

结构缺陷与监测盲区耦合下的风电叶片早期断裂机理研究

陈志荣, 廖永浩, 李杰, 钟诗琪

华电电力科学研究院有限公司 浙江杭州

【摘要】针对风电叶片低龄断裂问题, 本文基于某风电场#10 风机叶片断裂实证案例(运行 27 个月), 通过多源数据融合分析, 揭示“设计缺陷-损伤演化-监测失效”耦合机制。研究发现: 原始设计叶片(型号 A)在 12-19 m 关键区铺层薄弱(仅 2 层双轴布), 致局部应力集中系数达 1.83, 诱发“基体发白→纤维开裂→宏观断裂”三阶段演化路径; 90%同类缺陷集中分布于该区域, 且现有监测体系对前两阶段损伤集体失效(振动灵敏度不足、SCADA 参数淹没于噪声、视频缺乏智能识别)。据此构建三元耦合失效模型, 提出量化判据: 当设计薄弱度(Dw)与监测灵敏度(Sm)满足 $Dw \times (1 - Sm) > 0.7$ 时, 预警窗口关闭。进一步提出“损伤容限设计-多物理场感知-数字孪生预警”三位一体防护体系: 关键区铺层强化(2 层→4 层)使损伤萌生循环次数提升 3.2 倍; FBG+声发射融合监测可提前 14 天识别亚临界裂纹。本研究为大型复合材料结构从“被动检修”向“主动防护”范式转变提供理论依据与技术路径。

【关键词】风电叶片; 复合材料; 疲劳损伤演化; 结构健康监测; 耦合失效; 损伤容限设计; 数字孪生

【收稿日期】2026 年 3 月 12 日

【出刊日期】2026 年 4 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260023

Structural defects coupled with monitoring blind spots: A study on the early fracture mechanism of wind turbine blades

Zhirong Chen, Yonghao Liao, Jie Li, Shiqi Zhong

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】 Addressing the issue of premature fracture in wind turbine blades, this paper investigates an empirical case of blade fracture (after 27 months of operation) from a #10 wind turbine in a wind farm. Through multi-source data fusion analysis, the coupled mechanism of “design flaw-damage evolution-monitoring failure” is revealed. The study finds that the original blade design (Model A) exhibits laminate weakness in the critical 12–19 m region (only 2 layers of biaxial fabric), resulting in a local stress concentration factor of 1.83 and inducing a three-stage evolution path: “matrix whitening → fiber cracking → macroscopic fracture”. Ninety percent of similar defects are concentrated in this region, and the current monitoring system collectively fails to detect the first two stages of damage due to insufficient vibration sensitivity, SCADA parameter fluctuations being masked by operational noise, and the lack of intelligent video recognition. Accordingly, a tripartite coupled failure model is constructed, proposing a quantitative criterion: when the design weakness (Dw) and monitoring sensitivity (Sm) satisfy $Dw \times (1 - Sm) > 0.7$, the early warning window closes. Furthermore, an integrated protection system of “damage tolerance design — multi-physics field sensing — digital twin early warning” is proposed. Strengthening the laminate in the critical region (from 2 to 4 layers) increases the number of cycles to damage initiation by 3.2 times. Fusion monitoring using FBG and acoustic emission enables the identification of subcritical cracks 14 days in advance. This research provides a theoretical basis and technical pathway for shifting the safety paradigm of large composite structures from “passive maintenance” to “active protection”.

【Keywords】 Wind turbine blade; Composite material; Fatigue damage evolution; Structural health monitoring (SHM); Coupled failure; Damage tolerance design; Digital twin

作者简介: 陈志荣(1982-)男, 汉族, 福建莆田人, 高级工程师, 主要从事电厂金属监督和管理; 李杰(1996-)男, 汉族, 湖北恩施人, 中级工程师, 主要从事电厂新能源风电监督和技术支持工作。

引言

随着风电产业向深远海、大容量方向快速发展,超长复合材料叶片的服役安全已成为制约行业可持续发展的关键瓶颈。玻璃纤维增强复合材料(GFRP)叶片在极端环境与复杂载荷谱的长期耦合作用下,其内部损伤的萌生、积累与演化过程呈现显著的时变性和隐蔽性特征^[1],传统基于定期检修的安全保障模式面临严峻挑战^[2]。现有研究多聚焦于叶片材料疲劳性能单一维度,或孤立分析监测技术有效性,缺乏对设计缺陷、损伤演化与监测盲区三者耦合机制的系统揭示,导致“为何同类缺陷集中爆发”“为何监测体系集体失效”等核心问题悬而未决。

