

【引用格式】张亚军. 大型 AUV 及其水面侦察技术浅析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6 (4): 406-412

# 大型 AUV 及其水面侦察技术浅析

张亚军<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. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

**摘要** 传统的自主水下无人航行器 (AUV) 主要执行包括军事活动在内的水下情报收集、环境监测和 underwater target detection and disposal 等。近年来随着信息化技术和人工智能的发展, AUV 行业受到各界尤其是各国军方越来越多的关注, 得到了快速发展和广泛应用。作为一种无人侦察平台, AUV 逐渐突破了常规尺度, 向大型化和超大型化方向发展, 可搭载的载荷类型和尺度有了明显的变化和提升。通过分析大型 AUV 作为侦察型装备的国内外发展现状, 对利用大型 AUV 开展水面侦察的能力建设进行了分析, 重点提出了大型 AUV 搭载水面侦察载荷需要解决的关键技术, 为进一步提升和拓展 AUV 作战能力和作战领域提供支持。

**关键词** 水下无人航行器; 水面侦察; 电磁侦察; 光学侦察; 雷达侦察

**中图分类号** TP391

**文献标识码** A

**文章编号** 2096-5753(2023)04-0406-07

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.04.002

## Analysis of Large AUVs and Surface Reconnaissance Technology

ZHANG Yajun<sup>1, 2</sup>

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;  
2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

**Abstract** Traditional autonomous underwater vehicles (AUV) are mainly used to perform underwater intelligence collection, environmental monitoring, and underwater target detection and disposal, including military activities. In recent years, with the development of information technology and artificial intelligence, AUV industry has received increasing attention from various sectors, especially from the military of various countries, and has been rapidly developed and widely used. As an unmanned reconnaissance platform, AUVs have gradually broken through the conventional scale and developed towards large and extra-large types. The types and scales of payloads that can be carried have been significantly changed and improved. In this article, the current development status of large AUVs as reconnaissance equipment at home and abroad is introduced, then the ability construction of using large AUVs for surface reconnaissance is analyzed. After that, the development trend and key technologies that need to be addressed for carrying surface reconnaissance payloads on large AUVs are highlighted. It provides support for further enhancing and expanding AUV combat capabilities and fields.

**Key words** unmanned underwater vehicle; surface reconnaissance; electromagnetic reconnaissance; optical reconnaissance; radar reconnaissance

## 0 引言

自主水下无人航行器 (Autonomous Under-water Vehicle, AUV) 是一种自带能源, 通过融合多种探测传感器, 依靠高精度导航控制、自主避碰、目

标识别等技术, 通过预置指令或接收遥控指令, 在指定的水域开展目标隐蔽侦察或情报收集, 一旦暴露或战损, 由于不存在人员伤亡, 经济损失也较小, 适合执行各种高风险任务。1996 年美国国家研究委员会将 AUV 列为重大项目, 为 AUV 赋予了更

多的使命。2000 年美国海军提出了 2030 年前 AUV 的发展规划,明确了包含情报/监视/侦察 (ISR) 在内的 9 项使命任务。2005 年美海军发布的《无人水下航行器总体规划》中规定,将 AUV 执行 ISR 作为最优先的任务<sup>[1]</sup>。目前投入使用的 AUV 大部分以侦察、探测为主,根据目标所处的空间位置,将 AUV 搭载的侦察传感器类型分为水面和水下,提供的情报类型包括图像情报、信号情报、测量和特征情报<sup>[2]</sup>。传统的 AUV 利用声学设备以水下探测为主,随着 AUV 向大型化和多用途方向发展,AUV 功能和应用领域得到不断拓展,侦察的方向逐步向水面和空中延伸,搭载的侦察载荷由传统的声学向光电、电磁等传感器方向发展。

近年来为提高 AUV 的装载能力和作战能力,各国都积极开展大型 AUV 的研发<sup>[3]</sup>。其中美国在此领域的发展最为迅速,尤其是在 2016 年修改了对大型 AUV 的采购方案,加强了对大型 AUV 的研究和试验验证。其他国家如俄、英、意、伊朗等国也开展了大型 AUV 原理样机以及相关载荷的研制。这些大型 AUV 在重量和尺度上均突破了以往常规 AUV 的标准,装载的载荷更多,担负的使命也更加多样化,大部分大型 AUV 均搭载了水面侦察载荷如光电侦察设备、电磁侦察设备,实施对水面、空中等目标的侦察。

## 1 国内外大型 AUV 及搭载水上侦察载荷现状

### 1.1 美国大型 AUV 发展现状

在 2016 年美海军的《2025 年 AUV 需求》中,将 AUV 根据口径大致分为 4 个等级,分别为小型、中型、大型和超大型<sup>[4-5]</sup>,并提出要加强对大型 UUV 的使用,尤其强调对所研制的“曼塔”(Manta)和“创新型海军原理样机”等大型 UUV 的快速利用<sup>[6]</sup>。2018 年,美公开的《无人系统综合路线图 2017-2042》中指出为适应未来海上联合作战需求,无人系统应聚集全域作战,相关技术应支持跨域指控<sup>[2]</sup>。2016 年,美海军在美国海上力量网站上公布了未来几年开发和用于试验的大型 AUV 的细节和采购数量,同年对大型 AUV 进行了测试。2017 年,在美发布的《恢复美国海权》报告中,要求海军未来装备大型与智能型 AUV,将其作为一种多任务、

多功能,并携带多种有效载荷的水下作战平台<sup>[6]</sup>。

美国有多型在研在役的 UUV,覆盖各种排水量和动力类型,其中重型 AUV 中,已经服役的有 3 型,还有多型处于研究阶段。在大型 UUV 中,目前多型在研,近期即将服役的是 LDUUV,其余均在论证中<sup>[7-8]</sup>。在整个大型 AUV 的研发过程中,美先后提出了多项大型 AUV 计划,包括在 2002 年完成样机研制的“曼塔计划”、目前在研的“水螅计划”和“爪子计划”,其中最具代表的典型大型 AUV 装备有“曼塔”“回声旅行者”“虎鲸”和“黑鱼”等。

#### 1) “曼塔”大型 AUV。

美国海军水下战中心研制的航行器被命名为“曼塔”(Manta),外形类似“魔鬼鱼”的无人潜航器,其中一种长度为 25 m,有效载荷 14 t。该 AUV 装备有模块化的传感器系统及武器系统,可通过水声、无线电、光电搜索任务,执行情报搜集和监视敌方动态,并将信息发回母艇,搜索跟踪目标并在适当的时机打击敌方目标。

在“曼塔”上搭载的水面侦察载荷包括安装于通气管的情报监视侦察载荷,该侦察载荷利用红外摄像机和视频摄像机、雷达信号接收设备进行目标侦察。在 2001 年对“曼塔”I 型进行了携带有效载荷包括热成像仪、雷达侦听接收机等试验。

#### 2) “海马”大型 AUV。

“海马”(Sea Horse)大型航行器是基于核潜艇携带与使用为主导的,长度 8.69 m,直径 0.97 m,最大工作潜深 300 m,空气中重量 5 000 kg,最大潜深 300 m,排水量 4.5 t,任务距离 1 000 km,于 2016 年开展了相关试验。

该 AUV 具备任务可重构能力,可用于水面与水下情报侦察,反水雷和探潜等任务。

#### 3) “黑鱼”超大型 AUV。

以“黑鱼”(Black Fish)命名的超大型 AUV 是基于“海马”原型上重新设计研制的。

该型 AUV 重点通过安装有效的侦察载荷,包括电子战、反潜战及反水面战等的有效载荷,开展情报/监视/侦察 (ISR) 任务和扩展空间作战,美海军核潜艇可携带“黑鱼”来拓展其作战范围。



