

风力发电机组运行状态监测技术研究

胡志宝 黄晓春

中广核（政和）风力发电有限公司 福建 福州 350000

摘 要：为解决风力发电机组复杂工况下故障频发、早期预警难度大、运维成本高的问题，本文分析风电机组核心结构、故障机理与状态表征参数，探究多传感器数据采集、特征提取及智能故障监测核心技术，对比传统阈值法与智能监测技术的优劣。依托端边云协同监测系统开展工程验证，证实智能复合监测架构可大幅提升故障识别精度，提前预警故障、减少停机损耗，为风电机组智能运维提供可靠技术支撑。

关键词：风力发电机组；运行状态；监测技术

引言：风电是清洁能源体系的核心组成，风电机组长期服役于复杂户外环境，易受风沙、盐雾、变载荷影响，叶片、齿轮箱等核心部件易产生疲劳损伤，引发机组故障停机，严重制约风电场运行稳定性与经济效益。传统监测技术存在误报漏报、动态适配性差等短板。为此本文系统研究机组故障机理与智能监测技术，优化监测体系，旨在实现故障早期精准预警，提升风电机组运行可靠性与运维精细化水平。

1 风力发电机组结构与运行故障机理分析

1.1 风力发电机组核心结构与工作原理

（1）风电机组整体结构由风轮系统（叶片、轮毂）、传动系统（主轴、齿轮箱）、发电系统（发电机、变流器）、偏航系统、变桨系统、塔架及控制系统等子系统组成。运行流程为：风能驱动叶片旋转，经主轴传递至齿轮箱增速，驱动发电机将机械能转化为电能，再经变流器并网输出。（2）叶片采用翼型设计捕获风能，是关键捕能部件；齿轮箱将低速轴转速提升至发电机所需高速，承担变速增扭功能；发电机实现机电能量转换；主轴传递扭矩并支撑转动部件，是风轮与齿轮箱之间的核心连接件。（3）正常运行工况下，机组输出功率随风速变化呈三次方关系，转速与功率协调控制，振动、温度、电流等参数稳定在阈值范围内，变桨系统根据风速调节桨距角以维持额定功率输出。

1.2 关键部件常见故障类型及诱因

（1）叶片故障以表面裂纹、结构变形和疲劳磨损为主。诱因包括雷击、风沙侵蚀、冰载冲击及长期交变载荷导致的复合材料层间剥离，裂纹扩展将引发结构强度退化甚至断裂。（2）传动系统故障集中于齿轮箱齿面磨损、点蚀、断齿及轴承滚动体疲劳剥落、保持架断裂。诱因包括润滑失效（油质劣化、油位不足）、过载冲击

及安装对中偏差，导致接触应力异常增大。（3）电气系统故障表现为发电机绕组过热绝缘老化、线路接触电阻增大及变桨系统伺服电机或编码器异常。诱因为散热不良、谐波干扰、潮湿环境及控制信号受扰，严重时导致停机或失控^[1]。

1.3 机组运行状态表征参数分析

（1）振动加速度频谱可反映轴承特征频率及齿轮啮合频率边带，温度场分布体现散热与摩擦状态，声学噪声信号包含早期损伤的高频成分，三类物理参数互为补充构成多维度健康监测基础。（2）转速-功率曲线是衡量风能捕获效率的核心指标，扭矩波动反映传动链均匀性与冲击载荷，结合风速、桨距角指令等参数，可全面评估机组动态响应特性与变工况适应能力。（3）故障状态下，振动总幅值显著增大且出现非整数倍频成分，关键部位温度持续爬升超标，功率输出波动加剧、跟踪曲线偏离理论值，扭矩脉动增强，各参数偏离正常范围的程度与故障严重度呈正相关，通过多参数融合可提取早期预警特征。

2 风力发电机组运行状态核心监测技术

2.1 多传感器数据采集技术

（1）振动传感器选用压电式加速度计（测量范围 $\pm 50g$ ，频响 $0.5Hz \sim 10kHz$ ），部署于主轴轴承座、齿轮箱各级行星轮与平行轮轴承位、发电机前后轴承及塔顶法兰处；温度传感器采用 PT100 铂热电阻（A 级精度）布置于齿轮箱油池、发电机绕组端部、主轴内外圈及机舱环境测点；声发射传感器谐振频率 $150kHz$ ，安装于齿轮箱齿面啮合区及叶片根部靠近叶尖处，形成覆盖机械传动链与结构件的多参量感知布局。（2）SCADA 系统通过现场总线与 PLC 控制器交互，以 1 秒采样周

