

水下考古机器人研究与应用进展

郭威¹, 徐高飞^{1*}, 王敏健², 李滨³, 高森¹, 袁博¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210

3. 国家文物局考古研究中心, 北京 100013

摘要 作为开展水下文化遗产探测的主要工具, 水下考古机器人具有广泛应用。根据水下考古工作的具体内容、典型作业流程和现有工作开展情况, 总结了水下机器人考古工作的主要特点。从通用水下机器人入手, 分类介绍了遥操作水下机器人、载人潜水器和自主水下机器人的主要特点及其在水下考古中的典型应用, 并介绍了国内外水下考古专用机器人的具体情况。从作业模式、作业功能和智能化水平等方面展望了水下考古机器人的发展趋势。

关键词 水下考古; 遥操作水下机器人; 载人潜水器; 自主水下机器人

海洋是连接各大洲的主要通道。自15世纪的“地理大发现”开始, 人类开启了以海洋为中心的经济文化全球化进程, 分布各地的古老文化圈被逐渐连接起来, 进入海洋全球化时代^[1]。在漫长的海上交流过程中, 受航海条件限制和恶劣天气等影响, 大量船只沉没于航道沿线。

受海洋环境的影响, 研究和探索海底文物遗存往往比陆地上的文物遗迹面临更多的困难。水下机器人是水下探测与作业的重要工具之一, 在海洋科学研究、海底资源开发、水下工程作业和水下国防安全等方面有着广泛的应用。近年来, 随着水下考古事业的不断发展, 水下机器人越来越多地应用

到水下考古工作中, 水下考古专用机器人的研发工作也逐渐得到了世界各国的重视。本文梳理不同类型的水下机器人在水下考古工作中的应用, 分析并展望国内外相关水下考古机器人的研发与应用情况。

1 水下考古研究工作概况

1.1 水下考古工作主要内容

水下考古的主要对象为在迄今不少于100年的时间里, 周期性或持续位于水下的具有历史、文化价值的人类活动遗迹或具有考古价值的自然环

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1521704); 中国科学院青年创新促进会项目(2023386)

作者简介: 郭威, 研究员, 研究方向为水下机器人总体及控制技术, 电子信箱: guow@idsse.ac.cn; 徐高飞(通信作者), 高级工程师, 研究方向为深海自主无人装备及智能控制技术, 电子信箱: xugf@idsse.ac.cn

引用格式: 郭威, 徐高飞, 王敏健, 等. 水下考古机器人研究与应用进展[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 61-72;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.01101

境^[2]。根据《联合国海洋法公约》相关约定, 各国义务保护所管辖海域中发现的历史文物遗迹^[3], 在开展保护工作过程中需要确定水下历史文物遗迹的地点, 并且不间断地监测和保护这些地点^[4]。

典型的水下考古工作流程主要包括以下3个方面: (1) 在可能的海域探索并发现文物遗迹, 检测任何可能存在的沉船或其他遗址; (2) 对疑似文物遗迹进行现场调查, 确定水下文物遗迹的真实性, 对经过核实的文物遗迹进行测绘并记录具体地点和其他信息; (3) 定期对已知的水下文物遗迹进行检查和测绘, 通过与前期测绘结果进行对比来判断其保存状态, 根据实际需要在水下文物遗迹进行发掘打捞。

通常情况下, 水下考古工作的目标是进行原址保护, 尽量避免破坏水下文物遗迹的原有状态。在现场调查过程中, 需要尽量搜集有关文物遗迹的必

要信息, 建立档案并制作测绘图。

1.2 基于机器人的水下考古

目前, 深度 30 m 以内水域的考古工作通常由经过专业培训的潜水员来承担^[5], 但潜水作业风险较高, 难以实现大深度水域的长时间考古作业。位于海底的沉船遗迹是水下考古研究的重点之一, 沉船遗迹通常深度较大, 且具体位置难以确定, 需要在广阔的海域进行大范围搜索, 不借助深海装备的支持难以实现。自 20 世纪 90 年代以来, 随着水下机器人技术的进步, 考古工作者不断尝试基于水下机器人开展考古活动, 使用的装备主要包括遥操作水下机器人 (remotely operated vehicle, ROV)、载人潜水器 (human occupied vehicle, HOV) 和自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 等。目前, 有水下机器人参与的相关考古工作主要如表 1 所示。

表1 基于水下机器人的相关考古工作

使用的主要装备	国家	遗迹深度/m	开展作业年份	考古对象	地点
Deep drone system (ROV)	美国	70	1973	USS Monitor ^[6]	北卡罗来纳州海岸
P51 (HOV)	美国	60	1977	Capistello	地中海
Sea owl (ROV)	瑞典	459	1983	Vasa Vrouw Maria	波罗的海
ARGO (ROV)/ANGUS (ROV)	美国	3810	1985	RMS Titanic	北大西洋
Mini ranger (ROV)	美国	25	1986	steamship	新泽西州海岸
NR-1 (HOV)/Jason (ROV)	美国	818	1988	ISIS ^[7]	西西里海域
NR-1 (HOV)/Jason (ROV)	美国	800	1989	Skerki bank ^[8]	西西里海域
Jason (ROV)	美国	90	1990	Hamilton scourge	安大略湖
Hyball (ROV)/Eyeball (ROV)	挪威/俄罗斯	280	1994	Jedinorog ^[9]	特隆赫姆港
Magellan725 (ROV)	美国	4210	1995	Derbyshire ^[10]	冲绳海岸
Argus (ROV)/Hyball (ROV)	瑞典	60	1996	wooden boat	特隆赫姆港
Super Achille (ROV)/Remora2000 (HOV)	法国	60	1999	shipwreck	大里博德岛海域
Jason (ROV)	美国	400	1999	Phoenician shipwreck	地中海东部
Sperre sea eye (ROV)	希腊	50	1999	shipwreck investigation ^[11]	北斯波拉泽斯群岛海域
Argus (ROV)/Hercules (ROV)	瑞典	450	2000	Coastal wreck ^[12]	黑海
Magellan725 (ROV)	美国	2845	2001	H.M.S. Hood	丹麦海峡
C&C AUV/ROVs	美国	1524	2001	U-166 submarine	墨西哥湾
Hugin HUS (AUV)/ROVs	美国	1200	2002	AONA	墨西哥湾
NR-1 (HOV)/ROVs	美国	807	2002	Mica ^[13]	墨西哥湾
ZEUS (ROV)	—	518	2003	SS Republic	墨西哥湾
Sperre sub-fighter 30k (ROV)	挪威	170	2003	Ormen Lange ^[14]	挪威海

表1 基于水下机器人的相关考古工作(续)

