引用格式：李维豪, 施孟佶, 王朝阳, 等. 基于分布式滑模预测控制的 AUV 集群多目标围捕方法 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(4): 541-553.
Li Weihao, Shi Mengji, Wang Zhaoyang, et al. Distributed sliding model predictive control-based multi-target enclosing for autonomous underwater vehicle swarm[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(4): 541-553. (in Chinese)

基于分布式滑模预测控制的 AUV 集群多目标围捕方法

李维豪[1]，施孟佶[1*]，王朝阳[2]，林伯先[1]，秦开宇[1]

（1. 电子科技大学航空航天学院，成都 611731；2. 中原工学院智能感知与仪器学院，郑州 451191）

摘要：针对自主水下潜航器集群多目标围捕任务中存在的局部感知受限、模型不确定性及未知外部扰动等问题，提出一种融合分布式状态观测与模型预测控制的分组协同围捕方案。首先，构建多目标围捕任务场景下的潜航器集群动力学模型，设计具备局部信息融合能力的分布式状态观测器，实现多目标状态的并行估计与全局一致性重构。进而，基于任务关联性与空间拓扑特征，将集群划分为若干功能子群体，形成“子群体–目标”耦合结构。在此基础上，针对每个子群体设计带约束的模型预测控制器，通过在有限时域内滚动求解最优控制序列，实现对各自目标的动态围捕。所提方法在控制过程中综合考虑输入饱和及协同约束，兼顾控制精度与系统鲁棒性。仿真结果验证了该方法在多目标动态环境下的有效性与稳定性，具有良好的工程适应性与推广潜力。

关键词：AUV 集群；多目标围捕；滑模预测控制；分布式观测器
中图分类号：TP13 **文献标志码：**A DOI: 10.12178/1001-0548.2025094

Distributed sliding model predictive control-based multi-target enclosing for autonomous underwater vehicle swarm

LI Weihao[1], SHI Mengji[1*], WANG Zhaoyang[2], LIN Boxian[1], and QIN Kaiyu[1]

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. School of Intelligent Perception and Instrumentation, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: To address the challenges of limited local perception, model uncertainty, and unknown external disturbances in multi-target enclosing tasks for autonomous underwater vehicle (AUV) swarms, this paper proposes a group cooperative enclosing strategy that integrates a distributed observer with model predictive control (MPC). First, a dynamic model of the AUV swarm is constructed under a multi-target enclosing scenario. A distributed observer with local information fusion capability is designed to enable parallel estimation of multiple target states and achieve global consensus-based reconstruction. Subsequently, based on task relevance and spatial topology, the swarm is divided into several functional subgroups, forming a dynamic “subgroup–target” coupling structure. For each subgroup, a constrained MPC controller is designed to dynamically enclose its assigned target by solving an optimal control sequence over a finite prediction horizon in a receding horizon fashion. The proposed approach explicitly considers input saturation and inter-agent cooperation constraints, thereby achieving a balance between control accuracy and system robustness. Simulation results demonstrate the effectiveness and stability of the proposed method in dynamic multi-target environments, highlighting its strong engineering applicability and potential for practical deployment.

Key words: autonomous underwater vehicle swarm; multi-target enclosing; sliding model predictive control; distributed observer

随着海洋资源开发与水下智能作战需求增长，自主水下潜航器（autonomous underwater vehicle, AUV）已广泛应用于侦察、测绘、勘探、监测及搜救等任务[1-4]。然而，在多目标作战与压制场景中，目标数量多、分布广、机动性强，传统单 AUV 或集中规划方式难以满足需求。AUV 集群可

收稿日期：2025−04−30
基金项目：四川省自然科学基金面上重点项目（2024NSFSC0021）；中央高校基本科研业务费专项资金（ZYGX2025K028）
作者简介：李维豪，博士生，主要从事无人集群系统协同控制方面的研究。
*通信作者 E-mail: maangat@126.com

凭借并行协同优势实现多目标同步感知与分布式包围。但水下环境中无线电波传播受限，导致传统的通信手段在海水中几乎失效，AUV 之间通常依赖于带宽极窄、时延大、频繁丢包的声学通信方式[5]。此外，由于光学、雷达等常规感知手段在水下易受浑浊度、海流及地形干扰，AUV 个体在执行任务时通常只能获取局部范围内的观测信息[6]。这种“低带宽通信 + 局部感知”的双重限制，使得集群内部难以实现全局状态同步，严重制约了信息共享、任务协同与统一控制策略的有效实施。再者，AUV 动力学建模存在误差，受海流扰动与目标机动影响显著[7]。如何在局部感知与通信受限条件下，实现多目标状态估计与协调控制，并设计具备动态适应与鲁棒性的控制策略，成为 AUV 集群协同围捕控制的关键问题。

近年来，针对 AUV 集群在复杂环境下的动态目标围捕控制问题，学者已开展大量研究。在单目标场景中，文献 [8] 利用视觉引导与海流估计设计扩展状态观测器，实现未知扰动下的稳定圆形围捕；文献 [9] 进一步引入事件触发与模糊系统建模，降低通信与能耗。针对多 AUV 协同围捕单目标，文献 [10] 融合分布式观测器与模糊预测，实现未知动力学下的有序环形编队；文献 [11] 结合有限时间模糊预测控制与控制屏障函数，确保障碍物环境下的安全围捕。随着应用拓展，单目标方案难以满足多目标作战与探测需求。文献 [12] 基于分布式拍卖与量子粒子群优化实现集群分组与快速收缩，文献 [13] 通过观测器估计目标几何中心并结合模糊神经优化实现多目标环绕围捕控制。但现有研究多假设目标集中，缺乏分散多簇态势下的分组围捕与动态调度设计，且基于模型预测控制（model predictive control, MPC）的多目标围捕仍研究不足。

相较传统控制方法，MPC 具备天然的滚动优化特性，能够在动态变化环境中兼顾路径规划、能量管理与约束处理，且易于融入安全约束与性能指标。近年来，MPC 逐渐成为 AUV 及无人水面舰艇（unmanned surface vehicles, USVs）运动规划与控制领域的重要研究方向[14-16]。针对多 AUV 操作系统协同作业问题，文献 [17] 提出了一种基于非线性 MPC 的方法，实现了静态障碍环境下协同物体搬运控制。该方法充分考虑了操作过程中的运动学奇异性、关节极限、输入饱和等约束，通过设计负载分配系数与局部反馈控制策略，实现了各 AUV 操作系统在不依赖在线通信的情况下的协同搬运，且在仿真与实物实验中验证了其有效性。

从更广泛的角度看，文献 [18] 系统综述了近年来基于 MPC 的 AUV 运动规划与控制研究进展。该文指出，随着感知、通信与计算能力的持续提升，MPC 凭借其滚动优化机制与系统约束处理能力，在复杂动态海洋环境下展现出良好的航迹规划与姿态控制性能，并在提升系统自主性与运行安全性方面具有广泛的应用潜力。此外，针对异构水面–水下系统的协同控制问题，文献 [19] 提出了一种基于 MPC 的鲁棒分布式会合控制方法，设计了融合管道结构的非线性 MPC 策略，有效应对了系统扰动、输入限制及安全约束等关键问题。通过引入并行求解机制与辅助约束设计，实现集群在扰动环境下的安全无碰撞会合控制。总体而言，MPC 在 AUV 及广义海洋系统控制领域展现出广阔的发展前景，不仅具备处理复杂约束与环境扰动的能力，还体现出良好的系统可扩展性与实时优化特性，为实现水下作业的智能化与协同化提供了坚实的技术支撑。然而，现有关于 MPC 在 AUV 领域的研究，主要集中于编队跟踪[20-22]、单目标围捕[23-24]或多 AUV 协同会合[25] 等任务，较少涉及针对多个动态目标的分散围捕问题。特别是在目标分布广泛、态势演化迅速的复杂水下环境中，由于受限于低带宽、高延迟的水声通信通道以及感知范围局部化等物理约束，AUV 集群系统普遍面临状态信息获取不完全、交互频率受限与全局一致性难以保证等根本性问题。这些限制不仅显著削弱了集群成员间的协同能力，也对控制策略的时效性与全局有效性提出了更高要求。

综上所述，尽管已有研究在 AUV 集群协同围捕控制方面取得了一定进展，但多数方法依赖于稳定通信链路或完备状态信息的前提假设，难以直接应用于实际海洋场景。因此，如何在感知受限、动力学不确定与外部扰动作用下，基于 MPC 框架实现 AUV 集群对多个目标的灵活分组与协同围捕，仍然是一个亟须突破的关键挑战。因此，本文将基于分布式观测与滑模预测控制方法，解决受限环境下的 AUV 集群多目标围捕问题。

1 AUV 集群目标围捕问题描述与控制方案总体设计

1.1 多目标–多 AUV 系统拓扑结构建模

本文考虑M个 AUV 和N个目标，所有 AUV 可

被划分为N个子群，表示为$\mathcal{O}_k$，$k=1,2,\cdots,N$，从而保证对每个目标实现分群围捕。对于 AUV 集群，各子群由g_k个节点组成，其中$\sum_{k=1}^{N} g_k = M$。令$\mathcal{O}_f=\{1,2,\cdots,M\}$和$\mathcal{O}_l=\{1,2,\cdots,N\}$分别为 AUV 集群和围捕目标的集合。而后，定义 AUV 子群的集合为$\{\mathcal{O}_{f1},\mathcal{O}_{f2},\cdots,\mathcal{O}_{fN}\}$，其满足$\mathcal{O}_{fj}\neq\varnothing(j=1,2,\cdots,N)$，$\cup_{j=1}^{N}\mathcal{O}_{fj}=\mathcal{O}_f$和$\mathcal{O}_{fj}\cap\mathcal{O}_{fs}=\varnothing(j,s\in\{1,2,\cdots,N\};j\neq s)$。进一步，令$\mathcal{G}_F=(\mathcal{O}_f,\mathcal{E}_f,\boldsymbol{\mathcal{W}}_f)$表示 AUV 之间的通信拓扑，其由节点集合$\mathcal{O}_f$、边集合$\mathcal{E}_f$和加权邻接矩阵$\boldsymbol{\mathcal{W}}_f=[w_{ij}]_{M\times M}$组成。若$(j,i)\in\mathcal{E}_f$，则$w_{ij}>0$；否则，$w_{ij}=0$。若 AUV$_i$能获取到目标$k$的信息，则$w_{i0k}>0$；否则，$w_{i0k}=0$。进一步，可得多目标−多 AUV 组成的增广拓扑结构的拉普拉斯矩阵如下：

$$\boldsymbol{\mathcal{L}}_{FL}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\mathcal{L}}_1 & \boldsymbol{\mathcal{L}}_2\\ \boldsymbol{0}_{N\times M} & \boldsymbol{0}_{N\times N}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{\mathcal{L}}_1=[l_{ij}]_{M\times M}$。若$i\neq j$，则$l_{ij}=-w_{ij}$。反之，则有：

$$l_{ij}=\sum_{m=1}^{M} w_{im}+\sum_{k=1}^{N} w_{i0k} \tag{2}$$

假设 1　$\{\mathcal{O}_{f1},\mathcal{O}_{f2},\cdots,\mathcal{O}_{fN}\}$是 AUV 集合$\mathcal{O}_f$的一个无环划分。

