

【引用格式】高永宁. 水下航行器布放与回收现状及关键技术综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (4): 437-444.

# 水下航行器布放与回收现状及关键技术综述

高永宁<sup>1</sup>, 周欢思<sup>2,\*</sup>

(1. 宜昌测试技术研究所, 湖北 宜昌 443003;  
2. 海军装备部, 湖北 宜昌 443003)

**摘要** 水下航行器布放回收技术是航行器执行探测或监视等作业的重要环节, 其技术水平直接影响作业效率与安全性。系统地分析了当前水下航行器布放回收的技术现状、存在问题。对于水面回收方面, 当前技术已相对成熟, 但仍面临高海况适应性不足的问题; 水下回收技术不受水面复杂海洋环境的干扰, 在水下自主对接、定位导引和锁紧、高压密封、安全保障、通用化和无人化、流程化应用等方面存在显著技术瓶颈。通过梳理现状和关键技术及发展趋势, 为水下航行器布放回收技术的优化升级提供了理论参考, 对推动我国海洋装备技术的发展具有重要意义。

**关键词** 水下航行器; 布放回收; 海况适应性; 水下回收

**中图分类号** T19 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)04-0437-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.04.007

## Review of Current Status and Key Technologies of Underwater Vehicle Deployment and Recovery

GAO Yongning<sup>1</sup>, ZHOU Huansi<sup>2,\*</sup>

(1. Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang 443003, China;  
2. Navy Equipment Department, Yichang 443003, China)

**Abstract** Deployment and recovery technology is an important part for underwater vehicles to perform missions such as detection and surveillance, and its technical level directly affects the efficiency and safety of these operations. In this paper, the current technical status and existing problems associated with the deployment and recovery of underwater vehicles are systematically analyzed. The current surface recovery technology is relatively mature, but it still faces the problem of insufficient adaptability in high sea conditions. Underwater recovery technology is not disturbed by the complex marine environment of the water surface. However, there are significant technical bottlenecks in underwater autonomous docking, positioning guidance and locking, high-pressure sealing, safety assurance, generalization and unmanned operation, and process-oriented application. By analyzing the current situation and key technologies and development trends, this paper provides a theoretical reference for the optimization and upgrading of underwater vehicle deployment and recovery technology, which is of great significance for promoting the development of marine equipment technology of our country.

**Key words** underwater vehicle; deployment and recovery; sea state adaptability; underwater recovery

收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 高永宁 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水下航行器系统集成及布放回收技术研究。

\*共同第一作者: 周欢思 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事水中兵器和水声设备研究。

## 0 引言

随着国家对海洋工程和海军装备的重视以及装备现代化、无人化的要求,水下航行器产业取得了前所未有的发展<sup>[1]</sup>,水下航行器技术也在资源勘探、油气设施维护、生态研究、环境监测及军事国防领域发挥了重大作用。不管是军用或民用,水下航行器产品布放回收的安全性、便捷性一直是人们极其关注的。水下航行器每一次的下水作业都离不开布放回收,布放回收的顺利与否直接影响到水下航行器产品本身的安全、操作人员的安全和航行任务的成败。本文梳理了当前布放回收的不同方法,分析和探讨了不同布放回收技术的特点,并结合技术不断的发展、迭代对未来水下航行器的布放回收技术进行了展望。

## 1 当前情况

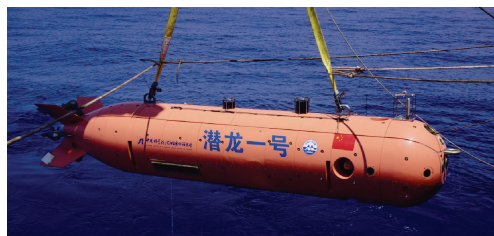
根据不同的作业场景和实际条件,国内外研究者提出了多种水下航行器的布放回收方案,根据水上、水下、有人或无人等情况,进行了总结分类如下:岸基布放回收(水上有人)、水面(有人/无人)布放回收、水下(无人)回收技术等,根据回收用平台分有水面有人舰船、无人艇平台、潜艇/大型航行器等平台类回收、布放水下航行器。

