

多波束测深系统在复杂海底地形精细测绘中的误差校正与精度提升研究

张志军

天津港湾水运工程有限公司, 天津市塘沽区, 300450;

摘要: 多波束测深系统在复杂海底地形精细测绘中应用广泛, 但受多种误差影响, 其测量精度面临挑战。本文综述了该系统在复杂海底地形测绘中的误差来源, 包括系统误差(声速误差、波束指向误差、时间同步误差)、环境误差(波浪和海流影响、海水不均匀性、海底散射和反射)以及操作误差(测量参数设置不当、换能器安装误差、数据采集和处理不当)。针对这些误差, 详细阐述了相应的校正方法, 如系统误差中的声速校正、波束指向校正等, 环境误差中的波浪和海流校正等, 操作误差中的测量参数优化等。同时, 探讨了精度提升技术, 涉及硬件改进、软件算法优化和多源数据融合, 并结合深海海沟、海底峡谷、岛礁周围地形等应用案例进行分析。最后总结研究结论, 展望了智能化误差校正、高精度实时测量等未来发展方向, 为相关领域研究和应用提供参考。

关键词: 多波束测深系统; 复杂海底地形; 海底测绘

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 029

引言

随着海洋各领域发展, 对海底地形测绘精度要求提高。多波束测深系统作为高效、高精度测绘技术, 能快速获取大面积海底地形数据, 在复杂海底地形精细测绘中至关重要。它通过发射多个波束并接收反射信号计算海底深度, 基于声波传播特性确定测点深度。与单波束测深技术相比, 多波束测深系统覆盖广、效率高、精度高, 能更全面反映海底地形。不过, 在复杂海底地形测绘中, 多波束测深系统面临诸多挑战, 复杂地形会使声波传播路径变化引入误差, 海洋环境因素影响声波传播速度, 且系统自身软硬件也可能有误差。所以, 对其误差校正和精度提升有重要意义。本文旨在对多波束测深系统在复杂海底地形精细测绘中的误差校正与精度提升进行综述, 总结成果进展, 分析问题挑战, 展望未来趋势, 为相关研究和应用提供参考。

1 复杂海底地形测绘中多波束测深系统的误差来源

1.1 系统误差

系统误差由多波束测深系统自身硬件设备和软件算法决定, 有规律性和重复性。声速误差方面, 声波在海水中传播速度影响测深精度, 海水温度、盐度和压力等参数变化会使声速改变, 若测量中不能准确获取声速剖面, 就会引入误差, 如实际声速大于测量所用声速, 计算出的水深会偏小, 反之则偏大。波束指向误差方面, 多波束测深系统的波束指向精度影响测量点位置精度,

该误差主要源于换能器安装误差、船体变形及测量中姿态变化等, 例如换能器安装角度偏差会使波束指向偏离实际方向, 导致测量点平面位置和深度出现误差。时间同步误差方面, 多波束测深系统需精确同步发射和接收信号时间以计算声波传播时间, 若时间同步不准确, 会导致传播时间测量误差, 影响水深计算精度, 该误差可能源于系统内部时钟偏差、信号传输延迟等。

1.2 环境误差

环境误差是由海洋环境因素引起的, 具有不确定性和随机性。波浪和海流影响: 波浪会导致船体发生上下起伏和摇摆, 从而使换能器的姿态发生变化, 影响波束的指向和测量精度。海流会使船体发生漂移, 改变测量点的实际位置, 同时也会对声波的传播产生一定的影响。海水不均匀性: 海水的温度、盐度等参数在垂直和水平方向上的不均匀分布会导致声波传播路径发生弯曲, 产生折射现象, 从而使测量点的深度出现误差。特别是在复杂的海洋环境中, 海水的不均匀性更为明显, 对测深精度的影响也更大。海底散射和反射: 海底的地形和地质特征会影响声波的散射和反射特性。在复杂海底地形区域, 如海底礁石、沙脊等, 声波的散射和反射情况较为复杂, 可能导致接收信号的强度和相位发生变化, 从而引入误差。

1.3 操作误差

操作误差是由测量人员的操作不当或经验不足引起的。测量参数设置不当: 在测量前, 需要对多波束测

深系统的各项参数进行设置,如发射频率、脉冲宽度、量程等。如果参数设置不当,会影响测量数据的质量和精度。例如,发射频率过高可能会导致声波在海水中的衰减过快,影响测量范围;量程设置过小则可能无法测量到较深的海底。换能器安装误差:换能器的安装质量直接影响系统的测量精度。如果换能器安装不牢固、与船体的连接不紧密或安装角度不符合要求,都会导致波束指向误差和姿态测量误差。数据采集和处理不当:在数据采集过程中,如果测量人员未能及时发现和处理异常数据,如噪声干扰、信号丢失等,会影响数据的质量。在数据处理过程中,如果采用的处理方法不当或参数选择不合理,也会导致误差的积累和放大。

