

# 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述

张伟,王乃新,魏世琳,杜雪,严浙平  
(哈尔滨工程大学 自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 随着水下无人潜航器技术的发展和日渐成熟,单一水下无人潜航器已不能满足需求的发展,这就使多水下无人潜航器以集群的形式互相协作执行任务成为了水下无人潜航器发展的必然趋势。本文从军事领域和民用领域两方面介绍了国外主要水下无人潜航器集群项目,包括项目设立目标和发展情况;分析了水下无人潜航器集群的一些关键技术的国内外研究现状和发展趋势,主要包括集群智能控制、通信网络设计、任务规划、路径规划、编队控制和导航定位等方面;最后对水下无人潜航器集群系统发展做出展望。

**关键词:** 水下无人潜航器集群; 集群智能; 路径规划; 任务规划; 编队控制; 通信网络; 关键技术; 导航定位

**DOI:** 10.11990/jheu.201909039

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20200107.1515.002.html>

**中图分类号:** TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2020)02-289-09

## Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies

ZHANG Wei, WANG Naixin, WEI Shilin, DU Xue, YAN Zheping  
(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Despite the development and maturity of unmanned underwater vehicle (UUV) technology, a single UUV can no longer meet development needs, which makes the swarm control and collaborative operation of UUVs an inevitable trend for UUV development. In this paper, we mainly introduce UUV swarm projects in military and civilian areas abroad, including project establishment goals and developments. We also present the most recent domestic and overseas research status of some key technologies of UUV swarm, including control using swarm intelligence, communication network design, mission planning, path planning, formation control, navigation, and localization. Finally, we propose some perspectives regarding UUV swarm systems.

**Keywords:** unmanned underwater vehicle (UUV) swarm; swarm intelligence; path planning; mission planning; formation control; communication network; key technology; navigation and localization

水下无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)从20世纪60年代<sup>[1]</sup>诞生以来,经历了很大的发展。从最初的遥控潜器(remote operated underwater vehicle, ROV)发展到无人无缆并有一定自主性的AUV(autonomous underwater vehicle)。AUV不依赖母船提供动力、机动性强、活动范围大、作业效率高等特点<sup>[1]</sup>使其逐步成为各国研究者的主要研究对象,其各项技术得到了很好的发展,并在海洋资源勘探、侦查监视、反潜等民用和军事领域得到了很好的应用。

随着UUV技术日渐成熟,它所面临的任务的难

度和复杂度也有很大提升,单一UUV已不能满足需求的发展。这就使多UUV以集群的形式互相协作执行任务成为了UUV发展的必然方向,同时也对UUV任务规划、路径规划等关键技术提出了新的要求,并促进了集群智能、编队控制等适应集群发展方向的技术的应用。

相比于单体UUV,集群有以下突出优势<sup>[2]</sup>:

1) 集群系统利用单体自主性能够实现集体决策以及群体级稳态; 2) 集群系统可扩展性很高,个别群内成员的增减不会对系统造成决定性影响; 3) 由于集群系统具有高度可扩展性和稳定性,所以集群系统鲁棒性较强; 4) 集群相比于个体最突出的特点是能够完成个体无法独自完成的任务。本文将重点介绍UUV集群的发展现状和关键技术,为其将来的发展提供参考。

收稿日期: 2019-09-12.

网络出版日期: 2020-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609046).

作者简介: 张伟,男,教授,博士生导师;

王乃新,男,博士研究生.

通信作者: 王乃新, E-mail: naixin.wang@hrbeu.edu.cn

## 1 主要的 UUV 集群项目

### 1.1 军事领域

各国对 UUV 的研究正在向集群化的方向发展,并已被应用在军事领域。2016 年英国在“Unmanned warrior”军事演习中直观的展现了 UUV 集群在军事作战中的关键作用和未来潜力。

#### 1.1.1 持续濒海水下监控网络项目 (PLUSNet)

PLUSNet (persistent littoral undersea surveillance network)<sup>[3]</sup>是由美国海军研究办公室 (ONR) 赞助的一个多机构合作项目,旨在推进沿海监控技术发展,目标是探测和跟踪燃油潜艇。该项目使用固定和移动水下平台,包括具有检测系统的底部节点,具有拖曳阵列的 UUVs,以及带有声学和环境传感器的水下滑翔机。节点组织成集群,与其他集群协同工作,进行大范围的动作。除检测、分类和跟踪等基础功能外,该项目还在自主性、环境适应性和网络结构 3 个关键技术领域取得了研究进展。

#### 1.1.2 协作自主的分布式侦察与探测系统 (CADRE)

CADRE (cooperative autonomy for distributed reconnaissance and exploration)<sup>[4]</sup>系统是协调水下无人航行器的异构集合的框架,用于自主执行面向目标的任务。该系统的开发旨在解决美国海军 UUV 总体规划中提出的海底搜索和调查 (undersea search and survey, USS) 以及通信与导航救援 (communications and navigation aid, C/NA) 功能,其关键属性是可扩展性和模块化。

CADRE 系统包括一个自主水下航行器网络 (AUV, 也称 UUV) 和自主水面航行器 (ASV), 它们自主地同时进行广域海底反水雷 (MCM) 侦查, 同时保持高精度导航和定位。多模式通信架构在 CADRE 系统中起着至关重要的作用, 允许系统中的 UUV 彼此之间还有与各种支持平台保持联系。

CADRE 系统在海底地雷对抗任务的背景下开发, 因此对该系统进行了 2 个关键反水雷任务方案的验证: 1) (365.6~914) m×20 nmile 的狭长区域 (如图 1 所示); 2) 10 nmile×10 nmile 的广域范围。2 种方案均在保持严格的导航精度和协同定位要求的前提下进行。

