

风力发电设备无损检测技术研究

王小锋 贾俊清 汪 勇

江苏中钢检测有限公司 江苏 靖江 214500

摘 要: 风力发电设备长期运行易出现材料疲劳、腐蚀及机械损伤等问题, 严重威胁机组安全稳定运行。针对这些损伤, 超声、涡流、红外热成像等无损检测技术发挥着重要作用。研究表明, 超声检测对内部缺陷敏感, 涡流检测适用于表面及近表面检测, 红外热成像能实现快速大面积检测。随着技术发展, 多技术融合、智能化与自动化、在线实时监测成为无损检测技术新趋势, 为保障风力发电设备安全可靠运行提供了有力支撑。

关键词: 风力发电; 设备; 无损检测; 技术

引言: 随着全球对清洁能源需求的不断攀升, 风力发电作为绿色可再生能源的重要组成部分, 装机容量持续增长。然而, 风力发电设备在复杂多变的运行环境下, 常面临材料疲劳、腐蚀、机械损伤等问题, 这些损伤若不能及时发现和处理, 将引发重大安全事故。因此, 高效精准的无损检测技术至关重要。本文深入分析风力发电设备常见损伤类型、原因及现有无损检测技术, 并探讨其发展趋势, 以期提升设备可靠性与运行安全性提供参考。

1 风力发电设备常见损伤类型及原因分析

1.1 常见损伤类型

1.1.1 材料疲劳损伤

风力发电设备长期处于复杂交变载荷作用下, 叶片、主轴、齿轮箱等关键部件持续承受气动载荷、离心力和重力等多种力的交替作用。在这种周期性应力循环下, 材料内部微观结构逐渐萌生裂纹并扩展, 导致疲劳损伤。以叶片为例, 其在运行过程中不断经历弯曲、扭转应力, 表面涂层与基体材料结合处易成为疲劳裂纹源, 随着运行时间增长, 裂纹向材料内部延伸, 降低部件承载能力, 最终可能引发结构失效, 严重威胁设备安全稳定运行。

1.1.2 腐蚀损伤

风力发电设备多安装于高湿度、高盐雾等恶劣环境中, 金属部件极易发生腐蚀。沿海地区的海风裹挟大量盐分, 直接附着在设备表面, 与空气中的水汽结合形成电解质溶液, 在金属表面发生电化学腐蚀。叶片表面的复合材料长期暴露在紫外线、雨水等环境因素下, 会出现老化现象, 导致涂层剥落, 基体材料失去保护, 加速腐蚀进程。腐蚀不仅会削弱部件的机械性能, 还会影响设备外观和使用寿命, 增加维护成本与安全隐患。

1.1.3 机械损伤

设备运行过程中, 机械部件间的相互摩擦、碰撞易造成机械损伤。齿轮箱内齿轮啮合时, 由于齿面接触应力过大、润滑不良等原因, 会出现齿面磨损、胶合甚至断齿等损伤; 轴承在高速旋转过程中, 受到不均匀载荷, 导致滚道磨损、滚珠碎裂。设备安装调试不当或遭受意外冲击, 如强风、雷击等, 也会使部件产生变形、裂纹等机械损伤, 影响设备的传动效率和运行可靠性。

1.2 原因分析

1.2.1 环境因素

风力发电设备所处的自然环境对其影响显著。极端气象条件下, 强风会使设备承受超出设计范围的气动载荷, 导致叶片、塔架变形甚至断裂; 暴雨、冰雪可能引发电气系统短路、部件结冰, 影响设备正常运行。高海拔地区的低气压、强紫外线, 以及沿海地区的高盐雾、高湿度环境, 都会加速材料老化和腐蚀, 降低设备性能与寿命。长期处于复杂多变的环境中, 设备各部件不断受到侵蚀, 增加了损伤发生的概率。

1.2.2 设计与制造缺陷

在风力发电设备设计阶段, 如果对载荷计算不准确、结构布局不合理, 会导致部件受力不均, 产生应力集中现象, 为疲劳损伤埋下隐患。制造过程中, 材料质量不达标、加工工艺缺陷也会影响设备性能。例如, 焊接工艺不当会使焊缝存在气孔、夹渣等缺陷, 降低焊接接头强度; 铸造过程中若出现砂眼、缩松等问题, 会削弱部件承载能力。这些设计与制造环节的缺陷, 使得设备在投入运行后更容易出现损伤, 缩短其使用寿命。

1.2.3 运行维护不当

风力发电设备运行过程中, 若维护保养不及时、不到位, 会加速设备损伤。润滑系统故障导致部件间摩擦加剧, 产生大量热量和磨损; 未定期对设备进行检查和校准, 无法及时发现潜在的损伤隐患, 任其发展扩大。