假设 2　每个子组内 AUV 之间的通信拓扑包含一棵生成树，以对应的目标作为根节点。

基于假设 1 与假设 2，$\boldsymbol{\mathcal{L}}_1$具有如下形式：

$$\boldsymbol{\mathcal{L}}_1=\begin{bmatrix}\mathcal{L}_{f1} & 0 & \cdots & 0\\ \mathcal{L}_{f21} & \mathcal{L}_{f2} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \mathcal{L}_{fN1} & \mathcal{L}_{fN2} & \cdots & \mathcal{L}_{fN}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，$\mathcal{L}_{fi}$表示子组$\mathcal{O}_{fi}$中跟随者之间的交互。子组$\mathcal{O}_{fi}$和$\mathcal{O}_{fj}$之间的交互定义为$\mathcal{L}_{fij}$。

假设 3　对于任意给定的子组$\mathcal{O}_i$和$\mathcal{O}_j$，其中，$i,j\in\{1,2,\cdots,N\}$，$i\neq j$，$\mathcal{L}_{fij}$中每一行的和等于零。

引理 1　基于假设 1～3，$-\boldsymbol{\mathcal{L}}_1^{-1}\boldsymbol{\mathcal{L}}_2$具有如下形式：

$$-\boldsymbol{\mathcal{L}}_1^{-1}\boldsymbol{\mathcal{L}}_2=\begin{bmatrix}\overline{w}_1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \overline{w}_2 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \overline{w}_N\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，$\overline{w}_i=\boldsymbol{I}_{g_i}$，$i=1,2,\cdots,N$。

1.2　AUV 系统数学模型

针对图 1 所示的 AUV 系统，本文在以下运动特性假设基础上建立数学模型：首先，考虑到 AUV 在水下航行过程中通常处于弱机动状态，其横滚运动对整体控制影响较小，可在建模中忽略；其次，在多目标−多 AUV 围捕任务中，集群系统采用分层部署策略于不同深度开展协同作业。基于上述假设，AUV 系统动力学特性可简化为包含纵荡、横荡与艏摇 3 个自由度的二维平面运动模型。

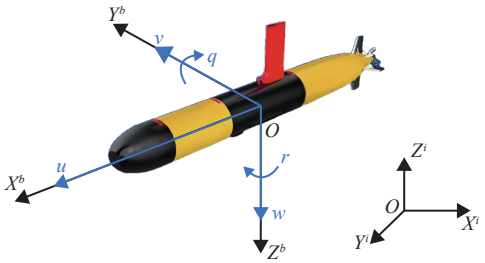


图 1　AUV 运动模型

在此基础上，本文定义 AUV 的动态模型如下所示：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\eta}}_i&=\boldsymbol{R}(\psi_i)\boldsymbol{v}_i\\ \boldsymbol{M}_i\dot{\boldsymbol{v}}_i+\boldsymbol{C}_i(\boldsymbol{v}_i)\boldsymbol{v}_i+\boldsymbol{D}_i(\boldsymbol{v}_i)\boldsymbol{v}_i&=\boldsymbol{\tau}_i+\boldsymbol{\tau}_{iw}\end{aligned} \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{\eta}_i=[x_i,y_i,\psi_i]^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{v}_i=[u_i,v_i,r_i]^{\mathrm{T}}$分别为惯性坐标系下的位置航向和载体坐标系下的速度状态。此外，$\boldsymbol{\tau}_i$和$\boldsymbol{\tau}_{iw}$分别为系统的控制输入和外部扰动；$\boldsymbol{R}(\psi_i)\in\mathbb{R}^{3\times3}$为旋转矩阵；$\boldsymbol{M}_i=\mathrm{diag}\{m_{11},m_{22},m_{33}\}$为惯性矩阵；$\boldsymbol{D}_i(\boldsymbol{v}_i)=\mathrm{diag}\{d_{11},d_{22},d_{33}\}$和$\boldsymbol{C}_i(\boldsymbol{v}_i)\in\mathbb{R}^{3\times3}$为阻尼矩阵和科里奥利向心力矩阵，具体为：

$$\boldsymbol{D}=\mathrm{diag}\{-X_u-X_{u|u|}u\quad -Y_v-Y_{v|v|}|v|\quad -N_r-N_{r|r|}|r|\} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{M}=\mathrm{diag}\{m-X_{\dot{u}}\quad m-Y_{\dot{v}}\quad I_z-N_{\dot{r}}\} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -(m-Y_{\dot{v}})v\\ 0 & 0 & (m-X_{\dot{u}})u\\ (m-Y_{\dot{v}})v & -(m-X_{\dot{u}})u & 0\end{bmatrix} \tag{8}$$

假设 4　集群内的节点被视为刚体，忽略其形变弯曲。

假设 5　水下不确定扰动未知但有界，即满足：

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\tau}_{iw}\|&\leqslant W_0\quad W_0\in R^+\\ \|\dot{\boldsymbol{\tau}}_{iw}\|&\leqslant W_1\quad W_1\in R^+\end{aligned} \tag{9}$$

1.3　多目标围捕问题建模

基于上述分析，考虑$\mathcal{G}(\mathcal{V}_\kappa,\mathcal{E}_\kappa)(\kappa=1,2,\cdots,n_\kappa)$的 AUV 集群多目标围捕系统。在每个子群中，都存在 1 个围捕目标$o_1^\kappa\in\mathcal{V}_\kappa$，AUV 集群的节点表示为$o_1^\kappa$，$o_2^\kappa,\cdots,o_{n_\kappa}^\kappa\in\mathcal{V}_\kappa\left(\sum_{\kappa=1}^{m}n_\kappa=n\right)$。结合式 (1)，第$\kappa$个子群节点的系统模型可以如式 (10) 和式 (11) 所示：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{p}}_i^{\kappa}=\boldsymbol{J}_{ip}^{\kappa}(\psi_i)\boldsymbol{\upsilon}_{ip}^{\kappa}\\ \dot{\boldsymbol{\upsilon}}_{ip}^{\kappa}=\boldsymbol{M}_{ip}^{-1}\left(-\boldsymbol{C}_{ip}^{\kappa}\boldsymbol{\upsilon}_{ip}^{\kappa}-\boldsymbol{D}_{ip}^{\kappa}\boldsymbol{\upsilon}_{ip}^{\kappa}+\boldsymbol{\tau}_{ip}^{\kappa}\right)\end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases}\psi_i^{\kappa}=r_i^{\kappa}\\ \dot{r}_i^{\kappa}=\dfrac{1}{I_z-\Psi_{\dot{r}}}\left[\left(-\Psi_r-\Psi_{r|r|}\left|r_i^{\kappa}\right|\right)r_i^{\kappa}+\tau_i^{\kappa}\right]\end{cases} \tag{11}$$

基于上述系统建模与问题背景，对于所描述的 AUV 集群系统，其围捕任务可定义为：通过合理设计子群控制策略，驱动各子群成员运动，使对应目标始终处于其构成的凸包内部，同时整体保持一定角速度的旋转编队结构。换言之，该任务等价于使目标始终被其对应子群所围绕，并在相对空间中形成封闭且具有动态协同性的旋转队形，即：

$$\lim_{t\to\infty}D_{po}^{\kappa}(t)=\min_{q\in co(\mathcal{V})}\left\|\boldsymbol{p}_0^{\kappa}(t)-\boldsymbol{q}_{po}^{\kappa}(t)\right\|=0 \tag{12}$$

$$\begin{cases}\lim\limits_{t\to\infty}\rho_i^{\kappa}=\left\|\boldsymbol{p}_i^{\kappa}-\boldsymbol{p}_0^{\kappa}\right\|=r_d\\ \lim\limits_{t\to\infty}\gamma_{i+}^{\kappa}-\gamma_i^{\kappa}+\varepsilon_i^{\kappa}=\lim\limits_{t\to\infty}\gamma_{j+}^{\kappa}-\gamma_j^{\kappa}+\varepsilon_j^{\kappa}\end{cases} \tag{13}$$

然而，受限于水下环境复杂性以及载体所搭载传感器的固有局限性，AUV 集群在执行围捕任务时对目标状态的观测精度常受到显著影响。这种感知能力的限制使得各 AUV 难以准确获取围捕目标的实时状态信息，进而对集群间协同控制精度与任务执行可靠性造成不利影响。因此，如何在局部感知受限环境下构建高效分布式状态观测器，已成为实现水下 AUV 集群分布式多目标围捕关键技术问题之一。

1.4 围捕控制方案总体设计

图 2 展示了 AUV 集群多目标围捕控制的总体框架，主要包括分布式状态观测器与滑模预测控制器两大核心模块。前者用于在感知受限条件下实现目标状态的动态估计，后者结合滑模思想与滚动优化，实现约束条件下的多目标稳定协同围捕。后续将分别对这两部分进行详细设计与分析。

