

# 水声通信多约束下水下无人航行器集群路径规划策略

徐明华<sup>1</sup>, 金建钢<sup>2</sup>, 王斌<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 海洋智能装备与系统集成技术教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**针对水下无人航行器集群在水声通信影响下水雷探测任务的路径规划与任务分配需求, 本文提出了一种基于自适应大邻域算法的两阶段协同探测方法。通过“粗扫全覆盖+精扫路径规划”策略, 结合通信约束动态优化水下无人航行器航速, 利用多水下无人航行器协同完成海域粗扫并定位可疑目标区域。随后对可疑目标区域进行精细化扫描并以探测效率最优为目标, 采用容量限制的水下无人航行器路径规划模型对多个可疑目标区域进行路径规划。数值仿真结果表明: 本文提出的方法能根据海域面积、通信带宽及水下无人航行器数量生成高效探测方案, 边际效益量化模型验证了其经济性与有效性。

**关键词:**水下无人航行器; 集群协同; 路径规划; 水雷探测; 自适应大邻域算法; 边际效益; 航速优化; 任务分配

**DOI:** 10. 11990/jheu. 202505001

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250624.1311.062>

**中图分类号:** TP242.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1583-10

## Path planning for underwater unmanned vehicle cluster mine detection in weak communication environments

XU Minghua<sup>1</sup>, JIN Jiangang<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System Integration Technology of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A two-stage cooperative detection method based on an adaptive large neighborhood search algorithm was developed to fulfill the requirements for planning the path and allocating tasks for underwater unmanned vehicle (UUV) clusters in mine detection missions governed by underwater acoustic communication. Adopting a "coarse sweeping full coverage + fine sweeping path planning" strategy, the method first dynamically optimizes the speed of the UUV by incorporating communication constraints, enabling multi-UUV collaboration to achieve coarse sweeping of the sea area and the location of suspicious target regions. Subsequently, a refined scanning of the suspicious target regions is conducted. Moreover, aiming to maximize the detection efficiency, a capacitated vehicle routing problem model is employed for path planning across multiple suspicious target regions. The numerical simulation demonstrates that the proposed method can generate high-efficiency detection schemes based on the sea area, communication bandwidth, and the number of UUVs. The marginal benefit quantification model further verifies the cost-effectiveness and efficacy of this approach.

**Keywords:** unmanned underwater vehicle; cluster collaboration; path planning; mine detection; adaptive large neighborhood search; marginal benefit; speed optimization; task allocation

水下无人航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)凭借其高灵活性、强环境适应性和卓越的生存能力, 已成为危险环境中替代人类作业的核心装

备。尤其在水雷排查领域<sup>[1]</sup>展现出显著优势, UUV 集群协同探测可以在保障人员安全的同时, 高效完成大范围水下目标的探测识别任务。因此 UUV 集群协同已成为一个研究热点问题。

UUV 集群协同的关键技术主要有编队控制, 任务规划, 路径规划和目标搜索等<sup>[2-4]</sup>, 其中路径规划方法是 UUV 集群协同的核心问题。张汝波等<sup>[5]</sup>针

收稿日期: 2025-05-02.

网络出版日期: 2025-06-24.

作者简介: 徐明华, 男, 硕士研究生;

王斌, 男, 教授.

通信作者: 王斌, E-mail: bin\_wang@sjtu.edu.cn.

对水下环境中多障碍物威胁导致路径规划困难的问题,在蚁群算法中引入信息素动态调整机制,显著提升 UUV 多重避障路径规划的稳定性和全局优化能力。WU Lian 等<sup>[6]</sup>提出基于改进仿生神经网络的多 UUV 路径规划算法,通过栅格化环境建模和神经元动态抑制机制实现复杂环境下的安全避碰。Yan Zheping 等<sup>[7]</sup>提出一种结合粒子群优化与航路点引导的 UUV 实时路径规划方法,利用多波束前视声呐检测障碍物并生成轮廓,优化临时航路点以实现多目标最优路径规划。SOLARI 等<sup>[8]</sup>提出一种基于势场法的 UUV 避障方法,通过机械扫描声呐实时检测障碍物并构建环境模型,在仿真环境中验证了该方法能有效规划避障路径。Hu Xinyu 等<sup>[9]</sup>提出了一种半闭环仿生自组织映射算法,通过混合仿生迭代网络融合水流动力学补偿与任务紧迫性评估,实验表明在 3D 非均匀水流场中多 AUV 系统能耗降低超过 27%。除了上述方法之外,遗传算法、人工势场法、差分进化算法等启发式算法<sup>[10]</sup>也广泛应用于 UUV 的路径规划问题中。

与无人机和车辆路径规划相比,多 UUV 系统在水下弱通信条件下进行作业。由于水下环境中电磁波衰减严重,水声通信<sup>[11]</sup>是目前水下中远距离通信的唯一有效方式。然而水声信道存在带宽受限、传播时延长、多普勒扩展显著以及多径效应突出等固有缺陷,导致通信效率低下,形成典型的弱通信环境。赵振义等<sup>[12]</sup>提出一种混合自适应人工势场法,通过局部感知和动态权重调整实现弱通信环境下多 UUV 协同狩猎。严浙平等<sup>[13]</sup>通过位置-速度双层通信拓扑和时延补偿增益设计,解决了弱通信环境下 UUV 编队通信的时变延迟与数据包丢失问题。

综合以上,目前水声通信约束下 UUV 集群水雷探测路径规划存在以下不足:1) 缺乏对集群级通信中带宽受限的深入研究;2) 任务导向的路径规划研究不足,面对大规模扫雷任务,易陷入局部最优。

本文针对现有水声通信环境下 UUV 集群水雷探测路径规划存在的问题,通过引入动态带宽-速度协同优化机制对传统自适应大邻域算法(adaptive large neighborhood search, ALNS)进行改进,提出了一种高效可靠的“两阶段”多 UUV 协同探测路径规划方法。

## 1 水声通信多约束下的 UUV 集群两阶段探测建模

### 1.1 水下通信约束建模

本文针对水声通信中通信速率与距离成反比的

特性,提出在带宽和“通信速率乘距离”指标<sup>[14]</sup>联合约束下,通过动态优化 UUV 的航行速度、作业区域及路径,实现探测效率最大化与探测时间最小化的目标,确保通信稳定性与数据传输可靠性<sup>[15]</sup>。水面船为 UUV 集群提供通信信号,两者之间的距离为:

