海洋资料浮标姿态信息测量技术研究 现状及发展趋势^{*}

王军 $d^{1,2,3}$ 厉运周 1,2,3 杨英 s^2 刘世萱² 孔庆霖² 郑 良²

(1. 国防科技大学气象海洋学院 湖南长沙 410073; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院海洋仪器仪表研究所 山东青岛 266061; 3. 崂山实验室 山东青岛 266237)

摘要 海洋资料浮标在海洋环境监测、预警预报、防灾减灾、资源开发、海上交通、渔业生产、 军事活动保障等方面具有重要作用,是海洋立体监测体系的重要组成部分。世界主要沿海国家和国 际组织都极为重视海洋浮标技术的发展。海上观测过程中,浮标随风、浪、流等作用产生复杂运动。 浮标复杂运动的精确观测离不开浮标姿态信息测量技术的发展。浮标姿态信息,不仅是浮标及其搭 载设备工作安全性可靠性评价的重要参考,也是浮标测量数据实时精准校正的重要保障。因此,浮标 姿态测量技术具有重要的研究价值和应用价值。文章从工程实际的技术需求出发,对浮标姿态信息 测量技术的研究现状、技术难点以及发展趋势等方面进行了梳理和总结,以期对研发新一代智能浮 标观测技术提供有益启发和借鉴。

关键词 海洋资料浮标; 姿态测量; 全球导航卫星系统; 微惯性测量单元; 数据校正 中图分类号 P715.2 doi: 10.11693/hyhz20230300054

受海浪、风、海流等的影响,海洋资料浮标(简称 浮标)海上工作时会产生多个自由度的复杂运动,对 浮标及其搭载测量设备的可靠性、安全性产生影响, 也将会导致海洋环境参数实时测量过程中产生一定 的误差。浮标姿态测量,是认识浮标海上工作时运动 状态的重要信息来源,关系着浮标研发过程中的稳 定性、可靠性及随波性设计(余建星等,2017),关系到 风、浪、流等观测数据的姿态精准校正和运动补偿, 是海洋资料浮标高准确度参数测量的重要关键技术, 越来越受到海洋资料浮标研究设计者的重视。与陆地 姿态测量技术相比,海洋资料浮标的海上工作环境 和测量方式对姿态测量技术提出了新的挑战和要求, 现有成熟的陆地姿态测量技术难以直接套用在海洋 资料浮标平台,适用于恶劣海洋环境的浮标姿态测 量技术亟待加大研发力度。本文对现有海洋资料浮标 的姿态测量技术进行分析探讨,以期为相关研究人员提供一定的借鉴和启发。

1 海洋资料浮标简介

海洋观测是研究海洋、开发海洋和利用海洋的基础,海洋观测技术的发展对于增强海洋环境监测能力、预警和预报海洋灾害、提高海洋资源的开发能力、 促进海洋经济的发展至关重要(蔡树群等,2007;漆随 平等,2019)。依靠先进的海洋监测仪器装备,人们得 以开展海洋环境大尺度范围和长序列时间的海上实 况测量,进而实现海洋环境立体实时监测,从而帮助 人们认识海洋,经略海洋(张云海,2018)。随着现代电 子、通信、计算机技术,以及搭载多种海洋传感仪器 平台技术(浮标、船舶、卫星等)的发展,人类能够以 组网的方式,全面立体实时获取海洋信息,海洋监测

通信作者: 厉运周, 博士研究生, 副研究员, E-mail: liyunzhou2011@163.com 收稿日期: 2023-03-07, 收修改稿日期: 2023-04-16

^{*} 国家重点研发计划项目, 2022YFC3104200号; 中国工程院战略研究与咨询项目, 2022-XY-21号, 2022-DFZD-35号; 山东 省重点研发计划项目, 2023ZLYS01号; 山东省自然科学基金面上项目, ZR2020MD058号; 青岛市博士后基金, QDBSH20220201041号。 王军成, 中国工程院院士, 研究员, E-mail: wjc@sdioi.com

不断向着综合智能感知的方向发展(姜晓轶等, 2018)。 海洋资料浮标作为离岸现场监测的重要手段。在海 洋动力环境监测、海洋污染监测、卫星遥感数据真实 性校验、水声环境监测等方面的重要作用日益突出。 浮标主要由浮标体、锚系、传感器、数据采集器、通 信系统、供电系统、安全系统、浮标检测仪等部分组 成(王军成, 2013)。按照标体结构形式、浮标分为圆盘 型、球型、船型、柱型等类型。按照锚泊方式、浮标 分为锚系型和漂流型。按照浮标体尺度、可以分为大 型、中型、小型等不同类型。浮标尺度越大、其稳定 性越好、越不易倾覆、抗破坏性和抗恶劣海况的能力 越强,但浮标的设计难度更大,建造价格更高、周期 更长、运输、拖航、布放回收难度也会更大。按照浮 标测量功能、可分为气象水文监测浮标、水质浮标、 波浪浮标、光学浮标(杨跃忠等, 2010)、核辐射监测 浮标(刘东彦等, 2016)等类型。根据搭载的测量传感 不同, 浮标能够实现对海洋水文、气象、生态、光学 等环境参数的测量(Liu et al, 2014; Wu et al, 2015; 阮 海林等、2015)。然而、海洋环境恶劣、无论何种类型 的海洋资料浮标、在海上工作过程中、都会因为受到 海浪、风、海流等作用力的影响,产生六个自由度的 运动(纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇)、从而 使浮标观测系统的长期稳定性下降(陈晓等, 2022), 极端天气下浮标产生剧烈的姿态变化甚至会导致浮 标倾覆现象(王昭正, 1987; Bouchard et al, 2006)。浮 标的动态运动也会对环境参数的测量结果产生一定 的影响(陈新刚等, 2020)、特别是与平台姿态紧密联 系的环境要素、在恶劣海况下难以获得接近真实的 数据(陈红霞等, 2023), 这是海上仪器装备观测区别 于陆地上仪器观测的重要不同之处。

