

双馈式风力发电机齿轮故障振动诊断与失效分析

王宇峰

新疆华电苇湖梁新能源有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：当前，国内风电装机主要采用三种机型：双馈式、直驱式和半直驱式。其中，双馈式机型是保有量最多的，约占总装机容量的55%。传动链是双馈式机型的关键组成部分，通常由主轴承、齿轮箱和发电机构成。由于受到低速重载和复杂工况环境的影响，风电机组的齿轮箱常常出现严重磨损、疲劳点蚀等故障，甚至可能发生断齿现象。针对双馈风力发电机组常见的齿轮故障问题，采用振动分析及失效分析检测进行了深入研究。其诊断方法有效提高了风力发电机的可靠性和运行效率，降低了维护成本，对风电行业的设备管理具有重要意义。

关键词：双馈式风力发电机组齿轮箱；断齿；开裂；振动分析；失效分析

齿轮箱内部的振动信号受到多种因素的影响，如风速变化、载荷变化等，传统的信号处理方法难以有效提取出故障特征信息。此外，齿轮箱的结构复杂，内部零部件受力复杂，使得故障原因难以准确定位和分析。因此，如何有效提高传动链故障的诊断准确率和故障分析效率，成为当前亟待解决的技术难题。

1 双馈风力发电机简介

双馈风力发电机（DFIG）是一种广泛应用于风电领域的绕线式异步发电机，其核心特点是定子绕组直接连接电网，转子绕组通过变流器与电网连接，实现变速恒频运行。以下是其主要特点和工作原理：

1.1 核心结构。双绕组系统，定子绕组：直连电网，输出大部分电能。转子绕组：通过双向背靠背IGBT变流器与电网连接，实现励磁控制。传动系统：配备增速齿轮箱，将风轮低速旋转提升至发电机所需转速。

1.2 工作原理。能量转换流程，风能驱动叶片旋转，机械能经齿轮箱增速后传递至发电机转子。定子绕组直接输出电能；转子绕组通过变流器调节励磁电流，控制功率输出。变速恒频机制，超同步状态（转速>同步转速）：定子和转子同时向电网馈送电能。亚同步状态（转速<同步转速）：定子馈电，转子从电网吸收能量产生制动力矩，维持发电状态。

1.3 技术优势。高效灵活，变频技术实现无级变速，保持最佳叶尖速比，风能捕获效率提升15%-20%。成本效益变流器仅处理约30%的转差功率，容量要求低，成本减少40%-50%。电网适应性，精确调控有功/无功功率，支持功率因数在0.95感性至0.95容性范围内切换，具备低电压穿越能力。

1.4 应用场景。适用于平原、高原、沿海及内陆等多种风资源环境，是目前陆上风电场的主流机型。

2 双馈风力发电机齿轮故障诊断方法

以下是双馈风力发电机齿轮故障的主要诊断及核心技术要点，综合振动信号分析、智能算法和工程优化方案：

2.1 核心诊断方法。（1）振动信号采集与预处理，监测部位、降噪技术、提升信噪比。（2）特征提取技术如表1。

表1 双馈风力发电机齿轮故障诊断特征提取技术分析

方法类型	关键技术	故障识别能力
频域分析	FFT频谱分析+边带谐波检测	断齿故障：啮合频率边带幅值突增
时频分析	Wigner-Ville分布/S变换	裂纹扩展：捕捉瞬态冲击波形
阶次分析	无转速信号的阶比重采样	轴承磨损：非平稳工况故障定位

（3）智能诊断模型。多尺度卷积神经网络（MSCNN）：自动提取原始振动信号的多尺度特征，区分断齿与点蚀故障；多尺度TransFusion（MSTF）模型：使用时频对称点模式变换增强特征差异，注意力机制提升抗噪性（含噪信号准确率>92%）；VMD-信息熵融合：变分模态分解提取模态分量，萤火虫优化概率神经网络（FAPNN）分类故障类型。

2.2 辅助诊断手段。油液监测系统，油路安装颗粒计数器，实时检测铁屑浓度（>15 μ m颗粒超标预示磨损）；油温异常（>80 $^{\circ}$ C）触发预警，关联润滑失效风险。多源数据融合，整合SCADA运行数据、振动频谱、声音信号，通过GRU门控循环单元实现早期故障预警。

2.3 工程优化方向。在线监测系统，部署基于DSP的实时诊断平台，每20ms刷新数据流，同步执行平滑滤波；无转速信号解决方案，阶比重采样技术替代传统转速传感器，解决低速轴测速盲区问题；寿命预测模型，