### 1.1 岸基布放回收

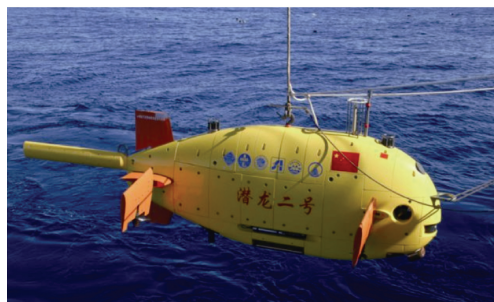
水面布放回收水下航行器是当前应用最为广泛的方法,也是最为成熟的技术,其布放回收系统组成有甲板起吊装置(有吊臂起重机、A型框架式布放回收系统等)、辅助布放回收工具等。如图1所示,我国沈阳自动化研究所潜龙系列航行器吊放过程中采用简易的吊带和绳索完成,绳索主要辅助解决吊放过程中的晃动问题,但这种方式不能实现自动脱钩、挂钩,需要专业作业人员潜入水中进行挂钩或者脱钩,对操作人员的技能要求较高,且安全性极低,遇到海况较差时,很难实现布放回收工作。

为了解决布放后便于脱钩/挂钩的工作,辅助布放回收工具成了研究者的关注焦点之一。李弘华<sup>[2]</sup>结合实际工作经验提出一种专用布放回收器,主要由打捞钩、旋转支撑板、锁紧解脱机构、打捞

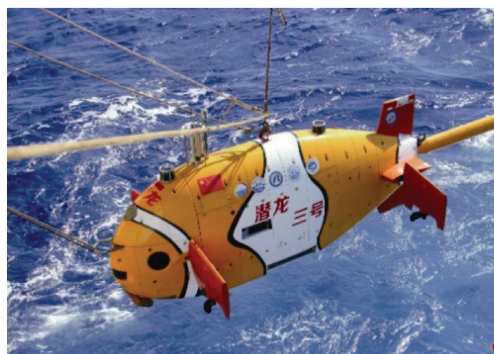
杆、连接钢索、释放绳索组成,如图2所示,操作人员利用打捞钩/杆进行吊放前后的水下航行器起吊环的脱钩/挂钩。该方法经过应用验证,技术可行,成本低,解决了需要下水作业的难题。



(a) “潜龙一号”吊放示意



(b) “潜龙二号”吊放示意



(c) “潜龙三号”吊放示意

图1 潜龙系列航行器吊放图片

Fig. 1 Hoisting images of Qianlong series AUVs

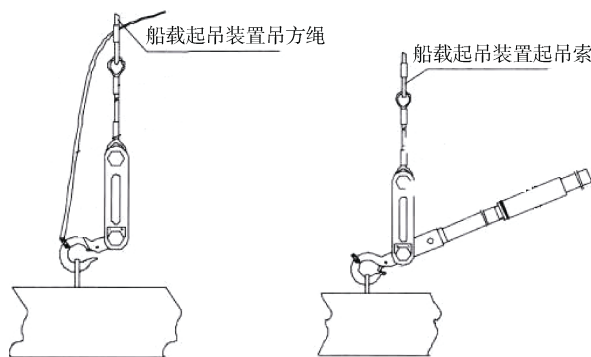


图2 专用布放回收器布放、回收示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deployment and recovery by dedicated deployment and recovery device

笔者针对水下航行器布放回收过程中脱钩/挂钩问题, 并结合水下航行器结构总体设计的实际, 提出了2种方案, 分别为机械式专用布放回收装置和遥控插销式专用布放回收装置, 如图3和图4所示。机械式专用布放回收装置针对水下航行器航行器上部起吊点为突起的起吊环而设计, 主梁结构下部设置适应航行器起吊环的内凹三角结构, 布放回收时岸基操控人员拉动绳索解脱锁销结构(使锁销处于打开状态), 后使布放回收装置套进航行器起

吊环, 岸基操控人员松开绳索, 锁销结构处于关闭工作状态, 即可用于布放回收作业。遥控插销式专用布放回收装置<sup>[3]</sup>, 采用电动插销的方案, 由电机驱动连杆机构从而带动4个同时转销转动( $\pm 90^\circ$ ), 实现布放回收装置与水下航行器的脱钩/挂钩, 主梁结构底部与航行器接触的位置设置接近开关, 用于检测航行器与主梁之间的间距, 确保可以实现锁钩。以上2种方案在海况较差时, 水面回收锁钩操作难度较大。