使用的主要装备	国家	遗迹深度/m	开展作业年份	考古对象	地点
Triton XL 2500m (ROV)	美国	1964	2004	World War II ship-wreck	墨西哥湾
Seabed (AUV)/Super Achille (ROV)	希腊/美国	495	2005	Chios, Kythnos	爱琴海
Triton XLS 17 (ROV)/Sperre Sub-fighter 7500 (ROV)	美国	1220	2007	Mardi gras ^[15]	路易斯安那州海岸
Cirona (AUV)/Aster (AUV)	西班牙/法国	2000	2012	La Lune	土伦海岸
Hugin HUS (AUV)	挪威	700	2015	Skagerrak	斯卡格拉克海峡
海潜二号 (ROV)	中国	100	2015	致远舰	鸭绿江口
WROV (ROV)/SROV (ROV)	挪威	2200	2017	黑海水下考古	黑海
深海勇士号 (HOV)	中国	1003	2018	深海文物调查	西沙群岛
深海勇士号 (HOV)/奋斗者号 (HOV)	中国	2000~3000	2022	深海文物调查	南海北部
OceanOneK (ROV)	美国	40~852	2021—2022	地中海考古调查	地中海

由图1可见,相关工作主要集中在北美周边海域、地中海周边海域、北欧周边海域以及中国周边海域。历史上,墨西哥湾和地中海区域为航运密集和战争多发海域,目前已发现大量沉船,如Anona、U-166、Halo和Virginia等^[6]。Garrison对16—20世纪的沉船残骸进行统计分析发现,历史航行路线及主要港口和礁石附近,沉船数量显著增加^[17]。

1.3 水下机器人考古工作主要特点

早期水下考古工作中使用的装备主要是ROV和HOV。随着技术的进步,2000年后AUV在水下考古中的应用逐渐增加^[18]。综合来看,在装备的研发和应用方面,典型的水下考古项目特点如下^[19]。

1) 水下考古工作需要先进的技术支持,通常需要从多个国家或不同的海洋研究机构合作进行,

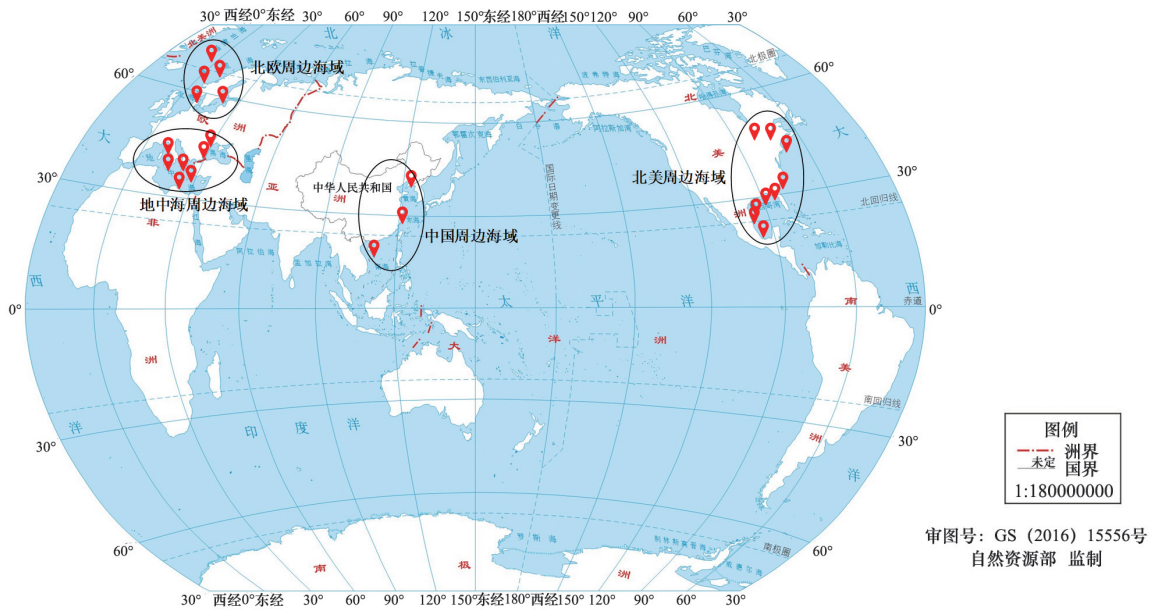


图1 基于深海装备的相关水下考古工作位置分布示意

如挪威特隆赫姆港水下考古项目、美国 Jason 水下考古项目、法国 VENUS 水下考古项目^[20]和意大利 TECSIS 水下考古项目^[21]等,都聚集了包括美国伍兹霍尔海洋研究所、法国国家海洋中心、意大利佛罗伦萨大学等多个国家的水下考古团队的共同参与。

(2) 水下考古工作需要使用专业的深海探测作业装备,一般引入大型商业公司参与,通过租赁设备或合作研发水下考古机器人来进行合作,如 Sperre 公司的 Sub-fighter 30k^[22]和 Sub-fighter 7500^[23]、Kongsberg 公司的 Hugin1000 HUS^[24]、Odyssey 公司的 ROV ZEUS^[25]和 SMIT 公司的 ROV Sea eye^[11]等。

(3) 水下考古项目通常成本巨大,而且需要探测的海域范围宽广,项目实施周期难以预估,导致需要的资金难以具体估算^[26]。受资金及技术的限制,导致了当前的水下考古项目主要集中在欧美和中国周边地区,在其他地区相对较少^[27]。

2 水下机器人考古工作应用

2.1 遥操作水下机器人

ROV 主要由能源系统、水面控制系统、光电复合缆和 ROV 本体组成,依据作业能力,一般可分为观察型与作业型 2 种。在水下考古作业中,观察型 ROV 主要用于水下遗迹的观察和拍摄,作业型 ROV 主要用于沉船残骸和掩埋文物的打捞。

观察型 ROV 一般配备有高性能摄像系统,能够辅助考古工作者建立完备的水下文化遗产考古档案,可为后续的文物打捞和发掘工作提供数据支持。作业型 ROV 配备有机械手和采样篮等设备,可实现水下文化遗产的采样作业。美国于 1983 年研制了 ROV Jason^[28-29],参与了 Titanic 沉船及德国 Bismarck 战舰的水下考古探测^[30]。目前参与过水下考古工作的主要 ROV 如图 2 所示,包括 Argus^[31]、Jason^[32]、WROV 和 SROV^[33]等。

