

[引用格式] 王彪, 罗瑞龙, 王芳, 等. 深海无人装备控制系统研究现状与发展趋势 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(3): 390-399.

深海无人装备控制系统研究现状与发展趋势

王 彪¹, 罗瑞龙¹, 王 芳¹, 崔维成²

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海, 201306; 2. 西湖大学 工学院, 浙江 杭州, 310030)

摘 要: 深海无人装备作为国家海洋科技实力的战略体现, 已广泛应用于资源探测、海洋科学研究、军事安全及经济开发等核心领域。其控制系统作为实现复杂水下作业的神经中枢, 直接决定装备的任务执行效能。文章系统梳理了深海无人装备的控制理论体系, 包括传统比例-积分-微分控制、基于模型的控制、数据驱动的智能控制及多智能体控制等技术路径, 深入剖析了集中式、分层式、分布式及混合式控制架构的技术特性与工程适用性。通过对比分析导航定位、通信传输和能源供给等关键技术的研究现状, 揭示了模型不确定性、鲁棒控制性能以及多装备协同机制等行业共性挑战。研究表明, 未来控制系统将朝着人工智能深度赋能、集群化协同作业、新型通信与能源技术融合以及跨学科融合的方向发展, 为深海装备智能化转型提供理论与技术支撑。

关键词: 深海无人装备; 控制理论; 控制架构; 关键技术

中图分类号: TJ63; U674

文献标识码: R

文章编号: 2096-3920(2025)03-0390-10

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0074

Research Status and Development Trends of Deep-sea Unmanned Equipment Control System

WANG Biao¹, LUO Ruilong¹, WANG Fang¹, CUI Weicheng²

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310030, China)

Abstract: Deep-sea unmanned equipment, as a strategic reflection of a nation's marine scientific and technological strength, has been widely integrated into core fields such as resource exploration, marine scientific research, military security, and economic development. The control system, serving as the neural center for complex underwater operations, directly determines the mission execution efficiency of the equipment. This paper systematically combed the control theory system of deep-sea unmanned equipment, including technical paths such as traditional proportional-integral-derivative (PID) control, model-based control, data-driven intelligent control, and multi-agent control. It deeply analyzed the technical characteristics and engineering applicability of centralized, hierarchical, distributed, and hybrid control architectures. By comparing and analyzing the research status of key technologies such as navigation and positioning, communication transmission, and energy supply, the paper revealed common challenges in the industry, including model uncertainty, robust control performance, and multi-equipment collaboration mechanisms. The study shows that future control systems will develop towards deep empowerment of artificial intelligence, clustered collaborative operations, integration of new communication and energy technologies, and interdisciplinary innovation, providing theoretical and technical support for the intelligent transformation of deep-sea equipment.

Keywords: deep-sea unmanned equipment; control theory; control architecture; key technology

收稿日期: 2025-05-29; 修回日期: 2025-06-07; 录用日期: 2025-06-09.

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2022YFC2808105).

作者简介: 王 彪(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水下作业装备控制系统及水面无人装备控制系统.

OPEN ACCESS

0 引言

深海装备在资源开发、科学研究、军事防御和经济发展中发挥了多重作用,是现代深海科技不可或缺的重要组成部分,也是国家竞争力的重要体现。鉴于深海环境的特殊性,深海装备的自持能力,相比于载人装备,深海无人装备数量更多,用途更为广泛。1953 年,法国工程师 Rebikoff 开发的电动缆控水下机器人 Poodle,被视为现代遥控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)的雏形。1983 年,国内研制的第 1 台 200 m 级远程 ROV 原理样机“海人一号”,实现了零的突破^[1]。虽然起步时间不同,进入 21 世纪以来,国内外深海无人装备都相继突破全海深的限制,发展出 ROV、自主水下航行器(autonomous undersea vehicle, AUV)、混合型 ROV(hybrid ROV, HROV)、水下滑翔机以及新概念仿生潜水器等丰富类型,从简单功能的遥控工具进化为可实现复杂功能的智能体。

控制系统是深海无人装备的核心,是其执行各类水下任务的中枢神经。按照“感知-计算-执行”的结构对以上深海无人装备的控制系统进行总结,其面临以下共性和关键问题。

1) 模型不确定性: 深海装备在进行作业时,经常会面临温盐深变化、水动力扰动及作业模式切换等诸多不确定性,因此导致深海无人装备数据模型建模困难。

2) 控制鲁棒性与适应性: 控制系统对模型参数的摄动应具有鲁棒性,对模型参数的扰动应具有适应性。

3) 作业任务多样性: 深海无人装备承担科学探测、资源勘探、军事安防和工程运维等不同任务,作业载荷的多样性要求控制架构有灵活的扩展能力。

4) 多装备协同控制: 复杂水下作业,如深海采矿、水下组网以及油气开采等需要控制系统实现多装备的协同作业。

5) 高精度导航定位: 在缺乏可靠单一全局数据参考的情况下,融合多源传感器信息的组合导航是实现深海无人装备控制的基础。

6) 通信速率和可靠性限制: 通信受限情况下,需要控制算法下沉到机器人本体,全局规划更新,多智能体间的信息交互都将受到影响。

7) 能源管理与长航程控制: 对于自带能源的深海无人装备,所有控制决策需要同时考虑总能量和功率输出限制,同时,低温高压环境对储能单元的影响不可忽视。

针对以上问题,文章对比了不同控制理论的优缺点,介绍了控制系统的几种常见架构,探讨了导航定位、通信以及能源等关键技术,结合当前深海科技的热点,对深海无人装备控制理论与技术的未来趋势进行了展望,为深海装备智能化升级提供参考。

