

【引用格式】苗千龙, 马腾, 马东, 等. 水下地球物理场辅助导航技术综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(2): 220-231.

水下地球物理场辅助导航技术综述

苗千龙^{1, 2}, 马 腾^{1, 2, *}, 马 东², 范佳佳³, 张文君⁴

(1. 哈尔滨工程大学 南海研究院, 海南 三亚 572000;
2. 智能海洋航行器技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144)

摘要 随着海洋资源开发的加速, 智能水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 在海洋探索中的应用日益广泛。AUV 的高精度导航技术是其高效作业的关键, 而水下地球物理场辅助导航技术因其无需外部传感器辅助、无累积误差等优势, 成为近年来研究的热点。回顾了水下地球物理场辅助导航技术的发展现状, 重点分析了地形辅助导航、地磁辅助导航和重力辅助导航等主要方法。探讨了地球物理场辅助导航的原理、传感器技术等关键技术。此外, 针对以水文信息、偏振光等为数据源的水下地球物理场导航技术和多 AUV 协同地球物理场导航技术进行了简要概述, 最终总结了地球物理场辅助导航的未来发展方向。旨在为 AUV 水下导航技术的进一步发展提供参考。

关键词 水下地球物理场; 自主水下航行器; 地形辅助导航; 地磁导航; 重力导航

中图分类号 U666.11 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)02-0220-12

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.02.014

Review of Underwater Geophysical Field-Aided Navigation Technologies

MIAO Qianlong^{1, 2}, MA Teng^{1, 2, *}, MA Dong², FAN Jiajia³, ZHANG Wenjun⁴

(1. Nanhai Institute, Harbin Engineering University, Sanya 572000, China;

2. National Key Laboratory of Autonomous Marine Vehicle Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150001, China; 4. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract With the accelerated development of marine resource exploration, the application of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) in ocean exploration is increasingly widespread. High-precision navigation technology is crucial for efficient operation of AUVs, and underwater geophysical field-aided navigation has emerged as a research hotspot in recent years due to its advantages, such as independence from external sensors and immunity to cumulative errors. In this paper, the current state of underwater geophysical field-aided navigation technologies is reviewed, and the main methods of terrain-aided navigation, geomagnetic-aided navigation, and gravity-aided navigation are analyzed. The principle, key sensor technology, and other key technologies of geophysical field-aided navigation are discussed. Additionally, underwater geophysical field navigation technology based on hydrological information and polarized

收稿日期: 2025-03-10

作者简介: 苗千龙 (2000-), 男, 硕士生, 主要从事海底地形匹配导航研究。

*通信作者: 马腾 (1993-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水下机器人导航技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“多 AUV 协同定位与深海地形图同步构建方法研究” (52371305)。

light, as well as multi-AUV cooperative geophysical field-aided navigation technologies are introduced briefly. Finally, the future development direction of geophysical field-aided navigation is summarized. This paper aims to provide a reference for the further advancement of AUV underwater navigation technologies.

Key words underwater geophysical field; autonomous underwater vehicle; terrain-aided navigation; geomagnetic navigation; gravimetric navigation

0 引言

海洋资源开发, 特别是深海资源的开发利用, 是人类拓展生存空间、获取战略性资源以及推动前沿科技创新的重要途径, 对保障人类社会的可持续发展与未来能源安全具有深远的战略意义。智能水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)作为深海资源探索的重要载体, 可在高压、黑暗、复杂的深海环境下实现自主、安全的近底航行和精细化作业。通过AUV平台开展深海观测和探测任务, 可实现深海金属矿藏、深海生物群落、深海油气资源等目标的高效、大范围、精细化调查, 已逐步成为全球深海资源探测领域的核心技术平台。水下导航技术则是确保AUV在复杂海底环境中实现精准定位和高效路径规划的关键技术, 直接决定了深海资源勘探与科学任务的成败以及数据获取的有效性和可靠性, 是拓展人类深海认知、挖掘未知资源的重要技术保障^[1-2]。

与依赖电磁波信号进行导航的陆地和空中无人系统相比, AUV导航在原理和实现方式上存在根本差异。由于电磁波在水体中迅速衰减, 卫星导航信号(如GPS、北斗)无法直接穿透水层对水下航行器进行实时导航定位修正。因此, AUV若需借助卫星导航系统进行定位, 只能周期性浮出水面进行校准, 这不仅降低了探测作业的整体效率, 还可能破坏潜航任务的隐蔽性。因此, AUV通常依靠自身搭载的各类导航传感器建立独立自主的水下定位与导航体系。当前主流的水下导航技术体系主要包括航位推算(Dead Reckoning, DR)、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、水下声学导航系统以及地球物理场辅助导航技术^[3]。其中, DR和INS导航技术均基于对航速和航向角的传感器测量数据进行航迹推算, 但其导航精度严重依赖陀螺仪、加速度计等传感器的性能; 在缺乏外

部定位参考的情况下, 系统误差会随时间逐步累积, 难以满足远距离、高精度导航的需求^[4]。尤其是航位推算技术, 由于其采用相对低成本的传感器设备, 更容易产生严重的累积误差, 因此多用于成本受限或精度要求较低的AUV平台^[5]。

为解决长航时水下导航精度问题, 需引入辅助导航技术对惯导系统或航位推算系统进行误差校正。目前应用较为广泛的辅助导航技术包括水下声学导航和地球物理场辅助导航。水下声学导航通过测量水下航行器与预先布设的声学基阵间的距离或角度, 实现绝对位置的实时修正, 其典型系统包括长基线(Long Baseline, LBL)、短基线(Short Baseline, SBL)和超短基线(Ultra-short Baseline, USBL)3种配置^[6]。尽管声学导航方法具有定位精度高、无累积误差等显著优势, 但其实际应用中设备体积庞大、布设和维护成本较高, 且严重依赖外部基阵或母船的支持, 限制了其在小型AUV及广域自主探测中的应用效率与可行性。相较之下, 地球物理场辅助导航通过实时采集地形、地磁、重力等地球物理特征数据, 与预存数字地图进行匹配定位, 该技术既能规避对卫星与声学基阵的依赖, 又可消除时间累积误差, 在深海水下大范围长航时自主导航领域展现出独特优势, 为未来深海探测任务提供了极具潜力的技术路径^[7]。

本文对近年来水下地球物理场辅助导航方法进行回顾, 并展望水下地球物理场辅助导航方法未来发展方向, 内容安排如下: 第1章对现有的AUV水下导航方法进行回顾及优缺点分析; 水下地球物理场辅助导航方法相关内容在第2章进行阐述, 包括环境感知、先验海图构建、路径规划及匹配算法4部分; 第3章介绍多AUV协同地球物理场辅助导航技术; 在第4章进行水下地球物理场辅助导航方法总结与未来发展趋势分析; 总结部分在第5章进行说明。

