

自主水下航行器在极地的应用现状与关键技术

黄学涛¹, 贾福鑫¹, 肖泽鸿¹, 张铁栋^{1,2,3}, 雷明^{1,2}, 骆婉珍^{1,2}

(1. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东珠海 519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082; 3. 极地环境立体观测与应用教育部重点实验室(中山大学), 广东珠海 519082)

摘要: 自主水下航行器(AUV)具有自主灵活、机动性强、扰动小和可塑性强等优点,是克服极地冰盖限制,探索两极冰下世界的重要方式。梳理各国极地AUV技术的发展与部署现状,介绍部分典型极地AUV的配置、应用与技术参数等,并对极地AUV关键技术进行详细分析,包括总体设计及优化技术、冰下导航与通信技术、极地布放回收技术、低温防护技术等内容。结合极地特殊环境条件与冰下作业需求,讨论极地AUV的未来发展趋势,为后续极地AUV的研制提供参考。

关键词: 极地AUV; 导航与通信; 布放回收; 极地应用

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7649(2024)16-0001-09 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.16.001

The application status and key technologies of autonomous underwater vehicles in polar regions

HUANG Xuetao¹, JIA Fuxin¹, XIAO Zehong¹, ZHANG Tiedong^{1,2,3}, LEI Ming^{1,2}, LUO Wanzhen^{1,2}

(1. College of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Observation of Polar Environment (Sun Yat-sen University), Ministry of Education, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Autonomous underwater vehicle (AUV) has the advantages of autonomy, flexibility, strong maneuverability, low disturbance, and strong plasticity, making them an important way to overcome polar physical limitations and explore the polar ice world. This article reviews the development and deployment status of polar AUV technology in various countries, introduces the configuration, application, and technical parameters of some typical polar AUVs, and provides a detailed analysis of key technologies of polar AUVs, including the overall design and optimization technology, the under-ice navigation and communication technology, the polar deployment and retrieval technology, and the cryogenic protection technology. Based on the special environmental conditions in polar regions and the requirements of underwater exploration missions, the future development trends of polar AUVs were discussed, providing a reference for the subsequent development of polar AUVs.

Key words: polar AUV; navigation and communication; launch and recovery; polar applications

0 引言

极地海洋是人类在地球上涉足较少的地区之一,极地考察对全球气候变化、资源开发、地质演变等研究具有重要意义。针对极地复杂、恶劣的环境条件,引入高技术设备成为探索极地的关键。极地自主式水下航行器(极地AUV)^[1]是一种以自主控制、环境感知、智能决策等关键技术为支撑的智能化水下无人平

台,通过携带多种传感器,可实现大范围、大深度冰下海洋探测与数据采集作业,是国家科技实力在极地考察中的综合体现。21世纪以来,各国加大了对极地冰下海域的考察力度,极大促进了极地AUV的发展^[2]。同时,极区AUV的成功部署获取了大量珍贵的极地海冰、海底地形、水文数据等资料,支持了极地海洋地质、生物、环境和海冰等领域的研究^[3]。

极地AUV的研制极具挑战性,除机械结构、水动

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 工信部高技术船舶资助项目(MC-201919-C11); 国家自然科学基金资助项目(U22A2012); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515012039)

作者简介: 黄学涛(1999-),男,硕士研究生,研究方向为水下机器人技术。

力、人工智能等多学科交叉难题外,还需要考虑低温环境、海冰覆盖、冰下避障等诸多挑战。因此,本文对国内外极地 AUV 的配置及部署进行了系统化的梳理,并从总体优化设计、布放回收、冰下导航与通信等四个方面分析了极地 AUV 的关键技术特点,最后对极地 AUV 的未来发展趋势进行了讨论,为未来极地 AUV 的研制提供参考。

1 各国极地 AUV 发展现状

国内外多艘 AUV 已在两极地区完成部署,获得了大量珍贵的极地海冰、海底地形、海洋环境等精细数据,支持了极区地质、生物、海冰和水文等方面的研究。美国、加拿大、俄罗斯、中国、澳大利亚和部分西欧国家是发展极地 AUV 的主要国家,部分代表性型号如表 1 所示。

1.1 美国极地 AUV 型号

1) ALTEX AUV

ALTEX AUV^[4] 由美国蒙特雷湾水族馆研究所 (MBARI) 研制,采用回转体艇型和模块化设计,如图 1 所示。全艇包括首段、浮标段、燃料段和尾段 4 个



图 1 ALTEX AUV

Fig. 1 ALTEX AUV

基本模块和若干任务模块组成,根据任务需求艇长在 2.23~5.58 m 范围内。该 AUV 由 1 个矢量导管螺旋桨推进器提供动力,巡航航速约为 3 kn。2001 年 ALTEX AUV 被多次被用于追踪进入北极盆地的大西洋暖流,并对沿途的水文数据及冰层厚度分布进行收集^[5]。