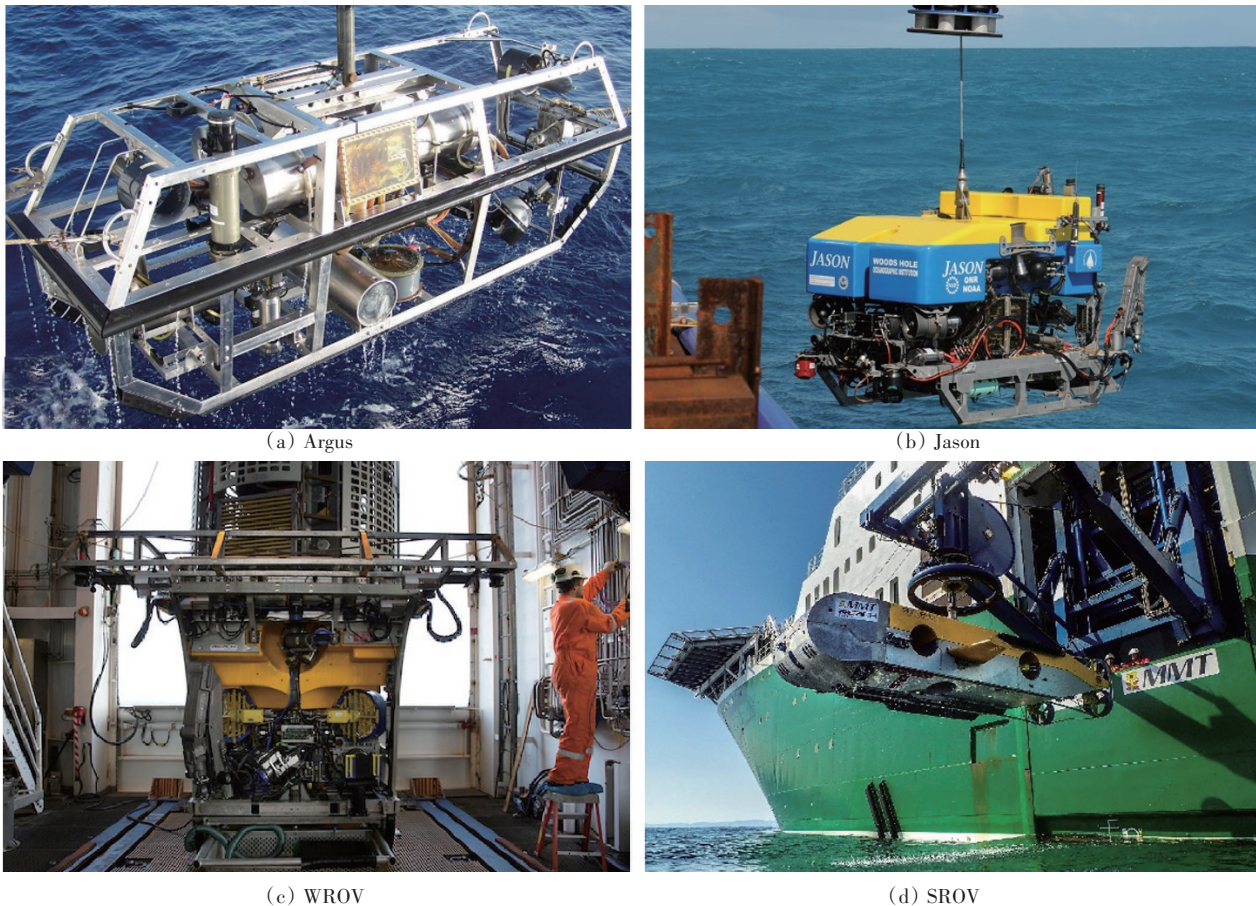


图2 参与过水下考古的 ROV

2.2 载人潜水器

HOV 在水下探测作业中有广泛的应用,1964 年,美国研制了用于水下考古的 Asherah 号,标志着 HOV 正式应用于深海考古作业^[34]。随着技术的不断发展,越来越多的国家开始建造 HOV 用于深海探测,而水下考古是其应用的一个重点领域^[35]。

美国于 1969 年研制了核动力的 NR-1 号 HOV^[36],主要用于海底地图测绘。1995 年, NR-1 发现了 Britannic 沉船。1997 年, NR-1 在埃及海岸沿线发现了 2 艘铁器时代的沉船。2002 年, NR-1 参与了密西西比峡谷地区的沉船考古调查^[37]。

1988 年 10 月,法国研制的 Cyana 号 HOV 在作业过程中发现 Arles IV 沉船,该沉船位于罗纳河口约 40 海里处,深度为 662 m。1993 年,法国 Nautilus 号 HOV 对该沉船开展了进一步调查。在调查过程中, Nautilus 号搭载摄像机,在沉船上约 3 m 高度进行拍摄,获得了近百张沉船照片。结合 Nautilus 号的定位信息,以分米级的精度确定了照片的空间

位置,重建了该沉船的立体影像。1993 年, Nautilus 号在法国土伦海岸发现了 1664 年沉没的法国海军战舰月亮号(La Lune)。2012 年,法国使用 2 台 AUV 对月亮号沉船进行了探测作业^[37],得到了更丰富的探测数据。为了更好地进行月亮号沉船的考古探测,法国与斯坦福大学合作开展了水下考古专用机器人 Ocean One 的研发工作^[38]。

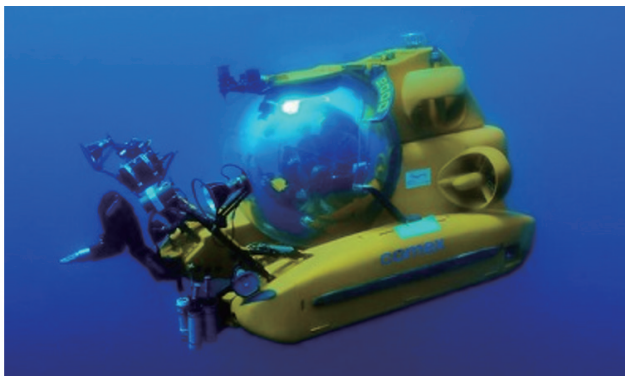
2018 年,中国科学院深海科学与工程研究所探索一号科考船搭载深海勇士号 HOV,在西沙群岛北礁海域开展了水下考古作业,将中国水下考古作业深度从几十米扩展到千米级,开启了中国水下考古事业的新篇章。2022—2023 年,探索一号和探索二号科考船分别搭载奋斗者号和深海勇士号载人潜水器,在南海北部海域开展了一系列水下考古探测工作,发现了多处具有重大考古价值的海底遗迹。目前参与过水下考古工作的主要 HOV 如图 3 所示,包括 NR-1^[39]、Nautilus^[40]、Remora^[41]和深海勇士号^[42]等。