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (1)$$

式中:  $d_1$  是 UUV 与水面船的垂直距离;  $d_2$  是 UUV 与水面船的水平距离;  $d$  是 UUV 与水面船之间的几何距离。

首先,要保证通信的稳定,UUV 的数据生成率要小于等于指标限定的通信速率,即:

$$R_d \leq R_c \quad (2)$$

式中:  $R_d$  为 UUV 的数据生成速率;  $R_c$  为指标限定的通信速率。其中:

$$R_d = vD_m \quad (3)$$

$$R_c = D_T/d \quad (4)$$

式中:  $v$  为 UUV 航速;  $D_m$  为 UUV 移动 1 m 产生的数据量,此时,“通信速率乘距离”指标  $D_T$  约束下的 UUV 最大航速为:

$$v_{\max 1} \leq \frac{D_T}{D_m \times d} \quad (5)$$

其次,在带宽恒定的情况下,带宽的分配通过频分复用(frequency division multiple access, FDMA)实现,将总带宽  $B$  划分为  $N$  个等宽的子频带,每台 UUV 独占一个子频带。随着 UUV 的数量增加,每个 UUV 可用的带宽减少,通信速率降低,导致数据传输延迟增加。为确保数据能够被有效且稳定的传输与接收,数据生成速率需小于等于每个 UUV 的平均通信速率即:

$$R_d \leq R_{\text{average}} \quad (6)$$

式中:  $R_{\text{average}}$  为每个 UUV 的平均通信速率,采用 QPSK 调制,每符号 2 bit,因此  $R_{\text{average}}$  为:

$$R_{\text{average}} = \frac{2000B}{N} \quad (7)$$

式中:  $B$  为总通信带宽;  $N$  为 UUV 的数量,此时,通信带宽约束下的 UUV 最大航速为:

$$v_{\max 2} \leq \frac{2000B}{D_m \times N} \quad (8)$$

综上所述,UUV 的最大航速  $v$  应为:

$$v = \min(v_{\max 1}, v_{\max 2}) \quad (9)$$

此模型通过动态平衡距离与带宽的耦合关系,在水下复杂环境中保证数据传输稳定的同时实现探测效率的最大化。

### 1.2 UUV 集群探测任务分解模型

#### 1.2.1 海洋环境建模

基于海洋环境的特点,UUV 在一定的水深下航

行探测海底,基本不存在固定的障碍物。在已知 UUV 所处的全局环境下,通过栅格法将矩形海域拆分成一定数量的等大小的栅格,如图 1 所示。根据区域的边长和栅格数量计算每个栅格的尺寸和位置,假定 UUV 的探测宽度就是栅格的边长。根据 1.1 节中 UUV 航速的 2 个通信约束限制,水面船处于海域中心,计算出每个栅格位置处 UUV 的速度并假设 UUV 在栅格内的速度恒定,则 UUV 探测完成一个栅格的时间就是栅格的边长除以该栅格处 UUV 的航速,得到的时间赋值到该栅格。

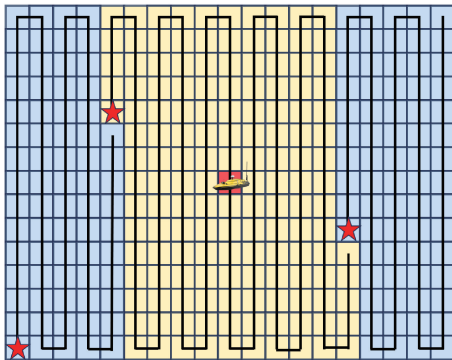


图 1 粗扫区域划分及路径规划示意

Fig. 1 Schematic diagram of rough sweeping area division and path planning

在栅格示意图中,可以根据栅格的序号  $i$ , 获得该栅格的边长  $d_i$ , 位置信息  $(x_i, y_i)$ , 速度信息  $v_i$  和探测时间信息  $t_i$ 。其中  $i \in n$ , 时间信息  $t_i$  为:

$$t_i = d_i/v_i \quad (10)$$

1.2.2 分层式多阶段协同探测机制:“粗扫+精扫”

全覆盖粗扫阶段 UUV 集群的任务是对目标海域进行快速、大范围的初步探测,以识别可能存在水雷的疑似区域。这一阶段的核心目标是高效覆盖和初步分类,具体实现方式为:

1) 基于栅格化海洋环境模型,将海域划分为若干子区域,每个子区域由单个 UUV 负责。根据 UUV 与母船的通信约束实时调整航速和探测范围;

2) 靠近母船的子区域,通信条件较好,分配较大的探测面积,UUV 以较高航速进行平行线扫描。远离母船的子区域,通信带宽受限,缩小探测面积并降低航速,确保数据稳定回传。区域划分大致情况及平行线扫描路径如图 1 所示;

3) 路径规划采用蛇形扫描模式,减少 UUV 转弯次数,提升覆盖率和探测效率。

UUV 在粗扫过程中实时采集声呐回波数据,通过对图像进行实时处理,识别疑似水雷目标。检测结果标记为疑似水雷区域。在精扫阶段,系统根据粗扫阶段后识别到的可疑目标区域,进一步规划路径进行高分辨率复核。具体实现方式为:

- 1) 可疑目标区域栅格细化,提高识别精度;
- 2) 采用纵向横向纵向路径交叉探测,有效解决 UUV 在子区域的进入点和出发点设计问题;
- 3) 计算每个可疑区域目标区域的精扫时间,作为任务量输入,通过自适应大邻域算法规划可疑目标点之间的路径。

精扫阶段的可疑区域细化及可疑区域间路径设计如图 2 所示。在可疑目标点处,将该栅格细化为 9 个相等的小栅格,并以中心栅格为出发点,先按绿色路线纵向探测,再按蓝色路线横向探测,最后按紫色路线纵向探测回到出发点,结束精扫,前往下一个可疑目标点,路径如图 3 所示。

