

【引用格式】吴楚, 鲁辛凯, 周河宇, 等. 面向多区域高效搜索的 UUV 集群任务分配[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 164-169.

## 面向多区域高效搜索的 UUV 集群任务分配

吴楚<sup>1,3</sup>, 鲁辛凯<sup>1,2,3,\*</sup>, 周河宇<sup>1,3</sup>, 曾令东<sup>1,3</sup>, 吴小涛<sup>1,3</sup>

- 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
- 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074;
- 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

**摘要** UUV 集群在执行大范围搜索任务时分配方案的优劣对于提高任务执行效率至关重要。研究解决 UUV 集群同时进行多区域搜索中的任务分配问题, 使得全部区域搜索完成时长最小。针对传统匈牙利算法无法高效解决不平衡任务分配的问题, 提出一种改进匈牙利多轮分配算法。该算法通过多轮任务分配, 实现空闲 UUV 高效利用和目标区域合理分配, 通过在代价函数中引入边际代价和保守估计时长, 大大减小了全部区域搜索完成时长。仿真实验结果表明: 提出的算法相比传统匈牙利算法能够合理分配空闲 UUV, 提高分配效率。此外, 相较于仅采用搜索时长为代价函数, 在代价函数中引入边际代价和保守估计时长能够针对耗时长的区域最大限度缩短搜索时长, 保证随着 UUV 数量的增加, 全部区域搜索完成时长单调递减。

**关键词** UUV; 任务分配; 匈牙利算法; 区域搜索

中图分类号 TP181

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)02-0164-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.004

### UUV Swarm Task Allocation for Efficient Multi-area Searching

WU Chu<sup>1,3</sup>, LU Xinkai<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHOU Heyu<sup>1,3</sup>, ZENG Lingdong<sup>1,3</sup>, WU Xiaotao<sup>1,3</sup>

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China; 2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

**Abstract** Task allocation is crucial to improve the efficiency when UUV performs large-scale searching tasks. In this paper, task allocation problem of UUV swarm in multi-area searching is solved to minimized the completion time of area searching. Aiming at the problem that the traditional Hungarian algorithm cannot solve the problem of unbalanced task allocation, an improved Hungarian multi-round allocation algorithm is proposed. This algorithm achieves efficient utilization of idle UUVs and reasonable allocation of target areas through multi-round task allocation. By introducing marginal cost and conservative estimated time in the cost function, the completion time of area searching is greatly reduced. Simulation results show that the algorithm proposed in this article can be used to allocate idle UUVs and improve allocation efficiency compared with the traditional Hungarian algorithm. In addition, compared with the algorithm only using the search time as the cost function, our algorithm can shorten search time as much as possible for long-time-consuming areas, ensuring that the completion time of area searching decreases monotonically as the number of UUVs increases.

收稿日期: 2023-12-20

作者简介: 吴楚 (1994-), 男, 博士, 主要从事无人系统集群控制、任务规划和分布式优化研究。

\*通信作者: 鲁辛凯 (1982-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事目标探测识别、无人系统集群等研究。

**Key words** UUV; task allocation; Hungarian algorithm; area searching

## 0 引言

为了满足国家战略利益空间拓展、国防安全 and 提升经济实力的需要, 世界各国正在大力发展和完善水上无人作战系统的建设发展。水下无人潜航器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 具有能在危险环境下长时间执行任务、避免人员伤亡等诸多优点, 成为近年来研究的热点并被应用到实战中<sup>[1]</sup>。由于单个 UUV 受到巡航时间、载荷数量以及种类等方面制约, 往往需要多个 UUV 采用以水声通讯为主的信息交互方式, 提高其环境感知、目标探测和定位的能力, 以协同方式完成反潜作战、雷区搜索、区域巡逻等多种作战任务<sup>[2]</sup>。实际作战中, 多 UUV 平台通过母船携带并投放, 下水后形成 UUV 集群进行自主组网控制, 远离母船执行任务, 保障母船安全<sup>[3]</sup>。当面临大范围多区域搜索任务时, 多 UUV 平台有很大优势, 可以实现对海域范围内全部目标区域的有效覆盖, 通过任务分配高效搜索区域内的目标信息。此时, 针对目标区域面积、UUV 数量以及巡航速度等因素, 如何针对任务目标优化 UUV 分配方案, 对于提高任务执行效率至关重要<sup>[4-5]</sup>。

