

智能无人潜水器技术发展研究

吴有生¹, 赵羿羽², 郎舒妍², 王传荣²

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082; 2. 中国船舶信息中心, 北京 100101)

摘要: 无人潜水器是开展深海探测与作业的重要工具, 成为世界海洋装备的重点发展方向。本文着眼我国智能无人潜水器 (AUV) 2035 年技术体系布局, 梳理世界 AUV 在发展规划、技术研发与应用等方面的进展, 凝练 AUV 技术发展趋势和 2035 年发展远景; 进一步总结我国 AUV 在发展现状, 研判规划、设备、产业化等方面存在的问题。研究分析了包括感知、通信导航、能源、自主航行、协同作业在内的领域未来关键技术攻关方向, 以材料、可靠性为重点的基础研究方向, 论证了 AUV 谱系化、国产化研制重大科技专项初步方案。研究提出顶层规划、行业协同、政策引导、人才培养等方面的对策建议, 以期为我国 AUV 产业的高质量发展提供理论参考。

关键词: 深海探测; 智能无人潜水器; 发展趋势; 关键技术; 基础研究

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Development of Autonomous Underwater Vehicles Technology

Wu Yousheng¹, Zhao Yiyu², Lang Shuyan², Wang Chuanrong²

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China; 2. Shipbuilding Information Center of China, Beijing 100101, China)

Abstract: Unmanned submersibles are important for deep sea exploration; they have become a key development direction for marine equipment worldwide. This study aims to propose a technical system layout for the autonomous underwater vehicles (AUVs) development in China by 2035. To this end, we first systematically summarized the current progress made worldwide regarding AUVs in terms of development plans, research, and application, and analyzed the technical trends and prospects of AUVs by 2035. Subsequently, we introduced the development status of AUVs in China and explored the challenges faced by it regarding top-level planning, equipment development, and industrialization process. Conclusively, China should identify materials and reliability as its basic research directions for AUVs and focus its efforts on breakthroughs in key technologies including perception, communication/navigation, energy, autonomous navigation, and cooperative operation. Furthermore, we proposed a preliminary plan for major scientific and technological projects that aim to promote the pedigree and localization of AUVs in China, and offered some policy suggestions for the high-quality development of the industry in China from the aspects of top-level planning, industry coordination, policy guidance, and personnel training.

Keywords: deep-sea exploration; autonomous underwater vehicles; development trend; key technologies; fundamental research

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2020-11-03

通讯作者: 王传荣, 中国船舶信息中心研究员, 研究方向为海洋装备技术; E-mail: wcrerc@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋装备发展战略研究”(2020-ZD-02); 中国工程院咨询项目“面向 2035 年的智能海洋运载装备工程技术发展战略研究”(2017-ZCQ-01)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

陆地和近海资源日益匮乏,人类朝向深海进军。由于深海环境恶劣、人类能够到达的下潜深度有限,无人潜水器成为深海探测与开发的重要工具。在人工智能(AI)、探测识别、智能控制、系统集成等技术的驱动下,智能无人潜水器(AUV,也称水下自治潜水器)具有自主决策和控制能力,可高效执行各类水下任务,成为世界海洋强国竞相发展的重要装备[1]。未来AUV必将在海洋安全维护、海洋资源开发、海洋科学研究等领域发挥重要作用。

当前,一些学者完成了AUV技术综述研究[2~6],重在梳理现状、研判趋势;然而面向中长期的AUV技术发展战略研究,尤其是我国未来AUV技术攻关布局等较为缺乏。本文以面向2035年的AUV技术发展研究为切入点,主要进行国际先进水平与前沿问题综述、发展趋势、重点任务、重大科技专项初步方案、政策建议等研究,以期为我国AUV产业与技术发展提供借鉴。