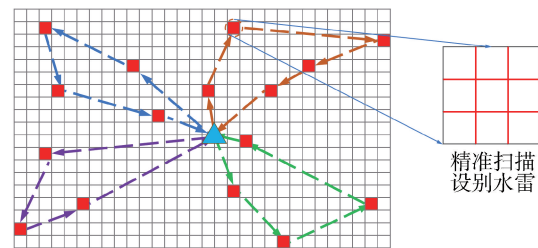


图 2 精扫阶段路径规划示意

Fig. 2 Schematic diagram of path planning for fine-sweeping phase

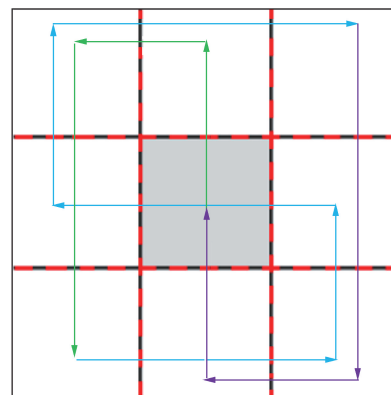


图 3 可疑目标区域精扫路径示意

Fig. 3 Schematic diagram of fine-sweeping path for suspected target areas

在分层式多阶段协同探测机制中,粗扫阶段通过动态带宽-航速协同优化与栅格化区域划分,采用蛇形扫描路径实现快速全覆盖探测,初步定位可疑目标区域。该阶段通过通信约束下的航速自适应调节,平衡了数据传输稳定性与探测效率。精扫阶段则基于粗扫结果,对可疑区域进行栅格细化和交叉路径规划,结合改进的自适应大邻域算法实现高分辨率复核,确保目标定位精度。

1.3 多目标优化函数设计

1) 粗扫阶段的路径规划旨在通过动态航速调整,对海域探测任务进行分配,实现 UUV 集群对海域的高效覆盖。其目标函数是最小化的最大探测

时间:

$$T = \min(\max_i T_i) \quad (11)$$

式中  $T_i = \sum_{j \in i} d_j/v_j$  表示第  $i$  个 UUV 完成其分配区域的探测时间。

2) 精扫阶段的路径规划旨在通过高分辨率复核可疑目标区域, 实现探测精度与效率的平衡。其目标函数可定义为最小化综合探测成本:

$$C_{obj} = \min(\alpha T_{max} + \beta \sum_{i=1}^N T_i + \lambda \sum_{i=1}^N D_i) \quad (12)$$

式中:  $T_{max} = \max T_i$ , 表示所有 UUV 中最大的探测时间;  $T_i = t_{scan,i} + \sum_{j \in i} d_j/v_j$ , 表示第  $i$  个 UUV 精细化扫描时间与路程消耗时间之和;  $D_i = \sum_{j \in i} d_j$ , 表示第  $i$  个 UUV 的行驶距离。 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $d_j$  为路径中, 可疑目标区域之间的距离, 且  $\alpha + \beta + \lambda = 1$ 。

该目标函数综合考虑总时间和单条路径的最大时间以及 UUV 的行驶距离, 实现了探测时间最小化的同时, 兼顾航行里程和不同 UUV 之间的任务量均衡。也可根据具体任务需求, 更改权重适应不同任务场景。

## 2 两阶段探测路径规划方法

### 2.1 实时航速动态调整

根据 1.1 节中的通信约束建模可知, 当 UUV 距水面船在一定范围内时, 航速受通信带宽的影响, 当超过这个距离后, 航速受“通信速率乘距离”指标约束, 即航速与距离之间成反比关系, 航速-距离曲线大致如图 4 所示。 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  之间的大小关系如图 5。

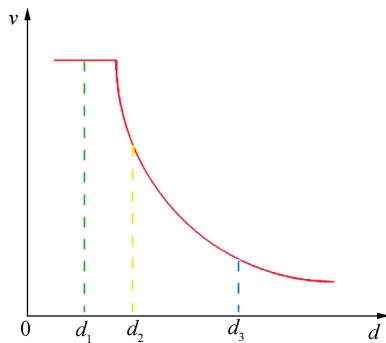


图 4 UUV 航速-距离曲线

Fig. 4 Speed-distance curve of UUV

### 2.2 粗扫阶段: 负载均衡的并行任务分配

根据海洋环境建模方法, 由通信带宽和 UUV 数量绘制航速-距离曲线, 通过栅格的边长计算出各栅格的时间信息  $t_i$ , 累计总时间  $T_{total}$  为该海域探测完成的时间。

单个 UUV 需执行探测任务的时间不小于探测总时间与 UUV 数量的比值:

$$T_a = T_{total}/N \quad (13)$$

采用平行线扫描路径, 按栅格顺序累加时间, 当子区域累计时间大于等于  $T_a$  时完成分配, 以下一个栅格为起点重新进行任务分配, 确保各 UUV 任务量均衡。任务分配原则如图 6 所示。其中  $T_1$ 、 $T_2$  分别为第 1 艘 UUV 和第 2 艘 UUV 完成探测任务所需时间。

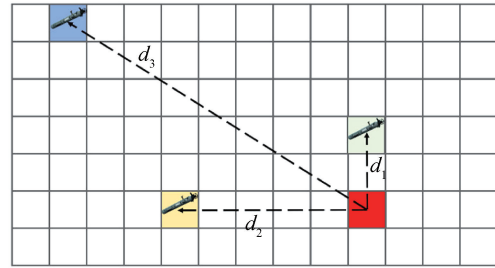


图 5 UUV 与水面船位置示意

Fig. 5 Position diagram of UUV and surface vessel

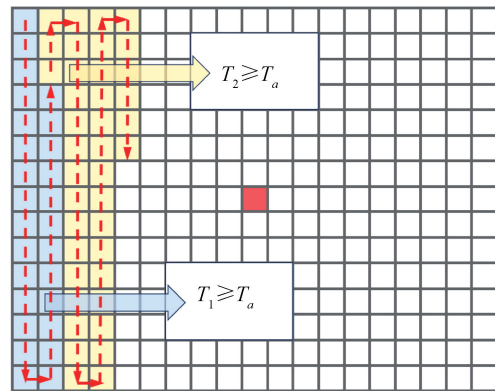


图 6 探测区域分配原则

Fig. 6 Allocation principles of detection zones

### 2.3 精扫阶段: 改进 ALNS 算法的协同路径规划

#### 2.3.1 算法流程

自适应大邻域搜索算法<sup>[16]</sup>是一种启发式优化算法, 主要用于解决复杂的组合优化问题。动态调整搜索邻域和破坏-修复策略, 在解空间中高效寻找高质量解。