图1 “黑鱼”超大型 AUV  
Fig. 1 Black Fish XL UUV

#### 4) “回声旅行者”超大型 UUV。

波音公司研发的“回声旅行者”(Echo Voyager)超大型 UUV, 于 2017 年完成海试。AUV 长约 15.5 m, 重约 50 t, 载荷重约 8 t, 潜深达 3 000 m 以上, 可加载长 10.36 m 的模块负载舱。该 AUV 可用于海底大面积监视、投送武器或反水雷, 也可用于执行水面情报/监视/侦察。在 AUV 顶部装有一个可折叠桅杆, 桅杆上集成了自动识别海上船只的自适应信息系统, 当 UUV 浸没水下时, 桅杆放倒与 UUV 外壳共形; 当浮至水面时, 桅杆升至 4.8 m, 并有约 2.4 m 露出水面。如图 2 可看出 AUV 在近水面时桅杆升起在水面侦察时的状态<sup>[5]</sup>。



图2 “回声旅行者”超大型 AUV  
Fig. 2 Echo Voyager XL UUV

#### 5) “虎鲸”超大型 UUV。

波音公司竞标成功的重型 UUV 被美海军命名为“虎鲸”(Orca)<sup>[9]</sup>, 该超大型 UUV 是在“回声旅行者”基础上研发的, 在外形上像加长版的“回声旅行者”。基本型长度 32 m, 重 80 t, 是可灵活装配有效载荷的多用途 AUV, 在甲板后部布置有可折倒式桅杆装置, 桅杆竖起高度为 4 m, 在艏部加装一个长约 10 m 的有效载荷舱段, 可搭载包括重型鱼雷、水雷等载荷。“虎鲸”服役后, 可用于执行隐蔽布放水雷、水下目标侦察以及在水面对时舰队、海岸线等的电磁信号实施侦察<sup>[10-11]</sup>。

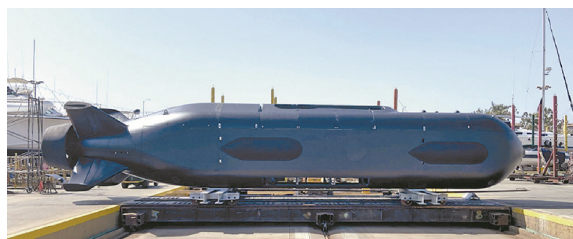


图3 “虎鲸”超大型 AUV  
Fig. 3 Orca XL UUV

#### 1.2 俄罗斯“大键琴”重型 AUV

俄罗斯由于所处地理位置决定了其在海上军事地位的被动性, 所以投入了大量资金研发海上作战装备, 验证了多款超大型 AUV, 包括“大键琴”系列重型 AUV<sup>[12]</sup>。该 AUV 包含“大键琴”1R 及其改进型“大键琴”2R-PM 2 个型号, 其中“大键琴”1R 已在海军使用<sup>[13]</sup>。与“大键琴 1R”的外观相比, “大键琴”2R 的最大区别是在背部有小的隆起结构<sup>[10]</sup>。该系列 UUV 长度约 7 m, 重量约 4 t,

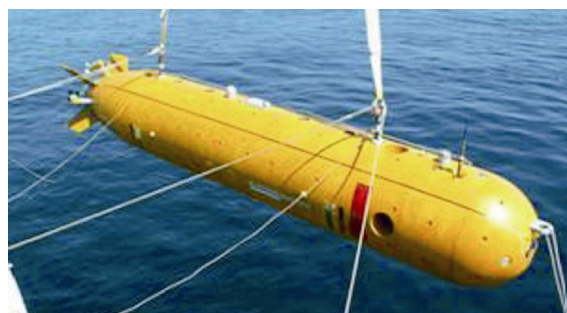


图4 “大键琴”重型 AUV  
Fig. 4 Harpsichord XL UUV

可由水面舰艇或潜艇携带。该 AUV 配置有侧扫声呐、电磁传感器和摄像机等多种传感设备,可执行情报/监视/侦察 (ISR)、海底成像、海底扫描、海洋科考等军民任务<sup>[10, 13-14]</sup>,于 2016 年完成了水池试验,并进行了下潜试验。2018 年,俄海军开始对第二代重型 UUV “大键琴”进行海试。

