速获得各移动障碍船 M_i 的航线与避碰路径的交点 K_i , 这些交点 K_i 即为无人船的碰撞危险点。计算各移动障碍船 M_i 到 K_i 的时间 T_i , 以及无人船使用该避碰路径时, 从当前时刻位置到交点 K_i 的航行路程 S_i 。分别以 d_t 和 d_s 为单元长度对 $S-T$ 图划分网格。将各碰撞危险点 (T_i, S_i) 标注在 $S-T$ 图中, 并进行凸型化、膨胀化处理, 从而得到当前时刻的 $S-T$ 栅格图。

Step 6: 在 $S-T$ 栅格图中的非障碍物区域随机生成 K 个节点。若避碰路径的航行里程为 S_{total} , 则以 $(0,0)$ 为起点, 以 $(S_{\text{total}}/5, S_{\text{total}})$ 为终点。对这 K 个节点与 $S-T$ 栅格图起点和终点构成的路径图进行减枝操作, 若路径图中两节点 $P_i^{S-T}(T_i, S_i)$ 和 $P_j^{S-T}(T_j, S_j)$ 存在 $S_j < S_i$ 或 $T_j \leq T_i$, 则将节点 P_j^{S-T} 从节点 P_i^{S-T} 的点集中移除。同时, 考虑到无人船航速通常具有最大值约束, 故而, 若 $((S_j - S_i)/(T_j - T_i)) \geq V_{\text{max}}$, 则将节点 P_j^{S-T} 从节点 P_i^{S-T} 的点集中移除, 其中, V_{max} 为无人船最大航速。

Step 7: 使用 PRM-A*算法对当前时刻 $S-T$ 栅格图进行航速规划。为加强计算效率, PRM-A*算法规划航速时的 G 函数和 H 函数设置如下:

$$G(P_i^{S-T}, P_j^{S-T}) = \sqrt{(T_i - T_j)^2 + (S_i - S_j)^2} \quad (4)$$

$$H(P_j^{S-T}, P_{\text{end}}^{S-T}) = \sqrt{(T_{\text{end}} - T_j)^2 + (S_{\text{end}} - S_j)^2} \quad (5)$$

式中, (T_i, S_i) 、 (T_j, S_j) 和 $(T_{\text{end}}, S_{\text{end}})$ 分别为节点 P_i^{S-T} 、 P_j^{S-T} 和 $S-T$ 栅格图终点的位置坐标。两两规划点之间的斜率即为无人船在这两个规划点对应路径段的航速。轨迹规划过程中, N 和 K 的取值过大会导致轨迹规划的计算复杂度过大, N 和 K 取值过小则会降低轨迹规划的效果。为加强计算性能, 提高方法实用性, 本文取 $N = \lceil 0.75 \sqrt{N_{\text{map}}} \rceil$, $K = \lceil 0.5 \sqrt{N_{ST}} \rceil$, 其中, $\lceil * \rceil$ 为向上取整函数, N_{map} 为栅格地图的总网格数, N_{ST} 为当前时刻 $S-T$ 栅格图的总网格数。

2 无人船动态避碰模型

无人船动态轨迹规划通常的做法是, 无人船按照轨迹规划模型规划的轨迹航行一段固定时间 T_s 后, 根据当前时刻的环境态势再次通过轨迹规划模型规划轨迹。重复上述操作直到与障碍船相撞或到达目标点位置。由于障碍船的轨迹是无法准确预测的, T_s 过大会使无人船与障碍船碰撞危险增大, T_s 过小会大大地降低计算性能, 不利于模型的实际使用。故而, 本文结合事件触发机制, 提出了无人船动态避碰算法。在 T_s 较小的情况下, 根据当前时刻的无人船碰撞危险性来设置触发条件。事件触发后, 再根据当前时刻环境态势使用无人船轨迹规划模型进行轨迹规划。该方法可使无人船在保证航行安全的前提下, 以较少的计算资源进行轨迹规划, 提高了方法的实用性。

