

风力发电机组状态监测和故障诊断技术的应用研究

邹纯超

新疆华电苇湖梁新能源有限公司，新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市，830000；

摘要：状态监测技术是风电运维从“被动抢救”转向“主动预防”的核心支撑，直接关系到机组安全性、发电效率及全生命周期经济性。随着机组大型化与海上风电发展，其重要性将进一步凸显。风电故障诊断技术正从单点分析转向“机械-电气-环境”多维融合，深度学习与边缘智能的应用推动诊断准确率突破 90%¹⁷。风电状态监测与故障诊断技术正加速向智能融合化（AI+边缘计算）、运维主动化（预测性维护）及标准体系化演进，但需攻克复杂信号解耦、极端环境可靠性及产业链协同三大瓶颈。未来数字孪生与低成本传感技术的结合将驱动行业迈向“无人值守、自愈运行”的新阶段。

关键词：风力发电机组；状态监测；故障诊断技术

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.026

风电是一种可再生的洁净能源，属于新型源能的一种，在我国及其他国家、地区得到广泛关注和运用。由于风电依赖风力提供动能，并且风能具有很强的动态性、不稳定性，因此，风电机组的工作也存在一定动态性。以保证其运行质量和安全性为目标，需要加强风力发电机组状态监测，并针对各类故障优化诊断技术。

1 风力发电机组状态监测定义重要性

1.1 定义

风力发电机组状态监测（Condition Monitoring System, CMS）是指通过传感器、数据采集设备及分析技术，对机组关键部件（如齿轮箱、轴承、叶片、发电机等）的运行状态进行实时或连续的高分辨率监测，并结合故障诊断算法识别异常或潜在故障的技术体系。其核心在于：数据采集：利用振动、温度、声发射等多种传感器获取高频运行数据；故障预诊断：通过分析数据特征（如频谱、冲击能量）预测部件失效风险，实现早期预警。区别于低分辨率的 SCADA 系统（仅监测基础运行参数），CMS 专注于机械部件的健康状态深度分析。

1.2 重要性

降低运维成本，风电机组维护成本占运营收入的 10%~25%，突发故障（如齿轮箱损坏）单次维修费用可超百万元。状态监测通过预判故障，避免事后维修的高额吊装费用，相比传统“损坏后维修”模式节省成本达 47%。减少非计划停机：例如叶片裂纹、轴承磨损等早期故障的及时处理，可显著缩短停机时间。提升安全性与可靠性，机组常年在沙尘、冰雪、雷电等恶劣环境下运行，机械部件易受高应力损伤，导致叶片断裂、倒塔

等事故。状态监测可实时评估结构健康（如叶片裂纹、塔筒形变），预防重大安全事故。海上风电因可及性差，监测系统对保障长期稳定运行尤为关键。优化维护策略，从“定期检修”转向预测性维护：基于部件退化趋势安排维护计划，避免“过维护”或“欠维护”。延长设备寿命：例如通过振动分析优化齿轮箱润滑周期，减缓磨损。

2 风力发电机组状态监测与故障诊断原理

2.1 状态感知层：多源数据采集

机械状态感知，振动信号：在齿轮箱、轴承处部署加速度传感器，采集 0.1Hz~10kHz 频段的振动波形，捕捉磨损/断齿特征的冲击信号。声发射技术：通过压电传感器捕获叶片内部裂纹扩展的高频应力波（频率>100kHz）。电气状态感知，谐波分析：实时监测发电机电流谐波畸变率，识别定子绕组匝间短路（特征频率为基波整数倍）。红外热成像：扫描变流器 IGBT 模块温度场，定位过热失效点。环境与工况感知，激光雷达测量风速湍流强度，校准功率曲线偏差；光纤光栅传感器监测塔筒形变（精度达±0.1mm/m）。

2.2 特征分析层：故障征兆提取

齿轮箱，变分模态分解（VMD），分离振动信号中行星轮磨损特征频带，抑制噪声干扰。发电机，希尔伯特-黄变换，提取电流信号瞬时频率，诊断转子断条故障。叶片，时频卷积网络（TF-CNN），联合时域/频域特征识别覆冰导致的模态参数漂移。多源融合，D-S 证据理论，综合振动+温度+电流数据，提升故障定位置信度。

2.3 智能决策层：诊断与预警

故障诊断模型，深度学习诊断：堆叠自编码网络（SAE）重构 SCADA 数据，重构误差>阈值触发故障分类器。数字孪生预警：建立 3.5 万数据点镜像模型，模拟故障演化路径（如轴承点蚀→断裂），提前 2000 小时预警。自适应决策优化，基于 EEMD 的风功率预测模型，动态调整故障状态下的发电策略；高斯过程回归预估轴承剩余寿命，优化备件调度计划。