二、AUV国际先进水平与前沿问题综述

(一) 全球政策与行动计划

海洋强国均制定研发规划,支持AUV发展。美国2011年发布《2030年海洋研究与社会需求的关键基础设施》报告,提出面向2030年、包括水下滑翔机(AUG)和水下机器人在内的观测平台类海洋研究基础设施的规划建议[7];2016年发布《2025年自主潜航器需求》报告,提出致力于提高自主潜航器的独立性,确保自主潜航器可在最少人员干预下运行数日或数周[8];2018年发布《美国国家海洋科技发展:未来十年愿景》报告,规划研发船舶、潜水器等装备[9];近年来,国防部高级研究计划局(DARPA)重点关注水下无人系统、水下态势感知、水下及跨域通信等领域,推动发展长航时、长距离、可搭载大型有效载荷的无人潜航器和先进自主水下机器人系统等。

2015年,日本依托“下一代机器人关键技术重点科技计划”项目,部署了资源勘探用自主型无人潜水器、遥控无人潜水器等高效海中作业系统以及多台自主型无人潜水器协同作业的研究开发[10]。2015年,劳氏船级社等发布《全球海洋技术趋势

2030》报告,认为未来一系列具有自主能力的水下、水面、空中装备可协同开展行动并执行任务,为探索、监测、与海洋空间互动提供新手段[11]。

(二) 各国研发与应用现状

1. AUV广泛应用于深海探测与作业

海洋强国已经发展了多型AUV装备(见表1),美国、日本、法国处于技术领先地位,已形成新兴产业和成熟市场。美国伍兹霍尔海洋研究所研制了潜深6500米级AUV,2008年完成海上试验并开展应用,提高了海洋调查能力。日本三井造船株式会社、东京大学联合开发了潜深4000m AUV,用于调查洋中脊海底热液活动。挪威康斯伯格集团开发的AUV作业潜深为1000~4500m,用于高质量海洋测绘、航道调查、快速环境评估等。英国南安普顿国家海洋中心正在开发新一代潜深2000m级自治无人潜水器,可在极地区域创建详细地图、建立海底栖息地特征[12,13]。整体来看,目前AUV智能化程度尚处于初级阶段,仅具有预编程、应急避障、数据采集、单台探测等基本特征。

2. 新型AUV研制

AUG是20世纪90年代发展起来的一种新型AUV。美国AUG单体技术非常成熟,具有多款产品(见表2),且可靠性和实用化程度高、应用广泛。2009年法国公司成功开发SeaExplorer系列AUG,实现了实用化和商品化。此外,日本、加拿大、韩国、新西兰等也开展了相关产品研制。发展至今,AUG领域出现了多模式混合推进滑翔机、飞翼滑翔机、温差能滑翔机、波浪滑翔机等多种类型,机动性、可靠性、隐身性等不断提升。此外,美国、瑞典、韩国等都在开展自主/遥控式复合型潜水器研制,具有代表性的是美国的“海神号”和“N11k号”,既可以自主航行与作业,又可由远程控制来执行任务[14~16]。

3. 超大型AUV成为前沿热点

美国、俄罗斯开展数十吨级“回音号”“曼塔”“波塞冬”等超大型AUV研究[5]。“回音号”潜水器长约15m,质量约为50t,最大潜深达3353m;采用油电混合动力,水下最大速度达14.5km/h,总航程约为 1.2×10^4 km,具有声纳避障、惯性导航能力,相关测试工作进展顺利。在此基础上,波音公司启动“逆戟鲸”超大型AUV的研制,

表 1 国外典型 AUV 装备情况

国家	型号	作业水深/m	质量/kg	续航时间/h
美国	Bluefin9	200	60.5	12
	Bluefin21	4500	750	25
	Sentry	6000	1250	20
挪威	REMUS 6000	6000	884	22
	HUGIN 4500	4500	1900	60
英国	Autosub 6000	6000	1800	30
日本	r2D4	4000	1630	12
法国	Alister-9	100、200	50~90	24