2.1 无人船碰撞危险评估模型

无人船在水域中航行时, 与处于航行状态障碍船的碰撞危险程度影响着无人船的行为决策。建立一个有效的船舶碰撞危险性评估模型是实现无人船自主航行的前提。如图 1 所示, 借鉴船舶会遇过程中的船舶领域和动界的概念, 选取 DPCA(最近会遇距离)、TCPA(最近会遇时间)作为评价船舶碰撞危险性的评价指标, 并建立相应隶属度函数来实时评估无人船与障碍船的碰撞危险程度。图 3 所示为无人船(O)与障碍船(T)的会遇情况。

如图 3 所示, ψ_T 为障碍船(T)的航向角, v_T 为障碍船(T)的航速。 (x_O, y_O) 和 (x_T, y_T) 分别为无人船(O)和障碍船(T)在全局坐标系下的坐标。障碍船(T)相对无人船(O)的速度 v_R 计算方法如下:

$$v_R = \sqrt{v_O^2 + v_T^2 - 2v_O v_T \cos(2\pi - \psi_T + \psi)} \quad (6)$$

全局坐标系下, 无人船(O)航向相对于障碍船(T)航向的方向角 ψ_R 为

$$\psi_R = \pi + \psi + \arccos\left(\frac{v_R^2 + v_O^2 - v_T^2}{2v_R v_O}\right) \quad (7)$$

无人船(O)与障碍船(T)的 DPCA 和 TCPA

如下式计算:

$$\begin{cases} P_{\text{DCPA}} = d_R \sin(\psi_R - \psi - \theta_r - \pi) \\ P_{\text{TCPA}} = \frac{d_R}{v_R} \cos(\psi_R - \psi - \theta_r - \pi) \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{DCPA} 和 P_{TCPA} 分别为无人船(O)与障碍船(T)的 DPCA 和 TCPA; d_R 为无人船(O)与障碍船(T)的距离, 可通过 $d_R = \sqrt{(x_O - x_T)^2 + (y_O - y_T)^2}$ 计算。建立 DPCA 和 TCPA 的隶属度函数, DPCA 隶属度函数如式(9)所示。

$$U_{\text{DCPA}} = \begin{cases} 1 & P_{\text{DCPA}} \leq d_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{d_2 - d_1} \left(P_{\text{DCPA}} - \frac{d_1 + d_2}{2}\right)\right] & d_1 < P_{\text{DCPA}} < d_2 \\ 0 & P_{\text{DCPA}} \geq d_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, d_1 为无人船到本船的船舶领域边界的长度, d_2 为无人船到本船的动界边界的长度, 且 $d_2 = 2d_1$ 。参考文献[18], 本文中的 d_1 通过下式计算:

$$d_1 = \begin{cases} 0.11 - \frac{0.02\theta_r}{180^\circ} & 0^\circ \leq \theta_r < 112.5^\circ \\ 0.1 - \frac{0.04\theta_r}{180^\circ} & 112.5^\circ \leq \theta_r < 180^\circ \\ 0.1 - \frac{0.04(360^\circ - \theta_r)}{180^\circ} & 180^\circ \leq \theta_r < 247.5^\circ \\ 0.11 - \frac{0.02(360^\circ - \theta_r)}{180^\circ} & 247.5^\circ \leq \theta_r < 360^\circ \end{cases} \quad (10)$$

式中, d_1 单位为 n mile; θ_r 为以无人船航向为正方向时, 障碍船(T)位置相对无人船(O)的方位角。TCPA 隶属度函数如式(11)所示。

$$U_{\text{TCPA}} = \begin{cases} 1 & P_{\text{TCPA}} \leq t_1 \\ \left(\frac{t_2 - P_{\text{TCPA}}}{t_2 - t_1}\right)^2 & t_1 < P_{\text{TCPA}} \leq t_2 \\ 0 & P_{\text{TCPA}} > t_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中, t_1 和 t_2 分别为 U_{TCPA} 的时间上限和下限, t_1 和 t_2 分别通过式(12)计算。