2 海洋浮标姿态测量需求

随着世界各国对于海洋资源探索开发需求的日 益增长,海洋资料浮标的应用需求逐渐从近海向深 远海拓展,人们对海洋环境监测的广度和精度等方 面提出了更高要求(戴洪磊等,2014;王波等,2014)。 更多种类和数量的传感器及设备被搭载布置在不同 类型的海洋资料浮标上。根据监测任务的不同,不同 类型浮标上集成相应的不同传感设备,采集诸如水 文、水质、气象、生态、海洋生物、海洋化学、海洋 物理等多方面的海洋信息并加以处理(Dai *et al*, 2019; 王军成等,2019)。例如,为研究海洋物质在海洋环流 影响下的表层物质散播轨迹,利用漂流浮标随海洋 环流系统运动轨迹获取过程参数,浮标轨迹路径和 终点位置受多尺度流场变化影响,通过拉格朗日示 踪分析和观测模拟试验,能够更全面认识海洋物质 实际传播路径和范围(卢锡等,2022)。

通常,海洋资料浮标的尺寸越小,浮标姿态变化 受海况影响的程度越严重(季春群,1988;梁冠辉等, 2020b),相应地,浮标及搭载设备的安全性和工作稳 定性也将受到严峻的考验。姿态变化的影响使得相关 测量结果不可避免地叠加了浮标运动的干扰,特别 当进行瞬时测量时,对于搭载在浮标上的风、浪、流 等水文气象参数的观测仪器和设备而言,浮标平台 上自身的动态基准对测量误差的影响更大,将很难 满足高时间分辨率的数据获取需求。在传感器性能确 定条件下,浮标运动是造成相关环境参数测量误差 的主要来源。

以风测量为例, 当采用平均数值作为风测量值 时、浮标运动影响或可通过统计学处理进行减弱甚 至抵消,因此通常认为真风值与平均视风值差距不 大。然而、进行瞬时风测量时、浮标体的横摇、纵摇、 艏摇、纵荡、横荡、垂荡引起的风速计倾料, 使得浮 标风速传感器旋转器转轴无法与风向保持平行,造 成瞬时风速风向测量的较大偏差,特别在高海况下 阵性风速的测量会更加显著。宫明晓等(2019)和 Polverari 等(2022)在卫星反演风场与浮标实测风场对 比研究过程中发现、两种风场测量存在明显差异。胡 敦欣等(1996)为获得精确的海气湍流通量,用多个加 速度计组成姿态观测阵列获取船体姿态和运动、用 于校正观测到的风湍流资料、能够较为精确地消除 船体运动对风湍流的影响。此外,浮标体的六自由度 运动会带动风速计产生相对于浮标参考系角速度的 变化,从而造成浮标体相对于固定参考系的移动速 度测量误差。海况越恶劣, 浮标运动越剧烈, 瞬时风 速测量误差会变大、数据偏离真实值也会越大、使得 测量结果的可信度变差。因此、在高海况下依托浮标 平台实现高准确度的测风是比较困难的。

浮标运动姿态与其水动力性能紧密相关。对浮标 标体进行结构设计时,标体水动力分析必不可少。经 典的著作《浮标工程》(Berteaux, 1976)就结合流体力 学、弹性力学以及环境载荷等相关学科知识,对浮标 及其系泊系统的力学性能进行了深入分析。Carpenter 等(1995)利用数值模拟与试验方法对圆柱形浮标和圆 盘形浮标的运动响应进行了系统分析,结果显示,圆 柱形浮标的垂荡运动以及圆盘形浮标的横摇运动受 涌浪影响较为显著。余建星等(2017)围绕浮标水动力 特性研究,归纳了浮标水动力特性研究在浮标受力 与力矩、浮标运动姿态与幅值上的工程应用,系统总 结了理论分析、数值模拟、模型试验和现场观测这四 种水动力特性研究方法,这些方法在指导浮标设计、 分析验证浮标工作稳定性等具有重要作用,指出现 场获取连续的实时动态数据可为新型浮标的开发和 设计提供直接反馈和指导。可见,开展海洋资料浮标 姿态监测能够为浮标结构设计提供有力的数据支撑。

目前用于科学研究或业务化观测的浮标、对于 传感器布放前的校准、运行中的状态监测、数据端奇 异值质量控制等较为重视(吴晓芬等, 2019), 对于受 海况影响产生的浮标多自由度运动导致的测量影响 关注较少、缺乏系统的定量分析评估、相关校正研究 也较少(Crout et al, 2010)。姿态研究方法尚未形成统 一标准,缺乏合适的运动模型,无法满足特定复杂海 况下的浮标运动姿态精度要求、浮动平台运动姿态 校正方法在国际上尚未形成共识、研究一致性存在 争议、相关领域仍然有较大的探索以及研究空间。因 此、迫切需要就浮标在复杂海况下的姿态运动开展 系统深入的研究、提升姿态测量技术在浮标上的应 用、融合浮标姿态信息进行实时数据校正以满足浮 动平台高精度实时观测的迫切需求。海洋资料浮标姿 态监测不但有利于科研人员对海上设备的工作环境 进行科学分析、对极端海况下的浮标搭载设备数据 的真实有效性以及浮标设备的安全性进行重点监测 和科学评估,而且能对浮标标体的结构设计也能起 到积极作用。