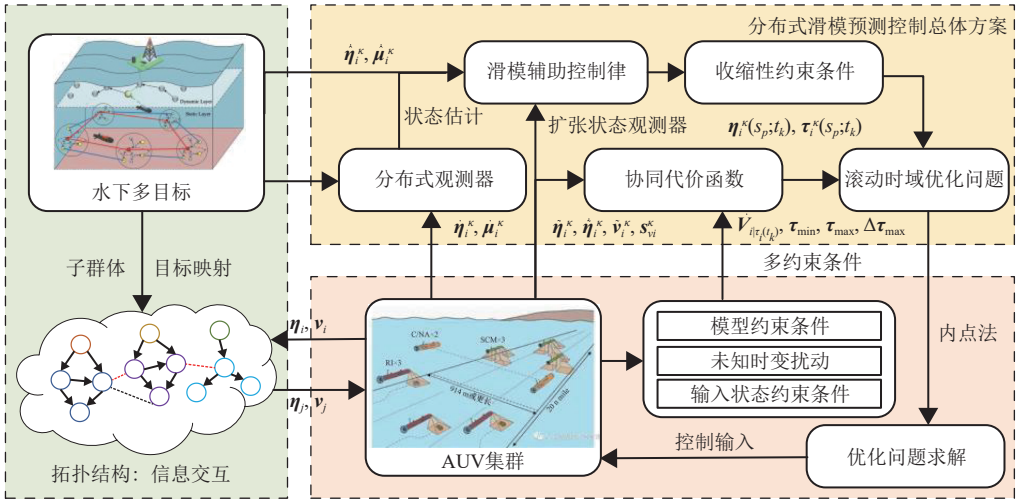


图 2 基于分布式滑模预测控制的 AUV 集群多目标围捕总体方案图

2 分布式状态观测器设计

2.1 基于局部感知信息的分布式观测器

本小节旨在解决 AUV 集群围捕多目标过程中感知受限问题。考虑各集群内节点无法直接获取对应围捕目标状态信息，设计如下快速分布式观测器：

$$\dot{\hat{p}}_{i1}^{\kappa}=-l_{11}\mathrm{sig}^{\gamma_{11}}\left[\sum_{j=2}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{p}_{i1}^{\kappa}-\hat{p}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{p}_{i1}^{\kappa}\right]-l_{12}\mathrm{sgn}\left[\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{p}_{i1}^{\kappa}-\hat{p}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{p}_{i1}^{\kappa}\right] \tag{14}$$

$$\dot{\hat{\upsilon}}_{i1}^{\kappa}=-l_{21}\mathrm{sig}^{\gamma_{12}}\left[\sum_{j=2}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{\upsilon}_{i1}^{\kappa}-\hat{\upsilon}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{\upsilon}_{i1}^{\kappa}\right]-l_{22}\mathrm{sgn}\left[\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{\upsilon}_{i1}^{\kappa}-\hat{\upsilon}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{\upsilon}_{i1}^{\kappa}\right] \tag{15}$$

$$\dot{\hat{\psi}}_{i1}^{\kappa}=-l_{31}\mathrm{sig}^{\gamma_{21}}\left[\sum_{j=2}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{\psi}_{i1}^{\kappa}-\hat{\psi}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{\psi}_{i1}^{\kappa}\right]-l_{32}\mathrm{sgn}\left[\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{\psi}_{i1}^{\kappa}-\hat{\psi}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{\psi}_{i1}^{\kappa}\right] \tag{16}$$

$$\dot{\hat{r}}_{i1}^{\kappa}=-l_{41}\mathrm{sig}^{\gamma_{22}}\left[\sum_{j=2}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{r}_{i1}^{\kappa}-\hat{r}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{r}_{i1}^{\kappa}\right]-l_{42}\mathrm{sgn}\left[\sum_{j=2}^{n}a_{ij}^{\kappa}\left(\hat{r}_{i1}^{\kappa}-\hat{r}_{j1}^{\kappa}\right)+b_i^{\kappa}\tilde{r}_{i1}^{\kappa}\right] \tag{17}$$

式中，$\tilde{p}_{i1}^{\kappa}=\hat{p}_{i1}^{\kappa}-p_1^{\kappa}$；$\tilde{\upsilon}_{i1}^{\kappa}=\hat{\upsilon}_{i1}^{\kappa}-\upsilon_{i1}^{\kappa}$；$\tilde{\psi}_{i1}^{\kappa}=\hat{\psi}_{i1}^{\kappa}-\psi_{i1}^{\kappa}$；$\tilde{r}_{i1}^{\kappa}=\hat{r}_{i1}^{\kappa}-r_{i1}^{\kappa}$。此外，式中 $l_{11},l_{21},l_{31},l_{41},l_{12},l_{22},l_{32},l_{42}$ 以及 $\gamma_{11},\gamma_{12},\gamma_{21},\gamma_{22}$ 为估计器参数，且需要满足：

$$l_{11},l_{21},l_{31},l_{41}>0,\ 0<\gamma_{11},\gamma_{12},\gamma_{21},\gamma_{22}<1$$
$$l_{12}>\left\|\dot{\boldsymbol{p}}_1^{\kappa}\right\|_{\infty},\ l_{22}>\left\|\dot{\boldsymbol{\upsilon}}_1^{\kappa}\right\|_{\infty},\ l_{32}>\left\|\dot{\boldsymbol{\psi}}_1^{\kappa}\right\|_{\infty},\ l_{42}>\left\|\dot{\boldsymbol{r}}_1^{\kappa}\right\|_{\infty} \tag{18}$$

2.2　系统收敛性分析

针对多 AUV 集群协同围捕系统中存在的局部感知受限问题，即部分节点无法直接观测目标状态信息的实际情形，本文对分布式观测器系统（式(14)~式 (17)）提出如下定理，以刻画其在该类感知受限条件下的收敛特性。

定理 1　对于由式 (5) 描述的 AUV 集群系统，若假设 1～假设 3 成立，且观测器参数满足条件式 (18)，则所设计的分布式观测器（见式 (14)～式 (17)）所对应的状态估计误差在有限时间内收敛。

证明：考虑式 (14) 所描述的分布式观测系统，根据$\tilde{\boldsymbol{p}}_{i1}^{\kappa}=\hat{\boldsymbol{p}}_{i1}^{\kappa}-\boldsymbol{p}_1^{\kappa}$，有以下动态成立：

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_{\kappa}=&-l_{11}\mathrm{sig}^{\gamma_{11}}\left[(H_{\kappa}\otimes\boldsymbol{I}_3)\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}\right]-\\&l_{12}\mathrm{sgn}\left[(H_{\kappa}\otimes\boldsymbol{I}_3)\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}\right]-\boldsymbol{I}_3\otimes\dot{\boldsymbol{p}}_1^{\kappa}\end{aligned} \tag{19}$$

进一步定义 Lyapunov 函数：

$$V_{\kappa}=\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\left((H\otimes\boldsymbol{I}_3)\right)\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa} \tag{20}$$

对其求导可得：

$$\dot{V}_{\kappa}=-l_{11}\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\mathrm{sig}^{\gamma_{11}}(\boldsymbol{\zeta}_{\kappa})-l_{12}\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\mathrm{sgn}(\boldsymbol{\zeta}_{\kappa})-\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa} \tag{21}$$

式中：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}&=(H\otimes\boldsymbol{I}_3)\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}\\\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}&=\boldsymbol{I}_3\otimes\dot{\boldsymbol{p}}_1^{\kappa}\end{aligned} \tag{22}$$

根据 Hölder 不等式，有：

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}\|_1&=\left|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\mathrm{sig}^{\gamma_{11}}(\boldsymbol{\zeta}_{\kappa})\right|^{\frac{1}{1+\gamma_{11}}}\left[2(n_{\kappa}+1)\right]^{\frac{\gamma_1}{1+\gamma_{11}}}\\\left|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}\right|&\leqslant\left\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}^{\mathrm{T}}\right\|_1\left\|\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}\right\|_{\infty}\end{aligned} \tag{23}$$

因此，式 (21) 可改写为：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\kappa}\leqslant&-l_{11}(2n_k-1)^{-\gamma_{11}}\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}\|_2^{1+\gamma_{11}}-\left(l_{12}-\left\|\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}\right\|_{\infty}\right)\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}\|_2\leqslant\\&-l_{11}(2n_k-1)^{-\gamma_{11}}\lambda_{\min}^2(H_{\kappa})\|\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}\|_2^2-\\&\left(l_{12}-\left\|\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}\right\|_{\infty}\right)\lambda_{\min}(H_{\kappa})\|\tilde{\boldsymbol{p}}_{\kappa}\|_2\end{aligned} \tag{24}$$

结合$\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}\|_2\leqslant\|\boldsymbol{\zeta}_{\kappa}\|_1$，式 (24) 可化简为：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\kappa}\leqslant&-\frac{2^{\frac{1+\gamma_{11}}{2}}l_{11}(2n_k-1)^{-\gamma_{11}}\lambda_{\min}^{1+\gamma_{11}}(H_{\kappa})}{\lambda_{\max}^{\frac{1+\gamma_{11}}{2}}(H_{\kappa})}V^{\frac{1+\gamma_1}{2}}-\\&\frac{\sqrt{2}\left(l_{12}-\left\|\dot{\boldsymbol{p}}_L^{\kappa}\right\|_{\infty}\right)\lambda_{\min}(H_{\kappa})}{\lambda_{\max}^{\frac{1}{2}}(H_{\kappa})}V^{\frac{1}{2}}\end{aligned} \tag{25}$$

因此，式 (14) 所提分布式观测器的估计误差可实现半全局有限时间收敛。

综上所述，参照式 (19)～式 (25) 所采用的分析步骤，可以证明所构造的分布式观测器（见式 (15)～式 (17)）同样具备半全局有限时间收敛性质。该结果表明，本文所设计的观测器能够在有限时间内实现集群内所有 AUV 对目标状态的快速一致估计，从而为后续的协同控制提供可靠的状态支撑。证毕。

3　滑模预测控制器设计

本节将详细介绍基于滑模预测控制器的 AUV 编队控制器的设计，主要包括基于滑模的辅助控制律设计和滑模预测控制器设计。需要说明的是，本文所称“滑模预测控制器”，是指将滑模辅助控制律嵌入 MPC 框架中，具体而言，将滑模面或滑模动态所定义的控制规律作为 MPC 的约束条件之一，从而在优化过程中保证系统满足稳定性约束，并提升系统对扰动与不确定性的鲁棒性。该设计思路不同于传统将滑模控制与 MPC 并列使用的方式，强调的是滑模律作为优化约束的辅助作用。