1 深海无人装备控制理论

1.1 传统 PID 控制

比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制凭借其结构简单、概念清晰、易于实现且鲁棒性较好的特点,最早应用于深海无人装备控制系统,是实际海上作业场景中被使用最多的一类方法。日本海洋研究开发机构的 KAICO ROV^[2]、英国国家海洋研究中心的 AutoSub 系列 AUV^[3]、美国伍兹霍尔海洋研究所的 REMUS 系列 AUV^[4]和 Nereus HROV(Hybrid ROV)^[5],以及中国上海交通大学的“海龙”系列 ROV^[6]等国内外众多知名深海无人装备,均采用 PID 控制器实现如姿态控制、速度控制以及位置随动等基础功能。这些装备的作业深度从 100 m 直至全海深,服役时间最早可追溯到 20 世纪 90 年代,由此可见, PID 控制在深海装备领域应用颇为广泛。

PID 控制主要适用于单输入单输出定常系统。实际应用中,对于 ROV、AUV 等多参数控制系统,研究人员往往将深海无人装备的控制问题进行解耦,简化为单自由度或单参数的控制。研究表明,基于经典控制理论的解耦控制可满足深海无人装备的基本控制功能需求。例如 AutoSub 系列 AUV^[3]采用将 6 自由度运动控制解耦为水平面和垂直面运动控制的方法,通过 2 个 3D-PID 控制器实现了基本控制功能。

1.2 基于模型的控制

海洋装备在进行海上作业时,经常会面临诸多的不确定性:温盐深引起的水动力参数变化、风浪流导致的环境力扰动、深海压力对机械系统效率的影响,以及作业模式切换导致的不同控制需求

等。为抑制模型失配和环境扰动的影响, 研究人员提出了 2 种应对模型不确定性的策略。

对于不确定性边界已知的场景, 通过提升控制器的鲁棒性来保持稳定性和性能, 包括自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)、滑模控制(sliding mode control, SMC)以及模型预测控制(model predictive control, MPC)等。

ADRC 通过对系统“总扰动”进行估计和补偿, 从而应对模型的不确定性。ADRC 常被用于深海无人装备 6 自由度运动控制^[7-8], 但与 PID 控制类似, 利用该方法很难找到 1 组在所有工况下都表现最优的参数, 为此研究人员提出了不同的改进方法以得到更好的控制效果^[9-10]。

SMC 通过不连续控制信号强迫系统状态在有限时间内到达滑动面, 并保持在面上运动, 以应对扰动和模型参数摄动。由于滑动面可被设计, SMC 被用于深海无人装备的位姿保持和轨迹跟踪控制等方面^[11-12]。针对系统惯性导致的 SMC 抖振问题, 边界层法和高阶滑模是常用的解决方案^[13-14]。

MPC 需要在每个控制周期内在线求解优化问题, 计算复杂度随系统维度和预测时域呈指数增长, 并不适用于软硬件资源受限和高实时性的场景, 如简单嵌入式系统、底层实时控制等。因此, 受机载计算能力和能源的双重限制, MPC 早期相关研究较少。近些年, 随着上述限制的逐步解除, MPC 方法被迅速应用于路径规划、轨迹跟踪以及避障等问题^[15-17]。同时, 研究人员通过引入事件触发^[18]、自触发^[19]机制有效降低了对计算资源的需求, 进一步提高了 MPC 方法的实用价值。

对于参数未知或时变的场景, 通过动态调整控制参数以适应外部条件变化, 以自适应控制为典型代表。例如, 美国 ODIN AUV 利用自适应控制器进行 6 自由度控制, 表现出了良好的性能^[20]。除此之外, 自适应控制还被用于机械手控制^[21]、容错控制^[22]、编组控制以及跨介质航行器控制^[23]等领域。但是, 自适应控制需要在确保误差收敛的前提下, 对不确定系统持续施加激励, 一般需要与底层控制律结合来实现相应的控制效果。

1.3 数据驱动的智能控制

智能控制技术引入了人工智能(artificial intelligence, AI)与机器学习(machine learning, ML), 以

数据驱动为核心, 弥补了传统控制方法对模型的依赖, 显著提升了系统在复杂水下环境中的自主性、适应性与决策能力。

模糊控制通过模拟人类决策的模糊逻辑推理能力, 使深海无人装备能够灵活应对复杂且不确定性环境, 其核心优势在于无需精确数学模型, 且能有效处理非线性、时变干扰等问题。研究人员可依据先验知识与控制目标, 通过设计模糊控制规则和动态整定控制参数, 构建了模糊 PID 控制器, 从而实现深海无人装备的位置和姿态控制^[24-25]。此外, 模糊控制还被应用于深海无人装备轨迹跟踪与路径规划^[26]、机械手操作与避障^[27]等方面。

深度学习的概念于 2006 年由 Hinton 等^[28]正式提出, 其在水下作业环境的核心应用场景是图像增强与目标检测。水下目标检测方面, 常用模型包括区域卷积神经网络(region-convolutional neural network, R-CNN)、fast R-CNN、faster R-CNN 以及 YOLO(you only look once)等^[29-31], 它们在检测速度、检测精度和资源消耗方面各有优缺点。其中, YOLO 模型经过持续改进, 目前已发展到 V12 版本, 是迄今影响范围最广的目标检测模型。水下图像增强方面, 深度学习的作用是从训练数据中自动提取特征并建立映射关系, 通过构建网络模型训练数据, 提升水下图像的质量, 具体可分为实时增强和后处理 2 种模式, 常用的网络模型为卷积神经网络 CNN 模型和生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)模型^[32-33]。此外, 利用深度学习的自动提取特征能力, 研究人员还探索将其应用于水下无人装备的故障诊断中^[34]。需要注意的是, 深度学习需要大量标注数据的支持, 因此不适用于没有先验知识的情形。