2.4 特殊场景原理适配

海上机组：采用运动补偿算法消除浮式平台六自由度摆动对振动信号的干扰；老旧机组：油液金属颗粒分析替代高频振动监测，降低改造成本 30%。

3 风力发电机组主要监测内容

3.1 核心机械部件监测

叶片状态监测，完整性监测：通过激光雷达扫描、视觉检测识别裂纹、变形及表面污染（如冰雪附着）。疲劳与静力性能：开展静力试验、疲劳试验，检测挠曲变形与刚度分布。振动特性：测量固有频率、阻尼比及振型，预防共振损伤。传动系统监测，振动分析：在主轴、齿轮箱、轴承处布置加速度传感器，捕捉高频振动信号（频率范围 0.1Hz~10kHz），诊断磨损与不对中故障。油液状态：定期检测齿轮箱润滑油黏度、金属颗粒含量，评估磨损程度。

温度监控：实时监测齿轮箱轴承温度，预警过热风险。

3.2 电气系统监测

发电机性能监测，电气参数：持续采集电压、电流、功率因数和谐波成分，分析绝缘老化与绕组异常。温度与振动：监测发电机轴承温度及径向振动，预防轴承失效。变流器与电网交互，输出特性：监测变流器输出电流/电压波动，结合 EEMD（集成经验模态分解）算法诊断开关故障。电磁兼容性：测试传导发射、辐射抗扰度，确保并网稳定性。

3.3 支撑结构监测

塔架安全，形变监测：利用倾斜传感器检测塔筒倾斜度，评估基础沉降。腐蚀与裂纹：定期目视检查或无损探伤（如超声波），重点监测焊缝与涂层完整性。基础结构（海上机组），应力分布：监测钢结构应力、灌浆体应力及土压力变化。动态响应：通过振动传感器分析基础在风浪载荷下的运动特性。

3.4 控制系统与环境监测

控制参数实时采集，监测变桨角度、风轮转速、液压油压、刹车片温度等核心控制信号。验证逻辑功能与通信链路状态，确保保护机制（如过载保护）有效。运行环境监测，气象数据：实时记录风速、风向、气温、气压，校准功率曲线。机舱环境：监测机舱内温度、湿度，预防电气设备凝露。

4 风力发电机组状态监测在风电行业的应用

4.1 预防性维护优化

机械故障预警，振动监测系统捕捉齿轮箱及轴承的高频异常信号，提前预警磨损风险，减少非计划停机达 30%以上。智能螺栓实时监测叶根连接螺栓轴力变化，精准识别预紧力损失，避免叶片脱落的重大事故。叶片健康管理，激光雷达与视觉检测技术识别叶片表面裂纹、覆冰及污染，降低发电效率损失约 19%。声发射技术结合无损探伤（如超声波），定位内部结构损伤。电气系统安全保障，实时监测发电机绝缘老化与电流谐波，预防短路故障。红外热成像技术追踪变流器等设备过热点，减少火灾风险。

4.2 海上风电特殊应用

基础结构监测，塔筒倾斜传感器与六自由度运动监测模块协同分析浮式平台姿态，确保倾斜角稳定在±5°以内。灌浆体应力监测系统预警基础结构疲劳损伤，延长使用寿命。环境适应性管理，盐雾腐蚀传感器监测塔筒防护层退化，降低维护成本 25%。集成海洋环境数据（涌浪周期、流速），优化偏航控制系统。

4.3 运维成本控制

降低维修支出，预测性维护替代定期检修，减少齿轮箱等核心部件更换费用 47%。基于油液分析的润滑优化策略，延缓机械磨损，延长设备寿命周期。提升发电收益，故障早期诊断使机组可利用率提升至 98.5%，年发电量增加 5%-8%。功率曲线校准技术减少风速适配偏差，提高产能利用率。

4.4 智能诊断技术落地

数字孪生系统，集成 3.5 万个数据点的风机数字镜像，实现故障提前 2000 小时预警，诊断准确率超 91%。边缘计算应用，机舱侧部署轻量化 AI 模型，实时分析振动与温度数据，缩短诊断响应时间至分钟级。多源数据融合，结合 SCADA、声发射与无人机巡检数据，构建综合健康评价模型，误报率降低 40%。