表 2 美国代表性 AUG 情况

型号	质量/kg	负载能力/kg	最大工作深度/m	滑翔航速/kn	续航或工作时间/d
Spray	51	3.5	1500	0.5	330 (续航)
Slocum	52	5	200、1000	0.7	20 (续航)
Seaglider	52	4	1000	0.5	200 (续航)
Ant littoral	110	5	200	2	30 (工作)
Tethys	120	—	—	1~2	31 (工作)

注：1 kn=1.852 km/h。

能够根据不同的任务需求快速配置多种类型载荷。

(三) 我国 AUV 领域的研究进展

1. 发展现状

我国 AUV 领域起步稍晚，但发展迅速 [6]。近年来，国家重点研发计划支持了全海深无人潜水器、水下机器人自主避障与规划控制等方面的研究，促进了无人潜水器作业能力与智能化水平的提升。代表性的工作有：CR-01、CR-02 两型 AUV 能够在 6000 m 深海进行地形地貌、浅地层剖面探测；系列化的 AUV 性能指标不断提升，支持大洋矿产资源勘查和大洋科学考察（见表 3）；“海燕” AUG 具有完全自主知识产权，最大潜深达 10 619 m；“海斗”自主/遥控式复合型潜水器最大潜深达 10 767 m，标志着我国成为世界第三个具备万米级无人潜水器研制能力的国家；“探索 1000” AUV 在我国第 35 次南极考察中首次开展应用，实现了极区海洋观测的应用突破。

2. 面临的问题

一是领域发展规划缺乏。目前我国相关机构开展的 AUV 研究，主要是根据行业需求分析以及对国外相关技术发展的了解，未系统全面开展 AUV 装备与技术发展规划研究。

二是关键专用设备发展滞后。我国在 AUV 配套的感知器件、能动控制器件等核心器件方面缺乏专门研究，使得无人潜水器专用设备的发展滞后于无人潜水器总体集成技术的发展，相关配套市场依然被国外产品垄断。

三是产业化进程缓慢。我国在 AUV 谱系化、国产化研制方面取得“点”的突破，但装备业务化、产业化的进程依然缓慢，工程应用装备仍以购买或租赁国外产品为主。

三、AUV 技术发展趋势研判

(一) 领域技术趋势

一是远程化。目前各国正在研究的燃料电池、小型核能装置等，体积小、能量密度高，可极大提高 AUV 续航力；适应水下应用的非传统导航方式正获得重点发展，通过高效率、高精度水下导航来支撑 AUV 远海作业 [17]。

二是深海化。随着材料、密封技术的进步，发展和优化 6000 m 水深甚至全海深的 AUV 方案成为海洋强国的目标 [18]。

三是高度智能化。未来 AUV 通过联合应用多种探测与识别技术来增强感知环境、识别目标能力，

表 3 我国 AUV/AUG 装备情况

名称	工作水深/m	速度/kn	续航能力	重量/kg
CR-02	6000	2.3	25 h	1500
潜龙一号	6000	2	30 h	1500
潜龙二号	4500	2	30 h	15 000
潜龙三号	4500	2	40 h	15 000
探索4500	4500	2	20 h	15 000
探索1000	800	2~5	300 km, 30 d	1200
海燕	1500	1.3	1000 km, 30 d	70
海翼	300~7000	0.5~1	>1000 km	60~70

自主系统也具有更高的学习能力；在运动控制、规划决策方面，AUV 采用更加智能化的信息处理方式 [19]。

四是作业协同化。随着 AUV 应用范围的拓宽，除了单一装备执行任务模式外，需要多个自治与遥控无人潜水器协同来承担更加复杂的任务，通过大规模、多平台的组网作业来增强探测与作业能力。