### 1.2 民用领域

#### 1.2.1 Cocoro 自主水下航行器集群

2011 年, 奥地利 Ganz 人工生命实验室的研究人员发布了当时世界上最大的水下无人航行器集群: CoCoRo 自主水下航行器集群<sup>[5]</sup>。该项目由欧盟资助, Thomas Schmickl 领导, 由 41 个 UUV 组成, 可以协同完成任务, 其主要目的是用于水下监测和搜

索。该集群系统在其行为潜力方面具有可扩展性, 可靠性和灵活性。研究人员通过受到行为学和心理学的实验来研究集体自我认知, 从而允许量化集体认知。

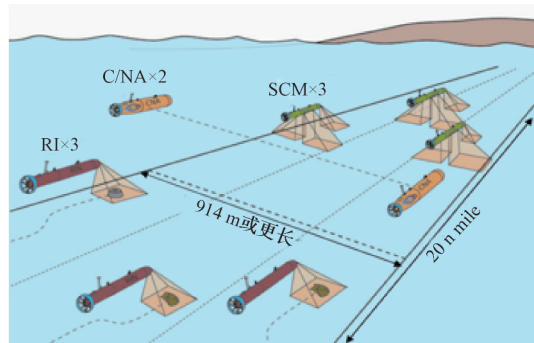


图1 CADRE 系统概念图

Fig.1 Concept diagram of CADRE system

#### 1.2.2 WiMUST-用于地震勘测的 AUV 舰队

WiMUST<sup>[6]</sup> (widely scalable mobile underwater sonar technology) 项目旨在设计和测试协作自主水下航行器系统以简化地震勘测并提供相比于现代拖缆方式的显著优势。WiMUST 系统的主要新颖之处在于使用海洋机器人来捕获地震数据而不是传统的拖缆。

项目利用 UUV 集群牵引小型孔径短拖缆。UUV 充当可重新配置的移动声学网络的感测和通信节点, 并且整个系统表现为用于记录数据的分布式传感器阵列, 数据通过支持船装备的声源射向海床和海底地层的强声波而获得, 如图 2 所示。

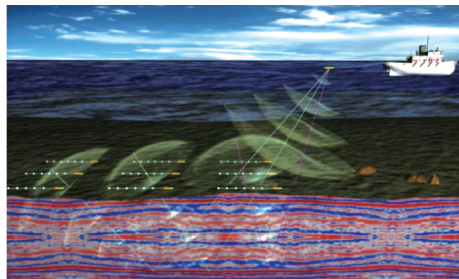


图2 WiMUST 系统工作方式

Fig.2 Work mode of WiMUST system

#### 1.2.3 欧盟 Grex 项目

由欧盟资助的研发项目 GREX<sup>[7]</sup> (2006-2009) 促进了多航行器协作的理论方法和实用工具的发展, 缩小了概念与实践之间的差距。由该项目资助研发的技术一方面通用性很强, 连接预先存在的异构系统。另一方面鲁棒性很强, 能够应对由通信错误引起的问题。

2008 年夏天至 2009 年末, 该项目针对“协调路径跟踪”和“合作视线目标追踪”任务进行了 3 次海上试验。航行器间使用预设的时分媒体访问 (time division medium access, TDMA) 同步架构交换导航

数据,允许每分钟5次交换大约20 Bytes的压缩数据包,同时避免数据包冲突。在有效通信条件下实现了编队航行(如图3所示)和向指定目标聚集等任务。

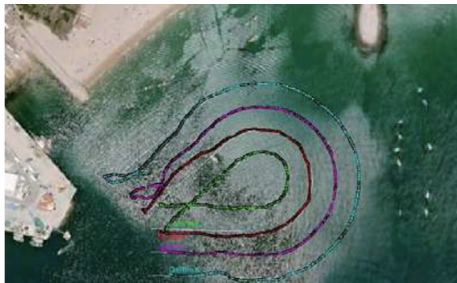


图3 4架航行器的编队航行轨迹

Fig. 3 Formation trace of 4 UUV

除去以上项目以外,还有很多其他已经取得成功或仍在进行中的UUV集群项目:如美国海洋研究局资助的自主海洋采样网络(autonomous ocean sampling network, AOSN)<sup>[8]</sup>;美国新泽西海湾布设的大陆架观测系统(the new jersey shelf observing system)<sup>[9]</sup>;由欧洲委员会资助启动的Co3-AUV自主水下航行器的协同认知控制项目<sup>[10]</sup>;由北约水下研究中心和麻省理工学院完成的通用海洋阵列技术声呐(generic ocean array technology sonar, GOATS)<sup>[11]</sup>项目;英国Nekton研究机构开发的水下多智能体平台(underwater multi-agent platform, UMAP)<sup>[12]</sup>等项目。

通过分析以上项目实例可以发现,国外的UUV集群项目以实用性为主,从实际应用角度出发,提出所面临的问题,并通过理论结合实践的方式寻找解决办法;项目研究更侧重系统稳定性和可扩展性的研究,在此基础上去寻找实现概念设想的方法。

## 2 UUV 集群发展关键技术

### 2.1 集群智能控制算法

集群智能控制算法是集群系统的核心技术,是控制各个单体活动并能将它们联系起来形成一个系统合作执行任务的关键。受自然界群体行为的启发,已有很多智能控制算法被提出,但是由于海底复杂环境和恶劣通信条件的限制,很多算法不能被移植到UUV集群应用当中。因此现有智能算法在海洋环境的应用以及适用UUV集群的新智能控制算法的开发仍是未来UUV集群发展的关键所在。

现阶段对集群控制算法的研究主要还是集中于对已有智能算法的改进,例如严浙平<sup>[13]</sup>在已有单、多智能体强化算法的基础上,提出一种融合了Nash—Q、CE—Q及WoLF—PHC等算法主要思想的多智能体Q学习算法,并将这种算法用于多AUV系统的控制。另外,集群控制算法的研究通常都是