### 1.3 法国超大型无人潜航器

法国 AUSS (Autonomous Underwater & Surface System), 主要用于执行反潜、反水雷等战术任务。AUSS 搭载多种传感器,可搜集声学、视觉和无线电信号,艏部布置一个可伸缩式天线装置,必要时, AUSS 可上浮至近水面并调整尾倾至 90°, 将天线伸出水面,与卫星或其他水面平台进行数据传输和通信<sup>[15]</sup>。



图 5 法国超大型 AUV  
Fig. 5 XL UUV of Franc

### 1.4 伊朗研制的大型 AUV

伊朗海军研制的大型 AUV 是基于伊朗现有的“加迪尔”(Ghadir)级小型潜艇,进行无人化改造而成的,该 UUV 采用无指挥台围壳、单轴单桨,回转体布局,在 UUV 艏部布置高频前视避碰声呐,在 UUV 上层建筑内布置有可折倒的无线电天线及光学潜望镜,上层后部还布置有可收放式浮标,用于通信及导航<sup>[6, 16]</sup>。

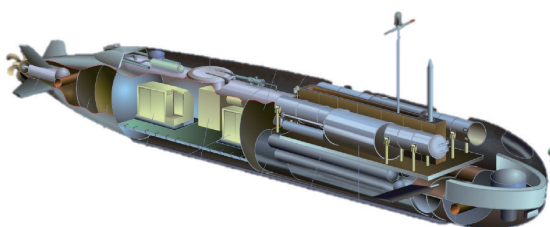


图 6 伊朗研发的大型 AUV  
Fig. 6 Iranian large UUV

### 1.5 意大利 MGI20/ER 大型 UUV

意大利研发的 MGI20/ER 大型 UUV 采用非金属材料作为壳体,以降低噪声和防腐蚀性,可携带 8 名作战蛙人,而且其搭载有六角形天线,也携带了能 360° 侦测敌方的雷达波,发出早期警报<sup>[5]</sup>。

### 1.6 印度大型 AUV 项目

2023 年 3 月,印度国防部也启动了开发超大型 AUV 的项目,据介绍,当超大型 AUV 通过试验后,印度海军将采购多达 12 艘的超大型 AUV<sup>[18]</sup>。该 AUV 有效载荷长度将达 50 m,宽度将达 5 m。在桅杆上安装 L 波段雷达和摄像机,可用于情报/监视/侦察,反潜和反水面战等。

### 1.7 国内大型 AUV 及其水上侦察技术现状

国内在大型 AUV 上开展了多项关键技术突破和装备研究。2019 年公开展示的 2 艘国产 HSU-001 大排水量无人潜航器,长约 5 m、直径 1 m。扁平的头部安装有大型声呐,可执行侦察、海底地形勘测等探测任务。背部搭载有 2 部桅杆,在桅杆上安装了光学和电磁信号侦察的传感器,可执行水上目标的侦察和情报搜集。桅杆在不使用时,可向下折叠成流线型船体<sup>[18-19]</sup>。



图 7 HSU-001 大排量无人潜航器  
Fig. 7 HSU-001 LDUUV

## 2 基于大型 AUV 的水上侦察能力分析

目前 AUV 大多只能执行单项任务,成本高昂,效费比高,因此美国海军提出了“任务可重组无人航行器”(MRUUV)发展规划,这种 UUV 能够携带多种有效载荷,用于执行 ISR、水雷侦察等任务<sup>[20]</sup>。随着人工智能和电子技术的发展, UUV 的任务负载系统可根据不同的使命任务而配备,通过配备声学、电子或光学设备开展相应的侦察