（二）2035 年 AUV 工程应用展望

到 2035 年，人类开展深海探测、深海作业的能力大幅提升。不同潜深、不同功能、不同尺寸、高度智能化的 AUV 将实现模块化、谱系化发展，凸显自主环境感知、自主航行规划、自主作业、群体协同、精确定位导航、水下长期驻留等技术特征，在深海（含深渊）、极地的水下侦察、科学考察、资源勘探与开发作业等领域的应用基本成熟化，成为深远海作业的主力装备。超大型有人装备与前沿智能无人技术有机融合，各类通用型深海装备具备有人与无人、小型与大型、点线与面域的高效协同作业能力。

四、智能海洋运载装备工程科技发展的重点任务

（一）亟待突破的关键技术

1. 深海复杂环境自主感知分析技术

深海环境复杂多变，海洋生物、水流等干扰增加了海洋探测感知分析的难度，必须发展深海探测感知新技术。相关技术以效率、可靠性、自主程度全面提升为主要发展目标，重点解决大容量、多类型水下数据的存储、处理与识别问题；具体包括深海复杂环境智能探测传感器件及其系统配置、环

境感知 / 认知与推理分析、多目标自主跟踪识别等内容。

2. 深海新型通信与定位导航技术

深海定位导航面临环境复杂、信息源缺乏的局面，技术突破难度大，使得当前的深海水声通信在通信质量、稳定性等方面均不理想。发展高精度、高效率、高可靠的新型深海通信与定位导航技术成为未来深海探测的关键环节，具体包括深海环境下光学通信、静 / 动组合通信与定位导航、海底高精度定位系统、远距离水下高速通信及信息交互、极低频电磁波应用、海底地形匹配定位导航、重力场与地磁场定位导航等内容。

3. 智能深海无人装备高效安全供能技术

任务需求越发苛刻，智能深海无人装备对续航力的要求越来越高，常规电池的体积、重量都制约了系统性能。相比水面船舶，智能深海无人装备动力与供能技术的复杂程度更高，储能的体积、重量密度是相关应用的关键因素。高密度、更安全的供能储能技术成为领域技术突破方向之一，具体包括耐高压 / 耐腐蚀高能量密度能源、水下小体积核动力、深海能源补给等内容。

4. 水下无人装备自主航行与作业控制技术

水下无人装备在航行与作业过程中无须人工实时参与控制，能够根据自身状态及外部环境的变化及时自主做出决策，是水下无人装备技术的重要发展方向。相关研究内容包括：复杂水下环境下自主航路规划、智能航行控制、信息融合与实时传输、自主对接与回收、作业姿态自主控制等。

5. 水下有 / 无人装备集群智能协同技术

各类水下装备协同作业能够克服单一装备作业效率有限的制约，实现各类装备作业能力的差异化配置，是执行水下复杂任务的有效方式，成为新一

代深海探测与作业技术的发展方向。相关研究内容包括：集群装备多单元空间与环境信息感知/实时融合、集群装备主从单元状态判断/抗交互干扰/时空协调/精确配合/故障诊断与自动排除等智能辅助控制、超高压环境下装备对接与进出舱、集群协同作业管理等。

（二）优先布局的基础研究方向

1. 深海无人装备先进材料设计、制备与应用研究

深水材料应具备超坚固、智能、自我修复的能力，以适应海洋开发水深不断增加的应用需求，主要有金属、陶瓷、聚合物、复合材料等类别。通过纳米级设计且在大型深海结构上利用这些属性，完善相关结构的强度、韧性、耐久性和其他可用性功能，是未来需要解决的基础问题。建议开展深海无人装备先进材料成分设计及其性能、深海无人装备先进材料微结构调控与制备方法、深海复杂环境条件下先进材料力学性能、深海无人装备先进材料的环境安全与寿命周期评价等研究。

2. 深海极端环境下无人装备可靠性研究

水下无人装备执行深海探测与作业任务，面临复杂极端的深海环境因素；极端环境会诱发装备故障，因而可靠性是重点解决问题。建议开展水下无人装备安全性设计/智能监测与控制、故障分析/危害评估与处置、深海环境条件及极端环境因素的仿真模拟及验证等研究。