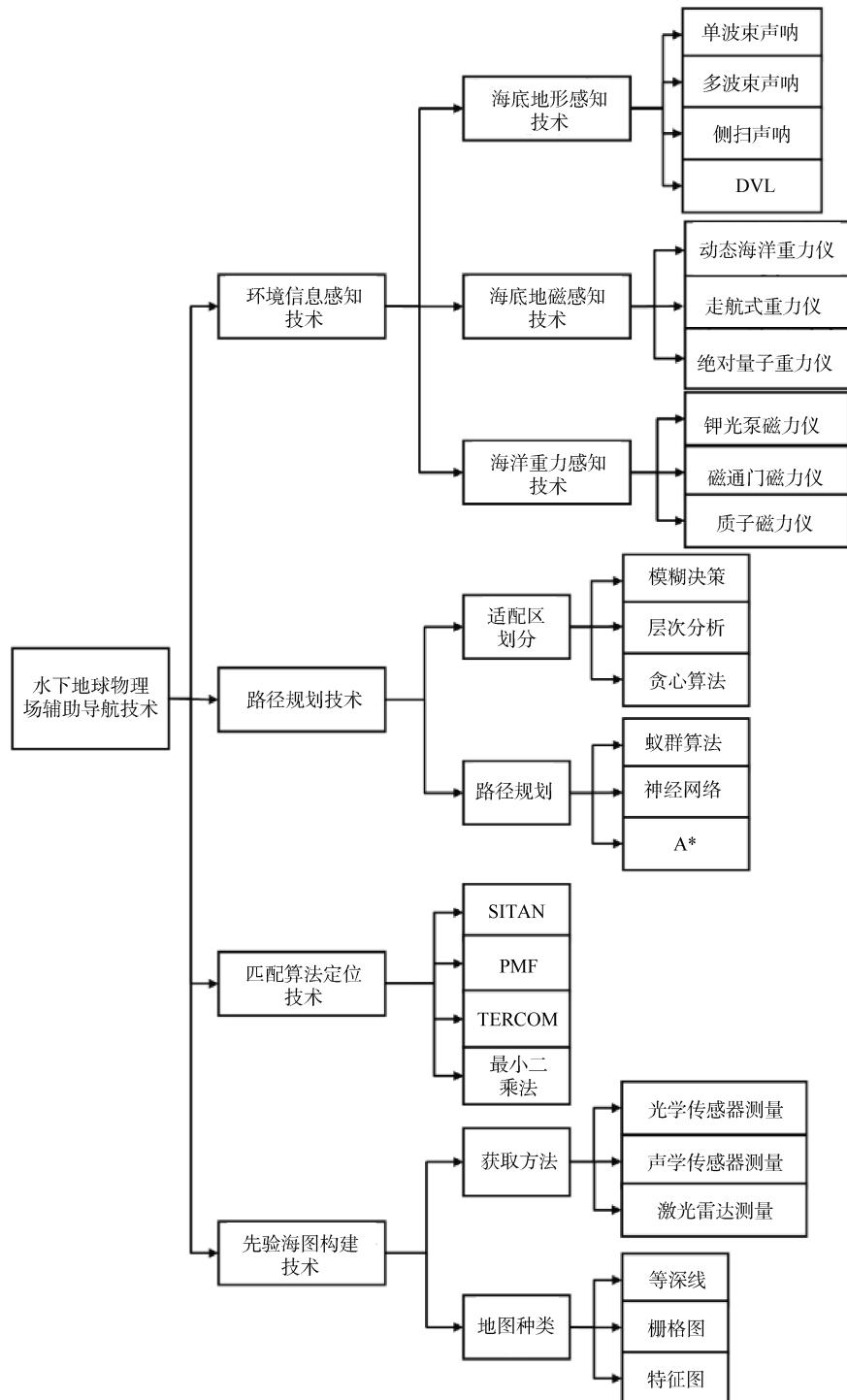


图 1 水下地球物理场辅助导航技术分类

Fig. 1 Classification of underwater geophysical field-aided navigation technologies

1 AUV 水下地球物理场辅助导航概述

水下地球物理场辅助导航中, AUV 利用水下地球物理场测量传感器测量得到的地球物理信息与先验数据库进行比对, 寻找最可能的 AUV 位置。

水下地球物理场辅助导航根据地球物理信息大致可以划分为 3 类: 地形信息、磁场信息和重力场信息。水下地球物理场辅助导航通常是以惯性导航/航位推算导航为主导航系统, 利用地球物理场辅助导航结果定期对主导航系统产生的漂移进行修正,

实现水下远距离高精度导航。

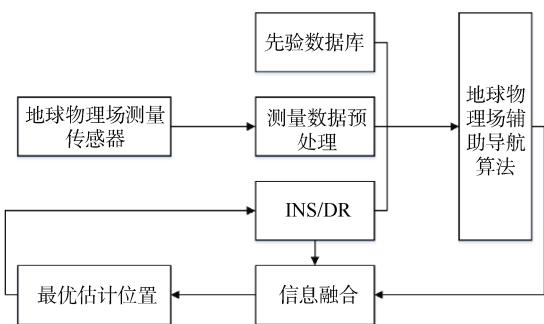


图 2 水下地球物理场辅助导航

Fig. 2 Underwater geophysical field-aided navigation

其中, 地形辅助导航由多部分组成, 包含测量传感器、先验数据库、先验地图适配区及路径规划、地形辅助导航算法等。其技术路线为通过事先测量得到的作业区域地形数据构建先验地形图, 利用实时测量得到的海底地形数据, 完成测量数据与先验地形图的匹配, 确定 AUV 的位置^[8]。

地磁辅助导航与地形辅助导航类似, 是通过测量获得的地磁序列与事先存储的水下地磁图进行匹配, 确定 AUV 的位置。不同于地形信息, 地磁导航包含多种特征信息: 磁偏角、磁倾角、水平分量等多达 7 个要素, 可以选择最合适的匹配要素进行匹配, 实现 AUV 水下导航^[9]。由于地磁场会随时间发生变化, AUV 自身携带的传感器设备也会对地磁测量产生干扰, 导致数据测量不准确, 因此, 目前对于水下地磁辅助导航的研究并未大面积展开。

重力辅助导航是利用重力异常值或重力梯度值与事先获得的重力场图进行匹配, 确定 AUV 的所在位置, 是一种利用对重力敏感传感器进行测量从而实现水下导航漂移修正的技术。将测量得到的重力图存储在计算机中, 在 AUV 航行过程中, 利用 AUV 携带的重力测量设备测量所处位置重力数据, 与重力图完成比对, 确定位置信息^[10]。