3.1　基于扩张状态观测器的滑模辅助控制律设计

首先，设计积分滑模辅助控制律。定义系统的速度误差如下：

$$\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}=\boldsymbol{v}_i^{\kappa}-\boldsymbol{v}_{i,r}^{\kappa} \tag{26}$$

基于此，构建速度误差积分滑模面：

$$\boldsymbol{s}_{i,e}^{\kappa}=\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}+\boldsymbol{K}_1\int_0^t\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}(t)\mathrm{d}t \tag{27}$$

式中，$\boldsymbol{K}_1=\mathrm{diag}(k_{11},k_{22},k_{33})$为正定的增益矩阵。

结合式 (26)，对$\boldsymbol{s}_{i,e}^{\kappa}$进行求导，有：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{s}}_i^{\kappa}=&\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}+\left(\dot{\boldsymbol{v}}_i^{\kappa}-\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^{\kappa}\right)=\\&\boldsymbol{M}'^{-1}\left(-\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}-\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}+\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}+\boldsymbol{\tau}_{i,f}^{\kappa}\right)+\\&\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}-\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^{\kappa}\end{aligned} \tag{28}$$

为确保滑模面快速收敛至零，采用指数趋近律：

$$\dot{\boldsymbol{s}}_i^{\kappa}=-\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^{\kappa}-\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^{\kappa}\right) \tag{29}$$

式中，$\boldsymbol{K}_p=\mathrm{diag}\left(k_{p1},k_{p2},k_{p3}\right)$；$\boldsymbol{K}_d=\mathrm{diag}\left(k_{d1},k_{d2},k_{d3}\right)$为正定的趋近因子矩阵。

基于式 (28) 和 (29)，设计如下辅助控制律：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}=&\boldsymbol{M}'\left(\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^{\kappa}-\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}-\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^{\kappa}-\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^{\kappa}\right)\right)+\\&\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}+\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}-\boldsymbol{\tau}_{i,f}^{\kappa}\end{aligned} \tag{30}$$

考虑受外部干扰和内部不确定性动态的集总扰动的 AUV 动态模型，本节通过设计扩张状态观测

器以补偿集总扰动。令$\boldsymbol{\mu}_i$和$\boldsymbol{w}_i$为惯性系下的速度和外部时变扰动，根据式 (5)，有：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa=\boldsymbol{\mu}_i^\kappa\\ \dot{\boldsymbol{\mu}}_i^\kappa=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa)\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}_i^\kappa+\boldsymbol{\zeta}_i^\kappa(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa,\boldsymbol{\mu}_i^\kappa)+\boldsymbol{w}_i^\kappa\end{cases}\tag{31}$$

式中：

$$\boldsymbol{\zeta}_i^\kappa(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa,\boldsymbol{\mu}_i^\kappa)=\boldsymbol{S}(\dot{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa)-\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa)\boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}_i^\kappa)+\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v}_i^\kappa)\right]\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa)\boldsymbol{\mu}_i^\kappa\tag{32}$$

定义$\hat{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa$, $\hat{\boldsymbol{\mu}}_i^\kappa$和$\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa$分别为$\boldsymbol{\eta}_i^\kappa$, $\boldsymbol{\mu}_i^\kappa$和$\boldsymbol{w}_i^\kappa$的估计值，扩展状态观测器模型如下：

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}_i^\kappa=\hat{\boldsymbol{\mu}}_i^\kappa+\boldsymbol{K}_a\boldsymbol{e}_{1i}^\kappa\\ \dot{\hat{\boldsymbol{\mu}}}_i^\kappa=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa)\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}_i^\kappa+\boldsymbol{\zeta}_i^\kappa(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa,\boldsymbol{\mu}_i^\kappa)+\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{e}_{1i}^\kappa+\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\\ \dot{\hat{\boldsymbol{w}}}_i^\kappa=\boldsymbol{K}_c\boldsymbol{e}_{1i}^\kappa\end{cases}\tag{33}$$

式中，$\boldsymbol{e}_{1i}^\kappa=\boldsymbol{\eta}_i^\kappa-\hat{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa$表示多集群 AUV 系统状态的观测误差；$\boldsymbol{K}_a=\mathrm{diag}(k_a,k_a,k_a)$；$\boldsymbol{K}_b=\mathrm{diag}(k_b,k_b,k_b)$以及$\boldsymbol{K}_c=\mathrm{diag}(k_c,k_c,k_c)$为正定矩阵。

进一步，定义$\boldsymbol{e}_{2i}^\kappa=\boldsymbol{\mu}_i^\kappa-\hat{\boldsymbol{\mu}}_i^\kappa$和$\boldsymbol{e}_{3i}^\kappa=\boldsymbol{w}_i^\kappa-\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa$。那么，观测器误差$\boldsymbol{e}_i^\kappa=\mathrm{col}(\boldsymbol{e}_{1i}^\kappa,\boldsymbol{e}_{2i}^\kappa,\boldsymbol{e}_{3i}^\kappa)$满足：

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i^\kappa=\boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_i^\kappa+\boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\tag{34}$$

式中：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{K}_a & \boldsymbol{I}_5 & \boldsymbol{0}_5\\ -\boldsymbol{K}_b & \boldsymbol{0}_5 & \boldsymbol{I}_5\\ -\boldsymbol{K}_c & \boldsymbol{0}_5 & \boldsymbol{0}_5\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_5\\ \boldsymbol{0}_5\\ \boldsymbol{I}_5\end{bmatrix}\tag{35}$$

结合式 (6)~式 (10)，可以用观测值$\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa$替代式 (5) 中的集总扰动$\boldsymbol{\tau}_{i,f}^\kappa$。此时，基于扩张状态观测器的积分滑模辅助控制律设为：

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{\tau}}_i^\kappa=\boldsymbol{M}'\left(\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^\kappa-\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^\kappa-\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^\kappa-\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^\kappa\right)\right)+\\ \boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa+\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa-\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\end{aligned}\tag{36}$$

基于上述辅助控制律设计，式 (5) 可以改写为：

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^\kappa=\boldsymbol{M}'^{-1}\left(-\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa-\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa+\boldsymbol{\tau}_i^\kappa+\hat{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\right)\triangleq\\ f\left(\boldsymbol{v}_{i,r}^\kappa,\boldsymbol{\tau}_i^\kappa,\boldsymbol{\tau}_{i,f}^\kappa\right)\end{aligned}\tag{37}$$

定理 2 对于式 (5)，在假设 1～5 成立的条件下，若控制输入由式 (36) 给出，且扩张状态观测器中参数满足$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{H}\boldsymbol{A}\leqslant-\chi\boldsymbol{I}_{15}$和$\varepsilon_1+\varepsilon_2-\lambda_q<0$ $(0<\varepsilon_1,\varepsilon_2<1)$成立，则闭环系统是渐近稳定的。

证明：由于整个控制系统分为滑模控制部分和扰动补偿部分，因此考虑如下李雅普诺夫函数：

$$V_i^\kappa=\frac{1}{2}\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_i^\kappa+\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}_i^\kappa\tag{38}$$

结合式 (29) 和式 (34)，对其求导，可以得到：

$$\begin{aligned}\dot{V}_i^\kappa=\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{M}'^{-1}\left(-\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa-\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^\kappa\right)\boldsymbol{v}_i^\kappa+\boldsymbol{\tau}_i^\kappa+\boldsymbol{\tau}_{i,f}^\kappa\right)\right)+\\ \boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^\kappa-\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^\kappa\right)+\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_i^{\kappa\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{H}\boldsymbol{A})\boldsymbol{e}_i^\kappa+\boldsymbol{e}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\end{aligned}\tag{39}$$

将式 (29) 代入，有：

$$\begin{aligned}\dot{V}_i^\kappa\leqslant-\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^\kappa-\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^\kappa\right)-\\ \frac{1}{2}(\chi-\varepsilon_1)\left\|\boldsymbol{e}_i^\kappa\right\|^2+\left\|\boldsymbol{e}_i^\kappa\right\|\|\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\|\overline{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\leqslant\\ -\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^\kappa-\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^\kappa\right)-\\ \frac{1}{2}(\chi-\varepsilon_1-\varepsilon_2)\left\|\boldsymbol{e}_i^\kappa\right\|^2-\frac{1}{2}\varepsilon_2\left\|\boldsymbol{e}_i^\kappa\right\|^2+\\ \left\|\boldsymbol{e}_i^\kappa\right\|\|\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\|\overline{\boldsymbol{w}}_i^\kappa\end{aligned}\tag{40}$$

因此，对于采用如式 (37) 所提控制律的 AUV 系统，在不确定模型和外界扰动情况下以有界误差跟踪其参考轨迹时，其编队跟踪误差随时间$t\to\infty$收敛至紧集$\Omega_{e_i}=\{\boldsymbol{e}_i\,|\,\|\boldsymbol{e}_i\|\leqslant\vartheta_{ei},\ \vartheta_{ei}>2\|\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\|\overline{\boldsymbol{w}}_i/\varepsilon_2\}$。证毕。

3.2 滑模预测控制器设计

基于式 (11)，多目标围捕控制器的表达式为：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{J}_i^{\kappa*}\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(t_k),\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(t_k)\right)=\\ &\min_{\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa*}}J_i^\kappa\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(s;t_k),\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(s;t_k)\right),s\in[t_k,t_k+T_p]\\ &\text{s.t. }a)\ \boldsymbol{\eta}_i^\kappa(s;t_k)=f\left(\boldsymbol{\eta}_i^\kappa(s;t_k),\hat{\boldsymbol{\tau}}_i^\kappa(s;t_k),0\right)\\ &\quad b)\ \boldsymbol{\eta}_i^\kappa(t_k;t_k)=\boldsymbol{\eta}_i^\kappa(t_k),\forall t_k>0\\ &\quad c)\ \left\|\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(t_k+\delta)-\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(t_k)\right\|<\Delta\tau_{\max},\forall t_k>0\\ &\quad d)\ \tau_{\min}\leqslant\left\|\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(t_k)\right\|<\tau_{\max},\forall t_k>0\\ &\quad e)\ \frac{\partial\dot{V}_i^\kappa}{\partial\boldsymbol{v}}f\left(\boldsymbol{v}_{i,r}^\kappa,\boldsymbol{\tau}_i^\kappa\right)\leqslant\frac{\partial\dot{V}_i^\kappa}{\partial\boldsymbol{v}}f\left(\boldsymbol{v}_{i,r}^\kappa,\overline{\boldsymbol{\tau}}_i^\kappa\right)\end{aligned}\tag{41}$$