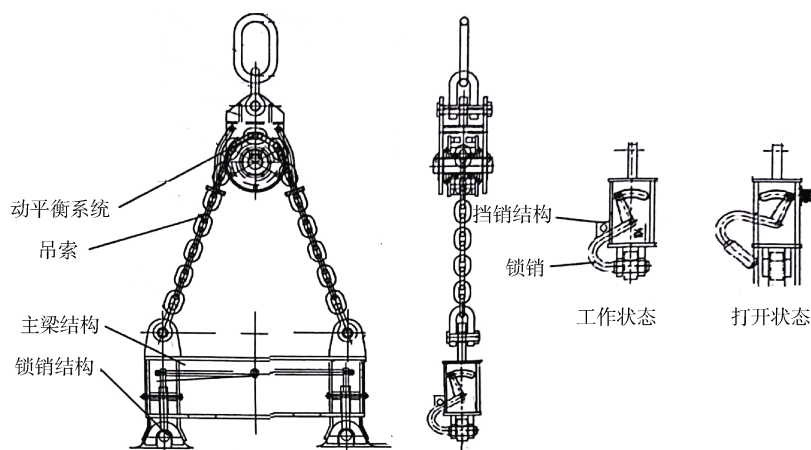


图3 机械式专用布放回收装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mechanical deployment and recovery device

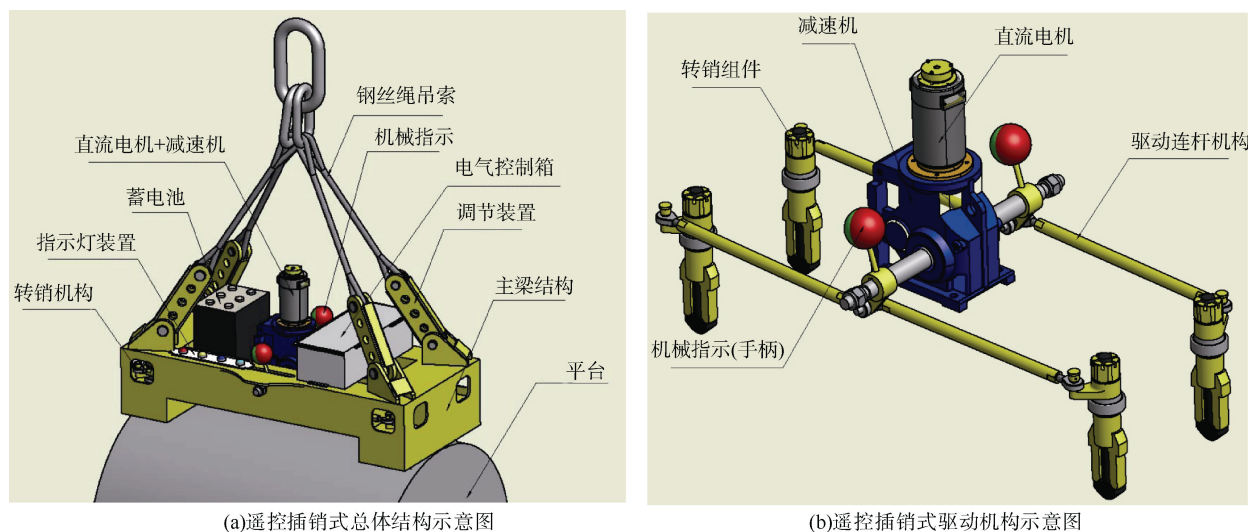


图4 遥控插销式专用布放回收装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of remote-controlled pin-type deployment and recovery device

鲁德泉<sup>[4]</sup>在“蛟龙”号载人潜水器的布放回收系统中通过主绞车的主吊缆和万向架的锁紧装置悬挂在回转梁的底部, 如图5所示。2个抗纵摇油缸的一端固定在门架横梁上, 另一端固定在回转梁