水下地球物理场导航不存在随时间增加的累计误差, 无需外界传感器设备辅助, 是一种无源水下导航方法, 也是 AUV 水下导航发展的主要方向之一。

2 地形/地磁/重力数据源的水下地球物理场辅助导航技术

水下地球物理场在线精细感知是 AUV 实现水

下地球物理场导航的前提。目前包括多波束测深声呐、磁力仪、重力仪等多种设备已可以实现水下物理场精确感知, 本节将对各类设备的应用情况和局限性分别进行阐述。

首先, 在水下地形测量方面, 目前常用传感器主要是声学传感器 2 类, 尽管水下激光测距仪等视觉传感器同样可以获取水下地形信息, 且分辨率更高、测量精确度更好, 但其测量范围有限, 且受海水水质等要求较高, 导致目前较少用于水下地球物理场辅助导航中。在地磁和重力辅助导航中, 由于 2 种方法不是向外界发生测量信息测量地球物理场, 而是感知 AUV 所在位置的地球物理场数据, 因此单次仅能测量得到单点的地球物理场信息, 测量利用的传感器多为重力仪或地磁仪。

2.1 多波束测深声呐

多波束测深声呐一次测量中能够发射大量的声学波束, 可单次得到一个地形条带的水深数据, 具有数据测量精度高、数据量大、分辨率高等优点, 是目前水下地形辅助导航方法最常用的测量传感器^[11-12]。目前以多波束测深声呐为传感器的地形辅助导航研究主要集中在如何提高多波束测深声呐地形辅助导航的精度与鲁棒性。

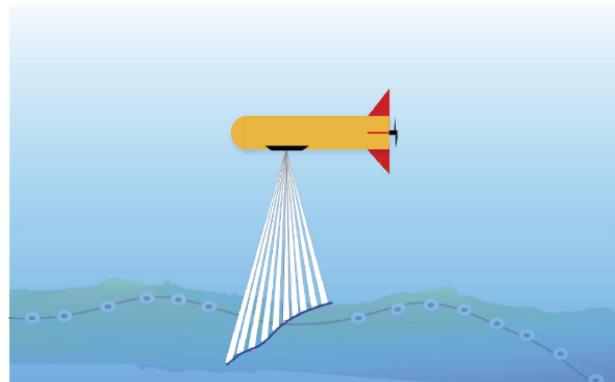


图 3 多波束声呐测深示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multibeam sonar bathymetry

2018 年, HAGEN 等以多波束声呐为环境感知传感器在浅水中进行 AUV 地形辅助导航试验, 利用四维 Rao-Blackwellized 点质量滤波估计潮汐和噪声干扰, 结果表明该方法在平坦地形和未知潮汐干扰下仍能正常工作^[13]。2019 年, PENG 等利用

多波束声呐在真实海图上进行仿真实验, 针对潮汐不可预测问题, 使用卡尔曼滤波估计潮汐偏差, 水平位置状态由点质量滤波估计; 针对地形测量受异常值影响导致 PF 发散问题, 利用 Huber 函数对 PF 中重要权值度量模型进行修正, 利用稳健代价函数对高斯似然函数进行修正, 减小异常值对结果的影响^[14-15]。2020 年, JUNG 等利用水面无人艇搭载多波束声呐进行地形辅助导航实验, 针对粒子滤波的粒子贫乏问题, 提出结合地形粗糙度的海底辅助匹配导航粒子滤波算法框架, 结果表明地形辅助导航误差相较航位推算降低 70%^[16-17]。2022 年, MOHRMANN 等提出将多波束声呐连续 ping 与成对匹配的分片对齐提高地图质量和精度的方法。所提出的方法可以在线使用, 主要针对后处理。在 AUV 和船载数据集上使用不同的参数设置进行测试。结果表明该方法都是可行的^[18]。

多波束测深声呐在实际应用中面临海量数据难以实时处理、环境噪声干扰严重以及高分辨率数据处理的难题。一方面, 多波束声呐测量数据规模庞大, 给实时地形建模与匹配计算带来了极大的复杂性与运算负担; 另一方面, 水体混响、声波散射和回波干扰等环境因素显著降低了系统探测精度。此外, 在浅海或复杂海底地形条件下, 设备运动补偿技术尚不成熟, 难以获取高分辨率、高精度的测量数据, 进一步限制了声呐在复杂环境中的应用效果^[19]。未来研究其主要集中于实时高精度三维地形导航技术的发展, 通过高性能计算平台与先进算法优化, 实现多波束声呐数据的实时处理与快速匹配。此外, 多传感器融合导航平台的构建, 将惯导、磁力仪与重力仪等多源信息有效结合, 有望显著提升导航定位的鲁棒性与精度。

实现上述目标需要有着高效实时的数据处理与降噪算法, 动态复杂环境下精确运动补偿技术的改进, 以及针对多源信息的高精度融合算法, 进而能使整体提高多波束声呐导航系统的精度与抗干扰能力, 推动 AUV 高效、可靠地在复杂水下环境中开展实时导航任务。

2.2 单波束测深声呐

单波束测深声呐测量原理与多波束声呐相似, 但其每次仅能获得单点的水下地形信息, 信

息获取有限, 在相同工作频率基础上, 单波束声呐功耗远低于多波束声呐, 能够有效延长 AUV 水下续航力^[20-21]。因此, 利用单波束声呐的地形辅助导航方法具有实现水下远距离导航的潜力。目前关于单波束地形辅助导航的研究主要集中在如何提高地形辅助导航方法的鲁棒性。