任务<sup>[7]</sup>。美海军在《2025年AUV需求》中提到,在2025年AUV所有能执行的行动预测中,大型AUV要通过利用光学、电磁、声学进行情报/监视/侦察和电磁机动战<sup>[4]</sup>。

通过对国内外目前已公开的多型大型AUV及其主要功能的分析,大部分AUV都通过在桅杆上安装有水面侦察载荷,基本具备了水面侦察的能力,实现了大型AUV对水下、水面、岸基和空中目标侦察、监视的能力,可提供的情报类型包括通信信号、雷达信号、声学等信号。美军设想利用AUV进入接近敌方的通信塔的敏感海域进行通信侦听,以达到获得通信情报的目的<sup>[2]</sup>。美海军认为未来可通过UUV完成重要的声场、光电和电磁等数据收集任务,将补充和扩展现有的情报/监视/侦察能力<sup>[3]</sup>。所以说在大型AUV上装备图像侦察设备、电磁信号侦察设备和雷达等,使其在水面上具备光电侦察、电子信号侦察和雷达侦察能力,可有效延伸AUV的作战范围,大幅提升AUV在作战体系中的贡献率,实现AUV的跨域作战。

大型AUV搭载水面侦察载荷的类型、性能指标与其需侦察监视的区域和范围、目标类型和特性有关。基于大型AUV水面侦察的范围可分为水面、岸基或空中,其中水面目标类型包括舰船、渔船等,岸基目标主要包括安装在岸基的设施、停靠岸基的船只等,空中目标包括如反潜机、反潜巡逻机、无人机等,可根据作战任务搭载一种或几种水面侦察载荷。

### 2.1 基于大型AUV的水面光电侦察能力

国外军用大型AUV为满足情报、监视、反潜战等需求,搭载在AUV上的光电探测设备发展方向为水面光电侦察设备的智能化<sup>[22]</sup>。AUV光电探测设备包括水面光电侦察设备和水下电视等,其中水面侦察设备在UUV上浮水面后开展侦察工作,可对大中型水面舰船、空中目标和海岸目标进行昼夜侦察与识别<sup>[21]</sup>,具有被动工作、隐蔽性好、信息直观、分辨率高的特点,可实现全天候,大范围的目标获取。

AUV水面光电侦察能力特指搭载适装于AUV平台的光电侦察载荷,当AUV在水面或近水面航

行或漂浮时,可直观获取水面、岸基、空中的目标及相关场景图像信息,并从复杂的背景中发现和识别目标、估算目标参数和跟踪目标。但由于受海浪、AUV姿态、航行状态、水雾等的影响,AUV水面光电图像质量较差,为了提高AUV获取的水面图像质量,可通过对图像去雾、增强、融合等方法,使图像成像效果和纹理信息更清楚,目标效果更理想<sup>[23]</sup>。

### 2.2 大型AUV电子信号侦察能力

大型AUV电子信号侦察能力是指通过在AUV上搭载电磁侦察设备对雷达、无线电通信设备等发射的电磁信号获取和处理的能力,通过将目标的微弱电磁信号收集起来,经过放大、信号处理,提取出信号的技术参数、通信内容、所在位置等情报信息特征。由于不主动发射电磁波,只接收目标辐射源发出的电磁波属于无源工作,具有隐蔽性好的特点。

AUV上搭载电子信号侦察载荷主要包括雷达信号侦察和无线电通信信号侦察。

目前还没有相关文献对大型AUV的电磁侦察能力和技术进行公开的、详细的介绍。

### 2.3 大型AUV雷达侦察能力

AUV雷达侦察能力是指在AUV上搭载专门的小型化雷达,通过自身发射强大的电磁波,对岸基、水面、空中的目标进行侦察,从而发现目标,由于雷达侦察需要发射电磁波,工作时会暴露自身。雷达一般体积、功耗较大,目前还没有在AUV上搭载雷达进行侦察的研究和应用。