上, 当A形架摆动或海况较差时, 回转梁和潜水器在布放过程中可具有纵向的自稳定能力, 有效解决海况差时布放回收系统(含航行器)摇晃幅度大的问题。



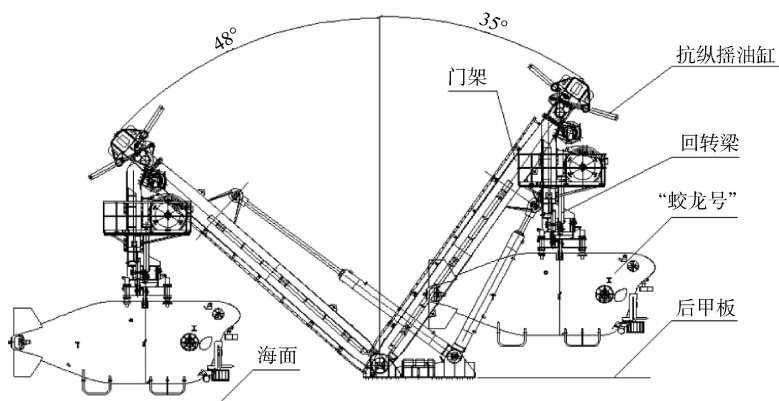


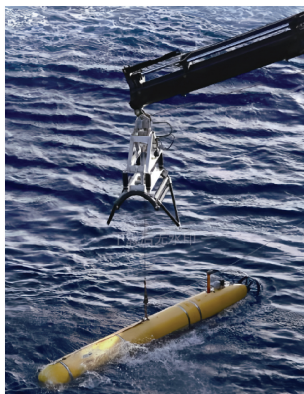
图 5 “蛟龙”号载人潜水器的布放回收系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deployment and recovery system of Jiaolong manned submersible

美国“金枪鱼”-21 (Bluefin-21) 航行器布放回收系统<sup>[5]</sup>技术较为成熟,布放与回收相对较为方便、可靠,具备防摇晃功能,采用鼻形线缆释放组件以辅助拖曳与回收,借助甲板起吊装置实现航行器的布放或回收。如图 6 所示,2020 年,美国海军 ICEX2020 军事演习期间,在北极圈的冰层下进行测试和回收航行器。



(a) Bluefin-21 吊装示意图



(b) Bluefin-21 布放示意图

图 6 Bluefin-21 航行器布放回收系统图

Fig. 6 Bluefin-21 AUV deployment and recovery system

总而言之,岸基布放回收存在系统结构简单,成本低、便于操作的特点,但对于海况较差的情况下,因水面浪涌大,水下航行器航行器受到的水波动较大,回收挂钩和航行器的防护较为困难。

## 1.2 水面布放水回收

近年来,因 USV 技术的成熟,利用 USV 作为平台搭载布放回收系统,实现水下航行器的水面布放、水中回收已经成为了行业研究热点<sup>[6]</sup>。该技术的应用为实现海上作业少人化、无人化奠定了基础,USV 作为无人平台,可以较为便捷地到达较为危险的水域,提高了布放回收的安全性。基于 USV 水面布放的原理同岸基布放类似,本文不做赘述,本章节重点研究国内外水下回收技术按照结构形式不同,基于 USV 的水下回收方式主要有入坞式、绳索捕捉式、大型平台等。

### 1) 入坞式水下回收。

USV 释放带有导向罩的拖曳装置,如图 7 所示,拖曳装置稳定航行在预定深度,水下航行器通过导引航行至导向罩或坞站后,完成入坞与锁紧限位,然后 USV 通过绞车机构完成对拖曳装置和 underwater 航行器的回收。其优点在于导向罩具有倒锥形结构特点,对水下航行器回收起到较好的导向作用,拖曳回收过程中可以用来保护航行器。“海德罗伊德”(Hydroid)公司<sup>[7]</sup>利用“雷姆斯”(REMUS)航行器进行了水下对接回收技术研究,利用航行器集成的水声定位系统估计坞站的位置,然后经过徘徊-拦截-跟踪-对接 4 个步骤进入坞站并锁紧。哈尔滨工程大学利用光视觉、声学