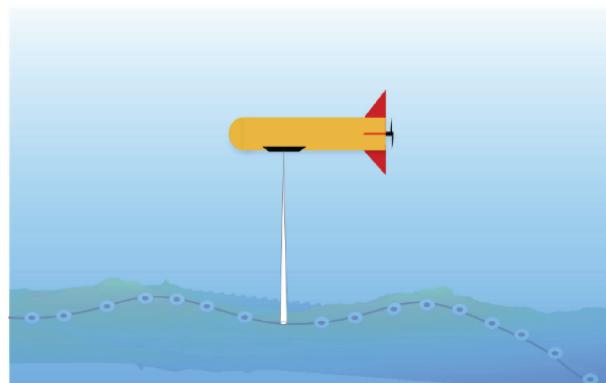


图 4 单波束声呐测量示意图
Fig. 4 Schematic diagram of single-beam sonar measurement

2017 年, ZHOU 等考虑单波束声呐实时获取地形数据有限, 将原始传感器数据合并到导航系统中实现关键传感器误差估计, 利用粒子滤波提供绝对有界位置误差测量更新, 利用实验数据进行仿真, 结果表明: 该方法可以成功应用于低成本 AUV, 并显著提高导航性能^[22]。2018–2021 年, SALAVASIDIS 等以单波束声呐为环境感知设备, 分别利用粒子滤波、Rao-Blackwell 粒子滤波算法构建面向远距离作业的海底地形辅助导航算法框架。利用 AUV 采集的单波束声呐数据进行仿真实验, 结果表明: 提出的算法框架能够将 AUV 导航误差长时间保持在任务要求范围内, 基于单波束声呐的海底地形辅助导航方法可实现数百千米的长时间精确导航^[23-26]。2020–2021 年, LIU 等开展了北极低分辨率海图下单波束声呐地形辅助导航算法研究, 采用模糊逻辑估计当前地形梯度下粒子分布方差, 利用归一化信息方差评估地形差异判断地形匹配有效性, 构建具有重定位功能的地形辅助导航系统。仿真结果表明: AUV 在平坦/起伏地形区域行驶 50 km 后, 仍能保持 2 km 以内的定位精度^[27-28]。2024 年, MA 等以单波束测深仪为环境感知设备, 提出了一种基于等高线的 SBES-TAN

路径规划方法,即使在 SBES 测量数据噪声较大的情况下,也能产生鲁棒、精确的导航结果。结果表明: 经过不同方法的模拟实验,与其他路径规划方法相比, CBPP 方法比其他方法更稳健,所规划路径上 TAN 具有最高的成功匹配几率和最小的定位误差^[29]。

单波束测深声呐在实际导航应用中存在明显的数据稀疏性和测量精度限制问题。使得地形匹配精度易受数据稀疏性的影响; 同时,载体运动轨迹误差与设备姿态误差对测深精度的影响显著,进一步制约了单波束系统的实际应用性能^[30]。鉴于低成本、轻量化导航需求的不断增长,单波束声呐导航方案在微型水下机器人和无人水下平台中的应用前景广阔。未来发展将聚焦于将单波束声呐与其他低成本、低功耗传感器(如惯性导航装置、磁力计、重力仪等)有效融合,构建经济高效的导航定位系统。推动单波束声呐导航性能的提升需要针对稀疏数据的高精度地形匹配与数据重构算法; 以及设备运动状态估计与误差的精确补偿技术; 实时动态自适应导航算法的优化与鲁棒性提升,从而有效克服单波束导航系统中数据稀疏性和运动状态误差的影响,提高导航的精度与可靠性。

2.3 多普勒测速仪

多普勒测速仪是根据多普勒效应测量 AUV 相对海底移动速度的声学传感器,在 DVL 测量 AUV 对地速度时,需要向海底发射四条声学波束,测量 AUV 水平方向的移动速度。DVL 在测量对地速度过程中,在获得 AUV 对底速度信息的同时也能测量得到 AUV 距离海底的高度,得到海底地形信息。DVL 往往用于对 INS 中速度信息的修正,是 AUV 惯性导航系统常用的测量传感器,因此利用 DVL 作为地形辅助导航测量传感器,在不引入外部传感器的情况下,能够得到海底地形信息用于地形辅助导航,在不增加 AUV 能耗基础上,提高导航系统定位精度。但由于直接利用 DVL 测量得到的海底地形信息数据可能存在较大误差,导致目前利用 DVL 作为地形测量传感器进行地形辅助导航方法的研究较少。

2010 年, ÅNONSEN 等利用 DVL 与高质量地形数据库进行地形辅助导航,利用点质量滤波进行

数据融合,以 DVL 作为测量传感器运行 5 h 后,水平导航精度保持在 5 m 以内^[31]。

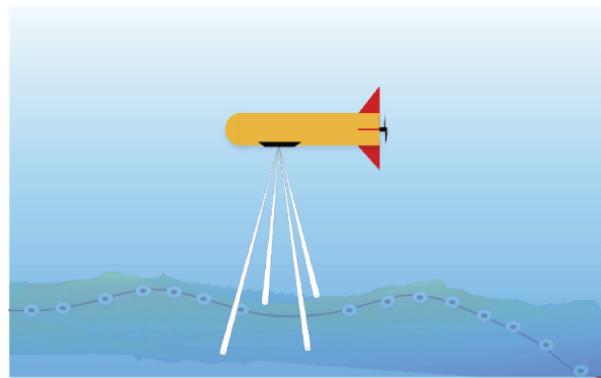


图 5 DVL 地形信息测量示意图
Fig. 5 Schematic diagram of DVL terrain information measurement

多普勒测速仪(DVL)在长距离航行过程中,其存在导航累积误差显著和环境敏感性等困难。此外,DVL 测量性能易受水质、海底底质等环境因素影响,在特殊环境条件下可靠性显著降低,限制了其实际应用的范围与精度^[32]。未来,随着水下智能航行器和无人潜航器(UUV)对高精度、长续航导航需求的不断提高,DVL 的应用场景将进一步扩展。同时,DVL 与惯导、声呐、磁力仪等其它传感器的组合导航和运动状态估计技术的发展,有望有效解决长距离水下导航过程中精度降低的问题。实现 DVL 导航性能提升的关键是适应复杂环境条件下的高鲁棒性测速技术; 开发针对导航误差累积效应的自适应补偿算法; 进一步探索多源信息辅助的多普勒导航方法,以提高 DVL 导航系统的长航程定位精度与整体可靠性。

2.4 侧扫声呐

侧扫声呐是一种水下成像声呐,与多波束声呐和单波束声呐测量原理不同,侧扫声呐返回的数据不是三维点云数据,而是返回海底地形区域的扫描线信息强弱,根据扫描线信息生成二维海底地形地貌。侧扫声呐可以获得连续的扫描线信息,拥有更高的地形测量精度与分辨率^[33-34]。由于侧扫声呐返回的信息为扫描线信息强弱,得到海底地形地貌信息,因此侧扫声呐往往用于海底遗骸探测等任务,利用侧扫声呐数据进行地形辅助导航研究相对较少。