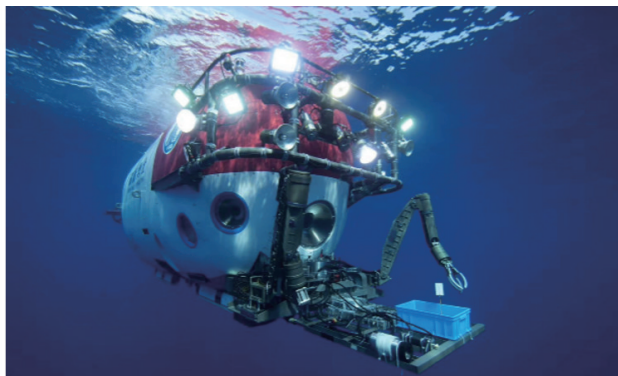
(a) NR-1



(b) Nautilus



(c) Remora



(d) 深海勇士号

图3 参与过水下考古的HOV

2.3 自主水下机器人

与ROV和HOV相比,AUV在水下大范围探测方面具有明显优势,在水下考古工作中受到越来越多的重视^[43]。2001年,中国CR-02号AUV在抚仙湖进行了水下古城探测^[44]。2012年,挪威的Hugin

系列AUV在挪威特隆赫姆港口参与了海底沉船调查^[45],2015年,Hugin AUV又在斯卡格拉克海峡进行了沉船调查^[46],充分证明了AUV在水下考古方面的巨大潜力。目前参与过水下考古工作的主要AUV如图4所示^[47-50]。

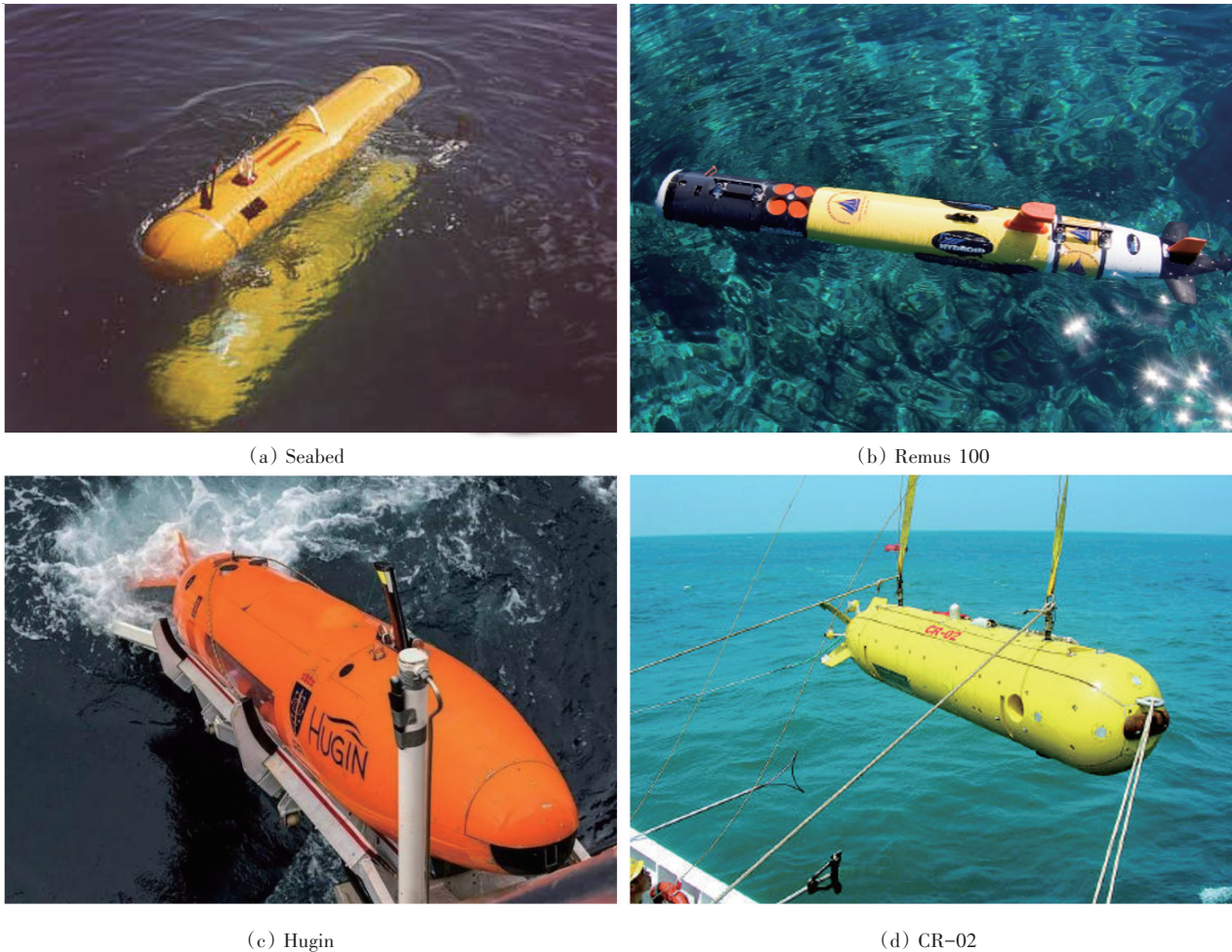


图4 参与过水下考古的AUV

随着应用需求的逐渐增多,研究人员开始设计专门用于水下考古的AUV。与常规AUV相比,水下考古AUV除了需要在应用便捷性、设备稳定性和研发成本等方面具有竞争力外,在水下航行能力和水下探测性能等方面还有着特殊的要求。

意大利佛罗伦萨大学在欧盟第七框架计划(7th Framework Program, FP7)世界海洋考古机器人系统(Archaeological Robot Systems for the World's Seas, ARROWS)项目支持下,研发了一款

名为MARTA(Marine Robotic Tool for Archaeology)的水下考古AUV(图5^[51])。MARTA的主要参数如表2所示,其采用模块化设计,模块之间通过标准电气接口连接,可以根据任务需求临时进行模块更换^[52]。MARTA搭载了声学 and 光学探测设备,声学设备为多波束前视声呐,用于获得海底声学图像。光学设备为立体视觉相机,与照明灯配合采集水下的光学图像信息。

