

# AUV 对复杂海底地形地貌精细化探测的研究方法

王月雷 张宇峰 焦自璐 赵凌霄 范倬凡  
深海技术科学太湖实验室连云港中心 江苏 连云港 222006

**摘要:** AUV (自主水下航行器) 在海洋探测领域发挥着关键作用, 本文阐述了AUV对复杂海底地形地貌精细化探测的重要性, 包括助力海洋资源勘探、保障海洋工程安全、推动海洋科学研究等。介绍了关键技术, 如高精度导航定位、多传感器融合探测、智能避障、高效能源管理技术。还说明了数据处理流程, 涵盖数据采集与预处理、多源数据融合与建模、地形特征提取与分类、三维地形模型构建与输出, 为海洋资源勘探、工程建设、科学研究等提供有力支撑。

**关键词:** AUV; 复杂海底; 地形地貌; 精细化探测; 方法

## 引言

随着海洋开发不断深入, 对复杂海底地形地貌的精细化探测愈发重要。AUV (自主水下航行器) 凭借其独特优势成为关键探测工具。本文将详细阐述AUV对复杂海底地形地貌精细化探测的重要性, 包括在海洋资源勘探、保障海洋工程安全及推动海洋科学研究等方面的作用。同时, 介绍AUV探测的关键技术, 如高精度导航定位、多传感器融合探测等, 以及数据处理流程, 为全面了解AUV在海底地形地貌探测中的应用提供参考

## 1 AUV对复杂海底地形地貌精细化探测的重要性

一是在海洋资源勘探上, 海洋蕴含丰富矿产、生物和能源资源, 复杂海底地形地貌与资源分布紧密相关。海底热液活动区常伴铜、锌、铅等金属硫化物矿床, AUV精细化探测可准确获取热液区地形地貌信息, 涵盖热液喷口位置、形态及周围地质构造, 为矿产资源勘探开发提供依据。特殊海底地形如海山、海沟是众多海洋生物栖息繁殖场所, AUV精细化探测能帮助我们了解这些区域生物群落结构、分布规律及生态环境特征, 支持生物资源保护与可持续利用。二是在保障海洋工程安全方面, 人类对海洋开发利用深入, 海底管道铺设、海上风电场建设、跨海大桥建设等海洋工程增多, 复杂海底地形地貌对其安全运行构成潜在威胁。海底礁石、沉船等障碍物可能损坏海底管道致油气泄漏, 海底滑坡、泥石流等地质灾害可能冲毁海上风电场基础设施。AUV精细化探测可提前发现潜在危险因素, 为海洋工程设计、施工和运行提供详细地形地貌数据, 助工程师采取防护措施保障安全。三是在推动海洋科学研究上, 海底地形地貌是重要研究内容, 记录地球海陆变迁、板块运动等地质事件, 对研究地球演化历史和地质构造意义重大<sup>[1]</sup>。AUV精细化探测获取的高分辨率海底地形地貌数据, 为海洋地质

学家提供更详细准确研究资料, 助其深入了解海底地形形成机制和演化过程。此外, 海底地形地貌与海洋环流、海洋生态系统等密切相关, AUV探测数据为海洋学家研究海洋环流模式、海洋生物分布等提供基础数据, 推动海洋科学研究深入发展。

## 2 AUV精细化探测复杂海底地形地貌的关键技术

### 2.1 高精度导航定位技术

在复杂海底环境中, 传统导航定位方式存在明显局限: 惯性导航通过自身惯性元件测量运动参数来确定位置, 然而会随时间推移产生误差积累; 多普勒声呐导航借助声波多普勒效应测速定位, 同样存在误差问题, 这些传统方法难以满足精细化探测对定位精度的严苛要求。为提升定位精度, 需采用多种导航定位技术融合的方式, 比如将惯性导航与声学定位系统相结合, 惯性导航可在短时间内提供精确位置信息, 声学定位系统通过测量AUV与已知位置信标之间的距离等信息, 对惯性导航产生的误差进行实时修正, 二者协同实现高精度导航定位。此外, 全球定位系统 (GPS) 能发挥辅助作用, 当AUV处于水面时, 利用GPS进行定位, 获取的准确位置信息可作为初始位置数据提供给AUV, 在其下潜开展探测任务过程中, 以此初始位置为参考, 结合惯性导航与声学定位系统的融合数据, 进一步保障定位的准确性, 为AUV在复杂海底进行精细化地形地貌探测提供可靠的位置支撑。