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{d_1^2 - P_{\text{DCPA}}^2}}{v_R} \\ t_2 = \frac{\sqrt{d_3^2 - P_{\text{DCPA}}^2}}{v_R} \end{cases} \quad (12)$$

式中, d_3 为 1.2 n mile。障碍船进入本船动界时, 本船与障碍船存在碰撞风险, 且 U_{TCPA} 和 U_{DCPA} 越接近 1 代表本船与障碍船的碰撞危险性越大, 本船需要尽快避开障碍船。为综合评估 DPCA 和 TCPA 对船

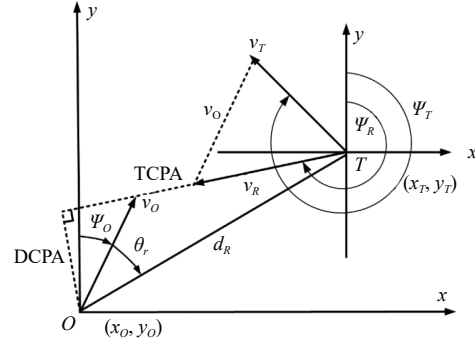


图 3 无人船会遇态势图

Fig.3 Encounter situation diagram of unmanned ships

船避碰的影响, 建立式(13)所示的碰撞危险性评估总隶属度函数。

$$U_{Ci} = w_{DCPA} U_{DCPA} + w_{TCPA} U_{TCPA} \quad (13)$$

式中, w_{DCPA} 和 w_{TCPA} 为权值系数, 且 $w_{DCPA} + w_{TCPA} = 1$ 。式(13)可衡量无人船与第 i 艘障碍船的碰撞危险性, U_{Ci} 越大代表无人船与障碍船 i 碰撞危险性越大。 U_{Ci} 为 0 时, 代表无人船与障碍船 i 无碰撞危险性。

2.2 基于事件触发机制的无人船动态避碰

通过事件触发机制减少轨迹规划的计算次数, 加强计算性能。假设 $t_0 = 0$ s 时, 轨迹规划第一次触发, t_k 为轨迹规划第 k 次触发时的时间。将 T_s 作为固定时间窗将时间离散化, 无人船动态避碰的事件触发机制可由下式表示:

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k | U_{Ci} \geq 1\} \quad (14)$$

由式(14)可知, 每隔固定时间 T_s 计算一次无人船与各障碍船的碰撞危险性 U_{Ci} 。若 $U_{Ci} \geq 1$, 则满足触发条件。根据当前时间窗 T_s 最后时刻的环境态势, 通过无人船轨迹规划模型进行轨迹规划。无人船在下一时间窗按照新规划的轨迹航行。若当前时间窗 T_s 最后时刻未满足触发条件, 则无人船在下一时间窗继续按照当前轨迹航行。事件触发机制下的无人船动态避碰模型计算流程如图 4 所示。

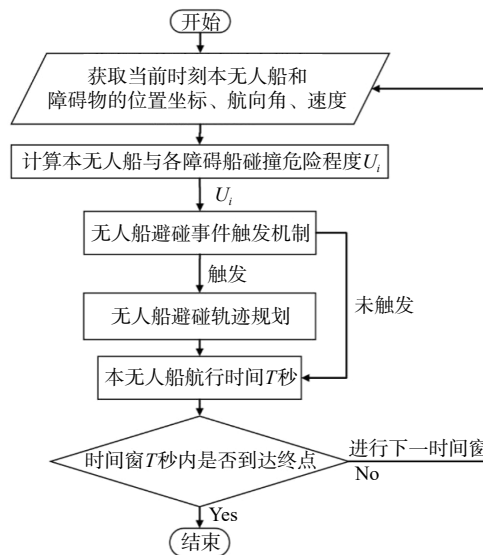


图 4 无人船动态避碰模型计算流程图

Fig.4 Calculation flowchart of dynamic collision avoidance model for unmanned ships