式中：

$$\begin{aligned}&J_i\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(s;t_k),\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(s;t_k)\right)=\\ &\int_{t_k}^{t_k+T_p}\left[\left\|\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(s;t_k)\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{G}_i}^2+\left\|\boldsymbol{\tau}_i^\kappa(s;t_k)\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}_i}^2\right]\mathrm{d}s+\\ &\left\|\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(T_p+t_k;t_k)\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{P}_i}^2\end{aligned}\tag{42}$$

式中，$\boldsymbol{\eta}_i^\kappa(s;t_k)$为$t_k$时刻预测状态轨迹；$\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^\kappa(s;t_k)$表示预测状态误差；$s\in[t_k,t_k+T_p]$；$T_p$为预测区间。$\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{G}_i=\mathrm{diag}(\Gamma_{G1},\Gamma_{G2},\Gamma_{G3})$，$\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}_i=\mathrm{diag}(\Gamma_{R1},\Gamma_{R2},\Gamma_{R3})$及$\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{P}_i$=$\mathrm{diag}(\Gamma_{P1},\Gamma_{P2},\Gamma_{P3})$为正定的权重矩阵。进一步地，约束式 (41a) 为 AUV 动力学模型，式 (41b) 为初始时刻约束，式 (41c) 和式 (41d) 为控制输入空间约束，式 (41e) 为基于滑模辅助控制律构造的约束收缩条件。

本节所设计的滑模预测控制策略在 MPC 优化问题中引入了基于扩展状态观测器的积分滑模辅助控制律，并以此构建动态收缩型约束条件，从而增

强系统对扰动与不确定性的适应能力，并确保 AUV 动力学系统的闭环稳定性。同时，该辅助控制律的嵌入使得预测控制器在实现滚动优化的同时具备滑模控制所特有的鲁棒性特征，有效提升了控制系统在复杂环境下的稳定性与可靠性。具体而言，稳定性动态约束条件的详细表达式为：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{M}'^{-1}\left(-\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}-\boldsymbol{D}\left(\boldsymbol{v}_i^{\kappa}\right)\boldsymbol{v}_i^{\kappa}+\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}+\boldsymbol{\tau}_{i,f}^{\kappa}\right)\right)+\\&\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{v}_{i,e}^{\kappa}-\dot{\boldsymbol{v}}_{i,r}^{\kappa}+\hat{\boldsymbol{w}}_i^{\kappa}\right)\leqslant\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{s}_i^{\kappa}+\boldsymbol{s}_i^{\kappa\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_d\tanh\left(\boldsymbol{s}_i^{\kappa}\right)\end{aligned}\tag{43}$$

至此，将多目标围捕控制转化为带有稳定性约束的优化问题，通过数值方法在线求解控制输入，并在每个控制周期执行最优输入并更新预测，实现兼具鲁棒性和预测控制优化性能的闭环控制。

3.3　稳定性分析

定理 3　对于式 (5) 所描述的多目标 AUV 围捕问题，若每个采样时刻都存在对应的如式 (41) 所示的跟踪优化问题，且初始时刻式 (41) 有解，则所设计的多目标围捕预测控制器能使闭环系统渐近稳定。

证明：根据定理 1 可知，集群内所有节点对于目标能够实现快速观测。因此后续只需证明优化问题的迭代可行性和预测控制器的闭环稳定性。

首先，假设在$t_k\geqslant t_0$的时刻每个 AUV 对应的如式 (41) 所示的优化问题有可行解，根据定理 2 可知，该可行解$\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa*}(s;t_k)$满足式 (43) 约束。再根据所设滑模辅助控制律，t_{k+1}时刻的可行输入状态为：

$$\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})=\begin{cases}\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_{k+1};t_{k+1}) & s\in[t_{k+1},t_{k+1}+\delta)\\ \boldsymbol{\tau}_i^{\kappa*}(s;t_k) & s\in\left[t_{k+1}+\delta,t_{k+1}+T_p\right)\\ \boldsymbol{\tau}_i^{\kappa*}(t_k+T_p;t_k) & s\in\left[t_k+T_p,t_{k+1}+T_p\right)\end{cases}\tag{44}$$

类似地，由定理 2 可知$\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})$同样满足式 (43) 中的约束条件。因此，当$t_k$时刻优化问题存在可行解时，能够保证$t_{k+1}$的可行解仍然存在。进一步由递归思想可得，如果每个节点在初始时刻存在其相应的可行解，则式 (41) 在未来时刻都存在可行解，即保证了所提滑模预测控制器中优化问题的迭代可行性。

进一步，考虑t_k时刻预测区间内所有 AUV 最优解对应的总代价函数为：

$$\begin{aligned}&V_{\Sigma,t_k}=\sum_{\kappa=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}J_i^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_k)\right)=\\&\min_{\tau_i^*(t_k)}\sum_{\kappa=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{N_p}\left\{\left\|\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(s;t_k)\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{G}_i}^2+\left\|\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_k)\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}_i}^2\right\}\end{aligned}\tag{45}$$

同理，t_{k+1}时刻预测区间内所有 AUV 最优解对应的总代价函数为：

$$\begin{aligned}&V_{\Sigma,t_k}=\sum_{\kappa=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}J_i^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_{k+1}),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_{k+1})\right)=\\&\min_{\tau_i^*(t_{k+1})}\sum_{\kappa=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{N_p}\left\{\left\|\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{G}_i}^2+\left\|\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})\right\|_{\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}_i}^2\right\}\end{aligned}\tag{46}$$

根据优化问题在滚动时域中的迭代可行性，$\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})$可作为$t_{k+1}$时刻闭环系统的可行输入，且满足$\|\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_{k+1})\|_{\boldsymbol{R}_i}^2=\|\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa*}(s;t_k)\|_{\boldsymbol{R}_i}^2$。因此，$t_{k+1}$时刻预测区间内最优解对应的总代价函数可进一步化简为：

$$\begin{aligned}&V_{\Sigma,t_{k+1}}=J_{\Sigma}^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_{k+1}),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_{k+1})\right)=\\&\min_{\tau_i^{\kappa}(t_{k+1})}\sum_{\kappa=1}^{m}\sum_{i=1}^{N}\sum_{s_p=1}^{N_p}\left\{J_i\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_{k+1}+T_p;t_{k+1}),\right.\right.\\&\left.\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_{k+1}+T_p;t_{k+1})\right)+J_i\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(s;t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(s;t_k)\right)-\\&\left.J_i\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t_k;t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_k;t_k)\right)\right\}\leqslant J_{\Sigma}^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_k)\right)-\\&J_i\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_k;t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_k;t_k)\right)\end{aligned}\tag{47}$$

因此，有：

$$J_{\Sigma}^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_{k+1}),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_{k+1})\right)-J_{\Sigma}^*\left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}_i^{\kappa}(t_k),\boldsymbol{\tau}_i^{\kappa}(t_k)\right)\leqslant 0\tag{48}$$

考虑到在每个控制周期内，最优控制输入所对应的系统代价函数值严格小于其他可行解，因此系统代价函数J_{Σ}^*随时间单调递减。结合定理 1 和定理 2，表明在存在未知时变扰动的情况下，所有 AUV 能够完成对多目标的围捕控制。证毕。

本文在设计分布式状态观测器与基于 MPC 的控制器时，基于理想通信假设进行建模与仿真，即默认 AUV 间在采样周期内能够稳定交换信息，且不考虑链路中断与数据包丢失等异常情况。这一设定旨在突出验证所提控制框架的基本有效性与鲁棒性，为后续进一步引入通信不确定性影响的系统建模与分析提供理论基础。在未来研究中，将系统考虑水下通信环境中带宽受限、随机时延及丢包等因素，深入研究非理想通信条件下观测一致性保持、控制器稳定性分析与系统性能评估等问题，以增强方法在实际 AUV 集群中的适应性与工程可落地性。

此外，本文所提出的围捕控制方案设计主要在仿真层面进行验证，未对实时部署的计算耗时与求解效率进行系统测试。在参数设定中，通过选取适中的预测步长与控制周期，初步实现了控制精度与

计算负担的平衡。但考虑到 MPC 在高维、带约束问题中的计算开销，未来研究将进一步开展面向边缘计算平台的控制器部署研究，包括求解器轻量化设计、模型降维优化、并行计算结构引入等，以增强方法的实时性与工程部署能力。

4 仿真验证与分析

4.1 初始条件设置

为验证本文所提出的基于滑模预测的 AUV 集群控制方法的有效性，本文对多目标围捕任务进行了数值仿真实验。仿真场景设定为一个由 11 艘 AUV 组成的集群系统，其通信拓扑结构如图 3 所示。围捕任务中包含 3 个动态目标，目标的运动轨迹均为不同高度的正弦曲线，具体表达形式如下：

$$\begin{cases} y_1 = 10\sin(0.125x_1) & z = 0 \\ y_2 = 10\cos(0.125x_2) & z = 7 \\ y_3 = 10\sin(0.125x_3) & z = 15 \end{cases} \tag{49}$$

