DP2动力定位系统在起重作业船舶中的实践研究

张茂林 赖小锋 杨 震 于 硕 张春祥
海洋石油工程股份有限公司 天津 300450

摘 要 海上风电、海洋平台升级与深海资源开发推动海上起重作业向更广水域、复杂工况拓展，对起重船定位性能和作业安全提出更高要求。传统锚泊定位难以满足深海高精度施工需求，DP2（dynamic positioning system class 2）动力定位系统依靠冗余架构优势广泛用于大型起重船，但现有通用控制逻辑未考虑船—吊耦合扰动、动态载荷等特殊工况，限制作业安全与效率。本文针对起重船DP2动力定位系统，分析船—吊耦合干扰机理，建立重载耦合动力学模型，优化控制算法与容错策略，经理论分析及仿真提升复杂海况下定位稳定性与精度，为海上起重作业提供技术支撑。

关键词 DP2动力定位系统；起重作业船舶；船—吊耦合干扰机制

Practical Research on DP2 Dynamic Positioning System in Crane Operation Vessels

Zhang Maolin, Lai Xiaofeng, Yang Zhen, Yu Shuo, Zhang Chunxiang
Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China

Abstract The development of offshore wind power, offshore platform upgrades, and deep-sea resource exploitation has driven offshore crane operations toward broader waters and more complex working conditions, imposing higher requirements on the positioning performance and operational safety of crane vessels. Traditional anchor mooring positioning can hardly meet the demands of high-precision construction in deep water. The DP2 (dynamic positioning system class 2) dynamic positioning system, with its redundant architecture advantages, is widely used in large crane vessels. However, existing general control logic does not take into account special working conditions such as ship-crane coupling disturbances and dynamic loads, thus limiting operational safety and efficiency. Targeting the DP2 dynamic positioning system of crane vessels, this paper analyzes the mechanism of ship-crane coupling interference, establishes a heavy-load coupling dynamic model, optimizes the control algorithm and fault-tolerant strategy, and, through theoretical analysis and simulation, improves positioning stability and accuracy under complex sea conditions, providing technical support for offshore crane operations.

Key words DP2 Dynamic Positioning System; Crane Operation Vessels; Ship-Crane Coupling Interference Mechanism

随着海洋工程向规模化、深海施工发展，大型海上吊装对船舶定位的实时性、精度及稳定性要求不断提高。DP2动力定位系统具备双冗余架构，广泛应用于起重船，克服了锚泊定位受水深、海况制约的不足。然而现有DP2通用控制方案未考虑船—吊耦合、载荷突变等起重作业特征，存在抗扰能力弱、响应滞后、容错机制不完善等问题。为此，本文研究起重船与DP2系统耦合机理，结合动力学建模、智能算法与容错策略优化，改善复杂海况吊装作业定位精度，健全起重船动力定位技术体系，为现场施工提供理论与技术支撑。

1 DP2动力定位系统与起重作业耦合机理分析

1.1 DP2动力定位系统核心架构与冗余特性

DP2动力定位系统为双冗余船舶定位系统，包含传感检测、核心控制、电力推进、监控报警四大单元，兼具安全性与经济性，多用于民用起重船舶。系统核心硬件与供电装置均设置双独立冗余配置，单设备故障可无缝切换，保障定位作业连续稳定。作业过程中，系统实时采集船位、姿态及环境载荷数据，通过推力算法抵消风浪流干扰，实现船舶精准定点定位[1]。

1.2 海上起重作业载荷特性与扰动机理

海上起重作业存在静态吊载、动态交变载荷、落载冲击等多重扰动，易破坏船体受力平衡，引发船体倾斜、姿态波动与瞬时晃动。同时，作业载荷与风浪流环境载荷形成耦合叠加，进一步扩大船体定位偏差。低海况下扰动影响较小，5～6级复杂海况的耦合干扰会显著增加调控难度，造成DP2系统响应滞后、定位精度差等问题。

1.3 DP2系统与起重作业耦合干扰机制

海上起重作业中，船体、吊机、吊载形成强耦合运动体

系，是DP2定位精度下降的核心诱因。吊机作业诱发船体无规则运动，船体姿态偏差又加剧吊载摆动，形成恶性循环扰动。该类扰动具有随机性、突变性、非线性特征，传统固定参数DP2算法适配性不足，易出现推力响应滞后、分配不均问题。扰动持续累积会导致船位超限、吊装精度下降，易引发设备损坏、吊物碰撞等安全隐患，严重时将造成定位失效、作业中断。

