

基于大数据的海上风电运维船舶智能管理系统

杨砚成

华电科工股份有限公司 广东 广州 510700

摘要：海上风电运维船舶管理面临海况复杂、调度频繁、设备维护难度大等现实挑战，传统管理手段已难以满足高效运维需求。本文围绕数据架构、智能调度、设备健康管理与平台集成四个维度，构建基于大数据的运维船舶智能管理系统。多源数据融合与感知终端部署奠定了数据基础，智能航线规划与多船协同调度提升了航行管控效率，预测性维护模型与备件智能管理强化了设备保障能力，微服务平台与可视化界面则为综合决策提供了支撑。各模块协同运作，推动运维船舶管理向数据驱动与智能决策方向持续演进。

关键词：海上风电；运维船舶；大数据；智能管理；预测性维护

引言：海上风电装机规模持续扩大，运维船舶作为连接陆地与风电场的关键载体，承担人员转运、设备检修与物资补给等多重任务。海洋环境瞬息万变，船舶调度需兼顾安全与效率，设备故障则直接影响发电收益。大数据技术为船舶管理提供了新思路，通过汇聚多源运行数据、挖掘设备状态规律，可实现调度优化与故障预判。构建以大数据为支撑的智能管理系统，已成为提升海上风电运维水平的重要途径。

1 运维船舶智能管理数据架构与感知体系构建

1.1 多源异构数据采集与融合框架设计

海上风电运维船舶智能管理涉及船舶自有传感器、风电场监测设备、气象观测站等多类数据源，各源数据在格式、频率、精度等维度存在显著差异，构建统一融合框架是实现数据驱动管理的前提^[1]。框架设计采用分层解耦思路，底层负责各类原始数据的接入与格式转换，中间层执行数据对齐与时间戳统一操作，上层提供标准化数据接口供调度、安全、设备管理等业务模块调用。异构数据融合过程中需处理采样频率不一致的问题，高频船舶运行数据与低频气象数据通过插值与降采样策略实现时间维度匹配，空间维度则依托统一坐标参考系完成位置信息关联。融合框架还需预留扩展接口，便于后续接入新增传感器或第三方数据服务。

1.2 船舶运行状态感知终端部署方案

感知终端的部署需围绕船舶动力系统、导航系统、甲板作业设备三大区域展开，动力系统区域重点布设发动机转速、油温、油压、振动等参数采集节点，导航系统区域配置GPS定位模块与电子罗盘，甲板作业区域安装载荷传感器与视频监控设备。终端选型需满足IP67以上防护等级，能够在高盐雾、强振动的海洋环境中长期稳定运行。各采集节点通过船内局域网汇聚至边缘计算网

关，网关对数据进行初步过滤与压缩后上传至岸基管理平台。终端部署密度需结合船舶关键设备分布与故障高发部位进行差异化配置，动力舱等高风险区域的采集点密度应高于生活区等低风险区域。

1.3 海洋气象与海浪数据实时接入机制

海洋气象与海浪数据是运维船舶调度决策的重要外部输入，实时接入机制需对接国家海洋预报中心及商业气象数据服务商的数据推送接口。海浪有效波高、平均周期、涌浪方向等参数持续同步录入管理系统，风速、风向、能见度等气象要素的更新频率不低于1h一次。数据接入层设置阈值校验逻辑，对明显超出物理合理范围的异常值进行标记与剔除，避免错误数据干扰后续分析。接入机制还需支持多源数据交叉比对，当不同气象服务商提供的同一海域数据出现较大偏差时，系统自动触发告警并选取置信度较高的数据源作为调度依据。

1.4 数据传输网络拓扑与通信协议优化

船舶与岸基之间的数据传输依托4G、5G公网与卫星通信链路构建双冗余网络拓扑，近海区域以公网传输为主，远海区域自动切换至卫星链路保障通信连续性。船内网络采用星型拓扑结构，边缘网关作为汇聚节点连接各感知终端与甲板设备。通信协议优化方面，船岸传输采用MQTT轻量级消息协议降低带宽占用，船内设备间通信采用CAN总线与Modbus协议保障实时性。协议栈针对海洋环境下的高丢包率进行了重传机制增强，关键安全数据设置最高优先级传输通道，确保碰撞预警、人员落水等紧急信息在网络拥塞状态下仍能优先送达。