设备操作不当,如频繁启停、超速运行等,也会对部件造成额外的冲击和疲劳,增加损伤风险。不合理的运行维护方式,严重影响设备的可靠性和稳定性,降低发电效率,增加维修成本。

2 风力发电设备无损检测技术分析

2.1 超声检测技术

超声检测技术基于超声波在介质中传播时遇到不同声阻抗界面会发生反射、折射和散射的物理特性,对风力发电设备内部缺陷进行检测。当超声波以特定角度通过探头耦合进入设备材料,若材料内部存在气孔、裂纹、夹杂等缺陷,超声波会在缺陷界面产生反射回波,通过接收和分析这些回波信号,可判断缺陷的位置、大小和形状。在风力发电设备中,超声检测技术常用于主轴、齿轮箱齿轮、叶片根部等关键部件的检测。主轴作为传递扭矩的核心部件,承受着复杂的交变应力,内部微小缺陷可能引发严重故障。超声检测能够穿透主轴厚实的金属材料,检测出内部的细微裂纹。在齿轮箱齿轮检测中,超声检测可对齿根、齿面等易产生疲劳裂纹的部位进行精准探测。对于叶片根部,由于其与轮毂连接,长期承受风力载荷,超声检测可有效检测复合材料层间的脱粘、分层等缺陷。该技术具有检测灵敏度高、穿透力强的特点,能够检测出毫米级甚至更小的内部缺陷,且对不同形状和尺寸的部件适应性较好。超声检测对缺陷的定性和定量分析依赖检测人员的经验和技术水平,复杂形状部件的检测存在一定难度,且检测结果受材料晶粒结构、声速等因素影响较大,在一些粗晶材料检测中,可能出现信号干扰,影响检测准确性^[1]。

2.2 涡流检测技术

涡流检测技术基于电磁感应原理,当载有交变电流的检测线圈靠近风力发电设备金属部件时,会在部件表面及近表面感应出涡流。若部件表面或近表面存在缺陷,会导致涡流分布发生变化,进而引起检测线圈阻抗改变。通过测量检测线圈阻抗的变化,即可判断缺陷的存在、位置和大小。在风力发电设备检测中,涡流检测主要应用于叶片表面及近表面缺陷检测、塔筒螺栓的检测等。风力发电叶片长期暴露在户外,表面易受风沙侵蚀、雷击等损伤,涡流检测可快速检测出叶片表面的裂纹、磨损等缺陷。对于塔筒螺栓,其连接可靠性直接关系到风力发电机组的稳定性,涡流检测能够有效检测螺栓表面及近表面的裂纹、腐蚀等缺陷,确保螺栓连接的安全性。涡流检测具有检测速度快、对表面及近表面缺陷灵敏度高的优势,无需对部件进行复杂的表面处理,可实现非接触式检测,适用于在役设备的快速检测。该

技术的检测深度有限,一般仅能检测几毫米深度范围内的缺陷,对埋藏较深的内部缺陷难以检测。涡流检测结果受检测线圈形状、检测频率、材料电导率和磁导率等多种因素影响,检测信号的解释和分析需要专业知识和经验。

2.3 红外热成像检测技术

红外热成像检测技术利用物体表面的热辐射特性,通过红外热像仪接收物体表面发出的红外辐射能量,将其转换为热图像,从而直观显示物体表面的温度分布情况。在风力发电设备运行过程中,若部件存在缺陷或异常,会导致局部热量产生或热量传导受阻,进而引起表面温度异常。通过分析热图像中温度分布的差异,可判断设备是否存在故障。在风力发电设备检测中,红外热成像检测技术广泛应用于发电机、变压器、电缆接头等电气部件的检测,以及齿轮箱、轴承等机械部件的检测。对于发电机和变压器,可通过检测绕组、铁芯等部位的温度分布,判断是否存在局部过热、接触不良等故障。电缆接头在长期运行中,可能因接触电阻增大而发热,红外热成像检测能够及时发现这些异常发热点。在机械部件检测方面,齿轮箱齿轮啮合不良、轴承磨损等故障会导致局部温度升高,红外热成像检测可直观呈现故障部位的温度异常,为故障诊断提供依据。红外热成像检测技术具有非接触、检测速度快、可实现大面积快速扫描的特点,能够直观地显示设备表面的温度分布,便于快速发现异常区域。该技术检测的是设备表面温度,对于内部缺陷的检测需结合传热学原理进行分析推断,检测结果易受环境温度、风速、物体表面发射率等因素影响,在复杂环境下检测精度会有所下降,且对微小缺陷或早期故障的检测灵敏度相对较低^[2]。