针对某一特殊任务或者目标,引入智能算法以达到优化控制器的目的。例如文献[14–19]分别针对UUV集群的路径跟踪、编队控制和协同围捕等问题,将适合的智能算法引入到海洋环境中,并根据不同问题所存在的不同客观条件对算法进行一定的改进。以上方法基本概括了目前主流的UUV集群智能算法研究方法:将已有智能控制算法针对海洋环境和特定任务进行改进,比较常用于集群控制的算法有:蚁群算法<sup>[20–21]</sup>、人工势场法<sup>[22]</sup>、粒子群算法<sup>[23]</sup>;另外强化学习和机器学习等方法<sup>[24–27]</sup>也一直有学者对其进行集群控制应用方面的研究。UUV集群发展相对较晚,改进已有算法是一种效率较高的方法,但不应该局限于此,文献[28]提出了一种模块化、可扩展的应用于异构多UUV编队协调问题的架构。文献中对硬件扩展时的软件配合扩展升级的研究是值得参考的研究方向。海洋环境的复杂性给UUV的研究增加了很多限制和挑战,同时也为UUV研究创造了更多的可能性,在参考已有研究成果的同时应该根据具体情况和相关理论知识探索更合适的智能控制算法。

### 2.2 通信网络设计

远距离通信、大容量通信、高质量通信、强抗干扰性和保密性是对UUV通信系统的基本使用要求。目前UUV的主要通信方式有:光缆通信、卫星通信、无线电通信和水声通信。其中水声通信由于其衰减慢可实现远距离水下通信的特点最适用于UUV集群中成员间的相互通信。但是水声通信存在带宽有限和传输速度慢且信道不稳定等缺点,有通信延迟和数据丢包等问题。因此在特定的环境条件限制以及没有更好的通信手段的情况下,通信网络的合理设计是一种提高水下UUV集群间相互通信效率和可靠性,从而更好地协作完成任务的可行方法。

针对水声通信的各种缺点和海洋中的客观不利条件,在已有的硬件条件基础上,仍可对通信效果进行可观的改善,达到节约能耗、减少数据丢包通信延迟带来的影响等目的。主要方法有:改变通信拓扑<sup>[29–30]</sup>、设计更高效的通信协议<sup>[31]</sup>、改变通信模式<sup>[32]</sup>等。近些年比较有代表性的研究有:文献[29]针对水声信道不稳定,存在时间延迟以及海洋背景噪声的问题,提出了一种基于Markov随机过程的双层独立变换通信拓扑,通过双层独立结构和不断切换的拓扑确保编队中全部潜航器都可以实现通信覆盖,并分析了在此变换拓扑条件下潜航器编队收敛的条件;在此基础上,严浙平等<sup>[33]</sup>又提出了有效的通信拓扑权重(communication topology effective weight)的概念以更好地表示受噪声干扰的通信信息的有效性。

### 2.3 任务分配

任务分配是随着集群技术发展最早被研究的技术之一,任务分配的研究对象日益复杂,分配的任务也多样化。现阶段任务分配方法根据对应集群的控制方式不同主要分为集中式分配和分布式分配 2 种。

1) 集中式任务分配。这种分配方式需要各 UUV 将自身环境信息与执行任务的代价函数信息传输给控制中心,控制中心权衡各 UUV 和任务情况进行合理分配。这种方式高度依赖通信,且作为控制中心的 UUV 计算负担重。文献[34]基于增加了延时的 petri 网对多 UUV 系统任务分配问题建模,提出了集中式和分布式相结合的任务分配方式:任务由主 UUV 发布,各从 UUV 结合自身约束条件选择是否接受任务。文献[35]在高延迟和不可靠的通信条件下,描述了一种使用  $k$  均值聚类的高效集中式任务分配机制,该机制在信息数据包错误率达到 80% 时仍能完成任务分配;

2) 分布式任务分配。这种分配方式并不是将决定权完全交给单体 UUV,而是给各个成员一定的自主决策权力,成员可根据局部信息按某些规则进行局部任务分配,有对通信依赖小、执行速度快的特点,但由于成员不能掌握整体信息,各 UUV 间可能存在竞争关系。分布式任务分配比较常用的方法是合同网算法<sup>[36-38]</sup>和 SOM 神经网络<sup>[39-42]</sup>。合同网算法是一种谈判协调,通过模仿经济行为的“招标—投标—中标”机制来实现任务分配,具有并行计算、分布式通信、可扩展性和鲁棒性等特点。SOM 神经网络实质上是一种竞争性学习方法,相比于合同网方法,由于没有前者的协商机制,成员间的竞争会更多。这种方法适用于多 UUV 对应于多目标任务的情况,其核心是分别以目标任务和 UUV 对应 SOM 神经网络的输入和输出量,任务间通过竞争计算对应到不同的 UUV,通过这种方式控制 UUV 到达指定位置完成指定任务。

任务分配的核心目的是将集群的优势最大化,通过合理分配任务给不同的执行者,使任务执行时间最少或能耗最小。集中式任务分配理论上可以通过通信协商找到最合理的分配方式,但是通信本身不可靠,且通信本身也会浪费掉一些时间和能量;与此相比分布式虽然不能得到最优解,但是它的优势是能够根据局部信息更快的作出反应。因此在应用时通常是根据实际需求将 2 种方法结合起来,才能发挥比较理想的效果。

### 2.4 路径规划

路径规划问题是指在航行器工作环境中,按照一定的评价标准(耗能最少、路线最短、时间最少

等)为 UUV 寻找一条安全到达目标点的最优路径。将该技术扩展到集群中,对控制和算法设计提出了更高的要求。路径规划首先要考虑的是安全问题,这是 UUV 到达目标的前提,因此避碰(包括集群内部成员避碰和避开障碍物)是此类问题中必须考虑的问题<sup>[43-45]</sup>。其次进行规划前要先定义规划的最优标准,不同标准利用的方法也有所不同,例如文献[46]将 TSP 问题(travelling salesman problem)与蚁群算法结合寻找 UUV 集群最短路径;而文献[47]则针对存在时变洋流影响的多 AUV 系统,将完成任务的时间最短作为规划目的并采用动态规划算法来实现。另外在规划完成后还要对路径的可行性进行验证,避免无效路径的产生并排除可能存在的不稳定因素<sup>[48-49]</sup>。

