



智能系统学报

CAAI TRANSACTIONS ON INTELLIGENT SYSTEMS

自主式水下滑翔机集群应用及关键技术研究

王征, 屈新雨, 李厚朴

引用本文:

王征, 屈新雨, 李厚朴. 自主式水下滑翔机集群应用及关键技术研究[J]. 智能系统学报, 2024, 19(6): 1341–1350.
WANG Zheng, QU Xinyu, LI Houpu. Research on autonomous underwater glider cluster application and key techniques[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2024, 19(6): 1341–1350.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202309041>

您可能感兴趣的其他文章

基于力传感的系留无人机定位方法研究

Research on the positioning method of tethered UAV using force sensing
智能系统学报. 2020, 15(4): 672–678 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201907015>

基于改进粒子滤波的AUV海底地形辅助定位方法

Seabed terrain-aided positioning method based on improved particle filtering for AUVs
智能系统学报. 2020, 15(3): 553–559 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201903027>

多约束下多无人机的任务规划研究综述

A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints
智能系统学报. 2020, 15(2): 204–217 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811018>

基于改进D*算法的无人机室内路径规划

UAV indoor path planning based on improved D* algorithm
智能系统学报. 2019, 14(4): 662–669 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201803031>

自主水面货船研究现状与展望

Research status and prospects of autonomous surface cargo ships
智能系统学报. 2019, 14(1): 57–70 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201806028>

基于滚动时域的无人机动态航迹规划

Dynamic UAV trajectory planning based on receding horizon
智能系统学报. 2018, 13(4): 524–533 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201708031>

DOI: 10.11992/tis.202309041

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.tp.20240719.1134.005>

自主式水下滑翔机集群应用及关键技术研究

王征, 屈新雨, 李厚朴

(海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 自主式水下滑翔机是一种可对目标海区进行长时序、大范围剖面观测与探测的新型无人水下平台。文中简述 3 种自主式水下滑翔机的典型应用场景, 其中包括情报、监视和侦察, 移动通信节点以及海洋现象观测。对国外自主式水下滑翔机集群的应用现状进行了详细介绍。对自主式水下滑翔机集群关键技术, 从编队控制、路径规划、轨迹跟踪 3 个方面梳理了国内外技术最新研究现状。最后对自主式水下滑翔机未来发展进行了展望。

关键词: 自主式水下滑翔机; 无人潜航器; 编队控制; 路径规划; 轨迹跟踪; 关键技术; 发展现状

中图分类号: TP242.6; U674.941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2024)06-1341-10

中文引用格式: 王征, 屈新雨, 李厚朴. 自主式水下滑翔机集群应用及关键技术研究 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(6): 1341-1350.

英文引用格式: WANG Zheng, QU Xinyu, LI Houpu. Research on autonomous underwater glider cluster application and key techniques[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2024, 19(6): 1341-1350.

Research on autonomous underwater glider cluster application and key techniques

WANG Zheng, QU Xinyu, LI Houpu

(School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Autonomous underwater gliders are a new type of unmanned underwater platform designed for extensive, long-term observations and detections in specific sea areas. This paper initially outlines three typical application scenarios of such gliders: conducting intelligence, surveillance, and reconnaissance; serving as mobile communication nodes; and observing oceanic phenomena. It then provides a detailed overview of the current status of foreign autonomous underwater glider clusters. The paper also summarizes the latest domestic and international research on the key technologies for autonomous underwater glider clusters, focusing on formation control, path planning, and trajectory tracking. Finally, it anticipates future advancements in autonomous underwater glider technology.

Keywords: autonomous underwater gliders; unmanned underwater vehicles; formation control; path planning; path tracking; key technology; present development

自主式水下滑翔机 (autonomous underwater glider, AUG) 是一种新型水下平台, 它因低成本、可重复利用、长续航、作业范围广等优点逐渐成为水下平台的重要组成部分。但是单台 AUG 搭载传感器数量少, 探测范围有限, 实际作业效率和探测效果不佳。为了解决此类问题, 世界各国已经将 AUG 的发展重心由单体技术转向了集群

技术。目前, AUG 的续航力、最大下潜深度、航速等关键参数能力在逐步提高, 在未来也可发展为可携带武器的大型 AUG。凭借其超长水下作业时间的特点, AUG 可以更多地代替有人装备在危险或海区承担各项任务, 降低人员伤亡率。使用多 AUG 组成水下编队进行协同探测, 可以提高探测效率, 扩大探测范围。在任务海域水文条件恶劣、任务持续时间长、任务复杂的情况下, 多 AUG 协同探测能够完成单台 AUG 无法实现的

收稿日期: 2023-09-25. 网络出版日期: 2024-07-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42122025, 42374050).

通信作者: 王征. E-mail: marchy618@163.com.

©《智能系统学报》编辑部版权所有

功能。

本文在广泛收集资料、阅读文献的基础上,针对目前国内 AUG 应用场景较为单一,且大多为海洋观测的缺陷,提出 3 种 AUG 集群典型应用场景;对国内外 AUG 集群应用的最新成果进行了介绍;对 AUG 集群控制的关键技术编队控制、路径规划、轨迹跟踪 3 个方面进行了系统化的梳理;最后,指出了 AUG 研究存在的不足和亟待进一步解决的问题。

1 自主式水下滑翔机集群典型应用场景

1.1 情报、监视和侦察 (intelligence, surveillance, and reconnaissance, ISR)

2016 年,中国在南海海域发现一个无人航行器,相关单位对该无人航行器进行了识别查证。同年 12 月 19 日,外交部发言人华春莹在主持例行记者会上针对中国捕获美国无人航行器事件做出了回应^[1]。根据相关报道,该无人潜航器为美国部署的 AUG。美国已将 AUG 视为重要的情报收集平台,并投放至敏感海域进行隐蔽行动。AUG 可作为在海洋中的无人侦察机和预警机,根据其自身低噪声的特点,通过提供相应的模块化电、磁和光电传感器组件,可执行隐蔽的情报、监视和侦察任务而难以被对方发现。例如安装了高分辨率合成孔径声呐的 AUG,具有高隐蔽性、长待机时间、大范围活动等特点,可部署在对方水面或水下船只母港外或必经水路处,隐蔽执行各类不同任务。