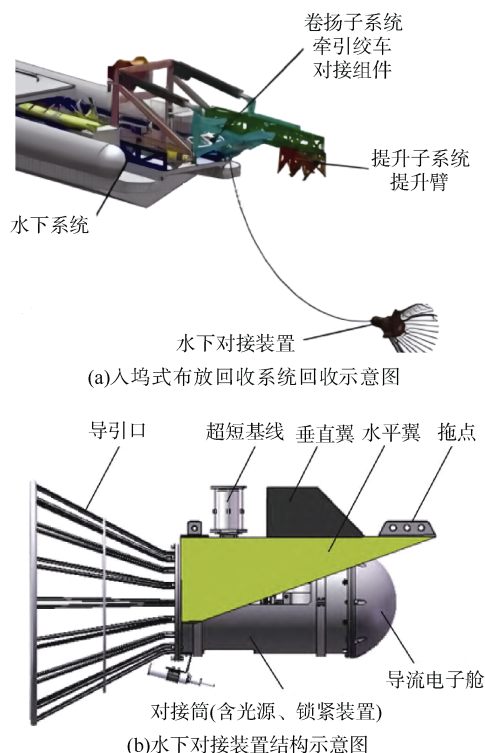


图 7 入坞式布放回收系统图

Fig. 7 Diagram of docking-type deployment and recovery system

导引技术进行水下对接, 导引回收实验, 并将技术应用于 500 kg 的水下航行器, 验证了回收方案的可行性<sup>[8]</sup>。浙江大学设计小型锥形坞站, 包括转向

机构、辅助设施和锁定装置, 对“海豚 II”在入坞过程中与坞站的影响进行了研究<sup>[9]</sup>。

## 2) 绳索(杆)捕捉式水下回收。

绳索捕捉式水下回收技术基于集成在 USV 尾部的捕捉式回收装置, 在回收过程中, 卷绳绞车释放使绳索终端的稳定翼处于水下设定位置, 待回收的水下航行器通过自身的导引和捕捉手段获取绳索的位置并通过其头部的捕获装置完成对绳索的捕捉, 捕捉到位后卷绳绞车回收绳索使水下航行器浮出水面, 完成回收。“伍兹·霍尔”(Woods Hole)海洋研究所和 MIT 在 2001 年研制了 Odyssey II 捕捉式对接装置<sup>[10]</sup>。如图 8 所示, 对接机构由捕捉机构和弹簧触发夹紧机构组成。在进行对接时, 水下航行器通过艏部的“V”形机构对定位杆进行捕捉, 再通过对接装置的锁紧机构完成水下航行器位置的调整和固定, 最终实现对接目的, 对接基站设计水深为 3 500 m, 能够满足深海应用的要求。2001 年, 法国赛博耐特 (Cybernetix) 公司为“自游者”(Swimmer) AUV 搭载的“自主轻型干预航行器”(ALIVE) 号 AUV 研制了对接基站<sup>[11]</sup>, ALIVE 前端携带一组可伸缩的对接机械手, 对接时机械手抓取 T 形对接架, T 形对接架的优势在于可以限制移动和转动的自由度。



(a) 绳索捕捉式水下回收示意图



(b) 绳索捕捉式回收后拖曳回港示意图

图 8 绳索捕捉式水下回收图

Fig. 8 Rope capturing-type underwater recovery

## 3) 大型平台回收技术。

水下大型平台回收技术分潜艇平台回收或大型水下航行器平台回收, 根据使用工况分平台内部搭载回收技术和外部搭载回收技术。潜艇平台回收主要应用于军事领域, 利用潜艇鱼雷发射管改装

后, 基于发射管内部的机械臂将航行器抓取至鱼雷发射管, 自动实现回收过程<sup>[12]</sup>, 如图 9 所示。这种方式改进的结构均在潜艇内部, 对水下航行器进行改造, 因此不会影响航行过程, 受海况影响小, 隐蔽性强。

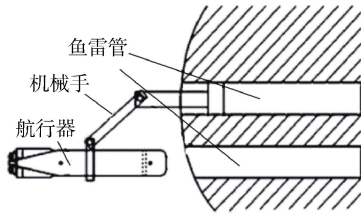


图 9 潜艇鱼雷发射管水下回收示意图

Fig. 9 Schematic diagram of underwater recovery from submarine torpedo tube

在潜艇或大型水下航行器平台的顶部设计外露式平台, 平台上部具备声波发射器, 与待回收的航行器顶部的超短基线进行通讯, 导引水下航行器朝着回收平台方向航行, 利用回收平台上部的捕捉、锁定机构, 对航行器的回收过程捕捉锁紧。典型代表为日本“海岛”(Marinebird)水下对接系统, 结构原理同图 10 所示, 利用平台具备基本的导引、对接、锁定功能完成对接后进行水下充电。需要回收时, 大型搭载平台直接携带水下航行器回港。

