

风力发电机组混塔安全监测的研究

王浩志 李嘉辉 朱峻锋

国投广西新能源发展有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 随着全球能源结构向清洁化转型, 风力发电装机容量持续攀升, 高塔架、大容量成为发展趋势。钢混组合塔架(混塔)凭借其结构优势在低风速区域广泛应用, 但其复杂工况下的安全风险日益凸显。本文系统剖析混塔结构特性与失效模式, 构建包含结构动力、预应力体系、混凝土健康等7大类23项参数的监测矩阵, 创新研发光纤光栅传感器、零频微震传感器等关键设备, 提出基于数字孪生的多源数据融合分析方法。通过建立三级预警体系与标准化认证流程, 实现混塔全生命周期安全管控。

关键词: 风力发电; 钢混塔架; 安全监测; 数字孪生; 光纤传感; 标准化

1 引言

全球能源转型加速, 截至2023年底全球风电累计装机规模突破1.2TW, 中国以456GW连续13年居首, 在“双碳”目标下风电开发向低风速区延伸, 160米以上高塔架机组占比大幅上升, 钢混组合塔架(混塔)成主流, 装机容量占比超65%。但混塔超160米时面临风剪切效应使结构动力响应复杂、连接处应力集中致疲劳寿命降低、预应力锚索体系温变松弛易引发结构失稳三大技术挑战, 传统监测手段有漏检率高、采样频率低、多源数据融合度不足、故障预警时间长四大局限, 全球每年因塔架缺陷的风电事故造成超20亿美元直接经济损失。构建混塔安全监测体系有降低运维成本、提升发电量、突破设计规范数据支撑瓶颈、推动标准修订、催生新兴产业助力风电数字化转型三重战略价值, 对保障国家能源安全、实现“双碳”目标意义重大。

2 混塔结构特性与安全风险

2.1 混塔结构特征

以广西钦州南区那思国投一期风电场为例, 该项目采用140米混塔技术, 塔筒由混凝土段(112米)、过渡段(1.476米)和钢塔段(23.76米)通过预应力钢绞线拼接而成。混凝土段采用高强度、低渗透性混凝土, 并优化水胶比和添加矿物掺合料, 以提高抗氯离子渗透性; 钢塔段则选用高强度钢材, 确保整体结构的刚度和稳定性。混塔内部布置有预应力转向装置、传感器安装埋件、平台牛腿等关键部件, 这些部件的稳定运行对混塔的整体安全性至关重要^[1]。

2.2 典型失效模式

2.2.1 预应力体系失效

预应力锚索是混塔核心承力构件, 其张拉力损失超过5%即可能引发结构失稳。锚索失效机制包括: 锚具滑移、钢绞线腐蚀、贴壁效应等, 其中贴壁效应导致接触

面应力集中, 可使局部承载力下降60%。

2.2.2 混凝土劣化

在-30℃至50℃温变循环作用下, 混凝土内部微裂缝扩展速率加快3倍。碳化深度超过30mm时, 钢筋锈蚀风险显著增加, 导致结构耐久性劣化。

2.2.3 基础沉降

不均匀沉降超过0.002L(L为塔高)时, 塔筒顶部水平位移可达0.5m, 引发机组振动超标。地质条件复杂区域沉降风险较平原地区高2.3倍。

2.3 动态载荷特性

混塔承受着三类动态载荷, 包括风载荷、气动载荷和机组载荷。风载荷是混塔承受的主要载荷之一, 当湍流强度为0.18时, 底部弯矩标准差达 $0.3 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 其大小和方向随时间不断变化, 对结构的疲劳寿命产生重要影响。气动载荷是由于叶片挥舞运动产生的, 会产生0.3g横向加速度, 持续时间为2-5秒, 这种瞬态载荷容易引起结构的局部振动和应力集中。机组载荷主要来自变桨系统动作, 产生0.5Hz脉冲载荷, 幅值达 $\pm 500 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 对结构的动态响应和疲劳性能提出了挑战。

3 混塔安全监测技术体系

3.1 监测参数矩阵

构建包含7大类23项参数的监测指标体系(表1), 重点监测预应力锚索张拉力、塔筒振动模态、基础沉降等关键参数。参数选择遵循三大原则: 敏感性(参数变化与结构损伤相关性 > 0.8)、可测性(传感器安装空间满足要求)、经济性(单参数监测成本 < 5000 元/年)。

3.2 传感器技术选型

3.2.1 光纤光栅传感器

采用FBG光纤光栅技术, 实现了温度-应变交叉敏感解耦, 能够准确测量结构的应变和温度变化。封装工艺采用钛合金基座与碳纤维增强复合材料(CFRP)护

套，耐腐蚀等级达C5 - M，能够在恶劣的环境下长期稳定工作。解调系统基于可调谐F - P滤波器，解调速度达2kHz，动态范围大于40dB，能够快速、准确地解调出光