### 2.5 编队控制

某些多 UUV 任务中,UUV 以编队形式集体移动。编队控制就是一种控制一组 UUV 在任务需要时沿着所需路径移动的技术,同时保持所需的队形,并适应环境约束:如障碍物,有限的空间,洋流和通信约束。对空中飞行器的编队控制的研究相比于水下 UUV 编队要成熟,但是由于水下特殊环境的限制,空中飞行器编队控制算法不能直接移植到多 UUV 控制中,因此多 UUV 编队控制技术是集群研究的焦点之一。目前主要的编队控制方法分为以下几种:虚拟结构方法、领航者-跟随者方法和人工势场法。

#### 1) 虚拟结构方法。

为了在多个机器人之间形成和保持某种几何形状,引入了形成的刚性结构作为参考,其中机器人的整体表现像是嵌入刚性结构中的粒子,这种方法就是虚拟结构法(virtual structure, VS)。虚拟结构按预定轨迹航行,算法反复计算 UUV 与虚拟结构的误差并进行调整,同时保持各 UUV 之间的刚性几何关系,直到 UUV 到达所需队形。这种编队控制方式被广泛应用于飞行器编队,但在 UUV 集群中的研究还很少。文献[50]提出了虚拟领航者的编队结构,由于编队领航者是虚拟的,因此它具有准确的位置信息,基于虚拟引导的准确位置,可以获得 UUV 在编队中的预期位置,但是只研究了 2D 的情况,3D 的编队控制还有待研究。

#### 2) 领航者-跟随者方法。

在领航者-跟随者方法中,基本思想是领航者跟踪预定义的参考轨迹,跟随者根据预定义的方案跟踪领航者的状态。其最大优点是易于理解和实现,但是,跟随者对领航者没有明确的反馈意见,领导者的失败将导致整个编队的失败。这种方法在 UUV 编队控制研究中的应用比较多,在此结构前提



下研究的方向主要集中在2方面:1)在复杂环境中的队形变换和避障。如文献[51-52]分别研究了在面对不同环境时采用不同的队形变换方法达到通过特定区域和避障的目的;2)编队稳定性研究。稳定性包括编队成员能否准确保持在队形指定位置和编队在复杂环境中的鲁棒性。如文献[53-54]提出了一种欠驱动多UUV主从式编队在领航UUV速度不确定时的控制方法,构建了收敛于从UUV轨迹的虚拟UUV,然后用反步法和李雅普诺夫法分析设计了跟随者的位置跟踪控制,使跟随者能准确跟随领航者。

### 3) 人工势场法。

人工势场概念由Khatib<sup>[55]</sup>提出。这种方法的基本思想是航行器在力场中移动,其类似于由正电荷和负电荷产生的电场。要达到的位置对航行器产生吸引力,障碍产生排斥力,使得航行器可以沿着潜在场地的方向移动。这种方法通常都是与其他方法共同使用,在遇到障碍或者需要队形变换时提供辅助指向力。文献[56-57]分别将反步法和虚拟结构法与人工势场法结合实现多UUV编队控制,以达到队形保持和避障的目的。

除去以上3种常用方法,利用一致性理论对UUV进行编队控制<sup>[29,58]</sup>,也是近期的研究热点。多智能体一致性是指各智能体根据预先约定的协议,使指定的状态达到一致。但是这种方法仍然很依赖通信,不能摆脱水下通信受限对编队控制的影响。而且现阶段关于一致性的研究主要局限于理论分析和仿真,还没有具体的应用实例。

## 2.6 导航定位

由于UUV通常需要长时间在大范围海域执行任务,而且通常UUV体积不大,所以所携带能源和质量等均受到一定的限制。这种客观条件限制以及隐蔽性和水下特殊环境等因素综合导致多UUV精确导航定位的实现是一项非常艰巨的任务。多UUV协同导航定位主要有2种方式<sup>[59]</sup>:1)每个UUV配备的导航装备相同,互相通过水声通信获得系统中其他UUV的位置信息的并行方式;2)采用少量UUV配备高精度导航设备为其他UUV提供精确相对定位信息,其他UUV利用这种相对定位信息修正自身定位误差的领航方式。并行式的结构简单,但每个UUV都装备高精度导航设备,成本将成倍增加。而领航式则兼顾了精度和成本且能够适用于不同的使用区域和环境,是当今多UUV导航定位的重点研究方向。

多UUV协同导航精度的提高主要需要从UUV内部影响因素、各UUV间的影响因素以及整个UUV协同系统等多方面进行考虑。主要涉及到以

下3方面问题<sup>[60]</sup>:1)精确建立协同导航模型以及协同导航算法的开发;2)对协同导航网络中的误差因素的补偿(如通信延迟、洋流等);3)对协同导航系统中的编队构型进行优化设计。

### 1) 建模与算法。

卡尔曼滤波是协同导航算法中最常见也最基本的方法之一,国内外学者围绕这一算法做了大量相关工作<sup>[61-65]</sup>。其中文献[62]针对EKF算法存在截断误差和计算繁琐等问题提出了使用sigma点卡尔曼滤波(SPKF)的协同定位方法;Gianluca Antonelli等则推导出了确保线性化模型的可观察性和非线性模型的局部弱可观测性的条件,然后设计扩展卡尔曼滤波器估计2个AUV之间的相对位置。协同导航算法的设计和改进都是建立在准确建模的基础上的,如文献[66]中的双伪测量的数学模型、文献[63]建立的从UUV非线性导航模型等。