除MARTA外,意大利还研制了Typhoon系列

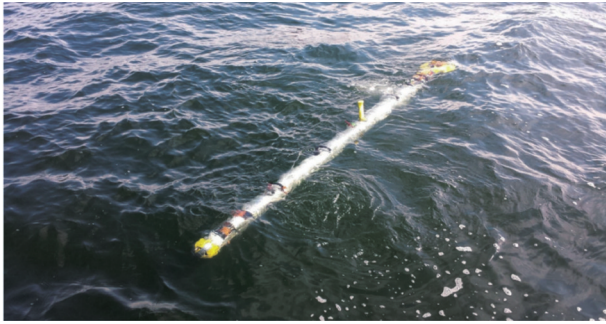


图5 MARTA水下考古AUV

表2 MARTA AUV主要参数

指标	参数
最大工作深度	150 m
长度	3.5 m
直径	177.8 mm
质量	80 kg
最大速度	4 knot
续航时间	4 h

水下考古AUV,用于执行水下文化遗产探测任务。Typhoon系列AUV的主要参数如表3所示,目前共有2台Typhoon系列AUV投入使用,分别为Tifone与Tiftu,两者可协同进行水下遗迹的声学 and 光学探测(图6^[53-54])。

表3 Typhoon系列AUV主要参数

指标	参数
最大工作水深	300 m
长度	3.6 m
直径	350 mm
质量	180 kg
最大速度	5~6 knot
续航时间	10 h



图6 Typhoon系列水下考古AUV

2020年,在国家重点研发计划项目支持下,国家文物局考古研究中心联合中国科学院深海科学与工程研究所等单位,共同开展了水下考古探测关键技术研究项目,并在项目支持下研制了文鳐号水下考古AUV(图7)。文鳐号AUV的主要参数如表4所示,其搭载了多波束前视声呐、侧扫声呐和摄像机等探测设备,主要用于执行水下文化遗产等目标的大范围快速搜索和近距离精细探测任务。

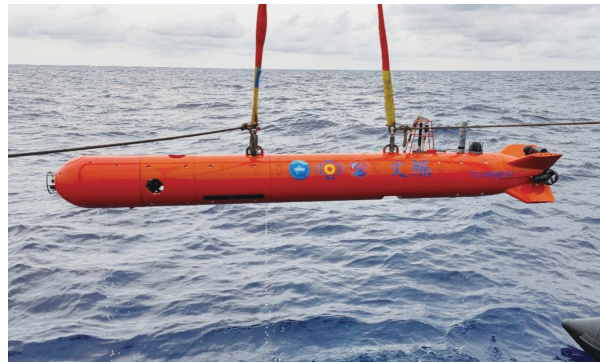


图7 文鳐号水下考古AUV

表4 文鳐号AUV主要参数

指标	参数
最大工作水深	1000 m
长度	3.6 m
直径	350 mm
质量	260 kg
最大速度	5 knot
续航时间	15 h

3 水下考古机器人发展趋势

3.1 水下考古机器人作业模式

随着水下考古作业范围的不断拓展,作业规模逐渐扩大,对作业效率的要求也越来越高。水下考古机器人的作业模式逐渐从传统的单一类型装备作业向多类型、多装备协同作业发展,多种装备的串行乃至并行作业,逐渐成为水下考古工作中的常态。

在串行作业过程中,通常先由科考船搭载大型声学设备进行大范围扫测,获取粗略的探测信息,确定可能存在水下遗迹的区域后,再通过AUV、ROV或HOV等开展进一步精细探查。在挪威特隆

赫姆港口沉船调查活动中^[55],首先由科考船搭载多波束测深系统对海底进行大范围探测,随后由Hugin AUV搭载合成孔径声呐进行探测。在此基础上,采用Remus 100 AUV搭载侧扫声呐以离底5 m的高度进行精细探测,获得了具有显著特征的声学图像,从而确定沉船的位置。后续考古作业团队又通过MINERVA号ROV进行了多次调查,最终获得了沉船遗址的三维模型和平面图等多方面测绘信

息。在U-166 战舰探测项目^[56]和挪威Falstabeten探测项目^[57]中,也采用了串行作业模式。

多装备并行作业能有效提高水下考古效率,在ARROWS项目中,采用了商业化AUV A-Size和仿生机器人U-CAT与MARTA协同作业^[58],提高对沉船内部区域的探测能力(图8)^[59-62]。在Typhoon系列AUV中,通过Tifone与Tiftu间协同作业提高定位能力^[63],以获得更高精度的水下遗迹探测信息。

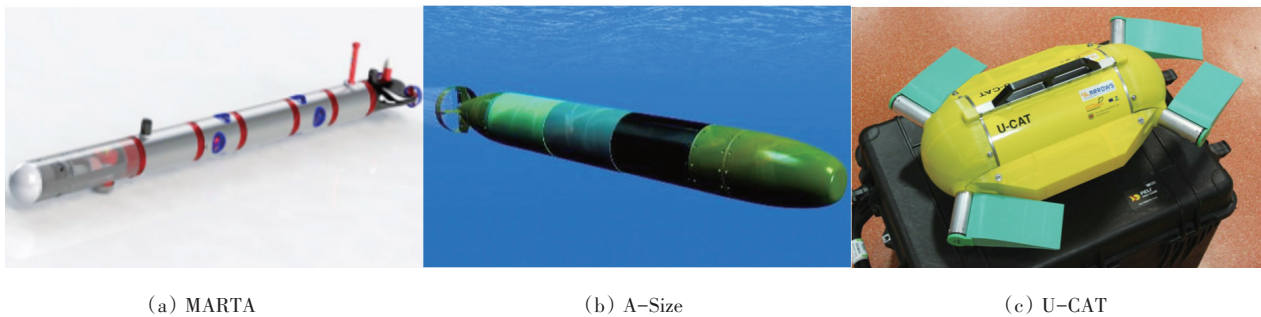


图8 ARROWS项目中协同作业的AUV

3.2 水下考古机器人作业功能

随着水下考古工作的不断深入,需要水下考古机器人完成的工作越来越复杂,作业难度逐渐增大,对水下考古机器人作业功能的要求也越来越高。水下考古机器人的作业功能逐渐从光学拍摄、声学探测或打捞作业向多种功能复合发展,新研发的水下考古机器人也逐渐突破传统AUV和ROV的界限,形成混合型水下考古机器人。

为更好地进行水下遗址探测,斯坦福大学机器人团队研制了名为Ocean One的仿人形水下考古机器人及其升级版Ocean One^K(图9^[64])。Ocean One系列水下考古机器人既能像AUV一样依靠自身携带的电池供电并独立执行水下作业任务,也能像ROV那样通过水面支持母船供电,与水面支持母船进行实时数据传输开展水下人机交互,并能够通过2个与人类手臂类似的机械手开展水下取样