本文采用轮盘赌法选择破坏算子与修复算子, 对初始解进行破坏与修复, 生成新解和新的目标值, 与初始解比较, 采用模拟退火原则, 一定程度上接受差解, 使得算法可以跳出局部最优解。迭代的过程中通过定期进行局部搜索, 提升负载均衡性, 算法核心流程为: 初始解生成、破坏与修复算子选择、模拟退火接受准则、局部搜索。

#### 2.3.2 初始解生成

将所有可疑目标点标号并进行完全随机排列, 生成一个无序的节点序列。将随机排列后的节点序列分割为满足 UUV 容量约束的可行路径。

从水面船位置出发, 创建空路径。采用贪心插

人按随机序列顺序依次将节点加入当前路径,若节点需求超过剩余容量,则封闭当前路径,并开启新路径。所有节点分配完毕,最终路径需返回水面船位置。

### 2.3.3 破坏算子

#### 1) 随机破坏算子。

随机破坏算子通过均匀随机采样移除一定比例的节点,破坏当前解的结构,以增强算法的全局探索能力。

从区间  $[d_{\min}, d_{\max}]$  中选择破坏比例  $d$ ,在初始解中随机移除  $d \cdot n$  个节点( $n$  为路径中总节点数),构成移除列表。将选中节点从当前路径中移除,保留剩余节点,从而生成不完整解。

#### 2) 最差破坏算子。

最差破坏算子基于目标函数敏感度分析,优先移除对当前解质量影响最大的节点,加速局部收敛。

对当前解中的每个节点  $i$ ,计算其移除后的目标函数变化量  $\Delta f_i = |f(x_i) - f(x_{-i})|$ ,其中  $x_{-i}$  为移除节点  $i$  后的解。将  $\Delta f_i$  降序排列,从  $[w_{\min}, w_{\max}]$  中随机选择移除数量  $w$ ,选取前  $w$  个高敏感度节点,构成移除列表,将选中节点从当前路径中移除,保留剩余节点,生成不完整解。

### 2.3.4 修复算子

在自适应大邻域搜索算法中,修复算子负责将破坏阶段移除的节点重新插入到不完整解中,以构造新的可行解。本文使用了随机插入、贪婪插入和后悔值插入 3 种修复算子。

1) 随机插入算子:随机插入算子通过均匀随机采样选择插入位置,将移除的节点重新插入到解中。遍历移除列表中的节点,对每个节点,在当前解中的所有可能插入位置中随机选择一个,将节点插入到选定位置,重复上述过程直到所有节点都被重新插入,生成新的解。

2) 贪婪插入算子:贪婪插入算子通过评估所有可能的插入位置,选择使目标函数改进最大的位置进行插入。遍历移除列表中的节点,对每个节点,评估其在当前解所有可能位置的插入成本。选择使目标函数最优的位置插入,重复上述过程直到所有节点都被重新插入,生成新的解。

3) 后悔值插入算子:后悔值插入算子不仅考虑最优插入位置,还考虑次优插入位置的差异,从而在贪婪性和多样性之间取得平衡。遍历移除列表中的节点,对每个节点,计算在所有可能位置的插入成本,按成本排序,选择前  $m$  个最佳位置,其中  $m$  为后悔值参数,计算后悔值,即次优位置与最优位置的差值。选择后悔值最大的节点优先插入。将节点插入到其最优位置,重复上述过程直到所有节点都被

重新插入,生成新的解。

### 2.3.5 轮盘赌选择法

轮盘赌选择是一种基于适应度比例的概率选择策略,用于在 ALNS 中动态选择破坏和修复算子。每个算子被选中的概率与其权重成正比,实现自适应的算子选择机制。

将所有候选算子的权重转换为概率分布,计算每个算子的累积概率区间,产生  $[0, 1)$  的随机数,根据随机数落入的区间确定选择的算子。每个算子  $i$  被选中的概率  $P(i)$  为:

$$P(i) = u_i / \sum_{j=1}^n u_j \quad (14)$$

式中  $u_i$  表示算子  $i$  的权重,通过规则动态更新:

$$u_i^{t+1} = (1 - \rho) u_i^t + \rho \frac{s_i}{k_i} \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为学习率;  $s_i$  为累计得分;  $k_i$  为选择次数。

轮盘赌法依据每次生成新解的结果,动态更新各算子权重,随着迭代次数的增加,对解提升效果好的破坏修复算子对的选择概率不断增大。

### 2.3.6 模拟退火准则

模拟退火核心思想是通过概率性接受劣解来避免陷入局部最优,最终逐步收敛到全局最优解。设置初始温度  $T_0$ ,根据目标函数值的变化:

$$\Delta E = f(x_{\text{new}}) - f(x) \quad (16)$$

式中:  $x_{\text{new}}$  为新解;  $f(x_{\text{new}})$  为新解目标值。按 Metropolis 准则决定是否接受新解,其公式为:

$$P = \begin{cases} 1, & \Delta E \leq 0 \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}}, & \Delta E > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中  $P$  为接受新解的概率,当劣解的目标值大于原解目标值时,即  $\Delta E > 0$ ,劣解仍有一定的概率被接受作为新的初始解,避免陷入局部最优。通过降温或者达到最大迭代次数使算法终止。

因此劣解就有一定的概率被接受作为新的初始解,通过降温或者达到最大迭代次数使算法终止。

### 2.3.7 局部搜索

局部搜索在本文中作为 ALNS 的改进模块,对迭代一定次数的最优解进行改进,识别耗时最长的路径,在满足容量约束的前提下,将其中的节点分配到其余的 UUV 路径中,均衡路径负载,避免其中一个 UUV 的负载远大于其余 UUV,路径间的局部搜索如图 7 所示。左侧环路中的访问节点多余右侧环路,导致路径负载均衡性差,将实心访问点从左侧环路中移除,加入右侧环路中,使 2 艘 UUV 访问节点的数目相同或接近。局部搜索的结果反馈至算子权重系统,使破坏修复算子更倾向于生成适合局部优化的解结构。综上所述两阶段探测水雷路径规划方法流程如图 8 所示。

