

Research on Full Life Cycle Damage Monitoring and Operation and Maintenance Optimization of Wind Turbine Blades Based on Digital Twins

Shuaibing Tan¹ Wenke Wang¹ Yuhuan Xu² Liming Wang¹

1. Hebi Pengyue Energy Co., Ltd., Hebi, Henan, 456700, China

2. Xincai Yuhua New Energy Technology Co., Ltd., 463500, China

Abstract

As the core component of wind turbine units, the performance of wind turbine blades directly affects the overall operational efficiency and economic benefits of the wind power system. Research on the full life cycle damage monitoring and operation and maintenance optimization of wind turbine blades based on digital twin Technology, through digital modeling and real-time monitoring of wind turbine blades, provides precise support for damage detection and preventive maintenance. By using the digital twin system, real-time operational status data of the blades can be obtained. Combined with big data analysis and artificial intelligence technology, potential damage risks can be identified in advance, and scientific basis can be provided for subsequent operation and maintenance decisions. This research not only extends the service life of wind turbine blades but also provides a feasible solution for the intelligent operation and maintenance of the wind power industry, thereby promoting the sustainable development of the wind power industry.

Keywords

Digital Twin Wind turbine blades Damage monitoring Operation and maintenance optimization Full life cycle

基于数字孪生的风电叶片全生命周期损伤监测与运维优化研究

谭帅兵¹ 王文科¹ 许玉环² 王礼明¹

1. 鹤壁鹏越能源有限公司, 中国·河南 鹤壁 456700

2. 新蔡豫华新能源科技有限公司, 中国·河南 驻马店 463500

摘要

风电叶片作为风电机组的核心部件,其性能直接影响风电系统的整体运行效率和经济效益。基于数字孪生技术的风电叶片全生命周期损伤监测与运维优化研究,通过对风电叶片的数字化建模与实时监测,为损伤检测和预防性维护提供了精准的支持。利用数字孪生系统,实时获取叶片的运行状态数据,结合大数据分析与人工智能技术,可以提前识别潜在的损伤风险,并为后续的运维决策提供科学依据。该研究不仅延长了风电叶片的使用寿命,还为风电行业的智能化运维提供了可行性方案,从而推动风电产业的可持续发展。

关键词

数字孪生; 风电叶片; 损伤监测; 运维优化; 全生命周期

1 引言

风电叶片的健康状况直接决定了风电机组的发电效率和安全性。随着风电规模的逐步扩大,如何高效监测风电叶片的损伤并优化运维成为亟待解决的问题。传统的运维模式往往依赖人工巡检和定期检测,无法实时反馈叶片的损伤信息,且难以在出现问题时及时采取有效措施。数字孪生技术的出现,为风电叶片的全生命周期监测提供了全新的解决思路。通过精确的虚拟模型与实时数据融合,能够实现对风电叶片的实时监控和损伤预警,有效降低故障发生率,并在早期阶段采取针对性的运维策略,从而延长风电叶片的使用寿命,

提高整体运维效率。

2 数字孪生技术在风电叶片监测中的应用

数字孪生技术在风电叶片监测中的应用,基于其强大的虚拟仿真能力,已成为风电行业中提高叶片健康管理效率的重要工具。通过数字孪生技术,风电叶片的物理特性、运行状态以及外部环境条件能够被实时映射到虚拟模型中。该技术通过集成传感器数据、气象信息和叶片的设计参数,创建一个与真实风电叶片高度一致的虚拟模型,使得每个叶片的运行状态可以通过数字化方式进行实时跟踪和监控。通过对风电叶片的动态监测,可以精确地获取叶片的应力、振动、

温度等关键参数,从而有效预测其损伤及老化趋势。

在监测过程中,传感器采集的数据被传输到虚拟模型中,经过数据处理与分析后,能够实现精确的损伤诊断与预测。叶片表面的微裂纹或材料疲劳可以通过数据分析提前发现,并进行精准定位^[1]。这不仅为风电叶片的损伤预警提供了有力支持,还能在叶片发生故障前采取必要的干预措施,避免大规模的结构性损害。数字孪生还能够模拟风电叶片在不同风速、温度和湿度等环境下的工作状态,为叶片的设计优化和运维决策提供参考依据。数字孪生模型实时反馈,可实现风电叶片全生命周期健康状况精准管理。运维阶段,数字孪生技术为风电场运维人员提供可靠决策支持,助力把握检修更换时机,降低运营成本,提升风电机组整体效能。技术落地推动风电叶片监测管理迈入智能化精细化新阶段,为风电产业可持续发展筑牢根基。

