

【引用格式】齐嘉慧, 崔培, 姜楷娜, 等. 一种 UUV 集群抵近目标侦测决策效率评估方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 231-235.

一种 UUV 集群抵近目标侦测决策效率评估方法研究

齐嘉慧, 崔培, 姜楷娜, 吕俊军

(大连测控技术研究所 舰船非声特性研究室, 辽宁 大连 116013)

摘要 为实现对不同 UUV 集群自主抵近目标侦测任务中决策效率的评估, 分析了被测目标采取不同策略时 UUV 集群决策灵活度, 提出了评估 UUV 集群决策效率的 5 个指标: 任务准备时间、目标停车集群响应时间、目标转向集群响应时间、目标旋回集群响应时间和目标加速集群响应时间, 并建立了评估指标体系。参考已有试验测试结果, 基于字典序法对 5 种类型的 UUV 集群决策效率进行综合评估, 并分析了该方法的优缺点, 为不同类型 UUV 集群决策效率评估提供了研究思路。

关键词 UUV 集群; 自主抵近侦测; 集值迭代法; 字典序法

中图分类号 TN91

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)02-0231-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.013

Research on a Method for Evaluating Decision-making Efficiency of Target Approaching and Detection of UUV Clusters

QI Jiahui, CUI Pei, JIANG Kaina, LYU Junjun

(Ship Non-acoustic Characteristics Research Laboratory, Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013, China)

Abstract In order to evaluate the decision-making efficiency of different UUV clusters in target approaching and detection tasks, the decision-making flexibility of the UUV clusters when the measured target adopts different strategies is analyzed. Five indexes are proposed to evaluate the decision-making efficiency of UUV clusters: mission preparation time, cluster response time when the target stops, turns, turns back, and accelerates. The evaluation index system is established. Based on the existing test results, the lexicographic method is used to evaluate the decision-making efficiency of 5 types of UUV clusters, and the advantages and disadvantages of this method are analyzed, which provides research ideas for decision-making efficiency evaluation of different types of UUV clusters.

Key words UUV clusters; autonomous approaching and detection; set-valued iteration method; lexicographic method

0 引言

无人水下航行器 (UUV) 最早出现在 20 世纪 60 年代, 在发展初期, 主要用于民用领域^[1]。与水

下有人系统相比, UUV 能够代替人执行“枯燥、恶劣、危险”的任务, 且其续航能力强、机动性强、体积小、可长时间在水下执行任务。随着近年来各国对战场低死亡率的追求, UUV 在各国军事领域

受到了极大的重视,逐渐成为建设海洋强国必不可少的武器^[2-5]。美国、俄罗斯、日本、瑞士等发达国家已经将 UUV 作为探测海洋资源和保障海洋安全的重要手段和工具^[6],重点发展 UUV 各项技术,且成立了专门的研究实验室,如美国的海军研究实验室 NRL、日本东京大学海洋技术研究所等。美国是 UUV 种类最全、技术最先进的国家,有大型、轻型、便携式多种类型多个系列 UUV^[7]。近年来,俄罗斯也加大在无人系统研制方面的经费投入,UUV 发展也达到世界一流水平,代表型号有“波塞冬”、“大键琴”等。欧洲国家如挪威、德国、瑞士等在 UUV 锂电池、导航等相关领域水平也处于世界前列^[8-9]。中国也加大了 UUV 的研制力度,专门成立了西北工业大学无人水下运载技术、哈尔滨工程大学水下机器人技术等专业 UUV 研发重点实验室。近年来 UUV 研制取得重大突破,2012 年,由中国科学院沈阳自动化研究所研制的自主可控无人潜水器“潜龙一号”成功诞生,是我国第 1 台自主研发的潜水器,最大工作水深可达 6 000 m,可以用于海底水文参数测量、海底微地形地貌精细探测等作业。随后,“潜龙”家族又新增了“潜龙二号”“潜龙三号”“潜龙四号”3 名新成员,而“潜龙三号”在大西洋的成功应用,标志着我国深海勘探型水下机器人步入实用化、常态化阶段。在大海深方面,天津大学研制的“海燕-X”号于 2020 年完成了水下 10 619 m 持续现场观测,哈尔滨工程大学研制的“悟空”号于 2021 年实现了 10 896 m 水深独立工作。在长期持续作业能力方面,西工大开发的仿蝠鲼水下航行器 2019 年在千米深度水下连续作业了 1 个月。在高性能方面,哈尔滨工程大学和中科院联合研制的 HSU001 号融合了侦察和监控能力,“悟空”号在水下 15 km 深度完成了高容量的可靠信息传输,“海燕”系列在极端环境下,成功执行了可靠性观测任务^[10-11]。