3 浮标姿态测量研究现状

浮标平台的海上运动特性非常复杂,包含了横 摇、纵摇、艏摇、纵荡、横荡、垂荡六个自由度的运 动。已有部分学者就海洋环境对浮标姿态的影响开展 了一定的相关研究,研究内容相对分散,研究方法及 重点不一。

3.1 浮标运动姿态响应研究

Chen 等(2021)基于对海洋漂流浮标组成部件的 力学分析,对不同场景下漂流浮标水下姿态和受力 分布进行了预测和分析,建立了漂流浮标的通用数 值模型。唐文俊等(2013)通过对浅水区海浪谱模型的 仿真,初步研究了浅水区海浪波动对电磁浮标姿态 变化的影响。曲少春等(2010)通过对圆柱形浮标运动 分析,讨论了浮标重力以及设计尺寸对浮标横摇运 动的影响,调整设计参数后有效降低了浮标横摇运动响应,提高了所搭载仪器的工作稳定性。

浮标系泊方式对浮标姿态的影响也有较多深入 的研究。Radhakrishnan 等(2007)对球形浮标及其系泊 系统在规则波中的运动进行了研究、结果显示、当规 则波浪频率为浮标固有频率的两倍时、浮标横摇运 动不稳定、会出现横向振荡现象、并且横向振荡幅值 随着浮标吃水深度的增加而减小。陈小红等(1995)基 于浮标静力计算和三势流理论、对浮标水动力系数 (附加质量、阻尼系数和波浪力等)展开了计算分析, 研究了单点系泊浮标在频域中的运动响应。朱新颖等 (2000)通过计算深海浮标在规则波中的运动响应和系 泊缆张力、研究了系泊缆绳对浮标运动响应的影响、 结果表明系泊缆绳的存在能够减小浮标的摇荡运动、 使其峰值向低频移动、但是垂荡运动除外。缪泉明等 (2003)基于三维势流理论计算了浮标的水动力系数。 应用卡明斯运动方程对浮标及其三锚链系泊系统进 行数值模拟计算、结果表明、增加浮标重量能够使浮 标复原力矩变大、从而降低其横摇运动响应、在不改 变浮体重量的前提下,调整浮标尺寸,增加复原力矩, 可改善浮标的横摇运动。王兴刚等(2011)应用边界元 方法对浮标进行了频域计算。分析了浮标附加质量、 辐射阻尼、一阶波浪力以及二阶波浪平均漂移力、通 过时域分析方法计算了浮标的运动响应和系泊缆索 张力。孙金伟等(2012)设计了横向锚泊系统, 增强了 流速较大海域波浪浮标抵抗海流的能力、结果显示、 横向锚泊系统能够极大提高波浪浮标的随波性以及 抗倾覆能力、进而提升了波浪测量数据的准确性。张 继明等(2014)利用数值模拟的方法,得到浮标的运动 响应与系泊缆的受力情况、对圆盘型海洋资料浮标 及其系泊系统进行了分析与研究,充分考虑了流载 荷作用、大大提高了数值模拟的精度。方子帆等 (2017)针对浅海浮标系泊结构姿态控制问题、根据浮 标系泊结构力学推导出系泊系统状态的描述方程, 建立了浮标锚链参数优化匹配的数学模型、研究了 浮标系泊系统结构参数优化匹配计算方法、为浮标 系泊系统结构设计提供了理论依据。

3.2 浮标姿态测量方法研究

针对浮标姿态测量,不同科研团队采取了不同 的研究方法。赵江涛等(2019)基于双目视觉及空间几 何,提出了一种新的浮标姿态测量方法。他们通过双 目视觉系统获取浮标的运动图像,再利用霍夫变换 (Hough)变换和随机样本一致性算法,从两侧图像平 面提取相应的直线特征,得到直线方程和浮标摆角。 海上实验验证这种方法可在海洋环境下有效提取平 均绝对误差小于 0.5°的浮标线性特征。但是这种方法 需要首先获得浮标的运动图像,因此必须在远离浮 标的地方架设相应的传感设备,在实际工程应用中 局限性较大。

还有一些学者采用水听器对浮标姿态进行测量。 笪良龙等(2016)设计了一种封装在矢量水听器内部的 微型姿态测量系统,辅以微型惯性测量单元 (Miniature Inertial Measurement Unit, MIMU),采用毕 卡迭代算法及卡尔曼滤波,显著提升了目标方位的 估计精度;赵信广等(2017)设计了轻量化低功耗的电 子罗盘系统,结合矢量水听器,提高了浮动载体姿态 测量的稳定性; Cui (2018)采用集成姿态监测系统 对水下平台的三维姿态进行了获取,有效提高了水 下平台矢量水听器的测量精度。然而,采用水听器进 行姿态监测主要应用于水下载体,较少用于海上浮 标平台。

上述浮标姿态测量方法在实际作业中局限性均 较大。目前,海洋资料浮标姿态测量仍然多采用陀螺 仪、加速度计以及磁阻传感器融合的惯性测量系统 (刘路等,2019)。但是,惯性测量系统也存在一定的不 足之处,比如陀螺仪漂移误差比较大,加速度计运动 干扰明显,磁场易受外界影响等等(杨英东,2017)。因 此,在应用惯性测量系统时,需要采用不同的系统设 计方式和不同的算法对姿态测量数据进行校准(甘雨, 2015)。

