

无损检测技术在风力发电工程中的应用

霍志龙

国能（济南）新能源有限公司河口分公司，山东 东营 257000

[摘要] 风力发电设备由多个复杂的系统和组件构成，包括电力电子设备、发电机、齿轮箱、塔筒及叶片等。任何一个部件的故障或失效，都可能导致设备停机、增加维修成本，甚至影响整个电网的正常运行。在实际操作中，风力发电设备常常面临高频振动、强风力冲击及温湿度变化等严峻环境条件，这些因素加速了零部件的老化、磨损，甚至可能导致损坏。通过实时监控与精确分析，使用无损检测技术，可以及时发现潜在缺陷或隐患，进而有效避免突发性故障的发生。利用热成像、声波检测、超声波检查以及红外扫描等技术，各部件得以在不拆卸设备或造成损坏的情况下进行检测，从而有效提升设备的安全性与可靠性。随着风力发电规模的不断扩大，提升无损检测技术的精度与效率，已成为确保风电设备长期稳定运行的关键要素。

[关键词] 无损检测技术；风力发电；发电设备

DOI: 10.33142/aem.v7i3.15996

中图分类号: TU74

文献标识码: A

Application of Non-destructive Testing Technology in Wind Power Engineering

HUO Zhilong

Hekou Branch of Guoneng (Ji'nan) New Energy Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract: Wind power generation equipment consists of multiple complex systems and components, including power electronics, generators, gearboxes, towers, and blades. The failure or malfunction of any component may result in equipment shutdown, increased maintenance costs, and even affect the normal operation of the entire power grid. In practical operation, wind power generation equipment often faces severe environmental conditions such as high-frequency vibration, strong wind impact, and temperature and humidity changes, which accelerate the aging and wear of components and may even lead to damage. By real-time monitoring and precise analysis, using non-destructive testing technology, potential defects or hidden dangers can be detected in a timely manner, effectively avoiding the occurrence of sudden failures. By utilizing technologies such as thermal imaging, acoustic detection, ultrasonic inspection, and infrared scanning, various components can be tested without disassembling the equipment or causing damage, effectively improving the safety and reliability of the equipment. With the continuous expansion of wind power generation scale, improving the accuracy and efficiency of non-destructive testing technology has become a key element to ensure the long-term stable operation of wind power equipment.

Keywords: non-destructive testing technology; wind power generation; power plant

引言

随着全球对可再生能源需求的持续增长，风力发电已成为清洁能源行业中不可或缺的一环。风力发电设备的高效运行及其长期稳定性，对风电场的经济效益和可持续发展起到了决定性的作用。风电设备在运行过程中常面临剧烈的风力、温度波动以及高湿度等极端环境条件，这些因素不仅可能降低设备的效率，还会引发设备损坏或故障。因此，提升风电设备的可靠性，确保其在高效、稳定的状态下持续运行，成为亟需解决的关键问题。无损检测技术，作为一种高效、实时且非侵入性的监测手段，在评估风力发电设备健康状况以及预防故障方面，发挥了至关重要的作用。

1 无损检测技术概述

无损检测技术 (Nondestructive Testing, NDT) 是一种无需破坏物体结构即可进行评估的方法，主要用于检测材料的性能及其内部缺陷。与传统的破坏性测试不同，

NDT 不会在检测过程中对被测物体造成任何物理损伤，因此在工业领域，特别是在风力发电工程中得到了广泛应用。通过这种方式，设备的可靠性和安全性能能够显著提高，避免了传统检查方法中通常需要拆解设备或停机检查的问题。无损检测方法包括声波检测、超声波检测、X射线检测、红外热成像、磁粉检测、电磁感应检测等，这些技术各具优势，能够根据不同设备或检测对象的需求灵活运用。举例来说，超声波检测能够有效地评估金属材料及焊接接头中的内部缺陷，而红外热成像则在监测设备表面温度变化方面尤为有效，有助于提前识别潜在故障。随着风力发电设备技术的不断发展以及运行环境的日益严苛，传统的检测方式已经无法满足设备实时、持续与高效监控的需求。无损检测技术为风力发电设备提供了一种可靠的监测手段，尤其在风力机叶片、齿轮箱、发电机及电力电子系统等关键部位的健康检查中，发挥着至关重要的作用。通过精确的设备状态诊断，风力发电设备的使用寿命得以延长，