式中，z 表示距水底的高度，即 $z = 0$ 对应水底，z 值越大表示离水面越近。

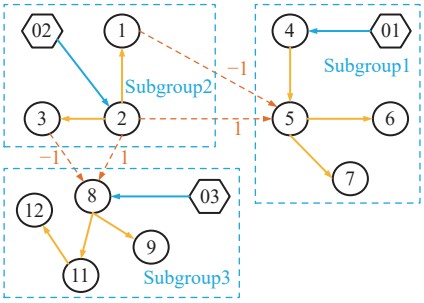


图 3 AUV 集群通信拓扑

此外，假设所有 AUV 具有结构相同的动力学模型，其具体参数如表 1 所示，初始状态如表 2 所示。

表 1 AUV 系统模型参数

变量	取值	单位
m	185	kg
X_u	−70	kg/s
Y_v	−100	kg/s
N_r	−50	kgm^2
$X_{\dot{u}}$	−30	kg
$Y_{\dot{v}}$	−80	kg
$N_{\dot{r}}$	−30	kgm^2
$X_{u\|u\|}$	−200	kg/m
$N_{v\|v\|}$	−100	kgm^2
$N_{r\|r\|}$	−100	kgm^2

控制器参数设置为$\Gamma_{G1} = 1$，$\Gamma_{G2} = 1$，$\Gamma_{G3} = 10$，$\Gamma_{R1} = 10$，$\Gamma_{R2} = 10$，$\Gamma_{R3} = 10$，$\Gamma_{P1} = 1$，$\Gamma_{P2} = 1$，$\Gamma_{P3} = 10$，$\boldsymbol{K}_p = \mathrm{diag}(6,6,6)$，$\boldsymbol{K}_d = \mathrm{diag}(10,10,10)$，$\boldsymbol{K}_a = \mathrm{diag}(8,8,8)$，$\boldsymbol{K}_b = \mathrm{diag}(12,12,12)$，$\boldsymbol{K}_c = \mathrm{diag}(15,15,15)$。预测区间设置为$N_p = 7$。观测器参数如表 3 所示。

表 2 AUV 集群的初始状态

编号	$\boldsymbol{\eta}(0)$	编号	$\boldsymbol{\eta}(0)$
AUV1-1	$[-8,-6,0]^{\mathrm{T}}$	AUV2-3	$[-10,0,7]^{\mathrm{T}}$
AUV1-2	$[0,-5,0]^{\mathrm{T}}$	AUV3-1	$[-8,-6,15]^{\mathrm{T}}$
AUV1-3	$[-7,0,0]^{\mathrm{T}}$	AUV3-2	$[0,-5,15]^{\mathrm{T}}$
AUV1-4	$[-1,3,0]^{\mathrm{T}}$	AUV3-3	$[-7,0,15]^{\mathrm{T}}$
AUV2-1	$[-11,15,7]^{\mathrm{T}}$	AUV3-4	$[-1,3,15]^{\mathrm{T}}$
AUV2-2	$[-15,10,7]^{\mathrm{T}}$		

表 3 观测器与控制器中的参数

参数	取值	参数	取值
l_{11}	2	γ_{11}	0.8
l_{21}	2	γ_{12}	0.8
l_{31}	5	γ_{21}	0.8
l_{41}	5	γ_{22}	0.8
l_{12}	0.8	μ_p	10
l_{22}	0.8	μ_ψ	10
l_{32}	0.8	γ_3	0.9
l_{42}	0.8	γ_4	0.9

不失一般性，本节考虑集群所受到的未知时变扰动设为：

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{id}}^1 = \boldsymbol{w}_{\mathrm{id}}^2 = \begin{bmatrix} 2\sin(2t) + 1.8\sin(1.5t) \\ 3\sin(t) + 1.5\sin(1.5t) \\ 0.5\sin(1.5t) + 0.3\sin(t) \end{bmatrix} \tag{50}$$

值得注意的是，本文中观测器和控制器相关参数的设置，主要依据系统收敛性和控制性能的平衡需求。具体而言，观测器中的增益参数参考了已有文献中的设计经验，并结合多目标围捕任务的特点，通过多组预实验调试获得，确保在扰动存在的情况下能够实现较好的状态估计效果。控制器中的权重参数则综合考虑了控制精度与执行能耗，在满足目标追踪性能的前提下尽量降低控制输入幅度。此外，预测时域和控制周期的设置兼顾了控制效果与计算复杂度，保证仿真过程中优化问题在每个周期内能够稳定求解。后续研究将进一步开展参数敏感性分析，并尝试引入自适应参数调节机制，以提升方法在复杂环境下的适应能力和推广价值。

4.2 仿真结果与分析

在给定条件下，仿真结果如图 4～图 14 所示。其中，图 4 描述了多目标与 AUV 集群的运动轨迹，图 5 则呈现了不同时刻下 AUV 子群的分布状态。仿真结果表明，所有 AUV 均能有效实现对多目标的协同围捕控制，并以各目标为中心形成稳定编队。

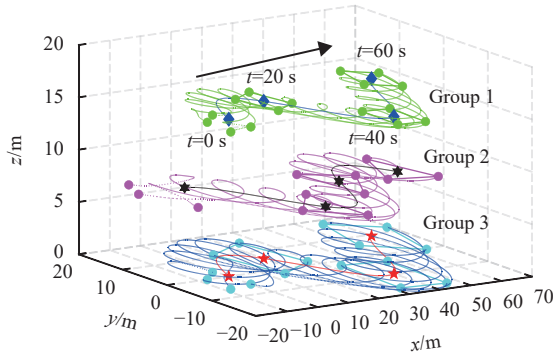
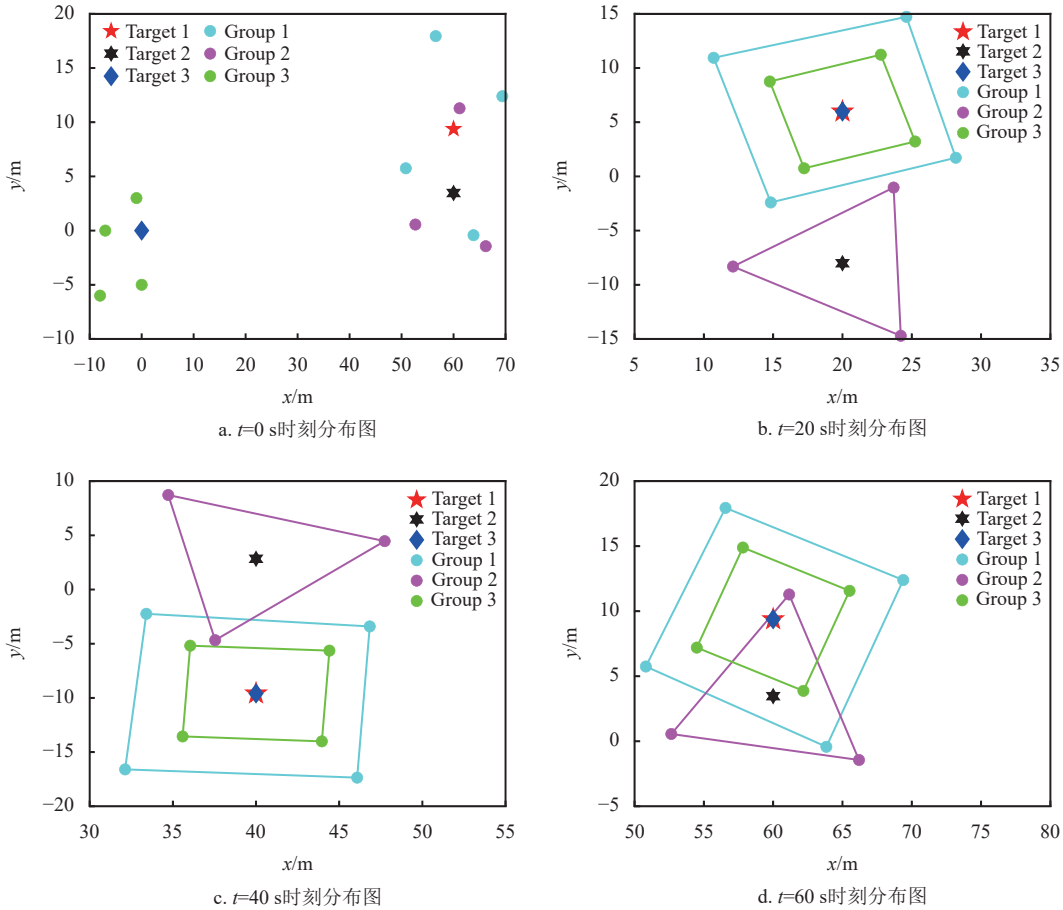


图 4　AUV 集群多目标围捕运动轨迹

图 6～图 8 系统展示了 3 个子群在追踪各自目标过程中，对目标实时位置的观测误差变化曲线。从图中可以清晰观察到，在所提出的分布式观测器作用下，各子群对目标位置的观测误差均表现出良好的收敛性。尤其在系统运行初期，所有子群对目标位置的观测误差均能在较短时间内迅速衰减，并最终稳定于可接受的误差范围内，充分验证了该分布式观测器在目标状态估计方面的有效性与实时性。图 9～图 11 进一步展示了各子群对复杂海洋环境中时变扰动的估计误差变化情况。结果表明，随着扩展状态观测器对扰动信息的逐步修正，各子群的扰动估计误差整体呈现持续收敛趋势，并最终稳定于较小的稳态值，有效削弱了外部扰动对系统性能的影响，提升了系统的环境适应能力与控制鲁棒性。

图 12～图 14 展示了集群内不同子群的状态误差变化情况。从图中可以明显看出，尽管各子群面临着不同的工作环境和任务要求，但在统一控制框架的协调下，所有子群的状态误差均表现出一致的收敛行为。这一结果不仅验证了本文所提出的控制算法的有效性，也体现了系统在应对复杂任务时所展现出的鲁棒性和稳定性。



a. t=0 s时刻分布图　　b. t=20 s时刻分布图

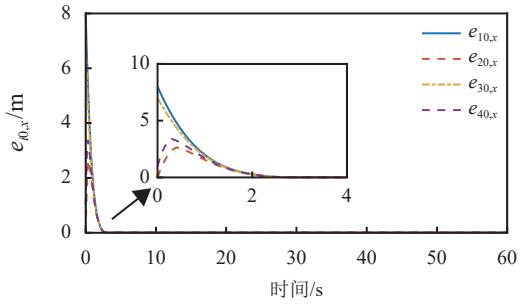
c. t=40 s时刻分布图　　d. t=60 s时刻分布图

图 5　不同时刻各集群分布情况

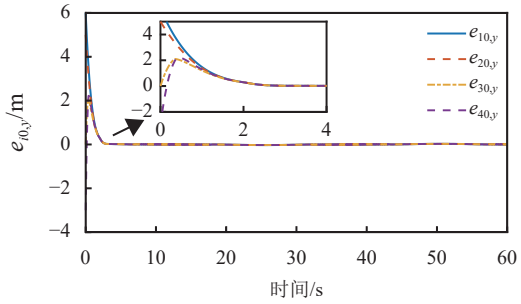
4.3　仿真结果对比分析

为进一步验证本文所提出的基于滑模预测的分组协同围捕控制方法的有效性与优势，本节选取具有代表性的现有控制方法进行对比仿真分析，如分布式鲁棒模型预测控制（distributed robust model predictive control, DRMPC）[22] 和分布式滑模控