### 2.2 多传感器融合探测技术

多传感器融合探测技术整合不同类型传感器数据并融合处理, 可有效提升探测精度与可靠性。实际应用中, 多波束测深仪能精确测量海底深度信息, 为描绘海底地形提供基础数据; 侧扫声呐可生成海底声学图像, 清晰呈现海底表面形态与物体分布; 浅地层剖面仪专注于探测海底以下地质结构, 揭示海底地层组成与构造特征<sup>[2]</sup>。不

过, 这些传感器各有优势也均有局限, 将多波束测深仪、侧扫声呐、浅地层剖面仪等传感器数据融合处理, 能取长补短。综合多波束测深仪的深度数据、侧扫声呐的图像信息以及浅地层剖面仪的地质结构数据, 可获取更全面准确的海底地形地貌信息, 既涵盖海底表面形态特征, 又包含海底以下地质情况, 进而实现对复杂海底环境的精细化探测, 为海洋资源勘探、海洋工程建设、海洋科学研究等众多领域提供有力支撑。

### 2.3 智能避障技术

智能避障技术涵盖障碍物检测、避障决策、避障动作执行三个核心环节。其中, 障碍物检测是基础, 借助声学传感器、光学传感器等设备对AUV周围环境实时监测, 声学传感器利用声波传播特性探测较远距离障碍物, 光学传感器获取清晰近距离环境图像, 二者配合能及时发现不同距离与类型的障碍物, 为后续环节提供准确信息。避障决策环节依据检测到的障碍物位置、大小、形状等信息, 结合AUV当前的航向、速度、剩余电量等状态, 以及探测任务的探测区域、探测精度等具体要求, 通过特定算法制定合理避障策略, 该策略需综合多方面因素, 确保AUV避障时对探测任务影响最小。避障动作执行是最终体现, 执行机构根据避障决策制定的策略, 控制AUV改变航向、调整速度或采取其他必要动作, 安全绕过障碍物。整个过程中, 三个环节紧密配合、协同运作, 让AUV能在复杂海底环境灵活应对各类障碍物, 保障探测任务高效、安全完成。

### 2.4 高效能源管理技术

由于水下环境特殊, 其能源供应主要依赖电池, 所以必须采用高效能源管理技术来提升能源利用效率、延长续航时间。该技术涵盖能源监测、能源分配和能源优化控制等方面。能源监测是基础, 借助能源监测系统实时监测AUV能源消耗情况, 清晰掌握各设备能源需求, 为后续环节提供准确数据, 保障能源管理决策科学。能源分配依据探测任务要求和能源监测结果开展, 不同任务对各设备需求不同, 合理分配能源并优先保障关键设备供应, 能避免因能源不足致关键设备停机而影响探测进度, 因为关键设备正常运行是AUV完成探测任务的重要前提<sup>[3]</sup>。能源优化控制是提升能源利用效率的关键, 采用调整设备运行模式, 使其在合适状态运行以避免能源浪费, 以及优化航行路径选择能耗最低路线减少航行能源消耗等策略, 可降低AUV整体能源消耗、提高利用效率, 进而延长续航时间, 让AUV能在水下长时间、大范围开展探测工作, 满足多样化探测需求。

## 3 AUV复杂海底地形地貌精细化探测的数据处理流程

### 3.1 数据采集与预处理

AUV执行复杂海底地形地貌精细化探测任务时, 在探测进程中同步开展多类型数据采集工作, 涵盖声学数据、光学数据以及定位数据。声学数据借助声呐等设备获取, 光学数据通过光学传感器采集, 定位数据则依靠相关定位装置记录。采集到的各类原始数据存在诸多干扰因素, 需进行预处理操作。对于声学数据, 要消除声波反射过程中产生的干扰信号, 确保数据能准确反映海底地形特征; 光学图像数据需针对光学畸变问题进行处理, 由于AUV处于水下高压环境, 高压可能导致图像失真, 通过平坦玻璃舱门可有效减少此类畸变, 保证图像质量。定位数据也需进行偏差校正, 提高定位精度。完成初步去噪和校正后, 数据可能存在空白区域, 此时运用插值算法进行处理, Kriging插值是常用方法之一。该算法依据已知数据点的空间分布规律, 对空白区域进行合理估算和填补, 从而构建出连续的海底高程模型(DEM)。这一模型能够直观呈现海底地形的起伏变化, 为后续更深入的数据分析和地形地貌研究提供基础数据支撑, 有助于更精准地了解复杂海底地形地貌的特征和分布情况。