2 船舶智能调度与航行安全管控

2.1 基于大数据的航线智能规划算法

航线规划算法以历史航行数据、实时气象海浪条件与船舶性能参数作为输入变量，通过多目标优化模型求

解能耗最低且耗时最短的航行路径。算法在构建过程中引入遗传算法与粒子群优化的混合策略,对船舶在不同海况下的阻力特性进行迭代计算,从而输出适应风浪等级变化的动态航线。规划模块将气象窗口期作为硬性约束条件纳入求解空间,当预报海况超过船舶作业允许阈值时,算法自动触发路径重规划并向驾驶台推送备选方案。路径生成还需考虑风电场机位分布与登靠顺序,将多个作业点串联为单向闭环航线以减少无效航程。算法运行结果以电子海图叠加形式呈现,标注各航段预计耗时与燃料消耗,供调度人员比选决策。

2.2 船舶轨迹实时监控与电子围栏预警

轨迹监控模块依托AIS与北斗双模定位数据源,以不低于每30秒一次的频率刷新船舶经纬度坐标并在电子海图上绘制实时航迹^[2]。电子围栏依据风电场边界、航道分隔带与禁航区域划定多级警戒范围,船舶进入一级警戒区时系统向驾驶台发出声光提示,穿越二级警戒线则立即向岸基管理平台推送告警信息并锁定船舶当前位置。围栏参数支持按气象等级动态调整,大风天气下警戒范围自动外扩以预留安全裕度。轨迹数据还被用于回溯分析船舶偏航行为,对频繁偏离既定航线的船舶标记为重点关注对象并纳入后续调度优化的数据源。

2.3 多船协同调度与资源动态分配策略

多船协同调度以风电场检修计划与气象可作业窗口为驱动,将运维船舶、交通船、抛锚船等不同船型纳入统一排程模型。资源分配策略采用滚动时域优化方法,每隔4小时根据最新气象预报与船舶在途状态重新计算各船任务序列,确保高优先级检修任务优先获得船舶资源。当多艘船舶同时申请进入同一机位作业时,调度模型依据船舶载员数量、吊机吨位与到港时间进行加权排序,输出最优编队方案。资源分配结果通过船岸通信链路下发至各船驾驶台,船舶执行过程中若遇突发海况变化,调度中心可远程调整任务分配并重新编排后续作业顺序。

2.4 通航安全风险识别与应急响应联动

通航安全风险识别模块融合雷达回波数据、AIS船位信息与电子海图水域特征,对航线周边船舶动态进行持续扫描与碰撞风险等级判定。当两船最近会遇距离小于安全阈值时,系统自动计算碰撞危险度并向双方驾驶台发出避让建议^[3]。应急响应联动机制将碰撞预警、人员落水、主机故障等紧急事件映射为标准化处置流程,触发后自动调取事发海域最近船舶作为救援力量并向海事主管部门推送事件信息。各应急预案与船舶当前载员状态、海况条件关联匹配,确保推送的处置方案具备现场

可执行性。

3 船舶设备健康管理 with 预测性维护

3.1 关键设备运行参数在线监测体系

船舶关键设备涵盖主机、齿轮箱、发电机、吊机及推进器等,在线监测体系依托振动传感器、温度探头、压力变送器与油液分析仪搭建感知层级,持续采集各类设备日常运行工况相关数据。振动监测节点布设于主机轴承座与齿轮箱壳体,采样频率设定为2000Hz以上,精准捕捉设备早期部件剥落以及齿轮磨损形成的特征频率。油液分析模块定期抽取润滑油样本,依靠铁谱与光谱分析手段判定油液内部金属磨粒含量以及油品老化变质程度。所有监测数据经由船内边缘计算节点完成前置处理后上传至岸基操作平台,平台选用时序数据库存储数据,方便高频监测信号快速调取与全过程状态复盘。

3.2 设备故障特征提取与智能诊断模型

故障特征提取从振动信号中分离出时域统计量与频域峰值分量,结合小波包分解方法捕捉瞬态冲击特征。智能诊断模型采用长短时记忆网络与卷积神经网络的组合架构,以历史故障样本作为训练数据,模型输入为多维特征向量,输出为设备健康等级与故障类型概率。模型训练过程中引入迁移学习策略,利用相似船型的故障数据扩充训练集以提升诊断精度。诊断结果以红黄绿三色健康指数呈现,当某一部件健康指数连续3个监测周期呈下降趋势时,系统自动生成预警工单并推送至维修管理模块。

3.3 备件库存智能管理与消耗预测

备件库存管理依托设备故障预测结果与历史消耗记录,建立动态安全库存模型。消耗预测模块以设备运行时长、工况负荷与历史故障率为输入变量,通过回归分析方法估算未来30天内各型号备件的需求量。库存系统设置最低库存阈值与最高库存上限,当某一备件库存量低于阈值时自动触发采购申请,高于上限时暂停补货以避免资金占用。备件出入库记录与设备维修工单关联绑定,实现从领用到安装的全链路追溯。库存数据按船型与设备类别分类统计,为船队层面的备件调配提供决策依据。

