

智能检测技术在风电叶片供应链 质量检查中的应用

刘伟

(艾尔姆风能叶片制品(天津)有限公司, 天津 301802)

摘要 风电叶片作为风力发电机组的核心部件,其质量状况直接关乎整机的性能表现与使用寿命。传统的质量检查手段存在着人工依赖程度高、检测效率低、成本高昂等弊端。伴随智能检测技术的蓬勃发展,无损检测、机器视觉、无人机巡检、人工智能算法等技术在风电叶片质量检查领域得到了越来越广泛的应用。本文深入剖析了当前风电叶片供应链质量检查面临的挑战,全面探讨了智能检测技术的具体应用,并结合实际案例与详细数据展开研究,以此验证智能检测技术在该领域的有效性。

关键词 风电叶片;智能检测;无损检测;机器视觉;供应链质量检查

中图分类号: TP18; F425

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.011.010

0 引言

近5年来,全球风电装机容量的年均增长率约为13.8%^[1],经过对多个风电场实际检测数据的统计分析,传统人工检测风电叶片时,平均每片叶片的检测时间约为1.8~2.2小时,平均误判率在10%~13%之间^[2]。智能检测技术异军突起,凭借其高精度、高效率、智能化的特点,为风电叶片质量检查提供了全新的解决方案。智能检测技术融合了多学科的前沿成果,涵盖无损检测技术、机器视觉、无人机巡检、人工智能与大数据分析等多个领域,能够从不同维度对风电叶片进行全面、精准的质量检测。本文将围绕智能检测技术在风电叶片供应链质量检查中的应用展开深入探讨,旨在为风电行业的质量控制提供有益的参考。

1 智能检测技术概述

智能检测技术是一个跨学科、综合性的技术体系,涉及材料科学、光学工程、电子技术、计算机科学、人工智能等多个领域。其核心在于利用先进的传感器、智能算法和数据分析技术,实现对检测对象的自动化、智能化检测,提高检测的准确性、可靠性和效率。以下是智能检测技术在风电叶片质量检查中涉及的主要技术领域。

1.1 无损检测技术(NDT)

无损检测技术是在不破坏被检测物体结构和性能的前提下,对其内部或表面缺陷进行检测的技术。常见的方法包括超声波检测、X射线检测、激光扫描、红

外热成像检测等。

超声波检测(UT)利用超声波在材料中传播时遇到缺陷会产生反射、折射和散射的特性,通过接收和分析反射波的信号来判断缺陷的位置、大小和形状。超声波检测的检出率可达92%左右,能够有效发现0.1 mm级别的微小缺陷^[3],与X射线检测相比,超声波检测成本仅为其1/3^[4]。该方法对发现叶片内部的气泡和分层缺陷具有较高的灵敏度,设备操作相对简便,成本较低,适用于现场检测。

激光扫描检测通过发射激光束并测量反射光的时间延迟或相位变化,获取物体表面的三维信息,可用于检测叶片表面的形状偏差和微小缺陷,具有高精度、非接触式检测的优点。

红外热成像检测是基于物体表面温度分布与内部结构和缺陷的相关性原理。当叶片内部存在缺陷时,在热激励作用下,缺陷部位与正常部位的热传导特性不同,会导致表面温度分布异常,通过红外热成像仪捕捉这种温度差异,进而识别叶片材料的不均匀性和内部缺陷。该方法检测速度快,可大面积检测,但对缺陷的定量分析难度较大。

1.2 机器视觉检测技术

机器视觉检测技术是利用高清摄像头获取叶片表面图像,再借助计算机算法对图像进行处理、分析和理解,从而实现对叶片表面缺陷的自动检测。其工作流程一般包括图像采集、图像预处理、特征提取和缺

陷识别等环节。

机器视觉检测技术具有显著的优势。首先，检测速度快，能够实现自动化、高速检测，大大提高检测效率；其次，检测数据可存储和分析，便于建立质量追溯体系，对产品质量进行全程监控；最后，结合深度学习技术，如卷积神经网络（CNN），可以不断优化缺陷识别模型，提高检测的准确性和适应性，能够检测出肉眼难以察觉的微小缺陷。

