

【引用格式】任翀, 李楠, 杜照鹏. 大深度无人潜航器研究现状及发展趋势[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(1): 63-71.

# 大深度无人潜航器研究现状及发展趋势

任翀<sup>1,2</sup>, 李楠<sup>1,2</sup>, 杜照鹏<sup>1,2</sup>

- (1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;  
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要** 大深度无人潜航器是深渊科研、工程及军事应用领域的重要技术装备。介绍了大深度无人潜航器的国内外研究现状及其应用领域, 分析了有待重点突破的总体设计与集成、深海结构与材料、高效能源动力、高速水下通信、组合定位导航、自主感知与控制等关键技术, 并展望了大深度无人潜航器的未来发展趋势。

**关键词** AUV; ARV; HROV; 大深度; 深海

中图分类号 P715

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)01-0063-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.01.008

## Research Status and Development Trend of Deep-sea AUV/ARV

REN Chong<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>, DU Zhaopeng<sup>1,2</sup>

- (1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;  
2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

**Abstract** The deep-sea AUV/ARV is an important technical equipment for hadal scientific research, engineering and military applications. Focusing on the AUV/ARV with maximum operating depth of 6000 meters or more, the research status and application fields of the deep-sea AUV/ARV are introduced, the key technologies such as overall design and integration, deep-sea structure and materials, high-efficiency energy power, high-speed underwater communication, combined positioning and navigation, and autonomous sensing and control that need to be broken through are analyzed, and the future development trend is prospected.

**Key words** AUV; ARV; HROV; large depth; deep sea

## 0 引言

“海斗深渊”指 6 000 m 以下深度的海洋空间, 简称“深渊”, 是人类知之甚少又难以企及的区域<sup>[1]</sup>。目前, 深渊科学研究是海洋科学研究的前沿领域之一。探索深渊需要相应的技术装备支撑, 深渊探测装备技术已成为各海洋强国竞逐的焦点。

无人潜器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 是深渊科研、工程及军事应用领域的重要技

术装备。依据控制方式的不同, UUV 可分为无人自主潜航器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、有缆遥控潜器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 和自主遥控复合型潜器 (Autonomous Remotely-operated Vehicle, ARV/Hybrid Remotely Operated Vehicle, HROV) 等。其中, AUV 能够依靠其自治能力完成任务, 具有机动灵活、使用成本低、作业范围大、环境适应能力强等特点; ARV 配备与母船连接的缆索, 能够以自主、遥控、半自

动等多种模式作业。AUV、ARV 已成为各海洋强国竞相发展的热点深渊技术装备。本文介绍了最大作业深度 6 000 m 以深的大深度 AUV、ARV 的研究现状及应用领域,分析了其主要关键技术,并展望了其发展趋势。

## 1 研究现状

无人潜航器研制始于 20 世纪 50 年代。进入 21 世纪,随着结构材料、智能控制、导航定位、能源推进及传感器等技术的不断发展,无人潜航器的工作深度、自主控制、续航时间及作业能力均大幅提升。以美欧为代表的海洋科技强国大力发展大

深度无人潜航器装备,多型大深度 AUV、ARV 已实现业务化应用<sup>[2-3]</sup>。

### 1.1 国外研究现状

#### 1) 美国。

美国在大深度无人潜航器领域居世界领先地位,主要研发应用机构包括美国海军水下作战中心、海军研究局、国防部高级研究计划局(DARPA)等军方单位以及伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)、华盛顿大学、麻省理工学院、Hydroid 公司、Teledyne 公司、波音公司和洛克希德·马丁公司等科研院所和企业。上述机构研发了多型大深度 AUV/ARV,部分典型产品技术指标如表 1 所示。

表 1 国外大深度 AUV/ARV 主要技术指标  
Table 1 Main technical specifications of foreign deep-sea AUVs/ARVs

型号	REMUS 6000	Nereus	Orpheus	Vitjaz-D	Autosub6000	A6K	HUGIN Superior	SeaRaptor	Explorer
研制机构	美国 WHOI, Hydroid	美国 WHOI	美国 WHOI, NASA	俄罗斯 RUBIN	英国 NOC	法国 ECA	挪威 Kongsberg	冰岛 Gavia	加拿大 ISE
最大作业水深/m	6 000	11 000	11 000	12 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
重量/kg	862	2 800	250	5 700	2 000	3 000	2 200	1 000 ~ 1 200	620 ~ 1 700
续航/h	22	/	-	24	70	50	72	24	24 ~ 85
长度/m	3.8	5	1.7	5.7	5.5	4.5	6.6	5.5	4.5 ~ 7.5
直径/m	0.7	-	-	1.3	0.9	-	0.9	0.63	0.7
宽×高/m×m	-	2×1.5	1×1.3	-	-	1.6×1.2	-	-	-