3 仿真实验

分别针对开阔水域和限制水域进行无人船轨迹规划的仿真实验, 对本文建立的无人船动态避碰模型在不同水域环境下的轨迹规划能力进行验证。开阔水域和限制水域均为以 $(0\text{ m}, 0\text{ m})$, $(2000\text{ m}, 0\text{ m})$, $(2000\text{ m}, 2000\text{ m})$, $(0\text{ m}, 2000\text{ m})$ 为顶点所围成的正方形水域。无人船与障碍船的船长均为 10 m 。在无人船轨迹规划计算过程中, 建立栅格地图时划分网格的单元长度 d_x 和 d_y 均为 10 m , 建立 S - T 栅格图时划分网格的单元长度 d_t 为 10 s , d_s 为 10 m , 时间窗 T_s 为 20 s , 栅格地图总网格数 N_{map} 为 $40\ 000$, 规划路径时栅格地图的采样点数 N 为 150 , 无人船最大航速 V_{max} 为 10 m/s 。无人船到达终点或与障碍船相撞则停止仿真。实验主机 CPU 型号为 Intel Core i7-8750H。

3.1 开阔水域

开阔水域中共有 6 艘障碍船。为方便模拟, 障碍船均以直线航行。无人船起点为 $(0\text{ m}, 0\text{ m})$, 终点为 $(2000\text{ m}, 2000\text{ m})$, 初始航向角为 $\pi/4\text{ rad}$; 障碍船 1 起点为 $(2000\text{ m}, 2000\text{ m})$, 终点为 $(0\text{ m}, 0\text{ m})$, 航速

为 5 m/s, 航向角为 1.25π rad; 障碍船 2 起点为 (0 m, 2000 m), 终点为 (2000 m, 0 m), 航速为 4 m/s, 航向角为 0.75π rad; 障碍船 3 起点为 (0 m, 500 m), 终点为 (2000 m, 500 m), 航速为 5.5 m/s, 航向角为 0.5π rad; 障碍船 4 起点为 (1500 m, 2000 m), 终点为 (1500 m, 0 m), 航速为 4.6 m/s, 航向角为 1π rad; 障碍船 5 起点为 (2000 m, 1500 m), 终点为 (0 m, 1500 m), 航速为 4.6 m/s, 航向角为 1.5π rad; 障碍船 6 起点为 (500 m, 0 m), 终点为 (500 m, 2000 m), 航速为 4.6 m/s, 航向角为 0π rad。各障碍船在各时刻的预测轨迹和航速与实际的轨迹和航速相同。为方便展示无人船的避碰过程, 将开阔水域无人船的避碰轨迹分成如图 5~8 所示的四个时段。无人船航速则如图 9 所示。

