[引用格式] 丁文俊, 柴亚军, 杨宇贤, 等. 基于空海异构无人平台的水下目标搜索与跟踪 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(2): 237-249.

基于空海异构无人平台的水下目标搜索与跟踪

丁文俊[1,2,3,4], 柴亚军[1], 杨宇贤[1], 刘佳敏[1], 毛昭勇[1,3,4]

(1. 西北工业大学 无人系统技术研究院, 陕西 西安, 710072; 2. 浙江西安交通大学研究院, 浙江 杭州, 311200; 3. 无人飞行器技术全国重点实验室, 陕西 西安, 710072; 4. 无人机技术集成攻关大平台, 陕西 西安, 710072)

摘 要: 海上异构无人系统可有效提高复杂任务的完成效率。文中采用自主水下航行器(AUV)和无人机(UAV)来完成近海海域内未知水下目标的搜索与跟踪任务。首先, 描述了水下目标搜索跟踪任务, 将任务过程分为目标搜索和目标跟踪阶段, 2 个阶段的目标分别是使 AUV&UAV 总搜索空间最大化以及 AUV 与水下目标的末端位置误差最小; 然后, 建立 AUV&UAV 跨域协同搜索模型, 并设定模型中 AUV 和 UAV 探测范围和通信距离等约束条件; 最后, 在跨域协同搜索与路径跟踪规划中, 基于传统粒子群算法, 加入自适应学习因子调控策略和精英保存策略, 生成搜索与跟踪路径。仿真实验表明, 采用改进粒子群优化算法的 AUV&UAV 异构无人系统能够更高效地完成水下目标搜索与跟踪任务。

关键词: 跨域无人系统; 自主水下航行器; 无人机; 改进粒子群优化算法

中图分类号: TJ630.32; U674 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-3920(2024)02-0237-13

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0037

Underwater Target Search and Tracking Based on Air-Sea Heterogeneous Unmanned Platform

DING Wenjun[1,2,3,4], *CHAI Yajun*[1], *YANG Yuxian*[1], *LIU Jiamin*[1], *MAO Zhaoyong*[1,3,4]

(1. Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Research Institute of Xi'an Jiaotong University, Hangzhou 311200, China; 3. National Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Technology, Xi'an 710072, China; 4. Integrated Research and Development Platform of Unmanned Aerial Vehicle Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: The marine heterogeneous unmanned systems can effectively enhance the implementation efficiency of complex missions. In this paper, autonomous undersea vehicles(AUVs) and unmanned aerial vehicles(UAVs) were used for searching and tracking unknown underwater targets in offshore waters. First, the underwater target search and tracking mission was described, and the mission was divided into two stages: target search and target tracking, with the objectives of maximizing the total search space of the AUV&UAV system and minimizing the end position error between the AUV and the underwater target, respectively. Then, a cross-domain collaborative search model of the AUV&UAV system was established, and constraints such as detection range and communication distance for AUVs and UAVs in the model were set. Finally, based on the traditional particle swarm optimization algorithm, an adaptive learning factor regulation strategy and an elite preservation strategy were employed for cross-domain collaborative search and tracking path planning, and search and tracking paths were generated. The simulation experiment demonstrates that the heterogeneous AUV&UAV system based on an improved particle swarm optimization algorithm can more efficiently search and track underwater targets.

Keywords: cross-domain unmanned system; autonomous undersea vehicle; unmanned aerial vehicle; improved particle swarm optimization algorithm

收稿日期: 2024-03-10; **修回日期:** 2024-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909206); 中国博士后科学基金项目(2021M692616); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBMS-300); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(31020200QD044).

作者简介: 丁文俊(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水下无人系统、跨域协同及智能决策.

OPEN ACCESS

0 引言

水下环境具有天然的屏蔽性和不透明性, 为水下目标[1] 的隐蔽活动提供了良好环境, 海上无人平台具有成本低廉、无人员伤亡及连续性强等优点, 可自主完成一系列复杂任务, 任务完成效率高。海上无人系统由无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)、无人艇(unmanned surface vessel, USV)和自主水下航行器(autonomous undersea vehicle, AUV)组成, 各无人平台之间的协同方式主要有同一空间域内无人平台的协同和不同空间域内无人平台的协同。常见的同一空间域无人平台间协同有 UAV 集群、USV 集群和 AUV 集群, 它们分别在所处空间域内执行搜索、跟踪[2] 和打击等任务; 不同空间域内异构无人平台协同有 UAV&USV 系统、USVs 系统、UAV&AUV 系统以及 UAV&USV&AUV 系统, 这类系统通过协同决策[3] 将任务合理分配给不同的无人平台, 充分利用各平台的优势, 以更好地完成任务。

对于同一空间域的无人平台, UAV 集群多用于执行区域侦察[4] 和物资运输等任务。针对 UAV 集群协同避障航迹规划问题[5], 杨勇等[6] 提出了一种增加自身斥力场的改进人工势场法与 Bezier 曲线相结合的方法, 使 UAV 在避障飞行时能够有效避免频繁大转角和急转弯现象的发生; Zu 等[7] 采用改进快速扩展随机树(rapidly-exploring random tree, RTT)算法, 可在存在静态、弹出和动态障碍物的情况下实时生成多个 UAV 的安全路径。USV 集群通常被用于执行搜救、侦察等任务, 针对海上复杂海况, 需要首先考虑航迹规划和队形控制问题。 包昕幼[8] 针对浅水区域 USV 编队巡航探测的路径规划问题进行了研究, 将 Boustrophedon 算法、野火法和 A*算法融合, 用于解决 USV 编队的探测区域覆盖问题, 同时进行了 USV 编队巡航路径过程中路径避障功能的改进; Liu 等[9] 提出了一种新的智能多任务分配与轨迹规划算法, 通过处理能量消耗和通信范围问题, 实现了将任务高效分配到每个 USV 上的目标。AUVs 编队则用于执行数据收集[10]、水下管道维护[11] 和海底电缆部署[12] 等任务。Ni 等[13] 研究了 AUVs 编队的协同狩猎问题, 在搜索阶段, 采用平行搜索策略以避免 AUV 航行时可能产生的碰撞问题, 在协同跟踪阶段, 采用多目标分配和就近组队方法, 使得搜索跟踪任务更加高效。

与同一空间域的无人平台协同相比, 不同空间域无人平台协同研究尚处于起步阶段, 常见的海上无人平台协同通常为 UAV 与 USV 协同。针对海上反潜搜索问题, 王宁等[14] 提出一种将 USV 作为 UAV 通信中继的跨域无人集群协同搜索方法, 设计了无人平台的分布式信息融合机制和协同搜索目标函数, 引导无人系统在搜索任务中实时决策。UAV&USV 系统还可应用于监测和清理海洋垃圾[15]。针对水下目标的搜索和跟踪任务, Yu 等[16] 结合 UAV、USV 和 AUV 等 3 类异构无人平台建立协同路径规划模型, 把任务分为搜索阶段和跟踪阶段, 并通过改进粒子群优化(improved particle swarm optimization, IPSO)分别生成对应路径, 仿真结果表明该方法能够应对不同复杂程度下的搜索与跟踪(search-and-track, SAT)任务; 另外, Yu[17] 还针对无人空海两用飞行器(unmanned aerial-aquatic vehicle, UAAV)和 AUV 协同路径规划展开研究, 针对 UAAV 和 AUV 的水下目标打击任务, 将任务分为 UAAV 单独飞行以及 UAAV 和 AUV 水下协同两阶段, 优化指标分别为 UAAV 的运动时间最小和终端位置误差最小, 采用基于粒子群优化(PSO)算法来生成每个阶段的最佳路径, 仿真结果表明所生成协调路径结果与理论最优解非常接近, 但 PSO 算法容易陷入局部最优解, 且算法缺乏对问题特性的自适应性, 对于不同类型的优化问题需要手动调整参数以获得更好的性能。

针对水下目标的搜索与跟踪任务, 一般采用的完成方式有 AUV、AUV 集群和 AUV&UAV 系统。由于 AUV 搜索范围比 UAV 小, 且航行速度慢, 因此当水下目标距离 AUV 过远时, AUV 会将大量时间耗费在搜索上, 从而导致目标逃离, 明显降低了任务完成效率。针对此, 文中提出了 AUV & UAV 跨域协同搜索方法, 该方法有效结合了 AUV 水下搜索能力强、隐秘性高和 UAV 搜索速度快、运动灵活的特点, 建立了跨域协同航迹规划模型, 并对算法进行了优化。仿真结果表明, 文中方法可有效提高任务完成效率。