3.4 维修计划自动生成与全流程闭环管控

维修计划生成模块整合设备健康诊断结果、备件库存状态与气象可作业窗口,自动编排未来7天的维修任务序列。计划编排遵循优先级规则,安全相关设备故障优先于一般性维护,停机维修优先安排在气象窗口期内以减少对航运计划的干扰^[4]。维修工单下达后,执行人员通过手持终端接收任务并反馈维修进度,维修完成后需上

传维修记录与设备复测数据。管理平台对工单执行情况进行跟踪,未按期完成的工单自动升级并通知相关责任人。全部维修数据回流至故障诊断模型用于迭代优化,形成从监测到诊断再到维修的完整闭环。

4 智能管理平台集成与持续优化

4.1 大数据分析平台功能模块集成设计

大数据分析平台采用微服务架构将船舶监控、智能调度、设备运维、安全预警等功能模块解耦部署,各模块通过统一消息总线实现数据交互与指令传递。数据存储层选用分布式数据库与时序数据库的混合方案,结构化业务数据存入关系型数据库,船舶传感器产生的高频时序数据则由时序数据库承接。平台集成设计遵循低耦合高内聚原则,新增业务模块仅需接入消息总线即可完成注册,无需对既有模块进行改动。计算资源依托容器化技术实现弹性伸缩,当多船集中回传数据导致处理压力骤增时,平台自动扩容计算节点以保障分析任务的按时交付。

4.2 可视化综合监管界面与决策支持

综合监管界面以电子海图为底图,叠加船舶实时位置、航线规划、气象场分布与设备健康状态等多维信息,形成一张图式的全局态势感知视图。界面设计支持多屏联动,岸基指挥中心的大屏展示全局调度态势,各船驾驶台的终端则聚焦本船周围海域的局部信息。决策支持模块内置多方案比选工具,当调度人员需要调整航行计划时,系统自动列出备选航线并标注各方案在耗时、油耗与安全裕度三个维度的量化指标。关键操作需经二次确认方可执行,防止误触导致的指令错误下发。

4.3 人员资质动态核验与培训管理

人员资质管理模块接入海事主管部门的船员证书数据库,对运维船舶上所有持证人员的证书有效期、准操航区与体检状态实施动态核验。当某一船员的证书即将到期或体检报告超过规定时限,系统自动向船舶管理方与船员本人推送提醒通知。培训管理功能依据船员岗位职责与历史操作记录生成个性化培训计划,针对频繁触

发安全告警的船员增设专项培训课程。培训完成情况与考核成绩记录在个人档案中,作为后续派船与岗位调整的重要依据。

4.4 系统升级与运维数据反馈机制

系统升级采用灰度发布策略,新版本功能先在部分船舶上线运行,经一周观测确认无异常后再向全船队推广^[5]。运维数据反馈机制将船舶日常操作中产生的告警记录、人工干预日志与用户修改记录统一汇聚至数据湖,算法团队定期从反馈数据中挖掘模型偏差与功能缺陷。反馈结果驱动调度算法、故障诊断模型与界面交互逻辑的迭代优化,每季度发布一次版本更新包。版本更新内容包含性能改进与新增功能两部分,更新部署安排在气象窗口期内执行以避免对正常作业造成干扰。

结束语

基于大数据的海上风电运维船舶智能管理系统已形成数据感知、智能调度、健康管理与平台集成四位一体的技术架构。多源数据融合与感知终端部署为管理决策提供了可靠数据支撑,智能航线规划与多船协同调度有效提升了航行安全与作业效率,预测性维护与备件智能管理降低了设备非计划停机风险,微服务平台与可视化界面则增强了综合管控与决策能力。各模块紧密衔接、协同运作,共同推动运维船舶管理向精细化与智能化方向迈进。

参考文献

- [1]李亚平,鹿重阳.基于大数据的海上风电运维船舶智能管理系统[J].船舶物资与市场,2022,30(3):10-12.
- [2]林烁.基于大数据的海上风电运维船舶智能管理系统[J].船舶物资与市场,2021,29(9):19-20.
- [3]黄国滨.海上风电场智慧运维的研究及大数据应用[J].能源与环境,2025(2):73-75.
- [4]朱玲芬.基于大数据的海上风电运维船舶智能调度研究[J].科技视界,2026,16(1):30-32.
- [5]王丽媛,郭树生,安吉祥.基于枚举法的海上风电智能运维调度模型[J].船舶工程,2022,44(2):28-34.