停机检修的成本与风险得以显著降低。无损检测技术的应用提升了风力发电领域的安全性,有力保障了设备长期稳定运行。随着技术的不断进步,未来的无损检测将向智能化、自动化、实时化方向发展,进一步推动风力发电行业高效运营的进程。

2 风力发电设备的无损检测应用

2.1 电力电子设备与发电机的无损检测

风力发电机的核心组件包括电力电子系统与电磁部分,这些关键部件的可靠性直接决定了风电设备的整体性能及运行效率。由于风力发电设备长期处于严苛的环境中,各种外部因素如振动、温度变化及湿度等都会影响设备的运行,导致内部结构或电子元件的老化、损坏,甚至引发故障。尤其在风力机叶片不断受风力作用时,其产生的空气动力与惯性力会引起不稳定的振动,这些交变的随机性力有可能激发电机的自激共振,若得不到及时控制,可能导致发电机及其他关键部件的损坏。为确保风力发电设备的稳定运行,必须及早发现潜在故障并采取有效措施。无损检测技术在此过程中发挥着至关重要的作用,常见的无损检测技术如热成像、电磁传感和扫地雷达等,能够在设备正常运行的同时,对其状态进行实时监控。以热成像技术为例,通过监测设备表面温度变化,可以揭示设备内部可能存在的过热区域,这往往是电子组件出现故障的先兆。电磁传感技术则用于监测电力电子系统中的定子线圈与转子等部件,能够及时识别绝缘故障或电流异常等问题。模态分析作为评估系统稳定性与使用寿命的有效工具,通过分析风力发电机的振动模式,可以提前识别出潜在的故障风险,为采取相应措施提供科学依据。需要指出的是风力发电机的电力电子系统通常在高功率负荷下运行,这种情况下产生的热量会影响设备的运行状态。传统的电流信号分析方法在实时监控中存在一定的局限性,无法及时反馈设备的运行情况。将温度监测与功率损耗分析相结合,可以更加精确地评估电力电子系统的健康状态。无损检测技术能够实时监控风力发电机各个运行阶段,提供高精度的监测手段。通过及时发现电力电子系统及电磁部件的潜在故障,显著提高了风力发电设备的可靠性与安全性,为设备的稳定运行提供了强有力的保障。

2.2 风力发电塔筒的无损检测技术

风力发电塔筒作为支撑整个风电机组的核心结构,承受着来自风力、振动及环境变化等多方面的巨大压力。由于塔筒通常位于较高位置并暴露于外部环境,它容易受到腐蚀、疲劳及结构损伤的影响。尤其在海上风电项目中,塔筒面临盐雾腐蚀和海水浸蚀的严重挑战,这使得塔筒的有效无损检测变得尤为重要。通过这一手段,不仅能够确保塔筒的结构安全,还能显著提升风电设备的运营可靠性。风力发电塔筒的无损检测中,常用的技术包括超声波检测、磁粉检测、射线检测、激光扫描以及视觉检测等。这些方

