

无人水下航行器的发展现状与关键技术

王童豪¹, 彭星光¹, 潘光¹, 徐德民^{1,2}

(1. 西北工业大学航海学院, 西安 710072;
2. 西北工业大学无人系统发展战略研究中心, 西安 710072)

摘要: 无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 包括遥控水下航行器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 和自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 是海洋科学研究、资源开发和维护海洋权益不可或缺的重要装备, 日益受到世界海洋国家的高度重视, 并竞相大力发展。阐述了国外 UUV 的发展现状与应用情况, 分析了 AUV 的关键技术及其发展趋势。

关键词: 无人水下航行器; 遥控水下航行器; 自主水下航行器

中图分类号: O375.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2017) 04-0052-13

Development and Key Technologies of Unmanned Underwater Vehicles

WANG Tong-hao¹, PENG Xing-guang¹, PAN Guang¹, XU De-min^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Research Center for Unmanned System Strategy Development, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The Unmanned Underwater Vehicle (UUV), including the Remotely Operated Vehicle (ROV) and the Autonomous Underwater Vehicle (AUV), is indispensable in the field of marine science, underwater targets detection, etc., for safeguarding marine rights and interests. Thus, the UUV has drawn world-wide attention and plenty of efforts have been made to improve related technologies. This work reviews the development and applications of the UUV. In addition, key technologies of the AUV and their prospects are also presented.

Key words: Unmanned underwater vehicle (UUV); Remotely operated vehicle (ROV); Autonomous underwater vehicle (AUV)

0 引言

海洋是地球表面最大的自然地理单元, 拥有地球表面积的 70.8%, 总水量的 97%。从太空中望去, 地球是一颗明珠般的蓝色水球。海洋蕴藏着巨大的能量和资源, 在经济、政治和军事上具有举足轻重的战略意义, 是世界各临海国家争相

开发利用的“蓝色疆土”。近年来, 围绕海洋开发、海洋环境安全和海洋权益维护, 国际上展开了新一轮的海洋竞争。当前一轮的海洋竞争是以高科技为依托的军事竞争、经济竞争和科技竞争, 海洋科技水平和创新能力在未来的海洋竞争中将占据主导地位。我国近年来进一步提高了对海洋权益和海洋资源的重视程度。2012年, 党的十八

收稿日期: 2017-09-15; 修订日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61473233)

作者简介: 王童豪 (1994-), 男, 博士, 主要研究方向为自主水下航行器控制与导航技术。

E-mail: wangth@mail.nwpu.edu.cn

大报告明确提出“提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国”的战略部署。2013年，习近平总书记强调“要进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋，推动我国海洋强国建设不断取得新成就”。作为海洋开发利用和海洋安全保障的重要技术手段，无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV）是建设海洋强国不可或缺的装备，是海洋竞争中的有力武器。本文总结了国外UUV的发展现状，详细讨论了自主水下航行器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）相关的关键技术，并对其发展趋势做出分析。

1 UUV的发展现状

20世纪60年代以来，世界上约20个国家研发了近200种各种类型的UUV，服务于军事、海洋工程应用和部分军民两用领域。

国际上，以美国、英国、法国、俄罗斯、德国等国家为代表的世界各国都投入了很大力量，进行UUV的研发。美国海军于2000年制定了UUV发展主计划（UUV Master Plan），并于2004年对该计划进行了修订。2007年和2013年，美国国防部相继制定了2007—2032无人系统路线图（Unmanned Systems Roadmap）和2013—2038无人系统路线图，将海陆空三位一体联合进行协同发展。英国南安普顿国家海洋中心于2013年宣布，英国自然环境研究委员会在2015年之前投入1000万英镑用于开展海洋机器人的研究和开发。

20世纪90年代以来，我国有关高校和研究所相继开展了UUV的研发工作，取得了比较显著的进展和研发成果，但力量比较分散，至今尚未形成完整、系统的发展规划，研发力度和水平与发达国家相比仍有不小的差距，不能完全满足我国海洋开发利用和安全保障的需求。

1.1 UUV的分类

UUV可在水下自航运动，具有感知能力，通过遥控或自主方式代替或辅助人力完成某些水下使命和任务，一般分为两类：

1) 遥控水下航行器（Remotely Operated Vehicle, ROV）：需要操作员通过电缆或声学通信系统传送指令进行遥控。

2) 自主水下航行器：执行任务时不需要操作员监视和操控。

1.2 ROV发展现状

ROV的研制开始于20世纪50年代，80年代发展到较高水平。其功能多种多样，在民用方面主要用于海上石油与天然气等资源开发、港口/水库大坝的水下检查等；在军用方面主要用于反水雷战（如水雷探测、遥控灭雷具）、打捞丢失海底试验武器（如鱼雷）等。ROV的主要特点为：

- 1) 有水面支持系统；
- 2) 拖带线缆；
- 3) 装载机械手可水下作业；
- 4) 活动空间范围有限。

1960年美国海军研制了世界上第一台ROV—CURV，用于打捞丢失在水下的海军实验军械。1966年它在西班牙外海869m深处打捞起一颗失落在海底的氢弹。CURV长5m，重1400kg，装有4个浮筒，搭载摄像机、探照灯和打捞用的机械手等。

1995年，日本的ROV“海沟（KAIKO）”号（图1）到达世界上最深的马里亚纳海沟，创下10911米无人探测的深度记录。发现了沉积岩心，拍到了许多生物照片，获得了大量的深海考察数据，对太平洋地区地震和海洋生物研究有重要作用。2003年5月，在某次执行任务的过程中，“海沟”号由于线缆断裂丢失。

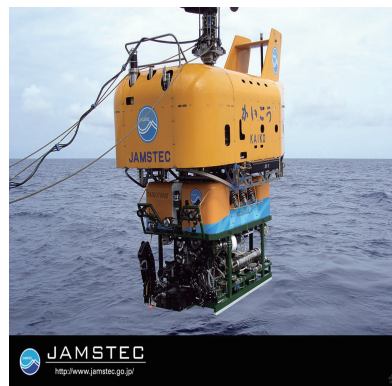


图1 “海沟”号遥控水下航行器^[1]

Fig.1 The “KAIKO” ROV^[1]

“双鹰（Double Eagle）”ROV由瑞典SAAB公司研制，第一代于1984年在瑞典海军服役，至今已发展了四代，并相继被丹麦、荷兰及澳大利亚等国家的海军装备，用于清除水雷。其最新型号自身质量为530kg，最高航速6节，可在500m深处作业。它由7个无刷电机作为主要动力来源，可在6个自由度上运动。