制（distributed sliding mode control, DSMC）[26]方法。通过在相同初始条件、目标轨迹与扰动环境下进行数值实验，比较各方法，从而评估所提控制方案，即分布式滑模预测控制（distributed sliding model predictive control, DSMPC）的性能与鲁棒性。

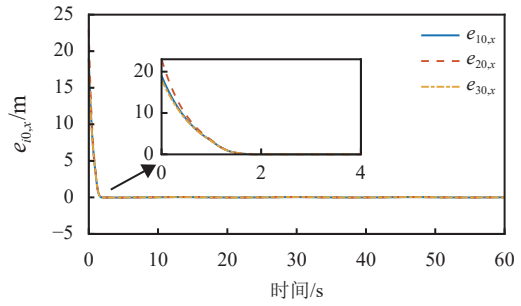


a. x方向观测误差

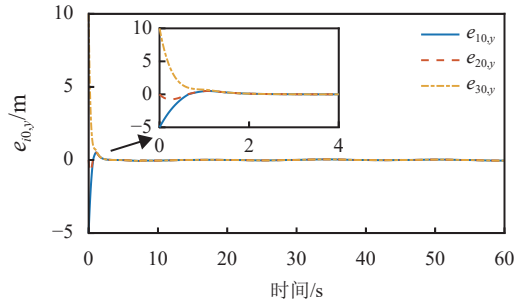


b. y方向观测误差

图 6　子群 1 对围捕目标位置的观测误差

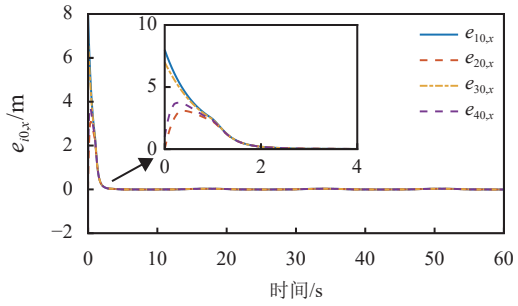


a. x方向观测误差

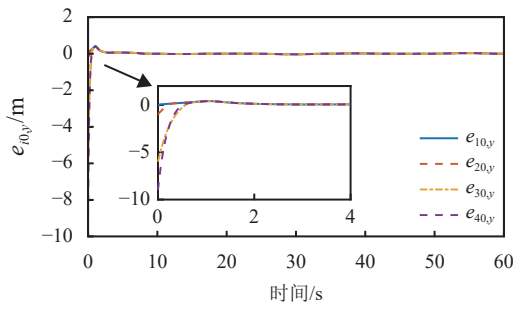


b. y方向观测误差

图 7　子群 2 对围捕目标位置的观测误差



a. x方向观测误差



b. y方向观测误差

图 8　子群 3 对围捕目标位置的观测误差

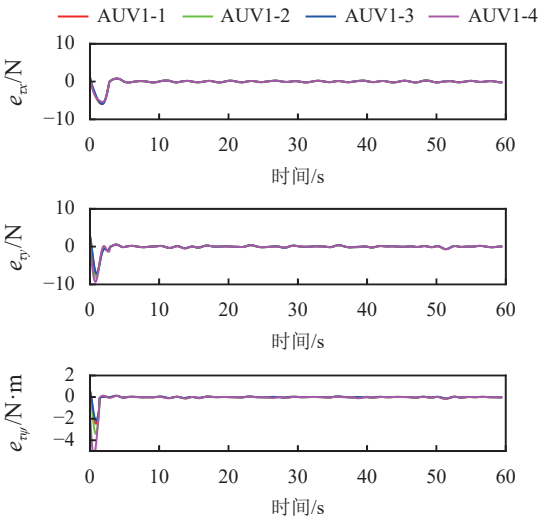
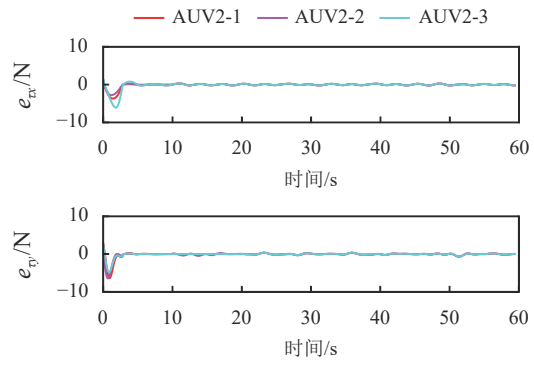


图 9　子群 1 对外部扰动的估计误差



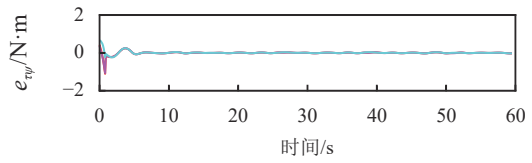


图 10　子群 2 对外部扰动的估计误差

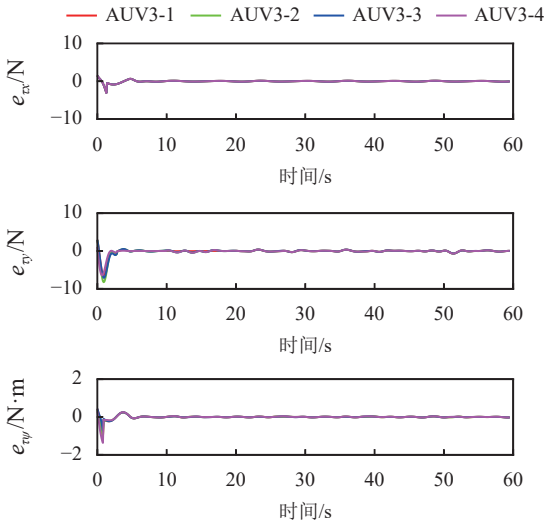


图 11　子群 3 对外部扰动的估计误差

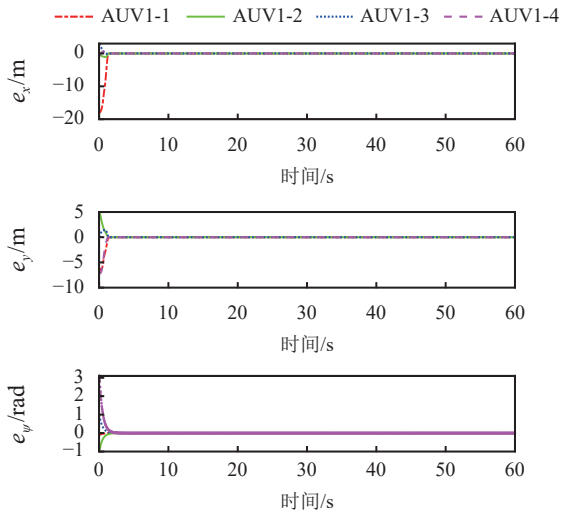
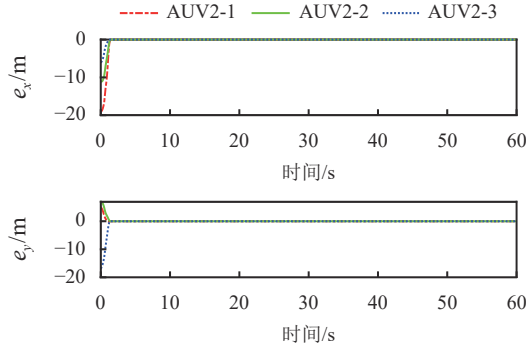


图 12　围捕过程中子群 1 的状态误差



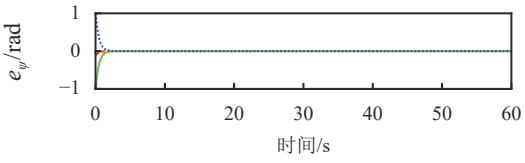


图 13　围捕过程中子群 2 的状态误差

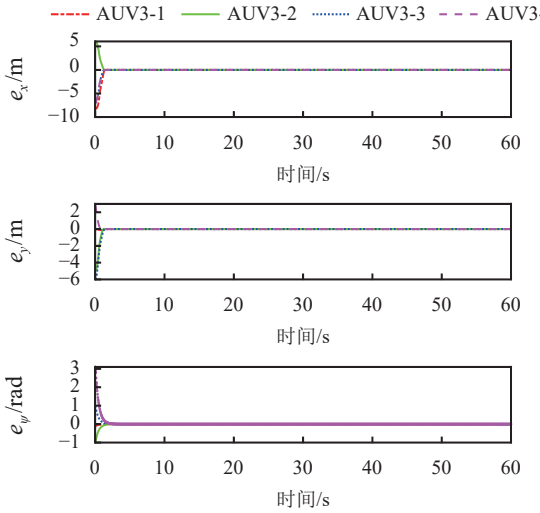


图 14　围捕过程中子群 3 的状态误差

图 15 为不同方法作用下围捕过程中的平均跟踪误差。可以看出，相比于已有文献的方法，所提 DSMPC 方法在收敛性和稳定性方面都具有一定优势。表 4 为不同方法作用下集群平均均方根误差（root mean squared error, RMSE）、误差绝对值积分（integrated absolute error, IAE）、时间误差绝对值积分（integrated time absolute error, ITAE）以及编队收敛时间（convergence time, CT）对比结果。其中，均方根误差为$e_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\dfrac{1}{T}\int_0^{\mathrm{T}}e^{\mathrm{T}}(t)e(t)\mathrm{d}t}$，误差绝对值积分定义为$e_{\mathrm{IAE}}=\int_0^t|e(t)|\mathrm{d}t$，时间误差绝对值积分定义为$e_{\mathrm{ITAE}}=\int_0^t t|e(t)|\mathrm{d}t$，收敛时间定义为 $t_{\mathrm{ct}}=\inf\{t\geqslant 0:\|e(\tau)\|_\infty<0.01,\forall\tau\geqslant t\}$。从表 4 中可以看出，相比于传统滑模控制方法，本文所提的滑模预测控制方法的稳态性能和收敛性能都有着优异的表现。相比于鲁棒模型预测控制方法，本文所提方法的收敛性与其类似，但从时间误差绝对值积分指标能够看出本文所提方法的稳态性能更好。这是由于 DSMPC 能够通过 MPC 的滚动优化和滑模控制的鲁棒性结合，在保证抗扰能力的同时，显著提升稳态精度和收敛性能。