### 2) 误差补偿。

导航误差的产生有很多原因,主要包括3大类:洋流干扰、量测误差、通信时延。

针对洋流干扰问题,张立川、刘明雍等<sup>[67-68]</sup>设计协同定位滤波算法对洋流干扰进行估计;并通过非线性极小平方优化模型求解UUV和洋流的初始量,提高初始精度等方式补偿洋流影响下的UUV定位误差。

针对量测误差问题,李闻白<sup>[69]</sup>利用扩展卡尔曼滤波方法建立了单领航者导航系统的整体定位误差与相对位置量测误差间的传递方程。卢健等<sup>[70]</sup>根据水声通信的特点提出了一种相关性假设并提出了误差修正算法(ECA),在设定条件下利用误差间的相关性抵消量测误差,从而实现量测的粗估计。

水声通信时延问题是UUV集群研究不可避免的客观不利条件,由于时延的存在,相同时间不同UUV间的相对位置无法准确获得。为了弥补这种误差可采用2种方式:补偿时延造成的定位误差和追求时间同步。对于第1种方式,最常用的方法是卡尔曼滤波,如文献[71-72]。文献[73-74]则分别基于量测伪距的EKF移动长基线时间延迟算法和建立UUV时钟相对偏移、漂移两种模型实现对时间补偿,达到时间同步。

### 3) 编队构型。

编队构型影响着协同导航的可观测性,而可观测性直接决定协同导航定位的精度,因此对编队构型的研究也是提高协同导航精度的一种可行方法。多UUV协同导航系统具有非线性特性,使得线性系统的可观测性理论对其不再适用。为了解决这一问题,国内外学者主要采用2种方式:1)将非线性系统线性化<sup>[75]</sup>,但在线性化的过程中可能会导致系统关键信

息的丢失; 2) 引入非线性的可观测性方法<sup>[76-78]</sup>。

### 3 结论与展望

1) 一直以来限制 UUV 集群发展的一个主要原因是水下恶劣的通信条件。分布式优化算法能够降低通信对控制的影响, 但是现阶段还没有比较成熟的分布式优化算法应用于集群当中。未来分布式优化可能会成为集群发展的突破口。

2) 对 UUV 集群的相关研究越来越多, 但是多数研究都局限于理论推导和仿真验证, 受限于 UUV 集群验证平台的发展, 相关理论和算法不能得到及时验证。

3) 目前集群的研究主要针对少数 UUV 的编队和协作控制, 针对大规模集群的研究很少, 这也限制了 UUV 集群的发展潜力。

鉴于当今科技发展潮流, 已经有学者提出将人工智能技术应用到 UUV 集群控制当中, 可以预想这将大大提高现有航行器的自主能力, 也将使集群控制更加智能化。未来集群技术的发展除了建立在前文提到的关键技术发展上之外, 航行器自身的智能性的提高将是集群发展的强大助推器。

### 参考文献:

- [1] 陈强. 水下无人航行器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] CHEN Qiang. Unmanned underwater vehicle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [3] CAMAZINE S, DENEUBOURG J L, FRANKS N R, et al. Self-organization in biological systems [M]. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [4] GRUND M, FREITAG L, PREISIG J, et al. The PLUSNet underwater communications system: acoustic telemetry for undersea surveillance [C]//Oceans 2006. Boston, 2006.
- [5] WILLCOX S, GOLDBERG D, VAGANAY J, et al. Multi-vehicle cooperative navigation and autonomy with the bluefin CADRE system [C]//International Federation of Automatic Control Conference (IFAC). Cambridge, 2006.
- [6] SCHMICKL T, THENIUS R, MOSLINGER C, et al. CoCoRo-the self-aware underwater swarm [C]//Proceedings of 2011 Fifth IEEE Conference on Self-adaptive and Self-organizing Systems Workshops. Ann Arbor, 2011: 120-126.
- [7] ABREU P, ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, et al. Widely scalable mobile underwater sonar technology: An overview of the H2020 WiMUST project [J]. Marine technology society journal, 2016, 50(4): 42-53.
- [8] KALWA J. Final results of the European project GREX: coordination and control of cooperating marine robots [J]. IFAC proceedings volumes, 2010, 43(16): 181-186.
- [9] RAMP S R, DAVIS R E, LEONARD N E, et al. Preparing to predict: the second Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN-II) experiment in the Monterey Bay [J]. Deep sea research part II: topical studies in oceanography, 2009, 56(3/4/5): 68-86.
- [10] GLENN S M, SCHOFIELD O M E. The new jersey shelf observing system [C]//OCEANS '02 MTS/IEEE. Biloxi, 2003: 1680-1687.
- [11] BIRK A, PASCOAL A, ANTONELLI G, et al. Cooperative Cognitive Control for Autonomous Underwater Vehicles (CO<sup>3</sup>AUVs): overview and progresses in the 3rd project year [J]. IFAC proceedings volumes, 2012, 45(5): 361-366.
- [12] SCHMIDT H. GOATS' 2000 Multi-AUV Cooperative Behavior Multi-scale Environmental Assessment. 2001.
- [13] SCHULZ B, HOBSON B, KEMP M, et al. Field results of multi-UUV missions using ranger micro-UUVs [C]//Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future. San Diego, 2003: 956-961.
- [14] 严浙平, 李锋, 黄宇峰. 多智能体 Q 学习在多 AUV 协调中的应用研究 [J]. 应用科技, 2008, 35(1): 57-60.
- [15] YAN Zheping, LI Feng, HUANG Yufeng. Research on application of multi-agent Q-learning algorithm in multi-AUV coordination [J]. Applied science and technology, 2008, 35(1): 57-60.
- [16] CAO Xiang, SUN Hongbing, JAN G E. Multi-AUV cooperative target search and tracking in unknown underwater environment [J]. Ocean engineering, 2018, 150: 1-11.
- [17] SHOJAEI K. Neural network formation control of underactuated autonomous underwater vehicles with saturating actuators [J]. Neurocomputing, 2016, 194: 372-384.
- [18] HUANG Zongrui, ZHU Daqi, SUN Bing. A multi-AUV cooperative hunting method in 3-D underwater environment with obstacle [J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2016, 50: 192-200.
- [19] BIAN Xinqian, MOU Chunhui, YAN Zheping, et al. Formation coordinated control for multi-AUV based on spatial curve path tracking [C]//OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. Waikoloa, 2011: 1-6.
- [20] CAO Xiang, HUANG Zongrui, ZHU Daqi. AUV cooperative hunting algorithm based on bio-inspired neural network for path conflict state [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. Lijiang, 2015: 1821-1826.
- [21] HUANG Zongrui, ZHU Daqi, SUN Bing. A multi-AUV cooperative hunting method in 3-D underwater environment with obstacle [J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2016, 50: 192-200.
- [22] 苏菲, 陈岩, 沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配 [J]. 航空学报, 2008, 29(S1): 184-191.
- [23] SU Fei, CHEN Yan, SHEN Lincheng. UAV cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2008, 29(S1): 184-191.
- [24] DUAN Haibin, ZHANG Xiangyin, WU Jiang, et al. Maxim adaptive ant colony optimization approach to multi-UAVs coordinated trajectory replanning in dynamic and uncertain environments [J]. Journal of bionic engineering, 2009, 6(2): 161-173.
- [25] SUN X, et al. Multi-agent formation control based on artificial force with exponential form [J]. Intelligent control & automation, 2014.