1　任务描述

文中方法主要用于对近海海域进行水下目标搜索与跟踪, UAV 与 AUV 分别在空中和水下跨域协同搜索水下目标, 探测到目标位置后, 将位置信息传递给 AUV, 由 AUV 完成后续的跟踪任务。

在执行任务过程中, 为了保持 UAV 和 AUV 航迹规划的实时性, 两者需要进行信息共享。因此, 在目标搜索阶段, UAV 与 AUV 之间的距离始终保持在最大允许通信范围内; 同时, 在 AUV 上安装有拖曳式声呐作为通信中继, 不但保证了两者通信的实时性, 也节省了 AUV 上浮与 UAV 进行信息交换的时间, 提高了搜索效率。

搜索过程中, AUV 先行运动, UAV 再根据 AUV 的行动决定下一步行动, 以保证两者在搜索过程中的正常通信, 该过程持续到水下目标被探测到。虽然, UAV 相较于 AUV 有着更快的搜索速度, 通常情况下会先探测到水下目标, 但由于水下目标方位和运动的不确定性, AUV 仍有先发现水下目标的可能性, 两者跨域协同作业可有效提高搜索任务完成效率。为方便起见, 将目标被探测到的情况分为 2 种: 1) UAV 先探测到水下目标, 将目标实时位置信息传递给 AUV, 在确保目标不丢失的前提下降低自身速度, 远远地跟随目标, 直至 AUV 探测到目标并完成跟踪任务; 2) AUV 先探测到水下目标, 将目标实时位置信息传递给 UAV, 并不断缩短与目标的距离, 完成跟踪任务。而 UAV 接收到 AUV 的信息后, 迅速向目标靠拢。此时 UAV 的作用是通过融合两者探测到的目标信息, 将更准确的水下目标位置信息实时传输给 AUV。

2　模型建立

2.1　工作空间建模

在研究 UAV、AUV 对水下目标协同搜索跟踪的路径规划时, 为了准确地描述三者的运动状态, 需要引入地面坐标系和速度坐标系。由于 UAV、AUV 和水下目标均视为质点, 因此在刚体建模中需要考虑的航行器随体坐标系(简称体坐标系)与伴随航行器的速度坐标系重合(文中不再赘述体坐标系)。

工作环境地图的建模是 UAV 与 AUV 开始路径规划的基础, 环境建模方法根据环境精度和特征是否被改变可分为自由地图建模和非自由地图建模。栅格法是较为典型的非自由地图建模方法之一, 由于 AUV 和 UAV 的工作空间范围大, 建模过程中所需栅格数量过多, 考虑到无人平台和水下目标运动的实时性, 栅格法[18] 并不适合用于文中跨域协同搜索路径规划研究。

文中在空中及水下环境均采用以坐标系为基础的自由地图模型, 在三维$Ox_0y_0z_0$坐标系中, 定义工作区域的海平面左下方边界点为原点 O, 最终对三维工作环境的建模结果如图 1 所示。图中的灰色平面表示海平面, 即空域工作环境和水下工作环境的交界处, 灰色区域以上为 UAV 的工作区域, 以下三维区域则是 AUV 和水下目标的水下工作区域。无人平台和水下目标在自由地图模型内生成符合性能约束的可行路径时, 仅受自身机动性能限制, 这样在避免栅格法三维空间建模带来的复杂计算量的同时, 也规避了栅格法固有的路径航向角和轨迹冲突问题。自由地图模型保障了无人平台跨域协同搜索跟踪路径的可行性, 同时提高了其实时性和精确性。

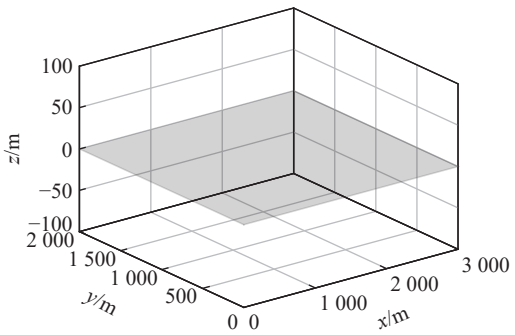


图 1　自由地图模型示意图

Fig. 1　Diagram of free map model

2.2　UAV、AUV 和水下目标运动学模型

文中介绍了搜索跟踪任务阶段 UAV、AUV 和水下目标的运动模型和机动能力; 并设定了不同任务阶段的约束条件, 确保信息交互和目标探测的有效性以及跟踪任务的成功; 最后提出反映每个任务阶段的优化指标, 保证任务的完成效率。

在路径规划问题中, 通常将运动物体作为质点, 采用质点运动模型(包括动力学模型和运动学模型)描述其运动, 甚至一些文献只考虑了质点运

动学模型[19]。这是因为与控制器模块相比, 路径规划模块要求有较快的运算速度。但路径规划问题中运动物体是一个刚体, 其运动模型可由一组变系数非线性常微分方程描述, 求解该方程组只需由控制器模块完成。综上考虑, 将 AUV、UAV 和水下目标都化简成质点, 在不失一般性的前提下, 只关注它们在工作空间内的位置和速度信息, 建立 UAV、AUV 和水下目标运动模型。图 2 为 UAV 和 AUV 模型示意图。

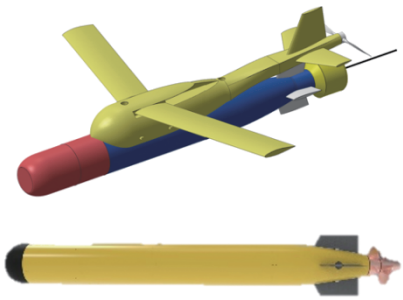


图 2　UAV 与 AUV 模型示意图

Fig. 2　Model of UAV and AUV

2.2.1　水下目标运动学建模

水下目标的主要运动类型包括日常状态下的定深运动和工作状态下的非定深运动, 文中主要研究水下目标日常状态下的二维定深运动模型。

1) 运动学模型

水下目标的二维运动学模型主要涉及地面系和速度系之间的参数坐标转换。因此, 基于地面坐标系和速度坐标系建立水下目标的定深运动模型, 即

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{\mathrm{T}} = [x_{\mathrm{T}}, y_{\mathrm{T}}, z_{\mathrm{T}}, \varphi_{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{T}} = [v_{\mathrm{T}}, q_{\mathrm{T}}, a_{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{u}_{\mathrm{T}}$为目标位置信息, x_{T},y_{T}为目标在x,y轴方向上的坐标; z_{T}为坐标恒定; φ_{T}为目标水平面偏航角; $\boldsymbol{V}_{\mathrm{T}}$为目标的速度信息; v_{T}为水下目标在水平面的平移速度; q_{T}为水下目标的偏航角速度; a_{T}为水下目标的加速度, 定深状态下不考虑俯仰角。

根据坐标与速度的转换关系, 可得水下目标的位置信息$\boldsymbol{u}_{\mathrm{T}}$和速度信息$\boldsymbol{V}_{\mathrm{T}}$的关系为

$$\begin{cases} \dot{x}_{\mathrm{T}} = \cos\varphi_{\mathrm{T}} \cdot v_{\mathrm{T}} \\ \dot{y}_{\mathrm{T}} = \sin\varphi_{\mathrm{T}} \cdot v_{\mathrm{T}} \\ \dot{\varphi}_{\mathrm{T}} = q_{\mathrm{T}} \\ \dot{v}_{\mathrm{T}} = a_{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $\dot{x}_{\mathrm{T}}$, $\dot{y}_{\mathrm{T}}$, $\dot{\varphi}_{\mathrm{T}}$, $\dot{v}_{\mathrm{T}}$分别为x_{T}, y_{T}, φ_{T}, v_{T}关于时间t的导数。

2) 约束条件

水下目标的约束主要涉及水下目标的运动空间和运动性能两方面。

水下目标在某海域中运动, 且根据自身的承压能力设置有最大下潜深度范围, 其运动空间约束为

$$\begin{cases} X_{\min} \leqslant X_{\mathrm{T}} \leqslant X_{\max} \\ Y_{\min} \leqslant Y_{\mathrm{T}} \leqslant Y_{\max} \\ Z_{\mathrm{T,min}} \leqslant Z_{\mathrm{T}} \leqslant 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: X_{T}, Y_{T}, Z_{T}分别为目标的坐标值; 下标 min 为目标在运动空间的最小坐标; 下标 max 为目标在运动空间的最大坐标。

