

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210360

微型自主水下机器人研究现状

康 帅^{1,2,3}, 俞建成^{1,2}, 张 进^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 综述了国内外微型自主水下机器人 (AUV) 的研究现状。首先, 对微型 AUV 的定义进行了梳理。其次, 基于微型 AUV 的平台结构特征, 对微型 AUV 的应用背景和特征进行了归纳和总结。最后, 对微型 AUV 的发展趋势进行了分析和探讨。为微型 AUV 的设计提供了参考, 对微型 AUV 的应用发展具有借鉴意义。

关键词: 自主水下机器人 (AUV); 微型 AUV; 结构特征

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2023)-02-0218-20

Research Status of Micro Autonomous Underwater Vehicle

KANG Shuai^{1,2,3}, YU Jiancheng^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*
2. *Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The research status of micro autonomous underwater vehicle (AUV) at home and abroad is reviewed. Firstly, the definition of micro AUV is clarified. Secondly, the development background and characteristics of micro AUV are summarized based on its structural characteristics. Finally, the development trends of micro AUV are analyzed and discussed. This review work can provide a reference for the design, application, and development of micro AUV.

Keywords: autonomous underwater vehicle (AUV); micro AUV; structural characteristic

1 引言 (Introduction)

自主水下机器人 (AUV) 在海洋环境观测^[1-2]、海洋资源探查^[3]、海底地形测绘^[4]等民用方面发挥着重要的作用, 同时, 在水下目标探测^[5-6]、反水雷战^[7-8]等军事应用方面也扮演着重要的角色。随着传感器技术^[9]、3D 打印技术^[10]和轻量化技术^[11]的发展和普及, 在不削弱 AUV 作业能力的前提下压缩其排水量已成为可能。更小的尺寸、更轻的重量、更低的功耗和更低的成本同样是 AUV 的发展趋势之一^[12]。微型 AUV 是顺应该趋势形成的产物, 也可认为它引领了这一趋势。与传统中大型 AUV 相比, 微型 AUV 具有小 (尺寸)、快 (速度)、灵 (操纵性) 的优势, 适合批量生产和集群作业, 受到了各国学者和用户的广泛关注。

微型 AUV 具有尺寸小、重量轻、功耗低、成本低的特点, 且维护简单、便于运输和船上作

业, 对拓展 AUV 的应用场景具有积极作用。浅水环境观测和科研教学是微型 AUV 典型的民用应用场景^[13]。权威市场调研分析网站“Research and Markets”在 2020 年 2 月公布了题为《AUV 的市场分析、发展趋势及预测》的调研报告摘要^[14], 摘要中指出, 全球 AUV 市值预计在 2025 年增长至 12 亿美元。其中最大作业深度可达 100 m 的浅层 AUV (shallow AUV) 有望在 2025 年之前获得超过 3.771 亿美元的收入, 将为全球水下机器人的经济增长提供重要动力。因此, 微型 AUV 在民用上体现出了巨大的发展前景。

微型 AUV 还可用于执行集群作业的分布式感知任务, 多机协同作业可扩展微型 AUV 的感知能力^[15-17]。同步时空下的高分辨率水文观测、目标定位和识别, 以及噪声源的检测和跟踪是微型 AUV 典型的军事用途^[18]。已为美国海军和潜艇部队提供产品服务 23 年的 Riptide 公司总裁 Smith 在

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0300801); 国家自然科学基金 (51909257, U1709202); 辽宁省自然科学基金 (2021-MS-031); 兴辽英才计划 (XLYC2007035)。

通信作者: 张进, zhangjin1@sia.cn 收稿/录用/修回: 2021-08-11/2021-12-08/2021-12-10

美国潜艇部队官方刊物《Undersea Warfare》2017 年冬季版上发表了文章《The next big thing in undersea warfare may be MICRO》^[19], 文章指出, 2000 年美国国防预算的减少促进了微小型 AUV 的发展, 同时为了强化有限潜艇的综合能力, 美国海军正在寻找更多的微小型 AUV 来扩展潜艇的感知范围, 并充当战斗力的倍增器。因此, 微小型 AUV 在军用上同样具有发展潜力。

基于微小型 AUV 在军民两用中的优势, 越来越多的微小型 AUV 涌现出来, 微小型 AUV 平台技术近年来也得到了快速发展。然而, 微小型 AUV 的特征及平台技术尚未得到系统的归纳, 并且有必要对微小型 AUV 的发展趋势进行分析和探讨。因此, 本文对国内外微小型 AUV 的研究现状进行综述, 对其应用背景、特征及平台技术进行归纳, 并对微小型 AUV 的发展趋势进行探讨, 旨在为其研制设计和实际应用提供参考。

2 微小型 AUV 的定义及特征 (Definition and features of micro AUV)

2.1 微小型 AUV 的定义

广义上, 微小型 AUV 是依靠自身携带能源驱动、自主作业的微小型水下机器人, 属于 AUV 的一种。狭义上, 不同研究团队对 AUV 的分类有着不同的标准, 导致对微小型 AUV 的定义也不尽相同。目前世界上对其类型的划分主要参照以下因素。

2.1.1 排水量和载荷

在美国海军公布的 Master 计划^[20]中, 依据排水量和载荷, AUV 被划分为 4 个级别, 如表 1 所示。微小型 AUV 对应表 1 中便携级, 用于执行浅水环境调查、水下目标探测和爆炸军械处理等任务。

表 1 基于排水量和载荷的 AUV 分类^[20]

Tab.1 AUV classification based on its displacement and load^[20]

级别	排水量 /kg	负载 /kg
便携级	< 45.4	< 7
轻量级	≈ 227	28.3~84.9
重量级	≈ 1342	113.2~169.8
巨级	> 9080	> 424.5

2.1.2 直径

俄罗斯学者洛波塔等^[21]在《机器人技术系统目前发展趋势: 军用和特种海洋机器人技术系统》

中依据 AUV 的直径大小将其分为以下 5 个级别, 如表 2 所示。微小型 AUV 对应表 2 中微型级, 直径不大于 200 mm。

表 2 基于直径的 AUV 分类^[21]
Tab.2 Diameter-based AUV classification^[21]

级别	直径 /mm	用途
微型	< 200	海底勘查或反潜作战干扰
小型	≈ 300	海底地形测绘和水雷探测
中型	≈ 500	海底地形测绘和水雷探测
大型	≈ 2000	可装在潜艇上, 采用鱼雷管发射以提高探测系统作用距离, 或将载荷输送至潜艇无法到达或危险的区域
超大型	> 2000	长时间执行侦察任务, 作为其他装备和 AUV 的母舰

2.1.3 模块数量

Beobachtung 公司^[22]依据执行机构、能源等模块数量将其研制的 Amethyst AUV 分为微型、小型、标准型、强化型及 AUV/ROV 混合型, 如图 1 所示。Amethyst AUV 采用了模块化设计, 根据不同的应用场景选取适合配置的型号。微小型 AUV 对应图 1 中的微型配置。微型配置 AUV 采用单个前向推进器和单个舵相配合的驱动方案。相比于其他配置, 微型配置 AUV 在携带上具有优势。

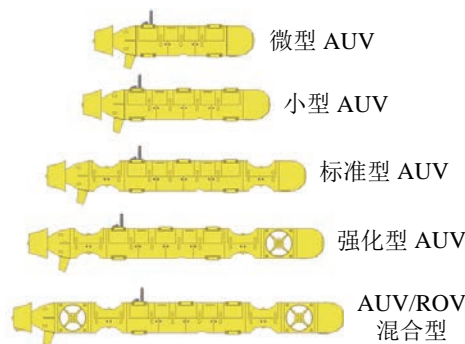


图 1 Amethyst AUV 的 5 种模块化配置

Fig.1 Five modular configurations of the Amethyst AUV

综合不同研究团队对微小型 AUV 的划分方法, 总结出微小型 AUV 通常具有如下特性: 排水量或空气中重量通常不大于 50 kgf; 可搭载负载通常不大于 7 kg; 若其主体为回转体, 则主体直径通常不大于 200 mm。

2.2 微小型 AUV 的特征

下面对微小型 AUV 在尺寸、重量、功耗和成本上的特征进行逐一阐述。

2.2.1 尺寸

部分微小型 AUV 整机尺寸符合声呐浮标中 A 型尺寸的标准^[23], 即长度不大于 914.4 mm, 直径

不大于 123.875 mm。符合该标准的微小型 AUV 可用于空投和鱼雷管发射, 对实现水下目标探测和在海洋环境观测上进行快速部署具有重要意义。

2.2.2 重量

微小型 AUV 重量通常不大于 50 kgf, 符合 A 型尺寸标准的微小型 AUV 重量不大于 17.69 kgf。微小型 AUV 通常可由一个成年人轻易地提起、搬运, 对布放、回收、维护、装箱等船上作业极为便利。

2.2.3 功耗

微小型 AUV 通常依靠 12 V 或 24 V 直流电源驱动, 瞬时功率的大小往往取决于瞬时电流的大小。由于微小型 AUV 空间有限, 所搭载的电机和传感器等功率普遍不大, 平均功率通常不大于 100 W。

2.2.4 成本

微小型 AUV 成本通常仅为 1 万~1.5 万美元^[24], 远低于更高级别 AUV 的成本, 适合批量生产。如高性能的小型 AUV ($10^2 \sim 10^3$ kg 级) 成本约为 25 万美元^[24], 中型 AUV “REMUS 600” 成本为 100 万美元^[12], 超大型 AUV “Boeing Orca” 成本为 4 300 万美元^[12]。

3 典型微小型 AUV 及其特征 (Typical micro AUVs and their features)

本文对国内外典型的微小型 AUV 进行了调研, 基于其结构特征将其分为 3 类: 回转体类、箭体类和多体类。

3.1 回转体类

该类微小型 AUV 的主体为回转体, 舰部配备单一的推进器。其中一些微小型 AUV 完全符合声呐浮标中 A 型尺寸的标准^[23], 通常被用作反潜训练靶标、反潜干扰装置和快速部署装置, 约束其外形使其可用于空投和鱼雷管发射。另外一些微小型 AUV 主体参数符合 A 型尺寸的标准, 其舵、天线等部件未被完全约束在该尺寸内, 但其通常配有专用的投送装置, 可作为更大级别 AUV 的子体以增大探测范围、进行多线程作业以及执行探雷等危险任务。

3.1.1 外形尺寸完全符合 A 型尺寸标准

外形尺寸完全符合 A 型尺寸标准的典型微小型 AUV 包括 REMUS M3V (micro 300 m vehicle)^[24-25]、ecoSUB μ 5 AUV^[26]、MK 39 Mod 2 EMATT (expendable mobile ASW training target)^[27-28]、ALAUV (air-launched AUV)^[29-30] 和 SEAScout AUV^[31], 如图 2 所示。



图 2 完全符合 A 型尺寸标准的典型微小型 AUV
Fig.2 Typical micro AUVs that fully complies with A-size standard