2 误差校正方法

2.1 系统误差校正

声速校正:声速校正是提高多波束测深精度的重要环节。常用方法有现场声速剖面测量法和声速改正模型法。前者通过在测量区域投放声速仪测量不同深度声速值建立声速剖面,精度高但耗时费力;后者利用海水温度、盐度和压力等参数与声速的经验关系式,通过测量参数计算声速,常用关系式有威尔逊公式、Chen-Miller公式等。实际应用中可结合两种方法提高精度。

波束指向校正:目的是消除波束指向误差,提高测量点位置精度。常用方法有静态校正法和动态校正法。静态校正法在测量前于已知控制点校准换能器,确定并修正波束指向误差;动态校正法在测量中实时监测船体姿态和换能器位置变化,实时修正波束指向,如利用惯性导航系统(INS)获取船体姿态参数结合换能器安装参数计算偏差并调整。

时间同步校正:主要采用高精度时钟同步技术确保发射和接收信号时间同步。常用技术有全球定位系统(GPS)同步法、原子钟同步法等。GPS同步法用GPS信号高精度时间信息校准系统内部时钟实现同步;原子钟同步法时间精度更高但成本高,适用于对时间同步要求极高的场合。

2.2 环境误差校正

波浪和海流校正:为减小其对测量精度的影响,用姿态和运动传感器实时监测船体姿态与运动状态并修正测量数据,如获取横摇、纵摇和航向角等参数,结合运动速度和方向补偿测量点位置和深度。还可采用卡尔曼滤波等滤波技术平滑处理数据,消除随机误差。海水不均匀性校正:其会使声波传播路径弯曲引入测深误差,采用声线追踪技术,根据海水温度、盐度和压力等参数计算传播路径修正测量深度,该技术能考虑折射现象提高精度,也可利用历史数据和经验模型预测和补偿误差。海底散射和反射校正:其会影响接收信号质量引入误差,

采用自适应滤波、波束形成等信号处理技术提高信噪比,减少影响。还可分析海底地形和地质特征,建立模型修正测量数据。

2.3 操作误差校正

测量参数优化:测量前,根据测量区域实际情况优化多波束测深系统测量参数。通过现场试验和模拟分析确定最佳发射频率、脉冲宽度、量程等参数,以提高测量数据质量和精度。测量时,实时监测参数变化并及时调整。

换能器安装校准:换能器安装校准是确保测量精度的关键步骤。安装时严格按操作规程进行,保证安装牢固、角度准确。安装后进行校准试验,如在平静水域静态测量,对比测量结果与已知水深差异,确定安装误差并修正。

数据质量控制:数据采集时,加强质量控制,及时发现和处理异常数据。采用实时数据监控技术,监测测量数据的信号强度、信噪比、水深变化等参数,发现异常及时停止测量、查找原因并处理。数据处理时,采用合适方法,如剔除异常值、插值补漏等,提高数据质量。

3 精度提升技术

3.1 硬件改进

高性能换能器:换能器是多波束测深系统的核心部件之一,其性能直接影响系统的测量精度和分辨率。采用高性能的换能器,如宽带换能器、相控阵换能器等,可以提高声波的发射和接收效率,增加波束数量,提高测量分辨率。宽带换能器能够在较宽的频率范围内工作,适应不同的测量需求;相控阵换能器可以通过电子控制波束的指向和形状,提高波束的指向精度和覆盖范围。

高精度姿态传感器:高精度姿态传感器能够实时准确地获取船体的姿态参数,为波束指向校正和运动补偿提供可靠的数据支持。目前,常用的高精度姿态传感器有光纤陀螺仪、激光陀螺仪等。这些传感器具有较高的测量精度和稳定性,能够在复杂的海洋环境中正常工作。

先进的数据采集系统:先进的数据采集系统可以提高数据的采集速度和精度,减少数据传输过程中的噪声和干扰。采用高速模数转换器、大规模集成电路等技术,可以实现对接收信号的快速采集和处理,提高系统的实时性和可靠性。

3.2 软件算法优化

波束形成算法:波束形成算法是多波束测深系统的关键算法之一,其性能直接影响波束的指向精度和分辨率。优化波束形成算法,如采用自适应波束形成、高分辨率波束形成等,可以提高波束的指向精度,减少旁瓣干扰,提高对复杂海底地形的分辨能力。