现有浮标姿态测量方法主要包括以下两种:一 是基于 MIMU 的测量研究,一是基于全球导航卫星 系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的测 量研究。其中 MIMU 系统具有短时间内优良的动态 性能与不受外部信号干扰的特点,能够弥补导航卫 星测量系统动态性能差、更新率低以及易受外部干扰 等缺陷,而 GNSS 测量系统具有长期无误差积累的特 点,可为惯性测量系统进行在线标校和学习提供良 好的依据。现有大多数相关研究是基于两种测量系统 的耦合。下文主要就这两种方法展开论述。

3.2.1 基于 MIMU 的浮标姿态信息高精度测量 MIMU 是 微 机 电 系 统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的一个重要分支,集成了诸如陀螺 仪、加速度计、磁阻传感器、嵌入式元器件以及导航 软件等(唐康华等, 2015),该系统具有低成本,低功 耗,体积小,稳定性高的优点,广泛运用在诸如军事 (陈督等, 2020)、智能手机(Del Rosario *et al*, 2016)、 无人机(Yang *et al*, 2020; 张雄等, 2020; Hoang *et al*, 2021)、工业机器人(Chiella *et al*, 2019)、车辆姿态分析(Wu *et al*, 2021)等多种场景下的姿态测量中。

目前、海上浮标姿态测量多采用微陀螺仪。但 是、微陀螺仪测量的漂移问题会导致测量精度的明 显下降,需要融合其他信息以保证其测量精度,通 常采用以下两种方法: 一是通过提升改进硬件性能 实现浮标实时运动状态检测;二是基于现有陀螺 仪、加速度计、磁阻传感器设计新系统,获取相应 角加速度、线加速度和地磁信息,再通过对多元姿 态数据进行加权融合计算,实现浮标实时运动状态 检测。文献表明、大多数相关研究集中在第二种方 法开展,其中余博嵩等(2019)通过设计新系统,并 利用四元法和比例积分(Proportional Integral, PI)调 节算法对姿态进行解算并进行数据融合、使用椭球 拟合以及阈值滤波的误差补偿方法进行系统误差校 正。但是, PI 调节无法满足对浮标复杂的运动状况的 运算、因此会导致显著误差、这一点在海上试验中 也得到了证实。Jouybari 等(2019)则从位于伊朗基什 岛沿海水域浮标上获取数据, 通过采用多种算法进 行对比、证明了在输入参量一致的情况下, Madgwick 算法和 Mahony 算法对于姿态信息的校正 精度均优于互补滤波算法。Anctil 等(1994)利用小型 随波浮标测量湍流海气通量,提出了对风速计角向 和轴向运动引起的风速进行修正的方法、将大地坐 标系向浮标坐标系的坐标旋转变换。通过线性加速 度计积分对浮标轴向运动进行补偿、并对浮标旋转 引起的角速度进行坐标变换补偿,得到叠加了浮标 平动和旋转的真风修正公式。该方法在波浪 4.25 m 以下的海况下应用情况较好。苟艳妮等(2013)探索了 模拟退火算法对多基地声呐浮标水下目标定位的作 用、在建立适合于浮标系统工作方式的目标函数情 况下,选择合理的接收停止准则,通过大量实验对 算法的各方面性能进行了仿真、证实了退火算法对 多基地浮标目标定位具有可行性。刘宁等(2020)对 MIMU 加速度与姿态角信号进行预处理,获得主值 方向加速度、利用离散傅里叶变换将加速度转化到 频域、滤波后通过离散傅里叶逆变换获取时域内的 唯一信息,将空投波浪浮标的测量误差控制在 10% 以内。侯庆余(2014)利用三轴加速度传感器、三轴磁 阻传感器以及三轴陀螺仪,获取了浮标载体姿态的 冗余信息,通过有限脉冲响应数字滤波、扩展卡尔 曼滤波、误差补偿等优化,实现多源数据的融合,提 升海洋资料浮标姿态信息的测量精度。周金金等 (2016)采用 MIMU,通过卡尔曼滤波对载体的姿态 进行确定,获得航向角以及俯仰角信息,进行成像 结果的反向调整,获取稳定的图像。以上研究多采 用基于互补滤波器或卡尔曼滤波器的融合算法。需 要注意的是,上述研究中,在设计系统及算法时, 应留出足够的数据冗余度以应对有可能出现的传感 器测量误差或零漂导致的系统误差,保证系统获取 足够的信息对浮标姿态进行高精度校准。

3.2.2 基于 GNSS 的浮标姿态及定位信息测量 GNSS 是所有卫星导航系统的统称,包括我国的北斗

Sixes 定所有定望等所以实站的就称,它出现固定有 系统(Bei Dou Navigation Satellite System, BDS)、美国 的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、欧 洲的伽利略卫星导航系统、俄罗斯的 Glonass 系统等, 也同时涵盖了与这些系统配套的星基和地基增强系 统(Kaplan *et al*, 2021)。GNSS 测姿系统的研究核心是 求解整周模糊度,其中比较代表性的方法是最小二 乘 模糊度降相关法(Least-squares AMBiguity Decorrelation Algorithm, LAMBDA)及其衍生的相关算 法 (Teunissen *et al*, 1997; Wang *et al*, 2021; 肖玉钢等, 2021; Jia *et al*, 2022), 是目前为止从计算成功率和工 业应用上看较为成熟的一种算法。