2 起重船DP2多场耦合动力学建模与仿真模型搭建

2.1 传统DP系统建模缺陷分析

现有DP系统仿真建模多考虑船体运动与风浪流环境载荷，忽略起重动态载荷及船—吊耦合运动干扰，导致仿真模型与实际工况偏差较大。传统建模参数固化，无法适配吊重、吊机动作、海况的动态变化，且未考量DP2冗余设备协同工作特性与故障参数变化规律。仿真结果精准度不足，难以真实还原起重作业中DP2系统的实际运行状态，无法有效支撑控制算法优化[2]。

2.2 船—吊机—载荷一体化动力学模型构建

为贴合海上起重真实工况，本文构建船—吊机—载荷一体化多场耦合动力学模型。以船体六自由度运动模型为核心，融合起重动态载荷与海洋环境载荷模型，实现多维度载荷耦合计算。通过修正船体阻尼、惯性参数还原船体运动规律，量化静态吊载、动态摆动、落载冲击三类载荷特征，拟合不同等级海况参数，精准复现起重作业全过程船体受力与运动变化特性。

2.3 改进型DP2系统状态估计模型

针对传统传感器数据噪声大、精度低、易漂移等问题，本文构建改进DP2系统状态估计模型。采用改进卡尔曼滤波算法，实时修正船位、姿态、速度等核心参数，过滤随机作业干扰噪声。同时融合北斗、全球定位系统（global positioning system，GPS）与光纤陀螺多源传感数据，实现数据互补与容错校验，解决单一传感器数据漂移、信号中断、设备失效引发的定位偏差，为控制算法优化提供精准稳定的数据支撑。

2.4 仿真平台搭建与参数设置

本文基于MATLAB/Simulink仿真软件搭建专用的起重船DP2系统仿真平台，覆盖常规海况、复杂海况以及轻载、重载等各类作业场景，完整纳入3～6级海况、不同吊重吨位、吊机不同作业姿态等典型工况参数。同时录入DP2系统推进器性能参数、冗余设备切换参数、传感设备运行参数等核心设备数据，搭建与实船运行状态高度契合的仿真环境，为后续算法性能对比、故障容错能力测试提供标准化、规范化的仿真条件[3]。

3 基于载荷预判的DP2自适应协同控制算法优化

3.1 传统DP2控制算法局限性分析

传统DP2系统普遍采用固定参数PID控制算法，控制参数无法随工况变化实时动态调整，面对起重作业载荷突变、船—吊非线性耦合扰动等复杂场景，存在调控响应速度慢、抗干扰能力弱等短板。同时，传统推力分配算法以能耗最优为单一目标，未结合起重作业的稳定性核心需求，在重载作业工况下极易出现推力分配不均、部分推进器超负荷运行、推力响应滞后等问题，无法满足高精度、高稳定性的海上起重作业定位要求。

3.2 基于LSTM神经网络的起重载荷预判模型

船舶起重作业载荷突变易导致DP2动力定位系统响应滞后。针对该问题，本文构建长短期记忆网络（long short-term memory，LSTM）载荷预测模型，依托实船—吊装载荷数据完成训练。模型可识别吊机起吊、摆臂、卸荷等动作，精准预测载荷波动与海浪载荷扰动，提前输出载荷变化趋势，为DP2系统提供前馈补偿控制量，克服传统算法事后调节、存在滞后的缺陷，提升系统动态响应能力，增强复杂工况适应性。

3.3 模糊PID自适应控制器优化设计

将LSTM模型输出的载荷预测数据加以运用，对模糊比例—积分—微分（proportional-integral-derivative，PID）自适应控制器进行优化设计。传统PID控制器参数固定不变，适应性较差，而优化后的控制器能够结合海上风浪等级、吊装重物重量以及载荷波动程度，随时调整控制参数。同时文中新增动态扰动补偿机制，可实时修正船舶定位误差，削弱船—吊联动干扰与海上风浪带来的载荷影响，大幅提高DP2定位系统在恶劣海况、大重量吊装作业时的定位准确度，使船体姿态保持更加稳定。