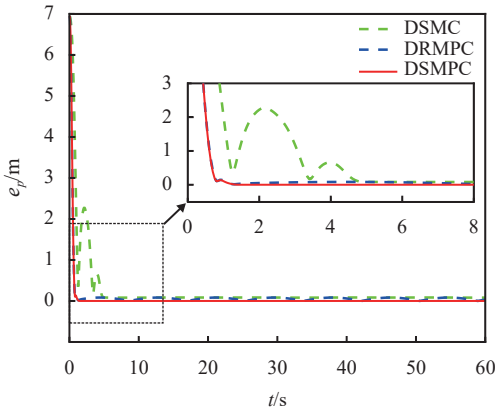


图 15 不同方法作用下围捕过程中的平均跟踪误差

表 4 不同方法作用下指标对比结果

方法	e_{RMSE}	e_{IAE}	e_{ITAE}	t_{ct}/s
DSMC	0.81	285.8	644.3	4.2
DRMPC	0.52	123.5	374.9	1.5
DSMPC	0.48	61.1	128.7	1.5

5 结束语

本文针对多目标水下围捕任务中 AUV 集群所面临的感知受限、模型不确定性以及控制协调困难等问题，提出了一种融合分布式状态观测与 MPC 的分组协同围捕方案。该方案的主要创新点包括以下 3 个方面。

1）针对 AUV 集群在多目标动态围捕任务中对柔性调度的需求，本文基于任务关联性与空间拓扑特征构建了“子群体–目标”耦合结构，并为每个子群体设计了带约束的模型预测控制器。通过滚动优化实现动态预测与决策，支持多目标约束下的自主分组与高效协同围捕，有效提升了 AUV 集群在目标分散与动态变化场景下的适应能力与执行效率。相比于文献 [12] 中基于拍卖机制与粒子群优化方法实现的静态任务划分策略，本文方法能够在任务持续演化和目标异构分布条件下完成子群体划分与编队调整，显著增强了系统在复杂环境下的任务响应速度与调度灵活性。

2）针对水下复杂环境中感知信息受限的问题，本文设计了一种具备局部信息融合能力的分布式状态观测器，实现了多目标状态的并行估计与全局一致性重构，为分组协同控制提供了可靠的动态态势支撑，显著增强了 AUV 集群在局部感知条件下的整体感知与协同决策能力。相较于依赖目标几何中心全局估计的方法，本文通过构建“子群体–目标”映射关系，使各子群体能够独立感知并协同重构对应目标状态，从而有效应对多簇目标分布的情形，提升了 AUV 集群在感知受限环境下的任务适应性与决策鲁棒性。

3）在控制器设计方面，本文系统地考虑了外部扰动、AUV 动力学不确定性以及输入饱和等复杂约束，提出了一种融合滑模动态面与模型预测控制的分布式滑模预测控制器。该方法通过在有限时域内进行滚动优化，实现了性能优化与约束满足的有机统一，有效提升了控制系统在动态不确定环境下的稳态精度与鲁棒性。相比仅具备约束处理能力的分布式鲁棒 MPC 方法[22]，以及不具备全局优化机制的传统分布式滑模控制方法[26]，本文所设计的围捕控制方案在控制精度、收敛速度与系统抗扰性能之间取得了更优的平衡，仿真结果进一步验证了其在多目标围捕任务中的有效性。

后续研究将进一步考虑水下通信链路中的带宽受限、信息丢失与传输延迟等因素对分布式观测器与 MPC 收敛性与稳定性的影响，设计可靠的协同控制方案。此外，还将拓展面向三维空间动态目标的多层级子群体编队围捕控制方案，并引入强化学习等数据驱动优化方法，以提升围捕控制方案在复杂未知环境中的自主决策能力与适应性能。

参 考 文 献

[1] 庞舟岐, 郝程鹏, 林晓波, 等. 基于深度强化学习的水下无人航行器高速目标捕获路径规划[J]. 控制理论与应用, 2025, 42(10): 1968-1980.
Pang Zhouqi, Hao Chengpeng, Lin Xiaobo, et al. High speed target acquisition path planning for underwater unmanned vehicles based on deep reinforcement learning[J]. Control Theory & Applications, 2025, 42(10): 1968-1980. (in Chinese)

[2] Sahoo A, Dwivedy S K, Robi P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 145-160.

[3] Wang Zhao, Xiang Xianbo, Duan Yu, et al. Adversarial deep reinforcement learning based robust depth tracking control for underactuated autonomous underwater vehicle[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 130: 107728.

[4] 王景璟, 魏维, 王永越, 等. 水下自主潜航器集群协同围捕技术[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 637-650.
Wang Jingjing, Wei Wei, Wang Yongyue, et al. Autonomous underwater vehicle swarm collaborative hunting technologies[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 637-650. (in Chinese)

[5] 王则青, 徐海祥, 余文曌, 等. 欠驱动多 AUV 双环指定时间三维编队控制[J]. 兵工学报, 2025, 46(8): 250046.
Wang Zeqing, Xu Haixiang, Yu Wenzhao, et al. Dual-loop

prescribed-time 3D formation control of underactuated multi-AUVs[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(8): 250046. (in Chinese)

[6] Hong Lin, Wang Xin, Zhang Desheng, et al. Vision-based underwater inspection with portable autonomous underwater vehicle: Development, control, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 2197-2209.

[7] Cao Xiang, Ren Lu, Sun Changyin. Research on obstacle detection and avoidance of autonomous underwater vehicle based on forward-looking sonar[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(11): 9198-9208.

[8] Jiang Yue, Peng Zhouhua, Wang Dan, et al. Line-of-sight target enclosing of an underactuated autonomous surface vehicle with experiment results[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 832-841.

[9] Peng Zhouhua, Jiang Yue, Wang Jun. Event-triggered dynamic surface control of an underactuated autonomous surface vehicle for target enclosing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3402-3412.

[10] Jiang Yue, Peng Zhouhua, Wang Dan, et al. Cooperative target enclosing of ring-networked underactuated autonomous surface vehicles based on data-driven fuzzy predictors and extended state observers[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(7): 2515-2528.

[11] Jiang Yue, Peng Zhouhua, Liu Lu, et al. Safety-critical cooperative target enclosing control of autonomous surface vehicles based on finite-time fuzzy predictors and input-to-state safe high-order control barrier functions[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(3): 816-830.

[12] Chen Mingzhi, Zhu Daqi, Pang Wen, et al. An effective strategy for distributed unmanned underwater vehicles to encircle and capture intelligent targets[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12570-12580.

[13] Jiang Yue, Peng Zhouhua, Wang Jun. Constrained control of autonomous surface vehicles for multitarget encirclement via fuzzy modeling and neurodynamic optimization[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(3): 875-889.

[14] Wen Guanghui, Lam J, Fu Junjie, et al. Distributed MPC-based robust collision avoidance formation navigation of constrained multiple USVs[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 1804-1816.

[15] Zhao Ran, Miao Maozhi, Lu Jiamin, et al. Formation control of multiple underwater robots based on ADMM distributed model predictive control[J]. Ocean Engineering, 2022, 257: 111585.

[16] Cai Mingxue, Wang Yu, Wang Shuo, et al. Autonomous manipulation of an underwater vehicle-manipulator system by a composite control scheme with disturbance estimation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(1): 1012-1022.

[17] Heshmati-Alamdari S, Karras G C, Kyriakopoulos K J. A predictive control approach for cooperative transportation by multiple underwater vehicle manipulator systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(3): 917-930.

[18] Wei Henglai, Shi Yang. Mpc-based motion planning and control enables smarter and safer autonomous marine vehicles: perspectives and a tutorial survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(1): 8-24.

[19] Jia Zehua, Lu Haibo, Chen Hongtian, et al. Robust distributed cooperative rendezvous control for heterogeneous marine vehicles using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(8): 11002-11013.

[20] Wei Henglai, Shen Chao, Shi Yang. Distributed Lyapunov-based model predictive formation tracking control for autonomous underwater vehicles subject to disturbances[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(8): 5198-5208.

[21] Er M J, Gong Huibin, Liu Yi, et al. Intelligent trajectory tracking and formation control of underactuated autonomous underwater vehicles: A critical review[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024, 54(1): 543-555.

[22] Xu Bo, Wang Zhaoyang, Li Weihao, et al. Distributed robust model predictive control-based formation-containment tracking control for autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 115210.

[23] Yan Zheping, Yan Jinyu, Cai Sijia, et al. Distributed TMPC formation trajectory tracking of multiple underwater unmanned vehicles with uncertainties and external perturbations[J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117160.

[24] Xu Jian, Cui Yunfei, Xing Wen, et al. Distributed active disturbance rejection formation containment control for multiple autonomous underwater vehicles with prescribed performance[J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 112057.

[25] Jia Zehua, Zhang Kunwu, Shi Yang, et al. Safety-preserving Lyapunov-based model predictive rendezvous control for heterogeneous marine vehicles subject to external disturbances[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(9): 5244-5256.

[26] Chen Bo, Hu Jiangping, Zhao Yiyi, et al. Finite-time observer based tracking control of uncertain heterogeneous underwater vehicles using adaptive sliding mode approach[J]. Neurocomputing, 2022, 481: 322-332.

责任编辑　张　莉