现阶段, 常用的任务分配算法主要有 2 类: 一类是确定性解析算法, 主要为整数规划法, 如匈牙利算法; 另一类是启发式智能算法, 如遗传算法<sup>[6]</sup>、粒子群算法<sup>[7]</sup>、模拟退火算法<sup>[8]</sup>等。启发式算法的优势在于能够较快求解大规模的任务分配问题, 但是不能保证得到最优解, 且算法相对复杂, 在工程中应用并不多。匈牙利算法<sup>[9]</sup>作为整数规划法中最常用的方法, 具有步骤简单、保证最优解、易于实现的特点, 被广泛用于解决中小规模的指派问题。然而, 匈牙利算法存在一定的局限性, 仅能处理常见的一对一任务分配问题, 无法处理搜索任务中常见的多 UUV 搜索同一目标区域场景, 即不平衡任务分配问题。

杜金玲等<sup>[10]</sup>在剖析匈牙利算法的基础上, 提出“加边补零法”对匈牙利算法进行了改进, 通过在代价矩阵中填充虚拟任务, 将不平衡任务分配问题转化为标准任务分配问题。马晓娜<sup>[11]</sup>提出了差额法,

利用差额矩阵直接求解不平衡任务分配问题, 无需对代价矩阵进行修改, 更加简洁直观。霍一鸣<sup>[12]</sup>提出一种预分配结合匈牙利算法, 通过贪心算法预先对机器人或任务进行分配, 分解简化代价矩阵之后再用匈牙利算法求解。任金霞等<sup>[13]</sup>提出一种快速降阶优化算法, 通过循环过程不断将代价矩阵拆分成更小规模方阵, 解决不平衡问题的同时保证了效率。马云红等<sup>[14]</sup>提出一种快速剪枝优化算法, 大大提高了大规模任务分配时的运算效率。

虽然前述文献通过填充虚拟任务、预分配等方法对匈牙利算法进行改进以解决不平衡任务分配, 但是归根结底是对代价矩阵进行人为的升降阶, 此过程会导致分配给虚拟任务的 UUV 处于空闲状态, 降低了搜索效率, 造成资源的浪费。因此, 需要对算法进行改进, 对可分配的 UUV 进行有效利用, 使其能更高效地解决区域搜索任务分配问题。

## 1 UUV 集群区域搜索任务分配

### 1.1 问题描述

UUV 集群区域搜索任务分配问题可以描述为: 在某一片水下区域内分布着可能存在水下目标的任务区域集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 现需要对 UUV 集群  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  进行任务分配, 使其协同完成任务集合中所有区域的搜索任务。为了提高搜索效率, 本文考虑 UUV 集群同时出发去搜索多个任务区域, 且允许多个 UUV 搜索同一个任务区域。本文目标为寻找一种分配方案, 使得全部区域搜索完成时长最小。定义 UUV  $r_i$  分配搜索任务区域  $a_j$  的代价函数为  $C_{ij}$ , 则任务分配问题的数学模型如下。

$$\min_{x_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ij} x_{ij}$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $x_{ij}$  表示 UUV  $r_i$  是否分配搜索任务区域  $t_j$ , 1 为分配, 0 为未分配, 公式 (1) 表示每个 UUV 能且只能分配搜索 1 个任务区域。可以看出, 公式 (2) 表示每个任务区域至少分配 1 个 UUV 进行搜索, 表示本文研究的问题是不平衡任务分配问题。为保证所有任务区域都能被搜索, 本文假设 UUV 数量大于等于任务区域数量, 即  $m \geq n$ 。

当 UUV 数量小于任务区域数量(即  $m < n$ ) 时, 本文算法和传统匈牙利算法一样, 可以通过填充虚拟 UUV<sup>[15]</sup> 等方式进行求解。由于仅需一轮计算即可完成分配, 本文算法和传统匈牙利算法求解的分配结果一致, 故后续仅讨论  $m \geq n$  的情况。

## 1.2 区域搜索策略及时长计算

UUV 在执行搜索任务时, 一般根据作业任务、地形具备不同的航行状态, 本文主要考虑 UUV 航行过程中的纵向运动和转向运动<sup>[16-17]</sup>。在此前提下, 多 UUV 系统进行路径搜索时, 需要采取一定的协同搜索策略来实现整个编队的路径规划, 主要包括分区协同和平行协同 2 种方式。相较于分区协同, 平行协同可以避免出现连续转弯和搜索路径出现空隙, 搜索效率和路径覆盖率更高<sup>[18]</sup>。因此, 本文考虑 UUV 搜索时以纵向巡航速度  $v$  运动, 并采用平行协同搜索策略。

