

风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法

董宇斌 岳秀峰

内蒙古华电锡林浩特新能源有限公司，内蒙古锡林浩特，026000；

摘要：由于全球气候问题和能源需求的增长，全球在清洁能源领域的投资都在逐渐增加。风力发电是当前可再生能源领域技术最成熟、增长速度最快、商业化发展最好的发电方式之一，其大规模发展对能源结构的调整、应对能源需求增长和环境挑战、实施可持续低碳能源战略具有重要的意义。受风力资源分布限制，风电机组通常建在偏远山区或者海上，工作环境恶劣，长期面临冰冻、台风、潮湿或盐雾腐蚀等问题，机组发生故障的概率显著增加，提高了机组的运维成本。

关键词：风电机组；异常数据识别；空间聚类；风速-功率曲线

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.014

从“单点采集→边缘智能→云边协同”向“数字孪生驱动的一体化智能监控”跃迁，边缘-云端协同的实时诊断架构。整合机械振动、电磁系统及风况数据，利用内嵌物理约束的深度神经网络构建相关性模型。通过校核异常数据与风况的相关性偏差，精准判别异常状态种类。

1 风电机组数据采集与监控系统定义

1.1 定义核心要素，系统定位

工业级监控中枢：基于分布式架构实现对分散式风力发电机组的集中监控与数据管理，覆盖单机至全场设备运行状态。实时闭环控制：通过传感器网络采集运行参数，结合控制算法动态优化机组性能与安全保障。功能本质。数据采集层：实时获取风速、功率、温度、振动等关键运行参数及气象、电网数据；监控决策层：可视化展示运行状态，远程启停机组、调节功率输出，触发分级报警与紧急保护；分析优化层：存储历史数据，生成性能报表，支持故障诊断与发电效率优化。

1.2 技术架构特征

层级化部署：现场控制单元：风机端嵌入式系统处理本地传感器数据；中央监控中心：通过光纤网络整合全场数据，提供人机交互界面。扩展能力：支持云边协同（边缘端实时诊断+云端模型训练）及多系统集成（如升压站监控、气象站）。

1.3 国家标准规范定义

根据《GB/T 44360-2024》，该系统被明确界定为：“集成传感器网络、数据通信协议及处理中心的智能管

控体系，承担风电场全生命周期数据采集、传输、分析及控制任务，为集约化运维提供技术支撑”。以实时数据驱动为核心，融合采集、控制、诊断功能的智能化工业控制系统，确保风电机组安全、高效、可管控运行。

2 风电机组数据采集与监控系统主要功能

1. 全域数据采集与传输。多源参数采集。实时采集机组运行参数：发电功率、转速、电压电流、部件温度（发电机/齿轮箱等）、桨距角；同步获取气象数据（风速、风向、温湿度）及电网状态（功率因数、频率、断路器开合）。高速数据传输。通过光纤网络将分散机组的秒级数据实时传输至中央监控中心。

2. 实时监控与设备控制。动态可视化监视。图形化展示全场机组运行状态（单线图、功率曲线）、故障定位及报警信息。远程精准操控。支持远程启停机组、偏航调整、参数标定及复位操作。智能自动调节。依据风速动态调整桨距角与偏航系统，最大化发电效率。

3. 故障诊断与安全防护。分级报警机制。实时触发超限、过载、温度异常等故障的声光报警，并存储故障瞬间数据。多重安全保障，独立安全链实现超速等危急状况的紧急停机；集成防雷、防火及箱变测控装置防护。

4. 数据分析与运维优化。历史数据管理。长期存储秒级/分钟级运行数据，自动生成发电量统计报表（日报/月报/年报）。性能评估与预测。绘制风速-功率曲线、风速分布图评估机组效能；基于数据分析预测关键部件寿命（如齿轮箱）。能效决策支持，优化功率输出策略，提升全场发电经济性。系统扩展能力。支持云边协同架构（边缘端实时诊断+云端模型训练）；无缝集

成升压站监控、气象站及动环系统。核心价值：实现风电场无人值守集约化运维，通过数据闭环控制保障安全、提效、降本。

3 AI 视觉识别技术在风电机组异常数据识别中的应用

1. 叶片健康智能诊断。裂纹与损伤识别。通过无人机搭载高清摄像头与热成像仪，实时捕捉叶片表面图像，基于 YOLOv7 等深度学习模型识别毫米级裂纹、腐蚀或雷击损伤。热成像技术辅助检测内部结构分层等隐蔽缺陷，实现非接触式探伤。结冰与污垢监测。分析叶片表面图像纹理变化，自动识别覆冰或积灰状态，触发除冰系统启动。