2) ARTEMIS AUV

斯通宇航公司 (Stone Aerospace) 开发的 ARTEMIS AUV 采用扁平型设计,配备有 2 个主推进器、4 个垂向推进器和 2 个侧向推进器。在配套布放回收系统的辅助下,ARTEMIS AUV 可实现冰基自主布放回收作业,如图 2 所示。2015 年,ARTEMIS AUV 在罗斯冰架上成功完成部署测试,并采集了周边水文数据和水样^[6]。

表 1 极地 AUV 主要参数

Tab. 1 The main parameters of polar AUV

国家	AUV 名称	主尺度/m	重量/kg	潜深/m	续航/km	部署时间	部署地点
美国	ALTEX	2.23×0.533(D)	1 000	4 500	1 500	2001	北极, 弗拉姆海峡
	ARTEMIS	4.2(L)	—	—	10	2015	南极, 罗斯冰架
	ICEFIN	3×0.203(D)	93.9	1 500	—	2014/ 2017–2020	南极
	REMUS 100	1.6×0.19(D)	37	100	120	2005/2010	北极, 阿拉斯加北部
英国	AUTOSUB2/3	6.8×0.9(D)	3 500	1 600	400	2001	南极
						2004	北极, 格陵兰岛
						2005	南极, 芬布尔冰架
						2009	南极, 松岛冰川
中国	ALR 6000	3.5×0.8(D)	750	6 000	1 800	2018	南极, 菲尔希纳–龙尼冰川
	北极 ARV	2.1×0.65×0.7	350	100	6	2008/2010/2014	北极
	探索 1000	6.45×0.53(D)	1 145	800	—	2019	南极
	探索 4500	—	1 500	4 500	—	2020	南极, 罗斯海新站
	星海 1000	3.13×1.47×1.53	1 280	1 000	200	2021	北极, 楚科奇海
	Harpsichord-1R	5.8×0.9(D)	2 500	6 000	300	2023	北极
俄罗斯	MMT-3000	3.05×0.58×1	280	3 000	—	2007	北极
	MMT-3500	—	—	3 500	—	2020	南极
加拿大	Exploere	7.4×0.74(D)	1 870	5 000	450	2022	南极, 威德尔海
冰岛	GAVIA	2.7×0.2(D)	70	200	—	2010/2011	北极, 加拿大北部
澳大利亚	Nupiri muka	7.6×0.75(D)	1 800	5 000	240	2007–2017	北极
						2019/2020	南极



图 2 ARTEMIS AUV

Fig. 2 ARTEMIS AUV

3) ICEFIN AUV

佐治亚理工学院设计的 ICEFIN AUV 极具特色, 一方面采用模块化设计使其极具便携性和可移植性; 另一方面无突出的低剖面鱼雷外形设计使其能够通过热水钻孔技术实现百米冰层下的快速部署, 如图 3 所示。ICEFIN AUV 分别在 2014 年、2017 年、2018 年和 2019 年 4 次完成南极冰下部署任务, 并根据部署期间的经验进行持续性的优化改造^[7]。2020 年 ICEFIN3 AUV (2019 年制造) 在 Thwaites 冰川下获取了冰川接地线及其周边区域的影像资料^[8]。



图 3 ICEFIN AUV

Fig. 3 ICEFIN AUV

4) REMUS100 AUV

伍兹霍尔海洋研究所对一艘标准型 REMUS100 AUV 进行了极地适应性改造, 增加了一个船体湿模块用于布置新增的应急定位、极区防撞和冰下回收等设备, 如图 4 所示。2010 年, 改造后的 REMUS100 AUV 被成功部署于阿拉斯加北部, 执行冰下环境观测任务^[9]。

1.2 英国极地 AUV 型号

1) AUTOSUB2 AUV

AUTOSUB 系列 AUV 由南安普顿国家海洋地理中心 (NOC) 开发, 是目前极地 AUV 中发展型号最多的系列。AUTOSUB2 AUV^[10] 采用回转型结构, 外壳由玻璃纤维增强塑料板与铝制框架组成, 4 个压力容器用

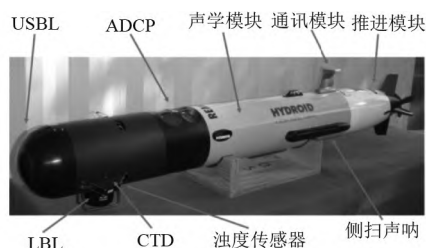


图 4 改造后的 REMUS 100 AUV

Fig. 4 The modified REMUS 100 AUV

于布置锰碱电池、控制系统和传感器。推进力由单个直流电机和五叶桨提供, 最高航速约 2 m/s, 如图 5 所示。2001 年, AUTOSUB2 AUV 配合 RRS James Clark Ross 调查船绘制了超过 210 km 的南极磷虾冰下分布样带^[11]。2004 年, AUTOSUB2 AUV 在格陵兰岛东北部海岸首次获得海冰下表面条形声呐图像, 展示了一年冰和多年冰的水下冰貌^[12]。2005 年, AUTOSUB2 AUV 考察了芬布尔冰架下的洞穴和水文环境, 更新了人们对冰架基地粗糙度的认知^[13]。



