

水下机器人（AUV）在深海热液区高精度地形测绘中的路径规划与数据融合

张志军

天津港湾水运工程有限公司，天津市塘沽区，300450；

摘要：深海热液区作为地球生命起源研究、海洋资源开发的关键区域，其地形环境复杂且具有重要科学价值。水下机器人（AUV）凭借自主作业能力，成为深海热液区地形测绘的核心工具。本文综述了 AUV 在深海热液区高精度地形测绘中的路径规划与数据融合技术，深入分析了热液区极端环境特征对技术应用的独特挑战，系统梳理了路径规划的关键方法（如基于采样的路径规划、基于优化的路径规划及动态路径调整技术）和数据融合策略（如多传感器时空配准、多源数据误差校正及融合建模方法），结合典型应用案例探讨了当前技术瓶颈及未来发展方向，为深海热液区地形测绘的技术创新与工程实践提供参考。

关键词：水下机器人；高精度地形；深海测绘

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.037

引言

深海热液区分布于大洋中脊、海山及弧后盆地，其形成与海底火山活动、板块运动有关。这里环境极端，孕育极端生态系统，是研究地球深部物质循环等的天然实验室，热液活动形成的硫化物矿床富含金属资源，开发潜力大。高精度地形测绘是揭示热液区构造等的基础，其技术水平影响科研与勘探。传统深海探测手段存在局限，载人潜水器受舱内空间与成本限制，难以大范围连续探测；遥控潜水器依赖脐带缆，活动范围受限且易受水流干扰。而水下机器人（AUV）搭载多传感器自主探测，续航、作业范围、环境适应性强，成为热液区地形测绘主力装备，如中国“潜龙三号”获取高分辨率三维地形数据，支撑了硫化物矿床分布研究。不过，热液区复杂环境对 AUV 技术挑战大，如路径规划、传感器数据误差累积、多源数据融合建模等方面。本文聚焦 AUV 在热液区高精度地形测绘核心技术，解析环境特征，综述路径规划与数据融合进展，剖析问题并展望方向，为技术优化与应用提供参考。

1 深海热液区环境特征及对测绘技术的挑战

深海热液区的环境特殊性源于其地质活动与水文条件的耦合作用，这些特征从多个维度对 AUV 的路径规划与数据融合构成挑战，需从地形、水文、传感器响应三个层面深入解析。

1.1 地形特征与探测难点

热液区地形由板块运动、火山活动与热液沉积共同

作用形成，具“陡峭、破碎、动态”特征，影响 AUV 路径安全与探测完整：

地形坡度极端：热液区多在断裂带或火山锥斜坡，坡度 $30^{\circ} - 60^{\circ}$ ，部分区域近垂直。AUV 用传统路径规划算法，多波束测深仪易现“阴影区”致数据漏测；陡峭地形增加姿态控制难度，影响传感器数据有效性。

障碍物分布无序：热液活动形成的烟囱体是典型障碍物，高度数米至数十米，直径数米，常集群分布，硫化物丘隆起、坍塌形成的岩块堆积增加地形复杂。障碍物威胁 AUV 航行安全，干扰侧扫声呐目标识别。

地形动态变化显著：热液区地质活动动态性强，烟囱体可能喷发或坍塌，沉积物迁移致局部地形短时间米级变化。这要求 AUV 路径规划与数据融合系统实时更新，避免决策失误。

1.2 水文与传感器限制

深海热液区水文条件与传感器响应特性加剧测绘难度，主要体现在：

水流扰动复杂：热液区受海底环流、热液羽状流及内波影响，水流速度 $0.5 - 1.5\text{m/s}$ 且方向多变。这不仅使 AUV 偏离预设路径（横向偏移数米），还干扰多普勒测速仪（DVL）精度，在弱底质区 DVL 底部跟踪模式易失效，导致定位误差每小时累积 $10 - 20$ 米。

声速梯度时空变异：海水温度、盐度垂直分布不均形成声速梯度，热液活动释放的高温流体加剧不均匀性。声速梯度变化使多波束测深仪声波传播路径弯曲，产生测深误差（ 1000 米水深下，声速偏差 1m/s 测深误差达

0.5 米)。此外,热液区气泡与悬浮颗粒散射声波,降低声呐信号信噪比。

传感器环境干扰显著:热液区强磁场环境(硫化物矿物富集所致)使磁力仪数据漂移,偏差达数百纳特;高浓度硫化物颗粒散射侧扫声呐声波,形成“噪声云”掩盖目标纹理特征;高温流体区域温度剧烈变化(每秒可达 10℃ 以上)影响 AUV 内部传感器稳定性,增加惯性导航系统(INS)漂移率。

2 AUV 在深海热液区的路径规划技术

路径规划是 AUV 实现安全、高效测绘的核心环节,其目标是在复杂环境中生成满足“避障、全覆盖、能耗低、精度高”要求的最优路径。针对深海热液区的地形与水文特征,现有技术可分为基于采样的路径规划、基于优化的路径规划及动态路径调整三类,各类方法在不同场景下各具优势。