对于 UUV  $r_i$  搜索区域  $a_j$  的情况, 假设 UUV  $r_i$  与区域  $a_j$  之间的距离为  $d_{ij}$ , 区域  $a_j$  的面积为  $S_j$ , UUV 前向声呐探测宽度为  $w$ , 则 UUV  $r_i$  分配区域  $a_j$  的搜索时长为

$$T_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} + \frac{S_j}{wv} \quad (4)$$

式中:  $d_{ij}/v$  为 UUV  $r_i$  从起始点到区域  $a_j$  的航行时长;  $S_j/(wv)$  为 UUV  $r_i$  对区域  $a_j$  执行搜索任务的任务时长。而针对平行协同搜索策略, 当 UUV  $r_i$  与多个 UUV 同时搜索区域  $a_j$  时, 航行时长应取决于最远距离的 UUV, 任务执行时长也与 UUV 总数量相关, 区域搜索时长可表示为

$$T_{ij} = \max \left\{ \frac{d_{ij}}{v}, \frac{d_{j\max}}{v} \right\} + \frac{S_j}{k w v} \quad (5)$$

式中:  $d_{j\max}$  为除 UUV  $r_i$  之外其他 UUV 与区域  $a_j$  之间的最远距离;  $k$  为搜索区域  $a_j$  的 UUV 总数量。

## 2 改进匈牙利多轮分配算法

为了最小化所有区域搜索完成所需时间, 考虑前述区域搜索时长作为代价函数, 本文改进了传统的匈牙利算法以解决 UUV 和任务数量不平衡情况下的高效分配问题。针对 UUV 集群进行多轮任务分配, 尽可能高效利用空闲 UUV, 保证每个区域都有合适数量的 UUV 进行搜索。由于全部区域搜索完成时长取决于所有区域中最长搜索时长, 且不同轮次各个区域 UUV 的数量和分配情况不同, 本文进一步引入边际代价和保守估计时长对代价函数进行重新设计, 以保证全部区域搜索完成时长最小化。

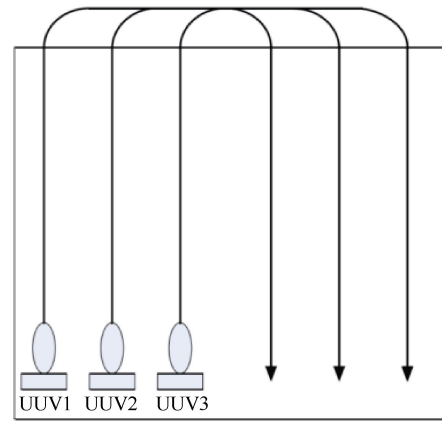


图 1 平行协同搜索

Fig 1 Parallel cooperative searching

### 2.1 多轮分配代价函数设计

定义第  $k$  轮 UUV  $r_i(k)$  分配搜索区域  $a_j$  的代价函数为  $C_{ij}(k)$ , 轮次结束后所得区域搜索时长集合为  $T_A(k) = \{t_1(k), \dots, t_n(k)\}$ 。对于第 1 轮分配, 即当  $k=1$  时, 代价函数设计为式 (4) 中的搜索时长, 即

$$C_{ij}(k) = T_{ij}(k) = \frac{d_{ij}(k)}{v} + \frac{S_j}{wv}。$$

此后每轮同一区域分配 UUV 的数量发生变化, 需重新计算代价函数和搜索时长。对于第  $k$  轮分配, 本文将代价函数  $C_{ij}(k)$  设计为  $\Delta T_{ij}(k)$  和  $D_{ij}(k)$  两部分的加权和组成。

$\Delta T_{ij}(k)$  为第  $k$  轮区域搜索时长减去第  $k-1$  轮区域搜索时长, 即  $\Delta T_{ij}(k) = T_{ij}(k) - T_{ij}(k-1)$ 。该代价相当于经济学中的边际代价<sup>[19]</sup>, 代表区域搜索中新增 1

个 UUV 减少的时长。一般来说,  $\Delta T_{ij}(k) < 0$ , 多轮分配后若  $\Delta T_{ij}(k) > 0$ , 则说明该区域分配 UUV 达到饱和, 新增 UUV 后搜索时长不减反增, 此时不再对该区域分配 UUV。对于平行协同搜索策略, 多个 UUV 分配到一个任务区域, 区域搜索时长参考式 (5) 计算得到

$$T_{ij}(k) = \max \left\{ \frac{d_{ij}(k)}{v}, \frac{d_{j\max}(k-1)}{v} \right\} + \frac{S_j}{kvw}$$