与深度学习不同, 强化学习允许深海无人装备在与环境的交互中通过试错来学习最优策略: 在行动时根据行动结果接收反馈, 即奖励, 以奖励信号指导装备根据任务需求调整策略, 动态适应环境和任务变化, 长期持续地做出最优决策。强化学习主要应用于水下装备的路径规划和作业机械手的抓取控制^[35-37], 能够显著提升装备的水下决策能力。近年来, 研究人员将深度学习引入强化学习, 通过深度神经网络近似价值函数或策略函数, 使深海无人装备同时具备感知和决策能力, 在多体

协同控制领域中展现了其优势^[38-39]。

1.4 多智能体控制

通过多个同构或异构深海无人装备的群体控制可完成复杂水下作业任务,提升效率与覆盖范围,成为近几年的研究热点。多体控制往往采用分布式控制策略,避免单点故障和通信瓶颈,个体需具备一定的自主决策能力。

多智能体控制的核心是队形保持和路径规划。编队控制的常用方法有领航-跟随者法、虚拟结构法、人工势场法、行为法以及信息一致性法等,其中,领航-跟随者法和虚拟结构法是 2 种最为常用的方法^[40]。在满足编队约束的条件下,需为整个集群规划最优或次优的全局路径,常与优化算

法和群智能算法相结合^[41]。目前,多智体控制的应用场景主要集中在采样和感知领域,如目标搜索、协同即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)以及环境监测等。但水下通信和能源的限制是多智能体控制的重要约束,实现有效的信息共享并延长整体任务时间是多智能体控制的工程应用需要面对的挑战。

1.5 不同控制理论对比总结

表 1 对比分析了传统控制方法和智能控制方法的优势和劣势。对于深海无人装备而言,其应用场景和功能需求往往是多变的,需要综合运用不同理论去解决实际控制问题,因此,融合多种不同控制方法是常见技术手段^[42-44]。

表 1 不同控制理论特点对比
Table 1 Characteristics comparison of different control theories

类别	控制方法	优势	劣势	典型应用
传统控制	PID控制	简单稳定,易于工程实现	无法处理非线性、时变或强扰动环境	底层运动控制
	ADRC	抗强扰动,强鲁棒性	扩张状态观测器增加计算量,对测量噪声敏感	底层运动控制
	SMC	结构简单,强鲁棒性	存在抖振	悬停控制与轨迹跟踪
	MPC	显式处理约束,动态优化能力强	计算复杂度高,实时性受限	轨迹跟踪与避障
	自适应控制	动态适应环境变化,鲁棒性较强	参数调整算法复杂,暂态不稳	动态调参
智能控制	模糊控制	无需精确模型,适合非线性系统	需先验知识,高维系统调试困难	轨迹跟踪与避障
	深度学习	端到端优化,数据驱动	需大量标注数据,可解释性差	图像增强与目标识别
	强化学习	无需环境模型,支持多目标优化	训练效率低,需大量交互数据	路径规划与编组控制

2 深海无人装备控制系统架构

深海无人装备控制系统软硬件依据控制系统架构进行部署,以实现深海无人装备的各项控制功能。控制系统常用架构包括集中式、分层式、分布式和混合式等。

2.1 集中式架构

深海无人装备发展早期阶段,其控制功能相对简单,广泛采用集中式架构。随着深海无人装备及其相关软硬件技术的发展,中大型深海无人装备已较少采用这种架构,然而在观察级和消费级水下装备领域,尤其是科学和教学样机中,集中式架构依然是主流,其组成如图 1 所示。集中式架构的主要特点是所有外部设备都与中央控制单元直接交互,软件直接调用外部设备的驱动,控制律由中央控制单元实时更新。集中式架构具有实时性高、结构简单、可靠性高以及成本低等优势。但受中央控制单元接口数量限制,集中式架构的扩展性相对较差。美国 BlueRobotics 公司的 BlueROV^[45]、

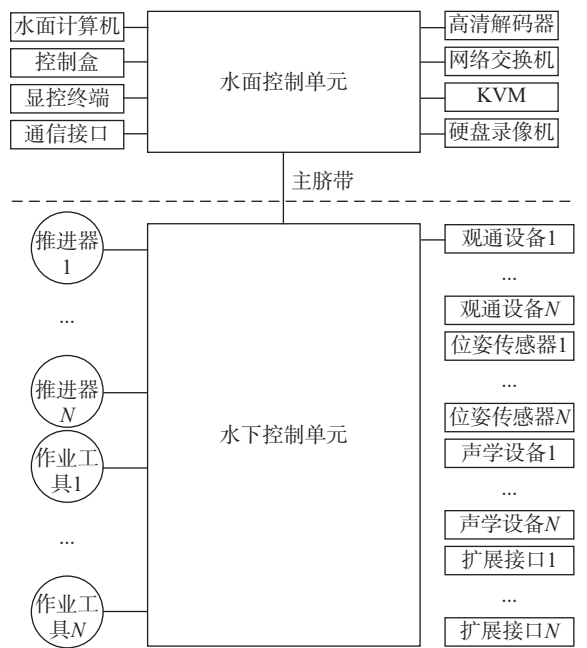


图 1 观察级深海无人装备集中式控制架构
Fig. 1 Centralized control architecture of observation-class deep-sea unmanned underwater equipment

GitHub 开源项目 OpenROV, 以及国内消费级 ROV 都采用了这种控制架构, 为广大科研人员和学生提供了低成本科教平台。另外, 水下滑翔机和水下拖曳系统也大都采用集中式架构。