1.2 移动通信节点 (mobile communication nodes, MCN)

与陆地通信网络不同的是,海洋通信网络无法像陆地上一样将通信基站布满整个海洋,所以以大量的低成本移动平台为主,辅以少量的固定平台,构建海洋通信网络的基础设施是较为可行的解决方案。所述移动平台,应具有廉价、节能、可靠性高、环境友好以及便于布放的特点。而 AUG 可在海上航行数月,航程可达数千公里,其特点符合移动通信节点的要求。

1.3 海洋现象观测 (ocean phenomena observation, OPO)

AUG 作为一种新型的水下观测平台,相比利用 AUV、ROV 等平台进行水下观测,AUG 可以进行大范围、长时间、全天候和高精度的水下观测,很好地弥补了当前水下观测手段的不足^[2]。目前,AUG 已经被广泛用于海洋现象观测中,包括

观测东、西边界流、海洋环流等现象,对海洋学家的研究起到极大促进作用。

2 国外水下滑翔机集群应用现状

2.1 近海水下持续监视网

近海水下持续监视网 (persistent littoral under-sea surveillance network, PLUSNet) 是由美国海军研究办公室于 2006 年提出,美国宾夕法尼亚大学研发的多机构项目,其主要目的是推进近海监视的最新技术,其主要目标是探测和跟踪敌方潜艇,以及完成美国近海水文、海洋噪声等方面的测量。该系统同时使用固定和移动水下平台,包括改装后带有通用发射和回收模块的“俄亥俄”级巡航导弹核潜艇,带有探测能力的海底固定节点、带有通信能力的浮标、可充当移动节点的带有拖曳阵列的自主式水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 以及带有声学和环境传感器的 AUG,详见图 1。各同类节点形成集群,集群与其他集群通过水下通信实施信息的交互,从而有能力执行大规模反潜、测量等行动。目前该系统已成为世界上最先进的水下监视网络系统之一^[3]。

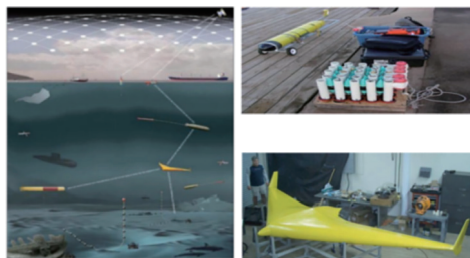


图 1 美国海军 PLUSNet 示意
Fig. 1 U.S. Navy PLUSNet schematic

2.2 自主海洋采样网

自主海洋采样网 (autonomous ocean sampling network, ASON) 是由美国海军研究院自 20 世纪 90 年代开始资助的一个大型项目,其目的在于将多种新型水下作业平台集成为一个系统,以提高观察和预测海洋的能力。在 ASON 一期试验中该项目通过多台 AUG 同步观测了铁元素引起的浮游植物繁殖期内近岸上升流系统中生物地球化学特性的演变过程。在 ASON 二期试验中该项目对 AUG 进行三角队形编队,并验证了 AUG 自适应控制策略的有效性。在 2006 年的试验中,该项目使用自研的“自适应采样”技术,根据 AUG 水下工作状态实时改变 AUG 的路径,从而达到更好的观测效果^[4],见图 2。

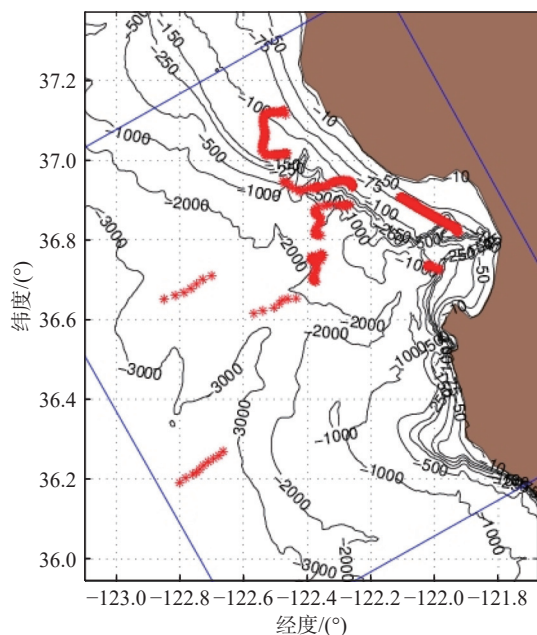


图2 ASON AUG 轨迹

Fig. 2 ASON AUG trajectory map

2.3 欧洲滑翔机观测网

欧洲滑翔机观测网 (European gliding observatories, EGO) 最初是由欧洲各国部分物理海洋学家自发形成的组织,但随着该组织影响力的扩大,来自澳大利亚、加拿大、美国等国的物理海洋学家也逐渐加入其中,并形成如今的规模。该组织主要目的是通过对 AUG 的应用研究,深化全球范围内的合作,实现全球、区域以及近岸海域等不同范围内的长期海洋观测任务。2012年9月—2013年5月,EGO 在地中海西北部海域部署了8台 AUG 进行海洋环境噪声采样,见图3。根据 EGO 官网数据,最新一次部署计划为2023年11—12月在亚德里亚海南部监测对流情况。截至目前,EGO 已完成累计2181架次 AUG 的部署。