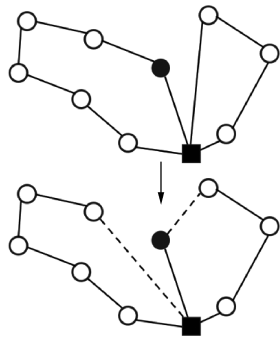


图 7 局部搜索示意

Fig. 7 Schematic diagram of local search

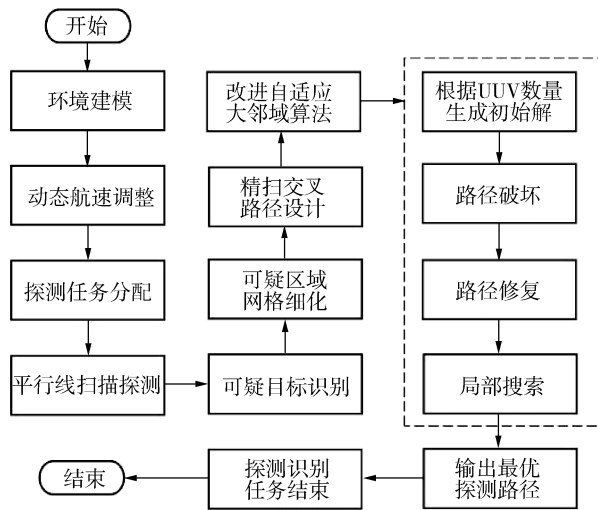


图 8 两阶段水雷探测路径规划方法流程

Fig. 8 Two-phase mine-sweeping path planning process

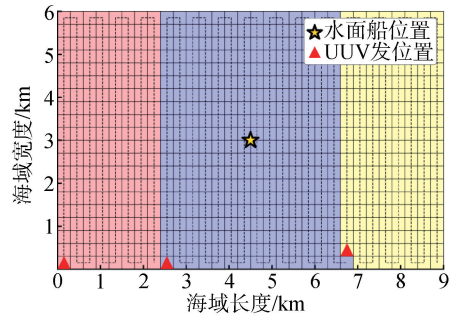
### 3 数值模拟与结果分析

为验证本文提出的两阶段探雷路径规划方法的有效性,基于典型海洋环境参数构建简化仿真模型,在矩形海域中进行数值仿真,其中海域长度,宽度分别为 9 000 和 6 000 m,初始栅格数量设置为 600 个,即 UUV 粗扫时探测宽度为 300 m,通信带宽为 5 kHz, UUV 移动 1 m 产生的数据量  $D_m$  为 500 bits/s,“通信速率乘距离”指标阈值  $D_r$  为 5 000 bit/s×km,由于水雷布放深度一般在水下 100 m,因此 UUV 航行深度设置为水下 100 m。粗扫阶段确定最佳 UUV 使用数量,精扫阶段共设置 3 类对比实验,分别为集群规模经济性拐点验证,带宽变化对探测效率的影响,超大海域的扩展性验证。

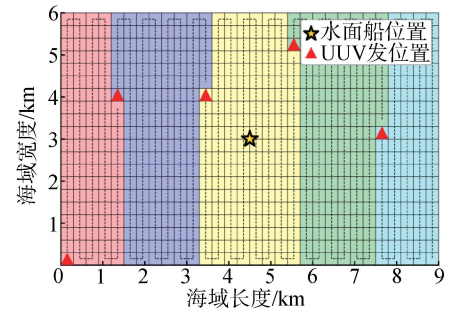
#### 3.1 粗扫全覆盖最佳方案

在边长为 6 km 和 9 km 矩形海域下海洋环境中,通过粗扫阶段任务分配方案及路径规划方法,根据 UUV 的数量,分配合理的探测任务,实现负载均衡,使探测时间最小化,以使用 3 艘和 5 艘的海域划分及路径规划情况为例,如图 9 所示。两者的速度曲线对比如图 10 所示。可见在距离水面船一定范

围内通信带宽约束 UUV 最大航速度,远距离时航速受通信距离的影响趋势是相同的。使用 3 艘和 5 艘 UUV 时探测任务完成时间分别为 4 h 58 min 和 3 h 13 min。可见增加 UUV 的数量可以有效降低全覆盖任务的时间花费,为后续精扫阶段节约时间。



(a) 3艘UUV



(b) 5艘UUV

图 9 海域划分结果

Fig. 9 Results of marine area artitioning

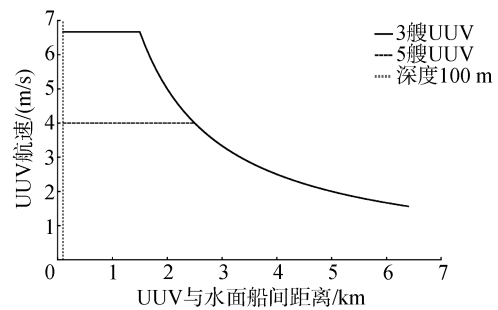


图 10 3 艘与 5 艘 UUV 航速对比曲线

Fig. 10 Speed comparison curves of 3 UUVs and 5 UUVs

进一步分析 UUV 数量对于探测效率的影响,分别使用 1~10 艘 UUV 探测该海域,绘制 UUV 数量与最短探测时间曲线如图 11 所示。随着 UUV 数量的增加,最短完成时间显著减小,但减小的幅度逐渐放缓。UUV 数量从 4 艘增加到 5 艘,时间减少 36 min,降幅 15.9%,UUV 数量从 5 艘增加到 6 艘,时间减少 20 min,降幅 10.6%。