图 5 AUTOSUB2 AUV

Fig. 5 AUTOSUB2 AUV

2) AUTOSUB3 AUV

AUTOSUB3 AUV 和 AUTOSUB2 AUV 是姊妹型 AUV, 结构外形一致。针对 AUTOSUB2 AUV 的丢失事件, AUTOSUB3 AUV 重新设计了内部线路, 优化了避障策略。2009 年, AUTOSUB3 AUV 通过装配湍流传感器成功获取了松岛冰川下的湍流动能耗散率和热方差耗散率, 为冰基融化速率的估算提供了支撑^[14]。

3) ALR 6000 AUV

AUTOSUB Long Range 6000 AUV (ALR 6000 AUV)^[15] 是 NOC 研制的一款远航程 AUV, 在低功耗模式下航程达到 1800 km。艇体结构围绕 2 个铝合金水密舱设计, 配备有微观结构探针、CTD、向上和向下观察的 ADCP 等传感器。2018 年, ALR 6000 AUV 被部署在菲尔希纳-龙尼冰川, 在超过 500 m 厚度的冰层下对冰架和海床形态进行了直接测量^[16]。为了进一

步提高续航能力, NOC 在 ALR 6000 AUV 的基础上研制了 ALR 1500 AUV, 最大航程达到 4000 km, 有望实现横穿北极的探测任务^[17], 如图 6 所示。



图 6 ALR6000 AUV 和 ALR1500 AUV
Fig. 6 ALR6000 AUV and ALR1500 AUV

1.3 俄罗斯极地 AUV 型号

1) Harpsichord-1R AUV

Harpsichord-1R AUV 是俄罗斯科学院远东分院海洋技术问题研究所 (IMPT FEB RAS) 开发的大型探测型机器人。如图 7 所示, 该 AUV 长 5.8 m, 直径 0.9 m, 重 2500 kg, 航程 300 km, 设计潜深 6000 m, 配置有侧扫声呐和照影机用于调查水域及海底情况。2007 年, Harpsichord-1R AUV 在北冰洋罗蒙诺索夫海岭附近区域进行了测试实验^[18]。2009 年, 该 AUV 被重新设计, 改进型 Harpsichord-2R-PM AUV 长 6.5 m, 直径 1 m, 重 3700 kg。



图 7 Harpsichord-2R-PM AUV
Fig. 7 Harpsichord-2R-PM AUV

2) MMT 系列 AUV

MMT 系列 AUV 由 IMPT FEB RAS 研制, 包括 MMT-3000 AUV 和 MMT-3500 AUV 等 2 个型号, 2 个型号结构外形相似。如图 8 所示, MMT-3000 采用鱼雷型设计, 搭载有磁通门罗盘、深度计、DVL 和领航测角传感器^[19], 具备对海底地质和底栖生物的视觉识别与采集能力。改进型 MMT-3500 AUV 更新了光学采集系统和导航装置。2020 年, MMT-3000 AUV 通过声呐和声学剖面仪调查了南极大西洋扇区的深海海底地形、地质, 并对沿涂水文数据进行收集^[20]。2022 年, MMT-3500 AUV 在威德尔海附近的 11 个站点进行两次光学观测, 调查了底栖生物的多样性及其群落结构^[21]。



图 8 MMT-3000 AUV
Fig. 8 MMT-3000 AUV

1.4 国外其他极地 AUV 型号

1) Explorer AUV (加拿大)

Explorer AUV 是国际潜水器工程公司 (ISE) 建造的冰下探测机器人, 如图 9 所示。该 AUV 配备有可变压载系统和远程归航系统。在 CATCHY II 回收系统的辅助下, Explorer AUV 可进行冰下充电和数据交换, 极大提高作业效率。2010 年, Explorer AUV 在加拿大北部进行了为其 12 天的冰下部署, 完成了冰下大陆架的地形测绘作业^[22]。2011 年, 在北纬 88.5°区域完成了水下 3000 m、航程 115 km 的科研调查任务。



图 9 Explorer AUV
Fig. 9 Explorer AUV

2) GAVIA AUV (冰岛)

GAVIA AUV 是冰岛研制的便携式模块化 AUV, 2~3 人即可完成该 AUV 的冰下部署。该 AUV 由推进、储能、控制和机头 4 个基本模块加上 Geoswath 探测模块和 INS/DVL 导航模块组成, 总重约 70 kg, 如图 10 所示。GAVIA AUV 主要被用于海冰或冰山水下形态的测绘, 在 2007-2017 年^[23]GAVIA AUV 在北极至少执行了 4 次此类任务。

3) Nupiri muka AUV (澳大利亚)