五、科技重大专项初步方案

（一）需求与必要性

国内已经研发的 AUV “自主”能力仍然偏低，属于“弱智能”。新一代 AI 技术有望显著提升无人潜水器的智能化水平，且新型通信与定位导航、新型能源等方面的技术进步也将促进 AUV 可靠性、效率、续航、集群作业等能力的提升。

我国的深海探测与作业逐步走向全海深，应梳理共性和差异性需求，配置不同潜深和能力的系列化 AUV，以进一步提高效率、降低成本。当前 AUV 核心设备国产化水平偏低，总体研发进度受制于进口产品，加之深海智能化探测手段不成体系，亟需在智能感知、水下定位及协同、控制与导航、

系统安全可靠性等多个方向取得进一步突破。

（二）工程任务

研发适应不同应用环境和应用载荷的 AUV，形成下潜范围从浅海到万米深渊、能力涵盖探测和作业的谱系化 AUV。突破自主探测感知、深海通信与定位导航、高效安全供能、自主航行控制、协同作业等关键技术，从脚本式智能转变为自适应智能。尽快开展 AUV 传感器、核心元器件的国产化研制，形成具有自主知识产权的 AUV 全产业链研发能力。

（三）工程目标与效益

2025 年，补齐我国 AUV 技术链、产业链的缺失环节，提高 AUV 关键元器件的国产化率，实现 AUV 与各类无人装备的自主协同探测与作业能力。

2035 年，核心设备技术水平达到世界领先，具有自主知识产权的谱系化 AUV 研发、设计、制造、测试、配套、运维能力齐备；深海智能无人集群探测作业装备及配套产业链发展成熟，带动高端材料、新型动力、先进制造、配套设备等下游产业的换代发展。

六、对策建议

（一）做好统筹规划，保证资源投入

加强顶层设计，做好统筹规划，制定科学详尽的 AUV 分阶段研发目标，分步推进。发挥国家和行业的整体力量，引导相关企业将技术研发重心聚焦到确定的重点方向。继续加强多元化的科研保障，组织攻克共性关键技术。

（二）加大行业协同，深化“产学研用”合作

建立合作机制，与数据信息处理、通信、计算机等信息技术领域的优势企业开展跨领域、跨行业协作。构建 AUV 产业技术创新战略联盟，深化“产学研用”合作力度，推动 AUV 装备技术成果转化与产业化发展。

（三）强化产业管理，推动政策引导

补齐主管部门对 AUV 产业化发展管理的缺位，

强化对“产学研用”相关主体的资金、人力、装备、技术、数据资源方面的统筹管理。实施自主研发 AUV 配套设备 / 系统“首台套信贷支持、税收减免”“国配国用”等产业激励政策。