初期,UUV 数量从 1 艘增加到 5 艘时,每增加一艘 UUV,探测时间大幅缩短,边际效益显著;后期,随着 UUV 数量继续增加,时间节省效果逐渐减弱。

UUV 数量增加会分摊带宽,导致单机通信速率下降,需降低航速以满足传输需求,且 UUV 过多时,任务分配可能不均衡,部分 UUV 提前完成探测任

务,处于闲置的状态。分析可知,此海域面积下,最佳的 UUV 使用数量为 5 艘。

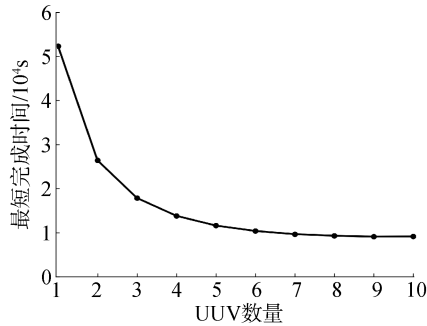


图 11 UUV 数量与最短时间关系

Fig. 11 Relationship between UUV quantity and minimum mission time

综上,UUV 数量的增加虽能提升探测效率,但需权衡通信约束和协同成本,应避免过度集群化导致效益下降,依据海域面积选择合适数量的 UUV 集群探测海域。

### 3.2 精扫阶段集群规模经济性拐点验证

在精扫阶段,为平衡探测效率与资源消耗,本文基于自适应大邻域算法分析了不同 UUV 数量对路径规划的影响。固定通信带宽为 5 kHz,设置 2~7 艘 UUV 的对比实验,以目标函数综合优化单条路径最大时间、总探测时间及航行距离。根据粗扫阶段的探测结果,本节随机生成 40 个可疑目标点,位置如图 12 所示。计算各位置的精扫时间,由于使用 UUV 的数量不同,在通信带宽一定的情况下,精扫的总时间,即任务总量也是不同的,精扫总时间随 UUV 数量增长趋势如图 13 所示。

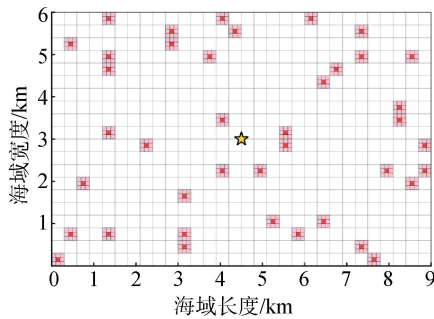


图 12 可疑目标点位置

Fig. 12 Locations of Suspected Targets

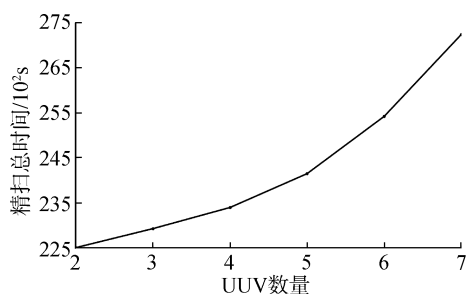


图 13 精扫总时间随 UUV 数量增长趋势

Fig. 13 Total fine-sweeping time vs. number of UUVs

随着 UUV 数量的增加,精扫总时间呈明显的非线性增长趋势,从表 1 可知,增长率随 UUV 数量的增加而加快。并且表 1 可知,有限通信带宽对探测任务的影响非常大。

表 1 增长趋势数据分析

Table 1 Data analysis of growth trends

UUV 数量	精扫总时间/s	增量/s	增长率/%
2	22 506	—	—
3	22 928	422	1.87
4	23 397	469	2.05
5	24 148	751	3.21
6	25 419	1 271	5.26
7	27 235	1 816	7.14

探测总时间和单条路径最大时间与 UUV 数量绘制如图 14 所示。通过改进自适应大邻域算法,规划可疑目标点之间的路径,其中使用分别使用 3、4、5、6 艘 UUV 的路径规划结果如图 15 所示,采用不同的颜色区分 UUV 之间的路径。

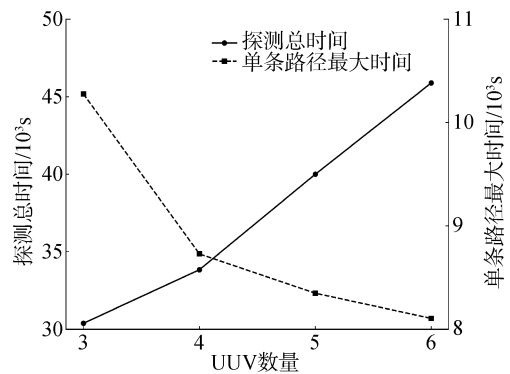
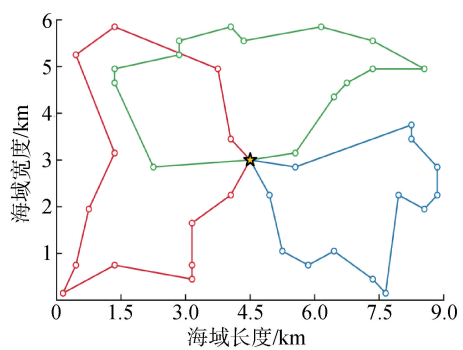
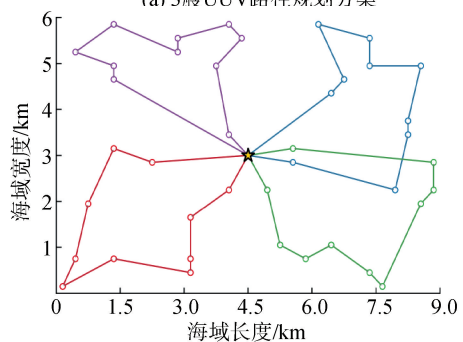


图 14 UUV 数量与探测时间关系

Fig. 14 Relationship between UUV quantity and detection time



(a) 3艘UUV路径规划方案



(b) 4艘UUV路径规划方案

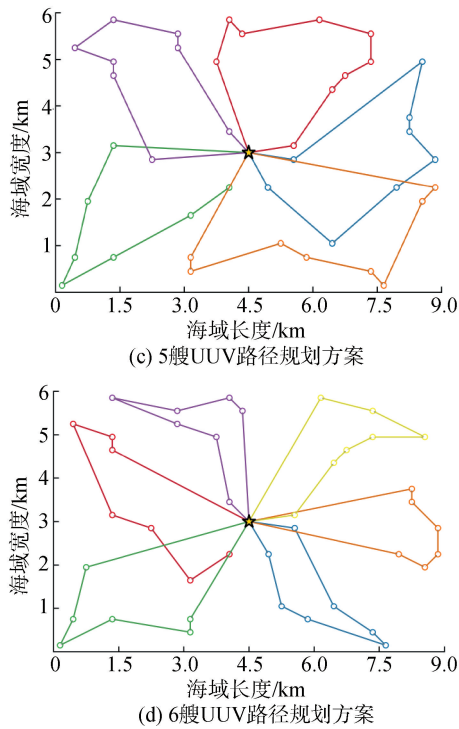


图 15 精扫路径规划结果

Fig. 15 Fine-sweeping path planning results

图 15 可知,随着 UUV 数量增加,在通信带宽的限制下,探测的总时间逐步增长,但是更多的 UUV 分配探测任务,减轻了单个 UUV 的探测压力,单条路径最大探测时间呈非线性减小,即总任务完成时间逐步减小,需根据后续边际效益分析,选择合适的探测方案。