对于海洋资料浮标而言,除了基于 MIMU 系统 获取浮标的实时运动状态, GNSS 系统也是获取浮标 运动信息的重要途径。张欣等(2005)采用了格型扩展 卡尔曼滤波技术对航空浮标的定位方法进行了研究. 使用状态更加简化的 2-状态定位模型、大幅缩减了 计算量,充分考虑了浮标漂移运动特性,提升了滤波 性能, 该方法对导航误差, 尤其是线性导航误差有很 好的抗性。Xue 等(2021)设计了一种自适应变参时标 卡尔曼滤波器、通过设定状态噪声协方差的自适应 机制、可以对不同报告间隔的浮标漂移轨迹进行估 算,对4个漂移浮标的实测轨迹进行测量,验证了该 方法在轨迹估算方面的优越性。蔡艳辉等(2005)详细 地介绍了采用三维数字罗盘, 基于差分 GPS 精密水 下立体定位系统、开展浮标姿态坐标实时三维校正。 张丽艳等(2008)通过融合数字罗盘以及 GPS, 设计了 一套无线测量系统、对海上浮标姿态和位置实现了 测量,在最终的输出中同时应用了 MIMU 和 GNSS 的数据、具有一定的先导性意义。李俊文等(2014; 2015)的研究则更进一步,设计了一款基于六轴姿态 传感器的波浪浮标系统, 通过引入经验模态分解和 希尔伯特边际谱,利用卡尔曼滤波算法进行加速度 计和陀螺仪的姿态信息数据互补融合,很好解决了 噪声和零漂对浮标姿态信息的干扰,实验证明了分 析算法在波浪频率和方向上的信息与现场实际情况 相符,该研究是将GNSS信息与MIMU信息进行融合 的一种有益尝试。Lei等(2022)针对GPS中断时导航 系统精度易受干扰的问题,提出了一种用于姿态估 算的自适应增益互补滤波器,通过在观测对象中引 入加速度矢量,融合深度学习方法,基于模糊神经网 络的位置预测算法进行参数收敛,寻找最优解,结果 表明该算法优于目前较为常用的 Mahony 算法,能够 将浮标姿态和位置测量精度大幅增强。

综上,随着研究的不断深入, MIMU 和 GNSS 的融合深度也在逐步提高。

4 海洋资料浮标姿态测量技术的未来发展

目前,海洋资料浮标姿态测量技术已由浮标姿 态信息测量延伸到浮标运动信息测量、以获取海洋 资料浮标上任意空间位置点的运动矫正信息、比如 三维空间的角速度信息、线加速度信息、三维姿态信 息、三维速度信息、三维位置信息以及升沉信息等等。 这些信息的准确获取不仅可以帮助海洋观探测仪器 进行误差补偿矫正,而且这些运动测量信息中本身 也包含了水文气象仪器观测的重要参数信息,如波 浪测量中,波浪特征参数(波高、波周期和波向)的计 算就是源于这些运动测量信息。另外、这些运动测量 信息作为浮标平台在复杂海洋环境中稳定性和随波 性的直接反映、是浮标标体设计的重要参考、能够为 浮标平台的稳定性或随波性的增强设计提供依据。总 之、海洋资料浮标姿态测量技术已经不仅仅局限于 姿态测量本身,这些运动测量信息还可为浮标设计 以及搭载于浮标平台上的水文气象仪器的观测提供 更加精准和精细化的服务。

针对海洋资料浮标,现有主流的姿态测量系统 以惯性测量系统和导航卫星测量系统为主,两者组 合可以形成明显的优势互补。考虑到实际的工程应用 成本,惯性测量系统在浮标平台上大多采用微惯性 测量系统,导航卫星测量系统则主要采用 GPS 和 BDS 的终端接收设备。然而实际上,惯性测量和导航 卫星测量组合系统对复杂海洋环境下海洋资料浮标 随风、浪、流以及锚系拖拽的运动辨识效果还不够理 想。这可能是因为目前国内外姿态测量的研究大多是 基于陆地应用环境所给出相应解决方案,较少涉及 海洋领域。虽偶有文献涉及海上船舶的姿态测量,但 浮标平台的运动特性较船舶更为复杂,除浮标自身 的横摇、纵摇、艏摇外,还有横荡、纵荡、垂荡以及 浮标围绕锚系做的圆弧运动,这些因素都会对海洋 观探测仪器的测量产生影响。目前国内外相关研究缺 少针对波浪场浮标运动的模型描述和分析。针对以上 问题、海洋资料浮标姿态测量技术需解决以下难题:

(1) 浮标复杂随机运动与海面高强度镜面反射 对 MIMU 和 GNSS 融合系统长期稳定运行的影响;

(2) 如何通过优化浮标的运动特性模型及多源数据融合算法进而提高姿态测量设备的高速响应频率,增强浮标姿态测量系统的抗干扰能力和复杂海况下自校准能力,实现浮标运动特性的快速高精度检测;

(3) 如何实现对浮标任意不同空间位置点运动 信息的精准获取;

(4) 如何实现浮标运动测量设备的低成本、低功耗、小型化、轻量化设计。

简而言之,针对复杂海洋环境研制相应的浮标 姿态模型和算法,是海洋资料浮标姿态测量技术未 来发展的主要方向。此外,随着卫星通信技术和浮标 组网技术的发展,利用浮标组网的信息中继传输特 点,实现深远海 GNSS 系统的精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)及运动信息获取,与惯性测量 系统进行深度融合,或将进一步提高浮标姿态测量 系统在复杂海洋环境中的运动测量精度。与此同时, 通过卫星通信和浮标组网技术对海上浮标运动状态进 行远程实时监控,也将是浮标技术智能化和网络化的 发展方向。借助浮标姿态测量技术,未来的海洋资料 浮标将不再是海洋传感器的简单载体和信息集成的单 一设备,而是具备自身运动感知、传感器测量诊断校 准和信息组网能力的智能化海洋综合监测平台。