2.2 分层式架构

以 AUV 为代表的自主式无人装备需要具备机载智能, 在通信和能源受限的情况下完成自主水下作业, 其控制系统往往采用分层式架构, 在该种架构中, 控制系统至少被分为 2 层, 最多为 4 层, 以 3 层为典型结构(如图 2 所示), 通常包括规划层、执行层和功能层, 以同时满足顶层策略生成和底层控制需求。Valavanis 等^[46]对 2000 年之前国外 AUV 控制系统架构进行了调研, 发现在 25 台 AUV 中有 19 台 AUV 的控制系统都采用了分层架构。2000 年以来, 国内外研制的新型自主式深海无人装备也都采用了分层式架构。国外方面, 美国伍兹霍尔海洋研究所、英国国家海洋研究中心等机构为其谱系化 AUV 均设计了统一的分层控制架构^[47-48], 美国 Bluefin Robotics 公司^[49]、挪威康斯伯格海事公司均发布了自己的分层控制系统, 用于旗下的各类深海无人装备。国内研制的“海斗”^[50]、“悟空”和“潜龙”等 AUV 也都采用了分层式控制架构。分层式架构实现了顶层规划和底层控制的解耦, 对于深海无人装备的智能化具有重要意义。但其底层传感器或执行器改变时, 可能通过层级传递影响顶层控制策略, 这是分层式控制系统设计时需关注的问题。

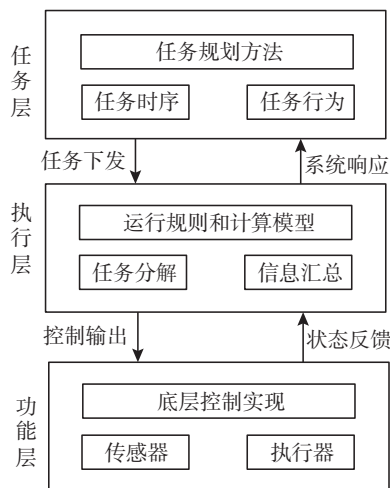


图 2 AUV 3 层式控制架构

Fig. 2 Three-layer control architecture of AUVs

2.3 分布式架构

中大型深海无人装备为满足多种作业模式和多样化的搭载需求, 其控制系统应具有鲁棒性和可扩展性, 因此分布式架构成为一种主要解决方案。分布式架构是将整个控制系统按任务或功能集群进行划分后形成多个控制节点, 节点间通过总线进行交互, 通过去中心化进行任务分配或功能实现, 在总线上增加节点即可进行系统扩展, 其结构如图 3 所示。由于任务或功能可以分配给不同节点, 因此分布式架构具有较强的容错能力。早在 20 世纪 90 年代, 美国伍兹霍尔海洋研究所的深潜实验室已经开始在“JASON”和其他大深度深海无人装备应用分布式控制架构开发控制系统。国内深海无人装备的研究虽然起步晚于国外, 但在中大型深海装备控制系统中广泛采用了分布式架构, 涉及的装备类型包括 ROV、AUV、深潜救生艇 (deep submergence rescue vehicle, DSRV) 以及自主遥控水下机器人 (autonomous & remotely operated vehicle, ARV) 等。以国内崂山实验室设计的万米级 AUV^[51]为例, 其控制系统由导航、观测、通信和运动控制等节点组成, 在实现基本功能的同时保证了良好的扩展性。

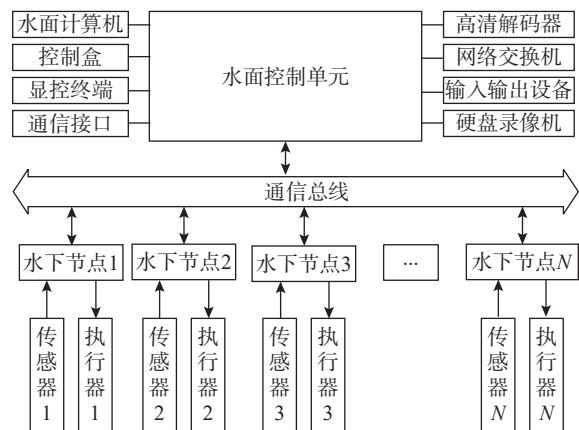


图 3 深海无人装备分布式控制架构

Fig. 3 Distributed control architecture of deep-sea unmanned underwater equipment

分布式架构另一个重要的应用场景是深海无人装备集群的控制^[52], 研究人员通过建立分布式模型进行深海无人装备的分布式信息融合、分布式推理和分布式协同。单个深海无人装备在集群中即为 1 个控制节点, 在分布式架构下, 节点间通过互动实现更高等级、更复杂的任务行为。

