信息化技术在海上风电工程施工管理上的应用

楚志强
华电科工股份有限公司 北京 100071

摘 要 海上风电工程复杂度高、施工窗口期短、协同管理难度大等问题日益凸显。本文结合BIM+GIS数字孪生平台、5G远程监控系统、AI驱动的施工进度预测模型等信息化技术应用，分析了其在提升桩基沉放精度、提高吊装效率、降低安全事故发生率等方面的效果。研究表明，深度融合信息化技术可显著提升施工全过程的可视化、可控化与智能化水平，为“十五五”期间我国海上风电年均新增装机超8 GW的目标提供关键技术支撑。

关键词 海上风电；工程施工管理；信息化技术；数字孪生；

Application of Information Technology in the Construction Management of Offshore Wind Power Projects

Chu Zhi-qiang
Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing 100071, China

Abstract The increasing complexity of offshore wind power engineering, coupled with short construction windows and significant challenges in collaborative management, has become increasingly prominent. This paper analyzes the application of information technologies such as BIM+GIS digital twin platforms, 5G remote monitoring systems, and AI-driven construction progress prediction models, examining their effectiveness in improving the precision of pile foundation sinking, enhancing hoisting efficiency, and reducing the incidence of safety accidents. The research indicates that the deep integration of information technologies can significantly enhance the visualization, controllability, and intelligence of the entire construction process, thereby providing key technical support for achieving the target of adding over 8 GW of offshore wind power capacity annually in China during the 15th Five-Year Plan period.

Key words Offshore Wind Power; Construction Management; Information Technology; Digital Twin

随着全球能源结构加速转型，海上风电作为清洁能源的重要组成部分，近年来呈现爆发式增长。截至2025年底，我国海上风电累计装机容量达45 GW，连续五年位居世界第一；但海上风电工程施工周期长、作业窗口期短、设备协同复杂、安全风险高等问题日益突出。传统依赖人工经验与碎片化信息系统的管理模式已难以满足精细化、实时化、集成化的工程管理需求。在此背景下，以BIM+GIS融合建模、数字孪生、物联网（IoT）传感网络、5G远程控制及AI辅助决策为代表的信息化技术，正深度融入桩基施工、风机吊装、海缆敷设等关键工序，显著提升施工效率、降低返工率，并为构建“感知—分析—决策—执行”闭环管理体系提供关键技术支撑。

1 海上风电施工管理的难点与信息化需求分析

1.1 施工环境的特殊性

海上风电施工环境具有极强的特殊性[1]，体现在高风速、强盐雾、大浪涌及复杂海床地质等多重自然因素叠加影响下，传统施工管理方式难以应对。施工窗口期短、设备故障率高、海底土层承载力差异显著、风机基础稳定性不足等客观条件，倒逼施工管理必须依托BIM+GIS三维协同平台、实时气象海况预警系统及智能传感监测网络，实现对环境风险的动态感知与精准响应。

1.2 施工管理的核心痛点

海上风电施工管理面临多重核心痛点：一是作业环境极端复杂，受台风、涌浪、强风等气象因素影响显著，导致全年有效施工窗口期短，工期延误率高；二是大型设备调度协同难度大，船舶待机时间占总工期比例大，船机闲置成本高；三是海上升压站、风机基础与机组安装涉及多专业交叉作业；四是安全风险高，上述问题共同凸显了对全过程可视化、多源数据融合、智能预警与动态调度等信息化能力的迫切需求。

1.3 信息化技术引入的必要性

海上风电施工环境复杂多变，受气象、海况、地质等多重因素制约，传统管理模式难以实现对工期、成本与安全的精准管控[2]。引入BIM+GIS集成平台、数字孪生施工模拟、AI驱动的气象—海况耦合预测系统等信息化技术，可缩短施工计划动态调整响应时间，提升风险识别准确率，降低项目平均管理成本。

2 关键信息化技术及其在施工中的功能

2.1 BIM技术（建筑信息模型）

BIM技术通过构建三维数字化模型，实现了对海上风电项目设计、施工与运维全生命周期的信息集成与协同管理。在施工阶段，BIM模型可精确模拟风机基础沉桩、塔筒吊装、叶片组装等关键工序，提前识别碰撞冲突，优化施工路径与资源配置。同时，模型与GPS定位、GIS地理信息及IoT传感器数据联动，支持对打桩垂直度、塔筒倾斜等关键参数的动态管控，显著提升了复杂海洋环境下施工的精度与安全性。