3 风电叶片损伤特征分析与识别方法

风电叶片的损伤特征分析与识别方法是确保风电机组可靠性与安全性的重要环节。风电叶片作为一个高度复杂的结构件,其损伤通常受到多种因素的影响,包括气候环境、运行负荷以及叶片材料的老化等。损伤类型可大致分为表面裂纹、分层、腐蚀、疲劳损伤等,每种损伤的特征表现都具有一定的独特性。针对不同类型的损伤,需采用不同的识别方法。表面裂纹的识别通常依赖于非接触式的检测技术,如红外热像、激光扫描等。通过红外热像技术,能够检测到由于裂纹或缺陷导致的热梯度变化,从而发现微裂纹或表面损伤。而激光扫描技术则能够通过高精度的表面形貌测量,捕捉到表面裂纹或形变的微小变化,进而进行精确识别。表面裂纹与疲劳损伤密切相关,其识别方法也可以通过高频振动检测实现。通过振动传感器采集叶片的振动信号,利用信号处理和频谱分析技术,可以识别出由裂纹、分层等缺陷引起的振动特征,从而为早期故障诊断提供依据。

叶片分层损伤通常伴随着内部结构的破坏,因此其识别依赖于更为深入的检测技术,如超声波检测与X射线成像。超声波检测通过发射高频声波并分析回波信号,能够准确探测到叶片内部的分层或气泡缺陷。X射线成像则通过透过材料并捕捉图像的方式,精确地显示出叶片内部的缺陷分布和严重程度。此类技术可以对叶片内部的损伤进行无损检测,确保叶片结构的完整性^[2]。腐蚀损伤的识别方法主要集中在电化学腐蚀监测和表面检测方面。风电叶片常常暴露在潮湿环境中,腐蚀损伤在长时间的使用过程中逐渐显现。通过电化学腐蚀检测技术,可以在线监测叶片表面电阻的变化,从而预测腐蚀的发生与发展。除此之外,常规的视觉检测和表面涂层检查也是腐蚀损伤识别的重要手段。

疲劳损伤是风电叶片常见的长期累积性损伤类型。其识别需要结合长期监测数据与动态载荷分析,利用应变计与加速度传感器采集叶片在不同工况下的应变与加速度数据。通过数据分析,可以识别疲劳损伤的累积过程,并对其发生

的关键时刻进行预警。结合风电场的运行数据和叶片的动态行为,可以通过计算损伤积累值预测疲劳损伤的发生,从而为叶片的更换和维修提供科学依据。风电叶片损伤的特征分析与识别方法多种多样,针对不同类型的损伤采用不同的检测手段能够提高识别精度。

4 基于数据分析的损伤预测与早期预警机制

基于数据分析的损伤预测与早期预警机制在风电叶片的健康管理中扮演着至关重要的角色。通过对风电叶片的运行数据进行全面分析,可以提前识别出潜在的损伤风险,并在损伤变得严重之前采取相应的预防措施,从而有效延长叶片的使用寿命并降低维护成本。风电叶片的运行数据通常包括应力、振动、温度、风速等多个维度,这些数据为损伤预测提供了丰富的基础信息。

在损伤预测的过程中,数据的采集与处理是首要步骤。通过布置传感器系统实时监测风电叶片的动态特性,能够收集到叶片在各种工作状态下的详细信息。应力传感器、加速度计、温度传感器等设备被广泛应用于这一过程,数据通过无线网络传输至云平台进行存储和分析。对这些数据的处理需要借助机器学习、人工智能等先进的算法,识别出风电叶片在不同负载和环境条件下的工作状态。这些算法能够通过学习历史数据,发现损伤发生的规律,并建立起损伤与工作环境之间的关联模型,从而进行准确的损伤预测。

基于这些历史数据,预测模型能够估算叶片在未来一段时间内的损伤进程。当损伤接近临界点时,系统会触发早期预警机制,提醒运维人员进行检测或维护。在实际应用中,损伤预测与早期预警不仅仅依赖于单一的传感器数据,而是通过多源数据融合技术,将传感器数据、气象信息、叶片历史维修记录等数据进行综合分析^[3]。这种方法可以更加准确地捕捉到复杂环境中的损伤发展趋势,为风电叶片的运维决策提供科学依据。

机器学习与深度学习在损伤预测中得到了广泛应用。通过大量的训练数据,模型能够自动调整其参数,以优化预测精度。常用的算法包括决策树、支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)等,这些算法可以在复杂的非线性关系中进行高效的损伤识别与预测。结合时序分析技术,可以对叶片的健康状态进行动态监控。时序数据的处理能够揭示出损伤在不同时间段内的演变规律,进一步提升预警的准确性和实时性。

预警机制的核心是确保在损伤发生的初期就能够获得预警信号,从而及时采取措施,防止损伤进一步扩展。通过设定预警阈值和报警机制,能够为风电场的运维团队提供明确的行动指引。这些预警信号不仅可以基于实时监测数据,还可以结合风电机组的负荷、风速等外部条件进行调整,从而实现动态预警。智能化的运维管理系统还能够根据预警信息优化维修调度,合理安排叶片检查和维修,减少停机时间,提高整体运维效率。