- [23] DUAN Haibin, LUO Qin'an, SHI Yuhui, et al. ? Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for multi-UAV formation reconfiguration [J]. IEEE computational intelligence magazine, 2013, 8(3): 16-27.
- [24] 顾国昌, 仲宇, 张汝波. 一种新的多智能体强化学习算法及其在多机器人协作任务中的应用 [J]. 机器人, 2003, 25(4): 344-348, 362.  
GU Guochang, ZHONG Yu, ZHANG Rubo. A new multi-agent reinforcement learning algorithm and its application to multi-robot cooperation tasks [J]. Robot, 2003, 25(4): 344-348, 362.
- [25] 段勇, 徐心和. 基于多智能体强化学习的多机器人协作策略研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1305-1310.  
DUAN Yong, XU Xinhe. Research on multi-robot cooperation strategy based on multi-agent reinforcement learning [J]. Systems engineering--theory & practice, 2014, 34(5): 1305-1310.
- [26] LAUER M, RIEDMILLER M A. An algorithm for distributed reinforcement learning in cooperative multi-agent systems [C]//Proceedings of the Seventeenth International Conference on Machine Learning. Stanford, 2000: 535-542.
- [27] RASHID T, SAMVELYAN M, SCHROEDER C, et al. QMIX: monotonic value function factorisation for deep multi-agent reinforcement learning [C]//Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. Sydney, 2018.
- [28] FREDDI A, LONGHI S, MONTERIÙ A. A coordination architecture for UUV fleets [J]. Intelligent service robotics, 2012, 5(2): 133-146.
- [29] YAN Zheping, LIU Yibo, ZHOU Jiajia, et al. Consensus of multiple autonomous underwater vehicles with double independent Markovian switching topologies and timevarying delays [J]. Chinese physics B, 2017, 26(4): 040203.
- [30] LI Ning, CÜRÜKLÜ B, BASTOS J, et al. A probabilistic and highly efficient topology control algorithm for underwater cooperating AUV networks [J]. Sensors, 2017, 17(5): E1022.
- [31] 严浙平, 李磊磊, 赵海彬, 等. 多 UUV 通信路由协议方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1594-1596, 1600.  
YAN Zheping, LI Leilei, ZHAO Haibin, et al. Research on routing protocol of underwater communication for multi-UUV [J]. Computer measurement & control, 2013, 21(6): 1594-1596, 1600.
- [32] GAO Zhenyu, GUO Ge. Fixed-time leader-follower formation control of autonomous underwater vehicles with event-triggered intermittent communications [J]. IEEE access, 2018, 6: 27902-27911.
- [33] YAN Zheping, XU Da, CHEN Tao, et al. Leader-follower formation control of UUVs with model uncertainties, current disturbances, and unstable communication [J]. Sensors, 2018, 18(2): E662.
- [34] 康小东, 李一平. 基于时延 Petri 网的多 UUV 系统的任务分配策略 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(S1): 614-617.  
KANG Xiaodong, LI Yiping. Strategy of task allocation in multiple UUV system based on timed Petri net [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2007, 28(S1): 614-617.
- [35] TSIOGKAS N, PAPADIMITRIOU G, SAIGOL Z, et al. Efficient multi-AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions [C]//2014 Oceans-St. John's. St. John's, 2014: 1-6.
- [36] LIANG Hongtao, KANG Fengju. A novel task optimal allocation approach based on Contract Net Protocol for Agent-oriented UUV swarm system modeling [J]. Optik, 2016, 127(8): 3928-3933.
- [37] 李娟, 张昆玉. 基于改进合同网算法的异构多 AUV 协同任务分配 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(6): 418-423.  
LI Juan, ZHANG Kunyu. Heterogeneous Multi-AUV cooperative task allocation based on improved contract net algorithm [J]. Journal of unmanned undersea systems, 2017, 25(6): 418-423.
- [38] 马硕, 马亚平. 基于分层聚类拍卖的集群 UUV 多目标分配方法 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5): 70-75.  
MA Shuo, MA Yaping. A hierarchical clustering auction approach for UUVs multi-objects allocation [J]. Ship science and technology, 2019, 41(5): 70-75.
- [39] 朱大奇, 李欣, 颜明重. 多自治水下机器人多任务分配的自组织算法 [J]. 控制与决策, 2012, 27(8): 1201-1205, 1210.  
ZHU Daqi, LI Xin, YAN Mingzhong. Task assignment algorithm of multi-AUV based on self-organizing map [J]. Control and decision, 2012, 27(8): 1201-1205, 1210.
- [40] 李欣, 朱大奇, 徐珂昂. 运动学约束条件下多 AUV 任务分配算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(12): 1638-1644.  
LI Xin, ZHU Daqi, XU Keang. Task assignment for a multi-AUV system under kinematic constraint [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(12): 1638-1644.
- [41] LI Jianjun, ZHANG Rubo, YANG Yu. Multi-AUV autonomous task planning based on the scroll time domain quantum bee colony optimization algorithm in uncertain environment [J]. PLoS one, 2017, 12(11): e0188291.
- [42] WANG Hongjian, YUAN Jianya, LV hongli, et al. Task allocation and online path planning for AUV swarm cooperation [C]//OCEANS 2017-Aberdeen. Aberdeen, 2017: 1-6.
- [43] WU Lian, LI Yiping, LIU Jian. Based on improved bio-inspired model for path planning by multi-AUV [C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology. Tianjin, 2018: 128-134.
- [44] ZHUANG Yufei, HUANG Haibin, SHARMA S, et al. Cooperative path planning of multiple autonomous underwater vehicles operating in dynamic ocean environment [J]. ISA transactions, 2019, 94: 174-186.
- [45] YU Xue, CHEN Weining, HU Xiaomin, et al. Path planning in multiple-auv systems for difficult target traveling missions: a hybrid metaheuristic approach [J/OL]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, (2019-10-01). DOI: 10.1109/TCDS.2019.2944945.
- [46] 吴小平, 冯正平, 朱继懋. 基于蚁群算法的多 AUV 路