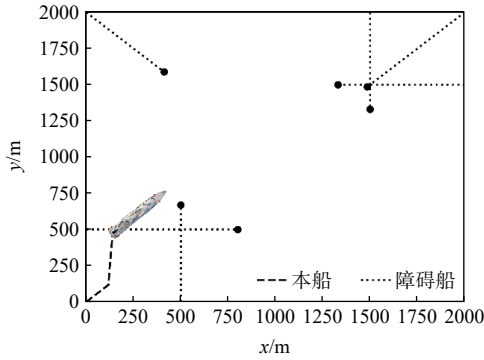


图 5 开阔水域时段 1 无人船轨迹

Fig.5 Unmanned ship trajectory in open waters Period 1

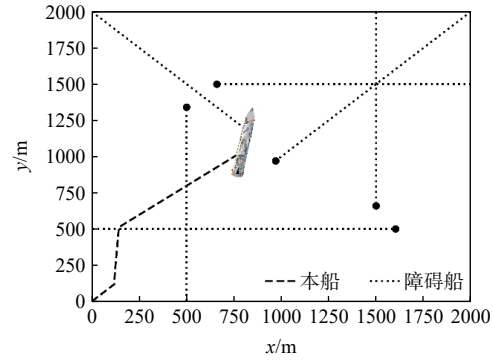


图 6 开阔水域时段 2 无人船轨迹

Fig.6 Unmanned ship trajectory in open waters Period 2

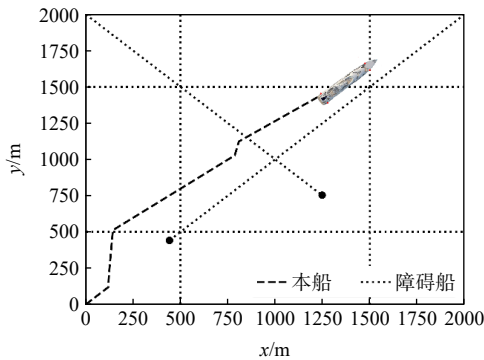


图 7 开阔水域时段 3 无人船轨迹

Fig.7 Unmanned ship trajectory in open waters Period 3

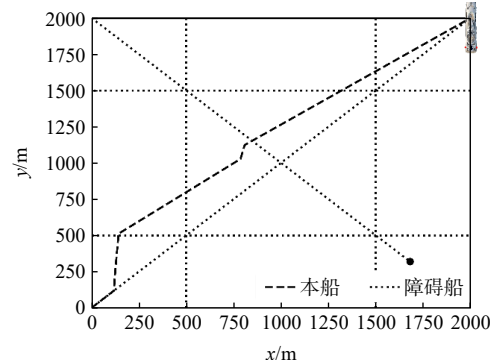


图 8 开阔水域时段 4 无人船轨迹

Fig.8 Unmanned ship trajectory in open waters Period 4

如图 5~9 所示, 开阔水域仿真总共运行 89 s, 无人船航行时间为 628 s, 避碰轨迹总里程为 2964.01 m。其中, 时段 1 为 0~157 s, 时段 2 为 157~314 s, 时段 3 为 314~471 s, 时段 4 为 471~628 s。无人船轨迹在该开阔水域中完美地避开了障碍船, 并到达终点。同时, 避碰轨迹总里程较短, 避碰轨迹相对平滑, 没有大的转向角。可见, 本动态避碰模型可使无人船在开阔水域实现自主避碰, 且避碰轨迹能很好地保障无人船的经济性和安全性。

3.2 限制水域

限制水域中有两艘障碍船, 三处静态障碍物。为方便模拟, 静态障碍物均以圆形表示。其中, 障碍船 1 的航线为以 (2000 m, 2000 m) 为起点, (0 m, 0 m) 为终点的直线。障碍船 1 的航

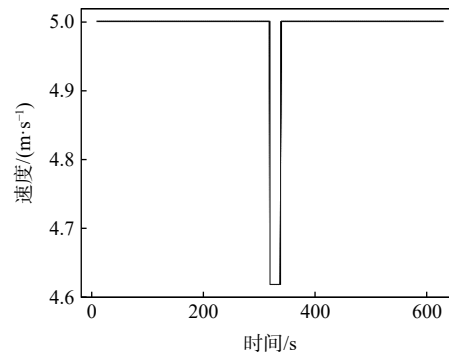


图 9 开阔水域无人船航速

Fig.9 Speed of unmanned ship in open waters

速和航向角分别为 5 m/s 和 1.25π rad; 障碍船 2 的航线为以 (0 m, 1125 m) 为起点, (2000 m, 1125 m) 为终点的直线, 障碍船 2 的航速和航向角分别为 5 m/s 和 0.5π rad。第一处静态障碍物圆心坐标为 (750 m, 1500 m), 半径为 250 m; 第二处静态障碍物圆心坐标为 (1000 m, 500 m), 半径为 250 m; 第三处静态障碍物圆心坐标为 (1500 m, 750 m), 半径为 250 m。各障碍船在各时刻的预测轨迹和航速与实际的轨迹和航速相同。为方便展示无人船的避碰过程, 将限制水域无人船的避碰轨迹分成如图 10~13 所示的四个时段。