3.4 DP2系统动态推力分配优化算法

综合考虑推进器耗电多少、推力分配是否均衡、设备不能超负荷运转等多项实际限制条件，本文搭建了适用于重载吊装工况的DP2系统动态推力最优分配模型。该模型会结合船舶当下的姿态偏移量和载荷干扰情况，合理分配每台推进器的输出推力，避免某一台推进器长时间满负荷工作。既能减少整套动力定位系统的整体能耗，又能让设备运行更平稳、延长使用年限，充分满足起重作业对船舶高精度定位的要求。

3.5 算法稳定性与收敛性验证

本文设置多种不同作业工况开展仿真对比试验，全面检验这套优化后的协同控制算法是否稳定、调节过程能否快速收敛。

试验数据显示，本文改进后的算法收敛更快，运行过程不会出现明显抖动；遇到载荷突然变化、海上风浪持续波动时，船体调节过程平缓，定位误差也更小。和传统控制算法相比，该算法更能适应各类复杂作业环境，抵御外界干扰的能力更强[4]。

4 DP2系统故障容错策略与安全作业管控优化

4.1 起重作业DP2系统典型故障模式分析（FMEA分析）

1.推进器故障、传感器失效等故障特征。海上起重作业过程中，DP2系统的高频故障主要包括推进器动力不足、转速异常、机械卡滞，以及位置与姿态传感器数据漂移、信号中断、设备失效等类型。其中，推进器故障会直接导致全船推力输出失衡，引发船体持续性偏移；传感器故障会造成系统无法精准判断船舶实时状态，出现调控逻辑错乱的问题，对动力定位效果造成直接负面影响[5]。

2.重载工况下系统故障演化规律。船舶进行重载起重作业时，DP2系统各类设备的运行负荷会急剧增大，设备出现故障的概率也随之大幅提升。如果设备出现轻微故障却没能及时检测和处理，船舶的定位偏差会不断扩大，最终造成整个调控系统失效。同时，复杂多变的海上环境会加速故障恶化，极易引发吊装碰撞、设备损毁等各类安全事故。

4.2 DP2分级冗余容错控制策略设计

依据故障影响、定位偏移及作业风险建立故障分级准则，将传感器小幅漂移、单推进器轻微出力异常划为轻故障，该类故障扰动较小、风险可控；核心传感器失效、多推进器及主控设备故障归为重故障，易造成定位失效，安全隐患突出。针对两级故障差异化设计容错方案：轻故障依托数据校正与推力微调实现容错，可不中断吊装作业；重故障立即切换备用设备、重构推力分配，保障定位持续稳定，防范吊装碰撞事故。

4.3 起重作业DP2安全作业阈值体系构建

结合仿真与实船经验，量化不同海况、吊重下的定位精度阈值，区分常规、重载、恶劣海况吊装误差标准，并对吊具对位、空中稳钩、落货等关键工序设置分级精度指标，形成现场量化管控依据。依托极限工况仿真确定DP2故障耐受边界，明确多设备失效、大风浪、超载吊装等作业禁止临界条件，并嵌入控制系统，实现风险预判、约束超限操作，提升海上起重作业安全性与规范性[6]。

5 结束语

本文针对起重船DP2动力定位系统适应性、抗扰及容错能力不足的问题，分析船—吊耦合扰动并建立多场耦合动力学模型，融合LSTM载荷预测优化模糊PID控制与推力分配策略，构建分级容错体系并设置安全作业阈值。仿真显示，优化系统可满足复杂海况重载作业需求，定位精度、动态响应与容错性能显著提升，弥补传统系统缺陷，为海上起重作业提供技术支撑。后续结合实船数据迭代算法，强化极端工况适应性能。

参考文献

[1]国世乾,陈梦,何沁园,等.DP-2起重船的电力系统特点分析[J].船舶,2021,32(5):65-70.

[2]赵洋洋.4000t全回转起重船总体布置设计[J].广东造船,2024,43(3):27-30.

[3]骆寒冰,龙禹,屈湛博,等.动力定位起重船吊装海洋平台组块耦合运动响应模拟[J].中国造船,2022,63(6):88-100.

[4]耿骏杰,孟帅.基于BAS的模糊PID解耦算法在船舶动力定位中的应用[J].舰船科学技术,2024,46(6):13-19.

[5]周喜宁,褚继壮,彭方华.3000t全回转起重船动力定位能力分析[J].船海工程,2023,52(4):127-131.

[6]金晔,张吉海.基于DP-2的5000t全回转起重船动力定位控制系统研究[J].船舶物资与市场,2025,33(10):52-54.

（本文编辑 曹 阳）