数据处理算法：数据处理算法对测量数据的质量和精度有着重要的影响。优化数据处理算法，如采用稳健估计、卡尔曼滤波、小波分析等，可以有效地消除噪声干扰，提高数据的平滑度和精度。稳健估计能够减少异常值对数据处理结果的影响；卡尔曼滤波可以对动态测量数据进行实时滤波和预测；小波分析能够对信号进行多尺度分解和重构，提取有用信息。

三维建模算法：三维建模算法可以将多波束测深数据转换为三维海底地形模型，直观地反映海底地形的特征。优化三维建模算法，如采用不规则三角网（TIN）建模、网格建模等，可以提高模型的精度和细节表现力。TIN 建模能够更好地适应复杂的海底地形，保留地形的细节特征；网格建模则具有数据结构简单、计算效率高的优点。

3.3 多源数据融合

多源数据融合是将多波束测深数据与其他来源的测量数据，如单波束测深数据、侧扫声纳数据、海底地震数据等进行融合处理，以提高海底地形测绘的精度和可靠性。通过多源数据融合，可以充分利用不同数据的优势，弥补单一数据的不足。例如，单波束测深数据具有较高的点测量精度，可以用于对多波束测深数据进行校准；侧扫声纳数据可以提供海底表面的纹理信息，有助于识别海底地形的特征。多源数据融合的方法主要有加权平均法、卡尔曼滤波法、神经网络法等。

4 应用案例分析

4.1 深海海沟测绘

深海海沟是地球上最复杂的海底地形之一，具有深度大、地形陡峭、环境恶劣等特点，对多波束测深系统的精度和可靠性提出了极高的要求。在某深海海沟测绘项目中，研究人员采用了先进的多波束测深系统，并结合了多种误差校正和精度提升技术。通过现场声速剖面测量和实时声速校正，有效地减小了声速误差；利用高精度姿态传感器和动态波束指向校正技术，提高了波束指向精度；采用多源数据融合技术，将多波束测深数据与海底地震数据进行融合，提高了海底地形模型的精度。最终，获取的深海海沟地形数据精度达到了米级，清晰地反映了海沟的地形特征和地质构造。

4.2 海底峡谷测绘

海底峡谷是连接大陆架和深海盆地的重要通道，地形复杂，水流湍急。在某海底峡谷测绘项目中，测量人员面临着波浪、海流等环境因素的严重影响。为了提高

测量精度，采用了姿态传感器和运动传感器实时监测船体的姿态和运动状态，并进行了波浪和海流校正；通过优化测量参数和数据处理算法，提高了数据的质量和精度。同时，利用三维建模算法构建了海底峡谷的三维地形模型，为海底峡谷的地质研究和资源开发提供了重要的基础数据。

4.3 岛礁周围地形测绘

岛礁周围地形复杂，存在大量的礁石、浅滩等，对船舶的航行安全和岛礁的开发利用具有重要意义。在某岛礁周围地形测绘项目中，采用了多波束测深系统进行精细测绘。为了减小操作误差，对测量参数进行了优化设置，并对换能器进行了严格的安装校准；通过数据质量控制技术，剔除了异常数据，提高了数据的可靠性。最终，获取的岛礁周围地形数据精度较高，为岛礁的规划、建设和管理提供了有力的支持。

5 结论

多波束测深系统在复杂海底地形精细测绘中应用价值大，但受多种误差影响。本文详细分析其误差来源，包括系统、环境和操作误差，总结了相应校正方法，如系统误差的声速、波束指向和时间同步校正等。同时探讨精度提升技术，含硬件改进、软件算法优化和多源数据融合，并通过案例验证其有效性。有效校正误差和应用精度提升技术可提高系统测绘精度与可靠性，为海洋多领域提供高质量数据。随着科技发展，该系统误差校正与精度提升面临新机遇和挑战。未来研究方向有：智能化误差校正，结合人工智能等技术自动识别、预测和校正误差；高精度实时测量，提高系统实时性和精度，如开发高性能换能器和算法实现厘米级甚至毫米级实时测量；多学科融合应用，加强与海洋多学科融合拓展应用领域；国产化技术发展，加大国产化技术研发，提高自主创新能力和竞争力。这是个不断发展完善的过程，持续研究创新将提升其性能和应用水平，为海洋事业作更大贡献。

参考文献

- [1] 孙革. 多波束测深系统声速校正方法研究及其应用[D]. 中国海洋大学, 2007. DOI: 10.7666/d.y1071623.
- [2] 王海栋. 多波束系统测深异常处理理论与方法研究[D]. 战略支援部队信息工程大学, 2010.
- [3] 岳增阳. 基于多波束测深系统的海底地形匹配导航技术研究[D]. 东南大学[2025-09-10]. DOI: 10.7666/d.Y2922358.