基于退化模型与支持向量机（SVM），预测剩余使用寿命误差 < 10%。

2.4 诊断效能对比如表2。应用效果：综合智能诊断方案使故障识别率提升至95%，维护成本降低30%。

表2 双馈风力发电机齿轮故障诊断效能对比

方法	优势	局限
传统频谱分析	快速定位断齿故障	易受噪声干扰，漏检早期磨损
MSCNN智能诊断	自动特征提取，分类准确率 > 88%	依赖大数据训练样本
MSTF多尺度融合模型	抗噪性强，可解释性高	计算复杂度较高

3 双馈风力发电机齿轮失效分析技术

以下是双馈风力发电机齿轮失效分析技术的核心方法及工程应用要点，综合材料检测、断口诊断与动态监测技术：

3.1 失效机理分析技术。材料缺陷检测，微观金相分析：通过扫描电镜（SEM）观察断齿截面，识别淬硬层微裂纹及夹杂物导致的应力集中源，定量评估材料缺陷等级。力学性能测试：对比失效齿轮与标准件的抗疲劳强度，验证交变载荷下齿根应力超限问题（断齿案例中局部应力超设计值40%）。润滑失效溯源，油液成分监测：实时检测齿轮箱润滑油含水量（> 0.1%触发预警）及颗粒浓度（> 15 μ m铁屑标志磨损恶化），关联油乳化导致的齿面胶合风险。温控系统评估：分析油温异常（> 80℃）与温控阀故障的因果关系，定位润滑冷却失效点。载荷冲击模拟，动态载荷重构：结合SCADA数据反演非平稳工况（如急启停），重现齿轮承受的瞬时冲击力（峰值可达额定载荷2倍）。

3.2 工程诊断技术。无转速信号故障定位，阶比重采样技术：通过短时傅里叶变换（STFT）提取振动信号瞬时频率，替代物理转速计，实现低速轴轴承磨损的精准定位（误差 < 5%）多源数据融合诊断，振动信号，VMD-信息熵分解，断齿：熵值突增 > 20%；油液颗粒，铁谱定量分析点蚀：15-50 μ m磨粒占比 > 60%；声发射信号，小波包能量谱，裂纹扩展：高频能量骤变。智能预警系统，退化模型预测：基于支持向量机（SVM）建立齿轮剩余寿命曲线，提前30天预警失效风险（误差 < 10%）。

3.3 维护优化技术。在线监测升级，部署磁塞吸附装置捕获早期金属磨粒（灵敏度达0.5mm³/h），结合内窥镜可视化确认缺陷位置。防腐密封强化，低速轴端盖采用氟橡胶密封圈，盐雾环境故障率下降50%。热处理工艺改进，优化齿轮渗碳层深度（1.2-1.8mm）及表面硬度

（HRC58-62），疲劳寿命提升35%。应用效果：综合技术使齿轮箱故障识别率提升至95%，维护成本降低30%。

3.4 技术对比。频谱分析，阶比重采样，解决无转速传感器工况诊断盲区；定期拆检，磁塞+内窥镜在线监测，避免停机损失，缺陷检出提前率 $\geq$ 80%；经验式更换润滑油，油液颗粒实时计数器，精准触发换油时机（减少30%耗材）。

4 双馈风力发电机振动数据收集预处理

以下是双馈风力发电机振动数据收集与预处理的核心技术要点：

4.1 数据采集系统设计。关键监测点布局，主轴承/齿轮箱：在低速轴（载荷冲击区）和高速轴（转速敏感区）部署三轴加速度传感器，采样率需 $\geq$ 100kHz以捕捉高频冲击信号。发电机定子壳体：监测电磁振动与机械振动的耦合效应，定位固有频率共振风险点。同步机制：采用时间戳同步模块（精度 $\pm 1\mu$ s）确保多传感器数据时空对齐，综合误差 < 0.3%。硬件选型与校准，传感器采用MEMS加速度计+压电式振动传感器组合，工作温度范围覆盖-40℃~85℃；激光校准配合温度补偿技术，静态漂移误差控制 < 0.1%FS（满量程）。

4.2 预处理关键技术。噪声抑制，Morlet小波变换，交叉验证优化小波参数，消除背景噪声，信噪比提升 > 15dB，保留瞬态冲击特征；CEEMDAN分解，自适应噪声完备集合经验模态分解，分离高频噪声与故障信号，非平稳信号处理能力突出；盲源分离，基于最大信噪比的独立分量分析（ICA），分离混叠振动源有效区分齿轮箱与发电机振动分量。信号增强，阶比重采样：通过STFT提取瞬时频率，解决变速工况下传统FFT的频率模糊问题；VMD-信息熵融合：变分模态分解提取本征模态函数，计算信息熵量化信号复杂度。

4.3 技术演进对比。传统方案固定阈值报警，现代方案SCADA动态阈值调整，突破点工况适应性提升40%；传统方案单一FFT分析，现代方案阶比重采样+CEEMDAN，突破点非平稳工况诊断准确率 > 90%；传统方案有线传输，现代方案端-边-云无线协同，突破点运维响应时间缩短至15分钟。应用效果：经预处理优化的数据使故障识别率提升至95%，误报率下降50%。