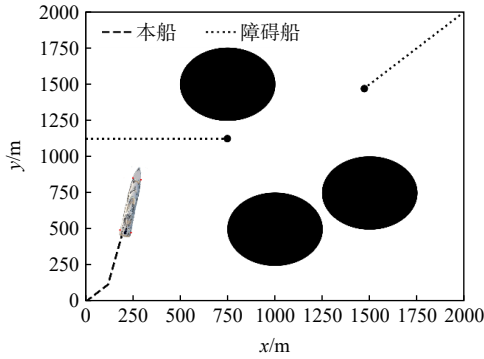


图 10 限制水域时段 1 无人船轨迹

Fig.10 Unmanned ship trajectory in restricted waters Period 1

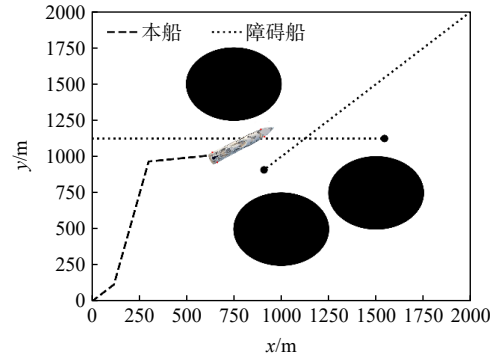


图 11 限制水域时段 2 无人船轨迹

Fig.11 Unmanned ship trajectory in restricted waters Period 2

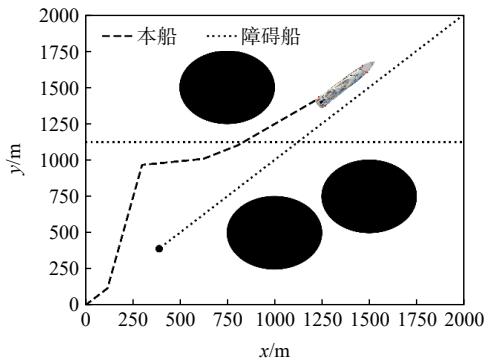


图 12 限制水域时段 3 无人船轨迹

Fig.12 Unmanned ship trajectory in restricted waters Period 3

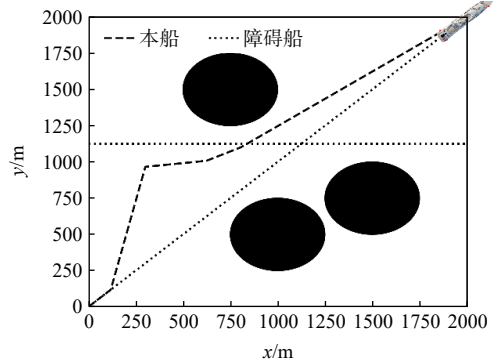


图 13 限制水域时段 4 无人船轨迹

Fig.13 Unmanned ship trajectory in restricted waters Period 4

如图 10~13 所示, 限制水域仿真总共运行 53 s, 无人船航行时间为 631 s, 避碰轨迹总里程为 3059.28 m。其中, 时段 1 为 0~157 s, 时段 2 为 157~315 s, 时段 3 为 315~473 s, 时段 4 为 473~631 s。由于障碍船只有 2 艘, 每次轨迹规划时的 $S-T$ 图碰撞危险点较少, 使得规划的航速均为 5 m/s。无人船在该限制水域中避开了障碍船以及静态障碍物, 到达终点。同时, 避碰轨迹相对平滑, 没有大的转向角, 避碰轨迹总里程也较短。可见, 本轨迹规划模型可使无人船在面对限制水域时, 以较高的经济性安全地到达终点。在开阔水域与限制水域的仿真实验中, 无人船动态避碰模型的事件触发情况如表 1 所示。