5 结语

海洋资料浮标是在各种海洋环境下实时监测水 文、气象等海洋环境参数的重要技术手段和关键平 台。作为海洋资料浮标智能化技术的重要组成部分, 良好的姿态测量技术将赋予海洋资料浮标优秀的运 动感知能力,助力海洋水文气象观测仪器增进自身 测量数据的诊断、校准以及海上监测信息的交叉检 验。因此,姿态测量技术越来越被海洋资料浮标领域 研究学者和工程专家重视。随着海洋浮标在海洋环境 监测领域的广泛应用和更高精细化测量需求的发展, 浮标姿态测量技术也将得到更加深入地研究,浮标 姿态测量技术将由姿态信息测量延伸到运动信息测 量,姿态测量技术不仅紧密关联浮标搭载仪器设备 的测量精度,而且可为浮标标体稳定性/随波性的增 强设计提供重要的参考。

本文介绍了海洋资料浮标目前的应用情况以及 发挥的作用,并针对姿态测量技术在海洋资料浮标 领域的技术需求、发展现状、测量方法优缺点及应用、 测姿技术难点及其未来发展趋势等方面进行了详细 介绍和深度剖析,当前成熟的陆地姿态测量技术在 海洋环境的应用存在的"水土不服"现象,应用于浮 标工程的组合运动测量设备普遍存在实际测量精度 不足、数据完整性不强、噪声分布情况不理想、设备 内部运动模型的环境适应性差等问题,因此,针对特 定海洋环境研制相应的运动测量模型和算法,将是 未来海洋资料浮标姿态测量技术发展的重要方向, 结合卫星通信技术和浮标组网技术将不仅有利于提 高浮标姿态测量系统在复杂海洋环境中的测量精度, 而且有利于促进浮标技术向智能化和网络化发展。

参考文献

- 王兴刚, 孙昭晨, 梁书秀, 等, 2011. 规则波作用下四锚浮标 系统动力分析[J]. 海洋工程, 29(3): 43-49.
- 王军成, 2013. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京: 海洋出版 社.
- 王军成, 厉运周, 2019. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学, 32(5): 1-20.
- 王波,李民,刘世萱,等,2014. 海洋资料浮标观测技术应用 现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报,35(11):2401-2414.
- 王昭正, 1987. 进一步加强浮标的基础理论研究和实验工作[J]. 海洋技术, 6(3):50-57.
- 方子帆,余红昌,郑小伟,等,2017. 浮标系泊结构的参数优 化匹配方法研究[J]. 舰船科学技术,39(11):69-74.
- 甘雨, 2015. GNSS/INS 组合系统模型精化及载波相位定位测 姿[D]. 郑州: 解放军信息工程大学.
- 卢锡, 胡石建, 王凡, 等, 2022. 基于漂流浮标观测分析日本 福岛以东表层海洋物质的散播轨迹[J]. 海洋与湖沼, 53(5): 1027-1044.
- 曲少春,郑琨,王英民,2010.圆柱形浮标运动分析与仿真[J]. 计算机仿真,27(6):363-367.
- 朱新颖, 黄祥鹿, 2000. 深海锚泊浮标的二阶动力分析[J]. 海 洋工程, 18(2): 74-78.
- 刘东彦,张颖颖,刘岩,等,2016. 海洋核辐射现场监测装置 研究及实验测试[J]. 海洋技术学报,35(4):41-43.
- 刘宁,魏晓辉,王斌,等,2020. 基于 MEMS 加速度计空投浮标 的 波 浪 测 量 方 法 试 验 研 究 [J]. 海 洋 科 学,44(9):146-153.
- 刘路, 王收军, 陈松贵, 等, 2019. 基于 MEMS 加速度计的波 高测量装置[J]. 科学技术与工程, 19(30): 70-77.