目标根据自身性能范围设置速度和加速度上限, 其性能约束为

$$\begin{cases} v_{\mathrm{T}} \leqslant v_{\mathrm{T,\,max}} \\ q_{\mathrm{T}} \leqslant q_{\mathrm{T,\,max}} \\ a_{\mathrm{T}} \leqslant a_{\mathrm{T,\,max}} \end{cases} \tag{4}$$

式中, $v_{\mathrm{T,\,max}}$, $q_{\mathrm{T,\,max}}$, $a_{\mathrm{T,\,max}}$分别为目标的最大速度、最大偏航角速度和最大加速度。

3) 目标位置预测

水下目标运动状态是未知的, 在水下目标追踪阶段, UAV 通过自身探测设备获取到的只有目标当前时刻信息, 如果 UAV 只将该信息通过拖曳式声呐传递给 AUV, 会使 AUV 掌握的目标信息滞后于目标的真实运动。因此, AUV 需要采用可靠方法对水下目标未来位置进行预测, 以便快速跟踪到水下目标。

假设当前为第 k 个周期, 目标的坐标信息为 $\boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{T}}(k) = [x_{\mathrm{T}}(k), y_{\mathrm{T}}(k), z_{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}}$, 目标在$k-1$周期的状态信息为 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{T}}(k-1) = [\gamma_{\mathrm{T}}(k-1), \varphi_{\mathrm{T}}(k-1)]^{\mathrm{T}}$, 其中 UAV 获取到的目标信息仅为位置信息$\boldsymbol{u}_{\mathrm{T}}$。

因此, UAV 对运动目标当前状态预测为

$$\begin{cases} v_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k) = \dfrac{\boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{T}}(k) - \boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{T}}(k-1)}{T_{\mathrm{hunt}}} \\ \varphi_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k) = \arctan\dfrac{y_{\mathrm{T}}(k) - y_{\mathrm{T}}(k-1)}{x_{\mathrm{T}}(k) - x_{\mathrm{T}}(k-1)} \end{cases} \tag{5}$$

式中: $v_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)$为在第 k 个周期对目标速度的预测; $\varphi_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)$为在第 k 个周期对目标偏航角的预测; T_{hunt}为目标跟踪阶段的路径规划时间间隔。

同理得, 第$k+\Delta k$个周期的目标近似预测位置应为

$$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{T}}(k+\Delta k)=\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{T}}(k)+\begin{bmatrix} v_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\cos\left(\varphi_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\right) \\ v_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\sin\left(\varphi_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\right) \\ v_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\sin\left(\theta_{\mathrm{T}}^{\mathrm{pre}}(k)\right) \end{bmatrix}\cdot\Delta kT_{\mathrm{hunt}} \tag{6}$$

在 AUV 跟踪过程中, 为了更好地完成跟踪任务, 需要根据 AUV 与目标当前位置的间距动态设置Δk的取值, 从而快速改变 AUV 的运动方向。且预测的周期越大, 目标预测位置的准确度越低, 因此设定Δk的动态取值规则为

$$\Delta k=\begin{cases} 1,\ d_{\text{A-T}}\leqslant 100\ \text{m} \\ 2,\ 100\ \text{m}<d_{\text{A-T}}\leqslant 200\ \text{m} \\ 3,\ 200\ \text{m}<d_{\text{A-T}}\leqslant r_{\text{det,A}} \end{cases} \tag{7}$$

式中: $d_{\text{A-T}}$为 AUV 与水下目标的距离; $r_{\text{det,A}}$为 AUV 的探测半径。当$d_{\text{A-T}}>r_{\text{det,A}}$时, AUV 只能凭借 UAV 传递的信息了解目标所在位置, 此时 AUV 将水下目标纳入自身可探测区域的任务优先级高于追踪水下目标的需求, 所以只根据水下目标的当前位置信息进行运动。

2.2.2　UAV 运动学建模

1) 运动学模型

根据 UAV 的基本假设, UAV 在空中做二维平面运动, 其运动模型与水下目标的二维运动模型相同, 模型表述为

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{\mathrm{U}}=[x_{\mathrm{U}},y_{\mathrm{U}},z_{\mathrm{U}},\varphi_{\mathrm{U}}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{U}}=[v_{\mathrm{U}},q_{\mathrm{U}},a_{\mathrm{U}}]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{8}$$

该运动模型中各参数的含义与上节所述一致, $z_{\mathrm{U}}=50$ m恒定。

UAV 位置姿态向量$\boldsymbol{p}_{\mathrm{U}}$和速度向量$\boldsymbol{V}_{\mathrm{U}}$的关系为

$$\begin{cases} \dot{x}_{\mathrm{U}}=\cos\varphi_{\mathrm{U}}\cdot v_{\mathrm{U}} \\ \dot{y}_{\mathrm{U}}=\sin\varphi_{\mathrm{U}}\cdot v_{\mathrm{U}} \\ \dot{\varphi}_{\mathrm{U}}=q_{\mathrm{U}} \\ \dot{v}_{\mathrm{U}}=a_{\mathrm{U}} \end{cases} \tag{9}$$

2) 约束条件

在跨域协同路径规划问题上, UAV 的约束包括运动空间、自身性能和 UAV&AUV 跨域协同三方面。

UAV 在水下目标出没过的有界海域内对水下目标进行搜索时, 其空间约束为

$$\begin{cases} x_{\min}\leqslant x_{\mathrm{U}}\leqslant x_{\max} \\ y_{\min}\leqslant y_{\mathrm{U}}\leqslant y_{\max} \end{cases} \tag{10}$$

由于 UAV 本身的物理属性限制, UAV 在飞行过程中有着一定的速度和加速度范围, 设定其速度、角速度和加速度上限分别为

$$\begin{cases} |v_{\mathrm{U}}|\leqslant v_{\mathrm{U,max}} \\ |q_{\mathrm{U}}|\leqslant q_{\mathrm{U,max}} \\ |a_{\mathrm{U}}|\leqslant a_{\mathrm{U,max}} \end{cases} \tag{11}$$

在跨域协同搜索跟踪任务中, 假设 UAV 的搜索范围为以其质点为球心的半球形, 搜索区域半径为$r_{\text{det,U}}$, 当水下目标出现在 UAV 的搜索区域时, 可认为 UAV 成功搜索到水下目标, 其探测能力约束为

$$\left[(x_{\mathrm{U}}-x_{\mathrm{T}})^2+(y_{\mathrm{U}}-y_{\mathrm{T}})^2+(z_{\mathrm{U}}-z_{\mathrm{T}})^2\right]^{1/2}\leqslant r_{\text{det,U}} \tag{12}$$

搜索跟踪过程中, UAV 需要与 AUV 进行通信, 文中采用拖曳式通信浮标作为通信中继, 假设 UAV 的通信范围为以 UAV 的质心为球心的半球形, 通信半径为$d_{\text{com(U-A)}}$。当 UAV 和 AUV 之间的距离不超过$d_{\text{com(U-A)}}$, 认为两者可相互通信。UAV 与 AUV 的距离为

$$d_{\text{U-A}}=\left[(x_{\mathrm{U}}-x_{\mathrm{A}})^2+(y_{\mathrm{U}}-y_{\mathrm{A}})^2+(z_{\mathrm{U}}-z_{\mathrm{A}})^2\right]^{1/2} \tag{13}$$

2.2.3　AUV 运动学建模

1) 运动学模型

在执行水下目标搜索跟踪任务时, AUV 在水下空间做二维定深运动, 因此, AUV 的运动学模型与水下目标的二维运动模型相同, 其数学形式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{\mathrm{A}}=[x_{\mathrm{A}},y_{\mathrm{A}},z_{\mathrm{A}},\varphi_{\mathrm{A}}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}=[v_{\mathrm{A}},q_{\mathrm{A}},a_{\mathrm{A}}]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{14}$$