表 1 动态避碰模型事件触发次数

Tab.1 Event triggering times of dynamic collision avoidance model

航行场景	事件触发次数	时间窗数	减小比例
开阔水域	28	32	12.5%
限制水域	19	32	40.625%

如表 1 所示, 开阔水域中移动障碍船的数量较多, 所以无人船碰撞危险性较大时的情况较多, 导致事件触发次数较多, 但相比于未使用事件触发机制仍减小了 4 次轨迹规划的计算。限制水域的仿真相

比于未使用事件触发机制,无人船动态避碰模型减小了13次轨迹规划的计算,减小比例高达40.625%。可见,本无人船动态避碰模型通过事件触发机制进行轨迹规划,可在保障无人船航行安全的基础上,大大减少轨迹规划的计算次数,节省计算资源,从而提高模型的适用性。

4 结 语

本文提出了一种以较小的计算资源对局部水域中的静态障碍物以及移动障碍船进行动态避碰的轨迹规划方法。首先将无人船的轨迹规划解耦成路径规划和航速规划,并分别使用PRM-A*算法进行求解,从而规划得到当前时刻环境态势下具有较好经济性和安全性的避碰轨迹。通过事件触发机制建立了无人船动态避碰模型,以DCPA和TCPA为基础建立无人船碰撞危险性评估模型,并以此设置事件触发的条件,分别对开阔水域和限制水域的无人船轨迹规划进行仿真实验。结果表明:本动态避碰轨迹规划方法可在保证无人船能有效避开水域中的静态障碍物和移动障碍物的基础上,减少轨迹规划的计算次数,提高计算性能,可为实现无人船的自主避碰航行提供参考。本文是在假设已获取移动障碍船预测轨迹的前提下进行的避碰轨迹规划,因而,结合深度学习算法预测障碍船轨迹后,再利用PRM-A*算法进行轨迹规划是本模型下一步的研究方向。

参 考 文 献:

- [1] 钱正芳, 陆江, 孙小帅. 浅析深度学习在未来水面无人艇平台的应用[J]. 中国造船, 2020, 61(S1): 6-13.
Qian Zhengfang, Lu Jiang, Sun Xiaoshuai. Brief analysis of deep learning application in future unmanned surface vehicle platform[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(S1): 6-13. (in Chinese)
- [2] 张丹红, 陈文文, 张华军, 等. A*算法与蚁群算法相结合的无人艇巡逻路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 13-18.
Zhang Danhong, Chen Wenwen, Zhang Huajun, et al. Patrol path planning of unmanned surface vehicle based on A* algorithm and ant colony algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(6): 13-18. (in Chinese)
- [3] Song Hongqiang, You Yusong, Sun Xiujun, et al. The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations[J]. Ocean Engineering, 2021, 223.
- [4] 向金林, 王鸿东, 欧阳子路, 等. 基于改进双向RRT的无人艇局部路径规划算法研究[J]. 中国造船, 2020, 61(1): 157-166.
Xiang Jinlin, Wang Hongdong, Ouyang Zilu, et al. Algorithm of local path planning for unmanned surface vehicles based on improved Bi-RRT[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 157-166. (in Chinese)
- [5] 刘正锋, 张隆辉, 魏纳新, 等. 限制区域水面无人艇路径规划与跟踪控制研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(9): 1127-1136.
Liu Zhengfeng, Zhang Longhui, Wei Naxin, et al. Study on path planning and following control of unmanned surface vehicles in restricted areas[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(9): 1127-1136. (in Chinese)
- [6] 汪咏, 徐海祥, 冯辉, 等. 考虑船舶操纵性的无人艇路径规划方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 91-96.
Wang Yong, Xu Haixiang, Feng Hui, et al. Path planning method of unmanned surface vehicle considering ship maneuverability[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 52(3): 91-96. (in Chinese)
- [7] 王立鹏, 张智, 马山, 等. 考虑船舶操纵性约束的改进遗传算法航线规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(7): 1056-1062.
Wang Lipeng, Zhang Zhi, Ma Shan, et al. Improved genetic algorithm-based ship route planning considering ship maneuverability constraints[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(7): 1056-1062. (in Chinese)