2.4 混合式架构

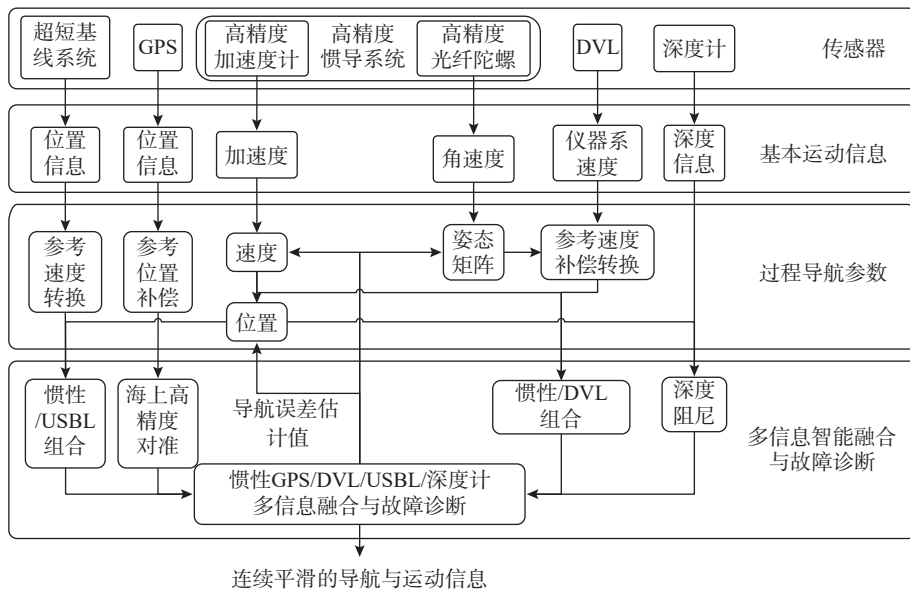
随着控制系统性能提升和功能多样化,其架构往往呈现出混合特性。前文提到的分层架构中,底层控制往往包含多个节点,以应对不同子系统的控制需求。采用分布式架构的深海无人装备单体或集群需要 1 个主控制器或领航节点实现信息交互和分配。从局部来看,不管是分层控制还是分布控制,都可以抽象为集中式架构。

3 深海无人装备控制系统关键技术

3.1 导航定位技术

水下导航定位的精度和更新速率决定了控制系统能达到的任务精度上限和控制性能。目前深海无人装备主要采取多源信息融合的组合导航方式实现水下导航定位^[53],典型技术方案如图 4 所示,

即惯性导航与声学导航进行融合,国内外的众多科研装备和商用产品均采用了这一技术方案。其中,惯性导航系统具有高自主性、高隐蔽性、高更新率等特点,能够获得运载体完备运动信息。而声学导航系统具备测速、测距精度不随时间发散的优点。组合导航方式综合二者的优势实现互补,从而实现深海无人装备自主、可靠、精确且连续的水下导航定位与运动测量。组合导航的基本原理是对传感器的随机误差和累积误差进行融合,以得到导航定位数据的最优估计值。除了惯性导航和声学导航的组合,研究人员对基于惯性导航和地球物理导航的组合方式也进行了相应研究^[54-55],且后者可实现完全自主,具有高度隐蔽性。不过由于地球物理导航需要对特征信息进行匹配,地球物理数据库和数据匹配算法的精度成为这种组合导航方式的决定因素。



注: GPS——全球定位系统(global positioning system); DVL——多普勒测速仪(Doppler velocity log); USBL——超短基线(ultra-short baseline)。

图 4 水下导航定位原理框图

Fig. 4 Schematic diagram of underwater navigation and positioning

近年来,随着 AI 技术的发展,将机器视觉、激光成像技术与惯性导航组合,实现局部高精度导航定位成为研究热点^[56-57]。

3.2 通信技术

深海通信受电磁波衰减限制,主要依赖水声通信方式。国内水声通信技术自主研究发展迅速,其中“海斗一号”AUV、“思源号”ARV 以及“悟空号”AUV 等全海深无人装备的成功研制,体现出

我国在全海深环境下的水声通信技术领域已构建起较为完善的技术能力体系。同时,在近程高频宽带声通信、水下组网技术方面也在持续自主创新^[58]。

为弥补水声通信在带宽和实时性方面的不足,水下光通信领域成为研究热点,主要研究方向包括水下高速光通信、水下长距离光子通信以及声光联合通信等。国内外关于水下光通信技术的研究可追溯到 20 世纪 60 年代,美国多个研究机构最

先开始研究将蓝绿激光用于水下光通信系统的可行性。直至 2010 年,美国伍兹霍尔海洋研究所基于通断键控(on-off keying, OOK)调制技术和大功率阵列 LED 光源研发了全向水下光通信样机,并进行了多次海试验证^[59],水下光通信技术至此真正走向实用阶段。国内多家研究机构围绕高速水下通信和长距离水下通信相关技术开展相关研究,进行了工程样机的海试验证^[60],其中一种全海深水光通信单元如图 5 所示。受水质导致的光信号衰减影响,现阶段水下光通信距离仅维持在百米左右,通信速率一般为 Mbit/s 量级。因此,如何提高通信距离是目前水下光学通信亟待解决的问题。

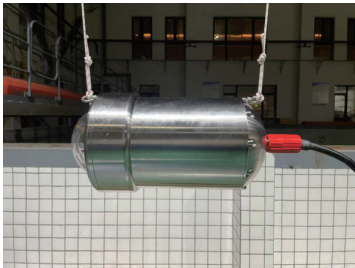


图 5 水下光通信单元
Fig. 5 Underwater optical communication unit

3.3 能源供给技术

能源供给决定了深海无人装备的运动能力,是控制系统运行的基本前提。除主脐带供电外,深海无人装备的主要能源形式是电池,电池性能决定了深海无人装备的自持能力和控制性能。深海无人装备所用电池主要包括铅酸蓄电池、镍镉电池、