随着各国对海洋工程相关领域的不断重视，

ROV的研发水平和规模也在蓬勃发展,取得了长足进步。其中具有代表性的生产厂家有美国Oceaneering公司,英国Seaeeye公司和加拿大的Seamor航海公司等,如图2所示。



(a) Oceaneering 公司作业 ROV (b) SAAB 公司作业 ROV



(c) Seamor 公司观察 ROV

图2 典型 ROVs^[2-4]

Fig. 2 Typical ROVs^[2-4]

1.3 AUV 发展现状

AUV无人、无缆,完全自主航行,是代表UUV发展方向的高新技术,是发达国家海军和海洋技术研究发展的热点之一。其主要特点为:

- 1) 自治能力强;
- 2) 活动空间大;
- 3) 智能化水平高;
- 4) 适应能力强;
- 5) 实用性好;
- 6) 隐蔽性好。

美国作为海洋强国之一,拥有多个系列AUV,各自应用于不同的领域。美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)海洋学实验室研制的REMUS系列AUV被用于检测海洋环境状况、沿海搜索等任务。

Odyssey I~IV是麻省理工学院AUV实验室(MIT AUV Lab)研发的系列产品。Caribou是一种Odyssey III型AUV,长2.6m,质量约400kg,工作深度为3000m,最大下潜4500m,可代替侦察船对危险海域进行监视,也能协助水面作战舰艇完成作战任务。Odyssey IV(图3)型继承了Odyssey II型的流线外形,能量转化率高,机动性好,下潜深度大。



图3 “Odyssey IV” AUV^[5]

Fig. 3 “Odyssey IV” AUV^[5]

英国南安普敦国家海洋中心(National Oceanography Centre, Southampton)研制的Autosub AUV配备有声学多普勒流速剖面仪、温盐深仪、氧含量传感器、视距测量计、荧光计,以及用于航行器控制的测量位置、姿态、高度、深度的多种传感器,是一个远航程、大航深的多用途海洋调查与监视平台。

俄罗斯早在20世纪60年代苏联时期就开始研制AUV,其MT-88长3.8m,宽1.1m,高1.2m,质量1150kg,采用模块化结构,主要用于海洋研究和海洋观测^[6]。MT-88下潜和上浮通过采用铸铁压载完成,它携带两个压载下潜,到达指定深度后抛掉其中一个压载,任务完成后抛掉另一个压载。

日本的r2D4号AUV采用锂离子二次电池,采用惯导+DVL计程仪的组合导航方式。2007年,r2D4通过携带的侧扫声纳和水下摄像机等设备在印度洋海底发现了世界最大的熔岩平原^[7]。

综上所述,随着各国海洋相关战略的不断推进和下水设备相关技术的快速发展,UUV已成为世界各国维护海洋权益必不可少的装备,在航程、航深和自主性方面得到了飞速发展。然而,目前UUV仍无法执行复杂任务,因此其智能性的发展成为UUV技术突破的关键。

2 UUV 的主要应用

UUV作为一种无人平台,在民用和军用领域都扮演着极其重要的角色。本文从海洋工程和军事领域两方面介绍UUV的用途。

2.1 UUV 在海洋工程中的应用

发展是人类社会永恒不变的主题。蕴藏在海洋和海底丰富的石油、天然气、可燃冰和各类金属矿石等矿产资源远未被充分开发和利用,是未来人类社会繁荣发展的重要保障。相比载人潜器和水面船拖曳设备,使用UUV对海洋资源进行勘

探和取样效率更高,成本更低,使用更方便,工作时间更长,安全性更加有保障。UUV 在海洋工程中的应用主要集中在以下方面:

(1) 海洋资源勘察

1977年,美国科学家首次在2000m深的海底发现了冒出浓烟般的热泉,在热泉“黑烟囱”周围的海水中,活跃着各类生物种群,深海生物基因研究是探究地球生命起源的重要组成部分。近年来,随着相关技术的不断发展,越来越多的UUV加入到深海热泉的探测与考察的队伍中来。在国内,参与深海热泉探测任务的有“海龙2号”ROV和“潜龙二号”AUV。

“CR-01”6000米AUV在1995年和1997年两次赴南太平洋海域参加中国大洋协会海底资源调查,进行海底多金属结核丰度测量,使我国被联合国批准为第5个深海采矿的先驱投资者,最终拥有对矿产资源最丰富的7.5万平方公里海域的优先开采权。

(2) 水下搜救

2005年8月4日,俄罗斯军方一艘搭载7名船员的“AS-28”型小型潜艇(图4)在进行例行训练时撞上渔网无法上升到海面,在俄罗斯东北部堪察加湾海域深190米的海底搁浅,由英国“天蝎45”ROV(图5)剪断缆绳后成功获救。2014年4月,在MH-370飞机残骸的搜寻过程中,美国海军在可能失事的水域部署了Bluefin-21 AUV(图6)进行深海搜索。同年,美国两架ROV还被应用到韩国“岁月号”客轮的搜救行动中。



图4 俄罗斯“AS-28”型潜艇

Fig. 4 “AS-28” submarine of Russia

(3) 海底打捞

2004年5月,美国北岛海军航空站的潜艇营救队在加利福尼亚外海用“超级天蝎”号ROV打捞起了在飞行训练中坠毁的F14-D“雄猫”战机的残骸。“超级天蝎”号自身负重可达100kg,两只



图5 英国“天蝎45”ROV

Fig. 5 “Scorpio 45” ROV of the U. K.



图6 “Bluefin-21” AUV^[8]

Fig. 6 “Bluefin-21” AUV^[8]

机械臂最大伸展时每只可举起110kg的物体。

此外,UUV还在水文调查、港口安全、渔业作业、科学取样、海图绘制和核电站维护等领域发挥着不可替代的作用。

2.2 UUV在军事领域中的应用

根据美国海军公布的UUV总体规划,军用UUV的作战任务为:

- 1) 情报、监视、侦察;
- 2) 反水雷战;
- 3) 反潜战;
- 4) 检查/识别;
- 5) 海洋调查;
- 6) 通信/导航网络节点;
- 7) 负载投送;
- 8) 信息作战;
- 9) 时敏打击。

2003年3月,美国海军在进入伊拉克的乌姆盖斯尔港时,利用REMUS 100自主水下航行器(图7)在强海流和低能见度条件下进行反水雷任务,用16h完成了人工21d才能完成的排雷任务,减少了战术时间,将雷区的威胁降到最低限度。

REMUS 100根据预先编制好的航行任务规划,对大范围水域进行搜索探测水雷目标。航行深度100m,单次执行任务可以航行60nm,在3节速度下可航行20h,以最大巡航速度5节航行的航时可达8h。



