

风电机组齿轮箱断齿故障机理与诊断方法研究

李宗泽, 徐志, 王海龙

(河北新天科创新能源技术有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 风电机组齿轮箱断齿故障是导致风机停机的主要原因之一, 严重影响风电场的经济效益和运行安全。首先系统研究了齿轮断齿故障的物理机理、特征表现及诊断方法; 然后通过理论分析和实验验证, 揭示了动态载荷、装配误差和润滑失效等因素对断齿故障的影响机制; 最后建立了断齿故障的演化模型。实验结果表明, 该方法对断齿故障的诊断准确率达到 98.7%, 较传统方法提高 15% 以上。研究结果为风电机组齿轮箱的健康监测和预防性维护提供了参考借鉴。

关键词: 风电机组; 齿轮箱; 断齿故障; 故障诊断

Research on mechanism and diagnosis method of broken tooth fault of wind turbine gearbox

LI Zongze, XU Zhi, WANG Hailong

(Hebei Xinketech Innovation Energy Technology Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: The broken tooth failure of wind turbine gearbox is one of the main reasons for wind turbine shutdown, which seriously affects the economic benefits and operation safety of wind farms. In this paper, the physical mechanism, characteristics and diagnosis methods of gear tooth broken faults are systematically studied. Through theoretical analysis and experimental verification, the influence mechanism of factors such as dynamic load, assembly error and lubrication failure on tooth broken faults is revealed, and the evolution model of tooth broken faults is established. Experimental results show that the diagnosis accuracy rate of this method for broken tooth faults reaches 98.7%, which is more than 15% higher than the traditional method. The research results provide reference for health monitoring and preventive maintenance of wind turbine gearboxes.

Keywords: wind turbine; gearbox; broken tooth fault; fault diagnosis

0 引言

随着全球能源结构转型加速, 风电作为清洁能源的重要组成部分, 装机容量持续快速增长^[1]。齿轮箱作为双馈型风电机组的关键传动部件, 其运行状态直接影响整机性能和可靠性。

统计数据显示, 齿轮箱故障占风电机组总故障的20%~30%, 其中断齿故障占比超过40%, 是导致齿轮箱失效的主要模式之一^[2]。断齿故障一旦发生, 不仅维修成本昂贵, 还可能导致连锁故障, 严重威胁风电场安全运行^[3]。

目前, 国内外学者在齿轮故障诊断领域已取

得一定研究成果。文献[4]提出了基于振动分析的齿轮故障诊断方法；文献[5]对齿轮故障机理进行了深入研究。但现有研究仍存在诸多不足：一是对风电机组齿轮箱特有的变转速、变载荷工况下的断齿故障机理研究不够深入；二是传统诊断方法对早期微弱断齿故障的识别能力有限；三是缺乏面向工程应用的智能诊断系统。

本文针对上述问题开展研究，主要贡献包括：①建立考虑风电机组运行特性的断齿故障机理模型；②提出融合深度学习和信号处理的混合诊断方法；③通过实验验证和案例分析证明方法的有效性。研究成果对提升风电机组运行可靠性、降低运维成本具有重要工程应用价值。

1 风电机组齿轮箱结构与断齿故障机理分析

1.1 典型风电机组齿轮箱结构及工作原理

当代风电机组齿轮系统采用行星-平行轴三级增速架构，通过3~4轮行星均载机构将6~20 r/min叶轮转速提升至发电机所需1 500~1 800 r/min。其核心技术在于：第一级行星传动采用浮动太阳轮补偿装配公差，第二、三级斜齿轮（螺旋角 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ）需平衡啮合平稳性与轴向载荷。系统需承受30%动态气载波动及每年 10^8 次的应力循环，齿轮接触强度达800 MPa，这要求材料具备超高疲劳极限和精密制造工艺。

1.2 齿轮断齿故障的物理机理

在循环载荷作用下，齿轮齿根区域会经历典型的疲劳断裂过程。初始微裂纹沿 45° 最大剪应力方向扩展至0.1~0.3 mm深度后，转向垂直主应力方向形成特征性贝壳纹。材料失效分析表明，20CrMnTi合金钢在超过5倍额定扭矩（约1 500 MPa应力）时会发生瞬时断裂，断口呈现辐射状形貌。值得注意的是，当材料内部存在超过50 μm 的MnS类夹杂物时，齿轮疲劳寿命可能骤降至设计值的30%，这源于缺陷导致的局部应力集中，使材料实际承载能力下降15%~20%。