- 阮海林,杨燕明,牛富强,等,2015. 基于 Argo 数据的吕宋海峡东部海域的会聚区特征分析[J].海洋学报,37(7): 78-84.
- 孙金伟,郑珊珊,范秀涛,等,2012. SBF3-2 波浪浮标锚泊系 统设计[J]. 山东科学,25(2):44-48.
- 李俊文, 2015. 波浪浮标的数据处理与研究[D]. 武汉: 武汉科 技大学.
- 李俊文,刘惠康,张孝春,2014. 基于 ARM 的波浪浮标设计[J]. 电子技术应用,40(9):17-20,23.
- 杨英东, 2017. GNSS/MIMU 组合系统误差补偿与抗干扰问题 的研究[D]. 上海: 上海交通大学.
- 杨跃忠, 卢桂新, 柯天存, 等, 2010. 光学浮标控制系统硬件 设计[J]. 热带海洋学报, 29(2): 7-11.
- 吴晓芬,周慧,曹敏杰等,2019.船载 CTD 仪与自动剖面浮标 观测资料质量初探[J].海洋与湖沼,50(2):278-290.
- 肖玉钢, 王峥, 喻守刚, 等, 2021. 一种有效的多模 GNSS 高维 模糊度固定算法[J]. 测绘地理信息, 46(5): 17-20.
- 余建星,韩彤,李林奇,等,2017.海洋资料浮标水动力特性 研究现状分析[J].海洋湖沼通报,39(4):61-67.
- 余博嵩,何姣,曹晓钟,2019. 基于 MEMS 的海洋漂流浮标运 动姿态测量系统设计[J]. 电子测量技术,42(10):99-104.
- 张云海, 2018. 海洋环境监测装备技术发展综述[J]. 水雷战与 舰船防护, 1(2): 7-14.
- 张丽艳, 普仕凡, 李桂林, 等, 2008. 海上浮标姿态和位置无 线测量系统设计[C]//辽宁省通信学会 2008 年通信网络与 信息技术年会论文集. 沈阳: 辽宁省通信学会: 388-392.
- 张欣,杨日杰,汤燕,2005.基于扩展卡尔曼滤波的浮标定位 方法[J].火力与指挥控制,30(4):59-62.
- 张继明, 范秀涛, 张树刚, 等, 2014. 海洋资料浮标锚泊系统 的系泊力计算[J]. 山东科学, 27(2): 19-24.
- 张雄,黄卫华,陈劲峰,2020.基于反幂法和扩展卡尔曼滤波 的姿态估计算法[J].计算机工程与设计,41(1):100-106.
- 陈小红, 黄祥鹿, 1995. 单点系泊海洋资料浮标的动力分析[J] 中国造船, 36(3): 1-8.
- 陈红霞,林丽娜,窦银科,等,2023.无动力海面移动观测平 台特点、进展与发展趋势分析[J].海洋技术学报,42(1): 32-39.
- 陈晓,刘长华,刘志亮,等,2022.2010-2019 年北黄海海域长 序列海量温盐数据分析与处理方法[J].海洋与湖沼,53(1): 49-61.
- 陈督, 霍鹏飞, 陈超, 等, 2020. 基于自适应互补滤波的滚转 角测量算法[J]. 探测与控制学报, 42(1): 17-20.
- 陈新刚,喻鹏,刘大钢,2020.基于自持式剖面浮标的目标电 场探测方法研究[J].中国造船,61(S1):31-39.
- 苟艳妮, 王英民, 王奇, 2013. 利用模拟退火算法的多基地浮 标定位研究[J]. 西北工业大学学报, 31(4): 607-613.
- 季春群, 1988. 海洋资料浮标在海上的稳性分析[J]. 海洋工程, 6(4): 36-42.
- 周金金, 林志, 王小英, 2016. 基于 ARM11 的海洋浮标云台稳 定控制系统[J]. 中国测试, 42(1): 74-78.
- 赵江涛,顾季源,张东亮,等,2019. 海洋观测浮标摇摆姿态 视频测量方法及试验分析[J]. 电子设计工程,27(15): 179-183.
- 赵信广, 王丽玲, 朱明辉, 等, 2017. 基于矢量水听器姿态修 正的电子罗盘系统设计[J]. 电子质量(11): 39-42.

- 胡敦欣,赵永平,陆蔼庆,等,1996.船上海气之间湍流通量 的观测研究[J].海洋与湖沼,27(2):163-168.
- 侯庆余, 2014. 基于 MEMS 的资料浮标姿态传感器的设计与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 姜晓轶, 潘德炉, 2018. 谈谈我国智慧海洋发展的建议[J]. 海 洋信息, 33(1): 1-6.
- 宫明晓, 马艳, 付业理, 等, 2019. 青岛沿海 ASCAT 卫星反演 风场与浮标海岛实测风场的对比分析[J]. 气象科技, 47(5): 740-746.
- 唐文俊,何洋,赵建扬,2013. 海浪波动对电磁浮标姿态的影 响研究[J]. 船电技术,33(12):46-48.
- 唐康华, 吴美平, 胡小平, 2015. GPS/MIMU 嵌入式组合导航 关键技术研究[M]. 北京: 国防工业出版社.
- 笪良龙,王文龙,孙芹东,等,2016. 一种微型矢量水听器姿 态测量系统[J]. 中国惯性技术学报,24(1):20-25.
- 梁冠辉,陶常飞,周兴华,等,2020a.GNSS海洋浮标海面高程 动态不确定度研究[J].海洋科学进展,38(3):532-540.
- 梁冠辉, 薛宇欢, 孙宝楠, 等, 2020b. 海洋物性监测小型浮标 稳性设计[J]. 海洋科学进展, 38(3): 541-548.
- 蔡树群,张文静,王盛安,2007. 海洋环境观测技术研究进展 [J]. 热带海洋学报,26(3):76-81.
- 蔡艳辉,章传银,王泽民,等,2005. 差分 GPS 水下立体定位 系统浮标姿态的测量[J]. 测绘科学,30(3):49-50.
- 漆随平, 厉运周, 2019. 海洋环境监测技术及仪器装备的发展 现状与趋势[J]. 山东科学, 32(5): 21-30.
- 缪泉明,顾民,杨占明,等,2003. 浮标在波浪中的试验研究 [J]. 中国造船,44(S1):359-366.
- 戴洪磊, 牟乃夏, 王春玉, 等, 2014. 我国海洋浮标发展现状 及趋势[J]. 气象水文海洋仪器, 31(2): 118-121, 125.
- KAPLAN E D, HEGARTY C J, 2021. GPS/GNSS 原理与应用 [M]. 寇艳红, 沈军, 译.2版. 北京: 电子工业出版社.
- ANCTIL F, DONELAN M A, DRENNAN W M, et al, 1994. Eddy-correlation measurements of air-sea fluxes from a discus buoy [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 11(4): 1144-1150.
- BERTEAUX H O, 1976. Buoy Engineering [M]. New York: Wiley.
- Bouchard R H , Teng C C , Hervey R V , 2006. Significant Events Reported by the NDBC Stations during Hurricane Katrina[C]//IEEE.IEEE,1-5.
- CARPENTER E B, LEONARD J W, YIM S C S, 1995. Experimental and numerical investigations of tethered spar and sphere buoys in irregular waves [J]. Ocean Engineering, 22(8): 765-784.
- CHEN Y L, ZHAO H C, DING L C, et al, 2021. A model building and simulation method for underwater attitude of drifting buoy [C] // OCEANS 2021: San Diego-Porto. San Diego: IEEE: 1-4.
- CHIELLA A C B, TEIXEIRA B O S, PEREIRA G A S, 2019. Quaternion-based robust attitude estimation using an adaptive unscented Kalman filter [J]. Sensors, 19(10): 2372.
- CROUT R L, RILEY R, 2010. Improved quality of national data buoy center (NDBC) acoustic Doppler current profiler (ADCP) measurements [C] // OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. Seattle: IEEE: 1-4.