图 7 参与排雷的 REMUS 100^[9]

Fig. 7 REMUS 100 with defense application^[9]

如图 8 所示，近期水雷侦察系统（Near-Term Mine Reconnaissance System, NMRS）是美海军已装备的 ROV，它由潜艇鱼雷管发射，由潜艇操作员通过 56km 长的光缆控制，主要完成情报搜集、监视、侦察和水雷的搜索与识别等任务。

此外，美国海军还为“洛杉矶”级攻击型核潜艇装备了远期水雷侦察系统（Long-Term Mine Reconnaissance System, LMRS）。LMRS 是用 NMRS 系统改进的 AUV，总长为 6.1m，与母舰之间采用声信号通信。LMRS 从鱼雷发射管发射，可完全自主地在水下对水雷进行搜索，续航能力超过 40h，每天可搜索的海区面积为 120km²。探雷结束时，系统可自动返回潜艇，由潜艇右舷鱼雷发射管中的机械手回收收到发射管中。



图 8 “NMRS” ROV

Fig. 8 “NMRS” ROV

1996 年，美国着手研发 Manta 无人作战平台，如图 9 所示。根据其设计构想，该 AUV 悬挂在攻击型核潜艇外部，携带鱼雷和超空泡武器，配合母艇完成水下环境侦察和鱼雷攻击任务，包括侦察、探测、攻击敌潜艇，或探测水中兵器；还可在两栖作战中对沿海浅水区隐蔽进行探测、侦察。

3 AUV 关键技术

UUV 的各项关键技术是保证 UUV 顺利完成任务的重要保障，是 UUV 研究的重点领域。其中 ROV 的关键技术有遥控技术、通信技术、动力推进技术、人机交互技术、平台设计技术、作业系

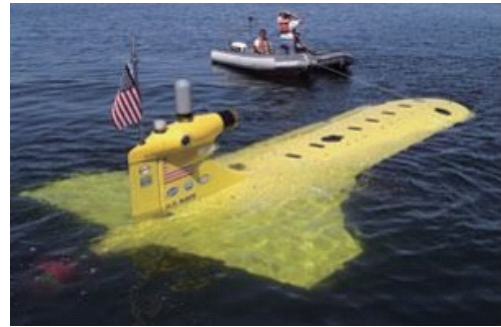


图 9 “Manta” 无人作战平台

Fig. 9 “Manta” unmanned combat platform

统及机械手技术等；AUV 的关键技术有总体及系统集成技术、能源及动力推进技术、自主控制与智能化技术、导航定位技术、通信技术、自主探测与识别技术和布放与回收技术等。本文主要针对 AUV 的关键技术进行分析。

3.1 总体及系统集成技术

3.1.1 AUV 通用平台设计

设计和研发通用平台对于 AUV 的发展和應用有着重要的意义。若对 AUV 进行标准化、模块化和系列化设计，当需要搭载不同任务载荷执行不同任务时，只需在一种或较少的几种 AUV 的基础上进行修改，即可使之适应不同的环境和任务指标。

1) 标准化：AUV 平台的标准化包括航行器构型、机械和电气接口、元器件、零组件、软件等的标准化设计。

2) 模块化：将 AUV 个体的功能载荷、导航控制、能源、动力推进、稳定操纵等部分进行模块化设计，如图 10 所示。

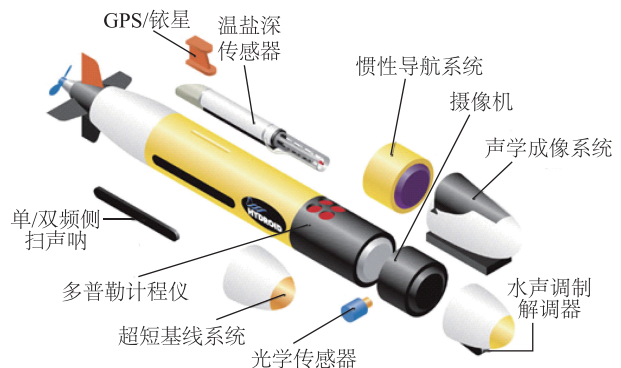


图 10 REMUS 100 模块化示意图^[9]

Fig. 10 Modularization of REMUS 100^[9]

3) 系列化：美国海军将 AUV 划分为 4 个等级——单兵便携式（Man-Portable）、轻型（Light

Weight Vehicle, LWV)、重型 (Heavy Weight Vehicle, HWV) 和超大型。其各自总体参数和性能指标如表 1 所示。

表 1 美军系列 AUV 参数

Tab. 1 Parameters of the AUV series of the U. S. Army

	直径 /mm	排水 量/kg	大负载 航时/h	小负载 航时/h	有效载 荷/L
单兵便 携式	76~229	<45	<10	10~20	<7
轻型	324	~227	10~20	20~40	28~85
重型	533	<1361	20~50	40~80	113~170
超大型	>914	~9072	100~300	>>400	425~850+ 外部携带

国内系列 AUV 的参数如表 2 所示。

表 2 国内系列 AUV 参数

Tab. 2 Parameters of the AUV series of China

	尺寸/mm	质量/kg	航程/km
超小型	<180	<50	<10
小型	180~230	50~150	10~20
中型	324	150~300	10~100
大型	533	1000~2000	400~1000
超大型	>533	A 级: 3000~10000 B 级: 10000~30000 C 级: >30000	1000~3000

3.1.2 构型与材料

1) 构型: 当前阶段 AUV 主要以回转型和扁平型为主, 新发展的有仿生型、组合 (捆绑) 型等, 如图 11 所示。

2) 材料: 目前, AUV 头部常采用复合橡胶材料, 壳体常用铝合金材料, 内部结构件大都采用非金属复合材料。近年来兴起的复合材料具有高比强、高比模、耐高温、韧性好、抗腐蚀与耐磨损等特性, 且密度较小, 可以通过降低水下航行体的质量相对地降低航行能耗, 有利于增加航程, 已广泛应用于 AUV (鱼雷、诱饵、侦察器、靶雷、反鱼雷) 等各种军民产品上。其中硼/铝复合材料具有高强度、低密度的特性, 性能优于常用的铝合金, 是一种较为理想的 AUV 壳体材料。

3.1.3 减阻技术

物体在水中运动的阻力比在空气中大 800 倍, 尤其对于细长回转型 UUV, 摩擦阻力占总阻力的



(a) 回转型 Autosub



(b) 扁平型 SeaOtter



(c) 组合型 SeaFox



(d) 仿生型 ACM-R5H

图 11 不同构型的 UUV^[10-13]