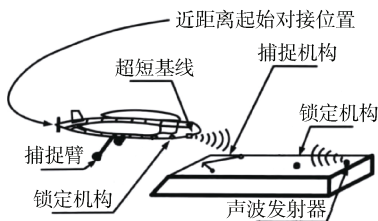


图 10 外部搭载回收技术示意图

Fig. 10 Schematic diagram of external recovery technology

综上所述, 随着科学技术的发展以及科技工作者们对水下航行器布放回收技术的深入研究, 各种布放回收技术的应用也不断发展。根据布放回收技术的特点 (如表 1 所示), 水下无人布放回收技术更加符合当代装备无人化的需求。

表 1 各种布放回收技术的特点分析  
Table 1 Analysis of characteristics of various deployment and recovery technologies

种类	特点
岸基布放回收	系统结构简单、作业成本低, 适应各种 UUV, 受海况影响大、隐蔽性差
水面有人布放回收	少人化, 系统较为简单, 适应各种 UUV, 受海况影响大、隐蔽性差
水面无人布放回收	少人化、自动化、主要适用中型 UUV, 作业成本较高、受海况影响
水下无人布放回收	无人化、自动化、适用各类 UUV, 海况影响小、隐蔽性好、安全性高

## 2 布放回收关键技术

水下航行器布放回收系统的设计所面临的是一个系统工程, 主要应解决如何在水面/水下复杂海洋环境的影响下保证布放回收装置的安全吊放、定位导引、水下对接、安全可靠的快速回收, 因而研究整个系统中的关键技术尤为重要。

### 1) 水下对接技术。

水下对接技术主要包括锥形坞站对接和机械臂捕获。锥形坞站对接通过漏斗式接口引导水下航行器自主进入坞站, 并通过声学信标或视觉系统辅助定位, 实现精准抓取<sup>[13-18]</sup>。水下对接过程中容易受到海洋流体动力的影响, 流体干扰力与水下航行器自身的运动姿态、周围的运动流场边界形状以及相对于对接平台之间的位姿关系不容忽视<sup>[1]</sup>, 曲莹<sup>[19]</sup>采用 CFD 技术对回收坐落过程中在近壁面环境下受到的水动力进行了仿真计算, 对计算结果进行总结, 判断出该过程中受到的水动力的大致趋势。文献[20]为了验证基于坞站回收 UUV 技术的有效性, 进行了仿真实验和水池试验, 对锥形坞站对接回收中坞站的锥角大小、材料选型、表面处理、入坞时的速度和位置等参数控制进行了研究。文献[21]对坞站回收 UUV 时水动力问题进行了系统研究, 包括速度、加速度、相对位置、坞站形状、流速等水动力的影响, 对提高对接精度技术做了很多探索。李开飞<sup>[22]</sup>在解决 UUV 对接过程中的碰撞而引起安全隐患问题时, 通过研究 UUV 水下对接碰撞机理以及分析影响对接碰撞的因素及减小对接碰撞的措施, 为水下对接装置的优化改进设计和参数选择提供了依据, 对提高对接效率和成功率, 增加水下对接的可靠性提供了实际应有价值。白桂强<sup>[23]</sup>结合国外 4 种捕获式回收技术的优缺点进行分析后基于直径 250 mm 的 AUV 为载体开展了优化改进设计, 简化回收结构并加强了结构强度, 提高了捕获范围, 对机构外形及参数对于 AUV 回收过程影响进行了深入分析, 通过仿真计算及湖上试验获取了有效数据, 验证了该机构的可靠性。

### 2) 定位导引技术。

实现水下航行器的回收, 需要获取回收平台或坞站等的相对位置、方向、姿态、高度等信息, 水

下航行器如何成功捕捉回收系统的绳索、杆或被专用的捕捉装置获取, 定位导引技术是关键。目前应用较多的为声学导引、光学、电磁学导引等方法, 声学导引适合远距离导引, 近距离误差大, 电磁导引和光学导引可以达到 cm 级别, 仅仅依靠道中导引技术难以实现回收工作, 需要采用声光复合导引技术, 在低能见度条件下的自主导航能力和与坞站的通讯及识别的精度和可靠性是未来发展的方向。各种定位导引技术性能对比如表 2 所示。