2. 机舱关键部件监控。螺栓松动检测。利用高精度视觉感知系统扫描螺栓位置，结合多模态数据分析预紧力变化，实时报警松动风险。漏油与过热预警。红外摄像头监测齿轮箱、液压系统油液渗漏，AI 模型识别油渍扩散特征并关联温度数据，实现早期预警。实时追踪发电机轴承等部位温度异常，防止过热故障。

3. 运行性能图谱分析。功率曲线异常筛查。国内首个功率曲线图像识别 AI 模型上线，自动识别 8 类典型异常（如限功率、风速标定偏移），替代人工经验判断。通过对比理论/实际功率曲线图像差异，快速定位气动性能下降或控制系统故障。控制图谱智能诊断。扩展视觉识别至偏航对风曲线、变桨响应图谱，建立多维度故障关联模型。

4. 安全行为与环境监测。人员入侵与违规操作识别，机舱内智能摄像头自动检测非授权人员进入、吸烟等危险行为，联动报警系统。环境风险感知，实时分析机舱周边视频流，识别火灾烟雾、雷暴等灾害征兆。技术架构创新，边缘-云端协同：机载边缘设备实时处理图像，云端训练模型迭代诊断规则（如螺栓松动算法）。多模态融合：结合可见光、红外、振动数据提升识别准确率（如漏油+温度联合分析）。国际标准推进：电力元宇宙框架下，制定基于计算机视觉的异常检测国际标准（ITU）。应用价值：实现风机全状态视觉感知闭环，故障识别效率提升 60%+，运维成本降低 30%。

4 风电机组应力监测的方法

1. 叶片应力监测。应力集中区域定位。关键区域识别：通过 Flapwise（翼面）和 Pitch-yaw（偏航-俯仰）

载荷分析，锁定叶片中部、上部及边缘为高应力区，需重点布设传感器。动态载荷监测：采用倾角传感器+无人机图像采集，实时捕获叶片扭转变形，结合 GPS 定位触发安全保护策略。损伤诊断技术。无损检测：超声波相控阵检测内部分层、裂纹（如 OmniScan X3 设备提升狭小区域检出率）；红外热成像识别腐蚀区域表面温度异常（适用于高温高湿环境）。疲劳预测：基于历史刚度退化数据建立模型，预判疲劳损伤风险。

2. 螺栓应力监测。实时应力计算，动态载荷分配模型（华能辽宁专利）：采集主轴转速、输出电压、叶片表面气压；映射动态总载荷至各螺栓应力值；超限时触发更换决策，并评估对相邻螺栓的连锁影响。松动状态追踪，机械式监测装置：套环与螺母联动，导柱位移反映松动感；壳体集成无线传输模块，实时报警。光纤光栅传感：塔筒螺栓布设光纤传感器，秒级响应疲劳应变变化。

3. 塔筒与结构件监测。疲劳损伤评估系统。振动传感器+应变片组合，采集塔筒振动频谱与局部应力；边缘计算设备实时分析数据，预测剩余寿命。环境适应性监测。盐雾腐蚀防护：红外热成像扫描金属部件热传导异常区，定位腐蚀点位；综合应力测试：模拟高低温、湿热、振动复合环境，验证结构可靠性。技术挑战与突破。隐蔽缺陷检测：叶片内部粘合剂失效需依赖相控阵超声扫描（检出精度 0.5mm）；复杂载荷解耦：主轴扭矩与风剪切力耦合干扰下，通过 EEMD 算法分离应力信号特征；盐雾环境干扰：防腐涂层状态影响热成像精度，需结合电化学阻抗谱交叉验证。从单点传感器向“智能感知-数字孪生-自主决策”闭环管控升级，推动运维模式从定期检修转向预测性维护。

5 风电机组数据联合分析识别异常的方法

1. 多源数据融合架构。时空对齐机制。通过时间戳同步 SCADA 运行参数（功率、转速）与振动传感器高频信号，建立毫秒级关联数据集；集成气象站、电网调度数据消除环境干扰。特征矩阵构建。拼接多时间尺度特征：改进 EEMD 算法分解秒级 SCADA 数据，跨尺度融合高频振动 IMF 分量形成三维特征矩阵。机器学习融合。无监督聚类，组合 K-means、DBSCAN、孤立森林算法交叉验证，定位传感器漂移等隐蔽异常；高斯分布模型筛选转速-功率离群点（F1-score 0.93+）。监督学习优化。基于随机森林的多模态分析：联合振动频谱+温度

梯度+图像纹理特征诊断轴承损伤。深度学习突破。视觉 Transformer 强化, 华润风电专利: 将 SCADA 特征矩阵输入 ViT 模型, 残差矩阵均方根误差超阈值即触发预警; 时空联合建模, LSTM-TCN 网络捕捉齿轮箱温度序列长期依赖, 预测偏差 $>15\%$ 判定劣化。