REMUS 系列 AUV 是美国性能最先进、列装最多、应用最广泛的无人潜航器系列,采用模块化设计,能够搭载不同类型任务载荷完成多种使命任务,已大量出口英、日、澳等国。该系列 AUV 工作水深最大的型号为 REMUS 6000(图 1(a)),最大工作水深 6 000 m,由美国海军和 WHOI 联合研发、Hydroid 公司制造。该型 AUV 曾在 2010 年成功搜寻到法航 447 的发动机残骸。

WHOI 研制了自治遥控混合型无人潜水器(HROV)“海神”号(Nereus,图 1(b)),工作水深 11 000 m,2009 年在马里亚纳海沟完成了 10 902 m 水深下潜试验,是史上首台抵达海洋最深处的无人潜水器。2014 年,“海神”号在新西兰克马德克海沟 9 990 m 深度丢失。此后,WHOI 与美国航空航天局(NASA)合作研发了 Orpheus 级全海深 AUV(图 1(c)),2018 年建成 2 台。该 AUV 借鉴“立方体卫星”(CubeSat)理念,采用紧凑型、

模块化、低成本、集群作业设计,可以在海沟狭窄水域航行、着陆并能够集群作业,已应用于 HADDEX(Hadal Exploration Program)研究计划。

此外,美国还研制了 Sentry, MBARI, ABE, Odyssey, Puma, Jaguar 等 6 000 m 级 AUV。

#### 2) 俄罗斯。

前苏联在深海潜水器结构材料研发及制造等方面取得了突出成果,苏联解体后,相关技术对俄罗斯发展大深度 AUV 起到了支撑作用。俄罗斯研制了 MT-88、“大键琴”-2R-PM 等 6 000 m 级 AUV 以及“勇士”-D(Vitjaz-D,图 1(d))12 000 m 级 AUV。“勇士”-D 系统由自主下潜器、海底站和指挥控制设备等组成。其中,海底站通过缆索与母船连接,作为水下基站与下潜器实现双向水声通信。2020 年,“勇士”-D 在马里亚纳海沟成功下潜至 10 028 m,创造了无人深潜系统自主下潜的世界纪录。