3 风力发电设备无损检测技术的发展趋势

3.1 多技术融合

(1) 在风力发电设备无损检测领域,单一检测技术往往存在局限性,难以全面、精准地识别复杂结构中的缺陷,多技术融合成为必然趋势。超声检测能够有效探测内部缺陷,但对缺陷定性存在困难;涡流检测虽能快速检测表面缺陷,却难以深入内部。将超声检测与涡流检测相结合,通过优势互补,可实现对风力发电设备零部件从表面到内部缺陷的全方位检测,极大提升检测的准确性和可靠性。(2) 随着计算机断层扫描(CT)技术的不断进步,将其与传统无损检测技术融合,为风力发电设备检测带来新突破。CT技术可提供高分辨率的三维图像,直观展示设备内部结构和缺陷分布情况,与磁粉检测结合,能够更清晰地显示缺陷的形状、尺寸和位

置信息,有助于检测人员更准确地评估缺陷对设备性能的影响,为设备的维修和维护提供科学依据。(3)声发射检测技术与红外热像检测技术的融合也展现出强大优势。声发射检测可实时监测设备运行过程中产生的应力集中和缺陷扩展情况,红外热像检测则能通过捕捉设备表面温度变化,发现因缺陷导致的异常发热区域。两者融合后,能够从力学和热学两个维度对风力发电设备进行动态监测,及时发现潜在隐患,有效预防设备故障的发生^[3]。

3.2 智能化与自动化

(1)智能化与自动化技术在风力发电设备无损检测中的应用,显著提高了检测效率和质量。自动化检测设备能够按照预设程序自动完成检测任务,避免了人工操作的主观性和不稳定性。例如,采用机器人搭载无损检测传感器,可在复杂的风力发电设备结构中自主移动,对叶片、塔筒等关键部位进行精确检测,大幅减少检测时间,同时保证检测结果的一致性和准确性。(2)人工智能算法的引入进一步提升了无损检测的智能化水平。深度学习算法能够对大量检测数据进行学习和分析,自动识别和分类不同类型的缺陷。通过训练神经网络模型,使其能够快速准确地判断风力发电设备零部件是否存在缺陷,以及缺陷的严重程度,为后续维修决策提供有力支持。这种智能化的检测方式不仅提高了检测效率,还降低了对检测人员经验和技能的依赖。(3)自动化检测系统还具备数据管理和分析功能,可高效精准操作,能自动采集、存储和处理检测数据。利用大数据分析技术,对历史检测数据进行挖掘和分析,可发现设备缺陷的发展规律和潜在风险,实现对设备状态的预测性维护。自动化检测系统与设备管理系统的集成,可实现检测数据的实时共享和协同工作,提高整个风力发电场的运维管理水平。

3.3 在线实时监测

(1)风力发电设备长期运行在复杂多变的环境中,传统的离线检测方式无法及时发现设备运行过程中出现的缺陷和故障,在线实时监测技术应运而生。通过在设备关键部位安装传感器,实时采集设备运行过程中的应力、振动、温度等参数,能够及时捕捉设备状态的微小

变化,实现对设备缺陷的早期预警。例如,在风力发电机叶片上安装应变传感器,可实时监测叶片在不同工况下的应力分布情况,一旦发现应力异常,及时发出警报,避免叶片损坏事故的发生。(2)在线实时监测技术借助高速数据传输和处理技术,能够将采集到的大量数据快速传输到监测中心进行分析和处理。利用先进的信号处理算法,对传感器数据进行实时分析,提取有效特征信息,准确判断设备是否存在缺陷以及缺陷的发展趋势。通过建立设备运行状态模型,结合实时监测数据,可对设备的剩余寿命进行预测,为设备的维修和更换提供科学依据。(3)在线实时监测系统还具备远程监控和故障诊断功能,检测人员无需到达现场,即可通过网络远程查看设备运行状态和检测数据,进行故障诊断和分析。这种远程监测方式不仅提高了检测效率,还降低了运维成本,尤其适用于分布广泛的风力发电场。多个风力发电场的在线实时监测系统可实现联网运行,形成大规模的监测网络,为风力发电行业的整体安全运行提供有力保障^[4]。

结语

综上所述,风力发电设备无损检测技术的研究与应用对保障设备安全稳定运行意义重大。通过对常见损伤类型及原因的剖析,超声、涡流、红外热成像等无损检测技术各展所长。未来,多技术融合、智能化与自动化、在线实时监测等趋势将进一步提升检测效率与准确性,推动风力发电行业向更安全、更高效的方向发展。后续研究可围绕新技术应用与检测标准完善展开,持续增强行业技术实力。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]兰金江,苏正雄,邱文举,等.风力发电机组塔架焊接变形超声无损检测方法[J].焊接技术,2023,52(11):133-137.