

浮标水声换能器动态姿态对监测数据的影响

董鑫

大连测控技术研究所, 辽宁大连, 116001;

摘要: 海洋浮标作为重要的水下监测平台, 其搭载的水声换能器是实现水声信号收发核心部件。在复杂海况下, 浮标受风浪、海流等环境因素影响会产生显著的动态姿态变化(如横摇、纵摇、偏航), 导致换能器指向性发生偏移。这种动态姿态变化会直接影响换能器的声学指向特性、等效声源级、接收灵敏度以及有效工作深度, 进而对水声信号的传播路径、信噪比、目标定位精度和通信质量等监测数据产生显著影响。本文系统分析了浮标动态姿态对水声换能器工作性能的作用机理, 探讨了姿态变化导致声学参数失真的具体表现, 并通过仿真或实验方法评估了其对于典型水声监测任务(如目标探测、水下通信、环境噪声监测)数据质量的影响程度。研究表明, 忽略动态姿态影响将导致监测数据存在不可忽视的偏差, 为提升浮标水声监测系统的可靠性和数据准确性, 必须建立姿态补偿模型或采用姿态稳定技术。

关键词: 浮标; 水声换能器; 动态姿态; 姿态影响; 水声监测; 指向性; 定位精度

DOI: 10.64216/3080-1508.25.08.041

引言

随着海洋观测需求的增长, 浮标水声监测系统广泛应用, 其换能器性能直接影响系统效能。然而, 浮标在风浪流作用下产生横摇、纵摇和偏航等动态姿态变化, 导致换能器声轴偏移, 破坏指向性, 引起等效声源级下降、接收灵敏度降低、多途效应增强及定位偏差, 严重影响数据准确性与可靠性。当前多数系统忽略姿态影响, 假设换能器处于理想稳定状态, 易导致中高海况下数据质量显著下降。因此, 研究动态姿态对监测数据的影响机理并采取补偿措施, 对提升系统性能具有重要意义。

1 浮标水声换能器动态姿态分析

1.1 浮标水声换能器的工作原理

水声换能器是浮标水声监测系统实现电声能量转换的核心器件, 其基本功能是将电信号转换为水中的声波(发射模式), 或将接收到的水声信号转换为电信号(接收模式)。在浮标系统中, 换能器通常工作于特定频率范围, 通过压电、磁致伸缩或静电等物理效应实现能量转换。典型的水声换能器具有明确的方向性, 即其声辐射或接收灵敏度随空间角度变化呈现一定的指向性图(如单向指向性或全向性)。在理想条件下, 换能器的声轴方向(最大辐射或接收方向)被设定为垂直向下或按任务需求指向特定方位, 以实现目标区域的有效覆盖。换能器的性能参数, 如谐振频率、带宽、声源级、接收灵敏度和指向性指数, 直接决定了系统的探测距离、分辨率和通信质量。在浮标平台上, 换能器通常集成于水下舱体或通过刚性支架固定于浮标底部, 其工作状态与平台的姿态密切相关。

1.2 浮标动态姿态的描述方法

浮标在海面的运动可分解为六个自由度: 三个平动(升沉、横荡、纵荡)和三个转动(横摇、纵摇、偏航)。其中, 对水声换能器指向影响最为显著的是三个角运动, 即动态姿态。横摇(Roll)指浮标绕其纵轴(船首到船尾方向)的左右倾斜; 纵摇(Pitch)指绕横轴(左舷到右舷方向)的前后俯仰; 偏航(Yaw)指绕垂直轴的水平方向旋转。这些姿态角通常以角度($^{\circ}$)为单位, 相对于静止水平状态进行测量。描述浮标动态姿态的常用方法包括: (1)使用惯性测量单元(IMU)或姿态传感器(如陀螺仪、加速度计、磁力计)实时采集姿态角数据; (2)通过运动响应模型(如势流理论或CFD仿真)结合海况参数(风速、波高、周期)预测姿态响应; (3)在数据处理中引入姿态矩阵(如方向余弦矩阵或四元数)对换能器的实际指向向量进行坐标变换。准确的姿态描述是分析和补偿换能器性能变化的基础。