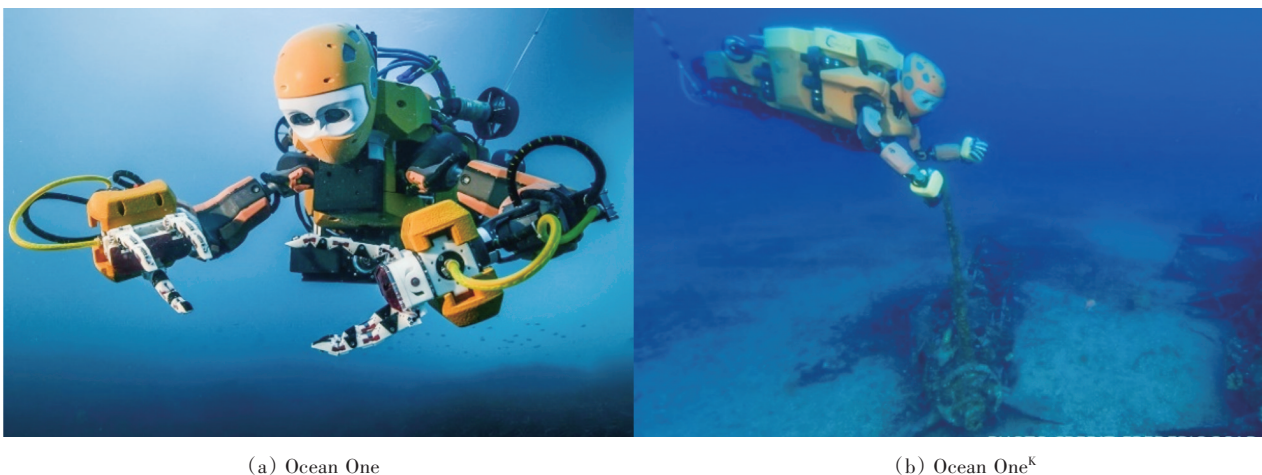


图9 OceanOne系列水下考古机器人

作业。最新一代的 Ocean One[®] 于 2021 年 9 月开展了一系列水下考古作业,分别在法国马赛、科西嘉岛和夏纳附近海域等区域执行了多项水下探测作业任务,探测目标包括水下 40 m 处的 P-38 飞机残骸、水下 124 m 处的 Le Protée 号潜艇、水下 334 m 处的 Aléria 罗马沉船和水下 507 m 的 Francesco Crispi 客轮等。

3.3 水下考古机器人智能化水平

随着各方面技术的不断进步,水下考古机器人的智能化水平也不断提高,通过智能控制算法的辅助实现水下考古作业质量和效率的提升,促进水下考古事业发展。

为尽量避免在探测和打捞过程中造成文物的破坏, Ocean One 系列水下考古机器人设计了触觉反馈系统和立体视觉系统,使机器人拥有与人类相似的触觉和视觉(图 10^[65])。 Ocean One 系列水下考古机器人的触觉和视觉能够通过仿真系统反馈给操作人员,使其在水下考古作业中具有身临其境的体验,能够直观感受到机械手抓取文物需要的力量 and 水的阻力,并看到机器人周围的物体。基于这种逼真的临场体验,水下考古工作人员能够做出更合理的操作决策。

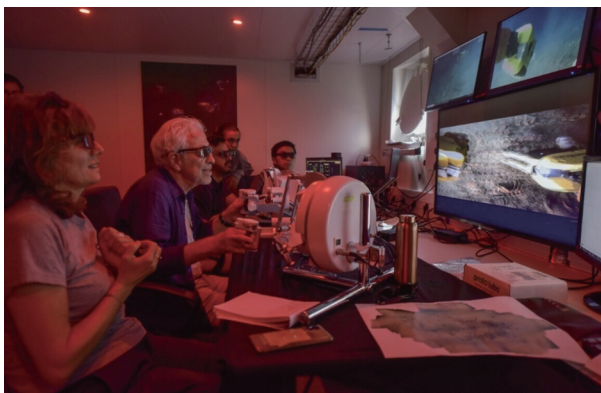


图 10 Ocean One[®] 人机交互系统

在水下考古机器人作业过程中,为获取更丰富、更高精度的探测信息,需要机器人能够在线识别探测过程中可能出现的文物遗迹并自主调整航行路径。为有效处理长时间水下探测过程中获得的海量声学 and 视觉探测数据以提高水下考古工作

效率,需要能够对探测数据进行智能化处理^[66-67]。为满足岛礁周边以及海底地形复杂区域的考古探测需求,需要水下考古机器人具有高精度的运动控制能力。为实现海底文物的有效提取和保护,需要水下考古机器人具有柔性抓取和自主作业能力。为保证海底长期作业的安全性,需要水下考古机器人具有作业状态在线监测能力^[68]。上述能力的实现,是水下考古机器人智能化水平提升的重点。

4 结论

得益于水下探测与作业技术的进步,水下考古尤其是深海考古工作近年来得到蓬勃发展。本文从水下考古工作的主要内容入手,介绍了基于水下机器人的相关考古工作情况,总结了不同类型水下机器人在考古工作中的典型应用,并分析了水下考古机器人相关技术的发展趋势。在作业模式方面,多装备协同作业已经成为提高水下考古作业能力和作业效率的主要手段。在作业功能方面,水下考古机器人的功能不断丰富和完善,新型装备不断涌现,逐渐打破现有水下机器人的分类界限。在智能化水平方面,基于虚拟现实的场景重建、自主文物目标识别、水下探测数据智能化处理、面向复杂作业环境的高精度运动控制、水下文物的自主柔性抓取以及水下机器人作业状态的在线监测等,逐渐成为水下考古机器人智能化水平提升的重点。随着水下考古工作的推进,未来将会有越来越多的新型水下考古机器人出现,以更强的作业能力和更高的工作效率,促进水下考古事业的高质量发展。

参考文献(References)

- [1] 吴春明. 从沉船考古看海洋全球化在环中国海的兴起[J]. 故宫博物院院刊, 2020(5): 43-70, 110.
- [2] 魏旭. 浅谈水下文化遗产调查[J]. 常州文博论丛, 2017(1): 125-127.
- [3] 蒂斯·马尔拉维尔德, 乌吕克·格林, 芭芭拉·埃格. 水下文化遗产行动手册: 联合国教科文组织 2001 年《保护水下文化遗产公约》附件之指南[M]. 国家文物局水下文化遗产保护中心, 译. 北京: 文物出版社, 2013: 13-46.
- [4] Bjørnø L. Underwater acoustic measurements and their ap-