期采集发电机转速、有功/无功功率、三相电流电压、风速、桨距角指令与反馈值、偏航角度、齿轮箱油温与油压、绕组温度、环境温湿度等模拟量,同时记录启停机、故障跳闸、变桨限位等开关量状态及日/月累计发电量,数据类型涵盖连续过程量、离散事件量与统计累计量^[2]。(3)多源数据同步采用GPS/PTP精确时间协议实现微秒级时钟对齐,确保振动高频信号(采样率25.6kHz)与SCADA低频参数在统一时间基准下精确关联;预处理流程包括线性插值修补通信中断造成的缺失段、三次样条拟合法消除采样抖动偏差,以及对不同物理量纲参数进行Z-score标准化(零均值单位方差),消除量级差异对后续融合分析的干扰,为高质量数据驱动建模奠定基础。

2.2 监测数据处理与特征提取技术

(1)降噪处理采用小波阈值去噪方法,选取db8或sym6小波基进行多尺度分解,采用软阈值函数抑制高频背景噪声,同时保留故障冲击成分的突变细节;自适应卡尔曼滤波通过状态递推实时跟踪信号变化,有效分离振动中的随机噪声;异常值剔除综合运用拉依达准则(3σ 原则)删除大幅偏离均值的数据点,结合局部离群因子检测法识别非正态分布下的孤立野点,确保原始数据纯净可靠。(2)时域特征提取涵盖峰值、均方根值、峭度指标、波形因子及脉冲因子,有效刻画信号强度、波动幅度与冲击特性;频域特征通过快速傅里叶变换获取幅值谱与功率谱密度,结合希尔伯特包络解调提取轴承故障特征频率(如BPFO、BPFI、BSF、FTF)及其倍频边带,精准定位齿轮齿面点蚀、轴承滚动体剥落等局部损伤的位置与程度^[3]。(3)多维特征优化采用主成分分析降维,在保留95%以上方差信息的前提下剔除冗余分量,压缩计算负担;或基于互信息准则筛选出与故障类别相关性最强的敏感特征子集;特征层融合将振动频域特征、温度变化率、扭矩波动指数及功率偏差整合为统一高维特征向量,全面反映机组健康状态,提升后续分类模型的泛化性能。

2.3 智能状态识别与故障监测技术

(1)传统阈值判别法依据ISO10816-3及VDI3834等国际标准,设定齿轮箱振动速度有效值(2.0mm/s黄色预警、4.5mm/s红色报警)、发电机绕组温度(120℃报警、140℃停机)及轴承温度(75℃预警、90℃报警)等单一参量门限,当实测值超限时触发分级报警,原理直观且响应迅速,适用于保护性停机及严重突发故障的快速安全链切断。(2)基于机器学习的识别技术以随机森林、支持向量机及XGBoost为主要算法,输入经优化后

的多维特征向量,训练多分类模型实现叶片不平衡、齿轮点蚀/断齿、轴承剥落、发电机转子故障及变桨卡滞等典型状态的高精度判别,在小样本训练条件下较传统阈值法准确率提升20%~30%,具备良好的非线性映射能力。(3)深度学习模型采用卷积神经网络自动提取振动时频谱图的二维局部模式,捕捉频带间的空间关联;结合长短期记忆网络处理SCADA时序数据的长程依赖性与趋势演化规律,在强背景噪声和变风速工况下实现早期微弱故障的精准识别,同时可构建健康指标并拟合劣化轨迹,实现剩余寿命趋势预测与风险量化评估。

2.4 主流监测技术优劣对比分析

(1)传统阈值法局限性突出:各参量独立判断、缺乏多物理量关联推理能力,对风速波动与载荷突变的变工况适应性差,固定门限难以动态跟踪机组老化漂移,易产生误报或漏报;但其计算量极小、实时性强、硬件要求低、工程实施门槛低,在稳态额定运行且要求快速保护的场景中仍占据不可替代地位。(2)智能监测技术显著优势在于能够深度挖掘多源参数间的高阶耦合关系,具备自适应学习、特征自提取和跨工况泛化能力,在早期预警与状态预测方面表现卓越;现存主要问题为深度模型可解释性不足、故障样本标注成本高昂且数据不平衡,跨机型、跨风场迁移时需大量重新标定与适配,工程部署与持续运维成本较高^[4]。(3)不同工况适配性方面:稳态额定工况下传统阈值法基本满足保护需求,响应速度占优;但在变风速追踪、阵风冲击、启停机瞬态及电网波动等动态过程中,智能模型因具备时序记忆与多维关联建模能力而明显优于固定阈值;实际工程中宜采用阈值法快速安全保护与智能模型精准趋势预警协同的复合监测架构,实现从突发严重故障到早期渐变劣化的全谱段覆盖,兼顾响应速度与诊断精度。

3 风力发电机组运行状态监测系统应用分析

3.1 状态监测系统整体架构设计

(1)端-边-云协同架构以传感器层为“端”,完成振动、温度、声发射等原始信号的高速采集与模数转换;以机组端边缘计算网关为“边”,承担实时数据预处理、特征提取与本地阈值判别,实现毫秒级响应;以风场集控中心及远程云平台为“云”,汇聚多机组数据,执行深度学习模型推理、劣化趋势分析和决策优化,形成三级分层计算体系。(2)数据采集模块适配多类型传感器接口与采样率配置,支持同步触发与连续采集双模式;传输模块采用冗余工业以太环网与5G无线备份链路,确保数据传输可靠性;分析模块内置时频特征提取、智能分类与趋势预测算法;预警模块根据故障等级

分级推送报警（机组端声光报警、集控端弹窗提示、移动端短信通知），实现多层次闭环管理。（3）系统运行流程为：传感器实时采集 → 边缘节点数据预处理与特征计算 → 本地阈值初筛（严重故障即时触发保护）→ 正常数据压缩上传至云平台 → 云端深度模型二次研判与趋势预测 → 诊断结果反馈至运维决策系统，形成“边缘快判 + 云端精诊”的功能逻辑。

3.2 工程应用案例与效果验证

（1）以某沿海 5 万千瓦风电场为例，部署 22 套状态监测系统，在主轴轴承、齿轮箱各级及发电机轴承共布

设振动传感器 132 个、温度传感器 66 个、声发射传感器 44 个，数据经光纤环网上传至场级监测服务器，并同步接入已有 SCADA 系统，实现振动、温度与运行工况数据的统一存储与关联分析。（2）持续运行 12 个月期间累计采集振动数据约 15TB，温度时序数据约 8 亿条。系统成功预警齿轮箱行星轮轴承早期点蚀 5 起、发电机轴承润滑劣化 3 起、叶片质量不平衡 2 起，预警时间较故障恶化平均提前约 720 小时，振动特征频率边带幅值在预警初期仅超出基线 15% ~ 20%，随运行时间呈明显上升趋势。（3）监测精度与运维效益验证结果如下表所示：

验证维度	传统阈值法	本监测系统	提升效果
故障识别准确率	70.3%	92.3%	↑22.0 个百分点
误报率	18.5%	6.2%	↓12.3 个百分点
平均预警提前量	约 240 小时	约 720 小时	↑480 小时
年非计划停机次数	平均 14 次	平均 9 次	↓5 次
年综合运维效益	—	提高约 180 万元	投资回收期约 1.8 年

实际应用表明，以单台齿轮箱更换成本约 120 万元、避免非计划停机损失约 45 万元/台次计，全风场年综合运维效益显著提升，运维人员现场排查工作量减少约 35%。

3.3 现存问题与优化改进策略

（1）复杂工况下监测数据失真问题突出，如阵风突变导致瞬时过载引发振动信号饱和削波、低温环境使传感器灵敏度漂移、盐雾腐蚀造成接头接触电阻增大影响传输质量，尤其在冬季低温和台风季双重因素叠加时数据有效采集率降至 83% 左右。（2）微小故障早期监测准确率不足，表现为齿轮初期微裂纹或轴承表面轻微磨损产生的特征信号幅值低、易被背景噪声淹没，现有模型在信噪比低于 15dB 时识别准确率下降至 65% 以下，且缺乏统一有效的劣化起始时刻判定准则，导致早期预警时间波动较大，误判率达 25% ~ 40%^[5]。（3）针对性优化策略包括：采用自适应增益调整与抗混叠滤波应对信号饱和，硬件层面增设备用冗余传感器并定期标定；算法层面引入对抗生成网络扩充故障样本，结合迁移学习提升模型跨工况泛化能力；系统层面构建数字孪生体融合物理模型与数据驱动方法，通过残差分析实现微小故障特征增强，改进后模拟测试准确率提升至 88% 以上，误判率降至 12% 以内。

结束语

本文梳理了风力发电机组故障诱因与状态参数特征，构建多源数据融合的智能监测体系，验证了端边云协同监测系统的工程应用价值，有效提升故障识别准确率与预警时效。同时指出复杂工况数据失真、微小故障难识别等现存问题，并提出针对性优化方案。后续可结合数字孪生与迁移学习技术，进一步提升模型泛化能力，推动风电监测技术向高精度、智能化、全周期运维方向发展。

参考文献

[1] 王磊, 赵鑫, 孙伟. 多传感器数据融合的风机运行状态监测与故障预警方法 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(02): 198-205.

[2] 李杨. 风力发电机组全生命周期运行状态监测系统设计与应用 [J]. 电工技术, 2026, 22(08): 136-138.

[3] 吴佳伟. 海上风力发电机组关键部件状态监测及故障预警策略 [J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 210-213.

[4] 刘军, 李浩然. 基于改进 DBSCAN 与随机森林的风机运行异常状态监测方法 [J]. 可再生能源, 2024, 42(07): 923-929.

[5] 陈晨, 王博文. 风力发电机振动信号特征提取与运行状态监测研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 189-195.