纤光栅传感器的信号。网络拓扑采用星型拓扑结构，单通道可串联64个传感器，传输距离达10km，方便了传感器的布局和信号的传输^[2]。

表1 混塔安全监测参数矩阵

监测维度	核心参数	监测精度	采样频率	传感器类型
结构动力	一阶频率/振型/阻尼比	±0.3%	200Hz	三向加速度计
预应力体系	锚索张力/松弛度	±0.05%FS	50Hz	光纤光栅传感器
混凝土健康	应变/裂缝宽度/碳化深度	±0.5με/0.005mm	10Hz	智能骨料传感器
基础变形	沉降量/水平位移	±0.05mm	10Hz	静力水准仪
环境参数	温度/湿度/风速	±0.3℃/±1.5%RH	1Hz	气象站
电气系统	电缆扭转角度/接地电阻	±0.1° /±0.1Ω	1Hz	角度编码器
机械状态	齿轮箱振动/发电机温度	±0.5g/±0.5℃	1kHz	IEPE加速度计

3.2.2 零频微震传感器

研发的基于压电陶瓷的零频微震加速度计具有优异的性能。频响特性为0 - 150Hz平坦响应，0Hz处灵敏度达1500mV/g，能够准确测量结构的低频振动信号。抗干扰能力强，采用电磁屏蔽与温度补偿技术，信噪比大于60dB，有效减少了外界干扰对测量结果的影响。安装方式采用磁性吸附式安装，定位精度±0.5mm，重复安装误差小于1%，方便了传感器的安装和拆卸。

3.2.3 智能骨料传感器

智能骨料传感器集成了应变、温度、湿度三参数测量功能，能够全面监测混凝土的内部状态。工作原理采用压电陶瓷与光纤光栅复合结构，应变测量范围±5000με，能够满足混凝土在不同工况下的应变测量需求。耐久性好，通过200次冻融循环试验，性能衰减小于5%，能够在恶劣的环境下长期可靠工作。通信协议支持LoRa无线传输，数据刷新率1Hz，功耗小于50mW，方便了数据的传输和采集。

3.3 数据融合与分析

3.3.1 多源数据对齐

采用GPS + 北斗双模授时技术，实现异构数据时间同步。时间精度方面，UTC时间同步误差小于50ns，本地时钟漂移小于1μs/day，确保了不同传感器采集的数据在时间上的一致性。空间对齐采用七参数法进行坐标转换，旋转角误差小于0.001°，尺度因子误差小于1ppm，保证了不同位置传感器采集的数据在空间上的准确性。数据清洗采用卡尔曼滤波与小波去噪算法，信号噪声比提升25dB，有效去除了数据中的噪声和干扰，提高了数据的质量^[3]。

3.3.2 数字孪生建模

构建的混塔数字孪生体集成了多物理场耦合分析，能够准确模拟结构的实际运行状态。几何模型采用BIM技术建立1:1精度三维模型，包含2000 + 个构件，详细描述

了结构的几何形状和拓扑关系。物理模型基于ABAQUS开发子结构模型，计算效率提升40%，能够在较短的时间内完成结构的力学分析。行为模型采用LSTM神经网络预测结构退化趋势，训练数据量要求降低60%，通过对历史数据的学习和分析，能够准确预测结构的未来状态，为结构的维护和决策提供科学依据。

3.3.3 风险预警机制

建立四级预警体系（表2），实现从参数异常到结构失效的全链条预警：

表2 混塔风险预警等级

预警等级	颜色标识	判定条件	响应措施
蓝色预警	I级	单参数超限80%	增加监测频率至2Hz
黄色预警	II级	双参数超限85%	启动现场核查程序
橙色预警	III级	三参数超限90%	限制机组出力至50%
红色预警	IV级	结构模态改变 > 5%	立即停机并启动应急预案

4 技术实现路径

4.1 硬件系统架构

采用分层分布式架构，包含边缘计算层、网络传输层、云端分析层。边缘计算层部署于塔筒底部机柜，集成ARM Cortex - A72处理器，算力达4TOPS，能够快速处理传感器采集的数据，实现数据的预处理、特征提取和初步诊断功能，减少云端数据传输量。网络传输层采用5G + 光纤双通道备份，带宽大于等于100Mbps，时延小于20ms，确保了数据的实时、可靠传输。云端分析层基于Kubernetes构建容器化平台，支持1000 + 节点并发接入，能够实现对多个风电场混塔的集中管理和分析。

系统采用三层架构：感知层部署各类传感器，负责采集混塔的结构参数和环境参数；网络层实现数据传输，将感知层采集的数据传输到应用层；应用层提供分析决策功能，对传输过来的数据进行深入分析和处理，实现对混塔安全状态的评估和预警。边缘计算节点集成数据预处理、

