

DOI: 10.7672/sgjs2026010024

基于多源感知与智能预警的风机吊装智慧 监测系统设计与应用*

孙伟, 张伟荣, 田发嵘, 田贺

(中电建新能源集团股份有限公司新疆分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

[摘要] 风机吊装作业是风电项目建设中的关键环节,传统吊装管理多依赖人工经验,存在安全隐患且效率较低。为提升吊装作业的智能化水平,设计并实现了一套面向风机吊装全过程的智慧监测与预警系统。通过集成风速、吊装角度、设备状态等多源感知数据,结合人工智能和大数据分析,实现了吊装作业的实时监控、风险预警与智能化决策支持。该系统部署在托克逊县风电项目,取得了显著的效果,提升了作业安全性、施工效率和现场管理水平。系统集成了无人机巡检功能,打破了传统管理模式,优化了施工现场的信息流通与决策响应。

[关键词] 风电; 吊装; 监测; 预警; 多源感知; 大数据分析; 人工智能

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0024-05

Design and Application of Intelligent Monitoring System for Wind Turbine Hoisting Based on Multi-source Perception and Intelligent Warning

SUN Wei, ZHANG Weirong, TIAN Farong, TIAN He

(Xinjiang Branch of PowerChina Renewable Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: Wind turbine hoisting is a critical phase in wind power project construction. Traditional hoisting management relies heavily on manual experience, which poses significant safety risks and efficiency limitations. To enhance the intelligence level of hoisting operations, this paper designs and implements a smart monitoring and early warning system covering the entire hoisting process. By integrating multi-source sensing data, such as wind speed, hoisting angle, and equipment status, with artificial intelligence and big data analytics, the system enables real-time monitoring, risk forecasting, and intelligent decision support. The system has been deployed in the wind power project in Tuokexun County, yielding notable results in improving operational safety, construction efficiency, and on-site management. Additionally, the system incorporates an embedded UAV inspection module, breaking away from traditional management models and enhancing information flow and decision responsiveness on the construction site. This paper presents the application outcomes of the system in wind power projects and discusses prospects for the future development of intelligent construction technologies in the wind energy sector.

Keywords: wind power; hoisting; monitoring; early warning; multi-source perception; big data analysis; artificial intelligence

0 引言

随着风电规模不断扩大,风机吊装因高空作业

集中、风险源复杂和环境变化剧烈等特点,已成为施工管理的薄弱环节。传统方式依赖人工巡查和经验判断,难以实现对关键风险的实时识别与连续监测,安全保障能力不足。

近年来虽有研究尝试应用 BIM 技术、无人机巡检及智能吊装等技术,但大多存在感知手段单一、

* 中电建新能源集团股份有限公司科研课题:风力发电机组吊装现场智慧监测预警系统

[作者简介] 孙伟,高级工程师,E-mail:sunwei08@powerchina.cn

[收稿日期] 2025-10-05

系统集成度不高、预警能力有限等问题,难以适应风机吊装的快速变化性与高风险特征。

针对上述不足,构建了一套面向吊装全过程的多源感知与智能预警系统,实现对风况变化、构件姿态和人员行为等关键状态的实时识别,并在托克逊县 100 万 kW 风电项目中完成工程化应用验证,取得良好效果。

1 工程概况

托克逊县 100 万 kW 风电项目位于新疆吐鲁番市北部戈壁区域,属于典型极端风速地区,历史极大风速超过 50m/s,对吊装安全影响显著。一期建设包含 32 台 8MW 与 23 台 11MW 机组,全部采用 IEC 超一类加强型机型,对施工窗口期与安全控制提出更高要求。项目建设中应用本文研发的吊装智慧监测系统,实现对塔筒、机舱等关键吊装工序的实时监测与风险预警,支撑了项目在恶劣气候条件下的安全推进。

2 系统总体架构设计

本系统围绕“多源感知-智能分析-可视化呈现”的总体思路构建架构体系^[1-8],通过集成传感器采集、AI 模型计算与三维展示技术,形成面向风机吊装全过程的智慧监管链条(见图 1)。系统架构主要包括数据采集、算法处理、数据传输、智能分析与展示交互 5 层,其层级结构如表 1 所示。

风机智慧吊装监测预警系统

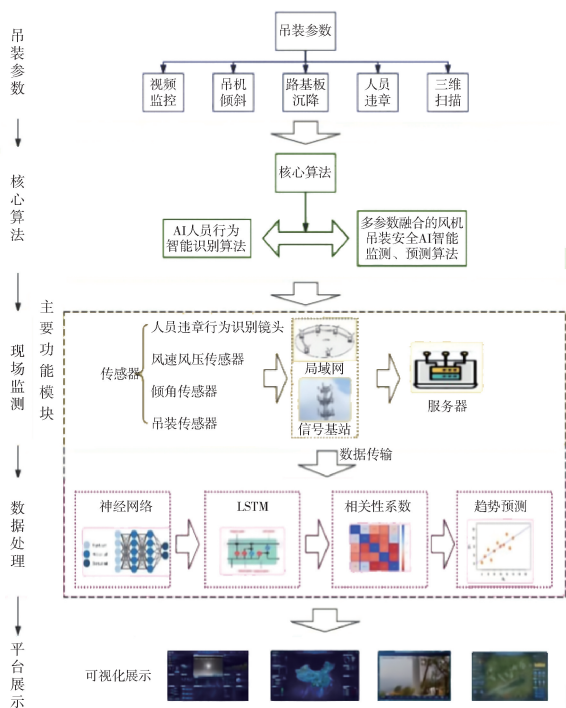


图 1 风机智慧吊装监测预警系统架构

Fig. 1 Intelligent hoisting monitoring and early warning system architecture for wind turbines

表 1 系统整体架构层级

Table 1 System overall architecture hierarchy

系统架构层	详情
数据采集层	通过风速、倾角、沉降、人员识别等多类传感器与视频终端,获取现场关键参数
算法处理层	内嵌 AI 行为识别与融合预测模型,实现对人员违规、设备异常的实时判断与风险推送
数据传输层	基于局域网与无线信号传输,构建边缘设备-服务器-平台的通信链路
智能分析层	引入神经网络与 LSTM 算法,对吊装数据进行趋势建模与异常预测
展示交互层	采用多级页面结构与三维建模,提升数据可视化深度与系统交互效率

在总体设计中,系统始终以吊装现场的工程需求为核心,通过高集成度的模块化设计,实现对风速、塔筒姿态、履带式起重机工况及人员行为等关键参数的统一采集并实时处理。相较于传统依赖单一风速或视频的监测方式,本系统通过时空同步机制实现多源异构数据的深度融合,有效提升了现场状态识别的完整性与准确性。

同时,系统构建了基于深度学习的智能预警算法体系,包括 LSTM 时序预测、CNN 行为识别及多特征阈值融合模型,可实现对风速突变趋势、构件姿态偏移和人员越界等风险的提前识别,相比传统阈值式报警可提升 8~15s 的预警提前量,实现由“事后响应”向“事前预控”转变。

在系统集成层面,平台采用“边缘设备-服务器-云端融合-分级展示”的架构,将无人机巡检、起重设备监测与三维吊装场景统一到同一平台,实现数据流、业务流与展示流的贯通,避免跨系统切换造成的信息割裂,增强了吊装监管的闭环能力。

2.1 核心功能模块设计

本系统面向风电吊装全过程作业,采用“多级页面+多维感知+智能预警”的设计思路,构建了清晰、高效的功能结构。平台共设四级页面,依次对应全国项目概览、单项目总览、风机作业详情与无人机巡检,支持从宏观到微观的监管需求,系统页面如表 2、图 2 所示。

2.2 无人机巡检系统集成设计

针对风电施工中对高空区域、狭窄工况与关键节点的可视化需求,系统将原独立运行的无人机巡检平台进行裁剪与重构,并与吊装监测系统深度融合,实现统一入口、统一风格与统一数据管理。

集成过程中遵循“结果导向、功能聚焦、交互简化”的原则,仅保留业主最关注的 3 类核心能力:实时巡检画面、历史任务媒体库与航线任务清单。用户可在单风机页面直接进入无人机模块,无需切换

表 2 系统页面功能
Table 2 System page function

系统页面	各页面功能
首页 (全国总览)	集成三维地图与数据面板,展示各区域项目分布、人员工种、起重设备与重大预警信息
二级页面 (项目概览页)	展示单项目内风机布置图,并叠加四色图层,标注风险源、评估等级与类型
三级页面 (施工详情页)	聚合视频监控、环境曲线、风机状态与作业人员信息,实现项目级多维监控
四级页面 (单风机监测页)	三维展示起吊过程,融合倾角、风速、视频等传感数据,识别异常操作并推送预警
五级页面 (无人机巡检页)	嵌入原独立系统,展示直播画面、历史媒体与任务清单,面向业主直观呈现成果

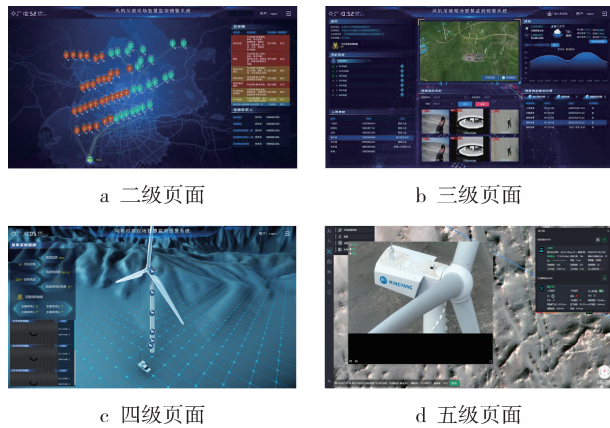


图 2 系统页面
Fig. 2 System page

平台或重新登录。该方式兼顾了无人机成果展示与系统整体的一体化体验,显著提升了平台的可用性与工程适配性。

3 算法流程与对比试验分析

为进一步验证本系统在风机吊装过程中的监测精度与预警性能,本研究通过算法机制、流程设计及工程化对比试验进行深入分析。本节在系统架构基础上,针对多源感知融合、智能识别预测及

风险分级预警等核心算法进行说明,并通过项目实测数据对比传统监控方式的性能差异,验证系统有效性与工程适用性。

3.1 多源感知与智能预警算法流程设计

风机吊装作业涉及风速、倾角、塔筒姿态、履带式起重机工况、人员行为及视频画面等多维异构数据。为实现跨设备、多模态数据的有效整合,本研究构建了涵盖数据预处理-特征融合-智能识别-风险判定-报警推送的完整算法流程,如图 3 所示。算法流程主要包括以下环节。

1) 数据采集与预处理

对风速、倾角、GPS、吊装工况参数及视频数据进行统一时间校准、异常值剔除与噪声滤波处理,保证数据的时效性与一致性。

2) 多源特征融合

通过空间映射(GIS 坐标绑定)与多模态编码,将风速梯度、姿态变化率、吊装轨迹偏移及人员行为特征进行融合,构建统一的场景特征向量,实现各类信息的共同表达。

3) 智能识别与趋势预测

引入 LSTM(long short-term memory)时序预测模型,对风速与倾角序列进行短时趋势预测,提前识别可能出现的姿态偏移和风速突增;通过 CNN(convolutional neural network)模型对视频画面进行行为识别,实现人员越界、违规靠近吊臂等事件的自动检测。

4) 风险综合判定与分级

构建基于风速风险、姿态风险与人员行为风险的复合风险模型,通过动态阈值实现对复杂场景的适应性判别,形成蓝、黄、橙、红四级预警等级。

5) 报警推送与闭环管理

系统在识别到风险后即时触发报警,并通过界



图 3 风机吊装智慧监测系统算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart of wind turbine hoisting intelligent monitoring system

面高亮、声光提醒与无人机辅助核查形成闭环管理机制。

3.2 核心算法机制分析

1) LSTM 时序预测模型

模型对风速与倾角序列进行短时预测, RMSE 为 0.18, 可提前 8~15s 识别突变趋势, 实现从“事后报警”向“事前预控”的转变。

2) CNN 行为识别模型

基于前端摄像头图像输入, 模型可识别人员越界、误入吊装旋转半径、错误指挥动作等典型行为, 识别准确率达 91%, 显著提升了复杂场景下的人员监管能力。

3) 复合风险判别模型

通过加权融合风速、姿态及人员行为风险, 实现更符合吊装场景特性的综合风险评估, 提升了系统对极端风速环境的响应性能。

3.3 对比试验设计

为验证本系统在风机吊装现场的监测可靠性与预警性能, 本文基于托克逊县风电项目施工期间的实际监测数据开展对比分析。系统自 2024 年 4 月投入运行以来持续记录吊装作业过程中的多源感知数据, 包括风速、塔筒倾角、履带式起重机工况参数、人员行为视频等动态信息, 共获得约 12 000 条有效数据。与此同时, 为构建传统监测方式的对照基准, 项目部提供了同期的现场监控录像、吊装作业记录及人工风险事件处置日志, 最终整理得到 214 条人工监测事件数据。

在此基础上, 研究团队从全部监测数据中选取 185 次完整吊装作业作为分析样本。为保证试验结果的客观性和一致性, 所有关键事件(包括风速突变、塔筒姿态偏移及人员越界等)均由技术人员基于视频逐帧回溯的方式进行人工标注, 最终获得 79 起经多次校核确认的真实事件, 用作试验中的“标准事件集”。系统的预警结果与该事件集逐一匹配, 用于计算预警准确率、漏报率与误报率等指标; 响应时间则通过对比系统发出预警的时间戳与视频中事件实际发生时刻获得; 吊装效率指标则基于同规格塔筒的拼装时长对比得到; 行为识别准确率则来源于 260 条人工标注的视频样本与模型预测标签的一致性统计。

上述数据构成了本文性能分析的完整样本体系, 通过多源监测数据、人工标注事件集与管理日志的联合使用, 确保了试验结果的可靠性与工程适用性。

3.4 性能对比结果

传统监控方式与本文系统性能对比如表 3 所示。总体来看, 本系统在预警准确性、响应速度及现场干预能力等方面均显著优于传统方式。

表 3 传统监控方式与本文系统性能对比

Table 3 Comparison of performance between traditional monitoring methods and the system in this paper

指标	传统监测方式	本文系统	性能变化
预警准确率	63.20%	91.30%	↑ 28.1%
漏报率	22.50%	6.40%	↓ 16.1%
误报率	14.30%	8.10%	↓ 6.2%
平均响应时间	8~12s	1.8s	↓ 70~78%
吊装效率 (塔筒拼装阶段)	—	—	↑ 12.4%
风险干预率	4.70%	15.80%	↑ 340%
人员越界识别 准确率	68%	92%	↑ 24%
风速突增提前 识别能力	无预测能力	8~15s 预测窗口	—

结果表明, 本系统在风机吊装高风险作业场景下具有显著的工程优势, 尤其在风险提前识别、智能行为判别及现场快速响应方面表现突出, 有效提升了吊装作业的安全保障能力与管理效率。

4 工程应用

本系统已在托克逊县 100 万 kW 风电项目中完成工程化部署, 覆盖塔筒、机舱及叶片等关键吊装工序, 实现了基于多源数据的实时监测和分级预警。项目现场共布设多类传感器终端、视频采集设备及 10 台履带式起重机的数据采集模块, 并通过局域网实现现场数据的稳定上传。平台能够同步展示吊装工况、风速变化、姿态偏移等关键信息, 支撑远程协同指挥。系统在工程应用中呈现出四方面成效。

1) 状态感知全面化: 吊装设备工况、风况曲线及塔筒拼装状态实现在线呈现, 显著提高了现场透明度。

2) 风险识别及时化: 系统可在风速突变、倾角异常和人员越界等情形触发快速预警, 并与视频联动定位事件。

3) 视频协同直观化: 监控画面与三维模型绑定, 支持违规画面抓拍与智能回放, 提高了判断效率。

4) 巡检融合一体化: 无人机模块嵌入后, 可在同一平台查看实时航拍与历史成果, 减少跨系统操作。

为评估系统性能, 对 185 次完整吊装记录进行了统计分析, 并与传统人工监控方式进行对比。结

果表明:系统在三类关键事件(风速突变、倾角异常、人员越界)上的平均预警准确率达91.3%,较人工监控提升28.1%;受益于边缘计算,本系统预警响应时间为1.8s,较人工发现风险缩短70%以上;在塔筒拼装阶段,依托数据共享与无人机辅助,平均作业时间缩短12.4%;系统月均60条预警中有14%~18%引发现场纠偏,干预率远高于传统方式(不足5%)。

上述结果验证了系统在高风速区域风机吊装任务中的工程适用性和风险控制价值。

5 结语

本文提出的风电吊装智慧监测预警系统,通过多源感知、智能分析与三维可视化集成设计,实现了对吊装全过程的实时监控与风险前置预警。在托克逊县风电项目的工程应用表明,该系统能够显著提升吊装作业的安全性、效率与管理透明度,促进施工单位由传统人工监管向智能化、可视化的数字管理模式转型。

尽管系统已取得良好效果,但仍需在数据精度提升、模型泛化能力优化及跨系统适配等方面进一步研究。未来将结合更大规模工程数据和先进智能算法,持续提升系统的可扩展性与适用于更复杂风电场景的能力。

参考文献:

- [1] 葛冬冬,张文慧,吕松涛,等.智慧道路设计建造运维中的数字化技术综述[J].中国公路学报,2024,37(12):294-309.
GE D D,ZHANG W H,LÜ S T, et al. Digital technology in smart road design, construction, and maintenance: a review [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(12): 294-309.
- [2] 谭任深,戚永乐,周冰,等.5G定制网技术在海上风电场智慧管理与生态环境监测中的应用实践[J].南方能源建设,

2024,11(4):65-75.

TAN R S, QI Y L, ZHOU B, et al. Application practice of 5G customized network technology in intelligent management and ecological environment monitoring of offshore wind farm [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 65-75.

- [3] 高兴国,常增亮,李乐乐,等.海上风电安全智慧化监测系统设计与实现[J].水电与新能源,2024,38(5):1-4.

GAO X G, CHANG Z L, LI L L, et al. Design and realization of an offshore wind power intelligent safety monitoring system [J]. Hydropower and new energy, 2024, 38(5): 1-4.

- [4] 朱建成.“人工智能+”背景下的风力发电技术探析[J].电力设备管理,2024(24):129-131.

ZHU J C. Analysis of wind power generation technology under the background of “artificial intelligence +” [J]. Electric power equipment management, 2024(24): 129-131.

- [5] 方宁.风电机组智能振动监测系统研究[J].电气技术与经济,2025(3):156-158.

FANG N. Research on intelligent vibration monitoring system of wind turbine [J]. Electrical equipment and economy, 2025(3): 156-158.

- [6] 张晋辉.风力发电风资源数据分析处理研究[J].自动化应用,2024(19):77-80.

ZHANG J H. Research on data analysis and processing of wind resources in wind power generation [J]. Automation application, 2024(19): 77-80.

- [7] 余佳成,许志远.基于大数据分析的高比例分布式电源配电网故障定位方法[J].光源与照明,2024(7):69-71.

YU J C, XU Z Y. Fault location method of high proportion distributed power distribution network based on big data analysis [J]. Lamps & lighting, 2024(7): 69-71.

- [8] 李刚.陆上风电机组塔筒吊装施工监测技术[J].施工技术(中英文),2025,54(18):130-135.

LI G. Monitoring technology for tower hoisting construction of onshore wind turbine [J]. Construction technology, 2025, 54(18): 130-135.

(上接第16页)

参考文献:

- [1] 吴俊杰.基于SolidWorks二次开发的构架焊接自动化方案研究[D].北京:北京交通大学,2022.
WU J J. Research on frame welding automation scheme based on secondary development of SolidWorks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [2] 焦继军,曹睿,李义民,等.焊后热处理对Q690高强钢焊缝金属冲击韧性的影响[J].材料导报,2025,39(4):127-134.
JIAO J J, CAO R, LI Y M, et al. Effect of post-welding heat treatment on impact toughness of Q690 high strength steel welded metal [J]. Materials reports, 2025, 39(4): 127-134.
- [3] 杨增海.数字化装焊车间焊缝识别与参数自动下达技术[D].南京:南京理工大学,2017.
YANG Z H. Digital welding workshop seam recognition and parameter automatic issuing technology [D]. Nanjing: Nanjing

University of Science and Technology, 2017.

- [4] 姜永.建筑钢结构焊缝无损检测技术[J].施工技术(中英文),2024,53(3):137-140,161.

JIANG Y. Non-destructive testing technology for welding seams in building steel structures [J]. Construction technology, 2024, 53(3): 137-140, 161.

- [5] 殷树言,刘嘉.关于数字化焊机发展的几点思考[J].电焊机,2009,39(2):1-5.

YIN S Y, LIU J. Several ideals about the development of digital welding machine [J]. Electric welding machine, 2009, 39(2): 1-5.

- [6] 王克鸿,黄勇,孙勇,等.数字化焊接技术研究现状与趋势[J].机械制造与自动化,2015,44(5):1-6.

WANG K H, HUANG Y, SUN Y, et al. Research status and development of digital welding technology [J]. Machine building & automation, 2015, 44(5): 1-6.