2017 年, 澳大利亚南极门户合作组织采购并改造



图 10 GAVIA AUV
Fig. 10 GAVIA AUV

了一艘 Explorer AUV, 重新命名为 Nupiri muka AUV, 如图 11 所示。Nupiri muka AUV 配备了向下、向上和侧扫的声呐阵列, 具备调查冰基融化的能力。2019 年, Nupiri muka AUV 从戴维斯站出发, 自航前往 Sørsdal 冰川, 收集冰下海底地形、水文和水下冰貌等数据^[24]。2020 年, Nupiri muka AUV 被部署在 Thwaites 冰川下, 进行了 6 次冰下探测作业^[25]。

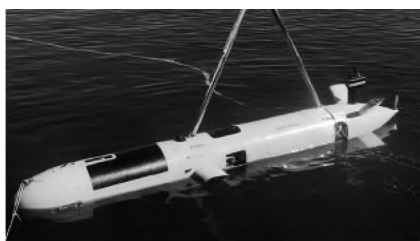


图 11 Nupiri muka AUV
Fig. 11 Nupiri muka AUV

1.5 中国极地 AUV 型号

1) 北极 ARV

中国沈阳自动化研究所(沈自所)研制的北极 ARV 拥有 AUV 和 ROV 两种作业模式, 共发展了 2 个型号。第一代北极 ARV 呈立扁型, 配备仰视声呐、温盐深测量仪、光通量测量仪等传感器。2014 年, 沈自所对北极 ARV 进行了重新设计。为降低重量, 第二代北极 ARV 采用框架结构设计, 并通过优化螺旋桨布局, 增强了冰下航行的机动性, 如图 12 所示。中国北极考察队分别于 2008 年、2010 年和 2014 年将 Polar-ARV (包含第二代) 用于北极海冰厚度和冰光学性质的采集^[26-27]。



(a) 第一代



(b) 第二代

图 12 北极 ARV
Fig. 12 Arctic ARV

2) 探索系列 AUV

探索 1000 AUV^[28] 是沈自所研制的一款回转型 AUV,

如图 13 所示。该 AUV 搭载了 ADCP、CTD、浊度计、叶绿素仪, 生化传感器和溶解氧仪等传感器, 拥有单点驻留观测和多点巡航观测 2 种观测模式。2020 年初, 探索 1000 AUV 参加了中国第 36 次南极科考, 并在罗斯海新站附近海域完成了连续 35 h 的水下作业。

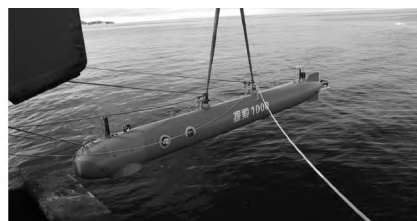


图 13 探索 1000 AUV
Fig. 13 Explore 1000 AUV

沈自所研制的同系列探索 4500 AUV 采用立扁鱼形设计, 采用可回转式推进器布局, 最大作业水深 4500 m, 如图 14 所示。在中国第 12 次北极科考期间, 探索 4500 AUV 被部署于楚科奇海进行近海床探测作业。



图 14 探索 4500 AUV
Fig. 14 Explore 4500 AUV

3) 星海 1000 AUV

哈尔滨工程大学研发的星海 1000 属于极地探测型 AUV, 如图 15 所示。该 AUV 采用立扁型设计, 搭载有摄像机、CTD、ADC、DVL、溶解氧仪、叶绿素仪、多波束声呐等探测载荷, 具备冰底形态观测和冰下自主探测能力, 冰下巡航航速为 2 kn。2023 年, 星海 1000 AUV 在北极达楚科奇海完成了 7000 m² 的海冰底部形貌探测作业^[29]。



图 15 星海 1000 AUV
Fig. 15 Xinghai 1000 AUV

2 极地 AUV 研制的关键技术

极地 AUV 的冰下作业环境更为复杂,除了常规 AUV 具备的可靠性、便携性、自主性等通用技术特点外,还需要克服严寒气候和大面积冰层覆盖带来的挑战,包括作业窗口期短、布放回收难度大、冰下导航精度低和通信困难等。

2.1 总体设计及优化技术

极区 AUV 的研制是一个涉及多学科、多需求和多约束的系统工程,其总体设计必须综合考虑任务需求和部署环境约束^[30]。针对极地作业窗口期限制,极地 AUV 需要配置尽可能多的有效载荷,保证单次作业任务的多样化,并提高作业效率。针对冰基布放难题,总体设计阶段需要结合布放方式对主尺度的约束限制确定艇型参数,合理设计有效载荷布置方案。此外,对于深潜型极地 AUV 还需要根据冰下水层密度变化对 AUV 浮态进行修正。

GAVIA AUV 采用模块化设计,进而实现任务模块的快速更换,有效提高了多样化作业能力^[31]。MON-ACA AUV 采用一套可上下翻转的多波束声呐系统满足了向上和向下的扫描需求^[32]。ICEFIN AUV 的低剖面无突出外形设计使其可以通过数百米的冰层钻孔进行冰下部署^[33]。星海 1000 AUV 采用立扁型设计,更小的水平投影面为其冰基布放提供了便利。MBARI 为 AL-TEX AUV 设计了水动力补偿系统代替复杂的可变压载系统,用于补偿水层密度变化和燃料电池质量损失导致的静水力变化^[34]。在总体优化设计方面,刘自豪^[35]以大潜深、长航程的极地 AUV 为研究对象,综合操纵性、快速性、静稳性和可靠性研究了 AUV 的多学科设计优化方法。周恒^[36]基于并行子空间设计方法,以最小艇体重量和水平投影面为优化目标,进行了多目标优化下的极地 AUV 总体设计。