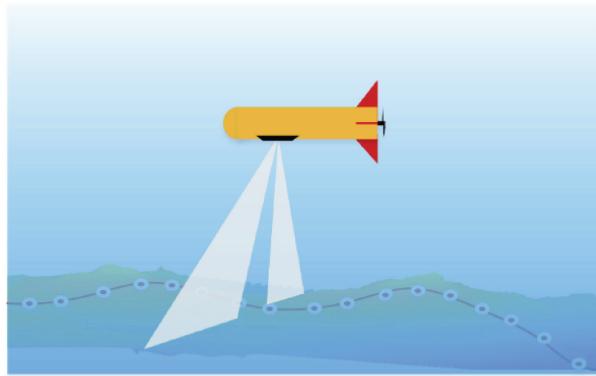


图 6 侧扫声呐测量示意图
Fig. 6 Schematic diagram of side-scan sonar measurement

2011 年, CHEN 等研究结合运动信息和声呐观测模型的实时侧扫声呐海底测绘方法, 在特征定位过程中考虑侧扫声呐工作原理、声呐测量区域和水中声速等因素, 结合 AUV 运动不确定性和实时观测误差, 采用栅格图建图算法进行建图, 在 AUV 上实现基于侧扫声呐信息的地标位置检测^[35]。2015 年, HAGEN 等利用 HISAS 1030 合成孔径侧扫声呐声呐在 HUGIN AUV 真实数据上进行离线测试, 利用点质量滤波进行数据融合, 地形导航限制位置误差的增长, 结果表明该方法取得良好的导航性能^[36]。2017 年, ÅNONSEN 等使用 HISAS 1030 合成孔径侧扫声呐进行地形辅助导航。AUV 进行自主测绘, 当导航精度较高时, 在任务早期测量基线并创建基线地图。当 AUV 路径穿过基线时, 该地图将用于地形辅助导航, 得到精确的导航结果^[37]。

侧扫声呐作为高分辨率的水下成像设备, 在导航应用最为突出的问题是二维侧扫图像向三维空间地形模型的有效转换问题^[38], 图像数据的空间匹配方法尚未完全成熟, 且在泥沙悬浮、水流扰动等复杂环境下, 其探测数据的可靠性和精度明显下降, 严重制约了侧扫声呐的实际导航应用能力。但随着水下精细化探测与导航需求的持续增加, 侧扫声呐在水下设施巡检、搜救任务和高精度导航领域的应用前景日益广泛。此外, 侧扫声呐数据与视觉图像、其它声学传感器数据的融合逐渐成为研究热点, 特别是声光融合技术的兴起, 为侧扫声呐的导航应用开拓了新的方向。

未来亟需在以下取得技术突破: 1) 针对侧扫声呐图像的快速三维重构算法研究; 2) 高效实时的声图匹配导航算法开发; 3) 环境干扰抑制与增强型数据处理技术的深入探索, 从而全面提升侧扫声呐在复杂水下环境中的数据可靠性、空间定位能力和导航精度。

2.5 水下磁力仪

与以多波束测深声呐、侧扫声呐等为环境感知设备的地形辅助导航不同, 地磁测量采用的传感器多为磁力仪, 每次仅能得到 AUV 所在位置的单点地磁数据, 主要利用磁力仪来感知海底磁异常而非主磁场来进行匹配导航定位^[39]。

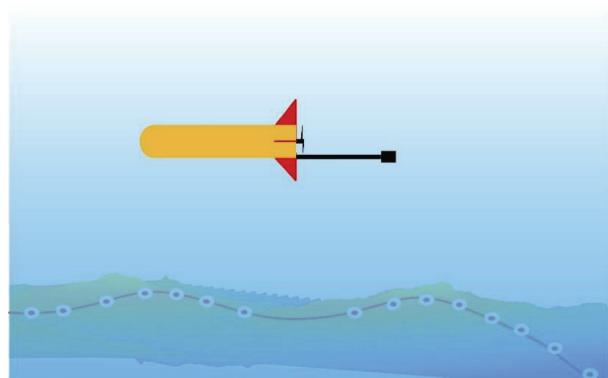


图 7 水下地磁测量示意图
Fig. 7 Schematic diagram of underwater geomagnetic measurement

2018 年, PAGE 等研究用于海岸磁性测量的下滑翔机。下滑翔机上安装有高质量磁力计, 能够准确地绘制密集的海洋学特征^[40]。2018 年, QUINTAS 等提出基于水深和磁场的地球物理导航方法。由于地形特征不足, 传统 TAN 方法在定位精度方面表现不佳。利用磁性和地形信息互补, 实现水下高精度定位。实验结果表明: 利用磁数据进行 AUV 地球物理导航具有很大潜力^[41]。

水下磁力仪导航技术在现阶段应用中面临困难主要包括磁场干扰与磁图数据资源不足的问题。水下平台自身磁场以及外界环境磁场变化引起的干扰现象普遍存在, 显著降低了磁力测量数据的可靠性与导航定位精度; 高精度、覆盖广的磁场数据库较少, 给磁场匹配导航技术的有效实施与推广带来了难题。磁场导航技术由于磁场相对稳定、不随时间显著变化的特性, 在水下长续航任务中具有重

要的应用价值。此外, 将磁场与地形场、重力场等多种地球物理场信息有效融合, 构建多场融合导航系统, 已成为未来水下导航研究的趋势, 有望进一步提升导航系统的精度与鲁棒性。为实现磁力仪导航技术的突破与实际应用性能的提升, 可利用磁力数据去噪及高精度处理算法的研发及快速构建高分辨率磁场数据库的技术方法, 从而解决磁场导航在水下环境中的实际应用过程中的难题。

2.6 水下重力仪

重力辅助导航方法与地磁相同, 都是利用 AUV 内部携带的传感器测量所处位置的重力/磁力数据, 不需要向外部发射测量传感器数据, 因为每次只能测量得到单点的数据。目前, 对于水下重力辅助导航的测量采用的传感器为水下重力仪^[42]。

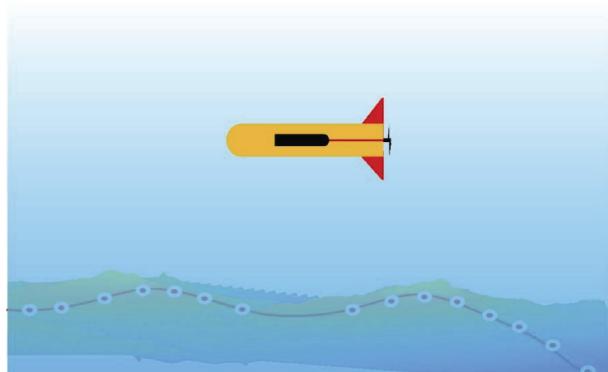


图 8 水下重力测量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of underwater gravity measurement