(四) 加强人才培养, 注重国际合作

加大 AUV 领域的领军人才、青年拔尖人才自主培养力度, 以多种方式吸引全球性高层次人才, 探索合理高效的人才激励约束制度。积极参与相关国际组织事务工作, 有效开展国际技术交流活动, 在国际标准制定方面发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海装备技术发展趋势分析 [J]. 船舶物资与市场, 2016 (5): 42-45.
Zhao Y Y, Zeng X G, Lang S Y. Analysis on the development trend of deep sea equipment technology [J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2016 (5): 42-45.
- [2] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(1): 44-51.
Pan G, Song B W, Huang Q G, et al. Development and key techniques of unmanned undersea system [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(1): 44-51.
- [3] 庞硕, 纠海峰. 智能水下机器人研究进展 [J]. 科技导报, 2015, 33(23): 66-71.
Pang S, Jiu H F. Current status of autonomous underwater vehicles research and development [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(23): 66-71.
- [4] 柯冠岩, 吴涛, 李明, 等. 水下机器人发展现状和趋势 [J]. 国防科技, 2013, 34(5): 44-47.
Ke G Y, Wu T, Li M, et al. The improvements and trends of the unmanned underwater vehicles [J]. National Defense Technology, 2013, 34(5): 44-47.
- [5] 钟宏伟, 李国良, 宋林桦, 等. 国外大型无人水下航行器发展综述 [J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(4): 273-282.
Zhong H W, Li G L, Song L H, et al. Development of large displacement unmanned undersea vehicle in foreign countries: A review [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(4): 273-282.
- [6] 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状 [J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1152-1164.
Li S, Liu J, Xu H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China [J]. SCIENTIA SINICA Informations, 2018, 48(9): 1152-1164.
- [7] 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署 [J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 113-125.
Gao F, Wang H, Wang F, et al. Future strategic deployment of international marine science and technology [J]. World Sci-Tech R & D, 2018, 40(2): 113-125.
- [8] 徐依航. 美国海军无人潜航器发展经验及未来趋势 [J]. 军事文摘, 2018 (5): 21-23.
Xu Y H. Development experience and future trend of US Navy's unmanned underwater vehicle [J]. Military Digest, 2018 (5): 21-23.
- [9] 王立伟. 美国国家海洋科技发展: 未来十年愿景 [J]. 海洋世界, 2019 (1): 54-59.
Wang L W. Marine science and technology development of the United States: Vision for the next decade [J]. Ocean World, 2019 (1): 54-59.
- [10] 甄子健, 刘进长. 日本最新机器人研发计划及其发展战略 [J]. 机器人技术与应用, 2016 (5): 14-19.
Zhen Z J, Liu J C. The latest robot R & D plan and development strategy of Japan [J]. Robot Technique and Application, 2016 (5): 14-19.
- [11] 郎舒妍, 曾晓光, 赵羿羽. 2030: 全球海洋技术趋势 [J]. 中国船检, 2017 (6): 90-92.
Lang S Y, Zeng X G, Zhao Y Y. 2030: Global marine technology trends [J]. China Ship Survey, 2017 (6): 90-92.
- [12] 王荣耀, 高宇清, 臧龙, 等. 深海探矿机器人现状与发展趋势 [J]. 采矿技术, 2017, 17(5): 69-72.
Wang R Y, Gao Y Q, Zang L, et al. Current situation and development trend of deep sea exploration robot [J]. Mining Technology, 2017, 17(5): 69-72.
- [13] 丁忠军, 任玉刚, 张奕, 等. 深海探测技术研发和展望 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(4): 71-77.
Ding Z J, Ren Y G, Zhang Y, et al. Research and prospect of deep-sea detection technology [J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(4): 71-77.
- [14] 俞建成, 刘世杰, 金文明, 等. 深海滑翔机技术与应用现状 [J]. 工程研究, 2016, 8(2): 208-216.
Yu J C, Liu S J, Jin W M, et al. The present state of deep-sea underwater glider technologies and applications [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 208-216.
- [15] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望 [J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89-106.
Shen X X, Wang Y H, Yang S Q, et al. Development of underwater gliders: An overview and prospect [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 89-106.
- [16] 赵羿羽. 万米级潜水器现状及发展重点 [J]. 中国船检, 2018 (9): 76-81.
Zhao Y Y. Current situation and development focus of full ocean depth submersibles [J]. China Ship Survey, 2018 (9): 76-81.
- [17] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势 [J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-132.
Xu Y R, Li P C. Developing tendency of unmanned underwater vehicles [J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33(3): 125-132.
- [18] 徐会希. 自主水下机器人 [M]. 中国科技出版传媒股份有限公司, 2019.
Xu H X. Autonomous underwater vehicles [M]. China Science Publishing & Media Ltd., 2019.
- [19] 赵羿羽, 曾晓光, 金伟晨. 海洋科考装备体系构建及发展方向研究 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 1-6.
Zhao Y Y, Zeng X G, Jin W C. Research on system construction and development direction of marine scientific research equipment [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(10): 1-6.