表 2 定位导引技术性能对比

Table 2 Performance comparison of positioning and guidance technologies

比较项目	声学导引	光学导引	视觉导引	电磁导引
通用性	较好	优秀	较好	较好
导引精度	m 级	cm 级	cm 级	cm 级
作用距离 /m	5 000	100	28	30
经济性	一般	极好	优秀	极好
使用介质要求	较低	较高	较高	一般
总体评价	较好	优秀	好	一般

文献[24]针对 Sparus II 开发了一种基于声学距离测量结合视觉信标检测的定位导引技术, 依靠声学装置估计相对于回收平台的位置后引导航行器沿着可观测的航迹靠近回收平台, 通过视觉系统引导航行器实现准确定位。李瑞康<sup>[25]</sup>对声光联合导引技术中光学导引技术进行了研究, 分析和讨论了水下特殊环境中光源、机器视觉镜头及靶标的设计要求, 对机器视觉镜头与靶标进行了设计及仿真优化, 为光学精准定位研究做了一定的理论探索。

3) 布放回收系统及安全性设计。

水面布放回收系统是实现水下航行器入水和回收工作的设备, 其可靠性、安全性尤为重要, 主要有旋臂吊、A 型架、滑道等结构组成的甲板起吊装置。动力装置部分多采用液压驱动, 通过可调节倾斜角度以适应不同海况, 同时配备主动升沉补偿系统, 通过实时调整缆绳长度抵消船舶垂荡运动, 特别是在高海况条件下, 系统的抗冲击和缓冲能力尤为关键。在多自由度的波浪补偿系统研究中, 由于其技术复杂, 国内外的研究工作较少。美国在六自由度波浪补偿技术方面的研究处于世界领先地位,

该系统具有六自由度波浪补偿功能, 由于技术封锁, 国内目前查不到该系统的核心技术资料。近几年, 国内少数单位才开始研究主动式波浪补偿起重机。胡永攀<sup>[26]</sup>研究了基于行星轮的波浪补偿系统, 实现了升沉方向的波浪补偿。吕伟<sup>[27]</sup>将绳牵引并联机构引入六自由度主动式波浪补偿系统, 通过收放多根绳索来控制平台的运动, 具有抗横向干扰能力强、机构自身惯量小、工作空间大、结构简单、便于控制的特点。

布放回收工作是一个极为复杂的系统性的题目, 在开发布放回收系统时需要考虑对接回收策略、整个系统的特点和之间的关系及接口匹配问题、布放回收的条件与环境、流程的规划设计、定位导引误差的补偿、运动控制、突发事件的应急处理等, 方案设计过程应对以上技术问题进行全面考虑。文献[28]–[31]结合水下航行器操纵性能、自主导引定位性能、回收平台位置姿态以及水下海洋环境实际工况、水动力干扰等, 从对接控制策略、抗流体干扰策略、回收失误策略进行分析探讨, 从理论角度确保水下对接过程的成功率。

3 结束语

水下航行器的布放与回收技术是利用水下航行器进行海洋科考、资源探测与开发、水下救援、海底打捞、大坝检修及国防应用的必备环节, 其发展水平直接影响水下航行器的作业能力和可靠性、安全性和整体效率。未来, 随着精确导航、目标识别、人工智能、自主控制及新型材料的突破, 以及标准化接口设计和模块化系统的推广, 将进一步提升不同装备间的兼容性和作业效率。可以预见, 水下航行器回收技术将朝着自主化、少人化、无人化、隐蔽化的高科技方向发展。在海洋经济与科技竞争日益激烈的背景下, 高效、可靠的水下航行器回收技术将成为深海探索与开发的关键支撑, 为人类进一步认知和利用海洋提供坚实保障。

参考文献

[1] 潘光, 黄明明, 宋保维, 等. AUV 回收技术现状及发展趋势[J]. 鱼雷技术, 2008, 16 ( 6 ): 10-13.

[2] 李弘华. 水下设备布放回收方法的研究及应用[J]. 机械管理开发, 2010, 25 ( 4 ): 100-101.

[3] 陈江, 高永宁. 某水下航行体遥控吊具总体设计[J].