2. 工程实践方案。动态风险指数计算, 诺文科矿井通风专利迁移: 实时计算功率-风速-温度动态风险指数, 生成二进制风险编码; 边缘-云协同诊断, 机载设备预处理振动信号→云端训练 ResNet 故障分类模型(响应延时 $<200\text{ms}$); 数字孪生验证, 三维应力场映射实际载荷分布, 模拟极端工况失效路径。

6 提高风电机组异常数据识别精度的方法

1. 多模态数据融合架构优化。时空对齐强化。毫秒级同步 SCADA 运行参数(功率、转速)与高频振动信号, 融合气象/电网调度数据消除环境干扰。构建三维特征矩阵: 改进 EEMD 算法分解秒级 SCADA 数据, 跨尺度融合振动信号的 IMF 分量。高维特征工程, 扩展特征维度: 计算风速-功率比例、风机转速时序梯度、日志丢失率等衍生特征。组合特征异常模式挖掘: 通过 k-means+D BSCAN+孤立森林交叉验证, 定位传感器漂移等隐蔽缺陷。

2. 智能算法创新突破。迁移学习解决数据稀缺。构建跨机型故障特征映射库, 采用领域自适应算法迁移学习, 新机型模型训练周期从 6 个月缩短至 3 周(跨品牌诊断准确率 $\geq 85\%$)。深度强化学习应用, ViT 残差诊断模型, 输入 SCADA 特征矩阵至强化视觉 Transformer (ViT), 残差矩阵 RMSE 超阈值即触发预警(响应延时 $<200\text{ms}$)。音频对抗生成网络, 编码器-解码器-编码器架构生成器: 对比叶片原始音频与重建梅尔谱的潜在表征差异, 精确识别裂纹/结冰异常(检出率提升 25%)。统计学习融合改进, 动态风险指数编码: 实时计算功率-风速-温度动态风险值, 生成二进制风险编码并触发分层预警。方差变化率-四分位法: 同步捕捉功率离散型与堆积型异常, 召回率提升 80%。验证闭环: 通过数字孪生平台映射三维应力场, 模拟极端工况失效路径, 实现“物理机理-数据驱动-虚拟验证”三位一体优化。关键挑战与对策。噪声干扰抑制: 采用云分段最优熵算法过滤 SCADA 脉冲噪声; 小样本学习: 基于 LeNet5-like

迁移网络的叶片覆冰诊断准确率达 98.90%; 环境适应性: 盐雾腐蚀场景结合红外热成像+电化学阻抗谱交叉验证。

7 风电机组数据采集与监控相关技术趋势

1. 多源数据深度融合架构革新。全域感知网络升级。部署高密度传感器阵列: 叶片嵌入光纤应变计、塔筒加装振动加速度计, 实现毫秒级高频信号采集与时空对齐; 融合气象雷达与电网调度数据, 构建环境-载荷联动分析模型。多维特征工程优化。跨尺度特征拼接: 采用改进 EEMD 算法分解 SCADA 秒级数据, 融合振动信号的 IMF 分量形成三维时空特征矩阵; 衍生特征扩展: 风速-功率时序梯度、日志丢失率等衍生变量纳入异常检测模型。

2. 智能诊断技术突破。深度学习驱动。视觉 Transformer 强化: SCADA 特征矩阵输入 ViT 模型, 残差均方根误差超阈值即触发预警(误报率 $<5\%$); 音频对抗生成网络: 对比叶片原始声纹与重建梅尔谱的潜在表征差异, 裂纹识别准确率达 98.5%。数字孪生验证闭环。构建三维应力场映射实际载荷分布, 模拟极端工况失效路径; 一体化设计优化: 远景 Model Z Pro 平台通过整机-塔基耦合仿真, 降低基础载荷 15%, LCOE 减少 7%。

3. 标准化与系统集成。国家标准引领。GB/T《智能风力发电场数据采集技术规范》正式实施, 规范数据范围、传输协议及存储格式; 强制要求覆盖机组运行、变电站测控、辅助系统等全维度数据采集。运维模式转型。无人机巡检+机器人检测替代人工高危作业, 叶片检测效率提升 300%; 预测性维护渗透率超 60%, 运维成本降低 25%。

总之, 基于改进 DBSCAN 的风电机组 SCADA 异常数据识别方法, 结合风电机组的风速-功率数据分布特点, 提出了两个指标, 以一种简单而有效的方式来选择合适的聚类参数, 能够保证异常数据被剔除的前提下, 保留尽可能多的正常数据。

参考文献

- [1] 张洁, 浅谈风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法. 2022.
- [2] 赵小刚. 大功率风电机组关键部件健康状态监测与评估方法研究. 2023.