式中: q_{A}为 AUV 的偏航角速度; a_{A}为 AUV 的加速度。水下目标做定深运动, AUV 不需进行深度变化, 俯仰角为零。

2) 约束条件

对 AUV 的约束要从 AUV 的工作空间、自身性能和任务完成标志等几方面进行分析。

a. 工作空间约束: 根据 AUV 自身的抗压特性和搜索范围, 其工作空间约束为

$$\begin{cases} x_{\min}\leqslant x_{\mathrm{A}}\leqslant x_{\max} \\ y_{\min}\leqslant y_{\mathrm{A}}\leqslant y_{\max} \\ z_{\mathrm{T,min}}\leqslant z_{\mathrm{A}}\leqslant 0 \end{cases} \tag{15}$$

b. 性能约束: 由于自身物理性能的限制, AUV 在航行过程中存在的速度和加速度约束为

$$\begin{cases} v_{\mathrm{A}}\leqslant v_{\mathrm{T,max}} \\ q_{\mathrm{A}}\leqslant q_{\mathrm{T,max}} \\ a_{\mathrm{A}}\leqslant a_{\mathrm{T,max}} \end{cases} \tag{16}$$

c. 探测能力约束: AUV 在水下工作, 假设其搜索区域为以 AUV 质心为搜索区域球心的球体, 搜索半径为$r_{\mathrm{det,A}}$, 当水下目标与 AUV 的距离小于$r_{\mathrm{det,A}}$时, 认为 AUV 成功搜索到水下目标, 即

$$[(x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{T}})^2+(y_{\mathrm{A}}-y_{\mathrm{T}})^2+(z_{\mathrm{A}}-z_{\mathrm{T}})^2]^{1/2}\leqslant r_{\mathrm{det,A}} \tag{17}$$

d. 目标跟踪约束: AUV 在跟踪水下目标时, 当其与水下目标的距离小于一定阈值$d(t_E)_{\mathrm{A-T}}$时(t_E为跟踪阶段结束时刻), 认为完成目标跟踪任务, 即

$$\left[\begin{pmatrix}x_{\mathrm{A}}(t_E)-\\x_{\mathrm{T}}(t_E)\end{pmatrix}^2+\begin{pmatrix}y_{\mathrm{A}}(t_E)-\\y_{\mathrm{T}}(t_E)\end{pmatrix}^2+\begin{pmatrix}z_{\mathrm{A}}(t_E)-\\z_{\mathrm{T}}(t_E)\end{pmatrix}^2\right]^{1/2}\leqslant d(t_E)_{\mathrm{A\text{-}T}} \tag{18}$$

e. 通信约束: AUV 和 UAV 之间的信息交互公式见上节。

2.3　优化指标

文中任务 2 个阶段的目标不同。在水下目标搜索阶段, 应尽量增大总的搜索空间来增加探测到水下目标的概率, 即 AUV 与 UAV 在工作海域的联合搜索面积最大。在水下目标跟踪阶段, AUV 应尽量缩短与水下目标的距离, 以实现对水下目标的实时跟踪, UAV 则需同时兼顾与 AUV 和水下目标的距离。

目标搜索阶段的优化指标如下

$$f_1=\max((\Phi_{\mathrm{U}}\cup\Phi_{\mathrm{A}})\cap\Phi_{\mathrm{work}}) \tag{19}$$

式中: Φ_{U}是 UAV 的搜索空间; Φ_{A}是 AUV 的搜索空间; Φ_{work}是工作海域的空间。

在目标跟踪阶段, AUV 只关注于自身和水下目标的距离, 而 UAV 还要考虑与 AUV 的通信保持, 因此分开给出当前第 k 个周期两者的优化指标。

AUV 的优化指标为

$$F_{\mathrm{A}}(k)=\min(d_{\mathrm{A\text{-}T}}(k)) \tag{20}$$

UAV 的优化指标为

$$F_{\mathrm{U}}(k)=\min(\mu d_{\mathrm{U\text{-}A}}(k)+d_{\mathrm{U\text{-}T}}(k)) \tag{21}$$

上式中: $d_{\mathrm{A\text{-}T}}(k)$为 AUV 与水下目标的距离; $d_{\mathrm{U\text{-}T}}(k)$为 UAV 与水下目标的距离; μ为根据 AUV 当前是否能搜索到目标为$d_{\mathrm{U\text{-}A}}(k)$项添加的权重值, 当 AUV 搜索到目标时为小于 1 的常数, 不能搜索到目标时为大于 1 的常数。

3　跨域协同搜索与跟踪路径规划算法

3.1　IPSO 算法

相比传统优化算法(例如梯度下降法), PSO 算法[20]能够同时评估群体内的多个粒子适应度, 求解覆盖面大, 具有良好的并行计算能力。但传统 PSO 算法缺乏对粒子速度属性的动态调节, 这使得粒子在趋近最优解时不能较好地控制收敛速度, 收敛速度过快, 算法容易陷入局部最优, 使得收敛精度降低。

针对此, 设计一种 IPSO 算法, 该算法在迭代中加入了自适应学习因子调控策略, 并参考遗传算法的优化思路, 在粒子更新过程中加入了精英保存策略。在保持 PSO 算法高收敛速度的同时, 保证实时且稳定地生成可行的最优在线路径。IPSO 算法流程如图 3 所示。

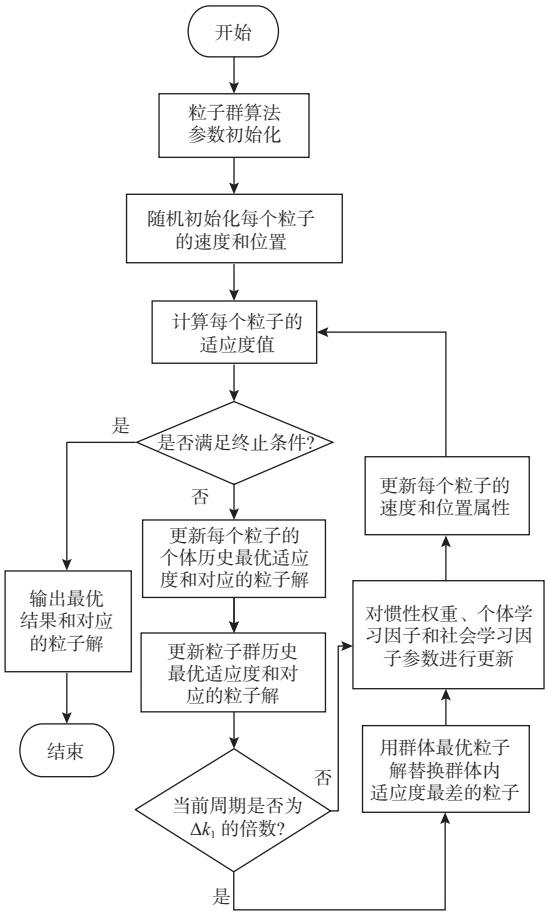


图 3　IPSO 算法流程图

Fig. 3　IPSO algorithm flow chart

由于在目标搜索阶段和目标追踪阶段, UAV 和 AUV 所承担的任务并不相同, 文中独立对两阶

段进行路径规划。

在目标搜索阶段, 设置 UAV&AUV 系统粒子群规模为 N, 在信息联通的前提下, 两平台进行集中式的粒子群算法路径规划; 在目标追踪阶段, 由于 UAV 和 AUV 的任务分工不同, 为了便于 AUV 执行目标追踪工作, 采用分布式路径规划, 并设置 UAV 和 AUV 的粒子群规模均为 N。

相应地, PSO 算法中第 k 个周期系统的粒子群 $\boldsymbol{X}(k)$记录为

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{X}(k)=\left\{\boldsymbol{X}^1(k),\cdots,\boldsymbol{X}^j(k),\cdots,\boldsymbol{X}^N(k)\right\},\\&\quad j=1,2,\cdots,N\end{aligned}\tag{22}$$

式中, $\boldsymbol{X}^j(k)$为第 k 个周期粒子群体内的第 j 个粒子。

由于 UAV 和 AUV 的周期路径解由本周期 2 个平台的状态初值、加速度和角速度决定, 因此, 取 2 个平台的运动控制量作为 PSO 算法的参数。

1) 目标搜索阶段

由于该阶段大多数时间内 UAV 和 AUV 信息联通, UAV&AUV 系统主要采用总体式的路径规划。水下目标做定深运动, 两平台的粒子维度为 2, 参数$\boldsymbol{X}^j(k)=\left[a_{\mathrm{U}}^j(k),q_{\mathrm{U}}^j(k),a_{\mathrm{A}}^j(k),q_{\mathrm{A}}^j(k)\right]^{\mathrm{T}}$。

考虑到 UAV 和 AUV 要对海域进行充分地搜索, 平台速度越大, 单周期搜索范围越大, 因此粒子 $\boldsymbol{X}^j(k=1)$的线加速度 $a_{\mathrm{U}}^j(k=1)$和 $a_{\mathrm{A}}^j(k=1)$分别在 $[0,a_{\mathrm{U,max}}]$和$[0,a_{\mathrm{A,max}}]$的正向范围内按高斯分布取值, 角速度$q_{\mathrm{U}}^j(k=1)$和$q_{\mathrm{A}}^j(k=1)$分别在$[-q_{\mathrm{U,max}},q_{\mathrm{U,max}}]$和$[-q_{\mathrm{A,max}},q_{\mathrm{A,max}}]$的范围内按均匀分布取值。