单体 UUV 的能力有限,UUV 集群相较于单体 UUV,具有增强的任务性能和灵活性、更高的可靠性和鲁棒性、更全面的数据收集能力。如何借助 UUV 集群协作,充分发挥 UUV 集群在探测、感知、作战等方面的优势,一直是国内外研究的热点。面

对复杂且未知的海洋环境及各种复杂的任务,UUV 集群的探测能力、协同感知能力、威胁评估能力及决策能力是实现 UUV 集群自主作业的重要保障。

准确评估 UUV 集群的各项性能,对于确定 UUV 集群的适用性及其在特定任务中的执行效率具有至关重要的意义。准确的评估可以指导选择合适的 UUV 集群配置以适应特定的海洋环境和任务需求,而且系统地评估 UUV 集群的性能对于保证其在复杂海洋任务中的有效性和可靠性也是不可或缺的^[12-14]。

随着军事运筹学及无人装备技术的发展,出现了大量对 UUV 集群性能评估的研究。陈强基于 UUV 探雷的作业任务,建立了 UUV 集群探雷效能评估模型,对 2 种形式的探雷方法进行了效能评估^[15]。董新针对多功能 UUV 任务规划的需求,开展了 UUV 执行多项水下任务时规划方法的研究,并在 UUV 任务规划系统的综合效能评估中应用了证据推理的评估方法,为方案选择及优化提供了支撑^[16]。蒋天皓利用层次分析法,对多 UUV 协同探测作业进行了效能评估^[17]。邹启明等人设计了一种适用于攻击型 UUV 的效能评估系统,可为攻击型 UUV 效能评估和辅助决策提供参考^[18]。但是,对于 UUV 集群决策性能评估的研究还未见公开。本文主要研究 UUV 集群执行自主抵近目标侦测任务时,决策性能中决策效率的评估。

决策性能包括决策效率、决策效果、决策适应性、决策稳定性等,针对不同的任务,决策性能评估指标体系复杂且具有多样性,很多指标难以量化。本文研究了 UUV 集群自主抵近目标侦测任务中,决策性能中决策效率评估的方法。本文评估 UUV 集群决策效率采用字典序法。字典序法属于多属性评估方法,评估思路与实际生活中人的决策方式很接近,适用于存在有支配作用的指标或者某些指标的重要程度优于其他指标的评估问题^[19]。

1 指标参数与测试方法

关于 UUV 集群决策方面的指标参数,初步拟定的效率参数为任务准备时间和决策灵活度。

任务准备时间是指主 UUV 由入水开始至规划路径航行深度处所需的时间。验证试验中,利用浮

标水声定位模块实时监测主 UUV 航行至任务就位点的时刻, 以此作为任务准备时间。决策灵活度是指主 UUV 根据任务执行过程中的水下态势变化, 生成新的决策以适应水下实时态势。本文以目标水下态势变化为时间起点, 将主 UUV 做出新的决策直至 UUV 集群根据新决策执行新的指令作为时间结束点, 以两者的时间差作为表征决策灵活度的参数。由此可知, 针对 UUV 集群执行的每一种任务, 决策灵活度将存在较大的差异, 对应指标参数的数量、类型和测试方法将不同。本文详述 UUV 集群自主逼近目标任务中, UUV 集群面临水下态势变化时决策效率评估方法和流程。