- plications[M]. New York: Elsevier, 2017: 889–947.
- [5] Arnold J B III, Oertling T J, Hall A W. The Denbigh Project: Initial observations on a Civil War blockade-runner and its wreck-site[J]. *International Journal of Nautical Archaeology*, 1999, 28(2): 126–144.
- [6] Boshoff J, Barstad J F, Ruppe C V. International handbook of underwater archaeology[J]. *The South African Archaeological Bulletin*, 2003, 58(177): 38.
- [7] Ballard R D, McCann A M, Yoerger D, et al. The discovery of ancient history in the deep sea using advanced deep submergence technology[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, 47(9): 1591–1620.
- [8] Adams J. Alchemy or science? Compromising archaeology in the deep sea[J]. *Journal of Maritime Archaeology*, 2007, 2(1): 48–56.
- [9] Jasinski M E, Sortland B, Soreide F. Applications of remotely controlled equipment in Norwegian marine archaeology[C]//*Proceedings of 'Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference Proceedings. Oceans '95 MTS/IEEE*. Piscataway, NJ: IEEE, 1995: 566–572.
- [10] Mearns D L. Search for the bulk carrier Derbyshire: Unlocking the mystery of bulk carrier shipping disasters [C]//*Proceedings of SUT Man-Made Objects on the Seafloor 1995*. London, UK: SUT, 1995: 95–103.
- [11] Delaporta K, Jasinski M E, Soreide F. The greek-norwegian deep-water archaeological survey[J]. *International Journal of Nautical Archaeology*, 2006, 35(1): 79–87.
- [12] Coleman D F, Ballard R D, Gregory T. Marine archaeological exploration of the Black Sea[C]//*Proceedings of Oceans 2003*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2003: 1287–1291.
- [13] Jones T N. The investigation and excavation of a deepwater shipwreck in the gulf of Mexico[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2002, 36(3): 51–54.
- [14] Soreide F, Jasinski M E. Ormen Lange: Investigation and excavation of a shipwreck in 170m depth[C]//*Proceedings of Oceans 2005* Washington DC, USA: IEEE, 2005: 2334–2338.
- [15] Ford B, Borgens A, Hitchcock P. The 'mardi gras' shipwreck: Results of a deep-water excavation, gulf of Mexico, USA[J]. *International Journal of Nautical Archaeology*, 2010, 39(1): 76–98.
- [16] Church R A, Warren D J. The 2004 deep wrecks project: Analysis of world war II era shipwrecks in the gulf of Mexico[J]. *International Journal of Historical Archaeology*, 2008, 12(2): 82–102.
- [17] Garrison E G. A diachronic study of some historical and natural factors linked to shipwreck patterns in the northern gulf of Mexico[M]. USA: Springer US, 1998: 303–316.
- [18] Bellingham J G. New oceanographic uses of autonomous underwater vehicles[J]. *Marine Technology Society Journal*, 1997, 31(3): 34–47.
- [19] Søreide F. Cost-effective deep water archaeology: Preliminary investigations in Trondheim Harbour[J]. *International Journal of Nautical Archaeology*, 2000, 29(2): 284–293.
- [20] Momma H, Iwase R, Kawaguchi K, et al. The VENUS project—instrumentation and underwater work system[C]//*Proceedings of 1998 International Symposium on Underwater Technology*. Piscataway, NJ: IEEE, 1998: 437–441.
- [21] Meo G B. The HMI of an experimental underwater vehicle for archeological survey, inspection and remote touring of important submarine sites and finds[C]//*Proceedings of Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04* (IEEE Cat. No. 04CH37600). Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 818–821.
- [22] Soreide F, Jasinski M E, Sperre T O. Unique new technology enables archaeology in the deep sea[J]. *Sea Technology*, 2006, 47(10): 10–13.
- [23] Nornes S M, Ludvigsen M, Ødegard Ø, et al. Underwater photogrammetric mapping of an intact standing steel wreck with ROV[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2015, 48(2): 206–211.
- [24] Pedersen O P, Gaardsted F, Lågstad P, et al. On the use of the HUGIN 1000 HUS Autonomous Underwater Vehicle for high resolution zooplankton measurements[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2010, 3(1): 17–25.
- [25] Dobson N C. Developmental deep-water archaeology: A preliminary report on the investigation and excavation of the 19th-century side-wheel steamer SS republic, lost in a storm off savannah in 1865[C]//*Proceedings of Oceans 2005 MTS/IEEE*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 1761–1769.
- [26] Foley B P, Dellaporta K, Sakellariou D, et al. The 2005 Chios ancient shipwreck survey: New methods for underwater archaeology[J]. *Hesperia the Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, 2009, 78(2): 269–305.
- [27] Khalil E, Mustafa M. Underwater archaeology in Egypt [M]. Boston, MA: Springer US, 2002: 519–534.
- [28] Ballard R D. The MEDEA/JASON remotely operated vehicle system[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(8): 1673–1687.
- [29] Bingham B, Mindell D, Wilcox T, et al. Integrating precision relative positioning into JASON/MEDEA ROV oper-