总体设计是极地 AUV 研制的基础,需要综合考虑任务需求和环境约束。为了适应冰下作业窗口期的限制,模块化设计是一项关键技术,这种设计方法允许 AUV 快速更换任务模块,提高多样化作业能力。此外,有效载荷布置方案也是重要的优化考虑因素,以确保 AUV 在冰基布放时满足主尺度的约束限制。对于深潜型 AUV,浮态修正技术根据冰下水层密度的变化对 AUV 的浮态进行调整,确保在不同深度的环境中稳定运行。

2.2 冰下导航与通信技术

导航与通信是限制极地 AUV 长距离水下巡航的重要因素。相比传统 AUV,极地 AUV 对导航系统的精

度要求更高。一方面,受大范围冰盖层限制,极区 AUV 无法通过上浮接收 GPS 信号修正航行误差;另一方面,传统导航方式,如地磁导航、惯性导航等,在高纬度区域存在导航精度低的问题。此外,冰脊、冰山等对极地 AUV 导航系统的自主探测与避障提出了一定的挑战。目前,组合导航和地形辅助导航的应用是解决此类问题的重要方式。Tian 等^[37]在 DVL/SINS 组合导航的基础上,采用基于马氏距离的鲁棒卡尔曼滤波算法降低了 DVL 异常数据的影响,提高了极地 AUV 的冰下定位精度。Salavasidis 等^[17]为 ALR1500 AUV 设计了一套北极地形辅助导航系统。在先验地图严重失真的情况下,地形辅助导航系统在穿越北极模拟实验中展现了良好的导航性能。针对冰下避障需求,NOC 为 AUTOSUB3 AUV 设计了一套特殊的避障策略^[38]。MMT-3 500 AUV 配备的回声定位系统可以实现九个不同方向的障碍探测,结合预置的避障算法实现了冰川底部洞穴内的自主巡航^[39]。

冰盖层的存在同时也限制了无线电通信的使用。目前,水声通信是极区 AUV 冰下通信的主要方式,但冰下独特的声场环境使水声信号的传递效率大幅下降。对极区复杂的水声环境进行研究并将研究成果用于水声通信的优化是解决冰下通信难题的有效途径。Lee 等^[40]利用相位均衡技术实现了 70~90 km 范围内 5~10 b/s 的冰下低速率相干通信。麻省理工学院^[41]研究了气候对冰下噪声环境变化的影响,并发现了一个特殊水层十分适合北极冰下的远距离水声通信。Alexander 等^[42]研究了海洋和海冰特性对声信号传播的影响,为冰下水声通信的优化提供了支撑。莫雪晶^[43]对北极楚科奇海台冰下噪声的统计特性进行了分析研究,研究结果支持了对极区水声通信的优化。殷敬伟等^[44]提出了一种针对冰水混合水域环境下的水声信道预测技术,为北极水下自适应水声通信提供了可靠的信道状态信息。

在极地冰下作业环境中,导航和通信技术的高精度要求是确保 AUV 成功执行任务的关键。由于大范围冰盖层的限制,传统导航方式(如 GPS)不再适用,因此需要采用组合导航和地形辅助导航,这些技术能够提高导航的精度,并解决在高纬度区域存在的导航精度低的问题。冰下通信方面,水声通信是主要方式,但由于冰下声场环境的特殊性,需要进行技术优化,例如相位均衡技术,以实现有效的冰下通信。

2.3 极地布放回收技术

冰下布放回收是极地 AUV 部署期间的重要挑战之一。大范围的冰层覆盖极大限制了极地 AUV 的布放作

业, 同时, 冰层的相对运动和导航系统的累积误差使极地 AUV 难以准确到达回收点。为此, 国内外研究机构为极地 AUV 研制了配套辅助装置, 用于克服冰下布放回收难题, 提高部署效率。辅助装置如 CATCHY 系统和冰下回收系统通过声学引导、超短基线声呐等技术, 为 AUV 提供冰下充电和数据传输服务, 以确保 AUV 的准确布放和回收。布放回收系统还包括垂直布放和回收方式, 减小冰洞的开凿面积, 从而降低了复杂冰下环境中的操作难度。Peter 等^[45]设计了用于布放和捕获大型极地 AUV 的 CATCHY 系统, 在 ROV 的辅助下该系统可以为捕获的 Explore AUV 提供冰下充电和数据传输服务。Kukulya 等^[9]为改造后的 REMUS 100 AUV 开发了一套冰下回收系统, 该系统以超短基线声呐 (USBL) 作为声学引导, 使用回收网捕获返航的 AUV。Kimball 等^[46]为 ARTEMIS AUV 研制了一套冰下自主布放回收系统, 其垂直布放与回收方式减小了冰洞的开凿面积。相关系统如图 16 所示。