式中,  $d_{j\max}(k-1)$  为前  $k-1$  轮中所分配 UUV 到区域  $a_j$  的最远距离。

$D_{ij}(k)$  为第  $k$  轮区域  $a_j$  搜索时长  $T_{ij}(k)$  与第  $k-1$  轮所得除区域  $a_j$  外其他区域最长搜索时长  $\max_{-j}(T_A(k-1))$  相比的较大值, 即

$$D_{ij}(k) = \max \left\{ T_{ij}(k), \max_{-j}(T_A(k-1)) \right\}$$

该代价表示保守估计下全部区域搜索完成的时长。综上所述, 当  $k > 1$  时, 代价函数为

$$C_{ij}(k) = \lambda_T \Delta T_{ij}(k) + \lambda_D D_{ij}(k) \quad (6)$$

式中,  $\lambda_T$ 、 $\lambda_D$  为加权系数。

## 2.2 改进匈牙利多轮分配算法步骤

结合上节提出的多轮分配代价函数, 给出改进匈牙利多轮分配算法步骤如下:

1) 首轮每个区域分配 1 个 UUV, 以搜索时长为代价函数, 即式 (4), 保证初始时长最短;

2) 之后每一轮对空闲 UUV 进行一次分配, 以边际代价和保守估计时长的加权和为代价函数, 即式 (6), 前者保证下一轮各区域新分配 UUV 能够最大程度缩短搜索时长, 后者保证被缩短时长的区域是耗时较长的区域, 两者结合使得所有区域中最长搜索时长有效缩短;

3) 每一轮分配完成后, 从 UUV 集合  $R$  中移除已分配 UUV。若任务区域集合  $A$  中存在边际代价大于 0 的区域, 即饱和区域, 则从集合  $A$  中移除该区域, 并将本轮分配到该区域的 UUV 放回 UUV 集合  $R$  中;

4) 重复步骤 2 和 3, 直到任务区域集合  $A$  或者 UUV 集合  $R$  为空。

其中, 步骤 2 保证了每一轮都针对耗时较长的区域最大限度地缩短搜索时长, 步骤 3 则通过移除饱和区域和已分配 UUV, 达到代价矩阵快速降阶的目的,

减少后续轮数分配的计算负担。

改进匈牙利多轮分配伪代码见算法 1。

算法 1 改进匈牙利多轮分配算法  
Alg. 1 Improved Hungarian multi-round allocation algorithm

```

输入: 任务区域集合  $A$ , UUV 集合  $R$ ;
输出: 分配集合  $P_1, \dots, P_n$ , 搜索时长  $T_A = \{t_1, \dots, t_n\}$ ;
1: 初始化轮次  $k=1$ ,  $d_{j\max} = 0$ ;
2: while  $R \neq \emptyset$  且  $A \neq \emptyset$ ;
3:   for  $i$  从 1 到  $m$ ,  $j$  从 1 到  $n$ ;
4:     if  $k == 1$ ;
5:       按式 (4) 计算  $C_{ij}(k)$ ;
6:     else
7:       按式 (6) 计算  $C_{ij}(k)$ ;
8:     end if
9:   end for
10:  由  $C_{ij}(k)$  匈牙利分配得到  $\{p_1(k), \dots, p_n(k)\}$ ;
11:  for  $p_j(k)$  从 1 到  $n$ ;
12:    if  $k > 1$  且  $p_j(k) > 0$  且  $\Delta T_{p_j(k)j}(k) > 0$ ;
13:      标记  $p_j(k)$ ;
14:    end if
15:    if  $p_j(k) > 0$  且  $p_j(k)$  未标记;
16:       $P_j$  中增加分配编号  $p_j(k) \in P_j$ ;
17:      更新  $d_{j\max} = \max\{d_{p_j(k)j}, d_{j\max}\}$ ;
18:      更新  $t_j = T_{p_j(k)j}(k) \in T_A(k)$ ;
19:      计算  $\max_{-j}(T_A(k))$ ;
20:    end if
21:     $A = A / \{a_j \mid p_j(k) == -1\}$ ;
22:     $R = R / \{r_{p_j(k)} \mid p_j(k) > 0\}$ ;
23:  end for
24:   $k = k + 1$ ;
25: end while