1.3 无人机巡检技术

无人机巡检技术借助无人机携带高分辨率摄像头或其他检测设备，对风电叶片进行远程检测。无人机可以灵活地飞行到风机叶片周围，获取多角度、高清晰度的图像数据。

在实际应用中，无人机巡检技术适用于各种复杂的风电场环境，尤其是那些地形复杂、人工难以到达的区域。无人机可以在短时间内完成对多个风机叶片的检测，大大减少了风机的停机时间，降低了检测成本。通过搭载先进的图像处理技术和人工智能算法，无人机巡检系统能够自动识别图像中的叶片缺陷，并对缺陷进行分类和评估，提高了检测精度和可靠性。

1.4 人工智能与大数据分析技术

人工智能与大数据分析技术在风电叶片质量检测中发挥着重要作用。利用深度学习算法，可以对大量的检测数据进行深度挖掘和分析，通过对历史检测数据的学习，模型能够自动提取数据中的特征和规律，从而提高缺陷检测的准确性和效率。

在预测叶片可能出现的质量问题方面，机器学习算法可以结合叶片的设计参数、运行工况、环境数据等多源信息，建立预测模型。例如：通过分析叶片的疲劳数据、温度变化数据和应力数据，预测叶片在未来运行过程中可能出现的裂纹、磨损等缺陷，提前采取维护措施，避免故障发生。

结合历史数据和实时检测数据，利用大数据分析技术可以优化质量检查流程。通过对不同批次、不同型号叶片的检测数据进行统计分析，确定最佳的检测周期、检测方法和检测重点，合理分配检测资源，提高质量检查的针对性和有效性。

2 智能检测技术在风电叶片供应链质量检查中的应用

2.1 无损检测技术的应用

在风电叶片生产过程中，无损检测技术用于原材料检验、生产过程中的半成品检测以及成品的最终检

测。在原材料检验阶段，通过超声波检测可以检测纤维增强材料中的分层、气泡等缺陷，确保原材料质量符合要求。在叶片制造过程中，对叶片的各个部件，如大梁、腹板等进行 X 射线检测，及时发现内部的焊接缺陷、疏松等问题，避免不合格品进入下一生产环节。

在叶片成品检测阶段，红外热成像检测可以对叶片整体进行快速扫描，检测是否存在因制造工艺不当导致的材料不均匀区域。例如：某风电叶片制造企业在生产过程中，采用红外热成像检测技术对一批叶片进行检测，发现其中 5% 的叶片存在局部材料温度异常区域，经进一步分析，确定是由于树脂灌注不均匀造成的，及时对这些叶片进行了返工处理，避免了潜在的质量隐患。

2.2 机器视觉检测技术的应用

机器视觉检测主要应用于叶片表面质量检测，包括叶片脱模后的外观检测、运输和安装过程中的损伤检测等。在叶片脱模后，利用机器视觉系统对叶片表面进行全面扫描，能够快速检测出表面的裂纹、划痕、砂眼等缺陷。例如：某大型风电叶片生产企业引入机器视觉检测系统后，检测效率提高了 3 倍，缺陷检测准确率达到 95% 以上。该系统不仅能够准确识别缺陷，还可以对缺陷的位置、尺寸进行精确测量，并将检测数据实时存储到数据库中，方便后续的质量追溯和统计分析。

2.3 无人机巡检技术的应用

无人机巡检技术在风电场运维阶段发挥着重要作用。风电场通常分布在偏远地区，风机数量众多，人工巡检成本高、效率低。无人机巡检技术可以快速覆盖整个风电场，对风机叶片进行定期巡检。无人机巡检技术还可以与其他检测技术相结合，如搭载红外热成像仪或超声波检测设备，实现对叶片内部和表面缺陷的综合检测，进一步提高检测的全面性和准确性。

2.4 人工智能与大数据分析技术的应用

人工智能与大数据分析技术贯穿于风电叶片质量检查的全过程。在检测数据处理方面，利用深度学习算法对无损检测、机器视觉检测和无人机巡检获取的数据进行分析，能够快速、准确地识别缺陷。例如：通过对大量的超声波检测数据进行训练，建立的深度学习模型可以自动判断缺陷的类型和严重程度，准确率比传统的人工分析方法提高了 20% 以上^[5]。

通过大数据分析，还可以对不同厂家、不同型号的风电叶片质量进行对比评估，为风电叶片的选型和

质量改进提供参考。例如：对多个风电叶片制造商的产品检测数据进行分析后发现，某厂家生产的叶片在特定环境下出现裂纹的概率较高，通过与厂家沟通，协助其改进生产工艺，提高了产品质量。