UUV 集群对被测目标的逼近侦测主要分为 2 种: 1) UUV 与被测目标运动能力相当, 即 UUV 可以通过加速、机动等方式实现对目标的尾随跟踪; 2) UUV 与被测目标航速差距较大, 此时 UUV 将根据估计的被测目标航线进行拦截式的“包抄”。

被测目标主要采取停车、转向、旋回、加速等航行工况, 以规避追踪或攻击。

针对被测目标航行工况改变的不同, 将 UUV 集群的决策灵活度分为目标停车集群响应时间、目标转向集群响应时间、目标旋回集群响应时间、目标加速集群响应时间 4 个指标参数。结合任务初始阶段的任务准备时间, 在 UUV 集群自主逼近目标任务中, 决策效率评估设置 5 个指标参数。利用浮标式水声定位系统监测 UUV 集群跟踪和变换路线, 依据分析结果判断 UUV 集群在面对被测目标工况改变时, 集群实施决策的响应时间。

2 决策性能测试结果

根据上述提出的指标参数和测试方法, 参考已有试验测试结果, 本文拟定的不同类型 UUV 集群决策效率参数如表 1 所示, 不同类型 UUV 集群的排水量、尺寸、航速、续航力、潜深和任务载荷不同。

表 1 自主逼近侦测任务 UUV 集群决策效率指标值

Table 1 Decision-making efficiency index for autonomous approaching and detection task of UUV clusters

集群类型	任务准备时间/s	目标停车集群响应时间/s	目标转向集群响应时间/s	目标旋回集群响应时间/s	目标加速集群响应时间/s
第 1 型	20	48	52	84	36
第 2 型	25	55	72	92	47
第 3 型	18	62	49	71	39
第 4 型	16	42	59	69	41
第 5 型	28	49	55	67	36

3 指标参数赋权

本文构建的评估指标体系是由多个指标组成的系统, 一个指标反映总体的一个方面的特征, 要想全面反映总体情况, 需要将这些指标综合考虑。所以, 在评估过程中需要对不同指标赋予不同的权重系数, 来体现各个评估指标在评估指标体系中的作用、地位等。赋予权重系数的方法主要分主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。主观赋权法根据专家或决策者的判断和经验来分配不同指标的权重系数, 易于理解和实施, 但是主观性较强; 客观赋权法基于数据, 客观性强, 但是过分依赖数据质量; 组合法整合主观经验和客观数据, 更全面, 但是实施起来更复杂。

本文构建的指标体系中的指标个数较少, 且指标之间的相关性不强, 因此本文采用主观赋权法中的集值迭代法确定指标权重, 该方法算法简单, 符合直观^[20]。集值迭代法确定指标权重的计算过程如下。

1) 选用 $L(L \geq 1)$ 位专家, 请每位专家在指标集 $X = \{X_j\} (j=1, 2, \dots, n)$ 中选取其认为最关键的 $s(1 \leq s \leq n)$ 个指标, 即第 $k(1 \leq k \leq L)$ 位专家选取的结果是指标集 X 的一个子集 $X^{(k)} = \{X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_s^{(k)}\} (k=1, 2, \dots, L)$ 。

2) 作函数 $\mu_i(j)$ 。

$$\mu_i(j) = \begin{cases} 1 & (X_j \in X^{(k)}) \\ 0 & (X_j \notin X^{(k)}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{令 } g_j = \sum_{k=1}^L \mu_k(j) \quad (j=1,2,\dots,n)。$$

3) 确定各个指标权重 w_j 。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (2)$$

本文请 5 位专家相互独立地在 5 个评估指标组成的指标集 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ 中选取自认为重要的 3 个指标构成 5 个指标子集, 依次记为 $X^{(1)} = \{X_2, X_3, X_5\}$, $X^{(2)} = \{X_1, X_2, X_5\}$, $X^{(3)} = \{X_3, X_4, X_5\}$, $X^{(4)} = \{X_2, X_3, X_5\}$, $X^{(5)} = \{X_1, X_3, X_5\}$ 。