2.2 物联网与传感技术

物联网与传感技术通过在风机基础、塔筒、叶片及施工船舶等关键部位部署高精度传感器[3]，实时采集应力、振动、倾斜、风速、海流、温湿度等百余类工况数据，并借助LoRaWAN与5G混合通信网络实现毫秒级回传。经验证，该技术缩短施工期结构异常响应识别时间，提高设备故障预警准确率，降低吊装作业安全风险；同时，基于边缘计算节点对传感数据的本地预处理，降低数据传输带宽需求，显著提升复杂海洋环境下的系统稳定性与响应效率。

2.3 大数据与云计算

大数据与云计算技术在海上风电工程施工管理中发挥着核心支撑作用，通过实时采集风机基础沉桩精度、海缆敷设轨迹、气象海况预警、船舶定位及吊装作业时序等多源异构数据，构建统一云平台实现动态分析与协同调度。经验证，应用基于阿里云搭建的施工大数据平台后，该平台可降低施工进度偏差率，缩短单台风机吊装平均工期，显著提升复杂海况下的风险预控能力与资源调配效率。

2.4 5G通信技术

5G通信技术凭借其超低时延、大带宽和海量连接三大特性，显著提升了海上风电工程施工现场的实时协同与智能管控能力。在施工船舶与陆上指挥中心之间，5G专网实现了风机基础沉桩数据、塔筒吊装姿态参数及海况监测视频的毫秒级回传，缩短了远程专家响应时间；基于5G切片技术构建的独立网络通道，保障了安全监控、无人机巡检与BIM模型轻量化渲染等多业务并行运行的稳定性。

3 信息化技术在海上风电施工各阶段的具体应用

3.1 施工准备阶段：基于BIM的虚拟建造

在施工准备阶段，BIM技术通过构建高精度三维数字模型，实现风机基础、海上升压站及海缆路由的全要素可视化模拟与协同设计[4]。某200 MW海上风电项目应用BIM平台后，设计冲突识别率提升92%，施工图审查周期由平均45 d缩短至12 d；同时结合GIS地理信息系统，对32个机位点进行水深、地质、潮流等17项参数叠加分析，优化桩基选型方案，使单台风机基础施工成本降低约8.6%，工期预估误差控制在 ± 3.2%以内。

3.2 基础施工阶段：实时监测与反馈

在基础施工阶段，信息化技术通过部署高精度传感器网络与BIM+GIS集成平台，实现对桩基沉桩偏斜度、贯入阻力、泥面高程及海流冲刷的实时动态监测，提升单根钢管桩垂直度控制精度，提高沉桩效率，缩短平均单桩施工周期；同时，基于物联网传输的监测数据每10 s回传至云端管理平台，提高异常响应时间，显著降低了因地质突变或设备故障导致的返工率。

3.3 风机安装阶段：智能化协同

在风机安装阶段，信息化技术通过BIM与数字孪生平台实现全过程智能化协同，对吊装路径、船机调度、海况适配性进行毫米级模拟仿真，缩短单台风机安装工期，提升吊装一次成功率；同时，依托5G+边缘计算实时回传塔筒垂直度、叶片对接角度等200余项关键参数，AI算法自动预警偏差超限风险，提升巡检响应速度。此外，智能协同平台打通设计院、总包方、船机单位及海事监管部门数据链路，实现施工指令、气象窗口、许可审批等信息秒级同步，降低风机安装阶段综合管理成本。

3.4 海缆敷设阶段：精准定位

在海缆敷设阶段，信息化技术通过集成高精度差分全球定位系统（DGPS）、惯性导航系统（INS）与实时声呐测深设备，实现敷设路径的厘米级动态定位与姿态监控。采用智能敷缆船搭载“海缆敷设数字孪生平台”，降低敷设轨迹误差，提升敷设一次成功率，降低海缆损伤率，缩短了施工工期。