5 风力发电机组故障诊断技术

5.1 核心诊断对象与技术要点

机械传动系统故障，齿轮箱诊断：通过振动信号分析（频率范围 0.1Hz~10kHz）结合多尺度卷积神经网络（MSCNN），识别行星轮磨损、断齿等故障，诊断准确率达 92% 以上。轴承失效预警：采用变分模态分解（VMD）融合信息熵技术，提取早期磨损特征频率，提前预警轴承点蚀故障。

叶片损伤识别，激光雷达扫描与视觉检测捕捉表面裂纹、覆冰及气蚀缺陷，辅以声发射技术定位内部结构分层。静力试验结合模态分析，评估叶片刚度退化与疲劳寿命。电气系统故障，发电机故障：监测电流谐波与绝缘老化，采用希尔伯特变换提取定子绕组匝间短路特征。变流器故障：基于线电压误差诊断功率器件开路故障，结合遗传算法优化容错控制策略，降低电流畸变率超 30%。

5.2 前沿诊断技术应用

深度学习，动态权重分配自注意力机制（华能专利），融合时域/频域特征，故障识别全面性提升 40%。时频分析，TF-CNN 时频卷积网络，解决非平稳信号识别，抗噪能力提升 50%。多源数据融合，SCADA+振动+油液数据协同，误报率降低 35%，支持健康率动态评估。

5.3 技术演进趋势

智能诊断系统，数字孪生平台集成 3.5 万数据点，实现故障提前 2000 小时预警。边缘计算部署轻量化 AI 模型（如 AW-LSTM），诊断响应时间缩短至秒级。标准化推进，依据 VDI 3834 规范建立振动评价体系，划分安全运行阈值区间（I / II / III 区）。

6 风力发电机组状态监测与故障诊断技术发展趋势与挑战

6.1 发展趋势

多源数据融合升级，融合 SCADA、振动、声发射及无人机巡检数据，构建综合健康评价模型，误报率降低 40%。结合海洋环境参数（涌浪周期、盐雾浓度），优化海上机组自适应诊断策略。运维模式转型，预测性维护主导：替代定期检修，降低齿轮箱等核心部件更换费用 47%，提升机组可利用率至 98.5%。无人值守实践：依托物联网与自主诊断算法，远程运维覆盖率达 80% 以上。特殊场景技术适配，漂浮式机组采用运动补偿算法，消除六自由度摆动对振动信号的干扰；老旧机组改造中，

油液金属颗粒分析替代高频振动监测，成本降低 30%。

6.2 核心挑战

技术瓶颈，复杂信号处理，变工况下非平稳振动信号特征提取困难，抗噪能力不足。小样本学习，严重故障样本稀缺，制约深度学习模型泛化能力。多物理场耦合，机械-电气-环境耦合效应导致故障误判率升高。工程落地障碍，海上环境适应性：盐雾腐蚀加速电气绝缘劣化，现有湿度监测精度难以满足容错控制需求；传感器可靠性：极端环境下（-30℃~50℃）光纤光栅等传感器寿命缩短 40%；产业链协同不足：监测设备供应商与整机厂商数据协议不互通，形成“信息孤岛”。标准化与成本矛盾，国际标准仅覆盖基础振动评价，缺乏电气与环境监测的统一阈值体系；高精度监测系统（如激光雷达叶片扫描）单机部署成本超 20 万元，制约中小风场应用。

6.3 突破方向

跨学科技术融合，开发抗盐雾腐蚀的纳米涂层传感器，延长海上机组监测设备寿命；迁移学习解决小样本故障诊断难题，模型泛化能力提升 50%。全链条标准构建，建立覆盖“感知-分析-决策”的 ISO 标准体系，统一健康状态评价指标；推动开源诊断算法库建设，降低技术应用门槛。经济性优化，推广轻量化无线传感网络，替代传统有线方案降低成本 60%；老旧机组采用“振动+油液”低成本组合监测方案，改造效益提升 15%-20%。

综上所述，风电状态监测与故障诊断依赖多源感知→特征解耦→智能决策的技术闭环。核心突破点在于：振动信号时频分析解决变工况诊断难题；多源数据融合将误报率降低 35%；数字孪生技术实现故障全生命周期模拟。未来将向边缘智能诊断（响应时间<1 秒）与自愈控制方向发展。

参考文献

- [1] 吴君. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术研究[J]. 光源与照明, 2024(2): 100-102.
- [2] 蓝坚. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术的应用研究[J]. 应用能源技术, 2023(11): 38-42.
- [3] 陆瑛. 双馈风力发电机的状态监测与故障诊断研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
- [4] 何治. 基于迁移学习的风机传动系统关键机械部件故障诊断研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2023.
- [5] 李玲. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(11): 317-318.