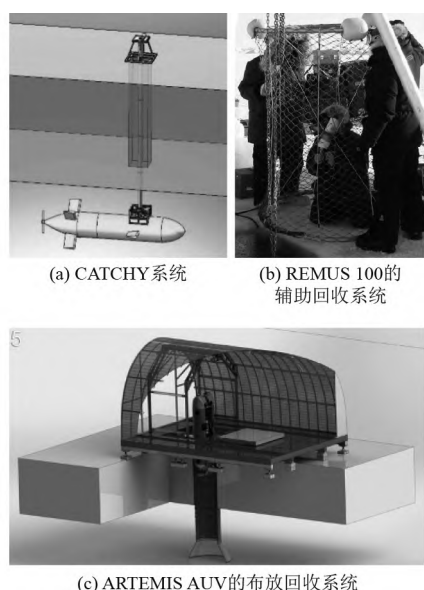


图 16 极地 AUV 布放与回收系统

Fig. 16 Polar AUV deployment and recovery system

2.4 低温防护技术

极地 AUV 的部署过程中, 严寒气候和低温环境难以避免。相比艇体结构, 艇内传感器和电池受到低温的影响更大。深度计、声呐和通信天线等设备极易因孔隙中滞留的水结冰而发生故障。2014 年, AUTOSUB3 AUV 在松岛冰川部署期间, 因传感器冻结、WiFi 天线覆冰等原因导致多次冰基探测任务被取消^[47]。ALR6000 AUV 在菲尔希纳和龙尼冰川部署期间也发生了类似故障^[16]。

为克服低温环境下 AUV 续航能力大幅下降问题,

各科研机构采取了一系列防护措施, 如采用低温放电性能更好的储能电池、开发低温热管理系统改善电池工作环境等。在远距离巡航任务中, NOC 为 ALR6000 AUV 配备了能源密度更高、自放电更低的筒式亚硫酸氯化锂原电池^[15]。AUTOSUB2KUI AUV 和 ICEFIN AUV 则是为电池舱配备了相应的热管理系统用于舱内温度、湿度的监测^[48]。

3 极地 AUV 发展趋势

极地 AUV 是一个备受关注且充满挑战的研究领域, 存在巨大的发展空间, 智能化、协同化和长续航是未来的主要发展趋势。

极地 AUV 在智能化方面的进步将成为推动极地科学和工程领域前进的关键驱动力。如智能感知系统能够更加精确地感知周围的环境, 包括水文、海冰、极区生物等多方面的信息, 有助于深入了解极地冰下水文环境, 探索海冰结构及海冰-海洋相互作用机理, 调查极区环境变化对生态系统的影响。另一方面, 智能决策系统能够根据感知信息做出更加合理或高效的决策。例如, 在面对复杂的水下冰貌或意外情况时, 智能决策系统能够根据对环境信息和各设备运行状态的分析, 自主调整航行路径或采取相应的措施, 从而提高在极端环境中的适应性和生存能力。这种智能决策不仅增强了 AUV 的自主性, 还提高了对极区环境变化的实时适应性。

协同化将极大地提高极地 AUV 的探测效率和环境适应性。在极地的极端条件下, 单个 AUV 可能会面临诸多挑战, 例如海冰遮挡、复杂海底地形或意外故障, 而协同化技术的引入可以弥补这些局限。通过有效的通信和协调, AUV 可以共同完成更大范围、更复杂的任务, 如海底地形或水下冰貌的测绘。这种协同组网探测技术不仅提高了工作效率, 还增强了探测系统的稳健性和可靠性。

冰下大航程 AUV 系统的研制将极大提升对极区生态变化和冰盖融化情况的监测能力。相比卫星反演技术, 极地 AUV 对冰下环境的监测数据更加精确。续航能力的提升将进一步缩小与空天地探测的量级差距, 提供更长时间的观测和勘测窗口, 提高探测数据的时间连续性。新型电池技术、先进的能源管理系统和节能型传感器技术是支撑长续航极地 AUV 研制的关键。

此外, 冰下驻留型和仿生型也是未来极地 AUV 的重要发展趋势。在冰下基地的辅助下, 驻留型极地 AUV 能够在部署期间自主进行能源补充和数据传输作业, 克服了极区考察窗口期限制, 实现了特定区域的

全季节变化监测。同时,冰下驻留探测系统的研制也为未来地外冰系星球的探索提供了技术积累。仿生型极地 AUV 可以用于特定的考察任务,如低噪声仿生鱼可以用于追踪特定生物群落、仿生蟹可以部署在冰底进行海冰的长期观测等。