REMUS M3V^[24-25] 是由美国伍兹霍尔海洋研究所海洋系统实验室在 2018 年发布的一款低成本的微小型 AUV, 如图 2(a) 所示。该 AUV 是 REMUS 系列中尺寸最小且唯一适于空投的 AUV, 可以作为拖鱼^[32]使用。其长为 914.4 mm, 直径为 123.825 mm, 重量为 10 kgf, 最大工作深度为 300 m, 最大航程为 50 km。该 AUV 内部携带可充电的锂离子电池, 电量为 360 W·h, 以 3~4 kn 速度运行时能够续航 6~7 h。在基础配置中搭载了姿态和航向参考系统 (AHRS)、GPS 及 WiFi 通信模块。在标准调查配置中搭载了单频 900 kHz 的侧扫声呐、1000 kHz 的多普勒计程仪 (DVL)、铱星通信系统以及声学通信系统。该 AUV 拥有优异的推进性能, 其最大速度可达 10 kn, 可在强流区域运行。

ecoSUB μ 5 AUV^[26] 是由英国南安普顿大学国家海洋学中心 Phillips 等在 2017 年研制出的一款低成本、灵巧型的微小型 AUV, 如图 2(b) 所示。其成本比常规大型 AUV 低 2 个数量级, 比常规商业级水下滑翔机低 1 个数量级。研发该 AUV 的目的是快速、经济、有效地进行大尺度立体海洋观测, 以便能够对如溢油或藻华等现象作出快速反应。该 AUV 适用于空投和集群作业, 其总长不超过 917 mm,

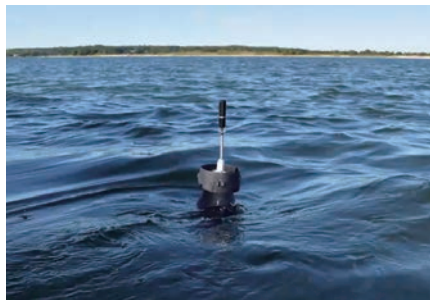
直径不大于 120 mm, 重量不超过 5 kgf, 最大工作深度 500 m, 续航时间 24 h, 巡航速度 1 kn, 可搭载多种科学载荷。该 AUV 通过磁耦合技术驱动舵和前向推进器, 配备了俯仰调节装置以改善其水面的通信姿态, 同时可以围绕定点进行定深航行。此外, 该 AUV 还搭载了 GPS、压力传感器、微机电系统和惯性测量单元 (IMU) 用于导航。

MK 39 Mod 2 EMATT^[27-28] 是由洛克希德·马丁公司在 2003 年研制的一种全天候、轻巧、廉价和消耗型微小型 AUV, 如图 2(c) 所示。该 AUV 主要作为反潜训练靶标, 用于在空中和水面反潜作战平台的反潜训练中模拟潜艇运行时产生噪声的频率、声强等声信息。EMATT AUV 不仅能在速度、深度和航向等运动参数上模拟安静型柴电核潜艇, 同时也可产生无源离散音调, 在声学上模拟安静型柴电潜艇。该 AUV 长 914.4 mm, 直径 123.825 mm, 重 9.98 kgf, 最大速度 8 kn, 巡航速度下续航时间 10 h, 最大作业深度 182.88 m。

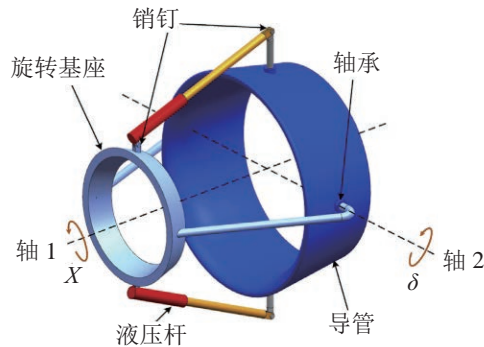
ALAUV^[29-30] 是由南安普顿大学 Stevenson 研究团队研发的空投 AUV, 如图 2(d) 所示。该 AUV 旨在通过快速部署的方式对大西洋经向横断面、深海平原、经向倾覆环流以及极地地区进行观测。该 AUV 长 530 mm, 直径 83 mm, 重 2.5 kgf, 在 1 kn

巡航速度下最大航程为 350 km, 最大作业深度为 500 m, 电池电量为 180 W·h, 综合推进效率 30%, 整机功率为 0.42 W, 整机成本为 5934 欧元, 可作为一次性产品使用。此外, 该 AUV 搭载“PNI-TCM5LT”电子罗盘用于导航, 搭载可粘在 AUV 表面的 GPS 天线用于定位。在文 [30] 中, Stevenson 等较为详细地介绍了空投 AUV 的实施方案, 并对可能用于空投的飞行器进行了归纳。在国内, 西北工业大学潘光等^[33-35]对空投 AUV 入水过程进行了数值模拟, 同时对空投 AUV 的抗冲击结构优化问题进行了研究, 并取得了一定成果。

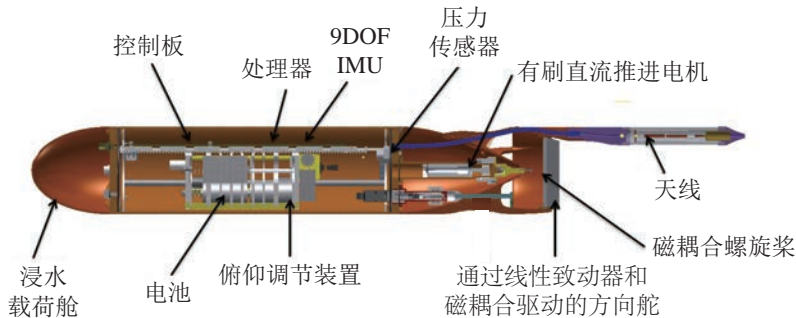
北美制造商 QINETIQ 公司在 2014 年发布了一款符合 A 型尺寸标准的微小型 AUV SEAScout^[31], 如图 2(e) 所示。该 AUV 可通过配置不同的载荷, 执行侦察、通信中继、环境观测等任务, 内部搭载了俯仰调节机构, 可以在浮标和 AUV 之间切换模式。该 AUV 采用了分体式柔性天线, 分别为 GPS、铱星和无线电天线。该 AUV 长 914.4 mm, 直径 123.825 mm, 最大速度 15 kn, 最大工作深度 243.84 m, 续航时间 8 h, 电池电量 230 W·h, 运行电压 14.4 V, 搭载了 AHRs、深度计和 GPS 等传感器。采用空心推进器结构, 可在艉部拖曳光纤、声学阵列等载荷。



(a) REMUS M3V采用浮标模式进行水面通信



(b) 矢量导管结构示意图



(c) ecoSUB $\mu 5$ AUV 采用的桨后舵结构

图 3 为达到 A 型尺寸标准在结构和作业模式上作出调整

Fig.3 Adjustments made in structure and work mode to reach A-size standard

为了严格符合 A 型尺寸的标准,设计者在结构和作业模式上进行了调整,如图 3 所示。在天线结构上,REMUS M3V 与 SEAScout AUV 均采用了浮标或水下滑翔机模式进行通信的作业模式,如图 3(a) 所示。在艏部推进器后方布置柔性天线,同时内部也增设了浮力调节装置,通过调节浮力和姿态将天线充分露出水面。在转向结构上,ALAUV 与 EMATT AUV 依然采用传统的“桨前舵”形式,但通过舍弃舵长度的方式实现了外形约束。REMUS M3V 采用了矢量导管结构^[36-37],如图 3(b) 所示。ecoSUB μ 5 AUV 采用“桨后舵”和水平后置天线的结构以实现严格外形约束,如图 3(c) 所示。

“桨后舵”结构与“桨前舵”相比,在相同的舵面积和质心位置下,“桨后舵”结构所产生的转舵力臂更长、转舵力矩更大,如图 4 所示。此外,舵处实际来流速度越大,舵效越显著。对于位于螺旋桨尾流中的舵,由于桨后的水流速度比桨前约增加 30%,舵效显著增大,且随螺旋桨负荷的增大而增加,但随二者间的间隙增大而减小^[38]。

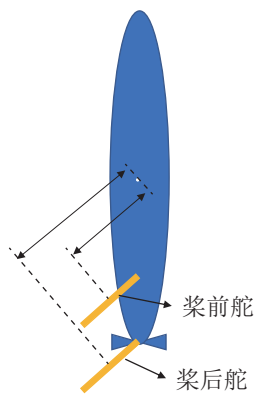


图 4 不同舵位力臂示意图

Fig.4 Schematic diagram of force arms in different rudder positions

3.1.2 仅主体尺寸符合 A 型尺寸标准

仅主体尺寸符合 A 型尺寸标准的典型微小型 AUV 包括 RIPTIDE μ AUV^[19,39-40]、NemoSens AUV^[41] 和 SandShark AUV^[42-43],如图 5 所示。

RIPTIDE μ AUV^[19,39-40] 是由美国制造商 Riptide Autonomous Solutions 在 2017 年发布的一款可作为消耗性反潜训练靶标的微小型 AUV,如图 5(a) 所示。该 AUV 具有 3 个独立驱动的舵片,使机体具备良好的横倾稳定性。在正上方的舵片中集成了 GPS 天线、WiFi 通信天线和 LED 光源,避免了天线对 AUV 水动力外形的影响。该 AUV 配备了多种能源选项,可分别由 144 个碱性 AA 电池、可充电的锂离子电池及铝海水电池供电,续航时间

分别为 40 h、88 h 及 400 h。其中铝海水电池可以存储约 5 kW·h 的电量,可以支持该 AUV 以 2.8 kn 的速度航行 2 778 km。该 AUV 长 559 mm,直径 123.825 mm,重 11.34 kgf,最大速度 10 kn,最大工作深度 300 m。常规搭载深度计、温度计、高度计、AHRS 及 WiFi 通信单元,选配惯性导航系统 (INS)、DVL 及铱星通讯模块。得益于铝海水电池等新能源技术,该 AUV 的续航能力十分突出,最大可达 400 h,是目前微小型 AUV 续航时间最长的一款。



(a) RIPTIDE μ AUV



(b) NemoSens AUV



(c) SandShark AUV

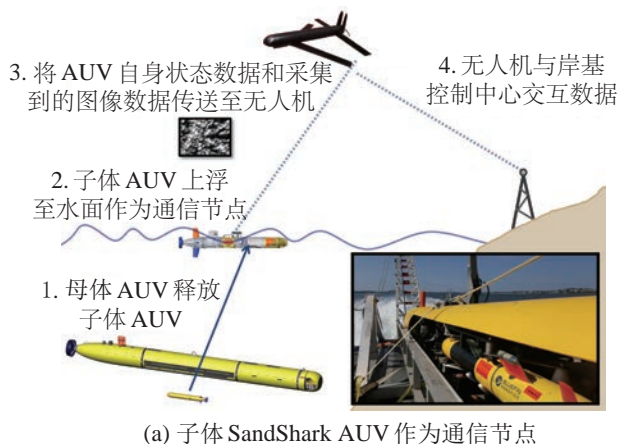
图 5 仅主体尺寸符合 A 型尺寸标准的典型微小型 AUV
Fig.5 Typical micro AUVs whose main body complies with A-size standard