2) 目标追踪阶段

该阶段 UAV 和 AUV 的粒子参数设置分别为 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{U}}^j(k)=\left[a_{\mathrm{U}}^j(k),q_{\mathrm{U}}^j(k)\right]^{\mathrm{T}}$和 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}^j(k)=\left[a_{\mathrm{A}}^j(k),q_{\mathrm{A}}^j(k)\right]^{\mathrm{T}}$, 水下目标做定深运动, 两平台的粒子维度为 2。

由于该阶段初始时刻 UAV 和 AUV 已具有状态初值, 加之考虑到 AUV 水下追踪的要求, 因此 UAV 粒子$\boldsymbol{X}_{\mathrm{U}}^j(k)$的线加速度$a_{\mathrm{U}}^j(k)$在$[-a_{\mathrm{U,max}},a_{\mathrm{U,max}}]$范围内按高斯分布取值, 偏航角速度$q_{\mathrm{U}}^j(k)$在$[-0.5\times q_{\mathrm{U,max}},0.5\times q_{\mathrm{U,max}}]$范围内按均匀分布取值。AUV 粒子$\boldsymbol{X}_{\mathrm{A}}^j(k)$的线加速度$a_{\mathrm{A}}^j(k)$在$[-a_{\mathrm{A,max}},a_{\mathrm{A,max}}]$的正向范围内按高斯分布取值, 偏航角速度$q_{\mathrm{A}}^j(k)$在$[-q_{\mathrm{A,max}},q_{\mathrm{A,max}}]$的范围内按均匀分布取值。

粒子群初始化后, 计算出当前粒子群每个粒子的适应度函数值, 并记录群体内每个粒子的适应度函数值$F\left(\boldsymbol{X}^j(k=1)\right),j=1,2,\cdots,N$, 将其作为历史最优个体$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^j,j=1,2,\cdots,N$, 并记录对应的粒子信息; 同时保存粒子群中的最优适应度函数值g_{best}以及对应的群体最优解$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$。

3.2　改进内容

在第 k 个周期中, 文中 PSO 算法的粒子速度更新公式和对应的粒子位置更新公式分别为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v}^j(k)=&\omega\boldsymbol{v}^j(k-1)+c_1\cdot\mathrm{rand}_1\left(\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^j-\boldsymbol{X}^j(k-1)\right)+\\&c_2\cdot\mathrm{rand}_2\left(\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}-\boldsymbol{X}^j(k-1)\right)\end{aligned}\tag{23}$$

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^j(k)=\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^j(k-1)+\boldsymbol{v}^j(k)\tag{24}$$

式中: ω为惯性权重; c_1为个体学习因子; c_2为社会学习因子; rand_1、rand_2分别为在 [0,1] 范围内均匀分布的随机实数; $\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^j$为个体粒子最优解; $\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}$为群体最优解。

当$\boldsymbol{X}^j(k)$某一控制量的大小超过工作平台的性能阈值时, 将其重新设置为最接近该值的临界值。

文中对 PSO 算法作如下改进。

1) 自适应学习因子调控策略

IPSO 算法在式(23)中引入了c_1和c_2, 其中c_1表征粒子学习自身历史经验的能力, 其可调控粒子自身经验在进化过程中所占的学习权重; c_2表征粒子在群体中的学习能力, 其可调控群体经验在单个粒子进化过程中所占的学习权重。需要指出, 若c_1=0, 则算法会由于参考方向单一失去群体多样性, 甚至可能陷入局部最优无法跳出; 若c_2=0, 则算法会由于粒子间无法共享最优的进化参考方向, 造成收敛速度较慢, 因此需要合理调整二者的赋值[21]。

为了实现c_1和c_2之间的均衡, IPSO 算法采用了自适应学习因子调控策略, 目标搜索和追踪阶段所采取的调控策略有所不同。

a. 目标搜索阶段

该阶段调控策略数学表达式为

$$\begin{cases}c_1(k)=c_{1,\max}-a_1c_{1,\max}\cdot\dfrac{G_{\max}-k}{G_{\max}}\\[2ex]c_2(k)=c_{2,\max}-a_2c_{1,\max}\cdot\dfrac{k}{G_{\max}}\end{cases}\tag{25}$$

式中: a_1、a_2均为非负常数, 取值在(0, 1)之间; $G_{\max}$为工作周期上限。

在 IPSO 算法的搜索初期和前期群体粒子进化效果尚不明显的时候, 上述调控策略可以让社

会学习因子c_2在粒子更新中发挥主导作用, 推动粒子向群体最优的方向进化, 从而加快群体进化速度; 在群体的搜索中后期, 由于搜索任务耗时长且尚未成功, 说明c_2的进化效果已经降低, 此时需要降低$c_2(k)$的影响, 同时让个体学习因子c_1在粒子更新中发挥主导作用, 增大$c_1(k)$来增加群体可行解的多样性, 扩大探索区间, 增强算法寻优性能以探索更优的可行解。

b. 目标追踪阶段

该阶段目标点的位置处于已知状态, 动态追踪路径规划对优化算法的收敛性要求更强, 且种群粒子已具有一定的初始状态, 调控策略表达式如下

$$\begin{cases} c_1(k)=c_{1,\min}+(c_{1,\max}-c_{1,\min})\cdot\sqrt{\dfrac{k}{G_{\max}}} \\ c_2(k)=c_{2,\max}-(c_{2,\max}-c_{2,\min})\cdot\dfrac{G_{\max}-k}{G_{\max}} \end{cases} \tag{26}$$

相比于式(25), 在目标追踪阶段对$c_1(k)$进行调整, $c_1(k)$采用开方式的递增权值策略。这是因为AUV 每周期的追踪路径对粒子群体多样性的要求更高, 因此在$c_1(k)$随周期动态增长的基础上进一步调整了其增长速度, 使每个路径解在进化过程中对自身的学习程度进一步增强, 在每个周期的路径解拥有相同运动状态初值的前提下推动群体粒子多样化, 达到多样性和收敛性相平衡的效果。

2) 精英保存策略

IPSO 算法参考遗传算法的优化思路, 在更新群体粒子的环节加入了精英保存策略, 每经过Δk_1个周期数, 若系统仍未完成当前周期任务, 则将群体内适应度最差的粒子用群体最优解进行替换, 辅助下一周期生成更优秀的协同路径规划解, 以此增强 PSO 算法的寻优能力。

在第 k 个周期的粒子群体完成速度和位置属性更新后, 对每个新粒子的适应度函数值进行计算, 若当代粒子的适应度值胜于历史最优个体, 则更新对应的个体粒子最优解$\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{j}$; 若当代中出现了适应度值优于种群最优的粒子, 则更新g_{best}, 并将对应的粒子更新为群体最优解$\boldsymbol{X}_{\text{best}}$。不断重复上述过程, 直至完成系统路径规划的任务或是路径规划达到工作周期上限为止。

3.3 适应度函数设置

1) 目标搜索阶段

进行 AUV&UAV 的搜索路径规划时, 需要根据任务的需求设置适应度函数(即目标函数), 以保证最终输出的路径解能够更高效地完成任务。考虑到 AUV 和 UAV 的搜索任务, 适应度函数的目标在于使 AUV&UAV 系统尽可能快地搜索到水下目标。

对于做定深运动的水下目标, 采用UAV 和 AUV 在海平面的搜索截面表征两者的搜索区域, 水平搜索截面能够准确地反映两平台搜索域之间是否重叠等情况, 因此将 UAV&AUV 系统的联合搜索域体积计算转化为 UAV 和 AUV 的海平面搜索截面联合面积计算, 则联合搜索域面积的优化指标简化为

$$f_1=\max((S_{\text{U}}\cup S_{\text{A}})\cap S_{\text{work}}) \tag{27}$$

式中: S_{U}是 UAV 的海平面搜索截面; S_{A}是 AUV 的海平面搜索截面; S_{work}是工作海域的水平面范围。

由于探测范围的精确值与计算时间成正比, 同时水下目标有一定体积, 因此在找出 AUV、UAV 下一时刻最优路径解的过程中, 不需要将搜索范围过于精细化。

针对以上计算方面和真实场景的实际情况, 基于蒙特卡罗实验提出一种计算方法, 即将搜索范围内的平面空间定义为一个长方形, 其长、宽可以被均匀地划分为 a、b 份, 则该长方形的表面和内部共有$((a+1)(b+1))$个点。总探测范围大小可以通过落入 AUV 和 UAV 探测范围内点的个数进行衡量。这就把复杂的精确计算探测面积问题转换成了判断点是否在由 AUV 和 UAV 的组合探测范围内的问题。