近期,某风电场一台大容量风电机组在低运行年限(约27个月)内发生叶片断裂事故。关键证据链显示:断裂位置与前期巡检裂纹高度吻合;监控视频记录断裂前裂纹扩展轨迹;同型号叶片缺陷统计表明90%集中分布于12-19 m区域。这一系列特征确证失效源于深层系统缺陷,而非偶然因素。

本文立足于该典型案例,通过多源数据融合分析,旨在实现以下研究目标:(1)阐明由设计缺陷导致的复合材料损伤早期萌生与加速演化机理;(2)剖析现有监测体系对渐进性结构损伤的识别盲区与预警失效根源^[3];(3)构建“设计-损伤-监测”耦合失效模型;

(4)提出面向损伤早期感知与主动干预的系统性提升策略。本研究的创新在于首次建立量化耦合判据,并推动风电叶片安全保障从“破损-安全”向“损伤-感知-预警-控制”主动防护范式转变,为大型复合材料结构全生命周期安全管理提供理论依据与技术路径。

1 事故概况与多维度分析方法

1.1 事故概况

2025年10月18日18:29:44,某风电场#10风机报“机舱振动开关1动作故障”,触发安全链停机。现场检查确认:断裂叶片于距叶根约15 m处发生完全断裂,断裂部分在旋转过程中撞击相邻叶片,引发连锁损伤。该机组累计运行时长约27个月,远低于设计寿命,属典型早期疲劳失效。时序分析表明:主断裂叶片在方位角90°位置先发生断裂(18:29:44),11秒后相邻叶片在方位角25°位置发生二次断裂。

1.2 系统性分析方法论

1.2.1 时序动力学反演

基于SCADA数据重构毫秒级时序:振动告警触发后,主断裂叶片变桨电流由7.8 A突增至115.45 A,对应时刻(2025年10月18日18:29:44)可判定为

初始断裂发生时间;11秒后(18:29:55),断裂叶片在旋转过程中撞击相邻叶片,致其结构失效并折断,对应变桨电流突增至50.6 A。

1.2.2 损伤视觉证据链

调取监控视频分析发现:事故前两日(2025年10月16日13:45),主断裂叶片前缘距叶根15 m处已存在弦向裂纹,并沿主梁向叶根方向扩展至约7 m位置。该影像记录直接证实了断裂发生前损伤的存在。

1.2.3 断口显微组织学分析

断裂源区取样截面检查显示:在承受最大气动弯矩的15 m截面处,芯材表面玻纤铺层仅为2层双轴布,远低于行业标准要求(IEC 61400-5:2020第7.3.2条)^[4]。

1.2.4 群体缺陷空间统计学分析

对同型号81支叶片的176项缺陷进行空间映射与核密度估计,结果显示:90%的“发白”与裂纹缺陷集中分布于距叶根12-19 m区域(K-S检验: $D=0.38$, $p=0.002$)^[5],证实该区域为共性薄弱区。

1.2.5 迭代设计对比取证

监控视频回溯分析表明,事故前两日,主断裂叶片前缘距叶根15 m处已存在明显弦向裂纹,并沿主梁向叶根方向扩展至约7 m处。该影像记录为断裂前损伤的客观存在提供了直接视觉证据,确证损伤演化具有明确的时序连续性。进一步对比原始设计叶片(型号A)与改进设计叶片(型号B)的关键结构参数:型号B将芯材长度由14 m延长至21 m,芯材表面铺层由2层双轴布增至4层以上,并将主梁腹板芯材由PET更新为PVC。上述改进措施均精准聚焦于12-19 m高应力薄弱区域,其设计优化逻辑与缺陷空间统计结果(90%缺陷集中分布于该区域)高度吻合。该“问题识别—针对性改进—性能提升”的闭环验证路径,从反向工程角度确证原始设计缺陷是诱发早期断裂的根本原因^[6],亦为损伤容限设计理念提供了实证支撑。

2 结果与讨论

2.1 设计缺陷主导的损伤早期化与加速演化

断口显微分析与群体缺陷统计结果共同证实,型号A叶片在12-19 m高应力区域存在铺层设计薄弱问题,导致局部应力集中系数高达1.83(有限元分析验证),显著降低疲劳损伤萌生阈值。其损伤演化过程呈现典型三阶段特征:

(1)阶段I(基体损伤期):维修记录表明,距叶根15.6-15.9 m处已出现“布层裂纹”,对应基体微

裂纹萌生与纤维/基体界面脱粘;

(2) 阶段II (裂纹扩展期): 监控视频记录显示, 裂纹由距叶根 15 m 处沿主梁向叶根方向扩展至 7 m 处, 表征纤维断裂与裂纹亚临界扩展行为;

(3) 阶段III (失稳断裂期): 结构承载能力骤降, 引发瞬时断裂。

统计分析进一步表明, 型号 A 叶片普遍在低运行年限内即进入阶段II, 充分印证设计缺陷所导致的损伤“早期化”与空间分布“集中化”特征, 为耦合失效机理提供关键实证支撑^[7]。

2.2 监测预警体系的系统性失灵

(1) 阶段I “感知沉默”: 基体微裂纹引发的结构刚度衰减 < 0.5%, 低于商用振动监测系统检测下限 (1.5%); SCADA 监测参数波动 (标准差 $\sigma=1.2\%$) 被风速工况噪声 (标准差 $\sigma=3.8\%$) 完全掩盖; “发白”类损伤因位于叶片内腔且视觉对比度低, 人工巡检漏检率高达 76%。

(2) 阶段II “识别失败”: 裂纹扩展引起的模态参数变化未被有效提取; 监控视频中已记录的裂纹影像因缺乏智能识别算法未能触发预警; 变桨电流异常波动模式 (与损伤扩展的相关系数 $r=0.89$) 未与损伤演化模型建立关联分析。

上述结果表明, 现有监测体系在损伤演化前两阶段均存在系统性识别盲区, 导致关键损伤信号持续“静默”, 为耦合失效提供时间窗口。

2.3 “缺陷-损伤-监测”耦合失效模型

基于多源证据链与机理分析, 本文构建“设计缺陷-损伤演化-监测失效”三元耦合失效模型, 实现耦合机制的定量化表征。模型核心参数定义如下:

设计薄弱度 $Dw=(\sigma_{local}/\sigma_{allow}) \times (1/N_{design})$, 表征结构设计对损伤萌生的敏感程度 (本案例中, σ_{local} 为高应力区计算应力, σ_{allow} 为材料许用应力, N_{design} 为设计安全系数, 计算得 $Dw=1.83$);

监测灵敏度 $Sm=\sum (w_i \times \eta_i)$, 其中 w_i 为第 i 类传感器权重, η_i 为其对损伤前两阶段 (基体损伤期与裂

纹扩展期) 的识别效率, 本案例加权计算得 $Sm=0.2$ 。

据此提出耦合失效判据: 当 $Dw \times (1-Sm) > 0.7$ 时, 预警窗口关闭, 系统丧失有效干预能力。代入事故参数验证: $1.83 \times (1-0.2) = 1.464 > 0.7$, 判据成立, 与实际断裂进程完全吻合。

该模型首次从量化层面揭示: 设计缺陷是损伤“必然早期发生”的内在决定因素, 监测体系失能导致损伤演化“不可见且不可控”, 二者协同构成早期断裂事故的充要条件。此判据突破传统单因素归因局限, 为风电叶片及其他大型复合材料结构的失效预警提供可计算、可验证的理论工具, 推动安全评估由经验判断向量化决策范式跨越。

3 系统性提升策略

3.1 面向损伤容限的设计优化

针对原始设计中 12 - 19 m 高应力区铺层薄弱问题, 实施系统性优化策略, 具体如下:

(1) 关键区强化: 对 12 - 19 m 高应力区实施梯度铺层优化, 将芯材表面双轴布铺层数由 2 层增至 4 层。有限元分析 (FEA) 验证表明, 该优化使局部应力集中系数由 1.83 显著降至 1.21。

(2) 损伤容限设计: 依据 IEC 61400-5: 2020 标准^[1], 设定可检损伤尺寸 ($a_{inspect}$) 为 5 mm, 并通过铺层反向优化使临界裂纹尺寸 (a_{crit}) 大于 15 mm, 确保损伤在扩展至临界状态前可被有效识别与干预。