NemoSens AUV^[41] 是由法国 RTSYS 公司在 2017 年发布的一款微小型 AUV,主要用于海底地形测绘、海洋环境监测、声学监测以及水雷排查,如图 5(b) 所示。该 AUV 可搭载侧扫声呐、温盐深测量系统 (CTD)、溶解氧传感器、浊度计、碳氢化合物传感器,通过 GPS 和 INS 进行定位导航。此外,该 AUV 在采用浮标模式作业时可采用声学定位技术,支持最多 7 台 AUV 通过集群模式协同作业。该 AUV 长 960 mm,直径 124 mm,重 10 kgf,最大工作深度 300 m,航速范围 2~10 kn,最大续航时间 8 h。

SandShark AUV^[42-43] 是由美国 Bluefin 机器人在 2017 年发布的一款低成本微小型 AUV,适合在海岸线附近和内陆水域使用,如图 5(c) 所示。该 AUV 具有一定的正浮力,无浮力调节系统,不具备悬停功能,可实现 3 个自由度的运动。该 AUV 所配备的推进器采用磁耦合技术,只提供向前的推力,未采用 Bluefin 系列中其他 AUV 采用的矢量推进技术。此外,该 AUV 还配备了 3 个转向舵,

舵片运动范围为 $\pm 25^\circ$ 。该 AUV 长 510 mm, 直径 123.825 mm, 重 6.1 kgf, 航行速度 2~4 kn, 最大工作深度 200 m, 携带电池电量 266 W·h, 搭载基本型载荷以 2.5 kn 速度运行时续航时间为 6 h。该 AUV 未搭配 INS 和 DVL, 而是依靠由 3 轴陀螺仪、3 轴磁力计和 3 轴加速度计组成的 IMU 来提取 AUV 横倾、俯仰和航向信息。该 AUV 可搭载集成的侧扫声呐和声学调制解调器, 用于声学探测和海洋环境观测, 还可作为军事演习中的消耗品。

除了单个 SandShark AUV 执行专用任务外, Bluefin 公司还提出了由 Bluefin 21 AUV 装载多个 SandShark AUV 进行母子式作业的新型工作模式。当需要与岸基或空基控制中心交互数据时, 母体 AUV 可通过释放 SandShark AUV 上浮水面作为通信节点来实现, 如图 6(a) 所示。此外, 当同时追踪多个目标时, 母体 AUV 可释放出 SandShark AUV 进行多线程作业, 如图 6(b) 所示。



(b) Bluefin 21 AUV 释放 SandShark AUV

图 6 Bluefin 21 AUV 与 SandShark AUV 母子式操作

Fig.6 Bluefin 21 AUV and SandShark AUV for mother-child operation

对于直径 120 mm、重 10 kgf 级别的微小型 AUV, 国内一些企业也进行了积极的探索。精灵 M120^[44] 是由中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司发布的一款微小型 AUV, 如图 7 所示。该 AUV 长 1 m, 直径 120 mm, 重约 10 kgf, 最大作业深度 300 m, 最大速度 6 kn, 续航时间 12 h。该 AUV

体积小、作业灵活, 既可以搭载小型声学载荷实现水下探查, 又能搭载水声通讯设备实现集群作业。



图 7 精灵 M120 微小型 AUV

Fig.7 Micro AUV "Jingling M120"

3.1.3 其他回转体微小型 AUV

其他回转体微小型 AUV 直径为 200 mm 左右, 典型代表包括 REMUS 100 AUV^[45-46] 和 Iver3 AUV^[47-48]。

REMUS 100 AUV^[45-46] 是由美国伍兹霍尔海洋研究所研制的微小型 AUV, 如图 8 所示。该 AUV 主要用于近海高分辨率环境观测、水雷探测、港口安全检查、搜寻救援和水下地图绘制等。其标准配置中搭载了双频侧扫声呐、DVL、GPS、WiFi 通讯模块、长基线导航模块和水声通信模块等。该 AUV 长 1.7 m, 直径 190 mm, 重 32 kgf, 最大航行速度 5 kn, 最大作业深度 100 m, 携带电池电量 1.5 kW·h, 在 3 kn 速度下续航时间可达 12 h, 最大航程 72 km。



图 8 REMUS 100 AUV

Fig.8 REMUS 100 AUV

Iver3 AUV^[47-48] 是由美国 OceanServer 公司在 2013 年发布的面向近海环境观测和搜索救援的低成本微小型 AUV, 如图 9 所示。该 AUV 长 1.52~2.16 m, 直径 147 mm, 重 27~39 kgf, 最大作业深度 100 m, 最大速度 4 kn, 配备了 800 W·h

的锂离子电池,以巡航速度 2.5 kn 运行时续航时间可达 12 h。此外,该 AUV 搭载 WiFi 模块、深度计和电子罗盘用于导航通信,还可搭载侧扫声呐及其他声学载荷进行声学探测。



图9 Iver3 AUV
Fig.9 Iver3 AUV

对于直径 200 mm、重 50 kgf 以内的微型 AUV,国内科研院所、高校和企业也进行了积极的探索。典型代表包括探索 100^[49]、无影便携式 AUV^[50]和云帆 AUV^[51]。



图10 探索 100 AUV
Fig.10 TS100 AUV

探索 100^[49]是由中国科学院沈阳自动化研究所面向海洋环境探测和水下观测需求研制的微型 AUV,如图 10 所示。该 AUV 采用模块化设计,分为基本航行体和扩展模块,基本航行体可实现自主航行及运动控制,可通过搭载不同的扩展模块(传感器)实现不同的使命^[52]。此外,通过搭载水声通信机,可以实现多 AUV 组网协同观测,在海洋与近岸环境观测及保护、海洋科学调查等方面有较大的应用潜力^[53]。该 AUV 长 1.7 m,直径 200 mm,重 47 kgf,工作水深 100 m,最大速度 5 kn,可在 3 kn 航速下持续航行 70 km 以上。搭载的主要传感器有 CTD、侧扫声呐、DVL 等。该 AUV 及相关技术在高原湖泊探测中得到了充分验证,曾搭载测深

仪和多参数水质仪等科学载荷,对由冰川融水形成的喀拉库勒湖进行了高精度湖底地形测绘和水质多参数剖面连续观测,对分析冰川融水对湖泊特性影响有着重要意义。

无影便携式 AUV^[50]是由西北工业大学与天和防务公司研制运营的适用于科研教学的 AUV,如图 11 所示。该 AUV 具备超深、超时停车,超出范围报警,紧急情况抛载等安全功能,同时具有卫星定位指示功能。该 AUV 能满足海洋领域、水声领域科研人员在研究平台方面的需求。



图11 无影便携式 AUV
Fig.11 Wuying portable AUV

云帆 AUV^[51]是由天津瀚海蓝帆海洋科技有限公司研制的一款面向科研教学、辅助救援、航道勘测以及江河湖泊等水域的观测的微型 AUV,有内十字舵和外十字舵 2 个版本,如图 12(a)和图 12(b)所示。该 AUV 长 1.55~2 m,直径 200 mm,重 40~50 kgf,最大作业深度 200 m,巡航速度 3 kn,续航时间 11 h。此外,该公司还推出了直径为 150 mm 的智帆 AUV^[54],如图 12(c)所示。该 AUV 配备了 4 个固定式艏部推进器和 2 个槽道推进器,具有比传统桨舵推进式 AUV 更好的操纵性。

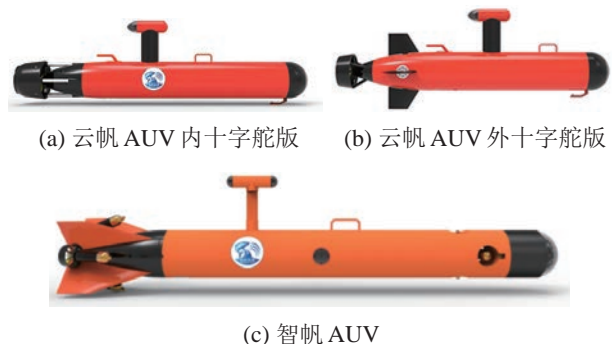


图12 天津瀚海蓝帆公司所发布的微型 AUV
Fig.12 Micro AUV developed by Tianjin Hanhai Lanfan Marine Technology Corp

3.2 箭体类

该类微型 AUV 突破回转体外形约束,呈箭体形状,通常配备多个推进器且布置方式多样,包括布置于载体中轴线的单前向推进器、外探到载体两侧的双前向推进器或垂向推进器,槽道形式的垂向推进器或侧向推进器。丰富的推进器配置使得该

类微小型 AUV 具有良好的操纵性, 适用于需要高机动能力的作业场景。

Vertex AUV^[55] 是由瑞士 Hydromea 公司在 2018 年发布的一款微小型、便携式、高度集成的新型分布式 AUV, 主要用于水体要素测量, 如图 13 所示。Vertex AUV 长 700 mm, 空气中重 7 kgf, 最大工作深度 300 m, 最大速度 3 kn, 电池电压 14.4 V, 携带电池电量 160 W·h, 续航时间 6~8 h, 可搭载 1 kg 的科学载荷, 具有 5 个推进器, 可实现前进后退、转艏、俯仰、横滚和升沉 5 个自由度的运动, 具有定深航行、悬停能力, 通过搭载多样化的传感器, 可测量水体温度、盐度、深度、浊度及 pH 值, 还可测量氨、氯化物、溶解氧、硝酸盐、藻类等物质在水中的含量。其推进器采用了无毂螺旋桨^[56-57]的结构形式, 避免了绳、线、水草等对桨造成的缠绕问题。此外, Vertex AUV 采用了先进的组网通信系统, 该系统融合了声学相对定位模块、低频无线电模块、短程光通信模块、GPS 和 INS。基于该系统, 10 个 Vertex AUV 通过集群作业能在 2 h 内对面积为 0.5 km² 的热液羽流区域进行覆盖探测, 实现高效、高分辨率地构建羽流的 3 维结构^[58]。

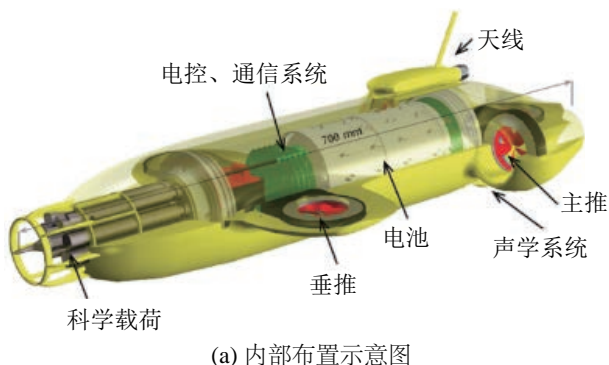


图 13 Vertex AUV
Fig.13 Vertex AUV

MONSUN AUV^[59-61] 是由德国卢贝克大学 Osterloh 等在 2012 年研制的一款通过集群作业进行水下环境监测的高机动微小型 AUV, 如图 14 所示。

在驱动配置方面, 该 AUV 配备了 2 个前向推进器, 4 个垂向推进器, 分别布置在载体两侧, 除了在侧移方向上均具有解耦的机动能力及优异的操纵性。在传感器配置方面, 该 AUV 配备了 Surveyor SRV-1 Blackfin 相机、AHRS、IMU、深度计、温度计以及避碰声呐。该 AUV 长 600 mm, 主体直径 100 mm, 重 4.2 kgf, 最大速度 4 kn, 最大作业深度 10 m, 携带电池电量 133.2 W·h。