4 结 语

作为极地科考的重要装备,极地 AUV 已经在极区海底地形勘测、冰盖监测和生态系统调查等领域得到广泛应用。本文回顾了近 20 年国内外典型极地 AUV 的研究与部署进展,总结并分析了极地 AUV 的关键技术,在此基础上对极地 AUV 的未来发展趋势进行了讨论。虽然极地 AUV 技术已经取得了巨大进步,但在冰下导航、自主避障和自主探测等方面还存在着不足。随着相关技术的不断发展,极地 AUV 的环境适应性和作业自主化研究正在持续推进。鉴于 AUV 的发展趋势,极地 AUV 将在未来极地考察中扮演越来越重要的角色,帮助人类进一步了解极地冰下世界。

参考文献:

- [1] 宋德勇,刘浩. 极地自主水下机器人研究现状和关键技术[J]. *船电技术*, 2020, 40(9): 36–39.
SONG Deyong, LIU Hao. Present status and key technology of autonomous underwater vehicle for investigation in polar region[J]. *Marine Electric Electronic Engineering*, 2020, 40(9): 36–39.
- [2] 柯剑寒,岳钧百,程雪岷,等. 海洋生物水下原位监测技术及其在偏振维度的信息拓展[J]. *水下无人系统学报*, 2023, 31(4): 614–623.
KE Jianhan, YUE Junbai, CHENG Xuemin, et al. Underwater in-situ monitoring technology for marine organisms and its information expansion in polarization dimension[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2023, 31(4): 614–623.
- [3] GWYTHYER D E, SPAIN E A, KING P, et al. Cold ocean cavity and weak basal melting of the sørsdal ice shelf revealed by surveys using autonomous platforms[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(6): e2019JC015882.
- [4] MCEWEN R, THOMAS H, WEBER D, et al. Performance of an AUV navigation system at arctic latitudes[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(2): 443–454.
- [5] BELLINGHAM J G, COKELET E D, KIRKWOOD W J. Observation of warm water transport and mixing in the Arctic basin with the ALTEX AUV[C]//2008 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, 2008: 1–5.
- [6] MOORE C, MCKIBBIN P. Artemis AUV payload development[C]// OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, 2015: 1–3.
- [7] MEISTER M, DICHEK D, SPEARS A, et al. Icefin: redesign and 2017 antarctic field deployment[C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, 2018: 1–5.
- [8] MEISTER M, DICHEK D, SPEARS A, et al. Antarctic deep field deployments and design of the icefin ROV[C]//Global Oceans 2020: Singapore – U. S. Gulf Coast, 2020: 1–5.
- [9] KUKULYA A, PLUEDDEMANN A, AUSTIN T, et al. Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic[C]//2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. 2010: 1–8.
- [10] DOWDESWELL J A, EVANS J, MUGFORD R, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs) and investigations of the ice–ocean interface in Antarctic and Arctic waters[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187): 661–672.
- [11] BRIERLEY A S, FERNANDES P G, BRANDON M A, et al. Antarctic krill under sea ice: elevated abundance in a narrow band just south of ice edge[J]. *Science*, 2002, 295(5561): 1890–1892.
- [12] WADHAMS P, WILKINSON J P, MCPHAIL S D. A new view of the underside of Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(4): 1–5.
- [13] NICHOLLS K W, ABRAHAMSEN E P, BUCK J J H, et al. Measurements beneath an Antarctic ice shelf using an autonomous underwater vehicle[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): 1–4.
- [14] KIMURA S, JENKINS A, DUTRIEUX P, et al. Ocean mixing beneath Pine Island Glacier ice shelf, West Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(12): 8496–8510.
- [15] ROPER D, HARRIS C A, SALAVASIDIS G, et al. Autosub Long Range 6000: a multiple-month endurance AUV for deep-ocean monitoring and survey[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(4): 1179–1191.
- [16] MCPHAIL S, TEMPLETON R, PEBODY M, et al. Autosub long range AUV missions under the filchner and ronne ice shelves in the weddell sea, antarctica - an engineering perspective[C]//OCEANS 2019 - Marseille, 2019: 1–8.
- [17] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, MCPHAIL S D, et al. Terrain-aided navigation with coarse maps —toward an arctic crossing with an AUV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(4): 1192–1212.
- [18] NICHOLLS K W, ABRAHAMSEN E P, HEYWOOD K J, et al. High-latitude oceanography using the Autosub autonomous underwater vehicle[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(5part2): 2309–2320.
- [19] DUBROVIN F, SCHERBATYUK A, VAULIN Yu. Some results of operation for the AUV MMT 3000 mobile navigation system on long and deep water trajectories[C]//2018 Oceans - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). 2018: 1–4.
- [20] BOROVNIK A I, RYBAKOVA E I, GALKIN S V, et al. Expe-