对应的适应度函数部分即为

$$h_1=(a+1)(b+1)-N_{\text{space}} \tag{28}$$

式中, N_{space}为工作海域落在组合探测空间内点的个数。

2) 目标追踪阶段

该阶段的任务是无人系统中的 AUV 逐渐缩小与目标的距离直至捕获目标, 此过程中 AUV 是水下追踪的主力, UAV 将目标的实时位置动态传递给 AUV。由于该阶段中 UAV 和 AUV 承担的工作任务不一致, 因此分开设置二者的适应度函数。

a. AUV 适应度函数设置

追踪阶段中 AUV 的唯一任务是完成对目标

的跟踪, 所以衡量当前第 k 个周期 AUV 不同路径解优劣的标准是该周期 AUV 路径末端位置距目标的距离, 距离越小, 路径解越好。

因此 AUV 的适应度函数与 2.3 节中的优化指标(见式(20))相同, 二者间距的数学表达式为

$$d_{\text{A-T}}(k)=\sqrt{\begin{matrix}(x_{\text{A}}(k)-x_{\text{T}}(k))^2+(y_{\text{A}}(k)-y_{\text{T}}(k))^2+\\(z_{\text{A}}(k)-z_{\text{T}}(k))^2\end{matrix}} \tag{29}$$

b. UAV 适应度函数设置

追踪阶段中 UAV 的任务是在全过程中传递目标位置信息给 AUV, 所以第 k 个周期 UAV 不同路径解的评估标准是: 第 k 个周期的工作路径末端与 AUV 的距离以及与水下目标的距离。

UAV 与 AUV 的末端通信距离应不超过前文中设定的距离$d_{\text{com(U-A)}}$, 对参考距离的临界值进行调整后表达式为

$$d'_{\text{U-A}}(k)=\begin{cases}d_{\text{U-A}}(k), d_{\text{U-A}}(k)\leqslant 0.7\times d_{\text{com,U-A}}\\ d_{\text{com,U-A}},\ d_{\text{U-A}}(k)>0.7\times d_{\text{com,U-A}}\end{cases} \tag{30}$$

UAV 与水下目标在周期末时刻距离的表达式为

$$d_{\text{U-T}}(k)=\sqrt{\begin{matrix}(x_{\text{U}}(k)-x_{\text{T}}(k))^2+(y_{\text{U}}(k)-y_{\text{T}}(k))^2+\\(z_{\text{U}}(k)-z_{\text{T}}(k))^2\end{matrix}} \tag{31}$$

当水下目标不在 UAV 的搜索范围内时, 为便于运算, 将二者的距离设定为一固定值, 固定值的选取与搜索半径相关, 文中取$d_{\text{det,U}}=2\times r_{\text{det,U}}$, 得二者距离的综合数学表达式为

$$d'_{\text{U-T}}(k)=\begin{cases}d_{\text{U-T}}(k), d_{\text{U-T}}(k)\leqslant r_{\text{det,U}}\\ d_{\text{det,U}},\ d_{\text{U-T}}(k)>r_{\text{det,U}}\end{cases} \tag{32}$$

由于 UAV 的搜索半径$r_{\text{det,U}}$和通信半径$d_{\text{com(U-A)}}$的大小并不相同, 直接采用$d'_{\text{U-A}}(k)$和$d'_{\text{U-T}}(k)$会因尺度上的差异造成适应度函数值具有偏向性, 因此在适应度函数中需先对 2 种距离的计算结果进行归一化处理, 实现对评估联通程度以及与目标接近程度的兼顾。

归一化处理的效果为

$$\begin{cases}D_{\text{U-A}}(k)=\sqrt[3]{\dfrac{d_{\text{com,U-A}}-d'_{\text{U-A}}(k)}{d_{\text{com,U-A}}}}\\ D_{\text{U-T}}(k)=\sqrt[3]{\dfrac{d_{\text{det,U}}-d'_{\text{U-T}}(k)}{d_{\text{det,U}}}}\end{cases} \tag{33}$$

易得$D_{\text{U-A}}(k)$, $D_{\text{U-A}}(k)\in[0,1]$, 其值越趋近 1, 说明 UAV 与 AUV 的距离越近。因此追踪目标阶段 UAV 适应度函数总式为

$$F_{\text{S}}(k)=\min(\mu D_{\text{U-A}}(k)+D_{\text{U-T}}(k)) \tag{34}$$

4　仿真与分析

文中使用 Matlab 软件首先对做二维定深运动的水下目标进行搜索跟踪仿真试验。

4.1　参数设置

AUV 和 UAV 的机动能力和性能参考反潜鱼雷和磁探无人机的相关数据获得, 水下目标的运动参数则参考用于海洋勘探、资源调查的中速 AUV, 具体设置如下。

UAV 的运动参数为: UAV&AUV 的通信半径$d_{\text{com(U-A)}}$=1 000 m, UAV 的搜索半径$r_{\text{det,U}}$=1 000 m, 最大工作速度$v_{\text{U, max}}$=15 m/s, 最大加速度$a_{\text{U,max}}$=3 m/s^2, 最大工作角速度$q_{\text{U,max}}$=0.2 rad/s。

AUV 的运动参数为: AUV 的搜索半径$r_{\text{det,A}}$=500 m, 最大工作速度$v_{\text{A, max}}$=8 m/s, 最大加速度$a_{\text{A,max}}$=2 m/s^2, 最大偏航角速度$q_{\text{A,max}}$=0.2 rad/s, 最大俯仰角速度$p_{\text{A,max}}$=0.2 rad/s, AUV 使用声呐实现对水下目标的实时跟踪, 因此跟踪目标距离阈值d_{hunt}=3 m。

水下目标的运动参数为: 水下目标的最大航行速度$v_{\text{T, max}}$=4 m/s, 最大加速度$a_{\text{T,max}}$=1 m/s^2 , 最大偏航角速度$q_{\text{T,max}}$=0.1 rad/s, 最大俯仰角速度$p_{\text{T,max}}$=0.1 rad/s。

由于 UAV&AUV 系统搜索跟踪水下运动目标时有实时性要求, 算法需均衡实时性和搜索性能的要求, 因此设定算法的粒子群数量$M_P=20$, 平台工作周期上限也设置$G_{\max}=200$, 每个搜索周期时长5 s。

下面对水下目标 2 维定深运动模型进行仿真, 验证所建立的无人平台、地图模型及所提改进路径规划算法的可行性和优越性。

由于 UAV&AUV 系统的工作空间相对有限, 这里将工作空间设置为$x\in[0, 3\ 000]$, $y\in[0, 3\ 000]$, AUV 及水下目标运动深度为 50 m。

UAV、AUV 及水下目标在初始时刻($t=0$)的坐标和状态信息如表 1 所示。

4.2　PSO 算法路径规划仿真

初始参数设置完成后, 首先采用 PSO 算法对

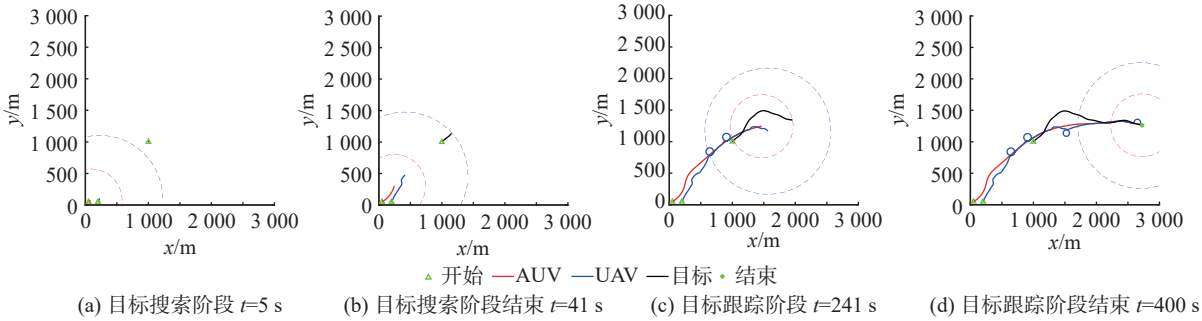
UAV&AUV 系统进行两阶段任务的跨域协同路径规划, 对水下目标搜索跟踪过程的二维俯视图如图 4 所示, 图中, 蓝色虚线圆是 UAV 的动态搜索范围, 红色虚线圆是 AUV 的动态搜索范围。

图 4(a)~(b)是水下目标搜索阶段过程图, (c)~(d)是水下目标跟踪阶段过程图。可以看出, 在任务开始时 UAV 和 AUV 便处于可通信状态, 并在此状态下跨域协同搜索, 其中目标搜索阶段用时 41 s; 转入水下目标跟踪阶段后, UAV 和 AUV 不断向目标位置靠近, AUV 在 UAV 的信息辅助下, 最终在 400 s 时搜索到水下目标; UAV&AUV 系统的跨域协同路径规划全程用时 344 s。

表 1　UAV、AUV 及二维定深运动目标的初始状态信息

Table 1　Initial state information of UAV, AUV and two-dimensional depth-fixed moving target

运动物体	坐标/m			速度/(m/s)	姿态角/rad	
	x	y	z		φ	θ
UAV	200	0	50	15	π/6	–
AUV	0	50	−50	8	0	0
目标	1 000	1 000	−50	5	0	0



(a) 目标搜索阶段 t=5 s　(b) 目标搜索阶段结束 t=41 s　(c) 目标跟踪阶段 t=241 s　(d) 目标跟踪阶段结束 t=400 s

图 4　基于 PSO 算法的任务全过程二维路径曲线

Fig. 4　The two-dimensional path map of the whole process of a task based on PSO algorithm

图 5 是 UAV&AUV 系统进行水下目标搜索与跟踪任务的跨域协同路径规划三维图。

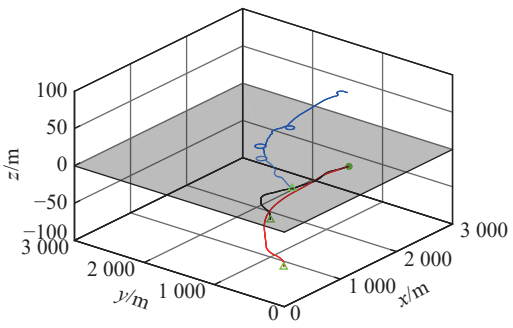


图 5　基于 PSO 算法的任务全过程三维路径图

Fig. 5　3D path map of the whole process of the task based on PSO algorithm

从图 4~图 5 可得, 在 UAV 与 AUV 保持通信的情况下, UAV&AUV 系统能够在任务海域内迅速完成对水下目标的搜索工作, 在目标跟踪阶段, AUV 能够在 UAV 的信息辅助下持续获取水下目标的方位信息, 完成水下目标跟踪任务。

图 6 为 UAV&AUV 系统执行跨域协同任务全过程中 UAV、AUV 和水下目标两两之间距离(l)的实时变化情况, 图中黑色竖线是水下目标搜索和跟踪阶段的时间分界线。任务过程中, UAV 与 AUV 的距离始终保持在有效通信范围内, UAV 持续传递水下目标的位置信息, 保证 AUV 对水下目标的有效追踪, 直至 AUV 成功搜索并追踪到水下目标。

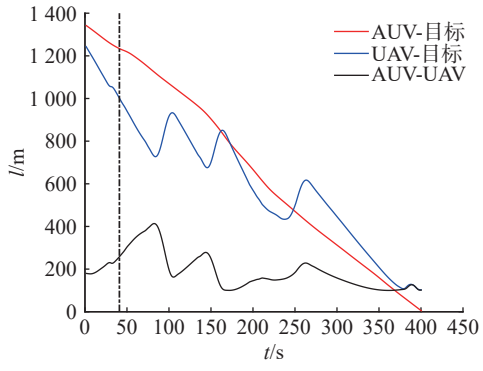


图 6　基于 PSO 算法的全过程无人平台间距变化曲线

Fig. 6　The whole process of unmanned platform spacing variation curve based on PSO algorithm

表 2 给出了 UAV&AUV 系统在搜索跟踪水下目标全过程中, UAV 成功搜索目标时刻 T_{U}、AUV 成功搜索目标时刻 T_{A}、AUV 跟踪目标时刻 $T_{\mathrm{A\text{-}T}}$ 和 AUV 与目标的跟踪距离 $L_{\mathrm{A\text{-}T}}$ 等事件内容的对

应数据。

表 2　基于 PSO 算法任务的相关参数

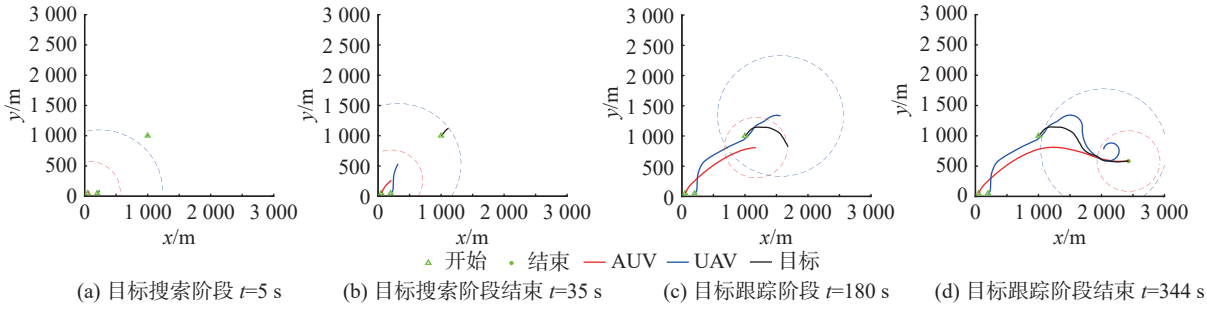
Table 2　Other data of task based on PSO algorithm

参数	数值
T_U/s	41.00
T_A/s	241.00
$T_{A\text{-}T}$/s	400.00
$L_{A\text{-}T}$/m	1.86

4.3　IPSO 算法路径规划仿真

上节验证了所建立的 UAV&AUV 跨域协同任务模型和 PSO 算法在异构无人系统的跨域协同实时路径规划问题上是可行的。文中使用 Matlab 软件仿真验证 IPSO 算法对 UAV&AUV 系统的跨域协同搜索追踪路径规划的有效性。其中, UAV、AUV 和水下目标的运动参数和初始状态信息设置与上节相同。对水下目标的搜索跟踪过程二维俯视图如图 5 所示, 参数设置与 4.2 节相同。

图 7(a)~(b)为水下目标搜索阶段的过程图, (c)~(d)为水下目标跟踪阶段的过程图。可以看出, 两无人平台在可通信状态下跨域协同搜索, 其中目标搜索阶段用时 35 s; 转入水下目标跟踪阶段后, UAV 和 AUV 不断向目标位置靠近, 当 UAV 与水下目标的距离小于 500 m 时, 会降低速度, 远远地跟踪水下目标, AUV 在 UAV 的信息辅助下, 在 180 s 时搜索到水下目标; UAV&AUV 系统的跨域协同路径规划全程用时 344 s。



(a) 目标搜索阶段 t=5 s　(b) 目标搜索阶段结束 t=35 s　(c) 目标跟踪阶段 t=180 s　(d) 目标跟踪阶段结束 t=344 s

图 7　基于 IPSO 算法的任务全过程的二维路径图

Fig. 7　The two-dimensional path map of the whole process of a task based on IPSO algorithm

图 8 为 UAV&AUV 系统进行水下目标搜索与跟踪任务的跨域协同路径规划三维图。从图 7~图 8 可得, 在两平台保持通信的情况下, UAV&AUV 系统能够在任务海域内迅速完成对水下目标的搜索工作, 在目标跟踪阶段, AUV 能够在 UAV 信息辅助下持续获取水下目标的方位信息, 高效地完成水下目标跟踪任务。

图 9 为 UAV&AUV 系统执行跨域协同任务全过程中 UAV、AUV 和水下目标两两之间距离实时变化情况, 图中黑色虚线是水下目标搜索和跟踪阶段的时间分界线。在目标搜索阶段, UAV 先搜索到目标, 进入目标跟踪阶段, UAV 向 AUV 持续传递水下目标的位置信息, 保证 AUV 对水下目标的有效追踪, 直至 AUV 成功搜索并追踪到水下

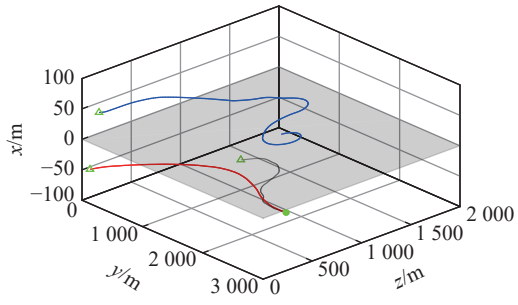


图 8　基于 IPSO 算法的任务全过程三维路径图

Fig. 8　3D path map of the whole process of the task based on IPSO algorithm

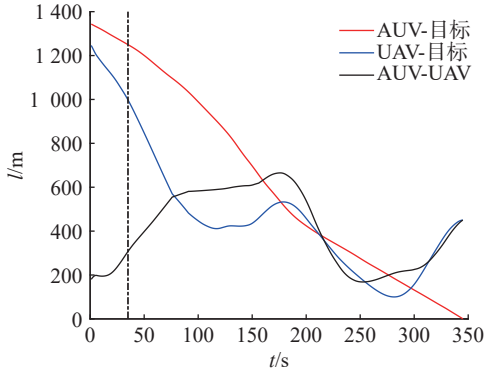


图 9　基于 IPSO 算法的全过程无人平台间距变化曲线

Fig. 9　The whole process of unmanned platform spacing variation curves based on IPSO algorithm