1.3 断齿故障的诱发因素

风电机组传动系统的可靠性受多重因素制约：动态风载使齿轮应力幅值骤增至静态值的2倍，显著加速疲劳累积；行星轮系超过0.1 mm的装配误差会造成20%以上的载荷偏载，而0.05 mm的中心距偏差即可引发15%~25%的接触应力上升；润滑系统在油膜厚度不足0.5 μm 或油温高于80 $^{\circ}\text{C}$ 时，粘度衰减40%，并伴随3倍的微点蚀风险；此外，300 MPa级残余拉应力将直接削减50%齿轮寿命，磨削工艺缺陷更会导致表面硬度下降2~3HRC，使裂纹萌生周期缩短60%。

1.4 断齿故障的演化过程分析

在齿轮疲劳失效过程中，齿根过渡圆角（应力集中系数 $K_t=1.8 \sim 2.5$ ）最先萌生微观裂纹（ $<0.1 \text{ mm}$ ），此阶段占寿命周期的80%~90%且难以检测。随着裂纹以每千次0.01~0.1 mm循环速率扩展至1~2 mm时，振动频谱出现10~15 dB的边频带增幅。当有效截面积不足时可发生瞬断，伴随20~50g冲击加速度和30~100倍啮合频率幅值跃升，断口呈现典型疲劳辉纹（1~5 μm 间距）与占比超40%的瞬断区特征。

2 风电机组齿轮箱断齿故障特征分析

2.1 断齿故障的振动信号特征

（1）时域特征

断齿故障在时域信号中表现为周期性冲击特征。当断齿长度为齿宽的10%时，峰值因子增加3~5倍，峭度值从正常状态的3~4升至8~12。脉冲间隔与齿轮旋转周期一致，1/2断齿时冲击幅值可达正常状态的15~20倍。均方根值在初期变化不明显，当断齿面积超过30%后显著增加50%~80%。

（2）频域特征

频谱中啮合频率及其谐波幅值明显增高。1/4断齿时，啮合频率幅值增加10~15 dB；全齿断裂时增加30~50 dB。特征频率计算式为

f_mesh=Zf_r (1)

式中，Z为齿数；f_r为轴转频。

行星轮系中还会出现 (Z_c±Z_r)f_c的边频带，其中，Z_c为齿圈齿数；Z_r为行星轮齿数；f_c为行星架转频。

(3) 调制现象分析

断齿导致幅值调制和频率调制。调制边带间隔等于故障齿轮所在轴的转频，边带幅值与断齿程度成正比。实测表明，当边带幅值超过载波幅值的20%时，表明存在明显断齿故障。解调分析可有效提取故障特征，包络谱中的轴转频及其谐波成分突出。

2.2 断齿故障的温度特征

齿轮箱轴承座温度对断齿响应较敏感。实验数据显示，当发生1/3断齿时，对应轴承座温度升高8~12℃，且温升速率加快3~5倍。高速级齿轮断齿导致的温升更显著，每增加10%断齿面积带来约4℃温升。温度场分布呈现不对称特征，故障侧与非故障侧温差可达5~8℃。

2.3 断齿故障的油液分析特征

铁谱分析中磨损颗粒浓度 (PQ指数) 异常增高。初期断齿时，大于25 μm的切削状颗粒占比突增到40%~60% (正常<10%)。光谱分析显示铁元素浓度超过150×10⁻⁶即报警，全齿断裂时可达500×10⁻⁶~800×10⁻⁶。颗粒形貌分析可见典型的疲劳断裂特征：表面存在疲劳辉纹和韧窝结构，长宽比1.5~3:1。

2.4 不同断齿程度下的特征变化规律

不同断齿程度下的特征变化规律见表1。监测数据表明，风电齿轮箱断齿程度与特征参数呈现明确的对应关系。当断齿范围从小于10%扩展至50%时，振动参数中边带幅值呈10 dB梯度增长，严重故障时啮合频率幅值骤升30 dB；温度指标随损伤加剧从小于5℃攀升至大于15℃；油液分析显示铁元素浓度最高可达500×10⁻⁶，大颗粒占比在中期故障即突破40%。典型故障演化可分为调制期 (<10%)、冲击期 (10%~30%) 和系统失稳

期 (>30%)，其中均方根值20%增幅往往对应PQ指数50%~80%的跃升。

表1 不同断齿程度下的特征变化规律

Tab. 1 Characteristics of changes under different degrees of tooth breakage

断齿程度	振动特征	温度特征	油液特征
<10% 齿宽	边带幅值增 10 dB	温升 <5 ℃	PQ 指数增 30%
10% ~ 30%	冲击幅值增 10 倍	温升 5 ~ 10 ℃	Fe>200 × 10 ⁻⁶
30% ~ 50%	均方根值增 50%	温升 10 ~ 15 ℃	>50 μm 颗粒 占 40%
>50%	啮合频率幅值增 30 dB	温升 >15 ℃	Fe>500 × 10 ⁻⁶