Fig. 11 The UUVs with different configuration^[10-13]

80%以上。因此减小阻力, 特别是摩擦阻力, 可以节约能源, 增大航程, 提高航速。减阻技术按边界层与流体接触表面的弹性大小, 可分为刚性表面减阻技术和柔性表面减阻技术。刚性表面减阻技术常使用与流体接触的表面为刚性的表面减阻材料, 或直接在刚性表面处添加有利于减阻的其他介质, 如目前研究比较广泛的脊状表面减阻技术、聚合物添加法、低表面能涂料、微气泡法和随形波表面法等; 柔性表面减阻技术采用的减阻材料与流体接触的表面为柔性, 具有小的弹性模量和较大的变形能力。柔性表面减阻技术作为一种近似的仿生研究模型, 具有减阻效果明显、不需要反馈原件和响应元件, 且不需要额外能量供给等优点; 同时柔性表面对边界层的湍流噪声有削弱作用, 有利于 UUV 提高隐身能力。

其中, 脊状表面减阻技术从仿生学角度出发, 通过对各种鱼类表面脊状结构分布规律的研究 (图 12), 提出不同形状、尺寸脊状结构在水下航行器上联合使用的减阻新方法, 可有效减阻 10%~20%, 如图 13 所示。

此外, UUV 的可靠性、安全性、保障性、维护性、经济性、隐身性和总体设计与评估技术等都是总体技术领域值得研究的问题。

3.2 能源及动力推进技术

未来 AUV 大深度、远航程、长航时的设计指标对 AUV 的能源与动力推进系统提出了更高的要求: 能源系统比能更高、推进系统效率更高, 使用更为安全和灵活。目前 AUV 使用的能源与动力

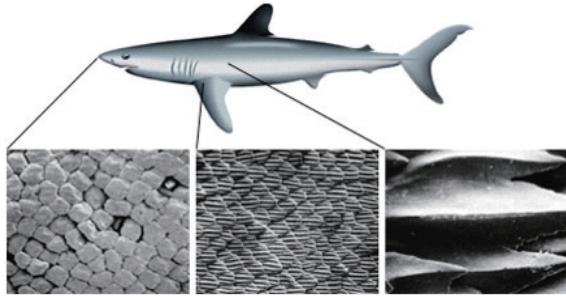


图 12 鲨鱼表面脊状结构分布

Fig. 12 The riblet structure on the shark skin

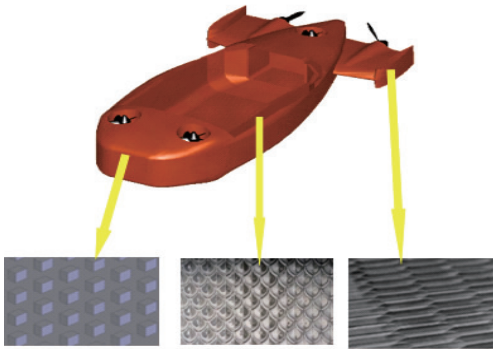


图 13 水下航行器脊状表面减阻构想

Fig. 13 The proposed riblet structure on the surface of UUV for drag reduction

推进系统主要有 4 个类型：电化学能源动力系统、AIP（Air Independent Power）热动力系统、混合动力推进系统和新型动力推进系统。

3.2.1 电化学能源动力系统

电化学能源动力系统由电池提供能量，驱动电机带动推进器提供推力。由于电动推进在能量密度方面有明显优势，目前的水下航行器主要采用电动推进。常用的电池有：

1) 一次电池，主要有锰干电池系列、碱性电池系列、汞系列、空气电池、氧化银电池、海水电池、锂电池和热电池等；

2) 二次电池，主要有铅酸电池、镍镉、镍氢电池、银锌电池、锂离子电池、聚合物电池等；

3) 燃料电池按电解质划分有 5 个主要种类：碱性燃料电池、磷酸盐型燃料电池、熔融碳酸盐型燃料电池、固体氧化物型燃料电池、质子交换膜燃料电池。燃料电池的电转化率最高，为 45%~60%。

铝氧化银电池是当今装备鱼雷的最先进动力电池之一，法国 SAFT 公司研制的铝氧化银电池先后应用于 MU90、Blackshark 和 F21 鱼雷，其性能可以达到普通锌银电池的 2 倍，比能量可达

160Wh/kg。能量密度大、自放电率低、温度特性好、可靠性安全性高、寿命长的电池是满足 AUV 日益提高的性能需求的重要技术途径。

3.2.2 AIP 热动力系统

传统的 AIP 热动力系统包括闭式循环柴油系统、斯特林发动机系统和闭式循环汽轮机系统，这 3 种系统发展较为成熟，已成功应用于常规 AIP 潜艇。从 UUV 角度来讲，仍需对其进行小型化、低成本化研究。

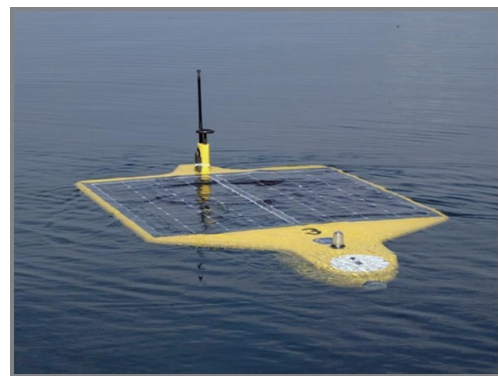
3.2.3 混合动力推进系统

混合动力推进系统结合电动力系统和热动力系统，充分发挥其各自的优势：低速巡航时使用电动力，巡航速度为 4~5 节，航程可达上千 km；高速攻击时电动力段分离，使用热动力，攻击速度为 50 节以上，航程为 40km~50km。

3.2.4 新型动力推进系统

近年来，几种新型动力推进系统引起了人们的关注。

1) 太阳能动力系统，续航时间长，无产物排放，环保、安全，但受环境影响较大。图 14 为采用太阳能动力系统的 SAUV II。

图 14 采用太阳能动力系统的 SAUV II^[14]Fig. 14 The SAUV II utilizing solar energy^[14]

2) 水下仿生学特种推进技术包括扑翼推进方式、摆尾鳍推进方式、波浪推进方式等，噪声低，推进效率高。

3) 水下超导电磁流体推进技术是一种基于电磁流体力学原理的新型水下推进技术。采用该技术的推进系统无运动部件，不产生推进噪声，所以是一种理想的水下低噪推进方式，发展潜力巨大。