图 14 MONSUN AUV
Fig.14 MONSUN AUV

COTSbot AUV^[62-63] 是由澳大利亚昆士兰科技大学 Dayoub 等在 2015 年为保护大堡礁的生态平衡研制的一款水下机器人, 如图 15 所示。大堡礁是世界上最大最长的珊瑚礁, 但该区域的珊瑚饱受棘冠海星的破坏。该机器人是一款可以作业的 AUV, 其主要任务是在复杂的礁石环境中自主导航并自动检测珊瑚上的棘冠海星, 最后喷射可消灭海星的药剂。COTSbot AUV 利用先进的机器人视觉和分类算法, 以及浅层沿海水域机器人监测的经验和技术, 能够有效完成对海星的识别和注射任务。该 AUV 长 1.35 m, 重 26~30 kgf, 最大工作深度 100 m, 常规工作深度不超过 30 m, 巡航速度 1 kn, 最大速度 4 kn, 续航时间大于 6 h, 配备了 2 个前向推进器、2 个垂向推进器和 1 个布置在槽道内的垂向推进器, 具有 5 个运动自由度, 可实现悬停、定高航行。



图 15 COTSbot AUV
Fig.15 COTSbot AUV

Sparus II AUV^[64] 是由西班牙吉罗纳大学在 2018 年研制的面向浅海地区海底测量的 AUV, 具

有水动力外形好、可悬停、小型化易于操作、模块化的特征。该 AUV 具有 2 个前向推进器、1 个垂向推进器以及位于前向推进器后方的 2 个舵，可实现前进、升沉、俯仰和转艏 4 个自由度的运动，具有悬停功能。该 AUV 通过 WiFi 进行通信，搭载了 IMU、DVL、压力传感器和 GPS 等传感器。该 AUV 长 1.6 m，宽 0.46 m，主体直径 230 mm，重 52 kgf，最大速度 3 kn，最大工作深度 200 m，携带锂离子电池组，电量为 1 400 W·h，续航时间 8~10 h。

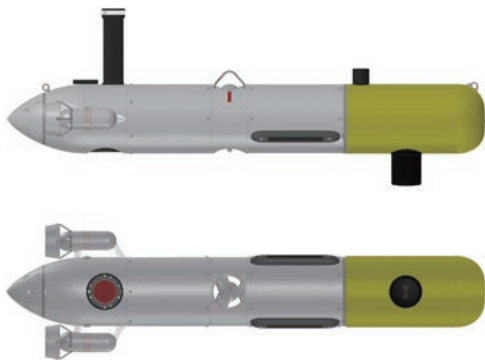
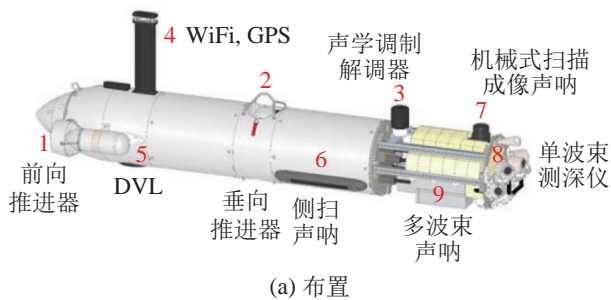


图 16 Sparus II AUV
Fig.16 Sparus II AUV

SwarmDiver AUV^[65-66] 是由美国 Aquabotix 公司在 2018 年发布的一款新型微型 AUV，如图 17 所示。该 AUV 可在水下和水面进行两栖作业，主要用于集群作业，执行安保、环境监测、羽流跟踪等任务。该 AUV 搭载了测量温度和压力的传感器，可以通过 GPS 进行定位，精度在 2.5 m 范围内，在艏部配备了 2 个推进器，外部挂载了一个浮力调节装置。该 AUV 长 750 mm，宽 130 mm，重 1.7 kgf，最大工作深度 50 m，最大速度 1.3 kn，续航时间为 2.5 h，航程 7 km。该 AUV 配备了专门研制的“集群传感器”，可保证其掌握周围其他 AUV 的位置，并与其他 AUV 共同执行集群导航算法。该公司曾部署了 40 余台 SwarmDiver AUV 进行集群工作，验证了其集群导航算法，为提升海洋数据的质量和数量提供了平台支撑。



图 17 SwarmDiver AUV
Fig.17 SwarmDiver AUV

SHAD AUV^[67] 是由葡萄牙波尔图大学工程学院 Gonçalves 等在 2016 年研制出的一款面向河流、湖泊和港口等强流有限水域环境观测的微型 AUV，如图 18 所示。该 AUV 搭载了用于导航定位的 AHRS、深度计和 GPS 等传感器，具有 4 个运动自由度。2 个前向推进器平行布置在 AUV 双侧铝型材上，2 个垂向推进器分别布置在 AUV 前后的槽道内。推进器电机的最大功率 130 W，最大推力 23 N。该 AUV 长 900 mm，直径 120 mm，重量不大于 10 kgf，工作深度 20 m，携带电池电量 82 W·h。该 AUV 的轨迹跟踪误差为 100 mm，航向误差约为 1°，拥有出色的悬停能力，能满足强流水域观测的要求。

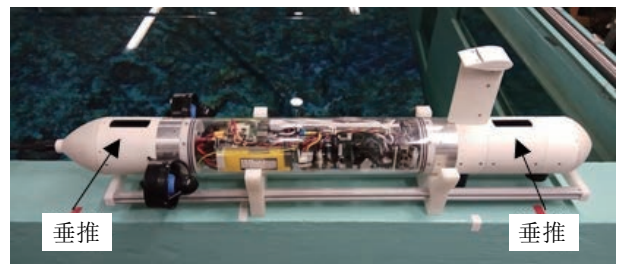
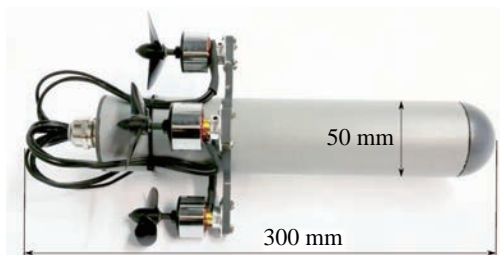


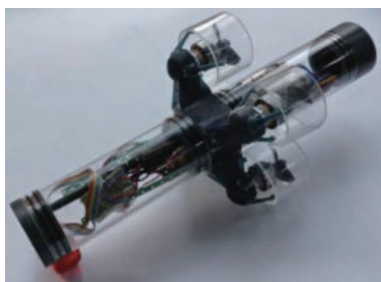
图 18 SHAD AUV
Fig.18 SHAD AUV

HippoCampus μ AUV^[68-72] 是由德国汉堡理工大学 Hackbarth 等研制的微型 AUV，如图 19 所示。研究团队利用其小型化、低成本的特点，通过集群作业的方式寻找海洋热源、污染源和流信息，为计算流体力学 (CFD) 数值模拟提供合理的设置参数和边界条件，致力于使 CFD 软件模拟出一个真实的海洋环境。该 AUV 在水平方向配置了 4 个推进器。与传统桨舵推进相比，该布置形式具有更好的机动性，且转弯半径与前向运动状态无关，可进行原地回转。HippoCampus μ AUV 目前有 2 代，第 1 代长 300 mm，重 0.7 kgf；第 2 代长 380 mm，主体直径均为 50 mm，重 1.3 kgf，最大速度 3 kn，最大工作深度 50 m。第 2 代 HippoCampus μ AUV 整体分为 3 部分，艏部和艉部由相同的圆柱形耐压壳体制成，通过艏部的推进模块连接。此外，搭载了用于导航的 IMU 和深度计等传感器，配备了 2.2 A·h 锂离子电池，续航时间为 1 h。HippoCampus μ AUV

的推力远超于水下导航使用需求, 在水下 1.5 m 深的位置全速垂直向上推进的情况下可跃出水面 440 mm。



(a) 第 1 代



(b) 第 2 代

图 19 HippoCampus μ AUV
Fig.19 HippoCampus μ AUV

3.3 多体类

该类微小型 AUV 本体可以利用自身优势执行一定任务, 也可以通过多个微小型 AUV 组合形成更大级别的 AUV 执行更复杂的任务, 单体之间的空间也可用于布置科学载荷。单体 AUV 组合成的多体机器人具有稳定性强的特点, 在强流环境中作业具有优势。

3.3.1 双体框架类

Starbug X AUV^[73] 是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织和昆士兰大学共同研制的面向浅水区域底栖生物调查和环境观测的小型 AUV。该 AUV 可满足底栖生物调查与水文观测的同步原位需求, 与基于船载设备对底栖生物的原位调查和水下滑翔机对水文进行观测的模式相比, 具有能同步处理数据的优势。该 AUV 采用了双体并联式结构, 具有侧倾稳定性高的优势, 配备了 5 个推进器。该 AUV 搭载 IMU、GPS、超短基线 (USBL) 定位系统、深度计和高度计用于导航定位。搭载的科学载荷包括 CTD、叶绿素传感器、浊度计传感器、溶解氧传感器和高清摄像机等。该 AUV 主体尺寸小于 1 m, 重量不超过 32 kgf, 最大作业深度 100 m, 携带电池电量 1.5 kW·h, 巡航速度 2 kn, 最大速度 3 kn, 1 kn 速度下的续航时间为 12 h, 2 kn 速度下续航时间下降至 4 h。该 AUV 具备近底定高航行的作业能力,

利用高度计, 可在距离海底高度 0.4~0.6 m 处进行巡航, 探测到的声学图像分辨率可达 1 mm。



图 20 Starbug X AUV
Fig.20 Starbug X AUV

LoCO AUV^[74] 是由美国明尼苏达大学 Edge 等研制的面向科研教学的一款低成本、开源的微小型 AUV, 如图 21 所示。该 AUV 同样采用了双体并联式结构, 有利于操纵性空间利用率提升。该 AUV 共配备了 3 个推进器, 其中 2 个前向推进器分别布置于双体的艏部, 通过控制 2 个推进器的速度差即可实现较小转弯半径的回转运动, 1 个垂向推进器布置于双体之间。该 AUV 搭载 IMU 和深度计用于导航。该 AUV 长 731 mm, 宽 344 mm, 高 141 mm, 重 12.47 kgf, 最大速度 3 kn, 最大工作深度 100 m, 携带电池电量 355.2 W·h, 理想状态下续航时间为 18.5 h。此外, 利用搭载的相机和水下目标识别技术, 该 AUV 可与潜水员进行手势互动和识别跟踪等操作, 对辅助潜水员作业具有积极意义。

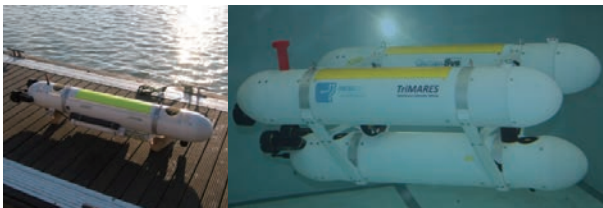


图 21 LoCO AUV
Fig.21 LoCO AUV

3.3.2 三体组合类

MARES (modular autonomous robot for environment sampling) AUV^[75-77] 是葡萄牙波尔图大学 Ferreira 等研制的一款用于环境采样的微小型 AUV, 如