2.1 基于采样的路径规划方法

基于采样的路径规划在配置空间随机采样生成可行路径,适用于高维复杂环境,在热液区未知地形探索性探测中应用广泛。

快速探索随机树(RRT)算法:通过随机采样点扩展树状结构逼近目标点,避障能力强。在热液区烟囱体密集区域,传统 RRT 算法 10 秒内可生成绕障路径,但路径冗余度高、平滑性差。改进算法 RRT 引入路径成本评估与重连机制,使路径长度缩短约 15% - 20%,平滑性显著提升。如在 300×300 米模拟热液区场景中,RRT 算法生成的路径总长度比传统 RRT 减少 45 米,转弯角度控制在 30° 以内,降低 AUV 能耗。

概率路标图(PRM)算法:预先在自由空间采样“路标点”构建连接图,用 Dijkstra 或 A*算法搜索最优路径,适用于已知静态环境的重复探测。在热液区已知地形精细测绘中,PRM 算法可将路径规划时间缩短至毫秒级,但当地形动态变化时,路标图更新成本高。为此,研究人员提出结合 SLAM 技术的动态 PRM 算法,通过实时感知数据更新路标图,使路径适应性提升约 30%,在西南印度洋热液区试验中成功避开新发现的小型烟囱体。

2.2 基于优化的路径规划方法

基于优化的路径规划通过建立数学模型求解最优路径,适用于已知地形的精细化测绘,能在覆盖率与能耗间实现平衡。

全覆盖路径规划:针对热液区重点区域(如烟囱体群、硫化物丘),全覆盖路径规划需确保每个区域都被

传感器有效探测。常用模式包括“蛇形扫描”(适用于平缓区域)与“螺旋扩展”(适用于孤立目标)。为减少重复探测,研究人员引入地形熵值评估未探测区域的信息增益,动态调整扫描方向与路径间隔。例如,基于信息熵的自适应路径规划算法在东太平洋海隆热液区的应用中,使关键区域的覆盖率从 85%提升至 95%以上,同时减少了 15%的航程,显著提升了探测效率。

能耗与精度平衡优化:AUV 的续航能力受限于电池容量(深海作业通常为 12~48 小时),需在路径长度与探测精度间建立平衡。通过建立能耗模型(如推进器功率与路径曲率、航速的关系),结合多波束测深仪的有效探测宽度(与高度相关,通常为高度的 2~5 倍),可优化路径间隔与航速。实验数据表明,在 1000 米水深的热液区,将路径间隔从 5 米调整为 8 米(同时匹配航速从 1.5 节提升至 2 节),可使续航时间延长约 10%,且地形数据分辨率仍保持在 1 米以内,满足科研需求。

2.3 动态路径调整技术

热液区动态环境要求路径规划具备实时调整能力,以保障探测安全与连续。基于实时地形反馈的调整:AUV 用前视声呐(探测距离 50 - 100 米)感知前方地形,结合当前位置与目标点,采用 MPC 算法滚动优化路径。MPC 算法建立 AUV 运动学模型,每步决策求解未来 5 - 10 秒最优子路径,可应对突发障碍物。如遇未预知烟囱体,能在 0.5 秒内生成绕障路径,避障精度±0.3 米,路径平滑性满足传感器数据采集要求。水流自适应调整:通过 DVL 与姿态传感器获取水流速度与方向,建立水流干扰模型,路径规划引入补偿量。在 1m/s 侧向水流环境中,水流自适应算法将传统路径跟踪算法横向误差从±2 米控制在±0.8 米以内。中国“潜龙二号”AUV 在印度洋热液区应用该技术,使测线重叠度保持在 10% - 15%,确保地形数据拼接精度。

2.4 深海热液区地形测绘的数据融合技术

多传感器数据融合是提升地形模型精度的关键,其核心是通过整合多波束测深仪(三维地形)、侧扫声呐(纹理特征)、磁力仪(地质构造)等数据,生成兼具几何精度与语义信息的地形模型。热液区的数据融合需解决时空配准、误差校正与融合建模三大问题,以应对环境干扰带来的挑战。

2.4.1 多传感器时空配准

时空配准是多源数据融合前提,要实现不同传感器数据时间同步与空间坐标统一,为后续处理奠基。时间

同步方面, AUV 搭载的传感器采样频率有差异(多波束测深仪 10Hz、侧扫声呐 5Hz、磁力仪 1Hz), 数据采集时刻不一致会导致空间匹配误差。可通过 GPS 授时或船载高精度时钟(如铷钟)校准, 将各传感器时间戳误差控制在 10ms 以内; 在深海无 GPS 信号区域, 采用 AUV 内部时钟与水面母船的时间同步机制(通过声学通信每小时校准一次)维持同等精度。空间配准方面, 需将不同传感器测量数据转换至统一坐标系(如 WGS84 大地坐标系), 其精度依赖 AUV 导航数据。热液区常用 INS/DVL 组合导航, 通过卡尔曼滤波(KF)融合 INS 高频输出与 DVL 速度测量值, 抑制 INS 漂移。针对 DVL 在弱底质区域失效问题, 引入压力传感器深度数据与声学信标(如长基线系统)定位信息, 形成多源融合导航。实验显示, 这种组合导航在热液区定位误差可控制在 ± 5 米以内, 较传统 INS (± 15 米)提升显著, 为空间配准提供可靠基础。