镍氢电池、银锌电池和锂离子电池。不同种类电池性能对比见表 2。其中,铅酸电池、镍镉电池和镍氢电池是传统富液电池,是最早应用于深海无人装备的电池种类,其优点是价格低廉、性能稳定,缺点是能量密度低、循环寿命短,且存在气体析出问题,目前已接近退出服役状态,仅用于试验测试。银锌电池的能量密度相对较高,放电能力和安全性均满足深海无人装备的使用需求,加拿大的 Theseus AUV,国内的“CR-01” AUV、“CR-02” AUV 都曾使用银锌电池作为动力源。但银锌电池成本高、寿命短的缺点限制了其应用前景。近几年,随着相关技术的快速发展,锂离子电池成为海洋无人装备能源的首选。根据电芯是否承压,锂离子电池分为干式和充油式 2 种,大容量大深度锂电池常采用充油式以减轻整体质量,对于中小容量和深度的锂电池,则需通过综合考虑成本、质量密度和维护便利性来决定采取何种封装方式。美国伍兹霍尔海洋研究所为多款深海无人装备配备了陶瓷壳体的干式锂离子电池^[61]。国内相关单位研制的充油式全海深锂离子电池已成功助力“海斗一号”、“奋斗者号”以及“思源号”等全海深装备的研发^[62]。围绕深海无人装备能源的研究在向着更高能量密度、更大容量的方向发展。国内相关单位在深海耐压高能电池方面开展了系列研究^[63]。日本、挪威等国研究人员将燃料电池用于长航程 AUV 的能源供给,相关研究仍在不断深入^[64]。

表 2 不同动力电池性能对比
Table 2 Performance comparison of different power batteries

电池类型	质量能量密度/(Wh/kg)	体积能量密度/(Wh/L)	循环寿命 /次	特点	代表性装备(国别)
铅酸电池	25~45	40~80	300	稳定,低成本,有气体析出	Nautile(法)
银锌电池	80~110	180~200	30	稳定,大电流放电,高成本	Shinkai 6500(日)
锂离子电池	120~270	320~750	>500	相对稳定,高能量密度	“思源号”(中)
固态电池	220~550	450~1 200	>1 000	高能量密度,技术尚未成熟	“探索一号”(中)
燃料电池	500~700	1 000~1 200		需解决深海燃料存储问题	Hugin(挪)

4 发展趋势

21 世纪是海洋的世纪,我国在海洋资源开发、海洋经济发展、海洋科技创新、海洋生态文明建设、海洋权益维护等方面进行了全面布局。随着深海无人装备总体需求的提高和控制系统关键技

术的发展,未来深海无人装备控制系统的发展趋势将体现在如下几个方面。

4.1 AI 深度赋能

AI 技术正在深刻重构深海无人装备的技术边界,从感知、决策、控制到系统运维实现全链路赋能,推动深海装备从“远程遥控”迈向“全自主智

能”。通过 AI 对传感器的赋能,进行多模态传感器智能融合,突破深海感知局限,借助海洋大模型进行任务自主决策,响应异常事件,进而使深海无人装备的智能控制成为未来典型应用模式。AI 与深海装备的深度融合已初见端倪,多家研究机构相继发布海洋大模型,已形成“千模竞帆”之势。

4.2 集群化与协同化

深海无人装备的集群化与协同化正推动海洋探测从单点作业向智能群体跃迁,通过去中心化架构、群体智能算法以及跨域通信实现“1+1>2”的系统效应。集群化与协同化所涉及的关键技术如群体智能控制、协同感知与建图,以及跨域通信等已可见相关报道。集群化与协同化在大范围水下作业领域将有广阔的应用前景,以深海采矿为例,可按 AUV 群广域扫描—精查 ROV 抵近—矿车联合作业的模式,实现高效自主深海采矿。

4.3 新型水下通信与能源技术

深海无人装备长期受制于通信孤岛和能源限制,导致任务范围受限、自主性不足。新型通信与能源技术的突破,将推动装备从“孤立作业”迈向与环境共生型的立体式联合作业,实现信息实时交互与能源自给自足的颠覆性跨越。水下量子通信、水下中微子通信、水下同位素电源以及深海环境能量捕获等相关研究工作已逐步开展。

4.4 跨学科融合

深海无人装备控制系统的发展已进入“复杂系统科学”阶段,2025年以来,国内多家研究机构相继发表了关于深海仿生研究的重磅成果。跨学科融合通过打破学科壁垒,将生物学、量子技术、脑科学以及材料科学等领域的突破性成果注入深海装备研发,可能催生“环境自适应、类生命体、超异构协同”的新一代控制系统。

5 结束语

在国家海洋战略推动下,我国的深海无人装备技术得到了快速发展,接连突破了深海耐压结构、浮力材料、能源与推进、导航定位等关键技术,走出了一条自主创新的道路。控制系统作为深海无人装备的控制中枢,决定了深海无人装备的上限。随着水下作业任务更加复杂化和精细化,智能和融合将是未来控制系统的发展方向。

参考文献:

- [1] 梁波,赵宏宇,王楠.水下机器人在中国的早期发展[J].科学,2022(3):53-56.
- [2] NAKAMURA M, KOTERAYAMA W, YAMAMOTO I, et al. Control of heading angle of launcher of deep sea exploration unmanned underwater vehicle “KAIKO” [C]// Proceedings of The Sixteenth 2006 International Off-shore and Polar Engineering Conference. San Francisco, CA, USA: ISOPE, 2006: 213-220.
- [3] FENUCCI D, FANELLI F, CONSENSI A, et al. A multi-platform guidance, navigation and control system for the autosub family of autonomous underwater vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 146: 105902.
- [4] ALLEN B, STOKEY R, AUSTIN T, et al. REMUS: A small, low cost AUV; system description, field trials and performance results[C]//Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings. Halifax, NS, Canada: IEEE, 1997: 994-1000.
- [5] WHITCOMB L L, JAKUBA M V, KINSEY J C, et al. Navigation and control of the Nereus hybrid underwater vehicle for global ocean science to 10903 m depth: Preliminary results[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2010: 594-600.
- [6] 任峰,张莹,张丽婷,等.“海龙III”号 ROV 系统深海试验与应用研究[J].海洋技术学报,2019,38(2):30-35. REN F, ZHANG Y, ZHANG L T, et al. Research on the deep-sea test and application of the “Hailong III” ROV system[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(2): 30-35.
- [7] 梁一飞,李永龙,王皓冉,等.基于降阶扩张状态观测器的水下机器人自抗扰运动控制[J].传感器与微系统,2024,43(8):141-145. LIANG Y F, LI Y L, WANG H R, et al. Active disturbance rejection motion control of ROV based on reduced order extended state observer[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(8): 141-145.
- [8] 黄陶俊,石凯,乌云嘎,等.基于自抗扰控制的 AUV 抗洋流对接研究[J].舰船科学技术,2024,46(14):89-96. HUANG T J, SHI K, WU Y G, et al. Research on AUV docking of anti ocean current based on active disturbance rejection control[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(14): 89-96.
- [9] JING A, WANG J, GAO J, et al. Self-tuning adaptive active disturbance rejection pitch control of a manta-ray-like underwater glider[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 254: 111364.
- [10] 王翻,武建国,王晓鸣,等.改进型自抗扰在 ROV 位姿控制中的应用[J].舰船科学技术,2024,46(14):91-98. WANG F, WU J G, WANG X M, et al. Application of improved active disturbance rejection in ROV pose control[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(14): 91-98.

- [11] 褚悦, 石泽林, 王孟军, 等. 水下航行器有限时间滑模控制[J]. *水下无人系统学报*, 2023, 31(6): 878-884.
CHU Y, SHI Z L, WANG M J, et al. Finite-time sliding mode control for undersea vehicles[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2023, 31(6): 878-884.
- [12] JOE H, KIM M, YU S C. Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 78(1): 183-196.
- [13] TAHERI E, FERDOWSI M H, DANESH M. Design boundary layer thickness and switching gain in SMC algorithm for AUV motion control[J]. *Robotica*, 2019(10): 1-19.
- [14] 孙旭瑶. 基于高阶滑模控制的水下机器人轨迹跟踪算法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [15] DENG S Y, HAO L Y, SHEN C. Autonomous underwater vehicle(AUV) motion design: Integrated path planning and trajectory tracking based on model predictive control(MPC)[J]. *Journal of Marine Science & Engineering*, 2024, 12(9): 1655.
- [16] XIN G, ZHOU M, YANG B, et al. Energy optimization control algorithm of underwater vehicle based on model predictive control[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(SI): 830-834.
- [17] LIU Z, ZHU D, LIU C, et al. A novel path planning algorithm of AUV with model predictive control[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2022, 37(6): 460-467.
- [18] ZHANG W, WANG Q, WU W, et al. Event-trigger NMPC for 3-D trajectory tracking of UUV with external disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 283: 115050.
- [19] BIAN Y, ZHANG J, HU M, et al. Self-triggered distributed model predictive control for cooperative diving of multi-AUV system[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267: 113262.
- [20] TABATABA'I-NASAB F S, KEYMASI KHALAJI A, MOOSAVIAN S A A. Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, 41(11): 3121-3131.
- [21] ZHENG X, TIAN Q, ZHANG Q. Development and control of an innovative underwater vehicle manipulator system[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(3): 548.
- [22] LI J, WANG Y, LI H, et al. Sliding mode control with adaptive-reaching-law-based fault-tolerant control for AUV sensors and thrusters[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(11): 2170.
- [23] LU D, XIONG C, ZENG Z, et al. Adaptive dynamic surface control for a hybrid aerial underwater vehicle with parametric dynamics and uncertainties[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 45(3): 740-758.
- [24] 熊保星, 甘文洋, 陈铭治, 等. 基于模糊线性自抗扰的水下机器人定深控制[J]. *控制工程*, 2024: 1-9.
XIONG B X, GAN W Y, CHEN M Z, et al. Depth control of underwater vehicle based on fuzzy linear active disturbance rejection[J]. *Control Engineering*, 2024: 1-9.
- [25] JI D, ZHOU S, REN J, et al. A prototype of newly dynamic underwater vehicle using fuzzy PID control[C]// 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics(ISIE). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2019: 1121-1126.
- [26] CHENG C, SHA Q, HE B, et al. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109355.
- [27] LONDHE P S, SANTHAKUMAR M, PATRE B M, et al. Task space control of an autonomous underwater vehicle manipulator system by robust single-input fuzzy logic control scheme[J]. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2016, 42(1): 13-28.
- [28] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. *Science*, 2006, 313(5786): 504-507.
- [29] 郑雨帆, 王银涛, 孙琦. 基于轻量化深度网络的水下声呐目标识别方法[J]. *指挥控制与仿真*, 2025: 1-10.
ZHENG Y F, WANG Y T, SUN Q. Underwater sonar target recognition method based on lightweight deep network [J]. *Command Control & Simulation*, 2025: 1-10.
- [30] 李培坤, 李锋, 葛忠显, 等. 基于改进 YOLOv8n 的水下目标检测算法[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(3): 172-179.
LI P K, LI F, GE Z X, et al. Underwater target detection algorithm based on improved YOLOv8n[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(3): 172-179.
- [31] WANG N, CHEN T, LIU S, et al. Deep learning-based visual detection of marine organisms: A survey[J]. *Neuro-computing*, 2023, 532: 1-32.
- [32] 张天驰, 刘宇轩. 深度学习驱动的水下图像处理研究进展[J]. *计算机科学*, 2024, 51(z1): 271-282.
ZHANG T C, LIU Y X. Research progress of underwater image processing based on deep learning[J]. *Computer Science*, 2024, 51(z1): 271-282.
- [33] ANWAR S, LI C. Diving deeper into underwater image enhancement: A survey[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2020, 89: 115978.
- [34] XIA S, ZHOU X, SHI H, et al. A fault diagnosis method based on attention mechanism with application in Qianlong-2 autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109049.
- [35] 潘云伟, 李敏, 曾祥光, 等. 基于人工势场和改进强化学习的自主式水下潜航器避障和航迹规划[J]. *兵工学报*, 2025, 46(4): 72-83.
PAN Y W, LI M, ZENG X G, et al. AUV obstacle avoidance and path planning based on artificial potential field and improved reinforcement learning[J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(4): 72-83.
- [36] 孙玉山, 冉祥瑞, 张国成, 等. 智能水下机器人路径规