3 研究案例与数据分析

为了进一步验证智能检测技术在风电叶片质量检测中的有效性，本研究选取了某风电叶片制造商的生产数据进行分析。该制造商在生产过程中同时采用了传统人工检测和智能检测技术，并记录了相关检测结果（见表1）。

实验数据情况如下：

1. 测试样本：选取了200片风电叶片作为测试样本，涵盖了不同型号和批次的产品，确保样本具有代表性。

2. 检测方法：分别采用传统人工检测、机器视觉检测、无人机巡检和AI算法分析四种检测方法。

表1 检测结果对比

检测方式	缺陷检测率	检测时间（单片）	误报率
人工检测	85%	120分钟	12%
机器视觉	92%	45分钟	8%
无人机巡检	90%	30分钟	10%
AI算法分析	95%	25分钟	5%

从实验结果可以看出，智能检测技术在各个方面都表现出明显的优势。在缺陷检测率方面，机器视觉、无人机巡检和AI算法分析的检测率均高于人工检测，其中AI算法分析的缺陷检测率最高，达到了95%，相比人工检测提高了10%。这表明智能检测技术能够更准确地发现叶片中的缺陷，有效避免漏检情况的发生。

在检测时间上，智能检测技术的优势更加显著。人工检测每片叶片需要120分钟，而机器视觉检测仅需45分钟，无人机巡检缩短至30分钟，AI算法分析用时最短，仅为25分钟。智能检测技术大大提高了检测效率，能够满足大规模生产和快速检测的需求。

在误报率方面，智能检测技术也低于人工检测。人工检测由于受到主观因素影响，误报率达到了12%，而机器视觉、无人机巡检和AI算法分析的误报率分别为8%、10%和5%。较低的误报率可以减少不必要的复查和处理工作，降低检测成本，提高生产效率。

综合以上数据对比分析，智能检测技术在风电叶

片质量检查中具有更高的准确性、更快的检测速度和更低的误报率，具有显著的应用价值。

4 结论

智能检测技术在风电叶片供应链质量检查中展现出了巨大的潜力和广阔的应用前景。无损检测技术能够深入检测叶片内部结构缺陷，保障叶片的内在质量；机器视觉检测技术实现了叶片表面缺陷的快速、准确识别，提高了检测效率和质量追溯能力；无人机巡检技术适用于复杂的风电场环境，大大降低了运维成本；人工智能与大数据分析技术则通过对检测数据的深度挖掘和分析，实现了质量预测和检测流程优化，提升了整体质量控制水平。

通过实际案例和数据分析可知，智能检测技术相比传统人工检测，在缺陷检测率、检测时间和误报率等方面都具有明显优势，能够有效提高风电叶片的质量，降低生产成本，保障风电机组的安全稳定运行。

随着科技的不断进步，智能检测技术在未来还将持续发展和完善。一方面，检测设备将更加智能化、小型化、便携化，检测精度和效率将进一步提高；另一方面，人工智能算法和大数据分析技术将不断创新，能够更好地处理复杂的检测数据，实现更精准的质量预测和缺陷诊断。可以预见，智能检测技术将在风电行业发挥更加重要的作用，推动风电产业向高质量、智能化方向发展。

在未来的研究和应用中，还需要进一步加强智能检测技术的标准化建设，完善不同检测技术之间的融合和协同应用机制，培养更多具备跨学科知识的专业人才，以更好地适应风电行业快速发展的需求，为全球清洁能源事业的发展提供有力支持。

参考文献：

- [1] 李华,陈杰,等.风电叶片质量检测技术的对比与优化[J].机械工程学报,2023,59(10):235-245.
- [2] 张勇,王亮,等.全球风电市场发展现状及对我国的启示[J].能源研究与管理,2024(03):1-8.
- [3] 刘峰,张悦,等.基于超声导波的风电叶片复合材料缺陷定量检测方法研究[J].机械工程学报,2022,58(16):187-195.
- [4] 赵阳,陈辉,等.风电叶片无损检测技术的成本分析与效益评估[J].中国电力设备管理,2021(09):88-90.
- [5] 张策,王立闻,蒋思超,等.风电机组叶片健康检测与故障诊断技术研究[J].东方电气评论,2024,38(03):31-34.