4) 水冲压发动机推进技术是热动力 AUV 发展的方向之一，它直接将液态水引入燃烧室中，通过燃烧剂中的金属粉末和水的剧烈反应产生高

温高压燃气，以燃气通过喷管喷出时产生的反作用力作为动力。

5) 水下滑翔技术也是当前热门的研究方向之一，它通过液压或温差的驱动来改变重心，促使UUV在垂直面内运动，进而通过滑翔翼产生水平方向的动力，进行水平运动。美国华盛顿大学研制的SeaGlider利用液压源改变重浮力来提供动力，续航时间为180d，航程可达数千km，最大下潜深度为1000m，其滑翔路径如图15所示。美国韦伯研究公司（Webb Research Corp.）研制的Slocum Thermal Glider利用海水温差改变重浮力，进而由滑翔翼提供动力。

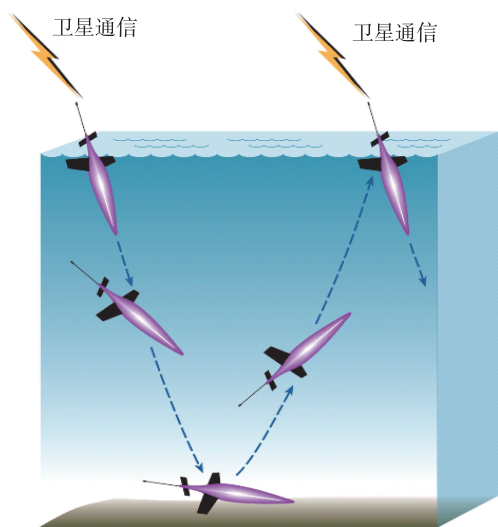


图15 SeaGlider水下滑翔路径^[15]

Fig. 15 The underwater path of SeaGlider^[15]

3.3 自主控制与智能化技术

自主智能控制技术作为实现AUV自主性和智能化的核心技术，对AUV执行任务的能力起着决定性作用，其实现将大大提高AUV对复杂环境中的适应能力和全球海域工作能力。Zhang等^[16]指出，AUV作为智能无人系统的重要领域之一，其自主性和智能化有望在不久的将来有巨大提升。2017年，“长航程、智能化自治式潜水器的研制”被国家重点研发计划深海关键技术与装备重点专项列为子课题。为实现AUV的智能化，应主要研究海洋环境自适应控制，智能自主规划与决策，智能信息融合，智能容错控制和智能分布式协作控制。

3.3.1 海洋环境自适应控制

对AUV来说，温度、盐度、深度和海流等是重要的海洋环境参数，它们在不同地区对应值存

在一定差异。要实现AUV的高效全海域工作，使其在变化的参数中更快地适应新的海洋环境，更准确地调节控制策略，保证其稳定、可靠运行，AUV对海洋环境的自适应能力至关重要。尤其对于执行深海空间复杂环境作业的AUV，在下潜过程中盐度和温度的变化带来AUV浮力的改变，对AUV的航行状态有复杂的影响。在运行条件不断变化的过程中，控制AUV的航行姿态和航向，保证AUV在指定深度的定深航行，实现AUV对任务目标的跟踪和操作，需要更加智能化的海洋环境自适应控制。由于海洋数据过于庞大，人类尚无法完全掌握，因此AUV的海洋环境自适应问题亟待解决。

3.3.2 智能自主规划与决策

AUV的自主规划包括自主任务规划和自主路径规划。自主任务规划是根据预先设定的任务指令，根据已知的海洋环境和自身条件等信息，对任务进行理解并按一定顺序分解完成，从而满足任务要求。自主路径规划即AUV根据所处的环境，寻求一条路径连接起始点到终止点且能自主决策避开环境中障碍物的运动轨迹的过程，根据处理方式可分为在线规划和离线规划，又可根据环境信息的完整程度分为全局路径规划、局部路径规划和最基本的避障。在AUV自主规划的过程中，除AUV自身的众多约束和目标的约束外，还要考虑非线性非定常的复杂环境，尤其是随机因素（随机出现的动态障碍物等）对AUV任务和路径规划所带来的影响。为更好地应对环境对AUV自主规划带来的负面影响，国内外研究人员做了大量研究，Zhu等^[17]提出了一种基于SOM神经网络的AUV动态任务和路径规划方法，可以在洋流干扰下实现路径点跟踪和自主任务规划。McMahon等^[18]提出了一种无碰低功耗自主路径和任务规划算法，能有效抑制复杂水下环境对AUV工作状态的干扰，并通过在海军研究实验室（Naval Research Laboratory）切萨皮克湾的实验验证了该算法在某种复杂任务条件下的有效性。如何使UUV在复杂环境下做出更加智能化的规划和决策，在满足约束条件的情况下通过增加可接受的计算量提高任务效率，实现多任务和复杂任务的智能规划，是未来相关学者的研究重点。

3.3.3 智能信息融合

传感器作为获取信息的窗口，对AUV的自主

性和智能化起到关键作用。根据多传感器信息进行计算、分析和判断的过程即数据融合。只有通过传感器数据的融合,控制系统才能对AUV进行合理的决策,采取适当的控制策略和行为,AUV的自主性和智能化才能得以实现。然而由于体积限制,AUV能携带的传感器数目十分有限。如何通过有限的传感器类型和精度获取并挖掘更多AUV所需的信息是AUV智能信息融合的发展方向,如通过单目相机结合深度学习技术代替双目相机或深度传感器获得距离信息^[19]。相信在不久的将来,更多的智能信息融合技术会涌现出来。

3.3.4 智能容错控制

AUV在水下自主执行任务时,由于复杂的水下环境,部分机构或子系统出现故障的情况时有发生。容错控制的目的是在发生此类故障时保证AUV顺利完成任务或自行返回。因此,容错控制是保障AUV生存及成功完成任务的关键技术,也是实现AUV全球海域工作的重要保障。容错控制初期采用硬件冗余技术,当其中一个或几个失效时,可切换使用与之并联的备用系统完成后续任务。然而,这种措施在提高可靠性的同时,增加了系统的成本,加大了能源消耗。通过一定的容错控制算法对故障进行定位和诊断,进而调整控制策略是一种理想的方法。现有容错控制算法尚停留在处理简单故障的层面,更加智能、快速、准确地智能容错控制方法将在未来AUV领域起到重要作用。