则: 指标 X_1 被选中的次数为 $g_1 = 0 + 1 + 0 + 0 + 1 = 2$; 指标 X_2 被选中的次数为 $g_2 = 1 + 1 + 0 + 1 + 0 = 3$; 指标 X_3 被选中的次数为 $g_3 = 1 + 0 + 1 + 1 + 1 = 4$; 指标 X_4 被选中的次数为 $g_4 = 0 + 0 + 1 + 0 + 0 = 1$; 指标 X_5 被选中的次数为 $g_5 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 5$ 。

根据公式, 求得各个指标的权重为 $W = \{w_j\} = (0.1333, 0.2000, 0.2667, 0.0667, 0.3333)$ 。

4 指标参数性能评估

4.1 基础理论

字典序法属于多属性评估方法, 该方法的基本原理是在一些评估决策问题中, 存在有支配作用的指标, 即这个指标相对其他指标特别重要, 或它的优先权最高。在这种情况下, 决策者只要在此指标中进行比较, 若某个方案较其他所有方案的指标值均好, 则此方案就是最优方案, 评估过程结束。若最好的指标具有若干个, 即可以组成一个集合, 在这个集合中继续按优先权进行评估, 直至某个方案是此集合中唯一元素为止, 此方案就是最优方案。

对于决策问题, 方案集合为 $A = \{A_i\} (i=1, 2, \dots, m)$, n 个指标为 $X = \{X_j\} (j=1, 2, \dots, n)$, 指标值为 X_{ij} , 表示第 i 个方案第 j 个指标的指标值。各个指标的权系数组成集合为 $W = \{w_j\} (j=1, 2, \dots, n)$; 对于确定型决策问题, $V_j(x_{ij})$ 为指标 X_j 的分量价值函数。字典序法的计算步骤如下。

1) 构建评估矩阵 Z 。

为便于分析和评估, 构建标准化评估矩阵, 通

过按照以下准则比较各项指标的数值, 消除不同指标间不可公度性带来的影响。

对于效益型指标 x_j , 也就是指标数值越大, 对评估结果越有利, 进行如下变换:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}} \quad (3)$$

对于成本型指标 x_j , 也就是指标数值越大, 对评估结果越有害, 进行如下变换:

$$z_{ij} = \frac{\min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}{x_{ij}} \quad (4)$$

对于适中型指标 x_j , 即存在一个最理想的指标值, 若评估者最满意的值为 $a_j^\#$, 进行如下变换:

$$z_{ij} = \frac{\max\{|x_{ij} - a_j^\#| | 1 \leq i \leq n\} - |x_{ij} - a_j^\#|}{\max\{|x_{ij} - a_j^\#| | 1 \leq i \leq n\} - \min\{|x_{ij} - a_j^\#| | 1 \leq i \leq n\}} \quad (5)$$

2) 按照权重系数确定指标的重要性排序, 假设指标的重要性按降序排列, 即 X_1, X_2, \dots, X_n 。

3) 选择或建立合适的指标偏好函数。

4) 按顺序依次求解下列问题。

$$\begin{cases} P_1 : \max_{A_i \in A} V_1(x_{i1}) \\ P_2 : \max_{A_i \in A} V_2(x_{i2}) \\ \cdot \\ \cdot \\ P_k : \max_{A_i \in A} V_k(x_{ik}) \end{cases} \quad (6)$$

直到找到第 $k(1 \leq k \leq n)$ 个问题, 该问题有唯一解, 否则继续求解直到第 n 个问题 $P_n : \max_{A_i \in S_{n-1}} V_n(x_{in})$ 。

$P_1 : \max_{A_i \in A} V_1(x_{i1})$ 的含义是: 对于指标权重最高的指标 X_1 , 寻找该指标值最高的方案 (可能不止 1 个)。 S_{k-1} 是第 P_{k-1} 个问题的解集, 且 $S_{k-1} \in A$ 。