分析数据可知,4 个 UUV 方案以最小成本增幅(总距离+4.6%)换取最大效率提升(单个 UUV 平均耗时-16.5%),是性价比拐点。继续增加 UUV 会导致“效率提升锐减但成本激增”边际效益递减现象。5 个 UUV 时单个 UUV 平均耗时虽然减小 5.4%,但是总耗时激增 18.2%,总距离暴增 21.5%。

边际效益量化为单位距离探测效率提升率  $k$  为:

$$k = \Delta T_{\text{average}} / \Delta D \quad (18)$$

边际效益分析如图 16,可见使用 4 艘 UUV 可以在增加单位航行距离时,单 UUV 平均时间节省最多,总距离仅增加 2 311 m,约 4.6%,远低于 5 艘方案的+21.5%增幅,避免了资源浪费,缓解了单机负载压力,任务均衡性更好。实际部署时,4 艘 UUV 既能避免集群规模过大导致的协同复杂度上升,又能充分利用母船通信资源。

### 3.3 精扫阶段带宽变化对探测效率的影响

在水声通信中,带宽是制约 UUV 航速与数据传输的关键因素。依据上节中方案选择 4 艘 UUV 时的性价比最高,是保证高效探测的同时又经济的选择,在此方案的基础上将通信带宽从 3 kHz 逐步提

升至 6 kHz 分析通信带宽对于探测效率的影响。

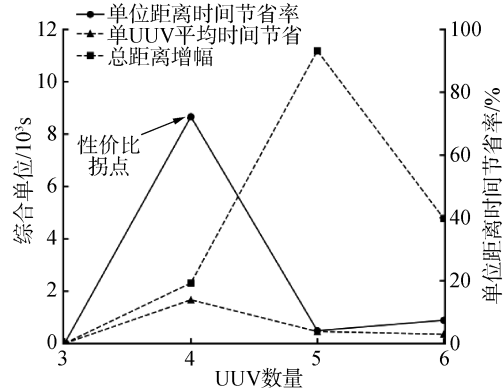


图 16 UUV 数量增加的边际效益分析

Fig. 16 Marginal benefit analysis of increasing UUV fleet size

实验数据显示,如表 2 所示,随着带宽从 3 kHz 增加到 6 kHz,探测总时间从 43 786 s 减少到 31 994 s,呈现明显的下降趋势,表明更高的带宽可以显著缩短探测总时间。单条路径最大时间从 11 137 s (3 kHz)减少到 8 197 s(6 kHz),单个 UUV 平均探测时间从 10 947 s(3 kHz)减少到 8 000 s(6 kHz),说明提高带宽可以优化单条路径和单个 UUV 的探测效率。而路径总距离在不同带宽下波动较小,表明带宽对路径规划的影响有限,因此 4 艘 UUV 不同带宽下的探测路径规划结果同上一节基本一致。

表 2 通信总带宽对探测效率的影响

Table 2 Detection efficiency under different cluster schemes

总带宽/ kHz	探测总 时间/s	单条路径 最大时间/s	单个 UUV 平均时间/s	航程/ m
3	43 787	11 137	10 947	51 531
4	37 621	10 009	9 405	53 382
5	34 240	8 721	8 560	53 797
6	31 994	8 197	8 000	54 128

### 3.4 精扫阶段超大面积海域的扩展性验证

为验证算法在大规模海域中的适应性,本节将海域面积从 41 km<sup>2</sup> 逐渐向外扩展至 102 km<sup>2</sup>,测试总航行时间、单 UUV 平均耗时及路径规划效率的变化。取 5 组面积值及探测结果如表 3 所示。

表 3 不同海域面积下的探测结果

Table 3 Detection results under different maritime areas

面积/ km <sup>2</sup>	探测总时 间/s	单条路径 最大时间/s	单个 UUV 平均时间/s	航程/ m
41	28 825	7 714	7 206	47 403
54	33 835	8 729	8 459	52 104
68	36 102	9 319	9 025	65 913
84	38 685	10 192	9 671	71 053
102	40 442	10 367	10 110	73 510

总航行时间随海域面积增大而单调递增,如图 17 所示,但增幅逐渐放缓。说明规模效应存在:更

大面积下,UUV 路径规划可能更优化,资源利用率提升。单 UUV 平均耗时随面积增大线性增加,但增速低于面积增速,最大单条时间与平均时间的差值稳定在 10%至 15%,表明任务分配较均衡,未因面积增大而显著恶化。

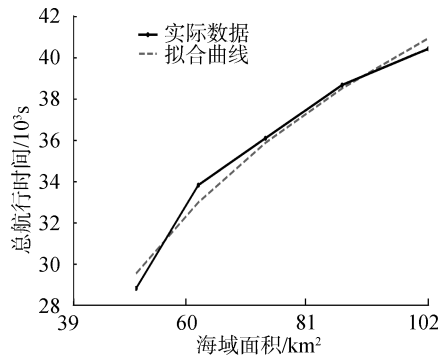


图 17 总航行时间随海域面积变化情况

Fig. 17 Mission duration scaling with sea area coverage

当海域面积从  $41 \text{ km}^2$  增加到  $102 \text{ km}^2$  时,单位面积耗时从  $703 \text{ s}$  降至  $396 \text{ s}$ ,耗时减少 43.7%,效率显著提升。说明集群在大规模的海域下,UUV 利用率更高。以  $102 \text{ km}^2$  为例,路径规划结果如图 18 所示,其中 UUV1 耗时  $10\,333 \text{ s}$ ,UUV2 耗时  $10\,741 \text{ s}$ ,UUV3 耗时  $10\,826 \text{ s}$ ,UUV4 耗时  $10\,549 \text{ s}$ ,标准差约 3 min。结果表明,自适应大邻域算法通过动态调整探测顺序与任务分配,显著降低了 UUV 的冗余路径,在超大规模场景下仍能维持任务均衡性与全局优化能力,具备良好的工程适用性。