- CUI X L, 2018. Attitude integrate monitor system design for direction finding of vector hydrophone on buoy platform [C]
 // 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Xi'an: IEEE: 1-2180.
- DAI Y, ZHANG S M, ZHANG H, *et al*, 2019. The application of IsatData pro service in data communication of oceanic buoys
 [C] // 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chengdu: IEEE: 2431-2435.
- DEL ROSARIO M B D, LOVELL N H, REDMOND S J, 2016. Quaternion-based complementary filter for attitude determination of a smartphone [J]. IEEE Sensors Journal, 16(15): 6008-6017.
- HOANG M L, CARRATÙ M, PACIELLO V, et al, 2021. Noise attenuation on IMU measurement for drone balance by sensor fusion [C] // 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Glasgow: IEEE: 1-6.
- JIA X Z, CHENG G, JI Y F, et al, 2022. GNSS single-frequency, single-epoch attitude determination method with orthogonal constraints [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022: 4426987.
- JOUYBARI A, AMIRI H, ARDALAN A A, *et al*, 2019. Methods comparison for attitude determination of a lightweight buoy by raw data of IMU [J]. Measurement, 135: 348-354.
- LEI X S, WANG R, FU F, 2022. An adaptive method of attitude and position estimation during GPS outages [J]. Measurement, 199: 111474.
- LIU Z H, XU J P, SUN C H, *et al*, 2014. An upper ocean response to Typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats [J]. Acta Oceanologica Sinica, 33(11): 90-101.
- POLVERARI F, PORTABELLA M, LIN W M, et al, 2022. On high and extreme wind calibration using ASCAT [J]. IEEE

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60: 4202210.

- RADHAKRISHNAN S, DATLA R, HIRES R I, 2007. Theoretical and experimental analysis of tethered buoy instability in gravity waves [J]. Ocean Engineering, 34(2): 261-274.
- TEUNISSEN P J G, DE JONGE P J, TIBERIUS C C J M, 1997. Performance of the LAMBDA method for fast GPS ambiguity resolution [J]. Navigation, 44(3): 373-383.
- WANG X Z, YAO Y B, XU C Q, et al, 2021. An improved single-epoch attitude determination method for low-cost single-frequency GNSS receivers [J]. Remote Sensing, 13(14): 2746.
- WU X F, LIU Z H, LIAO G H, et al, 2015. Variation of Indo-Pacific upper ocean heat content during 2001-2012 revealed by Argo [J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(5): 29-38.
- WU Z W, YUAN D, ZHANG F G, et al, 2021. Improving accuracy of low-cost vehicle attitude estimation by denoising MIMU based on SSA and ICA [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70: 9507213.
- XU X Y, XU K, SHEN H, et al, 2016. Sea surface height and significant wave height calibration methodology by a GNSS buoy campaign for HY-2A altimeter [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(11): 5252-5261.
- XUE H, CHAI T, 2021. Estimation of buoy drifting based on adaptive parameter-varying time scale Kalman filter [J]. Journal of Control and Decision, 8(3): 353-362.
- YANG Y, LIU X X, ZHANG W G, et al, 2020. A nonlinear double model for multisensor-integrated navigation using the federated EKF algorithm for small UAVs [J]. Sensors, 20(10): 2974.

STATUS QUO AND TREND OF RESEARCH AND DEVELOPMENT IN ATTITUDE MEASUREMENT TECHNOLOGY OF OCEAN DATA BUOY

WANG Jun-Cheng^{1, 2, 3}, LI Yun-Zhou^{1, 2, 3}, YANG Ying-Dong², LIU Shi-Xuan², KONG Qing-Lin², ZHENG Liang²

(1. School of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China; 3. Laoshan laboratory, Qingdao 266237, China)

Abstract Ocean data buoy plays an important role in marine environmental monitoring, early-warning and prediction, disaster prevention and mitigation, marine resource development, marine traffic, fishery production, and military support. It is also an important part of three-dimensional marine environment monitoring system. Both major coastal countries and international organizations pay great attention to the development of ocean data buoys. The motion of ocean data buoy is very complex under the influences of wind, wave, and ocean current. The precise observation of buoy movement is inseparable from the development of buoy attitude information measurement technology. Buoy's attitude information is an important reference for the work safety and reliability evaluation of buoy and its carrying equipment, and also an important technology has an important value in the research and application. Therefore, the research status, technical difficulties, and development trend of the attitude measurement technology of ocean data buoy were reviewed and summarized from the technical requirements of ocean buoy to provide good enlightenment and reference for the development of new-generation intelligent observation buoys.

Key words ocean data buoy; attitude measurement; Global Navigation Satellite System (GNSS); micro inertial measurement unit; data correction