- 径规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 150-153.
- WU Xiaoping, FENG Zhengping, ZHU Jimao. Simulation of path planning of multiple autonomous underwater vehicles (AUVs) based on ant colony algorithm[J]. Computer simulation, 2009, 26(1): 150-153.
- [47] LIU Mingyong, XU Baogui, PENG Xingguang. Cooperative path planning for multi-AUV in time-varying ocean flows[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2016, 27(3): 612-618.
- [48] 严浙平, 何靓文, 李娟. 多域限界内多 AUV 巡逻航路规划方法[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 237-242.
- YAN Zheping, HE Liangwen, LI Juan. Path planning method for multi-AUVs patrol in restricted Multizone area[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2017, 25(3): 237-242.
- [49] 朱大奇, 曹翔. 多个水下机器人动态任务分配和路径规划的信度自组织算法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(6): 762-769.
- ZHU Daqi, CAO Xiang. An improved self-organizing map method for multiple autonomous underwater vehicle teams in dynamic task assignment and path planning[J]. Control theory & applications, 2015, 32(6): 762-769.
- [50] YAN Zheping, LI Yibo, ZHOU Jiajia, et al. Moving target following control of multi-AUVs formation based on rigid virtual leader-follower under ocean current[C]//Proceedings of 2015 34th Chinese Control Conference. Hangzhou, 2015: 5901-5906.
- [51] 吴小平, 冯正平, 朱继懋. 多 AUV 队形控制的新方法[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(2): 128-134.
- WU Xiaoping, FENG Zhengping, ZHU Jimao. A novel method for formation control of multiple autonomous underwater vehicles (AUVs)[J]. Ship science and technology, 2008, 30(2): 128-134.
- [52] ROUT R, SUBUDHI B. A backstepping approach for the formation control of multiple autonomous underwater vehicles using a leader - follower strategy[J]. Journal of marine engineering & technology, 2016, 15(1): 38-46.
- [53] CUI Rongxin, GE S S, HOW B V E, et al. Leader - follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. Ocean engineering, 2010, 37(17/18): 1491-1502.
- [54] 李娟, 马涛, 刘建华. 基于领航者的多 UUV 协调编队滑模控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 350-357.
- LI Juan, MA Tao, LIU Jianhua. Multi-UUV coordinated formation sliding mode control based on leader[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 350-357.
- [55] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, 1986: 396-404.
- [56] 丁国华, 朱大奇. 多 AUV 主从式编队及避障控制方法[J]. 高技术通讯, 2014, 24(5): 538-544.
- DING Guohua, ZHU Daqi. Control of leader-follower formation and obstacle avoidance for Multi-AUV[J]. Chinese high technology letters, 2014, 24(5): 538-544.
- [57] 潘无为, 姜大鹏, 庞永杰, 等. 人工势场和虚拟结构相结合的多水下机器人编队控制[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 326-334.
- PAN Wuwei, JIANG Dapeng, PANG Yongjie, et al. A multi-AUV formation algorithm combining artificial potential field and virtual structure[J]. Acta armamentarii, 2017, 38(2): 326-334.
- [58] YAN Zheping, WU Yi, ZHOU Jiajia. Limited communication consensus control in Multi-UUVs swarm system under switching topologies and time delay[C]//Proceedings of the 37th Chinese Control Conference. Wuhan, 2018: 1349-1354.
- [59] 张立川, 许少峰, 刘明雍, 等. 多无人水下航行器协同导航定位研究进展[J]. 高技术通讯, 2016, 26(5): 475-482.
- ZHANG Lichuan, XU Shaofeng, LIU Mingyong, et al. Advances in cooperative navigation and localization for multi-UUV systems[J]. Chinese high technology letters, 2016, 26(5): 475-482.
- [60] 徐博, 白金磊, 郝燕玲, 等. 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 445-461.
- XU Bo, BAI Jinlei, HAO Yanling, et al. The research status and progress of cooperative navigation for multiple AUVs[J]. Acta automatica sinica, 2015, 41(3): 445-461.
- [61] 李闯白, 刘明雍, 张立川, 等. 单领航者相对位移测量的多自主水下航行器协同导航[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 1002-1007.
- LI Wenbai, LIU Mingyong, ZHANG Lichuan, et al. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles based on relative displacement measurement with a single leader[J]. Acta armamentarii, 2011, 32(8): 1002-1007.
- [62] 卢健, 徐德民, 张立川, 等. 利用 sigma 点卡尔曼滤波的多 UUV 协同定位[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(33): 1-6.
- LU Jian, XU Demin, ZHANG Lichuan, et al. Cooperative localization utilizing sigma-point Kalman filters for UUVs[J]. Computer engineering and applications, 2011, 47(33): 1-6.
- [63] 刘明雍, 沈俊元, 张加全, 等. 一种基于无迹卡尔曼滤波的 UUV 协同定位方法[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 205-208.
- LIU Mingyong, SHEN Junyuan, ZHANG Jiaquan, et al. A cooperative localization method of UUV based on unscented Kalman filter[J]. Torpedo technology, 2011, 19(3): 205-208.
- [64] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S, et al. Observability analysis of relative localization for AUVs based on ranging and depth measurements[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, 2010: 4276-4281.
- [65] ARRICHIELLO F, ANTONELLI G, AGUIAR A P, et al. Observability metric for the relative localization of AUVs based on range and depth measurements: Theory and experiments[C]//Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San



- Francisco, 2011: 3166-3171.
- [66] 张立川,徐德民,刘明雍. 双伪测量的多水下航行器移动长基线协同导航算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(1): 34-36.
- ZHANG Lichuan, XU Demin, LIU Mingyong. Cooperative navigation method of multiple autonomous underwater vehicles base on double acoustic measurement[J]. Fire control & command control, 2013, 38(1): 34-36.
- [67] 刘明雍,张加全,张立川. 洋流影响下基于运动矢径的AUV协同定位方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(11): 1632-1636.
- LIU Mingyong, ZHANG Jiaquan, ZHANG Lichuan. AUV cooperative localization method based on motion radius vector in the presence of unknown currents[J]. Control and decision, 2011, 26(11): 1632-1636.
- [68] 李闻白,刘明雍,雷小康,等. 未知洋流干扰下基于单领航者的多自主水下航行器协同导航[J]. 兵工学报, 2011, 32(3): 292-297.
- LI Wenbai, LIU Mingyong, LEI Xiaokang, et al. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles with single leader in unknown ocean current[J]. Acta armamentarii, 2011, 32(3): 292-297.
- [69] 李闻白,刘明雍,李虎雄,等. 基于单领航者相对位置测量的多AUV协同导航系统定位性能分析[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 724-736.
- LI Wenbai, LIU Mingyong, LI Huxiong, et al. localization performance analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on relative position measurements with a single leader[J]. Acta automatica sinica, 2011, 37(6): 724-736.
- [70] 卢健,徐德民,张立川,等. 基于移动长基线和误差修正算法的多UUV协同导航[J]. 控制与决策, 2012, 27(7): 1052-1056.
- LU Jian, XU Demin, ZHANG Lichuan, et al. Cooperative navigation based on moving long baselines and error correction algorithm for multiple UUVs[J]. Control and decision, 2012, 27(7): 1052-1056.
- [71] 高伟,杨建,刘菊,等. 基于水声通信延迟的多UUV协同定位算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 539-545.
- GAO Wei, YANG Jian, LIU Ju, et al. Cooperative location of multiple UUVs based on hydro-acoustic communication delay[J]. Systems engineering and electronics, 2014, 36(3): 539-545.
- [72] YAN Zheping, WANG Lu, WANG Tongda, et al. Polar cooperative navigation algorithm for multi-unmanned underwater vehicles considering communication delays[J]. Sensors, 2018, 18(4): E1044.
- [73] 刘明雍,黄博,蔡挺. 一种基于量测伪距的EKF移动长基线AUV协同导航方法[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(6): 432-436.
- LIU Mingyong, HUANG Bo, CAI Ting. A cooperative navigation method of EKF moving long baseline for AUV based on pseudo-range measurements[J]. Torpedo technology, 2012, 20(6): 432-436.
- [74] 张福斌,张小龙,马朋. 一种考虑时钟同步问题的多AUV协同定位算法[J]. 鱼雷技术, 2013, 21(5): 355-359.
- ZHANG Fubin, ZHANG Xiaolong, MA Peng. An algorithm of multi-AUVs cooperative location considering clock synchronization[J]. Torpedo technology, 2013, 21(5): 355-359.
- [75] YANG Aolei, NAEEM W, IRWIN G W, et al. Novel decentralised formation control for unmanned vehicles[C]// Proceedings of 2012 Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, 2012: 13-18.
- [76] 高伟,刘亚龙,徐博. 基于双领航者的多AUV协同导航系统可观性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2370-2375.
- GAO Wei, LIU Yalong, XU Bo. Observability analysis of cooperative navigation system for multiple AUV based on two-leaders[J]. Systems engineering and electronics, 2013, 35(11): 2370-2375.
- [77] 高伟,刘亚龙,徐博,等. 基于双主交替领航的多AUV协同导航方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 735-740.
- GAO Wei, LIU Yalong, XU Bo, et al. Multiple-AUV cooperative navigation based on two-leader alternated navigation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(6): 735-740.
- [78] 张立川,王永召,屈俊琪. 基于等价Fisher信息矩阵的AUV集群网络导航精度分析[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 254-259.
- ZHANG Lichuan, WANG Yongzhao, QU Junqi. Network navigation accuracy analysis of AUV swarm based on equivalent Fisher information matrix[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2019, 27(3): 254-259.

## 本文引用格式:

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, 2019, 41(2): 289-297.

ZHANG Wei, WANG Naixin, WEI Shilin, et al. Overview of unmanned underwater vehicle swarm development status and key technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 41(2): 289-297.