2.4.2 多源数据误差校正

热液区传感器数据误差来源复杂, 需针对不同传感器特性校正以保证数据质量。多波束测深数据校正: 除声速梯度折射误差外, 地形坡度会使测深点偏离真实位置(坡度 30° 时误差可达 1 米), 用波束角校正算法(如基于海底倾斜角的坐标转换)可将误差降至 0.3 米以内; 对“阴影区”用相邻航带重叠数据插值补全, 结合地形连续性约束, 使数据覆盖率提升至 98% 以上。如马里亚纳海沟热液区探测, 校正后的多波束数据与 ROV 实测数据偏差小于 0.5 米。侧扫声呐数据校正: 热液区悬浮颗粒使声呐回波强度异常, 用基于统计特性的噪声去除算法(如自适应阈值滤波)可使信噪比提升 10 - 15dB; 声能衰减致图像灰度不均, 采用辐射校正(如基于传播损失模型的灰度补偿)可增强图像一致性; 几何畸变校正结合多波束地形数据, 将侧扫图像像素位置误差控制在 ± 1 米, 为纹理特征与地形匹配奠定基础。磁力数据校正: 热液区磁力异常信号易受地磁场背景与 AUV 自身磁场干扰, 通过球谐函数模型去除地磁场背景值, 用磁探头阵列测量并抵消 AUV 自身磁场, 可提升数据质量。如东南太平洋热液区探测, 校正后的磁力数据能清晰识别硫化物矿床分布范围, 异常值与已知矿床吻合度达 90%。

2.4.3 多源数据融合建模

融合建模整合多传感器数据互补信息, 生成高精度、多维度地形模型, 为热液区地质分析提供支撑。基于贝叶斯估计的融合, 将多波束测深数据作先验信息, 侧扫

声呐纹理特征作似然函数, 更新地形细节。在烟囱体区域, 用侧扫声呐高分辨率纹理优化多波束数据高程精度, 使模型分辨率从 1 米提至 0.5 米, 呈现烟囱体形态。基于深度学习的融合, 用卷积神经网络提取侧扫声呐图像语义特征, 与多波束点云数据融合训练, 实现地形模型自动语义分割。实验显示, 基于 U-Net 架构的融合模型语义分割精度超 90%, 可快速识别关键地质目标, 为资源评估提供高效工具。动态地形更新, 结合 AUV 多次探测数据, 用时序卡尔曼滤波算法更新地形模型, 捕捉热液区动态变化。如在大西洋中脊热液区监测, 对比两次探测数据发现烟囱体高度增加, 揭示热液活动活跃, 为灾害预警提供数据支持。

3 技术瓶颈与未来发展方向

尽管 AUV 路径规划与数据融合技术在深海热液区测绘有显著进展, 但面对极端环境挑战, 仍有诸多技术瓶颈, 需创新突破以进一步发展。一是动态环境适应性不足, 热液区突发地形变化要求 AUV 毫秒级完成感知、决策与路径重规划, 现有算法响应时间(1 - 2 秒)难满足需求, 有碰撞风险; 水流瞬时变化会增大路径跟踪误差, 影响数据连续性。二是传感器数据鲁棒性欠缺, 强干扰环境下部分传感器易出现数据缺失或噪声激增, 现有融合算法对数据缺失容忍度低, 可能使模型精度骤降。三是大范围测绘效率有限, 单台 AUV 续航难覆盖大型热液区, 多 AUV 协同作业缺乏高效任务分配与数据同步机制, 整体效率未达预期。

未来发展方向包括: 智能路径规划与自主决策, 结合强化学习与深度学习, 让 AUV 通过与环境交互自主学习避障策略, 实现毫秒级路径重规划; 引入数字孪生技术, 构建热液区虚拟环境, 通过虚实交互模拟路径可行性, 提前规避风险, 提升决策可靠性。鲁棒性数据融合技术, 开发基于联邦学习的分布式融合算法, 在传感器数据局部缺失时, 通过多 AUV 数据协同提升。

参考文献

- [1] 吴涛. 西南印度洋脊热液硫化物区近底磁法研究[D]. 吉林大学, 2017.
- [2] 胡智龙. 海底热液矿床的磁性特征及磁异常响应——以大槽热液区为例[D]. 山东科技大学[2025-09-10].
- [3] 田宇, 李伟, 张艾群. 自主水下机器人深海热液羽流追踪仿真环境[J]. 机器人, 2012, 34(2): 12. DOI: 10.3724/SP. J. 1218. 2012. 00159.