法能有效识别塔筒表面及内部的缺陷,确保其在整个生命周期内保持稳定的结构性能。超声波检测技术通过向塔筒发射高频声波并分析反射信号,主要用于评估塔筒材料的厚度以及检测潜在的裂纹。磁粉检测则专门用于揭示塔筒表面及近表面区域的裂纹或其他缺陷,特别适用于检查钢铁结构。射线检测,包括X射线和γ射线,可以深入塔筒内部,揭示深层的缺陷,尤其在焊接接头等关键部位的检查中起着重要作用。激光扫描技术能够通过精准的三维成像快速扫描塔筒表面,识别表面损伤、形变等问题,甚至可以用于监测塔筒结构的变形。随着无人机技术的进步,搭载视觉检测与红外热成像设备的无人机也开始在塔筒的无损检测中得到应用。通过无人机的快速而精确地检查,不仅降低了人工检查的风险,也有效减少了工作量。塔筒的检测不仅限于静态检查,动态监测同样具有重要意义。在塔筒上安装振动传感器或应变传感器,实时监控其在风力作用下的振动状态,能帮助工程师提前发现潜在的疲劳损伤或结构性问题,从而在问题加剧之前及时采取有效的措施。

2.3 风力机叶片的无损检测与失效分析

风力机叶片是风力发电机组中至关重要的部件,其性能直接关系到机组的能效与安全运行。作为一种弹性体,叶片在风力作用下长期承受复杂的空气动力、惯性力以及气候变化的多重影响。这些因素使得叶片在长时间的运转过程中容易出现疲劳、裂纹及腐蚀等问题,从而影响发电效率,严重时甚至可能导致设备停机。因此,对风力机叶片进行定期无损检测及失效分析显得尤为重要。风力机叶片常用的无损检测技术包括红外热成像、超声波检测、激光扫描以及声发射检测等,这些方法能够有效地识别叶片表面及内部的缺陷。通过红外热成像,叶片表面的温度变化可以被监测,迅速发现潜在的裂纹、气泡或分层等问题,尤其是在材料表面存在起伏或分层的情况下,热成像能够提供清晰的损伤图像。超声波检测则专注于检测叶片内部的结构缺陷,如裂纹、气泡或分层,通过发送超声波信号并分析其反射波,能够评估材料内部的缺陷并确定其严重程度。激光扫描技术能够生成叶片的高精度三维模型,迅速发现表面损伤或变形。而声发射检测则实时监控叶片在运行中裂纹的扩展,能够在裂纹发生初期发出预警,从而确保及时采取措施^[1]。除了传统的无损检测方法,现代风力机叶片的失效分析也受到了越来越多的关注,叶片的失效通常与风力的交变荷载、气候条件变化及材料疲劳等因素密切相关。结合历史数据与实时检测结果,工程师可以采用模态分析、有限元分析等技术,研究叶片在不同工作状态下的应力分布与疲劳损伤模式。这些分析有助于预测叶片失效的位置及原因。例如,长期的气流振动可能导致叶片根部发生疲劳破坏,或由于强风及冰雪积聚,叶片表面出现裂纹,最终可能引发整体失效。

3 无损检测技术在风电系统状态监控中的应用

3.1 风电系统的实时监测技术

风电系统的实时监测技术是确保风力发电机组高效、安全运行的关键手段。在复杂的外部环境与长期机械负荷作用下,风力发电设备的可靠性直接影响发电效率与经济效益。通过持续跟踪各组件的运行状态,实时监测技术能够及时识别潜在故障,从而有效减少因设备故障导致的停机时间与经济损失。目前,风电系统的实时监测技术涵盖了传感器监测、数据采集与分析平台,以及基于大数据与人工智能的预测模型等多种手段。传感器监测技术通过在关键部件上安装各类传感器,如振动传感器、温度传感器及压力传感器等,实现对设备状态的实时监控。例如,振动传感器可监测风力发电机的机械部件,及时发现因轴承故障、齿轮磨损或叶片不平衡所引发的异常振动;温度传感器则可用于监测电力电子设备、发电机及齿轮箱的温度变化,及时预警潜在的过热问题。数据采集与分析平台是实时监控的核心组成部分,传感器采集到的数据集中后,工程师便可通过平台随时查看风电系统的运行状态,识别异常模式及潜在问题^[2]。现代化监控平台不仅具备实时数据采集功能,还能结合历史数据与机器学习算法,识别潜在故障趋势,甚至提前预测设备故障。例如,系统可通过大数据分析,发现长期温度异常,从而及时识别电力电子元件的老化迹象,或预测风机关键部件(如齿轮箱、发电机)的维修周期。随着5G、物联网(IoT)等新兴技术的应用,风电系统的实时监测逐步向智能化与远程化发展。借助云平台,工程师能够远程监控风力发电机的运行状态,不仅提高了故障响应速度,还可以进行智能诊断与远程调度。这些高效且灵活的监控手段在风电场运营与维护中发挥了重要作用,极大地提升了风力发电机组的可靠性与发电效率。