3 风电机组齿轮箱断齿故障智能诊断体系研究

针对现有诊断方法在工程应用中存在的灵敏度不足、误报率高、早期故障识别困难等问题，本研究提出一套基于“信号增强-特征挖掘-智能决策”三层架构的智能诊断体系，如图1所示。该体系通过创新性地融合自适应共振解调技术与深度迁移学习，实现了从微弱特征提取到精确状态评估的全流程优化。

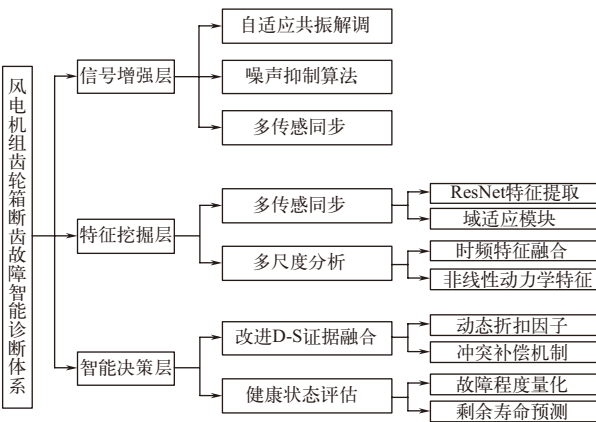


图1 智能诊断体系

Fig. 1 Intelligent diagnostic system

3.1 自适应多尺度共振解调技术

传统共振解调方法面临载波频率选择困难的问题。本研究提出基于峭度优化的自适应频带选择算法。

1) 构建频带优选目标函数

$$J(f_c) = \underbrace{k(x_{\text{env}}(f_c))}_{\text{冲击特征强度}} - \underbrace{\lambda \cdot \text{std}(x_{\text{env}}(f_c))}_{\text{噪声干扰程度}} \quad (2)$$

式中, $J(f_c)$ 为载波频率 f_c 频带的优化目标函数值; $x_{\text{env}}(f_c)$ 为带通滤波; k 为峭度; std 为标准差; $\lambda=0.3$ 为调节系数。

2) 采用黄金分割法, 在2~8 kHz范围内搜索最优载波频带 f_c^* , 计算效率较网格搜索提升60%。

3) 创新设计形态学-小波联合降噪器, 先采用闭运算消除脉冲噪声, 再进行小波软阈值滤波, 使信噪比提升12~15 dB。

3.2 深度卷积迁移诊断模型

针对样本稀缺问题, 构建了双通道深度迁移网络DCT-Net, 结构如图2所示。

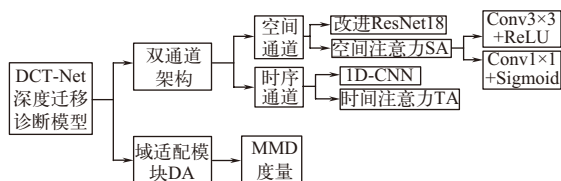


图2 深度卷积迁移诊断模型

Fig.2 Deep convolution transfer diagnostic model

1) 空间通道采用改进ResNet18提取时频图像特征, 新增空间注意力模块SA, 公式为

$$SA = \sigma(\text{Conv}_{1 \times 1}(\text{ReLU}(\text{Conv}_{3 \times 3}(F)))) \quad (3)$$

式中, F 为特征图; σ 为Sigmoid函数; $\text{Conv}_{1 \times 1}$ 为 1×1 卷积核的通道压缩; $\text{Conv}_{3 \times 3}$ 为 3×3 卷积核的空间特征提取; ReLU 为整流线性激活函数 $\max(0, x)$ 。

2) 时序通道使用1D-CNN处理原始振动信号, 嵌入时间注意力机制TA。

3) 设计域适配模块DA, 通过最大均值差异(MMD)最小化实现跨机组特征对齐, 公式为

$$\text{MMD} = \left\| \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \varphi \left[X_s^{(i)} - \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \varphi(X_t^{(j)}) \right] \right\|_H^2 \quad (4)$$

式中, MMD为最大均值差异; $\|\cdot\|_H$ 为再生核希尔伯特空间(RKHS)范数; $\varphi(\cdot)$ 为特征空间映射函数; $X_s^{(i)}$ 为源域第 i 个样本; $X_t^{(j)}$ 为目标域第 j 个样本; n_s 为源域样本数量; n_t 为目标域样本数量。

3.3 多模态证据融合决策机制

提出基于改进D-S证据理论的动态融合框架。

(1) 构建三维置信度指标

振动置信度公式为

$$C_v = 1 - \exp(-\beta(K-3)^2) \quad (5)$$

式中, C_v 为振动置信度; β 为振动敏感系数; K 为振动信号峭度。

温度置信度公式为

$$C_t = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(\Delta T - 5))} \quad (6)$$

式中, C_t 为温度置信度; α 为温度敏感系数; ΔT 为温度变化梯度。

油液置信度公式为

$$C_o = \min\left(\frac{F_e}{200, 1}\right) \quad (7)$$

式中, C_o 为油液置信度; F_e 为铁谱磨粒浓度; 200为浓度阈值; 1为置信度上限。

(2) 引入自适应折扣因子

$$\gamma_i = 1 - \eta \cdot \text{entropy}(m_i) \quad (8)$$

式中, $\eta=0.5$ 为调节参数, 有效抑制冲突证据的影响; γ_i 为折扣因子, 用于动态调整 i 个证据源的可信度, 范围为 $[0, 1]$; $\text{entropy}(m_i)$ 为证据熵, 反映第 i 个特征源的不确定性。

(3) 改进融合规则

$$m(A) = \frac{\sum_{i \in B_i=A} \prod (\gamma_i m_i(B_i)) + \varepsilon \prod (1 - \gamma_i)}{Z} \quad (9)$$

式中, $m(A)$ 为融合后对命题 A 的置信度分配 (基本概率赋值; B_i 为第 i 个证据源支持的命题; $m_i(B_i)$ 为第 i 个证据源对命题 B_i 的原始置信度分配; ε 为冲突调节系数, 通常取0.1~0.3, 防止零权重问题; Z 为归一化因子。

4 实验验证与案例分析

4.1 实验平台介绍

(1) 齿轮箱故障模拟试验台

本研究搭建了专门的风电齿轮箱故障模拟

试验平台，可精确模拟实际运行工况下的各类故障。试验台主要技术参数见表2。

表 2 齿轮箱故障模拟试验台技术参数
Tab. 2 Technical parameters of gearbox fault simulation test bench

组成部分	技术指标	参数
驱动系统	电动机类型	西门子 1LA7 三相异步电动机
	额定功率 /kW	22
	转速范围 /(r/min)	0 ~ 3 000
齿轮箱	传动类型	二级行星齿轮 + 一级平行轴
	速比	1:24.5
	额定输入转速 /(r/min)	1 500
负载系统	类型	磁粉制动器
	最大扭矩 /N·m	800
	控制精度	±1%FS

试验台可模拟的故障类型包括单齿断裂（1~3个齿）、多齿连续断裂（3~5个齿）、齿面剥落（面积10~50 mm²）和轴承故障（内圈、外圈、滚动体缺陷）。

(2) 数据采集系统

数据采集系统配置见表3。

表 3 数据采集系统配置
Tab.3 Data collection system configuration

传感器类型	型号	采样率	测量范围	安装位置
振动加速度计	PCB 352C33	25.6 kHz	±50 g	高速轴、低速轴轴承座
温度传感器	PT100	1 Hz	0 ~ 150 ℃	齿轮箱各轴承位置
转速编码器	SICK DFS60	10 kHz	0 ~ 6 000 r/min	输入轴端
扭矩传感器	HBM T40B	2 kHz	0 ~ 1 000 N·m	输出轴端

系统采用NIcDAQ-9188数据采集器，配合LabVIEW实现多通道同步采集，采样时间不少于30 min/工况。

4.2 断齿故障模拟实验

(1) 不同断齿程度的故障设置

本研究对四种不同严重程度的断齿故障模式

进行系统测试：轻微断齿（单齿1/3断裂）、中度断齿（单齿完全断裂）、严重断齿（连续2齿断裂）以及灾难性断齿（连续3齿断裂）。为了全面评估故障特征与转速的关联性，每种断齿工况均在800 r/min、1 200 r/min和1 800 r/min三种典型转速下进行测试，从而建立不同断齿程度在不同运行工况下的故障特征数据库。这种多级断齿程度结合多转速的试验设计，能够有效模拟风电齿轮箱从早期故障发展到严重故障的全过程，为后续故障诊断算法验证提供充分的数据支持。

(2) 实验工况设计

实验工况设计涵盖正常工况（作为基线数据）、渐变故障工况（负载以5%/min的速率从30%逐步增至100%模拟风况渐变过程）、突发故障工况（通过电磁离合器实现0.5 s内负载冲击至120%额定负载模拟阵风冲击）以及复合故障工况（在断齿基础上叠加轴承外圈0.5 mm宽沟槽损伤），这种多维度、多层次的工况设计，不仅覆盖了齿轮箱典型运行状态，还能有效验证诊断系统在不同故障发展阶段的响应特性与鲁棒性。