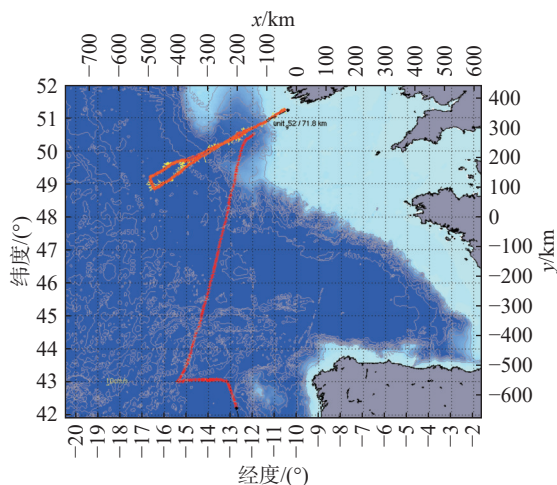


图3 EGO AUG 轨迹

Fig. 3 EGO AUG trajectory map

2.4 澳大利亚综合海洋观测系统

澳大利亚综合海洋观测系统 (integrated marine observing system, IMOS) 组建于2006年,现在已经成为拥有包括 AUG 在内多种观测设备协同运用的大型海洋观测系统。其主要观测目标为新南威尔士州和塔斯马尼亚岛附近的东澳大利亚洋流、塔斯马尼亚西南部的南大洋以及澳大利亚西北部部分地区,见图4。迄今为止,IMOS 已累计进行了370次 AUG 观测任务,最近一次任务时间为2023年11月9日—2023年11月23日。在 IMOS 2030 战略中, AUG 将作为重要的海洋观测平台来解决澳大利亚近海海域问题。

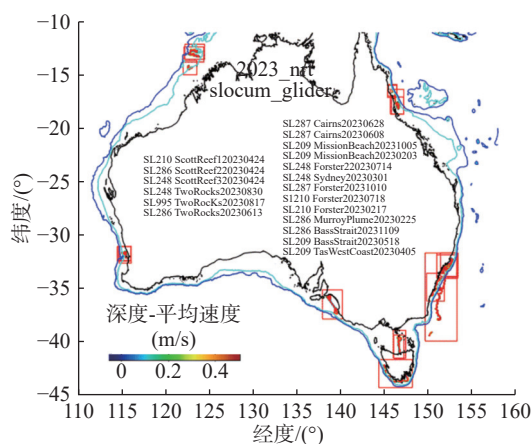


图4 IMOS AUG 轨迹

Fig. 4 IMOS AUG trajectory map

3 自主式水下滑翔机集群关键技术

多 AUG 系统在执行任务期间所采取的控制策略,根据其任务目标的差异而定。近年来,国内外在多 AUG 控制方面做了大量的基础理论与试验研究,其研究的关键技术主要有编队控制、路径规划和轨迹跟踪等。

3.1 编队控制

3.1.1 编队控制架构

多水下航行器的编队控制架构可以分为集中式控制架构和分散式控制架构两种,对于分散式控制架构还可继续细分为分层式控制架构和分布式控制架构。集中式控制架构是指一个主控单元获得群体中所有个体的信息并对群体进行统一的控制;分层式控制架构是指综合了集中式控制架构与分布式控制架构的优点,具有局部集中控制能力的控制架构;分布式控制架构是指在控制的过程中,没有主控单元,各个水下航行器之间地位平等,通过通信进行信息交互,自主决策并执行任务。各控制架构如图5所示^[5]。

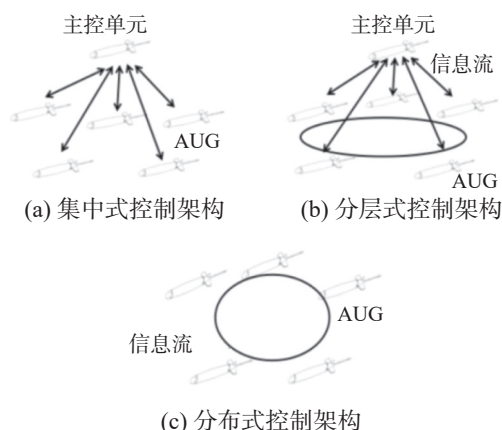


图5 多水下航行器编队控制架构

Fig. 5 Multi-underwater vehicle formation control architecture

3.1.2 编队控制策略

目前编队控制策略常见的有领航跟随者法、人工势场法、基于行为法、虚拟结构法,另外还有基于一致性法^[6]、图论预测法^[7]、软控制法^[8]、局部规则法^[9]等。

领航跟随者法是当前使用频率较高的一种编队控制策略,其核心思想是在编队中设定一个水下航行器作为领航者,其余水下航行器为跟随者。这样只需通过控制领航者的航行状态,其余跟随者通过保持与领航者的距离和角度即可保证编队队形的稳定,这样极大降低了编队控制难度^[10]。Wang^[11]于1991年首先提出了该策略。Desai等^[12]通过设计领航者与跟随者之间的期望距离和期望相对角度,实现了多机器人在有障碍物环境下的队形变换和保持。张润锋等^[13]基于领航跟随者法建立了AUG编队模型,提出了一种编队稳定性分析方法并验证了AUG编队稳定性。但是该法也存在缺陷:领航者较难得到跟随者的速度、位置等信息,若领航者出现问题,则编队系统将无法正常运行。因此,虚拟领航者的概念被研究人员提出,即领航者可以作为一个虚拟参考点参与编队控制,从而不影响整个系统的安全性。Leonard等^[14]设计了一种基于人工势场和虚拟领航者的编队控制策略,并证明了其闭环稳定性。王冬梅等^[15]克服传统领航者易受外界因素干扰,多智能体编队稳定性不高的问题,提出了一种自适应虚拟领航者的控制策略,增强了系统的鲁棒性和可靠性。周伟江等^[16]基于虚拟领航者法,结合行为法实现了无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)编队在三维空间下的控制。Ma等^[17]考虑目前多AUG编队缺乏更为通用的控制策略的问题,在有领航者和无领航者两种情况下,定义了编队可行性条件,提出了一种基于

波浪滑翔机(wave glider, WG)、AUG状态和随机切换拓扑结构的通用编队控制策略。在随机切换拓扑和固定拓扑结构下,得到了动态多AUG编队收敛的充分条件。在此基础上,通过仿真模拟和实船试验两个算例,对编队控制策略进行了验证。但是在海试中,该策略在时变强海流中控制效果有待提高。

人工势场法的核心思想是通过势函数模拟编队成员与编队内其他成员以及与外部环境的相互作用,编队成员在势场合力的作用下运动,达到控制编队的一种方法。Khatib^[18]在1985年首次提出该方法用于机械臂和机器人的避障。李沛伦等^[19]对传统人工势场法进行改进,考虑了AUG的运动特性及约束,从而实现了AUG水中静态与动态障碍物的有效避障。谢景鹏^[20]使用人工势场法,通过设计合适的势场函数,避免了机器鱼编队与障碍物、编队内部的碰撞。人工势场法计算简便,易于扩展,能够进行实时控制,但是势场函数一般存在局部极值,导致算法易陷入局部最优,且势场函数的设计相对困难。

基于行为法的核心思想是将编队控制目标分解为一系列基本行为,通过基本行为的复杂组合来实现编队的运动控制。这使得系统中每个个体都有一定的自主决策能力和协作能力。庞师坤等^[21]基于行为法将AUV水下航行可能遇见动静障碍物的问题分解成3个子行为,得到了AUV整体任务的函数输出模型。刘瑞轩等^[22]基于行为法和人工势场法设计了多水下机器人队形控制的子行为,提高了整体编队队形控制的容错性。在基于行为法的编队系统中,某个成员的行为决策可以影响其他成员的行为和状态,系统表现出明显的反馈特性,有利于对系统进行及时的调整。但是AUG水下通信能力有限,该方法很难用于AUG编队控制。

虚拟结构法的核心思想是将多机器人系统看作一个虚拟的刚性结构体,每个机器人作为该虚拟刚性结构体的一个顶点,从而达到编队控制的效果。该方法的优点是可以通过定义虚拟刚性结构体中心的运动来实现整个团队的运动,降低了控制难度,但由于整个团队必须按设定的结构运动,其应用范围受到限制。Lewis等^[23]于1997年首次提出该方法,并成功在二维平面上实现机器人的编队控制。薛东阳^[24]结合人工势场法与虚拟结构法,对AUG水下姿态进行控制。方一成^[25]提出一种改进的领航者-虚拟结构法,解决了刚性结构编队避障不灵活的问题。Li等^[26]考虑AUG

水下通信距离短、三维仿真困难及编队变化困难的问题,设计了一种基于虚拟铰链的多AUG编队策略。该策略可通过增加、替换或重置相应的虚拟铰链来实现编队的同步、重构和扩展,并且编队中每个个体只用考虑与其相连接的个体,不需要考虑所有个体,极大减少了计算量,解决了通信距离短的问题。但是该方法没有考虑洋流对编队的影响。

3.1.3 编队控制策略总结

受限于平台,单台AUG很难实现预期的目标,所以将AUG进行编队,以编队的形式来完成各项任务成为各国学者研究的主流方向。但是目前学者在对编队控制进行研究时,一般默认个体之间通信良好。而在实际任务中,由于海洋环境复杂多变,尤其是AUG锯齿形的运动方式,水声通信经常出现误码甚至通信中断,导致常规算法无法达到编队控制效果。未来还需在弱通信条件下,研究AUG编队控制问题。

3.2 路径规划

3.2.1 传统算法

Eichhorn^[27]采用Dijkstra算法解决了AUG单源最短路径问题。Hernández等^[28]采用最优快速探索随机树法,在未知环境中实现了二维平面内AUV无碰撞路径的规划。Marino等^[29]结合Voronoi图与高斯过程对AUV在海洋中的路径进行规划,实现了采样及巡逻功能,并使用两台AUV在意大利的拉斯佩齐亚港进行演示试验。周耀鉴等^[30]基于预测深平均流的方法构建局部流场,并用CTS-A*算法进行AUG路径规划。何柏岩等^[31]基于变分模态分解和最小二乘支持向量机方法的深平均流预测模型,对AUG进行航向修正和局部路径规划。Liu等^[32]采用最优化理论提出了一种新的AUG三维最优路径规划方法。朱心科等^[33]以时间最短为原则,利用空间聚类算法将多AUG路径规划简化为单AUG路径规划,再采用2步CLK(two-step chained Lin-Kernighan)算法与扩散算法对AUG进行路径规划优化。

3.2.2 智能算法

Su等^[34]采用模糊逻辑算法对AUG轨迹进行重新规划,并利用卡尔曼滤波算法对AUG垂直轨迹进行预测。Ni等^[35]采用仿生神经网络,将水下网格模型与神经元一一对应,对AUV在三维环境下的路径进行实时规划。Cheng等^[36]提出一种基于动态规划的遗传算法,将随机交叉算子改为确定交叉算子,提升了UUV路径规划适应度。Zamuda^[37]提出了一种连续数值优化算法用

于AUG路径规划,通过模拟仿真海洋环境,证明了该算法的优越性。王浩亮等^[38]提出一种改进型的自适应量子粒子群算法,以能耗最少为优化目标,使用多黏性Lamb涡叠加的方法模拟海洋场环境,结合B样条曲线对圆碟形AUG进行路径规划,仿真结果表明该算法较其他量子粒子群算法具有优越性。冯炜等^[39]以时间最短为原则,使用量子粒子群算法对UUV在有海流环境体条件下进行了路径规划。Han等^[40]考虑温跃层对AUG通信距离的影响,利用蚁群算法对AUG的水下路径进行了规划,但没有考虑洋流的影响。宋大雷等^[41]提出了一种改进的人工蜂群算法,以航程及精度为优化目标对AUG进行路径规划,将仿真结果与海试结果进行对比,结果表明该算法有效提升了AUG的综合性能。Lan等^[42]提出了一种基于深度强化学习算法的水下滑翔机路径规划方法,以在时间变化的海洋环流中寻找最优路径。该方法通过构建一个深度强化学习模型,学习在各种海洋环境下滑翔机的最优控制策略。通过与传统的路径规划方法进行比较,该方法能够有效地提高滑翔机的航行效率,同时减少了能量消耗。

3.2.3 多算法融合

Zhu等^[43]分别采用波阵算法和A*算法对强海流环境下的AUG进行路径规划,结果表明波阵算法仅适合全局路径规划,A*算法适合全局和局部路径规划,但该研究并未将两种算法进行融合。Zhang等^[44]融合人工势场法与A*算法,通过人工势场法建立障碍物成本函数,用A*算法解决了路径规划中的多约束问题,最后使用B样条曲线对路径进行了优化。Zhang等^[45]为了解决水下机器人在二维平面上的路径规划问题,提出了一种基于四叉树法的改进蚁群算法。该算法通过四叉树算法压缩环境信息,并改进了蚁群算法中的信息素更新规则以提高效率,仿真结果表明该算法可以在与障碍物保持安全距离条件下寻找到一条最优路径。朱佳莹等^[46]提出一种融合粒子群与改进蚁群算法的AUV路径规划算法,利用粒子群算法预先优化信息素初始值,再利用改进的蚁群算法进行路径规划,仿真结果表明该融合算法能够有效提高初期寻径和全局搜索能力,减少收敛迭代次数并缩短搜索时间。Zhou等^[47]提出了一种将多目标粒子群算法与模糊逻辑控制算法相结合的改进算法,即将模糊逻辑应用于决策的路径重新规划系统,同时利用多目标粒子群算法,以采样任务和能耗为双目标对AUV或AUG

路径规划进行优化。Ji等^[48]针对AUG全覆盖路径规划问题,考虑AUG独特的锯齿形运动模式和通信约束,设计了一种基于蚁群的遗传算法,该算法重构了蚁群算法的转移概率、信息素更新规则和适应度函数,仿真结果表明该算法提高了覆盖效率,降低了覆盖成本,但是该算法没有考虑洋流影响。

3.2.4 路径规划算法总结

从上述各类路径规划算法可以总结出,AUG路径规划算法也经历了一个迭代的过程。在路径规划研究初期,简单易实现的传统算法是路径规划研究中的主流。但随着各类更优秀的智能算法被不断提出,智能优化算法逐步被应用于AUG的路径规划。目前,多种智能算法相融合的融合算法成为了AUG路径规划的主流算法。未来,多算法融合仍会是主流解决方案,但需要更多创新,使路径在能耗、长度与时间等各个方面达到平衡,规划出最优路径。

3.3 轨迹跟踪

AUG作为典型的欠驱动水下无人航行器,若将全驱动水下无人航行器的轨迹跟踪控制方法照搬过来,将出现航行器运动不稳定的状况,从而无法完成轨迹跟踪任务。当前国内外对AUG轨迹跟踪方面的研究还处于初级阶段,大多数研究对象为AUV。目前,轨迹跟踪控制的主要方法有:李雅普诺夫直接法、李雅普诺夫再设计法、反步法、滑模控制法、切换控制法、微分平滑法、智能控制等^[49]。

毕凤阳等^[50]基于反步法设计了一种非线性控制器,并利用滑模控制提高了系统的鲁棒性,在二维平面内实现了AUV的轨迹跟踪。高剑等^[51]基于级联系统理论,将跟踪误差分解为位置跟踪和航向角跟踪2个相互级联的系统,并采用反演法设计了跟踪控制器。孙兵等^[52]提出一种基于生物启发模型的反步滑模混合控制方法,用于研究开架水下机器人轨迹跟踪问题,在考虑机器人推进器推力的约束条件下,解决了速度跳变问题。夏国清等^[53]在考虑未知海流条件下,提出基于模糊神经网络L2增益鲁棒跟踪控制方法,提升了系统鲁棒性。徐健等^[54]结合反步法和自适应滑模控制法实现了UUV在未知环境中的三维轨迹跟踪,有效避免了设计过程中存在的奇异值问题。刘丽萍等^[55]设计了自适应反演滑模轨迹跟踪控制器用于二维平面内AUV的轨迹跟踪,该控制器可实现对系统总不确定性的估计,仿真表明该控制器性能优于基于海流观测的反演轨迹跟

踪控制器。俞建成等^[56]针对AUV水平面轨迹跟踪控制问题,分别基于模糊神经网络自适应控制和神经网络直接自适应控制技术设计了控制器,保证了该控制器的稳定性,实现了欠驱动AUV水平面内的轨迹跟踪控制。石晴晴等^[57]针对AUG受洋流影响,实际运行轨迹与预定路径差距大的问题,将注意力机制引入传统的长短期记忆网络模型,建立了改进的洋流预测模型。在考虑洋流的影响下,提出了基于深度强化学习的AUG路径跟踪算法,通过仿真及海试验证了该算法性能的优越性。但是该算法仅验证了直线跟踪,对于复杂的曲线路径跟踪及三维路径跟踪任务中的效果还有待验证。

各国学者针对AUG路径跟踪问题的研究也在逐步深入,从简单的迭代优化控制算法到PID(proportional integral derivative)控制算法再到更复杂的滑模控制算法以及多种算法融合,从二维轨迹跟踪也扩展到了三维轨迹跟踪。但是传统算法例如PID控制等过多依赖于参数的设定,在实际复杂多变的海洋环境中跟踪精度相对较低,即使调整参数也很难达到理想效果。随着人工智能的发展,强化学习等算法被应用于轨迹跟踪问题上,得益于该类算法具有良好的泛化能力,适用于复杂环境且能够探索未知区域,在轨迹跟踪问题上表现出极大的优越性。

4 关键技术展望

4.1 水下通信与导航定位技术

导航定位是决定AUG能否顺利完成任务的关键,目前水下航行器常用导航方式有:惯性导航、航位推算导航、水声导航、视觉导航、地球物理导航等。传统导航方式存在误差随时间增大、受传播介质影响较大、易受干扰等缺陷。目前组合导航方式、协同导航方式和结合人工智能的水下定位导航方式日渐成熟,未来在导航定位领域将占据更重要位置。

水下通信应紧密结合AUG应用背景和平台特点,重点突破高速率通信、长距离水下通信、大深度水下通信、隐蔽通信等关键技术,提升AUG在全海域条件下的通信速率和链路稳健性,增强AUG集群协同能力,拓展AUG军事和民用使用范围。

4.2 新型AUG研制

随着混合推进、柔性材料、先进仿生技术的发展成熟,未来AUG的设计或有重大改变。传统AUG仅依靠自身电池包移动来改变水中姿

态,或通过对机翼的布局优化来达到更好的滑翔性能,这种设计并不能对特定的海洋环境和任务需求做出适应性调整。Yang等^[58]设计的AUG采用了可变翼技术,可以实现水下滑翔机机翼的3种形状变化,极大增强了AUG的适应性。马峥等^[59]引入仿生推进技术,对拍动推进和波动推进方式进行了研究,结果表明将传统AUG固定机翼改为拍动推进方式可显著提升推进效率,最大推进效率可达63%。马磊等^[60]对混合驱动AUG的3种驱动模式进行了能耗分析,结果表明在净浮力为0时,水平直航模式即螺旋桨推进下能耗最少。目前国内此方面的研究还有进一步提升空间,随着混合推进、柔性材料、先进仿生技术的发展,这些技术会成为新一代AUG的基础技术之一。

4.3 智能集群控制技术

智能集群控制算法是智能集群控制技术的关键。当前新型智能集群控制算法层出不穷,但并没有考虑到海洋复杂环境和大深度、大范围下恶劣的通信条件。因此,很多较为优秀的算法并不能简单移植到AUG集群控制上来。现阶段大多数AUG智能算法均为对已有算法进行改进,并没有进行有针对性的新型算法的开发。尽管美国已实现由50台AUG组成的应用集群,但是目前研究多以小规模AUG组网编队为主,大规模、超大规模AUG组网研究仍然面临挑战。

5 结束语

AUG集群控制是提高该型水下航行器工作效率、完成更多复杂艰难任务的有效手段。目前对AUG集群的研究成果多是理论研究,大多使用模拟仿真验证成果,缺乏在实际复杂海洋环境中经受考验。AUG在大深度、大范围的实际运用场景,弱通信条件约束下的集群控制研究也有待加强,同时水下异构平台的集群控制也是未来的重点研究方向。相信随着人工智能、控制、通信等技术的持续发展,AUG集群控制技术也必将有更广阔的未来。

参考文献:

- [1] 中国政府网. 外交部就中国捕获美国无人潜航器事件等答问[EB/OL]. (2016-12-19)[2023-12-29]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-12/19/content_5150241.htm#1.
- [2] 孙雨桐,成丹,杨绍琼,等. 水下滑翔机观测台风“天鸽”过境的海洋响应研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(2): 198-208.
- [3] STEWART M, PAVLOS J, BOAT E. A means to networked persistent undersea surveillance[C]//Submarine Technology Symposium. Washington DC: University of Washington Tacoma, 2006: 2-38.
- [4] 李淑凤. 面向中尺度涡三维结构观测的水下滑翔机组网策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [5] 薛多锐. 基于虚拟领航者的多AUV混杂编队控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [6] YUAN Jian, ZHANG Feng li, ZHOU Zhong hai. Finite-time formation control for autonomous underwater vehicles with limited speed and communication range[J]. *Applied mechanics and materials*, 2014, 511/512: 909-912.
- [7] LIANG Qingwei, SUN Tianyuan, WANG Dongdong. Time-varying reliability indexes for multi-AUV cooperative system[J]. *Journal of systems engineering and electronics*, 2017, 28(2): 401-406.
- [8] 梁晓龙,孙强,尹忠海,等. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 11-16.
- [9] 王天应. 基于融合启发式算法的水下滑翔机编队路径规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [10] 杨洋,王征,胡致远,等. 无人水下航行器编队控制研究现状及技术综述[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(2): 1-7,94.
- [11] WANG P K C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation[J]. *Journal of robotic systems*, 1991, 8(2): 177-195.
- [12] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. *Digital ocean & underwater warfare*, 2023, 6(2): 198-208.

- bots[J]. *IEEE transactions on robotics and automation*, 2001, 17(6): 905–908.
- [13] 张润锋, 杨绍琼, 牛文栋, 等. 强扰动环境下水下滑翔机编队稳定性分析[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(23): 67–71.
ZHANG Runfeng, YANG Shaoqiong, NIU Wendong, et al. Stability analysis of underwater glider fleet under strong disturbance[J]. *Ship science and technology*, 2020, 42(23): 67–71.
- [14] LEONARD N, FIORELLI E. Virtual leaders, artificial potentials control of groups and coordinated[C]//Proc of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando: IEEE, 2001: 2968–2973.
- [15] 王冬梅, 方华京. 基于虚拟领航者的智能群体群集运动控制[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2008, 36(10): 5–7.
WANG Dongmei, FANG Huajing. Virtual leaders-based control of flocking motion of intelligent swarm[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science edition)*, 2008, 36(10): 5–7.
- [16] 周伟江, 陈涛, 任牧青. 基于虚拟领航者的 UUV 空间编队方法[J]. *应用科技*, 2011, 38(11): 9–12.
ZHOU Weijiang, CHEN Tao, REN Muqing. Virtual-leader based spatial formation method for UUV[J]. *Applied science and technology*, 2011, 38(11): 9–12.
- [17] MA Xiaojuan, WANG Yanhui, LI Shuai, et al. Formation control of discrete-time nonlinear multi-glider systems for both leader–follower and no-leader scenarios under switching topology: cases for a fleet consisting of a wave glider and multiple underwater gliders[J]. *Ocean engineering*, 2023, 276: 114003.
- [18] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis: IEEE, 1985: 500–505.
- [19] 李沛伦, 杨启. 基于改进人工势场法的水下滑翔机路径规划[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(7): 89–93.
LI Peilun, YANG Qi. Path planning for underwater glider based on improved artificial potential field method[J]. *Ship science and technology*, 2019, 41(7): 89–93.
- [20] 谢景鹏. 多机器鱼系统任务分配及群体行为控制方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
XIE Jingpeng. Research on task assignment and group behavior control of multi-robot fish system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020.
- [21] 庞师坤, 梁晓峰, 李英辉, 等. 基于零空间行为法的自主水下机器人避障策略[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(3): 295–304.
PANG Shikun, LIANG Xiaofeng, LI Yinghui, et al. Collision avoidance strategy for autonomous underwater vehicle based on null-space-based behavioral approach[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(3): 295–304.
- [22] 刘瑞轩, 张永林. 多水下机器人编队控制[J]. *计算机与数字工程*, 2019, 47(2): 349–353.
LIU Ruixuan, ZHANG Yonglin. Multi-underwater robot formation control[J]. *Computer & digital engineering*, 2019, 47(2): 349–353.
- [23] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous robots*, 1997, 4(4): 387–403.
- [24] 薛冬阳. 水下滑翔机编队协调控制与不确定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
XUE Dongyang. Research on coordinate control and uncertainty analysis for underwater glider formation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [25] 方一成. 多 AUV 路径规划与编队控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
FANG Yicheng. Research on multiple AUV path planning and formation control[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [26] LI Shuai, WANG Yanhui, MA Xiaojuan, et al. A method based on virtual hinges for multi-underwater glider formation[J]. *Ocean engineering*, 2023, 286: 115565.
- [27] EICHHORN M. A new concept for an obstacle avoidance system for the AUV “SLOCUM glider” operation under ice[C]//OCEANS 2009-EUROPE. Bremen: IEEE, 2009: 1–8.
- [28] HERNÁNDEZ J D, VIDAL E, VALLICROSA G, et al. Online path planning for autonomous underwater vehicles in unknown environments[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle: IEEE, 2015: 1152–1157.
- [29] MARINO A, ANTONELLI G. Experiments on sampling/patrolling with two autonomous underwater vehicles[J]. *Robotics and autonomous systems*, 2015, 67: 61–71.
- [30] 周耀鉴, 刘世杰, 俞建成, 等. 基于局部流场构建的水下滑翔机路径规划[J]. *机器人*, 2018, 40(1): 1–7.
ZHOU Yaojian, LIU Shijie, YU Jiancheng, et al. Underwater glider path planning based on local flow field construction[J]. *Robot*, 2018, 40(1): 1–7.
- [31] 何柏岩, 杜金辉, 杨绍琼, 等. 基于 VMD-LSSVM 的水下滑翔机深平均流预测[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(4): 388–396.
HE Baiyan, DU Jinhui, YANG Shaoqiong, et al. Prediction of underwater glider depth-averaged current velocity based on VMD-LSSVM[J]. *Journal of Tianjin University (science and technology edition)*, 2021, 54(4): 388–396.

- [32] LIU Yanji, MA Jie, MA Ning, et al. Path planning for underwater glider under control constraint[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2017, 9(8): 168781401771718.
- [33] 朱心科, 俞建成, 王晓辉. 多水下滑翔机海洋采样路径规划[J]. *信息与控制*, 2012, 41(4): 433–438.
ZHU Xinke, YU Jiancheng, WANG Xiaohui. Path planning of multiple underwater gliders for ocean sampling[J]. *Information and control*, 2012, 41(4): 433–438.
- [34] SU Yishan, ZHANG Lin, LI Yun, et al. A glider-assist routing protocol for underwater acoustic networks with trajectory prediction methods[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 154560–154572.
- [35] NI Jianjun, WU Liuying, WANG Shihao, et al. 3D real-time path planning for AUV based on improved bio-inspired neural network[C]//2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics. Nantou: IEEE, 2016: 1–2.
- [36] CHENG C T, FALLAHI K, LEUNG H, et al. A genetic algorithm-inspired UUV path planner based on dynamic programming[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews)*, 2012, 42(6): 1128–1134.
- [37] ZAMUDA A, SOSA J D H. Success history applied to expert system for underwater glider path planning using differential evolution[J]. *Expert systems with applications*, 2019, 119: 155–170.
- [38] 王浩亮, 王成林, 张春来, 等. 基于 AQPSO 算法的圆碟形水下滑翔机路径规划[J]. *船舶工程*, 2020, 42(2): 13–19, 27.
WANG Haoliang, WANG Chenglin, ZHANG Chunlai, et al. Path planning of saucer-type autonomous underwater glider based on AQPSO algorithm[J]. *Ship engineering*, 2020, 42(2): 13–19, 27.
- [39] 冯炜, 张静远, 王众, 等. 海洋环境下基于量子行为粒子群优化的时间最短路径规划方法[J]. *海军工程大学学报*, 2017, 29(6): 72–77.
FENG Wei, ZHANG Jingyuan, WANG Zhong, et al. A time-optimal path planning method based on quantum-behaved particle swarm optimization in ocean environment[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2017, 29(6): 72–77.
- [40] HAN Guangjie, ZHOU Zeren, ZHANG Tongwei, et al. Ant-colony-based complete-coverage path-planning algorithm for underwater gliders in ocean areas with thermoclines[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2020, 69(8): 8959–8971.
- [41] 宋大雷, 臧文川, 郭亭亭, 等. 水下滑翔机长航程全局路径规划[J]. *控制工程*, 2020, 27(10): 1679–1685.
SONG Dalei, ZANG Wenchuan, GUO Tingting, et al. Global path planning for long range voyage of underwater gliders[J]. *Control engineering of China*, 2020, 27(10): 1679–1685.
- [42] LAN Wei, JIN Xiang, CHANG Xin, et al. Path planning for underwater gliders in time-varying ocean current using deep reinforcement learning[J]. *Ocean engineering*, 2022, 262: 112226.
- [43] ZHU Xinke, JIN Xianglong, YU Jiancheng, et al. Path planning in stronger ocean current for underwater glider [C]//2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Shenyang: IEEE, 2015: 891–895.
- [44] ZHANG Honghan, GONG Liming, CHEN Tao, et al. Global path planning methods of UUV in coastal environment[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2016: 1018–1023.
- [45] ZHANG Guanglei, JIA Heming. Global path planning of AUV based on improved ant colony optimization algorithm[C]//2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Zhengzhou: IEEE, 2012: 606–610.
- [46] 朱佳莹, 高茂庭. 融合粒子群与改进蚁群算法的 AUV 路径规划算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(6): 267–273.
ZHU Jiaying, GAO Maoting. AUV path planning based on particle swarm optimization and improved ant colony optimization[J]. *Computer engineering and applications*, 2021, 57(6): 267–273.
- [47] ZHOU Hexiong, ZENG Zheng, LIAN Lian. Adaptive re-planning of AUVs for environmental sampling missions: a fuzzy decision support system based on multi-objective particle swarm optimization[J]. *International journal of fuzzy systems*, 2018, 20(2): 650–671.
- [48] JI Haijun, HU Hao, PENG Xingguang. Multi-underwater gliders coverage path planning based on ant colony optimization[J]. *Electronics*, 2022, 11(19): 3021.
- [49] 于浩森. 非线性因素约束下欠驱动 UUV 轨迹跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
YU Haomiao. Research on trajectory tracking control for underactuated UUV with nonlinear constrained factors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [50] 毕凤阳, 张嘉钟, 魏英杰, 等. 欠驱动 AUV 的鲁棒位置跟踪控制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(11): 1690–1695.
BI Fengyang, ZHANG Jiazhong, WEI Yingjie, et al. Robust position tracking control design for underactuated AUVs[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(11): 1690–1695.
- [51] 高剑, 徐德民, 严卫生, 等. 欠驱动自主水下航行器轨迹跟踪控制[J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(3): 404–408.

- GAO Jian, XU Demin, YAN Weisheng, et al. Applying cascaded systems theory to ensuring globally uniformly asymptotical stability of trajectory tracking controller of underactuated autonomous underwater vehicle(AUV)[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(3): 404–408.
- [52] 孙兵, 朱大奇, 邓志刚. 开架水下机器人生物启发离散轨迹跟踪控制[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(4): 454–462.
- SUN Bing, ZHU Daqi, DENG Zhigang. Bio-inspired discrete trajectory-tracking control for open-frame underwater vehicles[J]. *Control theory & applications*, 2013, 30(4): 454–462.
- [53] 夏国清, 杨莹, 赵为光. 欠驱动 AUV 模糊神经网络 L2 增益鲁棒跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28(3): 351–356.
- XIA Guoqing, YANG Ying, ZHAO Weiguang. FNN-based L2 following control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. *Control and decision*, 2013, 28(3): 351–356.
- [54] 徐健, 汪慢, 乔磊, 等. 欠驱动 UUV 三维轨迹跟踪的反步动态滑模控制[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2015, 43(8): 107–113.
- XU Jian, WANG Man, QIAO Lei, et al. Backstepping dynamical sliding mode controller for threedimensional trajectory tracking of underactuated UUV[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition)*, 2015, 43(8): 107–113.
- [55] 刘丽萍, 王红燕. 基于海流观测的欠驱动 AUV 自适应反演滑模轨迹跟踪[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(7): 745–753.
- LIU Liping, WANG Hongyan. Adaptive backstepping sliding mode for underactuated AUV trajectory tracking based on ocean current observer[J]. *Journal of Tianjin University (science and technology edition)*, 2020, 53(7): 745–753.
- [56] 俞建成, 张艾群, 王晓辉, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制[J]. *自动化学报*, 2007, 33(8): 840–846.
- YU Jiancheng, ZHANG Aiqun, WANG Xiaohui, et al. Direct adaptive control of underwater vehicles based on fuzzy neural networks[J]. *Acta automatica sinica*, 2007, 33(8): 840–846.
- [57] 石晴晴, 张润锋, 张连洪, 等. 基于强化学习算法的水下滑翔机路径跟踪研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(9): 1100–1110.
- SHI Qingqing, ZHANG Runfeng, ZHANG Lianhong, et al. Research on underwater gliders path tracking based on reinforcement learning algorithm[J]. *China mechanical engineering*, 2023, 34(9): 1100–1110.
- [58] YANG Zhijin, WANG Yanhui, WU Zhiliang, et al. Mechanism design of controllable wings for autonomous underwater gliders[C]//OCEANS 2014. Taipei: IEEE, 2014: 1–5.
- [59] 马峥, 李永成, 潘定一, 等. 水下滑翔机仿生推进水动力学特性研究[C]//第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集 (上册). 北京: 海洋出版社, 2017: 212–226.
- MA Zheng, LI Yongcheng, PAN Dingyi, et al. Hydrodynamic performance on bionic propulsion of an underwater glider[C]//The 14th National Hydrodynamics Academic Conference and the 28th National Symposium on Hydrodynamics. Beijing: Ocean Press, 2017: 212–226.
- [60] 马磊, 张宏伟, 王延辉, 等. 混合驱动水下滑翔机动力学特性与效率分析[J]. *机械设计*, 2017, 34(8): 26–31.
- MA Biao, ZHANG Hongwei, WANG Yanhui, et al. Dynamic characteristics and efficiency analysis of hybrid underwater glider[J]. *Journal of machine design*, 2017, 34(8): 26–31.

作者简介:



王征, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能控制技术、水下无人系统。
E-mail: marchy618@163.com。



屈新雨, 硕士研究生, 主要研究方向为水下无人系统。E-mail: 602257804@qq.com。



李厚朴, 教授, 博士, 主要研究方向为海洋测绘。发表学术论文 60 余篇。E-mail: lihoupu1985@126.com。