- ations[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2006, 40(1): 87–96.
- [30] Michel J L, Ballard R D. The RMS Titanic 1985 discovery expedition[C]//*Proceedings of Oceans'94*. Piscataway, NJ: IEEE, 1994: 132–137.
- [31] Viola T. ROV Argus[EB/OL]. (2016–12–16)[2024–01–10]. <https://nautiluslive.org/tech/rov-argus>.
- [32] Woods Hole Oceanographic Institution. ROV Jason/Medea [EB/OL]. (2019–01–01) [2024–01–10]. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/ndsf-jason>.
- [33] Pacheco–Ruiz R, Adams J, Pedrotti F, et al. Deep sea archaeological survey in the Black Sea–Robotic documentation of 2, 500 years of human seafaring[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 152: 103087.
- [34] Bass G F. The Asherah: A submarine for archaeology[J]. *Archaeology*, 1965, 18(1): 7–14.
- [35] 李勇航, 温明明, 陈宗恒, 等. 水下考古地球物理技术进展、挑战及建议[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 191–201.
- [36] Ballard R D, Stager L E, Master D, et al. Iron age shipwrecks in deep water off ashkelon, Israel[J]. *American Journal of Archaeology*, 2002, 106(2): 151–168.
- [37] Gracias N, Ridao P, Garcia R, et al. Mapping the Moon: Using a lightweight AUV to survey the site of the 17th century ship 'La Lune'[C]//*Proceedings of MTS/IEEE Oceans–Bergen*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1–8.
- [38] Khatib O, Yeh X, Brantner G, et al. Ocean one: A robotic avatar for oceanic discovery[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(4): 20–29.
- [39] 王行舟. 美国最小的核潜艇: NR-1号[EB/OL]. (2018–09–05)[2024–01–10]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/43844839>.
- [40] IFREMER. Nautilé[EB/OL]. (2016–07–22)[2024–01–10]. https://www.flotteoceanographique.fr/var/storage/images/_aliases/c_slideshow-carousel_embed_page/medias-ifremer/medias-flotte/sous-marins-visuels/mediasnautilé/campagne-ghass22/1898876-1-fr-FR/Campagne-GHASS2.jpg.
- [41] David. Remora[EB/OL]. (2015–03–22) [2024–01–10]. <https://adml.jimdofree.com/r%C3%A9alisations/sous-marin/remora-2000>.
- [42] 中国科学院沈阳自动化研究所. 机器人学国家重点实验室研制的控制系统助力“深海勇士”号海试圆满成功[EB/OL]. (2018–01–08)[2024–01–10]. http://rlab.sia.cn/xwxx/kydt/201801/20180108_393170.html.
- [43] Jasinski M E, Sørreide F, Kristiansen S. VETIS: A survey tool for marine archaeology[C]//*Proceedings of Fourth Underwater Science Symposium 1997*. Newcastle upon Tyne, UK: SUT, 1997: 27–33.
- [44] 庞博. 水下机器人与考古[J]. *中国海事*, 2016, 130(5): 77–78.
- [45] Odegaard O T, Pedersen O P. ANCOR II processing and visualization software applied to Barents Sea ADCP and CTD data acquired by the HUGIN 1000 HUS AUV[C]//*Proceedings of Oceans 2010 MTS/IEEE SEATTLE*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1–9.
- [46] Ødegård Ø, Hansen R E, Singh H, et al. Archaeological use of Synthetic Aperture Sonar on deepwater wreck sites in Skagerrak[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2018, 89: 1–13.
- [47] Singh H, Eustice R, Roman C, et al. The Seabed AUV–A platform for high resolution imaging[J]. *Unmanned Underwater Vehicle Showcase*, 2002, 13: 102–104.
- [48] Oceanographic Systems Lab. REMUS 100[EB/OL]. (2004–10–22)[2024–01–10]. <https://www2.whoi.edu/site/osl/vehicles/remus-100>.
- [49] Kongsberg Discovery. HUGIN Autonomous Underwater Vehicle[EB/OL]. (2016–01–22) [2024–01–10]. <https://www.kongsberg.com/discovery/autonomous-and-uncrewed-solutions/hugin>.
- [50] 新浪. 6000米水下它轻松探宝[EB/OL]. (2006–11–30) [2024–01–10]. <https://news.sina.com.cn/o/2006-11-30/074410644961s.shtml>.
- [51] Ridolfi A, Spaccini D, Fanelli F, et al. An autonomous underwater vehicle and SUNSET to bridge underwater networks composed of multi–vendor modems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2018, 46: 295–303.
- [52] Allotta B, Baines S, Bartolini F, et al. Design of a modular Autonomous Underwater Vehicle for archaeological investigations[C]//*Proceedings of Oceans 2015 Genova*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1–5.
- [53] Allotta B, Caiti A, Costanzi R, et al. Cooperative navigation of AUVs via acoustic communication networking: Field experience with the Typhoon vehicles[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(7): 1229–1244.
- [54] Allotta B, Bartolini F, Caiti A, et al. Typhoon at Comms–Net13: Experimental experience on AUV navigation and localization[J]. *Annual Reviews in Control*, 2015, 40: 157–171.
- [55] Ødegård Ø, Sørensen A J, Hansen R E, et al. A new method for underwater archaeological surveying using sensors and unmanned platforms[J]. *IFAC Papers On Line*, 2016, 49(23): 486–493.
- [56] Warren D J, Church R A, Eslinger K L. Deepwater archaeology with autonomous underwater vehicle technology[C]//*Proceedings of Offshore Technology Conference*

2007. Houston, TX, USA: OTC, 2007: 1–12.
- [57] Ludvigsen M, Johnsen G, Sørensen A J, et al. Scientific operations combining ROV and AUV in the Trondheim fjord[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2014, 48(2): 59–71.
- [58] Allotta B, Costanzi R, Ridolfi A, et al. The ARROWS project: Robotic technologies for underwater archaeology [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 364(1): 012088.
- [59] Allotta B, Costanzi R, Ridolfi A, et al. The ARROWS project: Adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2015, 48(2): 194–199.
- [60] Allotta B, Costanzi R, Magrini M, et al. Towards a robust system helping underwater archaeologists through the acquisition of geo-referenced optical and acoustic data[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Systems, ICVS 2015*. Copenhagen, Denmark: Springer, 2015: 253–262.
- [61] Lockheed Martin. A-Size Autonomous Underwater Vehicles[EB/OL]. (2019-04-22) [2024-01-10]. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/a-size-autonomous-underwater-vehicles.html>.
- [62] Lockheed Martin. U-CAT[EB/OL]. (2015-04-23) [2024-01-10]. <http://www.mforum.ru/news/article/111575.htm>.
- [63] Caiti A, Calabro V, Di Corato F, et al. Thesaurus: AUV teams for archaeological search. Field results on acoustic communication and localization with the Typhoon[C]//*Proceedings of 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 857–863.
- [64] Khatib O. Ocean One Lands on the moon[EB/OL]. (2016-08-17) [2024-01-10]. <https://cs.stanford.edu/group/manips/ocean-one.html#media>.
- [65] Khatib O. Ocean One^s[EB/OL]. (2016-08-17)[2024-01-10]. <https://cs.stanford.edu/group/manips/ocean-one-k.html>.
- [66] Xu G F, Zhou D X, Yuan L B, et al. Vision-based underwater target real-time detection for autonomous underwater vehicle subsea exploration[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1112310.
- [67] Yang Y T, Liang W, Zhou D X, et al. Object detection for underwater cultural artifacts based on deep aggregation network with deformation convolution[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(12): 2228.
- [68] Xu G F, Guo W, Zhao Y, et al. Online learning based underwater robotic thruster fault detection[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3586.

Research and application progress of underwater archaeological vehicles

GUO Wei¹, XU Gaofei^{1*}, WANG Minjian², LI Bin³, GAO Sen¹, YUAN Bo¹

1. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

2. Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 201210, China

3. National Centre for Archaeology, Beijing 100013, China

Abstract With precious historical value, underwater cultural relics play an important role in safeguarding national maritime rights and interests. As the main tool for detecting underwater cultural relics, underwater archaeological vehicle is widely applied in underwater archaeological work. Based on the specifics of underwater archaeological work, typical operation process and existing work of underwater archaeology, the main characteristics of underwater archaeology work are summarized. Starting from general-purpose underwater robot, the main features of remotely operated underwater vehicle, manned submersibles and autonomous underwater vehicle and their typical applications in underwater archaeology are categorized, and the specifics of special robots for underwater archaeology in China and other countries are introduced in detail. Finally, the development trend of underwater archaeology vehicles is analysed from aspects such as operation mode, operation function and intelligence level, providing reference for the subsequent development of underwater archaeology vehicles.

Keywords underwater archaeology; remotely operated underwater vehicle; human occupied vehicle; autonomous underwater vehicle ●



(责任编辑 傅雪)