2018 年, SHINOHARA 等研究 AUV 上大范围海底重力测量的水下重力测量系统, 搭载在 Urashima AUV 进行多次试验。系统由 1 台水下重力仪和 1 台水下重力梯度仪组成, 2014–2015 年在冲绳伊泽呐火山口进行重力异常值测绘。2017 年, 在日本相扑湾利用重力测量系统进行观测, 重力仪在恒定深度作业期间精度为 0.1 mGal^[43–44]。2020–2021 年, ZHANG 建立 AUV 重力测量数学模型, 在 AUV 平台上建立捷联式重力仪水下测量实验系统, 在武汉木兰湖进行 6 次重力线测量。重力测量实验中, 水面、水下的重力测量精度分别为别 0.62 mGal 和 0.42 mGal, 验证了水下移动重力测量的可行性^[45–46]。2023 年, AI 等提出了一种适用于水下重力辅助导航的实时自主重力测量方法, 通过

融合重力仪、电磁流速计 (EML) 和深度计 (DG) 的数据, 实现 mGal 级别的高精度自主重力测量。该方法通过融合导航信息、运动加速度、速度和深度数据, 优化了水下惯性/重力匹配导航所需的信息, 解决了传统方法依赖外部导航信息的问题。实验验证表明: 该方法在重复测线上的精度优于 1.01 mGal (0.003 3 Hz), 适合长时间隐蔽水下导航和重力测量应用^[47]。

水下重力仪在导航领域中的应用易受到重力场信号微弱及环境的影响, 仅仅依靠仪器的灵敏度, 较难实现高精度的实时定位。此外, 重力仪设备普遍存在体积大、功耗高的问题, 这严重限制了其在轻量化平台和长期水下任务中的广泛应用。随着深海战略任务对长航程、高稳定导航定位需求的日益增加, 水下重力仪凭借其重力场长周期稳定性优势, 具备一定的战略性应用前景。为推动水下重力导航技术的实际应用, 可在相关领域进行改进创新。如研制高灵敏度、低功耗、微型化的新型重力仪设备; 开发针对弱信号检测与实时匹配的高效算法; 深入研究多场信息融合中重力场数据的高效处理与实时导航算法, 从而能够全面提升重力场导航在水下平台中的实际应用水平。

由于声学传感器向外发生声学波束测量地球物理信息, 因此其有多种形式进行信息测量, 能够得到多种形式的地形信息, 在地球物理场辅助导航中, 较重力仪与磁力仪更具匹配优势。但是, 由于重力仪与磁力仪不需要向外界发射信息就能够完成地球物理场测量, 其隐蔽性要高于水下声学传感器测量, 更适合进行水下隐蔽导航。

3 多 AUV 协同地球物理场辅助导航

地球物理场辅助导航方法多采用单 AUV 进行水下导航定位, 但单 AUV 在水下作业过程中, 会遇到地球物理场特征缺乏的区域, 可能导致导航结果失效, 无法实现水下精准导航定位。多 AUV 协同地球物理场导航技术则可以克服地球物理场特征缺乏带来的影响, 通过 AUV 间通信来提高导航定位的精度与鲁棒性。

2021 年, ANDERSON 等提出基于地形信息的水下协同定位通信技术, 并通过仿真和现场试验对该技术可行性进行验证。研究结果表明: 基于地形

的水下协同定位通信技术提供了低带宽通信策略，在 3 次试验中仅使用少于传统方法 43% 的通信带宽，就实现更高精度的定位^[48]。2021 年，李智慧提出基于地形匹配置信度的双 AUV 地形辅助导航方法，单 AUV 通过粒子滤波实现单波束声呐地形辅助导航，将 AUV 所在位置地形匹配置信度融入协同导航算法中，利用 EKF 融合多 AUV 定位信息，仿真结果表明该方法能够取得鲁棒的定位结果^[49]。2023 年，ZHU 等提出了一种基于层次化强化学习 (Hierarchical Reinforcement Learning, HRL) 的多 AUV 协同导航方法，利用半马尔可夫决策过程 (Semi-Markov Decision Process, SMDP) 将任务分解为轨迹规划和导航处理两个阶段，并通过 Q 学习算法 (Quality-Learning Algorithm) 和无迹卡尔曼滤波 (UKF) 进行状态估计。研究设计了一种动态调整导航轨迹的方法，以降低从 AUV 的定位误差，同时维持主从 AUV 之间的合理距离。仿真实验表明：该方法相比传统方法显著提高了多 AUV 协同导航的精度和效率，具有良好的鲁棒性和在复杂水下环境中的应用潜力^[50]。2024 年，BEN 等提出了一种基于因子图 (Factor Graph, FG) 和节点伸展策略的多 AUV 协同导航算法，旨在解决海洋环境中多 AUV 系统受洋流干扰导致的导航精度问题。研究建立了一个包含洋流速度变量节点的因子图模型，并通过节点伸展策略将循环因子图转换为无循环结构，从而避免了迭代计算的复杂性。结合求和-积算法 (Sum-Product Algorithm, SPA)，该方法能够同时估计 AUV 的导航信息和洋流速度。仿真和湖泊实验结果表明：提出的算法在导航精度和洋流速度估计方面分别比传统的因子图方法和扩展卡尔曼滤波 (EKF) 方法提高了 7.71% 和 14.60%。此外，该算法在计算复杂性上优于基于粒子滤波的非参数方法和传统因子图算法，适用于多 AUV 动态拓扑结构的实时协同导航^[51]。

在单 AUV 地球物理场匹配导航中，环境非适配区的存在显著影响系统可靠性。此类区域通常表现为弱地球物理场特征（如平坦海底地形、地磁静默区）或动态场畸变（如热液活动干扰地磁场），导致导航算法因特征匹配信噪比 (SNR) 低于阈值而失效。当单 AUV 处于导航非适配区时，利用多

AUV 间的通信来实现位置误差修正，提高 AUV 的定位精度与鲁棒性。

尽管多 AUV 协同导航具备理论优势，其实施仍受限于水声信道特性与置信度量化不确定性。首先，水声通信的窄带宽（典型值<10 kbps）、高传输延迟（0.5~2 s/km）及多普勒频移导致群组间状态信息异步，尽管现有研究通过稀疏通信拓扑优化可降低数据交换频率，但可能引发滤波发散风险。此外，协同导航中单体 AUV 需基于本地协方差矩阵与物理场匹配残差动态评估自身定位置信度，但非高斯噪声环境下传统卡方检验方法易产生虚警/漏警，造成错误权重分配，影响协同导航效果。

未来随着低信噪比物理场特征增强算法、非完美通信下的鲁棒协同滤波架构等技术发展，多 AUV 协同地球物理场导航有望成为解决 AUV 编队水下长期精确定位的重要技术路线。