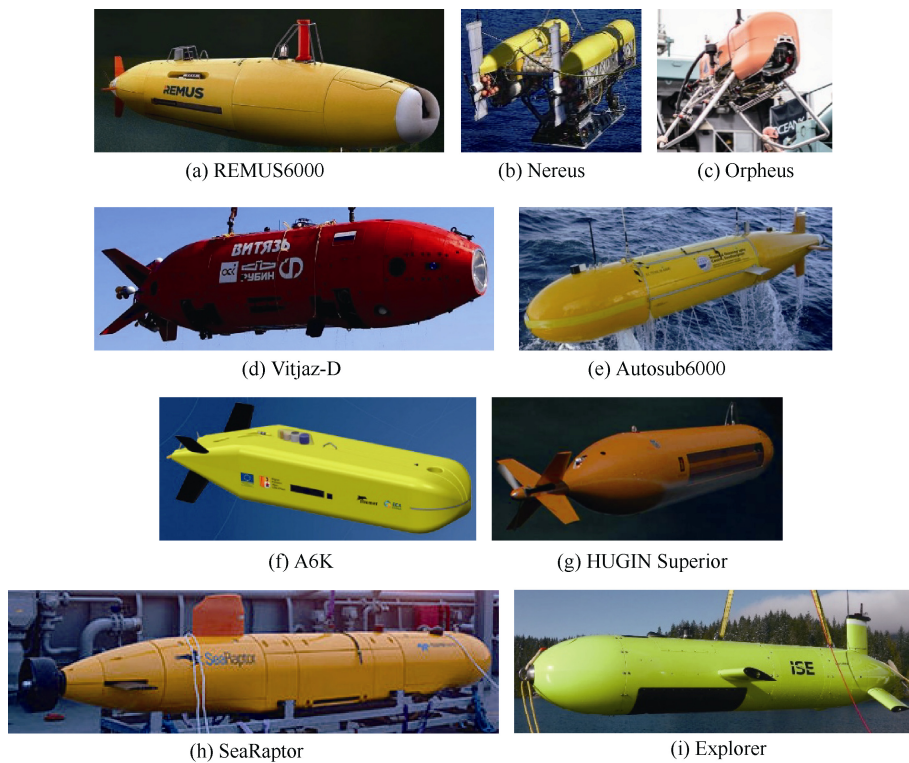


图 1 国外大深度 AUV/ARV

Fig. 1 Foreign deep-sea AUVs/ARVs

## 3) 英国。

英国南安普顿海洋研究中心 (NOC) 研制了 Autosub 系列 AUV。其中, Autosub 6000 (图 1(e)) 最大工作水深 6 000 m, 采用双叶螺旋桨设计, 曾多次在印度洋热液区、南北极冰下区等海域执行任务。该系列的最新型号为 Autosub LR, 通过融合水下滑翔机技术, 其重量仅为 Autosub 6000 的三分之一, 能够实现 6 000 km 的长航程以及 6 000 m 的大潜深。实现该性能的关键包括单叶螺旋桨减阻技术与低功耗技术等。另外, Autosub LR 比早期型号更加紧凑, 是 Autosub 系列中首型不需要布放和回收设备的 AUV。

## 4) 法国。

法国是 AUV 技术水平较高的国家之一, 第一台用于海洋地球物理调查的 AUV 就诞生在法国。法国研制的 Epaulard 型和 Nautilie 型 AUV 最大下潜深度均为 6 000 m, 完成了多次深海调查任务。ECA 公司研制了 A6K (图 1(f)) 6 000 m 级 AUV, 具有较强的续航及近底作业能力。

## 5) 挪威。

挪威 Kongsberg 公司研制了 HUGIN 系列 AUV。其中, HUGIN 6000 和 HUGIN Superior (图 1(g)) 均具备 6 000 m 水深作业能力。HUGIN Superior 是该系列的最新型号, 采用可热插拔的 62.5 kWh 锂聚合物电池, 比同尺寸的 HUGIN 6000 增加了 30% 的电池容量, 使 HUGIN Superior 能够搭载额外的任务载荷, 有助于提升其作业能力。另外, 通过采用先进的定位技术, 其导航性能优于其他同类 AUV。

## 6) 冰岛。

冰岛 Gavia 公司研制的 SeaRaptor (图 1(h)) AUV 最大工作水深 6 000 m, 具有模块化载荷接口。因其母公司 Teledyne 在海洋传感器领域居领先地位, SeaRaptor 集成了 Teledyne 旗下 RESON、Rd Instruments、BlueView 等子公司的众多高性能传感器, 也可按需定制其它传感器载荷。另外, SeaRaptor 的传感器、电池、数据存储器等均可现场快速更换, 有助于提升有效作业时间, 高效开展

深海调查、测绘、勘探、搜索等多种应用。

#### 7) 加拿大。

加拿大 ISE 公司研制的 Explorer (图 1(i)) AUV 采用模块化设计, 最大工作水深 6 000 m, 具有运维成本低、配置灵活和续航时间长等特点。该 AUV 曾在北极地区完成超过 10 D 的连续冰下作业, 实施了超过 1 000 km 的持续观测, 充电和数据传输也可在冰下完成。

### 1.2 国内研究现状

#### 1) 中国科学院沈阳自动化研究所。

20 世纪 90 年代起, 沈自所联合国内多家科研机构与俄罗斯共同研制了我国首台 6 000 m 级 AUV——CR-01 (图 2(a)), 随后在此技术基础上研制了 CR-02 (图 2(b))。“十二五”、“十三五”期间, 沈自所研制了潜龙系列 AUV。其中, 潜龙一号 (图 2(c)) 与其改进型潜龙四号 (图 2(d)) 均为 6 000 m 级 AUV, 已交付国家深海基地、大洋协会等应用单位。在 ARV 方面, 沈自所研制了问海 1 号 (图 2(e)) 6 000 m 级 ARV, 已交付中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 这是我国首台交付工程应用的 ARV。沈自所还研制了海斗号 (图 2(f)) 和海斗一号 (图 2(g)) 全海深 ARV, 填补了我国万米作业型无人潜水器的空白。海斗一号自 2020 年起多次开展万米深潜与科考应用, 最大下潜深度为 10 908 m, 刷新了我国潜水器下潜深度纪录, 全球首次实现了挑战者深渊西部凹陷区大范围、全覆盖巡航探测<sup>[4]</sup>。

#### 2) 哈尔滨工程大学。

哈尔滨工程大学研制了悟空号 (图 2(h)) 全海深 AUV, 2021 年实现 10 896 m 深潜, 刷新了俄罗斯“勇士”-D 创造的 10 028 m 的 AUV 潜深世