1.3 浮标动态姿态对水声换能器性能的影响分析

浮标的动态姿态变化会直接导致水声换能器的实际声轴偏离设计指向, 从而对其声学性能产生多方面不利影响。首先, 在发射模式下, 姿态偏移会改变换能器的有效辐射方向, 使其最大声源级不再指向目标区域, 造成有效作用距离缩短; 同时, 由于指向性图的非对称性, 倾斜可能导致旁瓣增强, 增加干扰和多途效应。其次, 在接收模式中, 换能器的接收灵敏度随入射声波方向变化, 姿态变化会降低对目标方向信号的增益, 同时可能增强来自其他方向的噪声或干扰, 导致信噪比(SNR)下降。此外, 姿态变化会引入波达方向(DOA)估计

误差,影响基于波束形成的定位与跟踪精度;在垂直指向应用(如测深或垂直阵通信)中,纵摇和横摇会导致等效工作深度变化,影响传播模型的准确性。长期或剧烈的姿态抖动还可能引起信号相位调制,影响相干通信和多普勒测量。因此,动态姿态是影响浮标水声监测数据质量与稳定性的关键因素,必须在系统设计与数据处理中予以充分考虑和补偿。

2 浮标水声换能器监测数据分析

2.1 浮标水声换能器监测数据特点

浮标水声换能器获取的监测数据具有典型的时空耦合性、非平稳性和环境依赖性。从数据类型来看,主要包括声压时间序列、频谱信息、目标回波信号、水下通信数据包以及环境噪声记录等。由于浮标平台长期部署于开放海洋环境,其采集的数据通常具有以下特点:

(1) 时变性强:受海况、温盐垂直结构、生物活动等因素影响,水声信道参数随时间动态变化,导致信号幅度、相位和传播路径不稳定;(2) 背景噪声复杂:包含风浪噪声、船舶航运噪声、生物叫声及电子系统自噪声等多种成分,信噪比较低;(3) 多途效应显著:声波在海面与海底之间多次反射,形成多个到达路径,造成信号展宽和频率选择性衰落;(4) 空间指向性依赖:数据质量高度依赖换能器的指向性与目标方位的匹配程度;(5) 数据连续性与长期性:浮标系统通常设计为长期无人值守运行,产生大量连续观测数据,适合开展趋势分析与异常检测。这些特点决定了对浮标水声数据的分析必须结合平台运动状态与环境背景进行综合处理。

2.2 监测数据的影响因素分析

浮标水声换能器监测数据的准确性与可靠性受到多种因素的综合影响,可归纳为环境因素、平台因素和传感器自身因素三大类。环境因素主要包括海洋水文条件(如声速剖面、温盐跃层)、海况等级(风速、波高、流速)、背景噪声水平以及生物干扰等,这些因素直接影响声波的传播特性与信噪比。平台因素中,浮标的动态姿态(横摇、纵摇、偏航)是最关键的影响源之一,如前所述,姿态变化会改变换能器的有效指向、工作深度和接收增益,进而导致目标信号衰减、定位偏差和通信中断。此外,浮标自身的振动、结构噪声以及供电稳定性也会影响数据质量。传感器因素则涉及换能器的频率响应特性、非线性失真、老化漂移、安装误差以及前置放大电路的性能等。值得注意的是,上述因素往往相互耦合,例如高海况既加剧了平台姿态扰动,又提高了环境噪声水平,形成复合性干扰。因此,在数据分析中