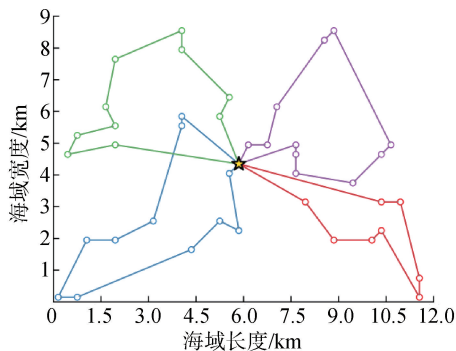


图 18 大面积海域路径规划结果

Fig. 18 Path planning results for large-scale ocean areas

## 4 结论

1) 本文提出的“粗扫全覆盖+精扫路径规划”两阶段方法,通过动态调节 UUV 航速,实现了水中复杂通信环境下探测效率的显著提升。粗扫阶段采用栅格化区域划分与自适应航速控制,实现了海域快速覆盖与可疑目标定位;精扫阶段结合改进的自适应大邻域算法与容量限制的 UUV 路径规划模型,规划海域中可疑区域的高分辨率复核路径,实现探测时间最小。

2) UUV 集群规模存在经济性拐点。在带宽为  $5 \text{ kHz}$ 、海域面积  $54 \text{ km}^2$  的场景下,4 艘 UUV 的综合探测效率最优,总时间减少 36%,航行距离仅增加 4.6%,既能缓解单机通信负载压力,又可避免资源浪费。此外,通信带宽从  $3 \text{ kHz}$  提升至  $6 \text{ kHz}$  使总探测时间缩短 27%,验证了带宽资源对任务效率的关键影响。

3) 在超大规模海域中,改进 ALNS 算法通过动态任务分配与局部搜索机制,将单 UUV 平均耗时标准差控制在 5 min 内,实现探测效率最优化和负载的均衡性。

4) 本文为水中复杂通信环境下 UUV 集群协同作业提供了可量化的决策框架,支持动态生成探测方案,为实际水雷排查任务提供可行的解决思路。

## 参考文献:

- [1] 陈昭,丁一杰,张治强. 无人潜航器发展历程及运用优势研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(23): 98-102.  
CHEN Zhao, DING Yijie, ZHANG Zhiqiang. Research on the development history and application advantages of unmanned underwater vehicle[J]. Ship science and technology, 2024, 46(23): 98-102.
- [2] 殷虎,石磊鑫. 多 UUV 集群协同作业技术研究现状及发展趋势分析[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(2): 4-9.  
YIN Hu, SHI Leixin. Research status and development trend of multi-UUV cluster collaborative work technology [J]. Ship electronic engineering, 2024, 44(2): 4-9.
- [3] 张宝库. 海洋环境下 UUV 协同任务规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
ZHANG Jianku. Research on UUV collaborative task planning method in marine environment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [4] LE THI H A, NGUYEN D M, PHAM DINH T. A DC programming approach for planning a multisensor multizone search for a target[J]. Computers & operations research, 2014, 41: 231-239.
- [5] 张汝波,李建军,杨玉. 基于改进蚁群算法的 AUV 航路避障任务规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(S1): 428-430.  
ZHANG Rubo, LI Jianjun, YANG Yu. AUV route planning study for obstacle avoidance task based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2015, 43(S1): 428-430.
- [6] WU Lian, LI Yiping, LIU Jian. Based on improved bio-inspired model for path planning by multi-AUV [C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology. New York: ACM, 2018: 123-135.
- [7] YAN Zheping, LI Jiyun, WU Yi, et al. A real-time path planning algorithm for AUV in unknown underwater environment based on combining PSO and waypoint guidance [J]. Sensors, 2019, 19(1): 20.
- [8] SOLARI F J, ROZENFELD A F, VILLAR S A, et al. Ar-

- tificial potential fields for the obstacles avoidance system of an AUV using a mechanical scanning sonar[C]//2016 3rd IEEE/OES South American International Symposium on Oceanic Engineering (SAISOE). Piscataway, NJ, 2016: 1-6.
- [9] HU X, CAO Z, CHEN Y. Dynamic task assignment and path optimization for multi-AUVs system[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 26[2025-07-24]
- [10] 孙伟昌, 罗志浩, 石建迈, 等. 无人机覆盖路径规划方法综述[J/OL]. 控制理论与应用, 2024: 1-21. (2024-12-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20241130.0849.004.html>.  
SUN Weichang, LUO Zhihao, SHI Jianmai, et al. Overview of UAV coverage path planning methods [J/OL]. Control theory & applications, 2024: 1-21. (2024-12-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20241130.0849.004.html>.
- [11] 严浙平, 刘祥玲. 多 UUV 协调控制技术现状及发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 226-231.  
YAN Zheping, LIU Xiangling. Research status and development trend of multi-UUV coordinated control technology: a review[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2019, 27(3): 226-231.
- [12] ZHAO Zhenyi, HU Qiao, FENG Haobo, et al. A cooperative hunting method for multi-AUV swarm in underwater weak information environment with obstacles[J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(9): 1266.
- [13] YAN Zheping, ZHANG Chao, TIAN Weida, et al. Formation trajectory tracking control of discrete-time multi-AUV in a weak communication environment[J]. Ocean engineering, 2022, 245: 110495.
- [14] 王晗. 基于互补码键控的水声通信关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2020.  
WANG Han. Study on the Key Techniques of Underwater Acoustic Communication based on Complementary Code Keying[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [15] KILFOYLE D B, BAGGERER A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 25. 1(2000): 4-27.
- [16] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. Transportation science, 2006, 40(4): 455-472.

### 本文引用格式:

- 徐明华, 金建钢, 王斌. 水声通信多约束下水下无人飞行器集群路径规划策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1583-1592.  
XU Minghua, JIN Jiangang, WANG Bin. Path planning for underwater unmanned vehicle cluster mine detection in weak communication environments [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1583-1592.