5 风电叶片全生命周期运维策略优化

风电叶片全生命周期运维策略优化的核心在于通过科学的数据分析与精确的预警系统,实现从设计、生产、安装到运维全过程的智能化管理。全生命周期运维策略优化不仅着眼于当前的维护需求,还要考虑到风电叶片在使用过程中逐步累积的损伤及老化过程,以此来最大限度地延长叶片的使用寿命,并有效降低整体运维成本。在风电叶片的全生命周期管理中,数据的收集与处理是关键。通过安装传感器并实时监测叶片的运行状态,能够获得大量关于叶片性能的数据,包括应力、温度、振动、风速等重要参数。这些数据通过高效的分析平台进行处理,结合大数据分析技术、机器学习等手段,可以实时识别叶片潜在的损伤并预测其发展趋势。在此基础上,可以制定针对性的运维计划,做到精确、及时地维修与保养,而非依赖传统的定期检修方式。

运维策略优化的另一个关键要素是基于损伤预测与预警系统的早期干预能力。通过提前识别损伤的发生,能够为风电场运维人员提供足够的时间进行规划,避免因突发故障造成的停机和维修成本增加。基于智能化管理系统,运维人员可以通过优化的维护调度系统,合理安排检修时间和资源,最大化风电机组的可用性。在此过程中,精准地预测能够引导维修工作在最适合的时机进行,从而避免不必要的停机和过度维修^[4]。风电叶片的设计和材料也对全生命周期的运维策略产生重要影响。在叶片设计初期,通过对材料的优化选择与结构设计,可以提高叶片的抗损伤能力,减少长期运维过程中的风险。这一过程需要结合对材料的性能测试和模拟分析,通过数字化建模与仿真技术,提前评估叶片在各种环境下的行为特性,从而提高叶片设计的可靠性与耐久性。

风电叶片全生命周期的运维策略优化还涉及运营阶段的数据反馈与持续改进。在运行过程中,风电机组的健康状态不仅受制于外部环境因素,还与设备的运行历史密切相关。通过构建一个持续反馈的监测与分析机制,可以动态调整运维策略,依据每个风电叶片的实际状态进行个性化的优化管理。这种基于数据驱动的动态优化,能够灵活应对风电场中不同叶片的个性化需求,进一步提高风电系统的整体运行效率。结合先进的数字孪生技术和智能运维平台,风电叶片全生命周期运维策略的优化不仅能够提升风电机组的运行效益,还能为整个风电行业带来可持续发展的动力。

6 数字孪生技术在运维管理中的实施效果与展望

数字孪生技术在运维管理中的实施效果显著提升了风

电叶片的监控和维护效率。通过创建风电叶片的虚拟副本,数字孪生技术使得运维管理不再依赖传统的周期性检查,而是能够实现实时监控和精确诊断。通过对实际风电叶片的动态行为进行实时数据采集和分析,运维人员可以对叶片的健康状况做出准确评估。虚拟模型能够映射出叶片的工作状态、损伤位置和疲劳情况,从而为运维决策提供科学依据。

该技术通过与传感器、监控系统以及大数据平台的集成,实现了多源数据的深度融合。这种融合不仅提升了数据分析的准确性,还使得损伤预测和故障预警更加及时^[5]。通过对数据进行深入分析,数字孪生技术能够在风电叶片出现潜在问题之前,提前发出警报,避免因故障导致的突发性停机和昂贵的修复成本。实时的虚拟建模和远程诊断能力使得风电场运维人员可以进行远程操作,减少了现场巡检的频率和人力成本。

展望未来,数字孪生技术在风电运维管理中的应用前景广阔。随着人工智能和机器学习技术的不断进步,数字孪生将进一步优化风电叶片的性能监控和故障预测。未来的数字孪生模型将不仅限于叶片健康管理,还能够融入更多的风电场数据,实现全方位、多层次的智能化运维体系,进一步提高风电机组的运行效率和安全性。

7 结语

数字孪生技术的应用在风电叶片运维管理中展现了巨大潜力,通过精准的监测、实时的数据分析及预测功能,有效提高了风电叶片的运维效率与安全性。随着技术的不断发展,数字孪生将进一步推动风电产业向智能化、精细化方向发展,为实现风电产业的可持续发展提供更加可靠的支持。未来,随着人工智能和大数据的深度融合,数字孪生在运维管理中的应用将更加广泛,为全球绿色能源的推广与应用奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 王金龙,宣泳辉,冀秀坤,等. 基于单向降阶高保真代理模型的CFRP机翼力学状态数字孪生研究[J/OL].机械工程学报,1-13[2025-12-17].
- [2] 李乃鹏,张涛,雷亚国,等. 数字孪生模型驱动的永磁同步电机偏心故障定量诊断方法[J/OL].机械工程学报,1-13[2025-12-17].
- [3] 秦有苏,徐辉,武艳蒙,等. 基于数字孪生的GIS综合监控及状态评估技术研究[J].高压电器,2025,61(12):58-64.
- [4] 李慧,杨林. 浅析数字孪生流域资源共享平台建设路径[J].治淮,2025,(12):29-31.
- [5] 唐金钱,何学. 风电叶片用拉挤板倒角安全性研究[J].先进无机纤维,2025,(05):30-34.