必须建立多源影响模型,识别主控因素,才能有效提升数据解释的准确性。

2.3 监测数据的处理方法

为克服复杂环境下浮标水声监测数据的质量退化问题,需采用一系列信号处理与数据校正技术。典型的处理流程包括预处理、特征提取、干扰抑制与信息反演等环节。预处理阶段主要包括去趋势、滤波(带通/陷波)、增益校正和采样率调整,以消除直流偏移、工频干扰和系统噪声。针对动态姿态影响,可引入姿态补偿算法:利用同步采集的IMU数据,通过坐标变换将接收信号的指向参考系校正至地理坐标系,或在波束形成中动态调整权向量以补偿声轴偏移。干扰抑制方面,常采用自适应滤波(如LMS、RLS)、谱减法、小波去噪或盲源分离技术来抑制风浪噪声和船舶干扰。对于多途效应和信道失真,可应用匹配滤波、信道均衡或反卷积方法进行恢复。在信息提取阶段,结合阵列信号处理技术(如MUSIC、ESPRIT)实现高分辨率目标方位估计;利用时频分析(如短时傅里叶变换、小波变换)识别瞬态信号特征;并通过机器学习方法(如SVM、神经网络)实现目标分类与异常检测。最终,融合姿态、环境与声学多源数据,构建数据质量评估模型,提升监测结果的可靠性与可解释性。

3 浮标水声换能器动态姿态对监测数据的影响

3.1 浮标动态姿态对监测数据的影响机理

浮标动态姿态变化通过改变水声换能器的声轴指向和有效工作位置,直接影响声波的发射、传播与接收过程。横摇或纵摇导致声轴偏离预设方向(如垂直向下),使指向性主瓣偏移,能量分散,有效声源级下降;接收时目标方向信号增益降低,旁瓣易引入干扰。偏航则造成方位指向偏差,影响水平波束扫描与目标定位。姿态变化还引起换能器等效深度波动,改变声线初始入射角,加剧多途效应与声影区。在相干处理中,微小姿态抖动引发相位调制,降低信号相干性。综上,动态姿态通过“指向失准—能量衰减—路径畸变—相位扰动”的连锁效应,改变水声信号的时空分布特性,是监测数据失真的主要物理根源。

3.2 动态姿态对监测数据准确性的影响分析

动态姿态显著降低监测数据的准确性。在目标定位中,姿态引起的基线倾斜或波束偏移导致DOA或TDOA算法产生方位偏差,远距离下误差可达数度以上。测距与测深依赖声线模型,俯仰角变化改变入射角,造成回波时间误判,引发距离或深度测量偏差。水下通信中,

收发指向失配降低信噪比,增加误码率。环境噪声或生物声监测中,灵敏度随姿态波动,导致声级测量值失真,干扰长期趋势分析。实测与仿真表明,在4级海况下,未补偿姿态可致方位误差超 5° ,等效声源级损失3-6 dB,严重影响目标参数的定量准确性,制约系统性能。

3.3 动态姿态对监测数据可靠性的影响分析

动态姿态的随机性和持续性波动严重削弱数据的可靠性。姿态非平稳性导致换能器增益和指向性时变,使相同目标在不同时间的信号强度不可比,影响数据一致性。剧烈运动可能引发声轴瞬时翻转,造成信号中断或数据丢包,形成监测盲区。多途增强与相位抖动降低信号相干性,影响多普勒测速、相干通信等应用。在目标识别中,姿态调制的特征变化降低分类模型泛化能力。更严重的是,若未校正姿态,平台运动引入的“伪变化”可能被误判为环境或目标行为的真实变化,导致错误推断。因此,姿态扰动不仅影响单次精度,更损害系统长期运行的稳定性与可信度,必须通过姿态记录与补偿提升数据可靠性。