图 22(a) 所示。该 AUV 的 2 个前向推进器对称布置于载体艏部舱段两侧, 2 个垂向推进器分别布置于载体的艏部和艉部舱段, 推进器的布置形式使 AUV 具有一定的抗流能力。同时, 3 个单体 AUV 通过铝制框架组合为三体 AUV-TriMARES (如图 22(b) 所示), 具有稳定性强的优势。单体 AUV 利用深度计、电子罗盘、长基线定位系统进行导航定位。其长 1.5 m, 主体直径 200 mm, 重 35 kgf, 最大作业深度 100 m, 巡航速度 2 kn, 最大速度 4 kn, 搭载了电量为 600 W·h 的锂离子电池, 续航时间 10 h, 续航里程 40 km。



(a) 单体

(b) 三体

图 22 MARES AUV 及 TriMARES AUV

Fig.22 MARES AUV and TriMARES AUV

Folaga AUV^[78-79] 是在 2009 年由意大利比萨大学 Caiti 等研制的一款面向沿海海洋学调查的 AUV, 如图 23(a) 所示^[80]。该 AUV 内部布置了浮力调节装置和姿态调节装置, 具有水下滑翔机运动特性。该 AUV 搭载了 GPS 和电子罗盘用于导航定位, 搭载 CTD 进行环境要素采集。该 AUV 长 2 m, 直径 140 mm, 内部直径 125 mm, 重 30 kgf, 作业深度范围 0~50 m, 爆破深度 100 m, 浮力调节能力 0.5 kg, 巡航速度 2kn, 续航时间 8 h, 携带电池电量 864 W·h。意大利萨伦托大学 Ingrosso 等^[81-82] 依托欧盟资助项目 ROBUST^[4], 通过对 ROBUST 三体式 AUV 的研制, 来研究未来在深海地点使用水下航行器—机械手系统进行自主矿产勘探任务的技术和方法。ROBUST AUV 由 3 个 Folaga AUV 和 1 个刚性框架组成, 如图 23(b) 所示^[83]。



(a) 单体

(b) 三体

图 23 Folaga AUV 及 ROBUST AUV

Fig.23 Folaga AUV and ROBUST AUV

具有浮力调节功能的多体组合类微小型 AUV 在稳定性上具有优势。稳心高度是微小型 AUV 重心与浮心之间的距离, 是衡量其保持稳定姿态能力的重要指标。该值越大, 意味着微小型 AUV 保持稳定姿态能力越强。静态单体 AUV 稳定在水中时, 其所受浮力 B 与重力 W 大小相等, 方向相反, 此时的稳心高度为 h , 如图 24 所示。

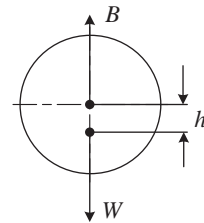


图 24 静态单体 AUV 稳心高度示意图

Fig.24 Schematic diagram of the metacentric height of the static singlebody AUV

多个单体微小型 AUV 重构成“倒三角”并联形式的多体 AUV 后, 多体 AUV 的稳心高度会增大, 如图 25 所示。

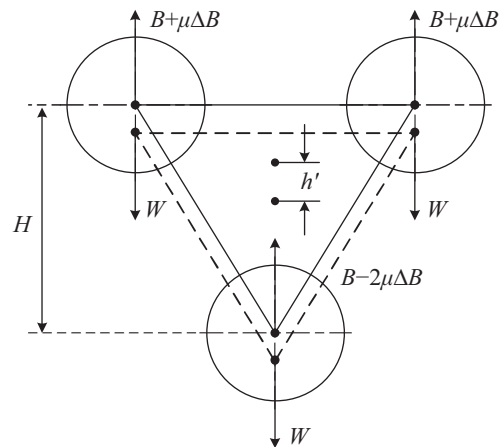


图 25 多体 AUV 稳心高度示意图

Fig.25 Schematic diagram of the metacentric height of the multibody AUV

单体 AUV 具有浮力调节能力, 调节量为 ΔB , 调节系数为 μ 。位于上侧的 2 个单体分别增大浮力 $\mu\Delta B$, 位于下侧的单体减小浮力使整体处于平衡状态, 上侧单体与下侧单体中心距离为 H , 则此时的稳心高度为

$$h' = \frac{2\mu\Delta B}{3B}H + h \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 多体 AUV 稳心高度的增加得益于 2 方面: 一是单体的浮力调节能力, 调节量 $\mu\Delta B$ 越大, 相较于静态单体 AUV 稳心高度的增量越大; 二是多体并联的布置形式, 上侧单体与下侧单体中

心距离 H 越大, 相较于静态单体 AUV 稳心高度的增量越大。

因多体微小型 AUV 在稳定性上的独特优势, 其用途也主要面向强流区域作业以及为机械臂提供平台基础。例如, 多体微小型 AUV 能在接近海底航行时降低壁面效应的影响, 达到定高航行的作业效果; 在搭载轻质量机械臂的多体作业型 AUV 中, 多体 AUV 可视为轻质量机械臂操作的稳定基座, 有利于提高机械臂的作业效能。虽然多体微小型 AUV 具有稳定性强的优势, 但其动力学特性尚未得到系统性研究, 且由于推力配置通常过于集中在进退、升沉、俯仰等方向, 多体微小型 AUV 欠驱动的特性并未改变, 因此难以实现对多体微小型 AUV 的精确控制。

4 微小型 AUV 研究现状总结 (Summary of the research status of micro AUVs)

调研的典型微小型 AUV 在平台参数、搭载载荷情况、驱动配置和技术运用上具有共性和差异。其中表 3 归纳了平台参数及载荷搭载情况, 表 4 归纳了驱动配置及技术运用。从表 3 和表 4 中总结以下 5 点:

1) 在统计的 25 款典型微小型 AUV 中, 回转体微小型 AUV 有 14 款, 占比 56%, 说明回转体类为微小型 AUV 的主流; 箭体类微小型 AUV 有 7 款, 而其中 6 款是近 5 年研制出来的, 说明部分应用场景对微小型 AUV 机动能力的要求在不断提高; 多体类微小型 AUV 有 4 款, 虽然占比最少, 但通常具备稳定性高、可扩展载荷搭载空间等独特优势, 能在特定场景中发挥重要作用。

2) CTD 为微小型 AUV 搭载的基本载荷, 环境观测能力是微小型 AUV 的基本作业能力。在此基础上搭载 DVL、侧扫声呐、摄像机、高度计等扩展载荷, 具备集群作业、可快速部署、声学探测、底栖生物调查等扩展能力, 能有效提升微小型 AUV 的产品品质。

3) 回转体类微小型 AUV 主要用于反潜训练和快速部署等军用领域, 低成本、小型化、操作简单的特性符合军用使用需求。箭体类微小型 AUV 通常应用于海洋环境观测、海底地形绘制和科研教学等民用领域, 适用于需要高机动能力的作业场景。多体类微小型 AUV 则更多利用其模块化和可扩展载荷布置空间的特性应用于强流环境下观测作业和科研教学等民用领域。3 类微小型 AUV 均有较为明确的应用场景。

4) 回转体类微小型 AUV 通常采用单个前向推进器与舵的驱动方案, 操纵性相对较差; 箭体类微小型 AUV 通常配备 2 个及以上的前向推进器, 并配备垂向推进器、舵等, 具有良好的操纵性; 多体类微小型 AUV 同样具备良好的操纵性, 其中三体组合类的单体微小型 AUV 操纵性往往一般, 通过将单体组合为多体的方式, 实现了分布式驱动和自稳效果, 有效改善了微小型 AUV 的操纵性。

5) 受微小型 AUV 尺寸等限制, 自适应浮力调节技术、质心调节技术应用较少; 水声通信机的小型化使得水声通信技术应用较多; 作业深度不大也使得设计者更倾向于动密封而不是磁力耦合; 悬停技术的应用则依赖于平台的机动能力。

5 存在的问题及发展趋势 (Existing problems and development trends)

5.1 空间约束下的结构高度集成化

与常规中大型 AUV 提倡的结构模块化设计思路不同, 微小型 AUV 结构设计采用高度集成化的设计思路可能更为适合。微小型 AUV 的空间约束条件更严格, 模块化设计所需的结构和电控接口可能造成空间利用率较低。因此, 如何将各功能部件在结构上进行高度集成是微小型 AUV 在结构设计上所面临的难题。

为此, 一些集成化的结构设计已经在部分微小型 AUV 中有所体现。例如, 为了使微小型 AUV 可用于空投等快速部署任务, 桨后舵、浮标或水下滑翔机式舰部天线等在常规中大型 AUV 中不常见的结构形式涌现出来, 并取得了良好的实际效果。然而, 目前微小型 AUV 集成化程度普遍不高, 空间利用率尚未得到“精打细算”, 尤其在科学载荷的结构处理上不够巧妙。现有微小型 AUV 更多搭载产品化的科学载荷。产品化的科学载荷通常采用自容式设计、外挂式设计等, 包含耐压壳体、电池、独立电控单元等部件。而微小型 AUV 同样包含上述部件, 造成了空间利用率较低。

为了在空间严格约束下实现结构上高度集成化, 未来的微小型 AUV 将在科学载荷上进行改造或自研, 实现载体和科学载荷的有机结合, 即载体载荷一体化。此外, 由于微小型 AUV 属于低成本平台, 发生故障时对其进行应急处理的成本可能大于平台自身的物料成本, 取消应急装置并在相应空间布置其他功能部件等措施有助于微小型 AUV 在结构上的高度集成化。

表3 典型微小型 AUV 平台参数及载荷
Tab.3 Platform parameters and loads of typical micro AUVs

类别	平台	国家	研究机构	外形尺寸/mm	质量/kg	最大深度/m	续航时间/h	最大速度/kn	电池电量/(W·h)	导航/定位/通信传感器	载荷	用途
回转体类	REMUS M3V	美国	伍兹霍尔海洋研究所海洋系统实验室	914.4 × φ123.825	10	300	6~7	10	360	AHRS/GPS/WiFi/惯性/声学通信系统	侧扫声呐 (900 kHz) / DVL (1000 kHz)	海洋环境观测/快速部署/声学探测/拖鱼
	ecoSUBμ5	英国	南安普顿大学国家海洋学中心	917 × φ120	5	500	24	1	-	IMU/GPS/深度计	CTD	快速部署/集群观测
	EMATT	美国	洛克希德·马丁公司	914.4 × φ123.825	9.98	182.88	10	8	-	-	模拟声源	反潜训练靶标
	ALAUV	英国	南安普顿大学国家海洋学中心	530 × φ83	2.5	500	200	3	216	电子罗盘/GPS	CTD	海洋环境观测/快速部署
	SEAScout	美国	Qinetiq 公司	914.4 × φ123.825	-	243.84	8	15	230	AHRS/深度计/GPS	光纤/声学阵列	海洋环境观测/声学探测/通信中继
	RIPTIDE	美国	Riptide Autonomous Solutions 公司	559 × φ123.825	11.3	300	40/400 (铝海水电池)	10	320*5000 (铝海水电池)	AHRS/深度计/GPS/WiFi	CTD/模拟声源	海洋环境观测/反潜训练靶标
	NemoSens	法国	RTSYS 公司	960 × φ124	10	300	8	10	-	GPS/INS	CTD/侧扫声呐/溶解氧传感器/浊度计/碳氢化合物传感器	海底地形测绘/声学监测/水雷排查/集群观测
	SandShark	美国	Bluefin 机器人公司	510 × φ123.825	6.5	200	6	4	266	GPS/WiFi/IMU	侧扫声呐	声学探测/军事演习消耗品/通信中继/大型 AUV 的子体
	精灵 M120	中国	中科探海公司	1000 × φ120	10	300	12	6	-	-	水声载荷/水声通信设备	海洋环境观测
	REMUS 100	美国	伍兹霍尔海洋研究所	1700 × φ190	32	100	12	5	1500	AHRS/GPS/WiFi/LBL	CTD/双频侧扫声呐/DVL	高分辨率环境观测/水雷探测/港口安全检查/海底地形绘制
Iver3	美国	OceanServer 公司	1520 × φ147	27	100	12	4	800	电子罗盘/深度计/WiFi	侧扫声呐/DVL	近海环境观测/搜索救援	
探索 100	中国	中国科学院沈阳自动化研究所	1700 × φ200	47	100	-	5	-	-	CTD/侧扫声呐/DVL	海洋环境探测	
无影	中国	西北工业大学, 天和防务公司	1500 × φ180	35	50	6	5	1500	GPS/深度计	-	海洋环境探测/科研教学	

表 3 续
Tab.3 Continued

类别	平台	国家	研究机构	外形尺寸/mm	质量/kg	最大深度/m	续航时间/h	最大速度/kn	电池电量/W·h	导航/定位/通信传感器	载荷	用途
	云帆	中国	天津瀚海蓝帆公司	1550 × φ200	40	200	11	3	-	-	CTD/摄像机	科研教学/辅助救援/航迹勘测/水体观测
	VERTEX	瑞士	Hydromea 公司, 瑞士联邦理工学院 (洛桑)	700 × 345* × 130*	7	300	6~8	3	160	INS/声学定位模块/GPS/低频无线电模块/短程光通信模块	CTD/氨气传感器/氯化物传感器/溶解氧传感器/硝酸盐传感器/pH 传感器/藻类传感器/浊度计	水体要素测量
	MONSUN	德国	卢贝克大学	600 × 300 × 100	4.2	10	-	4	133.2	AHRS/IMU/深度计/避碰声呐	相机/温度计	集群作业, 水下环境观测
	COTSbot	澳大利亚	昆士兰科技大学	1350 × 2270* × 464*	28	100	6	4	-	GPS	相机, 机械臂	生态环境维护
箭体类	Sparus II	西班牙	吉罗纳大学	1600 × 460 × φ230	52	200	8~10	3	1400	IMU/深度计/GPS/WiFi	DVL	海洋观测/海底地形绘制
	SwarmDiver	美国	Aquabotix 公司	750 × φ130	1.7	50	2.5	1.3	-	-	CTD	集群观测/海底底质采样/羽流跟踪
	SHAD	葡萄牙	波尔图大学	900 × φ120	10	20	-	-	82	AHRS/深度计/GPS	-	强流水域观测
	HippoCampus	德国	汉堡理工大学	300/350 × φ50	1.3	50	1	3	-	IMU/深度计	-	集群观测
	Starbug	澳大利亚	昆士兰大学	< 1000	32	100	12	3	1500	GPS/USB	CTD/叶绿素传感器/浊度计/溶解氧传感器/高清摄像机	海洋环境观测/底栖生物调查
多体类	LoCO	美国	明尼苏达大学	731 × 344 × 141	12.47	100	18.5	3	355.2	IMU/深度计	相机	水下目标识别
	MARES	葡萄牙	波尔图大学	1500 × φ200	35	100	10	4	600	电子罗盘/深度计/LBL	-	海洋环境观测/水体采样
	Folaga	意大利	比萨大学	2000 × φ140	30	50	8	-	864	电子罗盘/GPS	CTD	海洋环境观测

-: 尚未查找到具体数据; *: 测量或估计数据

表4 典型微小型 AUV 驱动配置与技术运用
Tab.4 Thrust configurations and technology applications of typical micro AUVs

类别	平台	外部驱动配置	自由度						技术运用				
			进退	侧移	潜浮	回转	横摇	纵倾	浮力调节	质心调节	磁力耦合	水声通信	悬停
回转 体类	REMUS M3V	A1+ (对转桨) +矢量导管转向	●	○	●	●	●	●	×	✓	-	✓	×
	ecoSUB μ 5	A1+垂直舵	●	○	●	●	○	●	×	✓	✓	×	×
	EMATT	A1+内十字舵	●	○	●	●	○	●	×	×	-	✓	×
	ALAUV	A1+垂直舵	●	○	●	●	○	●	-	✓	✓	×	×
	SEAScout	A1	●	○	●	●	●	●	×	✓	-	✓	×
	RIPTIDE	A1+3 舵	●	○	●	●	●	●	×	-	-	✓	×
	NemoSens	A1+3 舵	●	○	●	●	●	●	×	-	-	✓	×
	SandShark	A1+3 舵	●	○	●	●	●	●	×	-	✓	✓	×
	精灵 M120	A1+十字舵	●	○	●	●	●	●	×	-	-	✓	×
	REMUS100	A1+十字舵	●	○	●	●	●	●	×	-	-	✓	×
	Iver3	A1+十字舵	●	○	●	●	●	●	-	-	-	✓	×
	探索 100	A1+X 形舵	●	○	●	●	●	●	×	×	✓	✓	×
	无影	A1+十字舵	●	○	●	●	●	●	✓	✓	-	✓	×
	云帆 AUV	A1+十字舵	●	○	●	●	●	●	-	-	-	✓	×
箭体类	VERTEX	A2+ 3 个 B	●	○	●	●	●	●	×	×	×	✓	✓
	MONSUN	A2+4 个 B	●	○	●	●	●	●	×	×	×	✓	✓
	COTSbot AUV	A2+3 个 B	●	○	●	●	●	●	×	×	×	×	✓
	Sparus II	A2+1 个 B +2 个水平舵	●	○	●	●	●	●	×	×	✓	✓	✓
	SwarmDiver	A2	●	○	●	●	●	●	✓	×	×	×	×
	SHAD	A2+2 个 B	●	○	●	●	●	●	×	×	×	-	✓
	HippoCampus μ AUV	4 个 A	●	○	●	●	●	●	×	×	×	×	×
多体类	Starbug	A2+3 个 C	●	○	●	●	●	●	×	×	×	×	✓
	LoCO	A2+1 个 C	●	○	●	●	●	●	×	×	×	✓	×
	MARES	A2+2 个 B	●	○	●	●	●	●	×	×	×	×	✓
	Folaga	A1+2 个 B +1 个 C	●	●	●	●	●	●	✓	×	×	×	✓

●: 独立驱动; ○: 欠驱动; ●: 耦合驱动; ○: 欠驱动; A1: 单个前向推进器; A2: 一对前向推进器; B: 垂向推进器; C: 侧向推进器

5.2 携带能源有限条件下的长续航化

相较于常规中大型 AUV, 微小型 AUV 所能携带的能源更为有限, 续航能力不足的问题更为明显。为了能在有限的续航时间中充分发挥其工作效能, 微小型 AUV 的作业场景通常也更为具体。在本文所调研的 25 款微小型 AUV 中, 仅有 4 款续航时间超过 12 h, 占比仅为 16%。此外, 在采用常规锂离子电池并有明确电量数据的 16 款微小型 AUV 中, 携带电量大于 1000 W·h 的仅为 4 款。因此, 如何在携带能源有限的前提下实现长续航化是微小型 AUV 所面临的问题。

对此, 微小型 AUV 上应用了越来越多的先进技术, 如铝海水电池等新型能源技术^[84], 零攻角等航行控制技术^[85], 外形优化^[86]、仿生表面^[87]等减阻技术等。但这些技术大多处于理论研究阶段, 普遍未实现产品化转型, 未能在微小型 AUV 上得到广泛的应用。此外, 微小型 AUV 的长续航化应是结合具体作业场景多目标优化设计的结果, 而目前对多目标优化方法在微小型 AUV 上的应用研究尚不够深入。

为了实现在携带能源有限条件下的长续航化目标, 未来的微小型 AUV 将是经过多轮迭代优化设

计后的产物。除了充分利用空间携带更多的能源, 未来可能融合长续航化的先进技术与微小型 AUV 具体作业场景, 从而实现对微小型 AUV 续航能力的提升。

5.3 传感器能力不足条件下的群体智能化

微小型 AUV 的智能化程度通常基于其搭载传感器的能力。传感器的感测范围、精度、动态响应等能力, 通常与其体积呈正相关。相较于常规中大型 AUV, 微小型 AUV 难以有足够的体积来集成能力较强的传感器。因此, 如何在传感器能力不足的前提下提升微小型 AUV 的智能化水平将面临挑战。

在智能化应对外界环境变化方面, 传统的预编程技术通常能对可预见的环境变化作出正确的决策, 而在外界环境复杂度超出预编程适应范围和传感器感测范围时则难以应对。此外, 得益于海洋科学和海洋机器人技术的蓬勃发展, 海洋大数据已得到一定程度的积累, 但所积累的数据利用率不高, 对提高微小型 AUV 的智能化程度尚未起到直接作用。

为了在传感器能力不足的前提下提升微小型 AUV 的智能化程度, 未来的微小型 AUV 平台技术可能与人工智能技术相结合^[88], 充分利用已积累的海洋大数据, 并利用集群优势扩大传感器能力。例如, 微小型 AUV 在水下非定常运动时所受的水动力会呈现出明显的非线性特性, 其动态性能受到影响, 使其水动力及其系数难以被其传感器精确感知和估计, 故可利用神经网络非线性拟合能力强的优势建立代理模型来解决该问题^[89]。此外, 可利用基于人工智能方法的图像识别技术来帮助微小型 AUV 与环境进行信息交互, 从而提高微小型 AUV 环境感知和目标识别的能力、自主航行行为决策能力。不但如此, 基于微小型 AUV 低成本的特殊优势, 多个微小型 AUV 可形成传感器阵列, 利用物理场的叠加可使传感器阵列具备指向性, 从而弥补单体微小型 AUV 传感器能力不足的弱势。

未来的微小型 AUV 也将从单体智能作业向群体智能发展, 这能为任务的实施提供冗余性和多样性。微小型 AUV 的群体智能将不仅仅局限于理论方法, 智能化机械结构可为多个微小型 AUV 间的对接与分离提供支撑, 从而实现多个单体 AUV 与多体 AUV 的形态转换^[89-90]。对接形成的多体 AUV 具有更丰富的结构样式^[91], 能为传感器阵列的阵形变换提供基础, 从而拓展阵列的传感器能力, 提高微小型 AUV 的智能化水平。

5.4 动力学建模的流场条件边界化

与常规中大型 AUV 相比, 微小型 AUV 在排水量和操纵性上通常具有“小”和“灵”的特殊性。因此, 微小型 AUV 往往应用于包含管道、池壁及水面等流场边界的特殊作业场景。然而, 由于微小型 AUV 排水量小、惯性小, 推进器等执行机构的系列动作可能导致自身产生过快的瞬态响应, 这对实现微小型 AUV 的良好操纵带来挑战。此外, 管道、池壁及水面等流场边界条件复杂, 容易引发“壁面效应”和“记忆效应”, 这同样对微小型 AUV 的操纵性研究带来困难。

准确的动力学模型是在流场边界条件复杂的情况下实现良好操纵的基础。使用传统建模方法建立微小型 AUV 的动力学模型时, 通常假定其是在深、广、静的水下运动, 不考虑流场边界的影响, 只考虑机体一桨一舵的水动力。拖曳实验、平面运动机构(PMM)实验等动力学模型参数辨识方法同样基于该假设。然而, 微小型 AUV 真实的作业场景中往往包含复杂的流场边界, 与上述假设条件不符, 从而导致动力学模型参数不准确、参数辨识方法不能完全适用的问题^[92]。

为了实现微小型 AUV 在特殊作业场景下的良好操纵, 未来的微小型 AUV 动力学建模应充分考虑流场边界的影响, 并对传统建模方法进行适应性修正。传统建模方法采用模块化设计思路, 可以动态调整(叠加、删减等)因流场边界而改变的水动力项, 具有便于修正的优点。在传统建模方法中, 水动力项包括不随时间变化的水动力系数和随时间变化的运动参数。但由于流场边界条件的复杂性, 基于修正传统建模方法建立的动力学模型中的水动力系数往往也会随时间变化, 导致其辨识工作量骤增的问题。

5.5 整体性能评价模型化

常规中大型 AUV 通常为回转体外形, 采用桨舵推进方案, 外形和驱动配置较为单一。而微小型 AUV 可细分为回转体类、箭体类、多体类, 外形和驱动配置更多样化。多样化的外形和驱动配置影响着微小型 AUV 的整体性能, 任务所要求的整体性能也影响着外形参数和驱动形式的匹配。机动性和运动稳定性是微小型 AUV 最主要的 2 个整体性能, 且好的机动性和好的运动稳定性通常无法兼得。箭体类微小型 AUV 更注重机动性, 多体类微小型 AUV 更注重运动稳定性, 而回转体类微小型 AUV 对机动性和运动稳定性的要求则比较均衡。

然而, 对于机动性和运动稳定性的性能评价^[93]

目前多采用分项评价试验方法,尚无公认的整体性能评价模型,这为有依据地设计某一类别的微型 AUV 带来挑战。此外,部分多体类微型 AUV 具有浮力调节和构形变换的能力,其机动性和运动稳定性随着浮力和构形变化而变化,更需要一个能准确评价整体性能的数学模型来为该类型微型 AUV 的结构设计和运动控制提供理论支撑。因此,建立一个能够衡量整体性能的评价模型对微型 AUV 的优化设计十分必要。

未来整体性能评价模型应结合微型 AUV 的作业场景和任务,归一化自身的外形参数和驱动配置,并融合机动性和运动稳定性等分项评价指标,最终服务于微型 AUV 的优化设计。该评价模型的输入输出可依赖微型 AUV 的作业场景和实际任务动态调整。例如,对主要执行高机动作业任务的多体类微型 AUV 进行设计时,任务要求、作业场景中的环境参数将作为输入,外形参数和驱动配置将作为初始值,运动稳定性等其他分项评价指标将作为边界条件,不同外形参数和驱动配置对应的机动性将作为输出。而最终的输出往往有多组,如何从可行的输出中选择最优解还需进一步研究。

6 结论 (Conclusion)

微型 AUV 在军民两用上均具有重要意义,受到了研究者的广泛关注,相关技术得到了长足发展。基于平台结构特征的分类方法,对 25 款国内外典型微型 AUV 的平台特征、驱动配置和技术运用进行了系统归纳,剖析了微型 AUV 存在的问题,预测了发展趋势,为微型 AUV 的研制设计和实际应用提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] Fossum T O, Fragoso G M, Davies E J, et al. Toward adaptive robotic sampling of phytoplankton in the coastal ocean[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(27). DOI: 10.1126/scirobotics.aav3041.
- [2] Chai F, Johnson K S, Claustre H, et al. Monitoring ocean biogeochemistry with autonomous platforms[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 315-326.
- [3] Williams G, Maksym T, Wilkinson J, et al. Thick and deformed Antarctic sea ice mapped with autonomous underwater vehicles[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 61-67.
- [4] Teague J, Allen M J, Scott T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 333-339.
- [5] Ghafoor H, Noh Y. An overview of next-generation underwater target detection and tracking: An integrated underwater architecture[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 98841-98853.
- [6] Tan Y W, Wang J D, Liu J J, et al. Unmanned systems security: Models, challenges and future directions[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(4): 291-297.
- [7] Denos K, Ravaut M, Fagette A, et al. Deep learning applied to underwater mine warfare[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084910.
- [8] Nicolas F, Arnold-Bos A, Quidu I, et al. Symbolic simultaneous registration and change detection between two detection sets in the mine warfare context[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867211.
- [9] Sánchez P J B, Papaalias M, Márquez F P G. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2020, 23(2): 105-114.
- [10] de Moraes C C, Santiago R C. AUV scaled model prototyping using 3D printing techniques[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729828.
- [11] Wang D A, Zhang J T, Bie Z, et al. A novel lightweight design of UUV underwater wireless power transfer system by utilizing Fe-based nanocrystalline material[C]//IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 1281-1286.
- [12] Scudere A. Assessing the feasibility of intergrating an inertial navigation system and DVL into an A-sized AUV[D]. Rhode Island, USA: The University of Rhode Island, 2019.
- [13] Renner C. Packet-based ranging with a low-power, low-cost acoustic modem for micro AUVs[C]//11th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding. Hamburg, Germany: VDE, 2017.
- [14] Glover R. Autonomous underwater vehicle—Market analysis, trends, and forecasts[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4804377/autonomous-underwater-vehicle-market-analysis>.
- [15] Zhang J, Kang S, Yu J C, et al. Assign multiple AUVs to form a row efficiently based on a method of processing the cost matrix[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102177.
- [16] Mintchev S, Stefanini C, Girin A, et al. An underwater reconfigurable robot with bioinspired electric sense[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1149-1154.
- [17] Sutantyo D, Buntoro D, Levi P, et al. Optical-guided autonomous docking method for underwater reconfigurable robot[C]//IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/TePRA.2013.6556376.
- [18] Viquez O A, Fischell E M, Rypkema N R, et al. Design of a general autonomy payload for low-cost AUV R&D[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 151-155.
- [19] Smith M J. The next big thing in undersea warfare may be MICRO[EB/OL]. [2021-08-18]. https://issuu.com/julianne.mjohnson/docs/usw_winter_2017.
- [20] Fletcher B. UUV master plan: A vision for navy UUV development[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 65-71.
- [21] 创客总部. 世界各国海上机器人技术系统的现状与发展趋势[EB/OL]. (2017-11-23) [2021-08-18]. https://www.sohu.com/a/206210008_194357.
- [22] Anty B. Amethyst AUV platform[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://beobachtung3d.com/projects/amethyst>.
- [23] ERAPSCO Inc. U.S. specification sonobuoys[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://erapsco.com/erapsco.html>.

- [24] Djapic V, Nad D, Mandic F, et al. Navigational challenges in diver-AUV interaction for underwater mapping and intervention missions[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(29): 366-371.
- [25] Victoria L. New undersea drones are smaller, cheaper and can be refueled deep under water[EB/OL]. (2018-04-11) [2021-08-18]. <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/navy-league/2018/04/10/new-undersea-drones-are-smaller-cheaper-and-can-be-refueled-deep-under-water/>.
- [26] Phillips A B, Gold N, Linton N, et al. Agile design of low-cost autonomous underwater vehicles[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084772.
- [27] Toro C. MK 39 expendable mobile anti-submarine warfare training target (ematt)[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2159280/mk-39-expendable-mobile-anti-submarine-warfare-training-target-ematt/>.
- [28] Lockheed Martin Corporation. A-size autonomous underwater vehicles [EB/OL]. [2021-08-31]. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/a-size-autonomous-underwater-vehicles.html>.
- [29] Stevenson P, Mcphail S D, Tsimplis M, et al. Air launched platforms – A new approach for underwater vehicles[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/OCEANSE.2009.5278310.
- [30] Stevenson P. Report on air launched autonomous underwater vehicles[R]. Southampton, UK: National Oceanography Centre, 2011.
- [31] Qinetiq Inc.. SEAScout unmanned underwater vehicle[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://qinetiq-na.com/products/maritimesys/seascout/>.
- [32] Go G, Ahn H T. Hydrodynamic derivative determination based on CFD and motion simulation for a tow-fish[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 191-209.
- [33] Yan G X, Pan G, Shi Y, et al. Experimental and numerical investigation of water impact on air-launched AUVs[J]. Ocean Engineering, 2018, 167: 156-168.
- [34] Shi Y, Gao X F, Pan G. Design and load reduction performance analysis of mitigator of AUV during high speed water entry[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 314-329.
- [35] Shi Y, Gao X F, Pan G. Experimental and numerical investigation of the frequency-domain characteristics of impact load for AUV during water entry[J]. Ocean Engineering, 2020, 202. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107203.
- [36] Du X X, Cui H, Zhang Z D. Dynamics model and maneuverability of a novel AUV with a deflectable duct propeller[J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 191-206.
- [37] Xia H, Wang P, Jin Z H, et al. Maneuverability analysis of thrust vectoring ducted propeller with deflector[J]. Ocean Engineering, 2020, 213. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107614.
- [38] 施生达, 王京齐, 吕帮俊, 等. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 337-338.
Shi S D, Wang J Q, Lü B J, et al. Submarine maneuverability[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2021: 337-338.
- [39] Riptide Autonomous Solutions. Riptide family of autonomous unmanned undersea vehicles[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.baesystems.com/en-us/product/riptide-family-of-autonomous-undersea-vehicles>.
- [40] Byford B, Wood S. Onboard renewable energy charging methods to improve μ AUV deployment life[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.23919/OCEANS40490.2019.8962748.
- [41] RTSYS Inc.. NemoSens AUV[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://rtsys.eu/>.
- [42] Underwood A, Murphy C. Design of a micro-AUV for autonomy development and multi-vehicle systems[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084807.
- [43] Randeni P S A T, Rypkema N R, Fischell E M, et al. Implementation of a hydrodynamic model-based navigation system for a low-cost AUV fleet[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729758.
- [44] 中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司. 精灵 M120 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-08-18]. <http://www.t-sea.cn/>.
T-SEA Marine Technology Co., Ltd.. Product: Jingling M120 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-08-18]. <http://www.t-sea.cn/>.
- [45] Gallimore E, Terrill E, Hess R, et al. Integration and evaluation of a next-generation chirp-style sidescan sonar on the REMUS 100[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729709.
- [46] Kukulya A, Plueddemann A, Austin T, et al. Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Piscataway, USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/AUV.2010.5779661.
- [47] Crowell J. Design challenges of a next generation small AUV [C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6740945.
- [48] L3HARRIES. Iver3 standard system UUV[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.l3harris.com>.
- [49] 曾俊宝. 便携式自主水下机器人及其模型预测控制方法研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2018.
Zeng J B. Research on portable autonomous underwater vehicle and model predictive control[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [50] 西安天和防务技术股份有限公司. “中国无影”系列化水下 AUV 亮相 2018 中国航展 [EB/OL]. [2021-08-18]. <http://www.thtw.com.cn/news/220.html>.
Xi'an Tianhe Defense Technology Co., Ltd.. “China Wuying” serialized underwater AUV unveiled at the 2018 China Airshow[EB/OL]. [2021-08-18]. <http://www.thtw.com.cn/news/220.html>.
- [51] 天津瀚海蓝帆海洋科技有限公司. 智帆 AUV-ZF-01[EB/OL]. [2021-08-18]. http://obluesail.com/pd.jsp?id=1#_jcp=3-21.
Tianjin Hanhai Lanfan Marine Technology Co., Ltd.. Zhifan AUV-ZF-01[EB/OL]. [2021-08-18]. http://obluesail.compd.jsp?id=1#_jcp=3.21.
- [52] Zeng J B, Gao P Y, Zhang J, et al. Surveying of lake on plateau using a portable TS-100 AUV[C]//6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 449-455.
- [53] 徐皑冬. 海洋工程技术与装备[EB/OL]. [2021-08-18]. http://www.sia.cas.cn/kycg/cgzh/202008/t20200827_5677598.html.