3.3.5 智能协作控制

多AUV智能协作系统作为一种高度智能化的AUV工作形式,具有低成本、高效率、强容错性等特点,工作形式灵活,可执行单AUV无法完成的复杂任务,可缩短工作时间,扩大工作范围,是AUV高自主性和智能化的表现形式之一^[19]。多AUV智能协作系统自20世纪80年代被提出以来,受到了各国AUV研究机构和学者的高度关注,并相继开展了相关技术研究。2006年,欧盟组织德国、意大利等国开展了GREX项目(图16),旨在研究解决协同导航、编队控制、通信等问题的方案。该项目主要进行了2次海上试验,于2009年结题,成果丰硕。美国麻省理工学院的AUV实验室于2006年公开了其CADRE项目(图17),通过Bluefin系列AUV研究了多AUV的协作探测与侦查的可行途径。

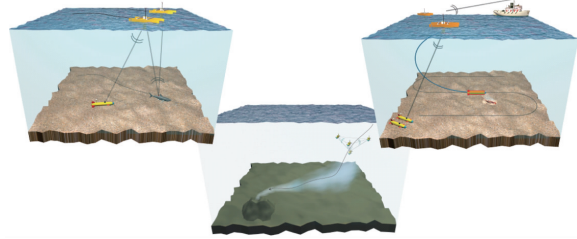


图 16 欧盟 GREX 项目

Fig. 16 “GREX” project by the EU

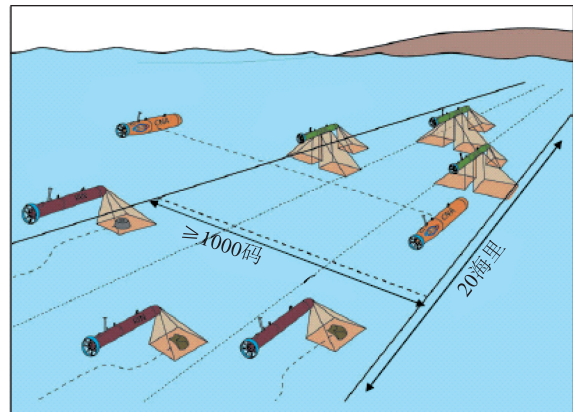


图 17 MIT CADRE 项目

Fig. 17 “CADRE” project by MIT

编队控制是多AUV智能协作控制的研究重点之一。合理的AUV编队可以更好地利用各AUV的信息资源,保证多AUV之间高效协作。Cui等^[20]提出了一种多欠驱动AUV的主从式编队控制方法,从AUV只需根据主AUV的位置信息和预先设定好的队形即可完成对参考轨迹的跟踪。分布式多AUV协同控制可降低能源消耗,使各AUV通过自身获得的有限信息进行动作,相互协作达到全局目标,是多AUV智能协作系统的研究热点。

随着无人系统和人工智能技术的蓬勃发展,AUV的能力将进一步提高,在海洋资源开发、海洋生态保护和海洋安全领域发挥更加重要的作用。

3.4 导航定位技术

AUV向长航时、远航程、大深度、全海域发展的趋势对导航定位系统的精度提出了更高的要求。水下导航与空中导航相比,具有工作时间长、环境复杂、信息源少、隐蔽性要求高等特点,技术难度更大,是影响AUV发展的瓶颈技术之一。

3.4.1 航位推算与惯性导航技术

航位推算技术与惯性导航技术作为最常用的两种完全自主导航方法有共同的缺点:导航误差

随时间累积,一般中等导航精度为 1n mile/h。航位推算与惯性导航的关键技术有载体运动状态下的初始对准技术、新型惯性器件和惯性器件误差校正技术。

(1) 载体运动状态下的初始对准技术

初始对准技术为自主导航计算提供必需的初始条件,对自主导航的效果有重要的作用。一般来说,对初始对准的要求是提高对准精度,缩短对准时间。受限于工作环境,AUV需要在运动状态下进行初始定位。如何提高载体运动状态下的初始对准效率,降低运动状态对初始对准带来的负面影响是重要的研究方向。

(2) 新型惯性器件

惯性器件主要包括陀螺仪和加速度计。陀螺仪是实现航位推算与惯性导航的关键器件。新型高精度陀螺有激光陀螺、光纤陀螺、MEMS陀螺、原子干涉陀螺等。其中MEMS陀螺有精度高、成本低、小型化、数字化和高可靠性的特点,得到了广泛的应用。新型加速度计有石英加速度计、MEMS加速度计等。

(3) 惯性器件误差校正技术

惯性器件的主要误差来源是漂移现象。针对漂移误差,可采取反补偿、自重调和自校正的方法进行校正,或使用GPS、DVL、声相关计程仪、地磁计程仪等外部设备进行校正。

3.4.2 声学导航

声学导航有3种方式:

1) 超短基线(Ultra Short Baseline, USBL)导航,基线长度 $<1\text{m}$,通过相位测量来进行位置解算;

2) 短基线(Short Baseline, SBL)导航,基线长度为 $1\text{m}\sim 50\text{m}$,通过时间测量得到距离,从而解算目标位置;

3) 长基线(Long Baseline, LBL)导航,基线长度为 $100\text{m}\sim 6000\text{m}$,通过时间测量得到距离,从而解算目标位置。

其中LBL导航是最为常用的导航方式,AUV获得与应答器间距离后,通过球面交会法、最小二乘估计法等定位算法解算自身位置。为了利用高精度的GPS信息,提高LBL导航精度,可采用LBL声纳浮标导航系统,将GPS收发机与水声信标集成为一体,定时向AUV报告浮标的位置,AUV根据声传播时间及浮标位置计算出自身的位

置坐标。然而上述方式都需事先在海域布放换能器或换能器阵,限制了AUV的导航范围。

3.4.3 水下地理信息辅助导航

水下地理信息导航通过匹配算法,将测量的地理信息与先验信息进行匹配,估计AUV的位置。理论上可实现全球自主导航,主要作为惯导的辅助手段使用。常用的水下地理信息导航的手段有地磁辅助导航、重力辅助导航、等深线导航和地形匹配导航。SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)方法是一种同时定位与制图方法,不需要先验的水下地理信息图,当AUV在水下运动时,利用相关传感器(地磁仪、重力计、声传感器)感知、提取地理信息,进行自身定位、构建、更新地理信息图,实现水下全球自主导航。刘明等^[21]分析了基于图像声呐的SLAM算法在AUV组合导航中的应用,刘明雍等^[22]提出了一种基于随机信标的水下SLAM导航方法,并通过仿真实验验证了其有效性。此外,通过分析和模拟生物(如海龟、海豚等)对水下地理信息的利用机理和方式,还可探索新的仿生导航模式。