- 机械设计, 2012, 29 (6): 87-88.
- [4] 鲁德泉, 李德威, 杨磊, 等. “蛟龙”号载人潜水器的布放回收系统及其关键技术[J]. 海洋开发与管理, 2020, 8 (2): 69-71.
- [5] GENERAL DYNAMICS MISSION SYSTEM. ICEX 2020: U.S. Navy deploys autonomous Bluefin-21 UUV under the ice[EB/OL]. [2021-04-26]. <https://gdmissionsystems.com/articles/2021/04/26/in-the-news-us-navy-deploys-autonomous-uuv-under-the-ice>.
- [6] 吴哲. 水下移动对接坞站设计与试验研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7 (4): 22-24.
- [7] CIRCLE B N. Underwater mobile docking of autonomous underwater vehicles[C]// OCEANS 2012. Hampton: IEEE, 2012.
- [8] SATO Y, MAKI T, MASUDA K, et al. Autonomous docking of hovering type AUV to seafloor charging station based on acoustic and visual sensing[C]// 2017 IEEE Underwater Technology. Busan: IEEE, 2017.
- [9] SATO Y, MAKI T, MATSUDA T, et al. Detailed 3D seafloor imaging of Kagoshima Bay by AUV Tri-TON2[C]// 2015 IEEE Underwater Technology. Chennai: IEEE, 2015.
- [10] SINGH H, BELLINGHAM J G, HOVER F, et al. Docking for an autonomous ocean sampling network[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26 (4): 498-513.
- [11] EVANS J, REDMOND P, PLAKAS C. Autonomous docking for intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation[C]// OCEANS 2003. San Diego: IEEE, 2003.
- [12] 孙叶义. 智能无人水下航行器水下回收对接技术[J]. 哈尔滨工程大学报, 2019, 40 (1): 1-11.
- [13] 时常鸣, 刘开周, 赵洋, 等. 面向 AUV 水下移动对接的实时路径规划方法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (5): 148-152.
- [14] 孙玉山, 王力锋, 吴菁, 等. 智能水下机器人路径规划方法综述[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (4): 1-7.
- [15] 马洪潮. 自主水下机器人回收对接与轨迹跟踪控制研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [16] 孙叶义, 武皓微, 李晔, 等. 智能无人水下航行器水下回收对接技术综述[J]. 哈尔滨工程大学报, 2019, 40 (1): 1-11.
- [17] 刘旸. 水下滑翔机的布放与回收[J]. 航海技术, 2022 (2): 1-4.
- [18] 宋涛, 郑荣, 梁洪光. 水下拖曳体自主布放回收装置设计与研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (7): 96-101.
- [19] 曲莹. 近壁面环境下 UUV 回收过程的自适应控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [20] ZHANG T, LI D J, YANG C J. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 176-187.
- [21] WU L H, LI Y P, SU S J, et al. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 110-126.
- [22] 李开飞. AUV 水下对接关键技术及对接碰撞问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [23] 白桂强. AUV 自主回收捕获机构设计与分析[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (12): 52-54.
- [24] HURTÓS N, MALLIOS A, PALOMERAS N, et al. LOON-DOCK: AUV homing and docking for high-bandwidth data transmission[C]// OCEAN 2017. Aberdeen: IEEE, 2017.
- [25] 李瑞康. 声光联合引导 UUV 回收系统光子子系统研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46 (2): 86-88.
- [26] 胡永攀, 陈循, 陶利民. 主动式波浪补偿起重机电液伺服系统数学模与优化[J]. 机床与液压, 2010, 38 (9): 80-84.
- [27] 吕伟. 基于绳牵引并联机构的六自由度波浪补偿关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [28] DONG L Y, XU H L, FENG X S, et al. An adaptive target tracking algorithm based on EXF for AUV with unknow non-Gaussian process noise[J]. Applied Sciences, 2020, 10 (10): 1-22.
- [29] 董凌艳. AUV 水下对接智能归航方法研究[D]. 北京: 中科院沈阳自动化研究所, 2020.
- [30] PARK J Y, JUN B H, LEE P M, et al. Underwater docking approach of an under-actuated AUV in the presence of constant ocean current[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43 (20): 5-10.
- [31] SALARI M, RAVA A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition[J]. Journal of Marine Science and Application, 2017, (3): 298-304.

(责任编辑: 曹晓霖)