```

由于本文采用多轮分配算法, 故对于任务区域数量变化的情况也可以进行实时求解。只需在算法 1 每一轮分配过程中增加或减少任务区域集合  $A$  中的元素, 并将新增的任务区域视为未饱和区域, 将减少的任务区域中分配的 UUV 视为未分配 UUV, 即可按照算法 1 的给定步骤进行分配。

### 3 仿真验证

本节采用改进匈牙利多轮分配算法，在 PC 机上基于 MATLAB 进行仿真实验。实验设定一个 40 n mile×20 n mile 的长方形海域中存在水下目标，并以长方形的中心为原点构建直角坐标系。实验中用到 7 个 UUV 分布在中心为 (-1, 0.5) 的 1 n mile×1 n mile 正方形母港区域内，UUV 的航速为 8 kn，所有 UUV 初始位置在母港区域随机生成。可能存在水下目标的待搜索任务区域为 5 个面积不同的正方形，随机分布在长方形海域中，面积从编号 1-5 分别为 1.44 n mile<sup>2</sup>、2.25 n mile<sup>2</sup>、1 n mile<sup>2</sup>、4 n mile<sup>2</sup>、1.44 n mile<sup>2</sup>。想定场景如图 2 所示。

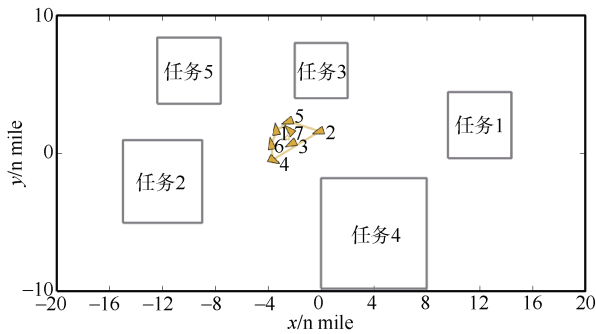


图 2 任务分配想定场景  
Fig. 2 Task allocation scenario

针对想定场景，将传统匈牙利分配算法、代价为搜索时长（即式（4））的多轮分配算法和本文所提改进匈牙利多轮分配算法进行对比，分别计算分配结果和全部区域搜索完成时长。具体的分配结果如表 1 所示。

表 1 分配结果  
Table 1 Task allocation results

算法	任务 1	任务 2	任务 3	任务 4	任务 5	全部区域搜索完成时长/h
传统匈牙利分配	2	4	5	3	1	1.812 1
代价为搜索时长的多轮分配	2	4	5, 7	3	1, 6	1.812 1
改进匈牙利多轮分配	2	4, 6	5	3, 7	1	1.235 0

从表 1 中可以看出，传统匈牙利算法分配之后，编号 1、2、3、4、5 的 UUV 各自分配一个区域并保证该区域搜索时长最短，但由于只支持一对

一分配，编号 6、7 的 UUV 处于空闲状态，造成资源的浪费。代价为搜索时长的多轮分配算法试图利用空闲 UUV 减少区域搜索时长，将编号 6、7 的 UUV 在次轮分配给了任务 5、3。然而，式（4）只是计算 UUV 自身对区域的搜索时长，次轮分配后仅减少任务 5、3 的搜索时长。由于全部区域搜索完成时长取决于搜索最慢的任务区域，故全部区域搜索完成时长并未减少。本文所提改进匈牙利多轮分配算法则通过在式（6）中引入边际代价和保守估计时长作为代价函数，将编号 6、7 的 UUV 分别分配给了上一轮耗时最长的 2 个任务，即任务 2、4，有效地缩短了全部区域搜索完成时长。

接下来，本文继续分析 3 种分配算法搜索时长随 UUV 数量增加产生的变化。实验随机在母港区域生成一定数量的 UUV，利用 3 种分配算法分别计算全部区域搜索完成时长进行对比。UUV 数量由 5 个开始，每次递增 4 个，直到数量为 65 个，得到 16 组数据，如图 3 所示。可以看出，当 UUV 数量足够多时，代价为搜索时长的多轮分配算法在一定程度上也能缩短全部区域搜索完成时长，但整体效果不如本文所提改进匈牙利多轮分配算法。此外，由于没有利用边际代价计算区域分配 UUV 是否达到饱和，代价为搜索时长的多轮分配算法在 UUV 数量超过 37 之后，全部区域搜索完成时长不减反升，说明新分配的 UUV 距离区域太远，反而增加了搜索时长。而本文所提改进匈牙利多轮分配算法中，全部区域搜索完成时长随着 UUV 数量增加呈单调减少趋势，证明了该算法的优越性。