4 地球物理场辅助导航未来发展方向

4.1 多地球物理场融合弹性 PNT 系统

当前地球物理场导航系统主要依赖单一场匹配定位，但在场特征模糊区（如地磁静带、重力平坦区）或动态干扰区（如海底热液地磁畸变）等非适配区中，存在匹配算法因信噪比 (SNR) 低于检测阈值而失效问题。

不同物理场（如重力场、地磁场、地形场）对同一区域的适配性呈现空间互补特性，通过多地球物理场融合导航可显著提升系统鲁棒性。但是，为实现多场同步感知，AUV 需搭载磁力计、重力梯度仪等多种传感器，导致平台载荷增加，对于小型 AUV，其有限的有效载荷与能源容量难以支撑多传感器长期运行。因此，需根据 AUV 对当前环境下物理场特性的实时感知结果，推动多物理场耦合特征提取算法、传感器异构集成等技术发展，开发高效节能的弹性 PNT 综合系统。

4.2 水下仿生导航

海洋生物在长期进化过程中形成了基于地球物理场信息的水下自主导航能力，典型实例包括：蠵龟 (Caretta caretta) 通过感知地磁场强度与倾角实现跨洋迁徙路径规划；鲑鱼 (Oncorhynchus spp.) 利用磁场梯度特征完成精准洄游定位；螳螂虾

(Stomatopoda) 则结合海底地形场记忆与地磁矢量感知建立巢穴回归机制。这些现象表明: 地球物理场(包括地磁场、重力场、地形场等)在海洋生物导航行为中具有普适性作用机制, 其仿生应用可为水下自主航行器(AUV)导航技术提供创新思路。

然而, 当前针对水下地球物理场仿生导航的系统性研究仍处于初步探索阶段。现有成果多集中于少数典型物种(如海龟、信天翁)的磁场感知机理分析, 而对其他潜在生物模型(如利用电场导航的魟鱼、依赖声场定位的鲸类)的跨物理场耦合机制缺乏深入解析。更关键的是, 受限于生物神经信号采集技术与跨尺度场感知机理建模的复杂性, 研究者尚未完全揭示生物体内多物理场信息融合、路径决策与误差补偿的完整神经通路。这导致现有仿生导航技术多停留于单一物理场特征模拟层面, 难以复现生物体的鲁棒性与环境适应性。

随着跨学科研究方法(如生物机器人学、计算神经科学)的深度介入, 地球物理场仿生导航技术有望为复杂海洋环境下的隐蔽导航、长航时定位提供全新解决方案。

5 结束语

随着AUV技术的快速发展,AUV的地球物理场辅助导航技术也随之逐渐进步。在现有的地球物理场辅助导航中, 地形辅助导航由于其探测技术发展较为完善, 能够得到更适合匹配的地球物理场数据, 是目前水下地球物理场的主要组成部分。

地磁/重力辅助导航技术不需要向外界发射探测信号就能够得到地球物理场数据, 其隐蔽性及安全性要高于地形辅助导航。但是, 由于单次只能测量得到单点的地球物理场数据, 导致其适用性及定位精度受到限制。

除传统的地形、重力、地磁信息辅助导航外, 人们利用其它地球物理场数据, 如海水信息、太阳偏振光等进行辅助定位, 通过利用新的地球物理场辅助导航手段, 来避免现有导航方法存在的问题, 为地球物理场辅助导航方法提供新的发展思路。

随着水下作业任务需求的逐渐增加, 远距离地球物理场辅助导航是主要的发展方向之一, 但目前

受限于AUV携带的能源, 导致地球物理场辅助导航的能耗受到限制。人们探求低功耗的鲁棒地球物理场辅助导航方法, 通过提高远距离地球物理场辅助导航的鲁棒性, 实现远距离精准定位。

综上所述, 水下地球物理场辅助导航技术具有巨大的发展前景。而且, 随着人类探测技术的发展, 大量的先验海图数据被测量并加入先验海图数据中, 都给水下地球物理场辅助导航的发展提供了充足的动力。水下地球物理场辅助导航技术是未来AUV水下导航技术的重要组成部分。

参考文献

- [1] HASAN K, AHMAD S, LIAF A F, et al. Oceanic challenges to technological solutions: a review of autonomous underwater vehicle path technologies in biomimicry, control, navigation and sensing[J]. IEEE Access, 2024, 12: 46202-46231.
- [2] WYNN R B, HUVENNE V A I, BAS T, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. Marine Geology, 2014, 352: 451-468.
- [3] FAN S S, BOSE N, LIANG Z M. Polar AUV challenges and applications: a review [J]. Drones, 2024, 8 (8): 8080413.
- [4] DINC M, HAJIYEV C. Integration of navigation systems for autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2015, 14 (1): 32-43.
- [5] ZHANG Y, ZHANG F H, WANG Z L, et al. Localization uncertainty estimation for autonomous underwater vehicle navigation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11 (8): 11081540.
- [6] KEBKAL K G, MASHOSHIN A I. AUV acoustic positioning methods[J]. Gyroscopy and Navigation, 2016, 24 (3): 115-130.
- [7] 范刚, 张亚, 赵河明, 等. 水下机器人定位导航技术发展现状与分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (3): 22-29.
- [8] MA D, MA T, LI Y, et al. Underwater multizonotope terrain-aided navigation method with coarse map based on set-membership filter [J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42 (1): 242-256.
- [9] 陆一, 魏东岩, 纪新春, 等. 地磁定位方法综述 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9 (2): 118-130.