目标。

表 3 是 UAV&AUV 系统在搜索跟踪水下目标全过程中的其他数据。

表 3 基于 IPSO 算法任务的相关参数

Table 3 Other data of UAV & AUV heterogeneous system task based on IPSO algorithm

参数	数值
T_U/s	35.00
T_A/s	180.00
$T_{A\text{-}T}$/s	344.00
$L_{A\text{-}T}$/m	0.69

以上试验结果及分析表明, 文中 IPSO 算法能够保证 UAV&AUV 无人系统在满足平台约束的要求下, 顺利完成对水下目标的跨域协同搜索跟踪任务, 证明了 IPSO 算法能够解决 UAV&AUV 系统的跨域协同路径在线规划问题。

为了更好地体现 IPSO 算法的有效性, 分别对 UAV、AUV 和水下目标设置不同的初始参数, 使用不同算法进行 100 次仿真试验, 部分结果如表 4 所示。

表 4 PSO 算法和 IPSO 算法仿真结果

Table 4 Some experimental results of PSO algorithm

参数	PSO仿真结果					平均值
T_U/s	41	40	37	54	32	40.8
T_A/s	241	227	244	261	217	238
$T_{A\text{-}T}$/s	400	366	384	416	341	381.4
$L_{A\text{-}T}$/m	1.86	2.68	2.23	1.56	1.72	2.01
参数	IPSO仿真结果					平均值
T_U/s	35	30	25	30	42	34.4
T_A/s	180	217	203	175	210	197
$T_{A\text{-}T}$/s	344	347	253	230	361	307
$L_{A\text{-}T}$/m	1.69	1.83	0.83	1.53	1.62	1.5

综上所述, 使用 IPSO 搜索算法的 UAV&AUV 系统能更快地搜索到目标, 且最终的平均跟踪距离更小, 相较于传统算法能更有效地解决 UAV&AUV 系统的跨域协同路径在线规划问题。

5 结论

文中探究了 AUV&UAV 异构无人系统在进行水下目标跨域协同搜索与跟踪任务时的路径规划问题, 针对 PSO 算法容易陷入局部最优以及适应性不足的问题进行改进, 在满足无人平台约束的要求下, 可高效完成了对水下目标的跨域协同搜索跟踪任务。主要工作如下:

1) 介绍了 AUV&UAV 系统的数学模型, 对 AUV、UAV 及水下目标的功能进行了定义, 并将整个任务分为搜索阶段和跟踪阶段, 明确了两阶段的目标分别是使得系统的总搜索空间最大化并实现对目标的精确追踪;

2) 以 PSO 算法为基础, 在粒子更新公式中引入自适应学习因子调控策略, 并参考遗传算法中的精英保存策略对算法进行优化; 通过对 UAV 先发现目标的情况进行仿真, 证明了所提出的 IPSO 算法能够成功应对这类搜索任务, 且效率优于 PSO 算法;

3) 在建模过程中, UAV、AUV 和水下目标都采用了固定高度, 降低了算法的复杂性, 更易求解, 但难以探测到做三维非定深运动的水下目标, 具有一定的局限性。

在 AUV&UAV 系统搜索和跟踪过程中, 对其抗干扰性能以及海流影响并未考虑过多, 未来将进一步优化算法, 使其能适应更复杂的场景中。另外, AUV&UAV 系统跨域协同的边缘智能处理能力是否满足实际部署过程中的响应精度和计算误差等也有待进一步研究。

参考文献:

[1] 郝紫霄, 王琦. 基于声呐图像的水下目标检测研究综述[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(2): 339-348.
Hao Zixiao, Wang Qi. Underwater target detection based on sonar image[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(2): 339-348.

[2] 熊伟, 朱洪峰, 崔亚奇. 在线学习的循环自适应机动目标跟踪算法[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 444-456.
Xiong Wei, Zhu Hongfeng, Cui Yaqi, et al. Recurrent adaptive maneuvering target tracking algorithm based on online learning[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 444-456.

[3] 张鑫明, 韩明磊, 余益锐, 等. 潜艇与UUV协同作战发展现状及关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(5): 497-508.
Zhang Xinming, Han Minglei, Yu Yirui, et al. Development and key technologies of submarine-UUV cooperat-

ive operation[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(5): 497-508.

[4] 王晓慧, 黄刚, 丁洁, 等. 基于改进型ADRC算法的无人水面侦察艇轨迹跟踪[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(3): 286-292.
Wang Xiaohui, Huang Gang, Ding Jie, et al. Trajectory tracking of unmanned surface reconnaissance vessel based on improved ADRC algorithm[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(3): 286-292.

[5] 郭银景, 鲍建康, 刘琦, 等. AUV实时避障算法研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(4): 351-358, 369.
Guo Yinjing, Bao Jiankang, Liu Qi, et al. Research progress of real-time obstacle avoidance algorithms for unmanned undersea vehicle: A review[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(4): 351-358, 369.

[6] 杨勇, 丁勇, 黄鑫城. 改进APF与Bezier相结合的多无人机协同避碰航路规划[J]. 电光与控制, 2018, 25(11): 36-41, 47.
Yang Yong, Ding Yong, Huang Xincheng. Multi-UAV cooperative collision avoidance route planning based on improved artificial potential field and bezier curve[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 36-41, 47.

[7] Zu W, Fan G, Gao Y, et al. Multi-UAVs cooperative path planning method based on improved RRT algorithm[C]// 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Auto-mation(ICMA). Changchun, Jilin, China: IEEE, 2018: 1563-1567.

[8] 包昕幼. 浅水区域无人探测艇编队巡航路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[9] Liu Y, Song R, Bucknall R, et al. Intelligent multi-task allocation and planning for multiple unmanned surface vehicles(USVs) using self-organising maps and fast marching method[J]. Information Sciences: An International Journal, 2019, 496: 180-197.

[10] Han G J, Long X H, Zhu C, et al. A high-availability data collection scheme based on multi-AUVs for underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(5): 1010-1022.

[11] 马朋, 张福斌, 徐德民. 基于距离量测的双领航多AUV协同定位队形优化分析[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 256-262.
Ma Peng, Zhang Fubin, Xu Demin. Optimality analysis for formation of MAUV cooperative localization with two leaders based on range measurements[J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 256-262.

[12] Ridao P, Carreras M, Ribas D, et al. Intervention AUVs: The next challenge[J]. Annual Reviews in Control, 2015, 40: 227-241.

[13] Ni J J, Liu Y, Wu L Y, et al. An improved spinal neural system-based approach for heterogeneous AUVs cooperative hunting[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(2): 672-686.

[14] 王宁, 梁晓龙, 张佳强, 等. 跨域无人集群协同反潜搜索方法研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-10[2024-04-01]. https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0073.

[15] Bella S, Belbachir A, Belalem G. A centralized autonomous system of cooperation for UAVs-monitoring and USVs-cleaning[M]//Unmanned Aerial Vehicles. Hershey: IGI Global, 2019: 347-375.

[16] Yu W, Kin H L, Chen L. Cooperative path planning for heterogeneous unmanned vehicles in a search-and-track mission aiming at an underwater target[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6782-6787.

[17] Yu W. Coordinated path planning for an unmanned aerial-aquatic vehicle(UAAV) and an autonomous underwater vehicle(AUV) in an underwater target strike mission [J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 162-173.

[18] 杨海清, 芦斌. 基于改进蚁群算法的水下无人机路径规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10): 216-220.
Yang Haiqing, Lu Bin. Research on path planning of underwater UAV based on improved ant colony algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(10): 216-220.

[19] Shen C, Shi Y, Buckham B. Integrated path planning and tracking control of an AUV: A unified receding horizon optimization approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(99): 1163-1173.

[20] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// 1995 IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings. Perth, Western Australia: IEEE, 1995.

[21] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Anchorage, AK, USA: IEEE, 1998.

(责任编辑: 杨力军)