(3) 全尺寸验证: 改进型号叶片经全尺寸加速疲劳试验验证, 关键区域损伤萌生循环次数较原始设计提升 3.2 倍, 结构抗疲劳性能与服役可靠性显著增强。

该优化路径实现了“设计缺陷源头抑制—损伤演化过程可控—检测干预窗口前置”的闭环设计, 为复合材料叶片损伤容限设计提供了可工程化实施的技术范式, 亦为行业标准修订提供实证支撑。

3.2 构建多尺度智能感知网络

为实现对叶片损伤全过程的精准感知, 本文构建融合材料层、结构层与系统层的多尺度智能感知网络, 具体架构如表 1 所示。

表 1 多尺度感知网络

层级	技术方案	功能提升
材料层	预埋 FBG 传感器网络	实现微应变 ($\mu \epsilon$) 级监测, 定位精度 ± 2 cm
结构层	声发射+相控阵超声	裂纹识别灵敏度提升至 92%, 响应时间 < 5 分钟
系统层	深度学习视频分析系统	裂纹自动识别 F1-score 达 0.92 (测试集 $n=500$)

3.3 基于数字孪生的预测预警平台

本研究构建了风电叶片全生命周期数字孪生预测

预警平台。平台核心为高保真数字孪生模型, 通过集成叶片材料本构参数、精细化结构设计模型、实测风况载

荷谱及多源监测数据 (FBG、声发射、视频等), 实现物理实体与虚拟模型的动态映射与双向驱动。在预测算法层面, 采用物理机理模型与长短期记忆网络 (LSTM) 的融合架构, 通过贝叶斯滤波实时同化监测数据, 动态修正损伤演化参数, 显著提升剩余使用寿命预测精度 (误差率 < 8%)。平台建立四级量化预警机制:

(1) 蓝色预警 (风险概率 < 20%): 提示关注, 加密巡检频次;

(2) 黄色预警 (20% ≤ 风险概率 < 50%): 48 小时内启动专项检测;

(3) 橙色预警 (50% ≤ 风险概率 < 80%): 72 小时内安排计划性停机检修;

(4) 红色预警 (风险概率 ≥ 80%): 立即触发安全链停机并更换叶片。

在 3 个风电场的试点应用表明, 该平台可将亚临界损伤识别窗口提前至 14 天以上 (平均提前期 16.3 天), 预警准确率达 89.7%, 有效阻断“损伤累积→突发断裂”的演化路径, 为运维决策提供科学依据与时间窗口。

4 结论

本研究揭示: 原始设计叶片关键区铺层薄弱 (仅 2 层双轴布) 是损伤早期萌生的根本原因; 现有监测体系对损伤前两阶段集体失效, 形成 ≥ 28 天的“监测静默窗口”。据此构建“设计缺陷-损伤演化-监测失效”三元耦合失效模型, 提出量化判据 ($D_w \times (1 - S_m) > 0.7$), 实现预警能力的定量化评估。通过关键区铺层强化 (2 层 → 4 层) 使损伤萌生循环次数提升 3.2 倍, 并融合 FBG/声发射监测与数字孪生技术, 实现亚临界裂纹提前 14 天识别^[8], 验证了“损伤容限设计-多物理场感知-数字孪生预警”防护体系的有效性。研究成果推动风电叶片安全保障从“破损-安全”向“损伤-感知-预警-控制”主动防护范式转变, 为大型复合材料结构全生命周期安全管理提供理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 陈平, 于祺, 陆春. 复合材料风机叶片疲劳损伤跨尺度演化机理研究[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 450 - 458.
- [2] 李宏男, 赵晓燕. 风电叶片结构健康监测技术瓶颈与突破路径[J]. 振动工程学报, 2023, 36(4): 1021 - 1032.
- [3] WEI J, McCLEAN C, CHEN Y, et al. Multi-physics sensing for early damage detection in composite wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2024, 225: 119876.
- [4] IEC 61400-5:2020 Wind energy generation systems — Part 5: Wind turbine blades[S]. Geneva: IEC, 2020.
- [5] 中国可再生能源学会. 风电叶片全生命周期健康管理技术导则 (T/CRES 0015-2024) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [6] SHENOI R A, DULIEU-BARTON J M. Damage tolerance design of composite wind turbine blades: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 258: 110712.
- [7] WANG Y, LI Z, ZHANG H. Fatigue damage evolution and life prediction of GFRP wind turbine blades under combined loads[J]. Composite Structures, 2022, 289: 115487.
- [8] LIU X, CHEN J, ZHAO R. Digital twin-driven structural health monitoring for wind turbine blades: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 192: 114235.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS