

基于故障诊断的风力发电机转子振动特性分析与监测

王建国

西安中车永电捷力风能有限公司，陕西 西安 441058

DOI:10.61369/ERA.2026060034

摘 要： 风力发电机转子作为能量转换核心部件，其振动特性直接决定机组运行稳定性与安全性。在复杂风况、交变载荷与电磁激励耦合作用下，转子易出现不平衡、不对中、轴承故障及裂纹等问题，引发异常振动甚至连锁失效。本文从故障诊断视角，分析转子振动机理与故障振动特征，构建时频域联合分析方法，研究监测系统架构、传感器布设及智能诊断技术，结合工程实例验证效果，提出多源信息融合与深度学习监测方案，为转子故障预警、状态维护提供理论与技术支持。

关 键 词： 风力发电机；转子；振动特性；故障诊断；状态监测

Analysis and Monitoring of Rotor Vibration Characteristics of Wind Turbine Based on Fault Diagnosis

Wang Jianguo

CRRC Xi'an Yongdian Jieli Wind Energy Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 441058

Abstract： As the core component of energy conversion systems, wind turbine rotors' vibration characteristics directly determine operational stability and safety. Under complex wind conditions, alternating loads, and electromagnetic excitation coupling effects, rotors are prone to issues such as imbalance, misalignment, bearing failures, and cracks, which may lead to abnormal vibrations or even cascading failures. From a fault diagnosis perspective, this study analyzes rotor vibration mechanisms and fault vibration patterns, develops a time-frequency domain joint analysis method, investigates monitoring system architecture, sensor deployment strategies, and intelligent diagnostic technologies. Through engineering case validation, we propose a multi-source information fusion and deep learning monitoring solution to provide theoretical and technical support for rotor fault early warning and condition-based maintenance.

Keywords： wind turbine; rotor; vibration characteristics; fault diagnosis; condition monitoring

引言

随着风电产业规模化、大型化发展，风力发电机长期服役于强风、沙尘、温差剧变等恶劣环境，转子系统作为连接叶轮与发电机的关键传动部件，承受机械、电磁、气动多场耦合交变载荷，故障发生率居高不下^[1]。转子振动异常是轴承失效、转轴断裂的主要诱因，不仅导致机组非计划停机、运维成本激增，更威胁电网稳定与设备安全。传统事后维修与定期检修模式难以适配变工况运行特性，基于振动信号的故障诊断与在线监测成为核心技术路径^[2]。本文深入解析转子振动机理与故障特征，构建全流程监测与智能诊断体系，对提升风电机组可靠性、降低全生命周期成本、推动风电智能化运维具有重要工程价值。

一、风力发电机转子振动基础理论

（一）转子系统结构与振动激励源

双馈风力发电机电力系统由主轴、叶轮、轮毂、发电机及联轴器组成，通过叶轮捕获风能并转化为机械能，再经主轴传递至发电机实现电磁能量转换。其振动激励主要分为三类：机械激励为主要来源，包含转子不平衡、转轴弯曲、联轴器不对中、轴承

间隙异常等；电磁激励由定转子磁场相互作用产生，与电机极对数和转速密切相关；气动激励则由湍流风、塔影效应等引发气动不平衡，形成低频振动。三类激励耦合作用，使转子振动呈现非平稳、非线性与强噪声特征，显著提升了故障诊断难度^[3]。

（二）转子振动基本形式与数学模型

转子振动主要有径向、轴向和水平三种形式，其中径向振动占比超 80%，是监测重点。正常工况下转子振动表现为小幅值

稳定简谐振动,发生故障时幅值、频率和相位会明显突变,并伴随冲击、调制与倍频等特征。采用 Rayleigh-Ritz 法与有限元法建立转子横向振动动力学模型,将转子简化为连续梁模型,综合考虑陀螺效应、剪切变形及轴承支撑刚度,构建相应运动微分方程^[4]。模型可准确反映不同故障下的转子振动响应规律,为振动特征分析与故障识别奠定理论基础。

二、风力发电机转子典型故障振动特性分析

（一）转子质量不平衡故障

转子质量不平衡是最常见故障,占比约 35%,由叶片磨损、结冰、材质不均、装配偏差、局部脱落引发,导致质心与旋转中心偏移。振动特征:以一倍旋转频率($1 \times f_0$)振动为主,幅值显著增大且与转速平方成正比;径向水平、垂直方向振动相位差稳定($90^\circ \sim 180^\circ$);频谱中 $1 \times f_0$ 占绝对主导,高次谐波幅值较低。变工况下,振动幅值随风速、转速升高线性增大,时域波形呈规则正弦曲线,无明显冲击分量^[5]。

（二）转子不对中故障

分为平行不对中、角度不对中及组合不对中,由联轴器安装偏差、轴承沉降、转轴变形引发,占转子故障 20% 以上。振动特征:平行不对中以二倍旋转频率($2 \times f_0$)为主,伴随 $1 \times f_0$ 、 $3 \times f_0$ 谐波;角度不对中以轴向振动突出,频谱含 $2 \times f_0$ 及高频啮合成分;组合不对中呈现 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 、 $4 \times f_0$ 多频复合特征。振动幅值对负荷变化敏感,联轴器附近测点振动幅值最大,时域波形出现周期性“双峰”冲击^[6]。

（三）转子轴承故障

轴承作为转子核心支撑部件,故障占传动系统故障的 40%,易出现内/外圈点蚀、滚动体剥落、保持架损坏及润滑失效等问题。其振动具有固定特征频率,如 BPFI、BPFO、BSF、FTF。故障初期表现为 500~5000Hz 高频冲击,频谱出现特征频率及边频;后期冲击增强,时域出现周期性尖峰,峭度由 3~5 升至 7 以上。早期信号易被噪声掩盖,需降噪和解调处理^[7]。

（四）转子裂纹与转轴弯曲故障

转轴裂纹由疲劳损伤、过载、材质缺陷引发,弯曲由长期不平衡振动、热变形、外力冲击导致。裂纹特征:振动为非线性响应,频谱含 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 、 $3 \times f_0$ 及分数谐波,幅值随裂纹扩展周期性波动;启停过程中通过临界转速时,振动幅值突变且相位偏移。弯曲特征:以 $1 \times f_0$ 振动为主,幅值稳定且不随转速变化明显衰减,轴向振动增大,转子“弓形”回转,相位差固定。两类故障易引发转子碰摩,诱发剧烈振动与设备损毁^[8]。

（五）电磁激励引发的转子振动

由转子绕组短路、断路、铁芯松动、气隙不均引发,表现为电磁振动。振动特征:频率为电源频率(50Hz)及其倍频、转频与电源频率组合频率($f_0 \pm 50\text{Hz}$ 、 $2f_0 \pm 50\text{Hz}$);振动幅值与负荷电流正相关,空载时幅值显著降低;频谱中电磁特征频率突出,机械转频成分较弱。常与机械振动耦合,需通过负荷试验与信号分离区分故障类型^[9]。

三、转子振动信号分析方法

（一）时域分析方法

时域分析核心特征参数主要分为三类:幅值类参数包括峰值、有效值、峰峰值,可直观反映振动强度,故障发生时幅值通常会超过正常阈值 2~5 倍;统计类参数包含均值、方差、偏度与峭度,其中峭度对冲击类故障最为敏感,正常工况下峭度值约为 3,出现轴承点蚀、裂纹等故障时会显著大于 5;波形类参数如波形因子、脉冲因子、裕度因子,可有效区分规则周期性振动与随机冲击振动。但时域分析仅能判断振动强弱,无法获取频率信息,难以精准定位故障类型与位置,通常作为故障初判手段^[10]。

（二）频域分析方法

频域分析以快速傅里叶变换(FFT)为核心,将时域信号转换为频域分布,是风力发电机转子故障诊断的主流方法。频谱分析可确定振动主导频率,根据 $1 \times f_0$ 、 $2 \times f_0$ 等特征频率快速识别质量不平衡、联轴器不对中、轴承故障等典型问题。包络谱分析通过 Hilbert 变换对高频冲击信号进行解调,提取隐藏的低频故障调制频率,大幅提升早期微弱轴承故障的检出能力。功率谱分析则能够反映信号能量分布,突出稳定频率分量并抑制随机噪声干扰。频域方法可精准定位故障频率,但对风电机组变转速、变负载下的非平稳、时变信号适应性较差,容易出现频谱模糊与特征丢失问题。

（三）时频域联合分析方法

时频域联合分析可同时反映信号频率随时间的变化规律,适配风电机组变工况下的非平稳振动信号。其中,小波变换(WT)能多尺度细化分解信号,凭借优良时频局部化特性提取早期微弱故障冲击分量;经验模态分解(EMD)与集合经验模态分解(EEMD)可自适应将复杂信号分解为多个固有模态函数(IMF),高效分离噪声与故障分量,提升信号纯度。短时傅里叶变换(STFT)采用固定窗函数,直观展示频率随时间的演变趋势;Wigner-Ville 分布(WVD)时频分辨率高,但易产生交叉干扰,需配合平滑处理保障可靠性。

（四）智能分析方法

智能分析方法依托机器学习与深度学习实现故障特征自主学习与自动识别,显著提升诊断精度与智能化水平。支持向量机(SVM)在小样本条件下仍保持较高分类准确率,适用于非线性、高维振动特征分类。卷积神经网络(CNN)可直接从时频图谱中自动提取深层特征,故障诊断准确率可达 95% 以上。长短期记忆网络(LSTM)与双向门控循环单元(BiGRU)能够捕捉振动信号时序依赖关系,有效提升变工况下的诊断稳定性。多模态融合方法进一步联合振动、声发射、温度及 SCADA 运行数据,实现多源信息互补,将综合识别准确率提升至 99%,为风电机组转子智能故障监测提供了强有力支撑。

四、风力发电机转子振动监测系统设计

（一）系统总体架构

采用现场感知层—传输层—数据处理层—应用层四层分布式

架构，实现从信号采集到智能运维的全流程闭环管理。现场感知层以压电式加速度、速度及位移传感器为核心，布设于主轴轴承座、齿轮箱、发电机轴承座等关键测点，实时捕捉转子多维振动信息。传输层依托工业以太网、4G/5G 及 LoRa 通信，完成高可靠远程数据传输，支持边缘计算本地预处理以降低传输压力。数据处理层集成降噪、特征提取、故障诊断等核心算法，实现振动数据深度解析。应用层为运维人员提供状态监测、故障预警等功能，为机组安全稳定运行提供智能化支撑。

（二）传感器布设与数据采集

结合风机转子结构特点与故障传播路径，测点按关键部位全覆盖、多方向同步监测原则布设。齿轮箱前后轴承为核心支撑测点，可监测质量不平衡、不对中及轴承磨损、点蚀等故障；发电机驱动端与非驱动端轴承用于捕捉电磁振动及转子本体故障；联轴器可灵敏反映安装偏差与连接松动；机座测点用于监测整机振动传递特性。各测点均采用水平、垂直、轴向三向布置，全面采集多维振动信息，避免故障漏判。

数据采集参数上，采样频率设为 10~20kHz 以覆盖故障高频分量，防止频率混叠；采用 16~24 位高精度采样，提升微弱早期故障信号灵敏度。采集采用连续与触发结合模式，连续采集跟踪趋势，超限触发存储故障瞬态数据。同时同步采集转速、温度、负荷等参数，构建多源数据体系，削弱变工况干扰，为后续故障诊断提供标准数据基础。

（三）信号预处理技术

原始振动信号易受环境噪声、电磁干扰及变工况波动影响，需通过预处理技术提纯有效故障信息。噪声抑制环节采用自适应阈值 SVD、小波阈值降噪与 EEMD-CC 联合降噪方案，通过多算法互补抑制风场强背景噪声，将信号信噪比提升至 58dB 以上，突出微弱故障冲击特征。趋势项剔除采用最小二乘法与高通滤波结合方式，消除温度漂移、载荷缓慢变化等引发的慢变趋势项，避

免其掩盖真实故障频率成分。异常值处理采用 3σ 准则与箱线图联合判别法，自动识别并剔除传感器异常、瞬时冲击等造成的野点数据，保证信号平稳性与一致性。经过系统化预处理，可有效降低噪声干扰，提升信号质量，为后续特征提取与故障识别奠定可靠基础。

（四）故障诊断与预警流程

故障诊断与预警流程遵循“数据采集—信号预处理—特征提取—故障识别—分级预警—趋势预测”的闭环逻辑。首先通过多传感器同步采集振动、转速、负荷等多维度数据，经降噪、滤波、归一化等预处理后，提取时域、频域及时频域联合特征构建特征向量。采用阈值判断与智能模型分类相结合的方式，精准判定故障类型、发生位置及损伤程度。按照运行状态将预警等级划分为正常、注意、异常、故障、紧急停机五级，实现差异化预警管理。同时运用 ARIMA 与 LSTM 时序预测模型，对振动幅值及特征参数进行趋势推演，可提前 72 小时实现故障发展趋势预测，为运维人员预留充足处置时间，有效避免故障扩大化与非计划停机，提升机组运行可靠性。

五、结语

风力发电机转子振动特性分析与故障诊断是保障机组安全运行的关键技术。本文系统剖析转子多源激励机理与五类典型故障振动特征，构建时域、频域、时频域及智能算法联合分析方法，设计四层架构在线监测系统。工程实例表明，该方法可有效识别早期故障并实现精准预警。目前研究仍面临变工况非平稳信号处理、微弱故障特征提取、多故障耦合分离及极端环境传感器可靠性等难题。未来需深化多物理场建模、多源信息融合、边缘—云端协同及数字孪生技术研究，推动监测系统向智能、精准、可视化与预测化发展，为风电高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张利慧, 李殊瑶, 李晓波, 等. 基于时频域特征参数的风力发电机滚动轴承振动监测与故障诊断 [J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42 (02): 45-51.
- [2] 陈鹏, 陈雪峰, 李兵, 等. 风力发电机组振动状态监测与智能故障诊断 [J]. 振动与冲击, 2025, 44 (08): 112-120.
- [3] 林家欣, 杨立国, 吴文远, 等. 振动传感器信号调制下风电机组变频器转子偏心故障检测 [J]. 传感技术学报, 2025, 38 (04): 512-519.
- [4] 唐永维, 刘主红, 胡旭龙, 等. 基于多模态 2DKAN-BiGRU-ACBAM 风电机组主轴承多故障分类与诊断 [J]. 制造业自动化, 2026, 48 (02): 34-40.
- [5] 马越, 陈捷, 洪荣昌, 等. 风电机组在线振动监测系统及应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2026, 46 (01): 156-162.
- [6] 高阳, 潘宏侠, 吴升. 基于改进 SVD 与轻量化 CNN 的风力发电机转子故障诊断 [J]. 中国机械工程, 2025, 36 (23): 2817-2824.
- [7] 赵雷, 王磊, 张健. 大型风力发电机转子电磁-机械耦合振动特性分析 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28 (09): 78-86.
- [8] 刘杰, 何正嘉, 张西宁. 基于 EEMD 与谱峭度的风电机组转子早期故障特征提取 [J]. 机械工程学报, 2025, 61 (05): 134-142.
- [9] 王健, 李刚, 张磊. 基于 CAVF-Net 多模态信号融合的风电机组旋转轴承故障诊断 [J]. Entropy, 2026, 27 (03): 951.
- [10] 闫航瑞, 董广明, 王健. 风电机组转子连接结构松动振动特性与监测方法 [J]. 太阳能学报, 2025, 46 (07): 198-205.