### 3.2 多源数据融合与建模

操作开始时将高分辨率图像与声纳点云进行叠加, 借助摄影测量技术中的SfM/MVS方法, 依据图像间的几何关系和特征点匹配生成三维纹理模型, 该模型融合图像纹理信息与声纳点云空间信息, 极大增强了地形细节可视化程度, 使海底地形的起伏、凹凸等特征清晰展现。同时, 要把不同传感器采集的数据整合到同一地理坐标系, 因不同传感器工作原理和测量方式有别, 数据空间参考可能不一致, 整合可消除差异、保证数据空间一致性<sup>[4]</sup>。在此期间, 利用多普勒计程仪(DVL)测量AUV相对海底运动速度、超短基线定位系统(USBL)确定AUV水下位置, 通过二者数据交叉验证修正AUV运动轨迹误差, 提高定位精度。此外, 基于扩展卡尔曼滤波(EKF)框架的海底地形多源信息融合匹配方法也至关重要, 其构建状态空间模型, 对重磁点集与多波束测深点云等不同来源数据进行全息融合, 综合利用多种物理场信息, 降低AUV潜航定位对单一物理场的依赖, 进一步提升海底地形地貌探测的准确性与可靠性。

### 3.3 地形特征提取与分类

在AUV开展复杂海底地形地貌精细化探测的数据处理工作中, 地形特征提取与分类是关键环节。为提升地形插值的精度与效率, 采用基于分形原理改进的方法, 利用分形原理对线性插值予以补偿, 进而形成基于分形

补偿的双线性插值方法。该方法充分考虑了海底地形的复杂性与不规则性,能使插值结果更贴近真实地形状况。与此同时,构建自适应地形特征波束选择模式,该模式能够依据不同海底地形的特点,自动挑选合适的波束开展测量工作,在存在多个测点的情形下实现实时海底地形匹配。通过这种自适应选择方式,可更精准地捕捉地形特征信息,提高匹配的准确性和效率。在地形特征提取过程中,为保证准确性,需剔除地形匹配中的伪波峰,基于费希尔判据的去伪方法能发挥关键作用,它通过设定合理的判据标准对匹配结果进行分析判断,有效识别并剔除伪波峰,避免其对真实地形特征提取产生干扰。经过这一系列处理,能够从复杂的数据中准确提取出海底地形特征,并依据这些特征进行合理分类,为后续对海底地形地貌的深入分析与研究提供可靠依据,助力更全面、精准地认识复杂海底环境。

### 3.4 三维地形模型构建与输出

先整合处理后的地形数据与光学图像,借助图像的颜色、纹理信息以及地形数据所呈现的地形起伏特征,精准识别海底火山构造,确定其规模与形态;清晰分辨沉积物类型,划分砂质、泥质等不同沉积物区域;明确生物群落分布范围,掌握各类生物的栖息之所。这些信息对地质研究意义重大,可助力分析海底地质演化过程;对生态保护也十分关键,能为制定针对性保护措施提供依据。完成识别后,构建符合国际海道测量标准(如IHO S-44)的数字高程模型,该模型以精确数值刻画海底地形高低起伏,能为航道规划提供可靠地形依据以保障航行安全,可辅助海洋工程选址以挑选地质适宜、地形平

坦区域,还支持虚拟勘探让科研人员无需实地抵达海底即可开展研究<sup>[5]</sup>。最后,利用建模软件,将数字高程模型转化为沉浸式的三维海底场景,直观地呈现海底地形地貌,既为教学演示提供生动素材,也为科研分析提供便捷工具,帮助科研人员更好地理解海底环境。

### 结语

综上所述,AUV对复杂海底地形地貌的精细化探测意义重大,在海洋资源勘探、工程安全保障及科学研究推进等多方面发挥着关键作用。其关键技术如高精度导航定位、多传感器融合探测等,为探测提供了坚实支撑。而数据处理流程从采集预处理到三维模型构建输出,环环相扣,确保了探测成果的准确性与实用性。未来,随着技术不断进步,AUV探测将更精准高效,为人类深入认识和开发海洋带来更多可能。

### 参考文献:

- [1]杜跃,欧阳锡钰.基于多波束的海底复杂地貌图像识别方法研究[J].机械设计与制造工程,2023,52(2):127-130.
- [2]刘铮,陈端新,朱友生,等.基于水下自主航行器(AUV)的神狐峡谷谷底块体搬运沉积特征及其对深水峡谷物质输运过程的指示[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(2):13-21.
- [3]李学成,张喜林,邱雅梦,等.面向深海复杂地形区的近海底管缆精细探测与数据融合技术研究[J].海洋地质与第四纪地质,2025,45(6):194-204.
- [4]周晶,司玉林,林渊,魏艳,安新宇,王杭州,黄豪彩,陈鹰.海底AUV关键技术综述[J].海洋学报,2023,45(10):1-12.
- [5]陈冠军,郝高建,冯湘子,朱友生.AUV在深水海底管道在位状态调查中的应用[J].天津科技,2022,49(5):39-43.