- [8] 周凤杰. 船舶避碰的粒子群-遗传 (PSO-GA) 的混合优化算法研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(7): 909-916.
Zhou Fengjie. Research on hybrid optimization algorithm of particle swarm-genetic (PSO-GA) for ship collision avoidance[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(7): 909-916. (in Chinese)
- [9] 陈天元, 袁 伟, 俞孟蕪. 基于集合制导和动态窗口约束的无人船自主动态避碰方法研究[J]. 中国造船, 2020, 61(3): 176-185.
Chen Tianyuan, Yuan Wei, Yu Menghong. Autonomous dynamic collision avoidance for unmanned surface vehicle under set-based guidance and dynamic window constraints[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(3): 176-185. (in Chinese)
- [10] 杨 娇, 张庆年, 杨 杰, 等. 内河无人船的驾驶行为决策模型[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2022, 46(3): 552-558.
Yang Jiao, Zhang Qingnian, Yang Jie, et al. Driving behavior decision model of inland unmanned ships[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2022, 46(3): 552-558. (in Chinese)
- [11] 杨 娇, 张庆年, 杨 杰, 等. 内河无人船的自主路径规划模型研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47(2): 263-274.
Yang Jiao, Zhang Qingnian, Yang Jie, et al. Research on autonomous path planning model of inland river unmanned ships[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2023, 47(2): 263-274. (in Chinese)
- [12] 王 群, 张庆年, 杨 杰, 等. 内河无人驾驶船舶驾驶行为决策模型研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2021, 45(1): 44-48+53.
Wang Qun, Zhang Qingnian, Yang Jie, et al. Research on navigation behavior decision model of unmanned ships in inland river[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2021, 45(1): 44-48+53. (in Chinese)
- [13] 于 镒, 王亚洁, 赵 博, 等. 动态事件触发机制下多智能体系统固定时间跟踪[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1403-1413.
Yu Di, Wang Yajie, Zhao Bo, et al. Fixed-time tracking control of multi-agent systems under dynamic event-triggering mechanism[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(5): 1403-1413. (in Chinese)
- [14] 陈立家, 周乃祺, 李世刚, 等. 基于 C-Informer 模型的船舶轨迹预测方法[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(6): 51-60+141.
Chen Lijia, Zhou Naiqi, Li Shigang, et al. A method of ship trajectory prediction based on a C-Informer model[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(6): 51-60+141. (in Chinese)
- [15] 郭逸婕, 张君毅, 王 鹏. 基于注意力机制的 TCN-BiLSTM 船舶轨迹预测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 30-36.
Guo Yijie, Zhang Junyi, Wang Peng. Prediction for TCN-BiLSTM ship trajectory based on attention mechanism[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(1): 30-36. (in Chinese)
- [16] 卫 彦, 晋 芳, 董凯锋, 等. 基于节点优化的改进全局路径规划 A* 算法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 143-148.
Wei Yan, Jin Fang, Dong Kaifeng, et al. Improved global path planning A* algorithm based on node optimization[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(6): 143-148. (in Chinese)
- [17] Wang Ziming, Chen Shunhuai. A ship route design method based on adaptive niche genetic algorithm[C]//Proceedings of the 30th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2020.
- [18] Li Bo, Pang Fuwen. An approach of vessel collision risk assessment based on the D-S evidence theory[J]. Ocean Engineering, 2013, 74: 16-21.