- [10] 王博, 付梦印, 李晓平, 等. 水下重力匹配定位算法综述[J]. 导航与控制, 2020, 19 (Z1): 170-178.
- [11] LAMOURET M, ABADIE A, VIALA C, et al. Measuring fish activities as additional environmental data during a hydrographic survey with a multi-beam echo sounder[C]// OCEANS 2019-Marseille. Marseille: IEEE, 2019.
- [12] LEE Y J, LIM Y J, YEU T K, et al. A simulation of real-time seabed mapping using multi-beam echo sounder measurement model[J]. Journal of Institute of Control Robotics and Systems, 2022, 28 (5): 436-443.
- [13] HAGEN O K, ÅNONSEN K B. Terrain referenced navigation using sand dunes and sand ripples in presence of tides[C]// OCEANS 2018 MTS/IEEE. Charleston: IEEE, 2018.
- [14] PENG D D, ZHOU T, XU C, et al. Marginalized point mass filter with estimating tidal depth bias for underwater terrain-aided navigation[J]. Journal of Sensors, 2019: 1-15.
- [15] PENG D D, ZHOU T, FOLKESSON J, et al. Robust particle filter based on Huber function for underwater terrain-aided navigation[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13 (11): 1867-1875.
- [16] JUNG J, PARK J, CHOI J, et al. Terrain based navigation for an autonomous surface vehicle with a multibeam sonar[C]// OCEANS 2019-Marseille. Marseille: IEEE, 2019.
- [17] JUNG J, PARK J, CHOI J, et al. Navigation of unmanned surface vehicles using underwater geophysical sensing[J]. IEEE Access, 2020, (8): 208707-208717.
- [18] MOHRMANN J, GREINERT J. AUV navigation correction based on automated multibeam tile matching[J]. Sensor, 2022, 22 (3): 954.
- [19] LI Z X, PENG Z T, ZHANG Z, et al. Exploring modern bathymetry: a comprehensive review of data acquisition devices, model accuracy, and interpolation techniques for enhanced underwater mapping[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1178845.
- [20] GUO Y B. 3D underwater topography rebuilding based on single beam sonar[C]// 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013). Kunming: IEEE, 2013.
- [21] BANDINI F, OLESEN D, JAKOBSEN J, et al. Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22 (8): 4165-4181.
- [22] ZHOU L, CHENG X H, ZHU Y X, et al. An effective terrain aided navigation for low-cost autonomous underwater vehicles [J]. Sensors, 2017, 17 (4): 680.
- [23] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, HARRIS C A, et al. Towards arctic AUV navigation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51 (29): 287-292.
- [24] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, MCPHAIL S D, et al. Terrain-aided navigation with coarse maps-toward an arctic crossing with an AUV [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46 (4): 1192-1212.
- [25] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, HARRIS C A, et al. Terrain-aided navigation for long-endurance and deep-rated autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36 (2): 447-474.
- [26] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, FENUCCI D, et al. Terrain-aided navigation for long-range AUVs in dynamic under-mapped environments[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38 (3): 402-428.
- [27] LIU Y J, ZHANG G C, HUANG Z J. Study on the arctic underwater terrain-aided navigation based on fuzzy-particle filter [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2021, 23 (4): 1017-1026.
- [28] LIU Y J, ZHANG G C, CHE C D. Underwater terrain-aided navigation relocation method in the arctic[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 54368-54368.
- [29] MA D, MA T, LI Y, et al. A contour-based path planning method for terrain-aided navigation systems with a single beam echo sounder[J]. Measurement, 2024, 226: 114089.
- [30] GBINENIKARO O P, ADEKOYA O O, ETUKUDOH E A. Review of modern bathymetric survey techniques and their impact on offshore energy development [J]. Engineering Science & Technology Journal, 2024, 5 (4): 1281-1302.
- [31] ÅNONSEN K B, HAGEN O K, et al. An analysis of real-time terrain aided navigation results from a HUGIN AUV [C]// OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle. Seattle: IEEE, 2010.
- [32] MERVEILLE F F R, JIA B Z, XU Z Z, et al. Advancements in sensor fusion for underwater SLAM: a review on enhanced navigation and environmental perception[J]. Sensors, 2024, 24 (23): 7490.
- [33] CHRISTENSEN J H, MOGENSEN L V, RAVN O. Side-scan sonar imaging: real-time acoustic streaming[J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54 (16): 458-463.
- [34] ANNALAKSHMI G, MURUGAN S S, RAMASUNDARAM K. Side scan sonar images based ocean bottom sediment classification[C]// 2019

- International Symposium on Ocean Technology (SYMPOL). Ernakulam: IEEE, 2019.
- [35] CHEN E, HUANG S W, WANG W H, et al. Side scan sonar grid map for unmanned underwater vehicle navigation[C]// OCEANS 2011 MTS/IEEE Kona. Waikoloa: IEEE, 2011.
- [36] HAGEN O K, ÅNONSEN K B, SÆBØ T O, et al. Toward autonomous mapping with AUVs-line-to-line terrain navigation[C]// OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. Washington D. C.: IEEE, 2015.
- [37] ÅNONSEN K B, HAGEN O K, BERGLUND E, et al. Autonomous mapping with AUVs using relative terrain navigation[C]// OCEANS 2017-Anchorage. Anchorage: IEEE, 2017.
- [38] ARAUJO A A, HEDLEY N. Bathymetric data visualization-a review of current methods, practices and emerging interface opportunities[J]. The International Hydrographic Review, 2023, 29 (2): 34691.
- [39] QI Z, LI J, C D X, et al. Method and experiment for compensating the interferential magnetic field in underwater vehicle[J]. Measurement, 2014, 47: 651-657.
- [40] PAGE B R, NAGLAK J, SIETSEMA M, et al. Littoral magnetic and water column survey underwater glider[C]// 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). Porto: IEEE, 2018.
- [41] QUINTAS J, TEIXEIRA F C, PASCOAL A, et al. Magnetic signal processing methods with application to geophysical navigation of marine robotic vehicles[C]// OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey: IEEE, 2016.
- [42] XU X C, WANG Q, JIAO T, et al. On the air buoyancy effect in MEMS-based gravity sensors for high resolution gravity measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (20): 22480-22488.
- [43] SHINOHARA M, KANAZAWA T, FUJIMOTO H, et al. Development of a high-resolution underwater gravity measurement system installed on an autonomous underwater vehicle[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(12): 1937-1941.
- [44] SHINOHARA M, ISHIHARA T, ARAYA A, et al. Mapping of seafloor gravity anomalies by underwater gravity measurement system using autonomous underwater vehicle for exploration of seafloor deposits[C]// OCEANS 2017-Anchorage. Anchorage: IEEE, 2017.
- [45] ZHANG Z Q, LI J C, ZHANG K D, et al. Experimental study on underwater moving gravity measurement by using strapdown gravimeter based on AUV platform[J]. Marine Geodesy, 2020, 44 (2): 108-135.
- [46] ZHANG Z Q, YU R H, CUI Y F. AUV 水下移动重力测量建模及误差分析 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4 (1): 1-7.
- [47] AI W Y, ZHONG S, LENG Y, et al. A real-time autonomous gravity measurement method for underwater gravity-aided navigation[J]. IEEE Access, 2023, 11: 135728-135737.
- [48] ANDERSON J, HOLLINGER G A. Communication planning for cooperative terrain-based underwater localization[J]. Sensors, 2021, 21 (5): 1675.
- [49] LI Z H. 双智能水下机器人地形匹配协同导航 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [50] ZHU Z X, ZHANG L C, LIU L, et al. An efficient multi-AUV cooperative navigation method based on hierarchical reinforcement learning[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(10): 1863.
- [51] BEN Y Y, SUN Y, LI Q, et al. Multi-AUV cooperative navigation algorithm based on factor graph with stretching nodes strategy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3460885.

(责任编辑: 曹晓霖)