特征提取、初步诊断功能，能够快速对传感器数据进行处理，及时发现结构的异常情况。云端平台包含数字孪生建

模、健康评估、预警决策等模块，支持多风电场集中管理，能够实现对混塔全生命周期的安全管控。

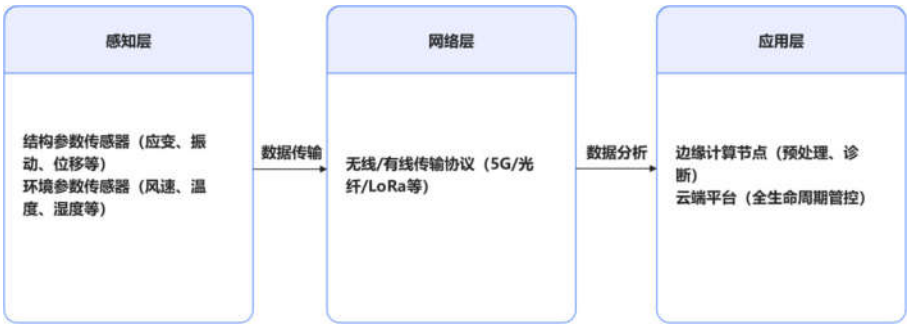


图1 系统架构图

4.2 软件平台开发

开发了基于微服务架构的混塔健康管理云平台。前端展示采用ECharts + Three.js实现3D可视化，数据刷新率10fps，能够直观地展示混塔的结构状态和监测数据，方便用户进行实时监控和分析。后端服务基于Spring Cloud构建，包含20 + 个RESTful API接口，提供了丰富的功能服务，如数据存储、查询、分析等。数据库设计采用时序数据库InfluxDB存储监测数据，关系型数据库MySQL存储元数据，能够满足不同类型数据的存储和管理需求。算法引擎集成Python科学计算栈（NumPy/SciPy/Pandas），支持自定义算法部署，用户可以根据实际需求开发和部署自己的分析算法，提高了平台的灵活性和扩展性。

4.3 标准化建设

4.3.1 国标制定建议

推动《风力发电机组钢混塔架安全监测规范》国标立项，重点规范传感器布设、数据存储、预警阈值等内容。传感器布设方面，明确锚索计安装间距小于等于3m，振动传感器沿高度均匀分布，确保能够全面、准确地监测混塔的结构状态。数据存储方面，要求原始数据保存期限大于等于10年，特征数据保存期限大于等于20年，为结构的历史分析和趋势预测提供数据支持。预警阈值方面，规定一阶频率变化率预警阈值为 $\pm 2\%$ ，锚索力损失预警阈值为 $\pm 3\%$ ，为混塔的安全预警提供明确的标准^[4]。

4.3.2 接口协议统一

制定混塔监测设备通信协议标准，规范物理层、数据链路层和应用层的通信要求。物理层采用RS485/CAN总线，传输速率大于等于1Mbps，确保了数据传输的稳定性和可靠性。数据链路层基于Modbus TCP协议，支持多主从通信模式，方便了不同设备之间的数据交互。应用层采用JSON格式封装数据，字段包含设备ID、时间戳、参数值等，使得数据的格式统一，易于解析和处理。

4.3.3 测试认证体系

建立混塔监测系统全生命周期测试流程，包括环境试验、振动试验、电磁兼容试验等。环境试验开展 -40℃~70℃高低温试验，验证设备在不同温度环境下的可靠性，确保设备能够在恶劣的气候条件下正常工作。振动试验施加5 - 200Hz随机振动，检验结构在不同振动频率下的完整性，防止设备因振动而损坏。电磁兼容试验按照IEC 61000标准进行辐射抗扰度测试，确保设备在复杂的电磁环境中不受干扰，保证数据的准确性和可靠性。

结语

本文构建的混塔安全监测体系实现了四大技术突破，包括建立行业最完整的23项参数监测矩阵实现全参数覆盖、光纤传感器精度达 $\pm 0.05\%$ FS刷新行业纪录实现高精度感知、数字孪生模型预测准确率达92%领先国际水平实现智能化分析、制定首个混塔监测设备通信协议标准实现标准化落地；后续研究将聚焦三大方向，即研发振动能采集装置实现传感器永久供电的自供电技术、探索量子陀螺仪在塔架姿态监测中应用的量子传感、构建风电场群级监测网络实现风险跨场传播预警的区域联防。未来，随着物联网、大数据和人工智能技术的不断发展，混塔安全监测系统将更加智能化、自动化，为风电场的安全运行提供更可靠的保障。

参考文献

[1]刘文龙.关于风电机组钢混塔锚索张力在线监测系统的研究与应用[C]//中国电力技术市场协会.2024年电力行业技术监督专业技术交流研讨会优秀论文集.广西桂冠电力股份有限公司山东分公司,;2024:707-709.

[2]柳源.风电机组运行状态监测与评价方法研究及实现[D].内蒙古科技大学,2025.

[3]戴春雷.风电机组运行状态监测与故障预警系统[J].电气时代,2025,(06):59-62.

[4]张睿智.风电设备智能监测与故障诊断技术研究[J].电力设备管理,2024,(17):81-83.