3.2 通过无损检测优化风电系统运行效率

无损检测技术在风电系统中的应用,不仅有助于及时发现设备故障,还能显著提升风电系统的运行效率。风力发电机组的关键部件,如叶片、齿轮箱、发电机及电力电子系统,常常面临着机械磨损、腐蚀及外部环境影响等问题。如果这些问题未能得到及时检测与处理,可能导致设备停机,甚至显著降低整体系统的效率。风电机组的关键部件,如叶片,承受着来自风力与气候变化的巨大影响。无损检测技术,如超声波检测与红外热成像,能够实时监测叶片表面可能存在的裂纹、腐蚀或结构损伤。若这些隐

患未及时发现,可能导致风机效率下降,甚至引发更为严重的故障。通过早期发现与修复这些问题,叶片的使用寿命得以延长,同时可避免因性能下降带来的发电效率损失。齿轮箱与发电机作为风电机组中另一类容易出现故障的核心部件,同样需要得到特别关注^[3]。齿轮磨损、润滑油污染或轴承损坏等问题,都会对发电效率产生不利影响,通过振动分析、磁粉检测与声学检测等无损检测方法,能够及时发现这些问题,防止设备突然停机并有助于优化维修安排。至于发电机,温度过高或电磁部分出现异常情况,可能导致运行效率下降。结合红外成像与电磁传感技术,能够高效地检测出这些潜在问题,确保发电机始终处于最佳工作状态。除了单个设备的检测,整套风电系统的无损检测还可以提升整个系统的运行效率。通过对多个风机组的持续监控与数据分析,能够识别哪些风机的效率较低,是否存在结构问题或需要更换的部件。这种方法有助于优化风电场的运行策略,确保各风机在不同气候条件下能够高效工作,从而最大化发电量。此外,通过综合分析监测数据,工程师可以制定更加科学的运维计划,进一步优化风电场的整体运行效率。

4 结语

无损检测技术在风力发电领域的广泛应用,为设备的安全性、稳定性及运行效率提供了有力支持。通过对电力电子设备、发电机、齿轮箱、塔筒以及叶片等关键组件的实时监控,潜在的故障问题得以及时发现,从而减少了停机时间,并显著延长了设备的使用寿命。尽管相关技术已取得一定进展,但实时数据分析与技术集成仍然是亟待解决的挑战。随着传感技术与人工智能的不断发展,未来的无损检测技术将更加智能化与精确,从而进一步提升风电系统的整体性能,推动风电行业的可持续发展。

[参考文献]

- [1] 邵龙威. 无损检测技术在风力发电工程中的应用[J]. 中华纸业, 2024, 45(7): 118-120.
 - [2] 谷群远, 刘木森. 对风力发电设备无损检测技术的研究[J]. 科技风, 2022(14): 1-3.
 - [3] 李景来. 基于无损检测技术的新能源风力发电设备运维研究[J]. 电气技术与经济, 2025(2): 252-255.
- 作者简介: 霍志龙(1988.9—), 毕业院校: 吉林农业大学, 所学专业: 自动化, 当前就职单位: 国能(济南)新能源有限公司河口分公司, 职务: 运检班长, 职称级别: 工程师。