3.4.4 组合导航

组合导航是一种“取长补短”的导航方法,能够降低难度与成本,同时提高可靠性和容错性。常见的组合导航方式有:

(1) 捷联惯导+卫星导航

该导航方式要求AUV周期性浮出水面,使用GPS/北斗卫星导航系统进行位置修正,可用于远航程精确导航定位,但需周期性浮出水面,降低了隐蔽性,且不断地上浮与下沉将消耗更多的能源。

(2) 捷联惯导+多普勒计程仪

该导航方式通过计程仪测得AUV绝对速度,对捷联惯导数据进行修正,消除漂移误差和海流影响,隐蔽性好,能耗低,但多普勒计程仪无法全水深使用,变深控制可部分解决这一问题。

(3) 捷联惯导+计程仪+地理信息

该导航方式能针对AUV的特定导航要求进行工作,有较高导航定位精度,但无法全海域使用。

(4) 捷联惯导+计程仪+卫星导航

该导航方式中,后两者可互补使用,当计程仪无法获得绝对速度时,使用卫星导航来校正导航误差,以满足全海域导航需求,提高导航精度。该组合导航方式可用于远航程精确导航定位,但

隐蔽性差，且上浮下沉消耗额外能源。

3.4.5 网络状态下的协同导航定位技术

在组网状态下，多 AUV 携带不同类型导航传感器，通过信息共享，利用时间同步信号和水声传播延迟进行位置解算估计，实现协同导航定位。

1) 协同导航定位技术(图 18)，通过水声通信共享位置信息、相对位置和方位信息；通过协同导航算法解算得到自身的精确位置估计。协同导航定位技术可分为主从式和并行式。主从式协同导航方式中，主 AUV 携带高精度传感器，从 AUV 携带低精度传感器；并行式协同导航方式中，各 AUV 携带同等级传感器，通过一定的算法设计获得较高精度的导航定位结果。

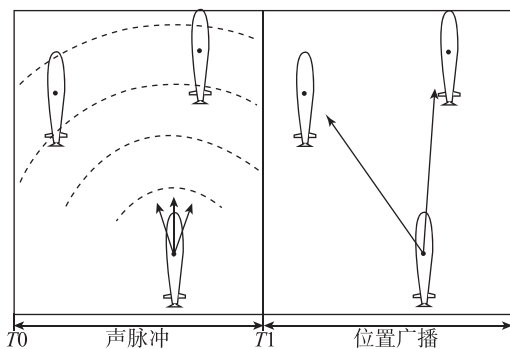


图 18 一种协同导航算法原理图

Fig. 18 Diagram of a kind of cooperative navigaiton

2) 移动长基线协同导航定位方法^[23]是随着 AUV 的水声定位需求发展起来的一种长基线水声导航定位系统，它与传统长基线水声导航定位系统最大的不同是：应答器不是固定布设在海底，而是移动的，多布设在大型 AUV 上，与被定位 AUV 组成水声通信网络进行协同定位，如图 19 所示。

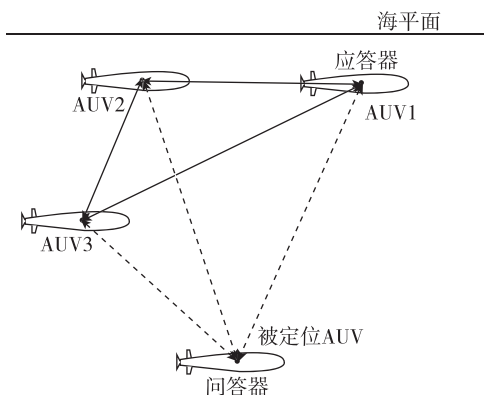


图 19 移动长基线定位原理示意图

Fig. 19 Diagram of moving LBL

3.5 布放与回收技术

现代化的 AUV 布放和回收要求高效率、高安全性、高自动化水平，操作简单且具备高海况作业的能力。常规 AUV 布放和回收方式可分为水面方式和水下方式。在水面上，可采用挂钩布放/回收、滑道布放/回收和中继布放/回收；在水下可根据 AUV 外形使用潜艇鱼雷管布放/回收或潜艇外壳背负方式。其主要研究内容有：

(1) 近距离精确导引对准技术

常用的近距离精确导引方法有基于惯导 + DVL 的导引方法和水声导引法。其中，水声导引法通过超短基线获取 AUV 与目标点的相对空间距离，采用横向跟踪控制算法导引 AUV 沿回坞站中轴线驶入回坞站中。由于声学导引精确度较低，声信号更新频率慢，近距离视觉传感器导引 AUV 回坞技术在近几年获得了较多关注。Watt 等^[24]阐述了将 AUV 与移动潜艇对接的概念，设计了一种基于视觉的导引方法，并于 2015 年成功将其应用到加拿大新斯科舍省的 AUV 回收实验中。严卫生等^[25]提出了一种基于偶极势场的导引方法，该方法将回坞过程分为回坞准备阶段和回坞阶段。在回坞准备阶段采用航路点导航方法，使 AUV 航行到距回坞站一定范围内；然后利用建立的偶极势场通过一定的控制算法导引 AUV 进入回坞站。

(2) 布放/回收流体动力学

在 AUV 的布放/回收过程中，会存在海流海浪的来流、AUV 与母船相对运动产生的扰流以及海底或庞大物体边界产生的绕流。来流、扰流和绕流 3 方面相互影响、相互作用，产生非线性非定常的复杂流场，对 AUV 的布放和回收产生负面影响，甚至可能导致碰撞。为实现 AUV 的高效布放/回收，对该复杂流场的建模分析方法及 AUV 对该流场扰动的处理方法还需深入研究。

(3) 布放/回收协调控制技术

协调控制中的核心技术为 AUV 和回坞站的对接控制，研究重点为回坞过程中的路径规划和相应的控制算法。常用的布放/回收协调控制技术有模糊控制、基于混杂系统的控制和分层递阶控制等。为提高布放/回收协调控制算法对环境的适应性和鲁棒性，鲁棒模糊控制、自适应滑模控制等新型控制算法得到了广泛的关注。

4 总结与展望

UUV 作为海洋开发利用和海洋安全保障的重

要技术手段,在海洋开发和利用中有不可或缺的作用(表3)。本文系统总结了国外UUV的发展历史和研究现状,详细分析了AUV各关键技术的研究现状并指出发展趋势。随着相关技术的日益成熟和相关需求的不断扩展,UUV的应用前景十分广阔。面对接踵而来的新任务及提出的更高要求,UUV的主要研究应集中在以下4个方面:

1) 提高持续工作能力,实现长航时、远航程工作;