界纪录。悟空号在万米深海中与母船直线距离超过 15 km, 仍可准确传输状态信息至母船, 上行峰值通信速率达 2 003 bps, 数据包接收正确率超过 93%。

#### 3) 上海海洋大学。

上海海洋大学研制了彩虹鱼号 (图 2(i)) 全海深 ARV, 2016-2017 年在马里亚纳及新不列颠海域 5 000~11 000 m 深度的多条海沟开展了海试。该项目规划建设“深渊科学技术流动实验室”, 由 1 艘科考母船、1 台全海深 HOV、1 台全海深 UUV 和 3 台全海深着陆器组成。

#### 4) 上海交通大学。

上海交通大学研制了思源号 (图 2(j)) 全海深 ARV, 2021 年完成了深海试验, 最大下潜深度 8 072 m, 最长海底工作时间超过 8 h, 完成了海底探测和取样等多种测试。

#### 5) 青岛海洋科学与技术试点国家实验室。

海洋国家实验室海洋高端装备联合实验室(中船重工集团部分)研制了问海号 (图 2(k)) 全海深 AUV, 2021 年完成了万米级海试及试验性应用, 最大下潜深度 10 218 m, 最高航速 5 kn, 最长续航里程 40 n mile (2 kn 航速条件), 是目前国内航速最快、续航里程最长的全海深无人自主潜航器。

## 2 应用领域

#### 1) 深渊科学研究。

深渊是指水深大于 6 000 m 的海域, 虽然只占全球海底面积的 2%, 但是垂直深度占全海深的 45%, 在海洋科学研究中具有重要意义。深渊环境的特点是高压、低温、黑暗、地壳运动活跃、生态系统奇特。作为国际海洋科学研究的前沿, 深渊科

表 2 国内大深度 AUV/ARV 主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of domestic deep-sea AUVs/ARVs

型号	CR-01	CR-02	潜龙一号	海斗号	悟空号	问海号
研制机构	沈自所	沈自所	沈自所	沈自所	哈工程	海洋国家实验室
最大作业水深/m	6 000	6 000	6 000	11 000	11 000	11 000
重量/kg	1 305	640~1 850	1 500	260	1 300	2 500
续航/h	10	25	24	/	-	20
长度/m	4.4	4.5	4.6	0.9	1.7	6.7
直径/宽高/m	0.8*0.9	0.8	0.8	0.4*1.2	0.7*2.2	0.9*0.9

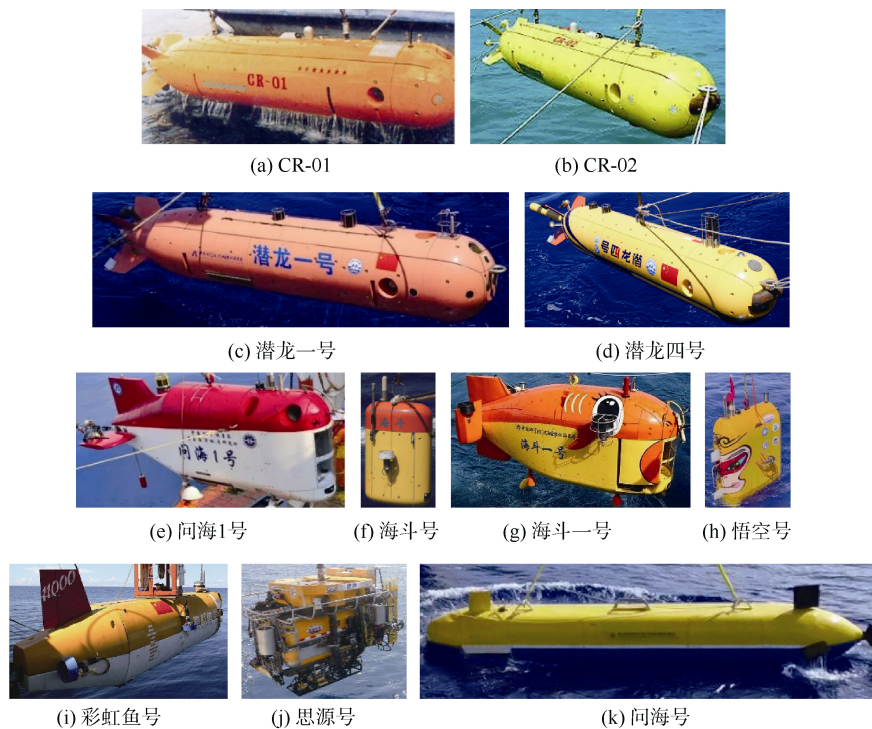


图 2 国内大深度 AUV/ARV  
Fig. 2 Domestic deep-sea AUVs/ARVs

学正逐渐形成深渊地质学、深渊水文学、深渊化学、深渊生物学、深渊微生物学和深渊生态学等各个分支科学。由于深渊的独特性和重要性,发达国家从 20 世纪中叶开始对深渊展开调查,实施了多项深渊科学研究计划,为未来开发利用深渊资源抢占先机。例如,美国开展了 HADES (Hadal Ecosystem Study)、HADEX 等研究计划并发展了 Orpheus 全海深 AUV 等探测装备,英国和日本联合开展了 HADEEP (Hadal Environment and Education Program) 深渊探测计划等。我国也瞄准深渊科学研究前沿,大力发展深渊科技,以提升我国在全球深渊科学领域的影响力。

## 2) 深海资源勘探开发。

随着人类社会的发展,陆地资源开发程度激增,资源匮乏矛盾凸显,各国纷纷将视线转向海洋。随着技术的进步,各国海洋资源开发进程持续加速,未来海洋资源勘探开发将逐步由浅海转向深海。除了常规油气资源,深海矿产资源还有多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、富稀土沉积物等多种类型,多分布在数千米水深的海底区域。另外,

天然气水合物也主要分布在数百至数千米水深区域。我国潜龙系列 AUV 用于多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、天然气水合物等多种深海资源勘查已累计下潜近百次。大深度无人潜航器在深海资源勘探、开发作业等领域将发挥重要作用。

## 3) 深远海水下搜救。

深远海水下搜救是大深度无人潜航器的重要应用方向之一。早在 1963 年,就有美国“阿尔文”号与“科夫”号无人潜水器协作搜寻、打捞西班牙海沟失落氢弹的成功案例。近年来,荷兰将 HUGIN AUV 用于马航 MH370 水下搜寻;美国军方也曾使用 Bluefin AUV 搜寻马航失联客机;REMUS AUV 成功搜寻到法航 447 的发动机残骸。大深度无人潜航器因其作业可靠、智能化程度高而成为深远海水下搜救的重要工具。

## 4) 深海地形测绘。

目前水下地形测绘主要依靠多波束测深系统。在浅海地形测绘任务中,船载多波束测深系统可获得高分辨率的水下地形数据,但在深水区域,受到水深影响,即便是开角较小的多波束也会因传播距

离的增加而导致其分辨率降低,无法获得高精度的水下地形数据。大深度无人潜航器能够抵近海底航行测绘,可以获得高精度的深海地形数据,是深海地形测绘的关键技术装备。

### 3 关键技术

大深度无人潜航器研制与应用是多学科交叉融合的复杂系统工程,需要重点突破总体设计与集成、深海结构与材料、高效能源动力、高速水下通信、组合定位导航、自主感知与控制等关键技术。

#### 1) 总体设计与集成技术。

大深度无人潜航器涉及的专业学科多达数十种,在总体设计方面需要加强协调,在满足总体技术要求的前提下,对各项技术指标予以统筹兼顾。另外,大深度无人潜航器要在深海环境以及有限的空间、能源等约束条件下集成搭载多种设备,对总体布局、电磁兼容、能耗控制和作业模式等提出了挑战。总体设计与集成的目标是既要实现无人潜航器低阻力和高效率的空间运动,又要保证能源、推进、控制、感知、通信、作业等模块高效工作。在无人潜航器总体设计与集成方面,需要根据任务需求,采用多学科设计优化(MDO)、建模仿真等手段,通过分析、优化、决策反复迭代,对无人潜航器的总体布局、流体外形、结构材料以及能源动力、作业载荷、通信、导航与控制模块等进行设计,提高空间利用率,降低系统重量,提升多任务能力,降低运维成本,利用有限的资源实现最佳的系统性能。

#### 2) 深海结构与材料技术。

大深度无人潜航器工作于深海恶劣环境,其结构与材料需满足耐高压/冲击、耐腐蚀、抗附着等要求。在结构方面,耐压壳体结构设计、仿真分析、密封以及制造工艺等技术是重要突破方向。在材料方面,金属结构材料实现了从钢到钛合金的转变,高分子材料和复合材料实现了耐压应用,结构功能一体化材料发展迅速。