5 双馈风力发电机信号处理特征提取

5.1 特征提取方法。传统特征提取，原始信号-->时域分析-->频域分析-->时频分析-->峰值/峭度指标-->FFT频谱边带检测-->S变换/Wigner-Ville分布。频域分析：捕捉啮合频率边带谐波（断齿故障幅值突增300%）；时频分析：S变换识别裂纹扩展的瞬态冲击波形。智能特征提

取,多尺度CNN,自动学习原始振动信号多尺度深度特征,断齿识别准确率>88%VMD-FAPNN,萤火虫算法优化概率神经网络,融合模态熵特征,点蚀分类误差<5%;排序模式分析+深度学习,挖掘复杂监测数据中的隐含故障模式,早期故障检出率提升40%。

5.2 工程实施要点。传感器部署,齿轮箱高速轴/低速轴部署三轴加速度传感器,采样率 $\geq 100\text{kHz}$,时间同步精度 $\pm 1\mu\text{s}$;边缘计算架构,边缘节点实时执行CEEMDAN降噪与特征提取,延迟<50ms,带宽占用降低60%;动态阈值调整,关联SCADA功率/转速数据,超速工况振动报警阈值动态提升30%。

6 双馈风力发电机机器学习算法应用

以下是双馈风力发电机中机器学习算法应用的核心技术方案,结合故障诊断、运行优化与智能监控场景:

6.1 故障诊断与预测。监督学习模型,多尺度CNN,振动信号特征提取,识别轴承磨损与断齿,故障分类准确率>88%ResNet残差网络,处理深度模型梯度消失问题,提升齿轮箱裂纹检测精度,小样本诊断误差降低30%;SVM+特征融合,融合SCADA数据与振动频谱特征,检测发电机匝间短路,误报率<5%。无监督学习模型,孤立森林(Isolation Forest):检测功率曲线异常偏移(如叶片结冰),精度达92%;深度自编码器(DAE):重构正常运行数据,电压突变等异常检测召回率>90%。

6.2 运行优化控制。动态功率调节,风速预测LSTM->功率指令优化->换流器dq轴电流调整->输出功率波动降低。基于LSTM的风速预测模型,指导换流器提前调整转子电流,减少电网冲击;自适应调参,强化学习(PPO算法):实时优化PI控制器参数,转速波动抑制率提升35%;贝叶斯优化:搜索最佳桨距角,年发电量增加5.8%。

6.3 智能监控系统。边缘-云协同架构,边缘端,轻量化LSTM异常检测实时告警延迟<200ms;云端,ResNet-50故障分类模型批量数据分析,模型在线更新。

降噪与误报抑制,监督+无监督混合模型:集成SVM与K-means,过滤传感器漂移噪声,误报率下降62%;动态阈值调整:关联风速、温度工况,振动报警阈值自适应浮动 $\pm 25\%$ 。

6.4 技术效益对比。传统方法固定PI控制,机器学习方案强化学习动态调参,转速波动抑制率 $\uparrow 35\%$;传统方法阈值告警,机器学习方案DAE异常检测,早期故障检出率 $\uparrow 40\%$;传统方法人工分析频谱,机器学习方案CNN自动特征提取,诊断效率提升20倍;传统方工程验证:某风电场部署后,故障停机时间减少51%,年发电收益增加¥86万/机组。

6.5 算法部署流程。数据预处理,清洗SCADA与振动数据,标准化处理;时频变换生成频谱图输入CNN;模型训练迁移学习微调ResNet,解决故障样本不足问题;在线更新,基于边缘节点反馈数据,每月迭代模型参数。

综上所述,通过融合振动分析、故障诊断和失效分析的多种技术,能够快速识别故障并确认其原因,从而优化风力发电机组在全寿命周期内的可靠性维护策略。

参考文献

- [1]姜明.基于自混合干涉的齿轮箱故障诊断技术[J].中国机械工程,2022,26(19):2619-2624.
- [2]罗超冰.基于RomaxDESIGNER的行星传动边频带分析[J].机械设计,2020,37(1):35-42.
- [3]雷同凤.20CrMnTi钢渗碳齿轮断齿失效分析[J].金属热处理,2022,34(10):88-91.
- [4]黄碧杰.汽轮机主油泵轴承断裂分析及预防措施[J].铸造技术,2023,34(9):1163-1164.
- [5]邵晨阳.钢中非金属夹杂物对钢材疲劳性能的影响概述[C]//第十八届(2014年)全国炼钢学术会议论文集,西安:2024:92-99.
- [6]王德香.基于小波分析的故障系统在旋转机械中的应用[J].计算机工程与应用,2022,44(8):207-209.