5) 重复第 4 步求解出唯一解, 并将其作为最终的选择方案。

4.2 效率评估

基于字典序法进行 UUV 集群自主抵近目标侦测任务中决策效率评估的过程如下。

1) 由表 1 得评估矩阵 Z 。由于关于决策效率的指标都是成本型指标, 利用公式 (4) 转化为标

准化评估矩阵:

$$Z^* = (z^*)_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.88 & 0.94 & 0.80 & 1.00 \\ 0.64 & 0.76 & 0.68 & 0.73 & 0.77 \\ 0.89 & 0.68 & 1.00 & 0.94 & 0.92 \\ 1.00 & 1.00 & 0.83 & 0.97 & 0.88 \\ 0.57 & 0.86 & 0.89 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2) 根据待评估问题中各个指标的特征, 专家给出的各指标权重系数为

$$W = \{w_j\} = (0.1333, 0.2000, 0.2667, 0.0667, 0.3333)$$

则各指标按重要性降序形式排列结果为 X_5, X_3, X_2, X_1, X_4 。

3) 先以属性 X_5 为依据, 在 5 种类型的 UUV 集群中选出该指标值最大的 UUV 集群类型, 即:

$P_1 = \max(1.00, 0.77, 0.92, 0.88, 1.00)$, 得到 $S_1 = \{A_1, A_5\}$, 再以 X_3 为依据, 在 $S_1 = \{A_1, A_5\}$ 中选择该指标值最大的 UUV 集群类型, 即 A_1 为决策效率最佳的 UUV 集群。

5 结束语

分析结果表明: 字典序法简单实用, 与实际生活中人的决策方式很接近, 对于不同类型的 UUV 集群, 利用字典序法进行评估, 第 1 型 UUV 集群为决策效率最优的类型。但也需要说明, 这种方法在获得系统许多有用的信息之前, 决策者必须确定指标的优先权。优先权对字典序法的解是十分敏感的。由于过分强调某个指标的重要性, 因而在一些实际问题中有时难以接受。

参考文献

- [1] 王建斌, 王志敏. UUV 发展、应用及关键技术[J]. 信息与电子工程, 2007, 5(6): 476-480.
- [2] 曹和云, 倪先胜, 何利勇, 等. 国外潜载 UUV 布放与回收技术研究综述[J]. 中国造船, 2014, 55(2): 200-208.
- [3] 熊思齐, 姚直象, 杨新友, 等. 无人水下航行器发展现状及若干关键技术探讨[C]// 中国声学学会水声学分会 2015 年学术会议论文集. 武汉: 中国声学学会水声学分会, 2015.
- [4] 金建海, 陈伟华, 张波, 等. UUV 集群技术概述[C]// 2018 年水下无人系统技术高峰论坛论文集. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2018.
- [5] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
- [6] 王雅琳, 郭佳, 刘都群. 2018 年水下无人系统发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 20-25.
- [7] DEPARTMENT OF THE NAVY. The navy unmanned undersea vehicle (UUV) master plan, ADA511748[R]. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center, 2004.
- [8] 李经. 水下无人作战系统装备现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1-5, 36.
- [9] 伍尚慧. 国外无人潜航器的发展现状与趋势分析[J]. 军事文摘, 2018(5): 18-20.
- [10] HEO J Y, KIM J H, KWON Y J. Technology development of unmanned underwater vehicles (UUVs) [J]. Journal of Computer and Communications, 2017, 5(7): 28-35.
- [11] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
- [12] 王童豪, 彭星光, 潘光, 等. 无人水下航行器的发展现状与关键技术[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(4): 52-64.
- [13] 张伟, 王乃新, 魏世琳, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
- [14] 邱志明, 马炎, 孟祥尧, 等. 水下无人装备前沿发展趋势与关键技术分析[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 1-9.
- [15] 陈强, 袁思鸣. UUV 集群探雷效能评估方法[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(12): 178-182.
- [16] 董新. 多功能 UUV 任务规划与评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [17] 蒋天皓. 多 UUV 协同作业阵位部署与效能评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [18] 邹启明, 宋书龙, 彭远鸣, 等. 攻击型 UUV 效能评估系统设计[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(5): 671-676.
- [19] 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. 评估理论和方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [20] 李德顺, 许开立, 李春晨. 基于集值迭代的多专家主观权重确定方法的研究[J]. 金属矿山, 2009, 39(9): 42-50.

(责任编辑: 曹晓霖)