耐压壳常规结构形式包括球形、圆柱形、椭球形、锥形、倒楔形及其组合形式等。目前,环形肋骨加强的耐压圆柱壳在无人潜航器中应用最为广

泛。结合球壳的最佳重排比与圆柱壳较高空间利用率的优点,发展出了藕节形耐压壳结构形式,球壳之间的连接方式是该结构设计的关键环节。另外,基于仿生学原理,还发展出了以鹅蛋壳为原型的蛋形及多蛋交接形耐压壳等新型结构形式。

传统无人潜航器结构材料以钢、钛等金属及其合金材料为主,钛及钛合金因具有较高的比强度和优异的耐腐蚀性能而应用广泛。考虑到结构减重需求,减重后兼具高强度、高韧性的钛合金成为无人潜航器研制的关键技术问题。在聚合物复合材料方面,纤维增强树脂基复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、提供静浮力等特性成为大深度轻量化耐压舱体的候选材料之一。在固体浮力材料方面,目前主要采用空心玻璃微球与树脂基材通过热固化成型制备。由于浮力材料在大深度无人潜航器中占比巨大,轻量化的固体浮力材料是重要的突破方向。在密封材料方面,深海耐压结构主要采用橡胶密封,存在长期使用老化、温度适应性差和易磨损等隐患,近年来,具有低模超弹、可形状自回复、耐腐蚀、耐磨损特征的钛镍形状记忆合金成为备受关注的新型类橡胶金属密封材料<sup>[5]</sup>。另外,深海润滑材料、减阻材料、声隐身材料及抗腐蚀涂层等也是重要的突破方向。

#### 3) 高效能源动力技术。

大深度无人潜航器需要在深海长时间作业,对能源动力提出了较高要求,需要满足能源密度高、安全性好、易于维护、成本低、能够承受深海水压等条件,因此,高效能源动力技术是无人潜航器技术的重要突破方向,具体包括锂离子电池、燃料电池、小型核能装置以及水下能源补给等。

锂离子电池能量密度约为 160 Wh/kg,具有电动势高、循环使用寿命长等优点,是无人潜航器普遍采用的水下能源,但易形成枝晶,引起短路、着火、爆炸,存在一定安全隐患。锂聚合物电池可以避免锂离子电池不正确充放电导致能量蓄积引发爆炸燃烧情况的发生,且电芯可以塑造成不同形状,也是无人潜航器主流电池类型之一。各国正在研发锂离子电池的替代品,目前锂硫电池能量密度已达 450 Wh/kg,锂-空气电池也在研制过程中。

美国海军正在开发大容量、高功率密度的燃料电池技术,其制定的中远期 UUV 动力系统功率密度发展目标达 500 Wh/kg。Fuel Cell Energy 公司、General Atomics 公司和 Infinity 公司等参与了该技术研究,这些公司采用了多种技术路线,包括质子交换膜、固态氧化物、金属燃料等燃料电池类型,以及甲醇、JP-10 燃油、铝水反应等制氢方式。挪威国防研究机构 FFI (Forsvarets Forsknings Institutt) 也设计了基于质子交换膜燃料电池的长航时 AUV 燃料电池方案,其比能量达 260~400 Wh/kg<sup>[6]</sup>。

小型核动力装置因水下续航长、隐蔽性好、可达航速高等特点受到重视,美、英等国潜艇已实现全核化。美、俄、韩等国大力发展小型压水堆,单堆热输出功率数百兆瓦至一千兆瓦。小型核能装置在无人潜航器上具有良好的应用前景,例如美国 NASA 已研制出迷你反应炉,日本开发了小型潜水器反应堆 SCR 等。

在功耗控制方面,由于各任务模块需在能源受限的情况下共用系统电力,这就要求各任务模块严格控制功耗,通过元器件高度集成和各模块工作模式的优化,在满足任务需求的条件下,降低作业功耗,增加可执行任务时间。

在推进方式方面,无舵化矢量推进已成为重要的发展趋势。传统 AUV 多采用螺旋桨推进、桨舵协同姿态控制方式。导管螺旋桨推进装置能够提高推进效率、降低噪声,在军用潜航器上应用较多。喷水推进器推进效率高于螺旋桨,但存在结构复杂、成本高昂等缺点,在矢量推进领域有所应用。

另外,通过水下充电提供能源补给,利用温差能等可再生能源补给,柴电混合动力,以及通过与水下滑翔机技术融合降低推进能耗等技术也将得到更多研究和应用<sup>[7]</sup>。