- 划研究现状与展望[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(8): 1111-1116.
- SUN Y S, RAN X R, ZHANG G C, et al. Research status and prospect of path planning for autonomous underwater vehicles[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(8): 1111-1116.
- [37] WANG Y, GAO J. Reinforcement-learning-based visual servoing of underwater vehicle dual-manipulator system[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(6): 940.
- [38] 闫敬, 徐龙, 曹文强, 等. 基于深度强化学习的多潜器编队控制算法设计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1457-1463.
- [39] SONG D, GAN W, YAO P, et al. Guidance and control of autonomous surface underwater vehicles for target tracking in ocean environment by deep reinforcement learning[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 110947.
- [40] 谢伟, 陶浩, 龚俊斌, 等. 海上无人系统集群发展现状及关键技术研究进展[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 7-17, 31.
- [41] 赵蕊, 许建, 向先波, 等. 多自主式水下机器人的路径规划和控制技术研究综述[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(6): 58-65.
- [42] HASAN M W, ABBAS N H. An adaptive neural network with nonlinear FOPID design of underwater robotic vehicle in the presence of disturbances, uncertainty, and obstacles[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114451.
- [43] JI D, ZHOU S, REN J, et al. A prototype of newly dynamic underwater vehicle using fuzzy PID control[C]//2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics(ISIE). Vancouver, Canada: IEEE, 2019: 1121-1126.
- [44] WANG Y, HOU Y, LAI Z, et al. An adaptive PID controller for path following of autonomous underwater vehicle based on Soft Actor-Critic[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 307: 118171.
- [45] VON BENZON M, SØRENSEN F F, UTH E, et al. An open-source benchmark simulator: Control of a bluerov2 underwater robot[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(12): 1898.
- [46] VALAVANIS K P, GRACANIN D, MATIJASEVIC M, et al. Control architectures for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1997, 17(6): 48-64.
- [47] PHILLIPS A B, TEMPLETON R, ROPER D, et al. Autosub long range 1500: A continuous 2000 km field trial[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114626.
- [48] JAFFRE F, LITTLEFIELD R, GRUND M, et al. Development of a new version of the Remus 6000 autonomous underwater vehicle[C]//OCEANS 2019-Marseille. Marseille, France: IEEE, 2019: 1-7.
- [49] GOLDBERG D. Huxley: A flexible robot control architecture for autonomous underwater vehicles[C]//OCEANS 2011 IEEE-Spain. Santander, Spain: IEEE, 2011: 1-10.
- [50] WANG J, TANG Y, LI S, et al. The Haidou-1 hybrid underwater vehicle for the Mariana Trench science exploration to 10, 908 m depth[J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(4): 1054-1079.
- [51] XU J, DU Z, HUANG X, et al. Design and development of 10, 000-meter class autonomous underwater vehicle[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(11): 2097.
- [52] LIU H, WANG Y, LEWIS F L. Robust distributed formation controller design for a group of unmanned underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 51(2): 1215-1223.
- [53] 赵万龙, 刘功亮, 张敏, 等. 水下多源融合定位与导航技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2023.
- [54] 邢奥成, 李海兵, 阚宝玺, 等. 海洋地磁导航关键技术及发展趋势[J]. *导航定位与授时*, 2025, 12(2): 1-14.
- XING A C, LI H B, KAN B X, et al. Review of key technologies and development trends in marine geomagnetic navigation[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2025, 12(2): 1-14.
- [55] 兰天, 李鼎, 娄琪欣, 等. 水下地形辅助导航算法综述[J]. *导航定位与授时*, 2025, 12(1): 14-28.
- [56] ZHANG S, ZHAO S, AN D, et al. Visual SLAM for underwater vehicles: A survey[J]. *Computer Science Review*, 2022, 46: 100510.
- [57] YANG H, XU Z, JIA B. An underwater positioning system for UUVs based on LiDAR camera and inertial measurement unit[J]. *Sensors*, 2022, 22(14): 5418.
- [58] 杨健敏, 王佳惠, 乔钢, 等. 水声通信及网络技术综述[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(1): 1-21.
- [59] FARR N, WARE J, PONTBRIAND C, et al. Optical communication system expands CORK seafloor observatory's bandwidth[C]//OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. Seattle, Washington, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [60] 韩笑天. 水下长距离无线光通信若干关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2024.
- [61] BOWEN A D, YOERGER D R, TAYLOR C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11, 000 m depth[C]//OCEANS 2008. Quebec City, QC, Canada: IEEE, 2008.
- [62] 李围, 杨创, 赵胜. 基于 CAN 总线的全海深锂离子电池组监测系统的设计[J]. *船电技术*, 2022, 42(10): 80-83.
- [63] 苑志祥, 张浩, 张雪, 等. 深潜器用蓄电池的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(11): 2868-2875.
- [64] KWON L, KANG J G, BAIK K D, et al. Advancement and applications of PEMFC energy systems for large-class unmanned underwater vehicles: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 79: 277-294.

(责任编辑: 陈 曦)