## 3 基于大型AUV的水上侦察关键技术分析

军事需求和战略决策是武器装备发展的依据,分析几年来国内外AUV的发展,无一不说明AUV已经成为水下战场的重要力量。美海军学会网站2016年刊发的《2025年AUV需求》中提出AUV的作战能力主要取决于以下4个主要特征:续航能力,有效载荷,自主性,指挥、控制及通信<sup>[4, 17]</sup>。AUV要突破常规战场,提升作战能力,关键因素是其作为武器平台,可搭载的载荷能力以及载荷技术的发展和运用,所以说大型化、综合化、任务多功能化将是未来大型AUV发展的方向<sup>[10]</sup>。

由于 AUV 可承载的重量和体积、功耗有限,同时作为无人系统,其控制和处理均来自设定软件,智能化程度还较低,无法像有人装备那样实时进行修正。同时,作为水下作业的主力军,AUV 在水面侦察时,由于空间、高度、水面航行姿态等将会影响侦察效果,所以如何实现大型 AUV 水面侦察载荷功能的最大化,确保侦察有效,还需开展以下几方面技术的研究。

#### 1) 水面侦察载荷小型化总体集成技术研究。

目前舰船搭载的水面侦察载荷的尺度、重量、功耗、散热、耐压均不符合 AUV 搭载要求,为了提高作战效能和满足多任务和多功能化要求,对于 AUV 搭载的水面侦察载荷需在功能和性能满足要求的前提下,从电磁兼容、结构和散热设计、安装方式、桅杆收放、小型化、空间优化等方面开展相关技术研究。

#### 2) 面对复杂任务的智能控制及应急处理技术。

AUV 能够长时间自主独立行动是其执行情报/监视/侦察等任务的前提,但目前 AUV 基本处于初级智能阶段<sup>[20]</sup>。为了实现隐蔽的水面侦察,AUV 应尽可能减少与母船或岸基指挥中心的联系,自主开展和完成侦察任务。因此,需要开展复杂环境下 AUV 自主侦察任务的智能控制技术和应急处理技术研究,提高其智能化程度和自适应能力,以降低人不在回路时 AUV 的风险,提高 AUV 的安全性和可靠性。

#### 3) 高比能量能源技术。

动力系统决定了大型 AUV 的续航力和载荷能力,目前常规的 AUV 动力采用锂离子电池,但其比能量相对较低,急需一种高比能、高可靠、低成本、快速充电、环境适应能力强、具有一定的功率特性的能源技术,以提高大型 AUV 的航程和执行任务的能力。

现在研究较多的有燃料电池、半燃料电池、混合电池。其中燃料电池的优点是效率高、噪声低、可扩展性好,为大型 AUV 最佳的动力源之一,各国研究机构已在大力发展大容量、高功率密度的燃料电池技术<sup>[24]</sup>。美海军在建造大型 AUV 时,动力来源也优先考虑燃料电池<sup>[25]</sup>。燃料电池最大的问题

是如何提高储氢和供氢材料及装置的质量比,且燃料制备、储运还不成熟,成本也较高,这些都是急需解决的问题。

#### 4) 多源侦察系统的协同探测技术。

从智能化侦察和多功能化要求出发,AUV 上配备多传感器是必然趋势。大型 AUV 通过电磁、可见光、红外等多种传感器侦察、跟踪和识别目标。由于不同的传感器系统性能指标和处理速度不同,探测到的目标形式多样化,探测距离和目标特征信息也不同,均已超出了以往综合信息处理的能力,所以需开展大型 AUV 复合探测系统下的多源协同探测和信息处理技术研究。