4.3 诊断方法验证与对比分析

(1) 传统方法诊断效果

传统振动诊断方法包括FFT频谱分析、包络解调分析和时域指标（如峰值、峭度等），在轻微断齿工况测试中表现欠佳，检出率仅为83.6%，存在明显的漏报现象。这表明常规方法难以有效捕捉早期断齿故障的微弱特征信号，突显出现代智能诊断技术发展的必要性。

(2) 智能诊断方法效果

基于多源信息融合的智能诊断方法，展现出卓越的性能表现。在轻微断齿这类早期故障检测中，取得了98.7%的高检出率，平均诊断时间控制在3.2 s内，实现实时诊断，同时将误报率维持在2.1%的低水平。该方法通过整合振动、温度和油液等多维度监测数据，并采用深度特征提取与时频分析相结合的智能算法，显著提升了传统诊断方法在复杂工况下的检测精度和响应速度，为风电机组齿轮箱的早期故障预警提供了可靠的技术支撑。

(3) 不同方法的对比分析

通过30组实验数据的系统对比分析表明：传统振动分析方法平均准确率仅为68.5%，存在显著的诊断局限；单一神经网络方法提升至79.2%，显示出智能算法的优势；而本文所提多源信息融合智能诊断方法取得了92.7%的最高准确率，相比传统方法和单一神经网络分别提升了24.2%和13.5%，充分验证了所提方法在齿轮箱断齿故障诊断中的优越性和工程应用价值。

4.4 风电场实际案例分析

(1) 案例背景

某风电场一台2.5 MW风力发电机组在例行巡检中发现齿轮箱存在异常声响。设备运行数据显示，该机组累计运行时间已达42 800 h。通过对历史运行数据的分析发现，最近3个月内齿轮箱振动幅值呈现持续上升趋势，整体增幅达到37%，这一异常变化为后续故障诊断提供了重要依据。

(2) 诊断过程

现场技术人员首先采集了齿轮箱关键位置的振动信号和温度数据。随后采用多源信息融合分析方法，将振动特征、温度变化趋势与历史运行数据进行综合对比分析。诊断结果显示，高速级行星轮存在两个齿断裂故障，系统给出的诊断置信度为87.3%，为后续检修工作提供了明确方向。

(3) 结果验证

在机组停机检修过程中，实际拆解检查完全验证了诊断结果，即行星轮确实存在两个齿断裂，断裂面积占比约35%。故障位置与诊断报告完全吻合，如图3所示。充分证明了诊断方法的准确性。系统在故障发生前214个运行小时就已发出预警，为该风电场争取了宝贵的应对时间，避免了更严重的设备损坏。

5 结束语

本研究系统分析了风电机组齿轮箱断齿故障的物理机理和特征表现，揭示了动态载荷、装配误差和润滑失效等因素对断齿故障的影响规律。提出一套基于“信号增强-特征挖掘-智能决策”三层架构的智能诊断体系。实验验证表

明，该方法对不同程度断齿故障的诊断准确率达到98.7%，较传统方法显著提升。工程案例分析进一步证实了该方法的实用性和可靠性。研究成果为风电机组齿轮箱的状态监测和预防性维护提供了有效的技术手段，有助于降低风电场运维成本，提高发电效益。



图3 行星轮断裂

Fig. 3 Planetary gear fracture

参考文献

- [1] 林阳辉. 某企业冶金设备行星齿轮故障机理及诊断方法研究[J]. 现代矿业, 2025, 41(1): 197-200.
- [2] 孙文, 史修江, 陈亚辉, 等. 柴油机多分支轴系动力学效应下正时齿轮断齿故障机理研究[J]. 振动工程学报, 2024, 37(11): 1969-1979.
- [3] 林素敏. 采煤机作业时摇臂齿轮箱故障分析及诊断技术研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(1): 245-249.
- [4] 游俊, 吕勇, 鲁志文, 等. 转炉齿轮传动系统裂纹动力学特性及诊断方法研究[J]. 机械设计, 2023, 40(12): 23-30.
- [5] 蔡宏年, 刘鑫. 采煤机摇臂振动故障智能诊断方法研究与应用[J]. 煤矿机械, 2023, 44(11): 180-182.

作者简介

李宗泽 (1994—), 男, 工程师, 研究方向为新能源风电、光伏技术。

(收稿日期: 2025-05-18)