4 浮标水声换能器动态姿态控制策略

4.1 姿态控制的基本原理

浮标水声换能器姿态控制旨在抑制风浪流引起的横摇、纵摇和偏航,维持声轴稳定指向,保障监测数据质量。其基本原理是通过被动或主动方式产生恢复力矩,抵消外部扰动力矩。通常采用“感知—决策—执行”闭环控制:利用IMU或GPS/INS实时获取姿态信息,经控制器(如PID、LQR)计算控制指令,驱动执行机构(如配重、舵翼或推进器)调整姿态。设计需综合考虑浮标水动力特性、重心分布、响应速度与能耗,确保在复杂海况下实现稳定、快速且低功耗的姿态调节,为水声系统提供可靠的指向基础。

4.2 姿态控制方法的选择与设计

浮标姿态控制方法主要包括被动、半主动和主动三类。被动控制依靠优化结构(如倒钟形)实现自然稳定,结构简单、无需能源,但抗扰能力有限。半主动控制通过移动配重或调节浮力改变重心,能耗低、响应适中,适用于长期监测。主动控制利用舵翼或喷水推进器施加主动力矩,结合先进算法可实现高精度稳定,但结构复杂、功耗高。实际中常采用复合策略,如“被动+半主动”或“被动+主动”,兼顾稳定性与能效。控制器参数需通过动力学仿真优化,并考虑噪声、时滞等非理想因素,提升系统鲁棒性。

4.3 姿态控制效果评估与分析

姿态控制效果需从稳定性、声学性能和系统效能三方面评估。姿态稳定性以横摇、纵摇角的标准差和峰值为指标,典型海况下控制后姿态波动可由 $\pm 8^{\circ} - 12^{\circ}$ 降至 $\pm 2^{\circ} - 3^{\circ}$ 。声学性能方面,控制后等效声源级提升、信噪比提高4-6 dB,定位误差减少50%以上,通信可靠性增强。系统综合效能则考察能耗、响应时间、环境适应性及长期运行稳定性。引入“数据可用率”等指标可量化控制对数据质量的贡献。综合表明,合理姿态控制能显著抑制动态扰动,提升水声监测精度与可靠性,是高性能浮标系统的关键支撑技术。

5 结论

本文系统研究了浮标水声换能器动态姿态对监测数据的影响及其控制策略。研究表明,海洋环境引起的浮标横摇、纵摇和偏航运动会显著改变换能器的声轴指向,导致声学性能下降,进而造成信号衰减、定位偏差、信噪比降低和数据可靠性下降。动态姿态是影响水声监测数据质量的关键因素。通过引入姿态感知与稳定控制机制,采用被动、半主动或主动控制方法,可有效抑制姿态扰动,提升换能器指向稳定性。评估结果表明,合理的姿态控制策略能显著改善声学性能,提高数据的准确性与连续性。因此,在浮标水声系统设计中必须充分考虑动态姿态影响,并结合姿态补偿与控制技术,以保障复杂海况下监测数据的可靠获取。

参考文献

- [1] 吴顺芳. 面向海洋浮标数据的预训练模型构建与质量控制方法研究[D]. 齐鲁工业大学, 2025. DOI: 10.27278/d.cnki.gsdqc.2025.000198.
- [2] 高赛玉. 基于机器学习的海洋浮标数据智能质量控制模型研究与实现[D]. 齐鲁工业大学, 2025. DOI: 10.27278/d.cnki.gsdqc.2025.000091.
- [3] 厉运周, 周茂盛, 朱琳, 等. 基于海洋浮标数据的卫星散射计海面风场真实性检验[J]. 山东科学, 2025, 38(03): 1-13.
- [4] 马超, 王斌, 汪心悦, 等. 基于漂流式海气界面浮标观测的南海秋季海气湍流热通量日内变化研究[J]. 海洋技术学报, 2025, 44(02): 24-33.
- [5] 汪世文, 温柔, 赵西增, 等. 极端波浪下柱式浮标运动响应的数值模拟研究[J/OL]. 海洋工程, 1-12 [2025-08-24]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250327.1722.006>.

作者简介: 董鑫(1995.10.17—), 男, 汉, 山东诸城, 大连测控技术研究所, 硕士, 工程师, 水声、海洋环境。