2) 提高UUV的自主性和智能化水平,满足多元应用领域对UUV提出的具备多种功能、执行多种任务的要求;

3) 提高UUV对复杂环境的适应能力和全球海域工作能力,提高在大深度和两极海域的工作效率;

4) 提高多UUV协作系统的性能,从而提升UUV应对复杂任务的能力。

人工智能技术正在世界范围内飞速发展,中国也将迎来人工智能2.0时代。作为人工智能的重要应用领域,无人系统的智能化水平必将在不久的将来达到新的高度,UUV也将在海洋资源开发、海洋生态保护和海洋安全领域发挥更加重要的作用。

表3 国外典型UUV参数

Tab.3 Parameters of typical foreign UUV

国家	研制单位	型号	截面尺寸/mm	长度/m	质量/kg	最大工作深度/m	最高航速/kn	最大航程/n mile	最大航时	
美国	宾夕法尼亚州立大学	Seahorse	970	8.69	4500	300	6	500	>100h	
	伍兹霍尔海洋研究所	“REMUS”系列	REMUS 100	190	1.6	37	100	5	60	20h
			REMUS 600	324	3.25	240	600	5	286	<70h
			REMUS 3000	356	—	335	3000	—	231	77h
			REMUS 6000	710	3.84	862	6000	4.5	—	22h
	Bluefin公司	“Bluefin”系列	Bluefin-9	240	1.75	60.5	200	5	36	12h
			Bluefin-12S	320	3.77	213	200	5	78	26h
			Bluefin-12D	320	4.32	260	1500	5	90	30h
			Bluefin-21	530	4.93	750	4500	4.5	75	25h
	麻省理工学院AUV实验室	Odyssey III	Caribou	580	2.6	400	4500	4	60	20h
Odyssey IV		1500×1300	2.6	25	6000	4	80	12h		
韦伯研究公司	SeaGlider	300	1.8	52	1500	<1	3240	0.5y		
	Slocum Glider	210	1.5	60	2000	0.6	2160	5y		
英国	南安普敦海洋中心	Autosub	900	7	1500	1600	3	>270	—	
	BEA系统公司	Tailsman	4500×2500	5	1800	300	5	120	—	
法国	ECA公司	“Alister”系列	Alister 300	1200×1100	3.2	600	300	3	40	—
			Alister 3000	1350	3.5	1000	3000	6	36	—
德国	ATLAS MARI DAN公司	“SeaOtter”系列	SeaOtter MK II	980×480	3.45	1100	600	8	96	24h
挪威	Kongsberg公司	“Hugin”系列	Hugin 1000	750	3.85~5	600~800	600	6	72	24h
			Hugin 3000	1000	5.35	—	3000	4	189	—
加拿大	ISE公司	Explorer	690~740	4.5~6	750~1250	5000	5	130	—	
俄罗斯	海洋技术研究所	MT-88	1100×1200	3.8	1150	6000	2	—	6h	
日本	东京大学	R2D4	1080×810	4.4	1506~1603	4000	3	37	—	

参考文献

- [1] Remotely Operated Vehicle“KAIKO7000II”[DB/OL]. http://www.jamstec.go.jp/e/museum/wallpaper/wp/kaiko7000_2_1024.jpg.
- [2] Oceaneering公司[DB/OL]. <http://www.oceaneering.com/>.
- [3] ROV Underwater Remotely Operated Vehicles by Saab Seaeye[DB/OL]. <http://www.seaeye.com/>.
- [4] Seamor Marine Ltd. | World Class Subsea Remotely Operated Vehicles[DB/OL]. <http://seamor.com/>.
- [5] AUV Laboratory at MIT Sea Grant[DB/OL]. <https://aurlab.mit.edu/vehicles/#04>.
- [6] 陈强. 水下无人航行器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [7] 日本机器人在印度洋海底发现世界最大熔岩平原 [DB/OL]. http://news.xinhuanet.com/tech/2007-01/11/content_5593520.htm.
- [8] Bluefin-21》Bluefin Robotics [DB/OL]. <http://www.bluefinrobotics.com/vehicles-batteries-and-services/bluefin-21/>.
- [9] Autonomous Underwater Vehicle, REMUS 100-REMUS 100 AUV-Kongsberg Maritime[DB/OL]. <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/D241A2C835DF40B0C12574AB003EA6AB?OpenDocument>.
- [10] Autosub6000-AUVAC[DB/OL]. <http://auvac.org/configurations/view/86>.
- [11] Double Eagle MCM System[DB/OL]. http://www.seaeye.com/pdfs/military/Double_Eagle_MCM.pdf#view=FitH.
- [12] ハイボットー極限作業におけるロボティクス・ソリューション[DB/OL]. http://www.hibot.co.jp/en/products/robots_1/acm-r5h_33.
- [13] US deploys underwater drones to hunt for Iranian drones-Telegraph [DB/OL]. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/middleeast/iran/9395584/US-deploys-underwater-drones-to-hunt-for-Iranian-drones.html>.
- [14] SAUV II- AUVAC[DB/OL]. <http://auvac.org/configurations/view/24>.
- [15] Seaglider[DB/OL]. <http://www.apl.washington.edu/project/project.php?id=seaglider>.
- [16] Zhang T, Li Q, Zhang C, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(1): 68-85.
- [17] Zhu D, Huang H, Yang S X. Dynamic task assignment and path planning of multi-AUV system based on an improved self-organizing map and velocity synthesis method in three-dimensional underwater workspace[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, 43(2): 504-514.
- [18] McMahon J, Plaku E. Mission and motion planning for autonomous underwater vehicles operating in spatially and temporally complex environments [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(4): 893-912.
- [19] Cao Y, Shen C, Shen H T. Exploiting depth from single monocular images for object detection and semantic segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(2): 836-846.
- [20] Cui R, Ge S S, How B V E, et al. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(17): 1491-1502.
- [21] 刘明, 张严, 徐德民. 基于图像声纳 SLAM 算法在 AUV 组合导航中的应用[J]. *鱼雷技术*, 2011, 19(4): 276-281.
- [22] 刘明雍, 董婷婷, 张立川. 基于随机信标的水下 SLAM 导航方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(12): 2830-2834.
- [23] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于移动长基线的多 AUV 协同导航[J]. *机器人*, 2009, 31(6): 581-585.
- [24] Watt G D, Roy A R, Currie J, et al. A concept for docking a UUV with a slowly moving submarine under waves[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(2): 471-498.
- [25] 严卫生, 齐贝贝, 高剑, 等. 基于偶极势场的自主水下航行器回坞导引算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(4): 902-908.