#### 4) 高速水下通信技术。

目前,水声通信是无人潜航器主要的通信手段。由于水声信道受到多途效应影响严重、频率信道选择性衰落、可用频带资源有限、误码率高等因素限制,致使其通信距离和速率的提升空间有限,而蓝绿激光、中微子等新型通信技术正在快速发展。在跨介质隐蔽通信方面,利用中继浮标/潜标/

海底基站建立数据链路实现跨介质通信是目前最成熟的手段,甚低频/超低频 (VLF/SLF) 无线电通信、激光致声等隐蔽性更高的通信手段也是各国竞相发展的重要方向<sup>[8]</sup>。

高速水声通信技术已由非相干通信向相干通信发展。正交频分复用 (OFDM) 通信技术已应用于水声高速数据通信系统中,取得了较大的数据速率与通信距离积,其他技术如多人多出 (MIMO) 和时反水声通信技术等也在不断发展和完善。

蓝绿激光通信在海水中的穿透距离可达 300 m,通信稳定,信息容量大,抗干扰能力强,缺点是通信前要进行精确对准。美国海军通过试验证实了蓝绿激光通信能够在几乎全天候气象和海洋条件下高速传输数据。DARPA 认为蓝绿激光通信各项关键技术已经足以应用于实际军事系统。

中微子穿透能力强,在海水中的衰减小,可以使无人潜航器在深水中不间断地实时传输信息,信道稳定,传输信息容量大。美国实施了以中微子为载体的通信试验,结果表明,必须借助类似大功率粒子加速器这样的大型设备才能进行中微子通信,技术要求复杂,离实际应用还有相当的距离。

利用浮标/潜标/海底基站等作为中继通信节点可以使无人潜航器无需上浮便能与岸基进行跨介质隐蔽通信。除了预先布设的中继节点,无人潜航器自身也可携带中继通信浮标载荷,例如洛克希德·马丁公司的深海快速通信系统 (CSD) 即以此方式实现了水下与陆空的双向通信。未来中继通信浮标将向大深度、小型化、双向双工等方向发展,功能也将由单一的中继通信向导航、探测等多功能一体化方向发展。

甚低频/超低频无线电通信作为传统的跨介质通信手段,可以穿透到水下 100 m 左右。该技术的缺点是岸站生存能力差、传输频带窄、隐蔽性差,冷战后逐渐退出使用,但相关技术研究并未停止。例如,美国高频主动极光研究项目 (HAARP) 能够激活大气层中的电离层作为天线产生极端低频波束穿透海水传输信息。

基于激光致声原理,从空中向水中发射带信息编码的激光信号,在水中转换为声信号,无人潜航

器接收该声信号并恢复编码信息,可以实现空中到水下的激光致声通信。利用该技术,在深远海环境下,空中节点与无人潜航器之间能够建立可靠的通信网络。激光致声通信机动性强、隐蔽性高,已经成为各海洋强国竞相发展的新兴技术。

#### 5) 组合定位导航技术。

目前水下定位导航面临环境复杂、信息源缺乏的局面,发展高精度、高可靠性的定位导航技术是大深度无人潜航器研制的关键环节,具体包括深海环境下组合定位导航、海底高精度定位、海底地形匹配定位导航、重力场与地磁场定位导航等<sup>[9]</sup>。

无人潜航器普遍采用惯性导航装置与多普勒计程仪组合的方式进行导航,由于大深度无人潜航器难以频繁浮出水面进行校准,国外一些机构采用其它设备辅助定位的方式,例如挪威 HUGIN 系列 AUV 通过采用惯导及计程仪利用水下超短基线定位装置进行辅助定位的组合导航,提升了导航精度。

随着深海惯性导航装备技术的发展,使得大深度无人潜航器的导航定位精度持续提升,有望不依赖辅助设备便可达到较高的导航精度。

目前发展最快的水下导航技术是多传感器配置、多信息融合的组合导航技术,以惯导/计程仪导航为核心,配置多种传感器加以辅助,如全球定位系统(GPS)、长基线/超短基线声学导航、水下定位应答(UTP)、地球物理信息导航等。针对不同应用场景,水下导航系统配置可灵活变换,以满足不同任务需求。

#### 6) 自主感知与控制技术。

无人潜航器在航行与作业过程中无须人工实时控制,能够根据自身状态及外部环境自主做出决策。由于大深度 AUV 与母船通信不便,其自主作业能力的重要性更加凸显。无人潜航器自主感知与控制技术包括自主感知、自主航行控制、自主路径规划、自主对接与回收、集群协同等技术。

自主感知技术是指无人潜航器通过传感器采集数据,对多传感器信息进行融合处理,获取环境及目标信息,支撑态势评估、行为决策和作业规划,实现基于任务目标的智能信息感知与融合处理等。