- Xu A D. Marine engineering technology and equipment[EB/OL]. [2021-08-18]. http://www.sia.cas.cn/kycg/cgzh/202008/t20200827_5677598.html.
- [54] Wang X M, Wu G S. Modified LOS path following strategy of a portable modular AUV based on lateral movement[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(9). DOI: 10.3390/jmse8090683.
- [55] Schill F, Bahr A, Martinoli A. Vertex: A new distributed underwater robotic platform for environmental monitoring[M]// *Springer Proceedings in Advanced Robotics*, Vol.6. Berlin, Germany: Springer, 2018: 679-693.
- [56] Witte M, Hieke M, Wurm F H. Identification of coherent flow structures and experimental analysis of the hydroacoustic emission of a hubless propeller[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 188. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106248.
- [57] Yan X P, Liang X S, Ouyang W, et al. A review of progress and applications of ship shaft-less rim-driven thrusters[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 144: 142-156.
- [58] Hydromea Inc.. VERTEX autonomous underwater swarm [EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.hydro-mea.com/vertex-autonomous-underwater-swarm>.
- [59] Meyer B, Ehlers K, Isokeit C, et al. The development of the modular hard- and software architecture of the autonomous underwater vehicle MONSUN[C]//41st International Symposium on Robotics. Hamburg, Germany: VDE, 2014: 1-6.
- [60] Meyer B, Renner C, Maehle E. Versatile sensor and communication expansion set for the autonomous underwater vehicle MONSUN[J]. *Advances in Cooperative Robotics: World Scientific*, 2016: 250-257.
- [61] Osterloh C, Pionteck T, Maehle E. MONSUN II: A small and inexpensive AUV for underwater swarms[C]//7th German Conference on Robotics. Hamburg, Germany: VDE, 2012.
- [62] Dayoub F, Dunbabin M, Corke P. Robotic detection and tracking of crown-of-thorns starfish[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1921-1928.
- [63] Zeldovich L. Underwater drone hunts coral-eating crown-of-thorns starfish[EB/OL]. (2019-04-11) [2021-08-18]. <https://www.asme.org/topics-resources/content/underwater-drone-hunts-coraleating-crownofthorns>.
- [64] Carreras M, Hernández J D, Vidal E, et al. Sparus II AUV – A hovering vehicle for seabed inspection[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(2): 344-355.
- [65] Maccready T, Shapiro J. Making swarming manageable[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729820.
- [66] Aniwaa Pte. Ltd.. Aquabotix SwarmDiver overview[EB/OL]. [2021-08-18]. [https://www.aniwaa.com/product/drones/aquabotix-swarmdiver/#:text=The%20SwarmDiver%20is%20a%20portable,unmanned%20underwater%20vehicle%20\(UUV\)](https://www.aniwaa.com/product/drones/aquabotix-swarmdiver/#:text=The%20SwarmDiver%20is%20a%20portable,unmanned%20underwater%20vehicle%20(UUV)).
- [67] Gonçalves C S, Ferreira B M, Matos A C. Design and development of SHAD – A small hovering AUV with differential actuation[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761457.
- [68] Duecker D A, Hackbarth A, Johannink T, et al. Micro underwater vehicle hydrobatix: A submerged furuta pendulum [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 7498-7503.
- [69] Duecker D A, Geist A R, Hengeler M, et al. Embedded spherical localization for micro underwater vehicles based on attenuation of electro-magnetic carrier signals[J]. *Sensors*, 2017, 17(5). DOI: 10.3390/s17050959.
- [70] Heitmann J, Steinmetz F, Renner C. Self-localization of micro AUVs using a low-power, low-cost acoustic modem[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604776.
- [71] Solowjow E. Design, dynamics, and control of micro underwater vehicle systems for autonomous environmental exploration[D]. Hamburg, Germany: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2019.
- [72] Hackbarth A, Kreuzer E, Solowjow E. HippoCampus: A micro underwater vehicle for swarm applications[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 2258-2263.
- [73] Marouchos A, Muir B, Babcock R, et al. A shallow water AUV for benthic and water column observations[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271362.
- [74] Edge C, Enan S S, Fulton M, et al. Design and experiments with LoCO AUV: A low cost open-source autonomous underwater vehicle[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 1761-1768.
- [75] Cruz N A, Matos A C. The MARES AUV, a modular autonomous robot for environment sampling[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5152096.
- [76] Cruz N A, Matos A C, Almeida B M, et al. TriMARES - A hybrid AUV/ROV for dam inspection[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2011. DOI: 10.23919/OCEANS.2011.6107314.
- [77] Cruz N A, Matos A C, Ferreira B M. Modular building blocks for the development of AUVs – From MARES to TriMARES[C]//IEEE International Underwater Technology Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/UT.2013.6519897.
- [78] Alvarez A, Caffaz A, Caiti A, et al. Fòlaga: A low-cost autonomous underwater vehicle combining glider and AUV capabilities[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 24-38.
- [79] Alvarez A, Caffaz A, Caiti A, et al. Folaga: A very low cost autonomous underwater vehicle for coastal oceanography[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, 38(1): 31-36.
- [80] Ingrosso R, de Palma D, Avanzini G, et al. Dynamic modeling of underwater multi-hull vehicles[J]. *Robotica*, 2020, 38(9): 1682-1702.
- [81] Ingrosso R, de Palma D, Giulio A, et al. Preliminary results of a dynamic modelling approach for underwater multi-hull vehicles[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(29): 86-91.
- [82] Zereik E, Bibuli M, Mišković N, et al. Challenges and future trends in marine robotics[J]. *Annual Reviews in Control*, 2018, 46: 350-368.
- [83] di Vito D, de Palma D, Simetti E, et al. Experimental validation of the modeling and control of a multibody underwater vehicle manipulator system for sea mining exploration[J]. *Journal of Field Robotics*, 2021, 38(2): 171-191.
- [84] 吴有生, 赵羿羽, 郎舒妍, 等. 智能无人潜水器技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 26-31.

- Wu Y S, Zhao Y Y, Lang S Y, et al. Development of autonomous underwater vehicles technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 26-31.
- [85] 黄琰. 轻型长航程 AUV 关键技术及控制问题研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2020.
- Huang Y. Research on key technologies and control problems of lightweight long-range AUV[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [86] Hou Y H, Liang X, Mu X Y. AUV hull lines optimization with uncertainty parameters based on six sigma reliability design[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 10(4): 499-507.
- [87] Meng L S, Yang L, Su T C, et al. Study on the influence of porous material on underwater vehicle's hydrodynamic characteristics[J]. Ocean Engineering, 2019, 191. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106528.
- [88] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV 智能化现状与发展趋势[J]. 机器人, 2020, 42(2): 215-231.
- Huang Y, Li Y, Yu J C, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. Robot, 2020, 42(2): 215-231.
- [89] 康帅, 俞建成, 张进, 等. 基于粒子群优化神经网络的水下链式机器人直航阻力预报[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 29-39.
- Kang S, Yu J C, Zhang J, et al. Direct route drag prediction of chain-structured underwater vehicle based on neural network optimized by particle swarm optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 29-39.
- [90] Zhang D, Pan G, Shi Y, et al. Investigation of the resistance characteristics of a multi-AUV system[J]. Applied Ocean Research, 2019, 89: 59-70.
- [91] Kang S, Yu J C, Zhang J, et al. Development of multibody marine robots: A review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21178-21195.
- [92] Kang S, Yu J C, Zhang J, et al. Research on accurate modeling of hydrodynamic interaction forces on AUVs operating in tandem[J]. Ocean Engineering, 2022, 251. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111125.
- [93] An Y, Yu J C, Zhang J. Autonomous sailboat design: A review from the performance perspective[J]. Ocean Engineering, 2021, 238. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109753.

作者简介:

- 康 帅 (1993-), 男, 博士生。研究领域: 多体海洋机器人建模与优化, 海洋机器人水动力学, 海洋机器人结构优化设计。
- 俞建成 (1976-), 男, 博士, 研究员。研究领域: 新概念海洋机器人技术, 移动自主海洋环境观测理论与技术, 海洋机器人智能控制方法与技术。
- 张 进 (1987-), 男, 博士, 副研究员。研究领域: 多体机器人建模与控制, 移动机器人路径规划, 最优化调度。

(上接第 196 页)

- [13] Tekin B, Sinha S N, Fua P. Real-time seamless single shot 6D object pose prediction[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 292-301.
- [14] Peng S D, Liu Y, Huang Q X, et al. PVNet: Pixel-wise voting network for 6DoF pose estimation[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 4556-4565.
- [15] Li Z G, Wang G, Ji X Y. CDPN: Coordinates-based disentangled pose network for real-time RGB-based 6-DoF object pose estimation[C]//IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 7677-7686.
- [16] 宋薇, 仇楠楠, 沈林勇, 等. 面向工业零件的机器人单目立体匹配与抓取[J]. 机器人, 2018, 40(6): 950-957.
- Song W, Qiu N N, Shen L Y, et al. The monocular stereo matching and grasping of robot for industrial parts[J]. Robot, 2018, 40(6): 950-957.
- [17] Bochkovskiy A, Wang C Y, Liao H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[DB/OL]. (2020-04-23) [2021-09-01]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [18] Hinterstoisser S, Holzer S, Cagniart C, et al. Multimodal templates for real-time detection of texture-less objects in heavily cluttered scenes[C]//International Conference on Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 858-865.
- [19] Garrido-Jurado S, Muñoz-Salinas R, Madrid-Cuevas F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(6): 2280-2292.
- [20] 陈宗海, 裴浩瀚, 王纪凯, 等. 基于单目相机的视觉重定位方法综述[J]. 机器人, 2021, 43(3): 373-384.
- Chen Z H, Pei H Y, Wang J K, et al. Survey of monocular camera-based visual relocalization[J]. Robot, 2021, 43(3): 373-384.

作者简介:

- 陈 钧 (1997-), 男, 硕士生。研究领域: 机器视觉, 机器人。
- 宋 薇 (1981-), 女, 博士, 副研究员。研究领域: 机器人, 机器视觉, 精密测量。
- 周 洋 (1985-), 男, 硕士, 助理研究员。研究领域: 机器视觉, 高功率激光靶定位瞄准, 精密测量。