## 4 结束语

AUV 是一种在潜航状态中到达预定位置,通过预置指令或接收遥控指令,进行隐蔽侦察和情报收集。随着 AUV 向大型化和多用途方向发展,不仅可充分发挥 AUV 作为无人平台的隐蔽性高、机动性强、部署成本低的特点,同时由于具备了长续航力、较强的载荷能力,在未来的海战中将发挥更大的作用。

美国、俄罗斯、法国等都开展了大型 AUV 样机的研究和试验。虽然目前对大部分大型 AUV 均处于试验阶段,在役的较少,但随着大型 AUV 动力与能源的突破,水面侦察载荷技术以及水面多源侦察协同技术的发展,在未来实现大型 AUV 对水下、水面和空中目标立体化的侦察、监测和探测,构建水面、水下立体化情报监视侦察网,实现 AUV 的跨域侦察和作战将成为可能。

## 参考文献

- [1] 陈强,张林根. 美国军用 UUV 现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(7): 129-134.
- [2] 杨波,李敬辉,吉顺东. 水下战场 UUV 侦察与监视研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(7): 15-17.
- [3] 冯景祥,姚尧,潘峰,等. 国外水下无人装备研究现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2012, 43(12): 1-8.
- [4] MCCAIN J S. Autonomous undersea vehicle requirement for 2025, 20350[R]. Washington D. C.: Underwater Warfare Directorate, 2016.

- [5] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 1-30.
- [6] 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): 274-282.
- [7] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 215-225.
- [8] HAMBLING D. Large displacement UUV steaming ahead[EB/OL]. [2017-03-01]. [http: //www.dsti.net/Special/NewsView/136](http://www.dsti.net/Special/NewsView/136).
- [9] SUTTON H I. The U.S. Navy's new Orca drone submarine could get offensive role[EB/OL]. [2019-12-17]. [http: //www.forbes.com/sites/hisutton/2019/12/17/the-us-navys-new-orca-drone-submarine-could-get-offensive-role](http://www.forbes.com/sites/hisutton/2019/12/17/the-us-navys-new-orca-drone-submarine-could-get-offensive-role). 2019/12/17.
- [10] 叶效伟, 胡桂祥, 俞圣杰. 国外重型无人潜水器最新发展动态及启示[J]. 船舶物资与市场, 2020(3): 3-6.
- [11] 王强. 大型无人潜航器的发展与军事用途[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(4): 33-39.
- [12] 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.
- [13] 伍尚慧. 俄罗斯大力发展无人潜航器以提升水下作战能力[J]. 军事文摘, 2019(9): 28-31.
- [14] 庄芷渔, 耿彤. 俄罗斯“大键琴”系列无人潜航器[J]. 兵器知识, 2018(10): 25-27.
- [15] 尚敦敏, 麻晓晶, 王文岳. 无人潜航器驶向水下战场[N/OL]. 解放军报, [2022-11-18]. [http: //www.81.cn/yw-208727/10199983.html](http://www.81.cn/yw-208727/10199983.html).
- [16] SUTTON H I. Low-cost-autonomous-submarine[EB/OL]. [2019-12-27]. [http: //www.hisutton.com/Low-cost-autonomous-submarine.html](http://www.hisutton.com/Low-cost-autonomous-submarine.html).
- [17] 申淼. 美海军报告分析 2025 年自主潜航器需求[J]. 防护视点, 2016(7): 60-62.
- [18] 李羚. 海底威胁助推无人潜航器新发展[J]. 新军事, 2022(7): 51-55.
- [19] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
- [20] 李经. 水下无人作战系统装备现状[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1-4.
- [21] 肖胜, 张路青, 许中胜. 军用 UUV 光电探测技术的应用方向[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 165-168.
- [22] CORBANE C, NAIMAN L, PECOUL E. A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(22): 5837-5854.
- [23] 时延利. 基于 UUV 的可见光与红外图像融合方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [24] 廖南杰. 燃料电池——美国海军水下作战能力的新增长点[J]. 现代军事, 2016(8): 17.
- [25] 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.

(责任编辑: 肖楚楚)