自主航行控制是指无人潜航器具备适应海洋环境而自主控制运动的能力。例如根据海水密度或海流等外界环境参数,无人潜航器自主调整航行控制参数,实现高效航行;根据海底地形起伏,无人潜航器自主控制距底高度,实现海底地形测绘等。

自主路径规划技术是指无人潜航器能够根据任务需求、海洋环境、运动约束、通信约束等约束条件,自主规划出最优航迹航路,以规避障碍或危险区域、节约能源、高效完成任务等。

自主对接与回收技术是指无人潜航器在水面/水下对接机构支持下,实现自主导引对接、能源补给、数据交换和装备回收等。导引方式包括声、光、电磁等多种;能量与数据传输可通过有线、无线等方式实现;对接回收机构包括平台式、箱(笼)式、导向罩式、鱼雷管式等多种类型。

集群协同技术是指在作业集群中无人潜航器及其它作业装备具备信息共享能力、任务规划能力、协同导航能力、协同作业能力,实现集群协同作业。各种水下装备协同作业能够打破单一装备作业效率有限的制约,是执行水下复杂任务的有效方式。

## 4 发展趋势

### 1) 深海远程长续航。

随着能源、导航等技术的进步,发展、改进及应用全海深、长航程无人潜航器已成为各海洋科技强国的目标。多国正在研究燃料电池、小型核能装置等体积小、能量密度高的能源,结合推进与减阻等技术,可显著提升无人潜航器续航力。适应深海应用场景的组合导航技术正获得重点发展,通过高效率、高精度水下导航来支撑无人潜航器深远海作业。

### 2) 模块化标准化。

大深度无人潜航器通常搭载多种类型的探测及作业设备,以应对不同的任务需求,但这也增加了无人潜航器本身的负载,降低了作业效率。通过软硬件模块化设计,可以实现面向不同需求的快速配置变更,同时减轻无人潜航器自身重量及体积,提高作业效率。通过标准化通用化设计,能够提升系统应用的灵活性并降低运维成本。



### 3) 智能集群协同。

由于单一无人潜航器的作业效能有限,通过搭载无人机、中继浮标、小型 AUV 等任务载荷,以及与其它类型装备构建智能集群,通过多种类型装备有机结合、异构集群协同作业,能够提升作业效率,已经成为重要的发展趋势。随着物联网、云计算和大数据等技术的发展,大深度无人潜航器作为海洋物联网的关键节点将发挥重要作用。

## 5 结束语

2016年习近平总书记指出,“深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏,但要得到这些宝藏,就必须在深海进入、深海探测、深海开发方面掌握关键技术”,为我国深海装备技术发展指明了方向。无人潜航器在深渊科研、工程、军事等领域具有巨大的发展潜力与广阔的应用前景。可以预见,随着相关技术的进步,作业范围更广、续航能力更强、智能化程度更高、多种功能集于一体的大深度无人潜航器将得到快速发展。目前,部分国家错误地视我国崛起为其挑战,对我国实施技术封锁,包括无人潜航器在内的多种设备都对我国禁售。面对这种国际环境,我国发展大深度无人潜航器技术只能走自主创新的道路。聚焦我国重大战略需求,开展大深度无人潜航器及相关技术研究,推动深海观测技

术、装备和产业发展,对于支撑海洋强国建设具有重要意义。

## 参考文献

- [1] WHOI. Hadal zone[EB/OL]. [2022-03-03]. <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/ocean-topics/how-the-ocean-works/ocean-zones/hadal-zone/>.
- [2] 秦洪德, 孙延超. AUV 关键技术与发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(12): 25-28.
- [3] 胡庆玉, 舒国平, 冯朝. 深海 AUV 发展趋势研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(1): 77-80.
- [4] 李硕, 吴园涛, 李琛, 等. 水下机器人应用及展望[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 910-920.
- [5] 杨锐, 马英杰, 程世婧. 海洋观测探测平台关键材料发展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 881-887.
- [6] 方红伟, 李紫嫣. 自主水下航行器能源系统技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(8): 18-26.
- [7] 曹红梅, 胡光兰, 李晓东. 国外无人潜航器能源技术发展现状与趋势研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 361-368.
- [8] 楚立鹏, 鄢宏华, 范强, 等. 国外水下无人潜航器及其通信技术发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(2): 112-118.
- [9] 吴有生, 司马灿, 朱忠, 等. 海洋装备技术的重点发展方向[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 20-35.

(责任编辑: 张曼莉)