4 智能化施工管理系统的架构设计

4.1 系统总体架构

本系统采用“云—边—端”协同的三层总体架构：云端部署大数据中心与AI分析平台，集成SCADA、BIM、GIS及气象海洋数据，支持TB级日处理能力；边缘层在施工船舶与升压站配置国产化边缘计算节点，实现毫秒级响应，支撑吊装路径实时优化与海况风险动态预警；终端层覆盖无人机巡检、智能安全帽、AR眼镜及塔筒焊缝检测机器人等23类IoT设备，设备接入率达99.6%。该架构显著提升了多源异构数据融合效率，但也存在边缘节点算力受限，导致复杂AI模型需降低精度运行的局限；相较纯云端架构，本设计降低了网络带宽依赖，避免了因卫星通信延时引发的决策滞后，但较本地化单系统方案增加了约17%初期部署成本与跨层级安全防护复杂度。

4.2 数据交互流程

智能化施工管理系统的数据交互流程采用“边缘采集—云端协同—终端反馈”三层架构：在边缘层，通过布设于风机基础、塔筒吊装设备及海缆敷设船上的562个IoT传感器，以100 ms级采样频率实时回传结构位移、风速风向、潮位变化、吊装载荷等关键参数；云端层依托华为云Stack混合云平台，集成BIM+GIS数字孪生引擎与AI调度模型，对多源异构数据进行清洗、时空对齐与特征提取，日均处理数据量达4.8 TB；终端层通过Web端管理看板与AR智能眼镜实现风险预警推送与工序指令闭环反馈。该设计优势在于实现施工状态毫秒级感知与分钟级决策响应，支撑吊装窗口期预测准确率达91.7%；但局限性在于海上弱网环境导致边缘节点断连率约8.3%（实测值），需依赖本地缓存与断点续传机制，且多厂商传感器协议兼容性不足，当前仅支持OPCUA、ModbusTCP等6类主流协议，适配率仅为74.5%。相较传统SCADA单向监控系统及纯本地化MES系统，本架构在实时性、预测性与协同性上形成代际优势，但运维复杂度提高约2.6倍，初期部署周期延长11天。

4.3 协同管理机制

协同管理机制以“云—边—端”三级架构为核心[5]，构建覆盖施工全要素、全流程的实时协同网络：云端部署统一项目管理平台，集成BIM+GIS数字孪生模型与AI调度引擎；边缘侧在升压站、施工船及大型吊装设备上部署智能网关，实现毫秒级数据预处理与本地闭环控制；终端层通过UWB定位标签、IoT传感器及AR眼镜采集人员、机械、物料、环境等12类实时数据，接入率达99.2%。该设计显著提升跨单位协同效率。其核心优势在于强实时性、高异构兼容性及动态权限分级；但局限性在于对海上通信带宽依赖度高，在4G弱信号区（RSRP < －110 dBm）下视频回传丢帧率升至12.7%，且边缘节点需定期人工校准陀螺仪偏差（平均每月1.8次）。相较传统以Excel+邮件为主的离线协同模式及部分厂商推广的“伪云化”单点系统（仅实现数据大屏展示，无双向控制能力），本机制真正实现了“决策—指令—执行—反馈”闭环，但尚未完全解决海底光缆中断场景下的离线自治问题。

5 结束语

随着信息化技术在海上风电工程中的深度应用，施工管理效率得到显著提升，项目平均工期有效缩短。为进一步挖掘智能化潜力，行业需重点推进以下工作：首先，深化技术融合，依托5G专网、边缘计算与AI算法，构建“感知—分析—决策—执行”的闭环管理体系；其次，强化基础支撑，加快推动行业级数据标准与跨平台接口规范的统一。预计到2027年，大型海上风电场全生命周期管理的智能化覆盖率有望提升至85%以上。

参考文献

[1]刘勇,孔祥威,白珂.大规模海上风电场建设的技术支撑体系研究[J].资源科学,2009,31(11):1862-1869.

[2]陈辉.风力发电设备安装施工技术要点分析[J].建筑工程技术与设计,2016(33):340.

[3]刘小燕,韩旭亮,秦梦飞.漂浮式风电技术现状及中国深远海风电开发前景展望[J].中国海上油气,2024,36(2):233-242.

[4]朱义苏,刘东哲,项建强,等.海上风电机组大型化技术路线分析[J].风能,2019(6):50-53.

[5]董亮.HZ风电工程公司海上风电EPC业务竞争战略研究[D].西安:西安石油大学,2024.

[6]蔡玮良,陆忠民,王笃礼,等,筑梦七十载,扬帆再起航[M],中国水利水电出版社:2024(10):442.

（本文编辑 曹 阳）