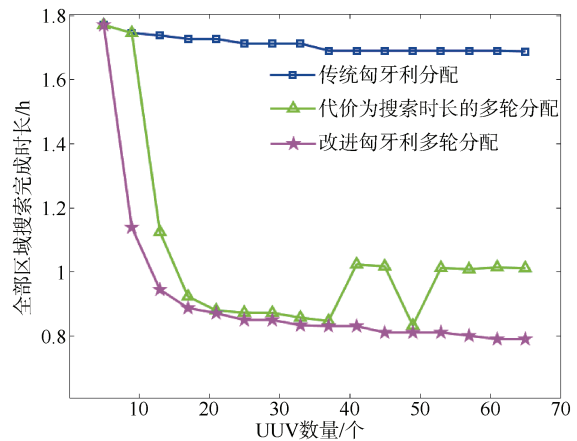


图 3 搜索时长随 UUV 数量增加的变化趋势  
Fig. 3 Trend of search time as number of UUVs increases

## 4 结束语

为了提升UUV集群在执行大范围雷区搜索任务时任务分配的方案质量,实现全部区域搜索完成时长最小化,针对传统匈牙利分配算法难以高效求解UUV和任务数量不平衡情况的问题,提出一种改进匈牙利多轮分配算法。一方面,通过多轮分配对空闲UUV进行合理利用,保证各个区域分配合适数量的UUV;另一方面,引入边际代价和保守估计时长对代价函数进行重新设计,有效针对耗时较长的区域最大限度地缩短搜索时长。为了验证方法的可行性和优越性,利用MATLAB进行UUV任务分配仿真,并针对同一场景分别与传统匈牙利算法和仅采用搜索时长为代价函数的多轮分配算法对比仿真。结果表明:本文所提算法能够更高效求解不平衡多UUV任务分配的问题,提高UUV系统的资源利用率,减少全部区域搜索完成时长。

## 参考文献

- [1] 杜方键,张永峰,张志正,等.水下无人作战平台发展现状与趋势分析[J].科技创新与应用,2019(27):6-10.
- [2] 刘梦雄.多UUV搜深水下目标的自主任务规划与分配方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [3] 陶伟,张晓霜.国外水下无人集群应用及关键技术研究[J].舰船电子工程,2021,41(2):9-13.
- [4] 彭汉国,马良,杨伟,等.基于协同作战信息质量的战场态势认知模型[J].兵器装备工程学报,2013,34(11):99-102.
- [5] 严浙平,刘祥玲.多UUV协调控制技术的研究现状及发展趋势[J].水下无人系统学报,2019,27(3):226-231.
- [6] JIA Z Y, YU J Q, AI X L, et al. Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and

time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 112-125.

- [7] JOSE K, PRATIHAR D K. Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 80(C): 34-42.
- [8] 李冰,徐杰,杜文.用模拟退火算法求解有顺序约束指派问题[J].系统工程理论方法应用,2002,11(4):330-335.
- [9] 范梦情.基于多机器人的任务分配协作研究[D].杭州:浙江理工大学,2022.
- [10] 杜金玲,周杰.关于几种不平衡指派问题的修正匈牙利解法[J].价值工程,2010,29(13):120-122.
- [11] 马晓娜.“人少任务多”型指派问题的一种新算法[J].重庆工商大学学报:自然科学版,2014,31(12):68-71.
- [12] 霍一鸣.多机器人系统的智能任务分配方法[D].南京:南京理工大学,2020.
- [13] 任金霞,何富江.快速降阶匈牙利算法的云计算任务分配模型[J].江西理工大学学报,2014,35(3):63-67.
- [14] 马云红,井哲,周德云.一种任务分配问题的快速剪枝方法[J].西北工业大学学报,2013,31(1):40-43.
- [15] 韦小梅.AGV调度系统高效任务分配算法研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [16] 周佳加.基于扁平UUV动力学模型的导航定位与路径跟随控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [17] 万闯.多UUV编队队形动态重构方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [18] 周安琪.多UUV/USV路径规划及协同编队控制[D].南京:南京理工大学,2021.
- [19] 姜大鹏.多水下无人机器人协调控制技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

(责任编辑:肖楚楚)