- rience of using the autonomous underwater vehicle MMT-3000 for research on benthic communities in antarctica[J]. *Oceanology*, 2022, 62(5): 709–720.
- [21] MOLODTSOVA T N, MININ K V, KOLBASOVA G D, et al. Studies of benthic fauna within the project "Assessment of the Current State of Environmental Systems in the Atlantic Sector of the Southern Ocean and Their Periodic Variability"[J]. *Oceanology*, 2022, 62(6): 919–921.
- [22] KAMINSKI C, CREES T, FERGUSON J, et al. 12 days under ice – an historic AUV deployment in the Canadian High Arctic[C]//2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, 2010: 1–11.
- [23] WADHAMS P, KROGH B. Operational history and development plans for the use of AUVs and UAVs to map sea ice topography[J]. *Polar Science*, 2019, 21: 195–203.
- [24] KING P, WILLIAMS G, COLEMAN R, et al. Deploying an AUV beneath the Sørsdal Ice Shelf: Recommendations from an expert-panel workshop[C]//2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), 2018: 1–6.
- [25] KING P, ZIÜRCHER K, BOWDEN-FLOYD I. A risk-averse approach to mission planning: nupiri muka at the Thwaites Glacier[C]//2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), 2020: 1–5.
- [26] ZENG J, LI S, LI Y, et al. The observation of sea-ice in the six Chinese national arctic expedition using polar-ARV[C]//OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, 2015: 1–4.
- [27] ZENG J, LI S, TANG Y, et al. The application of Polar-ARV in the fourth Chinese National Arctic Expedition[C]//OCEANS'11 MTS/IEEE KONA, 2011: 1–5.
- [28] LIU T, JIANG Z, LI S, et al. Explorer1000: A long endurance AUV with variable ballast systems[C]//2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 2018: 1–6.
- [29] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1778812407366746068&wfr=spider&for=pc>[EB].
- [30] 王建, 庞永杰, 杨桌懿, 等. 基于并行子空间设计的 AUV 多学科可靠性优化 [J]. *船舶力学*, 2023, 27(5): 659–668.
WANG Jian, PANG Yongjie, YANG Zhuoyi, et al. Reliability-based multidisciplinary design optimization of AUVs based on concurrent subspace design[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(5): 659–668.
- [31] YEO R. Surveying the underside of an Arctic ice ridge using a man-portable GAVIA AUV deployed through the ice[C]//OCEANS 2007, 2007: 1–8.
- [32] YAMAGATA H, MAKI T, YOSHIDA H, et al. Hardware design of variable and compact AUV "MONACA" for under-ice survey of antarctica[C]//2019 IEEE Underwater Technology (UT), 2019: 1–4.
- [33] SPEARS A, WEST M, MEISTER M, et al. Under ice in antarctica: the icefin unmanned underwater vehicle development and deployment[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(4): 30–41.
- [34] KIRKWOOD W J, GASHLER D, THOMAS H, et al. Development of a long endurance autonomous underwater vehicle for ocean science exploration[C]//MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295): Vol. 3, IEEE, 2001: 1504–1512.
- [35] 刘自豪. 极地 AUV 的优化设计方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [36] 周恒. 极地 AUV 综合优化方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [37] TIAN M, LIANG Z, LIAO Z, et al. A polar robust kalman filter algorithm for DVL-Aided SINSs based on the ellipsoidal earth model[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7879.
- [38] PEBODY M. Autonomous underwater vehicle collision avoidance for under-ice exploration[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2008, 222(2): 53–66.
- [39] INZARTSEV A, BAGNITCKII A, PANIN M. Algorithms of the AUV control system for operation under the lower ice edge[C]//2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS), 2022: 11–14.
- [40] FREITAG L, KOSKI P, MOROZOV A, et al. Acoustic communications and navigation under Arctic ice[C]//2012 Oceans, 2012: 1–8.
- [41] SCHMIDT H, SCHNEIDER T. Acoustic communication and navigation in the new Arctic — A model case for environmental adaptation[C]//2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms), 2016: 1–4.
- [42] ALEXANDER P, DUNCAN A, BOSE N, et al. Modelling acoustic propagation beneath Antarctic sea ice using measured environmental parameters[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 131: 84–95.
- [43] 莫雪晶. 北极楚科奇海海洋环境噪声研究 [D]. 青岛: 自然资源部第三海洋研究所, 2023.
- [44] 殷敬伟, 吴雨珊, 韩笑, 等. 北极冰水混合水域的水声信道预测技术 [J]. *信号处理*, 2019, 35(9): 1496–1504.
YIN Jingwei, WU yushan, HAN Xiao, et al. Underwater acoustic channel prediction in arctic ice-water mixed waters[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(9): 1496–1504.
- [45] KING P, LEWIS R, MOULAND D, et al. CATCHY an AUV ice dock[C]//OCEANS 2009, 2009: 1–6.
- [46] The ARTEMIS under - ice AUV docking system - Kimball - 2018 - Journal of Field Robotics - Wiley Online Library[EB].
- [47] GRIFFITHS G. Fifty years and counting: Applications of AUVs in the Polar Regions[C]//2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), 2020: 1–6.
- [48] PHILLIPS A B, KINGSLAND M, LINTON N, et al. Autosub 2000 Under Ice: Design of a New Work Class AUV for Under Ice Exploration[C]//2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), 2020: 1–8.