 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11792

Research on Nondestructive Testing Technology Based on Multi-Technology Integration and Its Engineering Applications

Shishui Mao

Foshan Testing Institute, Guangdong Special Equipment Inspection Research Institute, Foshan, Guangdong, 528100, China

Abstract

With the rapid development of industrial equipment and construction projects, component defects seriously affect structural safety. Traditional destructive testing methods are difficult to meet the full lifecycle management requirements of engineering projects, while nondestructive testing (NDT) has become a core technology due to its non-invasive, efficient, and precise advantages. This paper reviews the principles and mainstream methods of NDT, analyzes defect characteristics and testing requirements for three major scenarios: wind power equipment, concrete structures, and metal welds, proposes a hierarchical combined testing selection principle, and explores the trends of intelligent, multi-technology integrated development and industry challenges. The study shows that multi-technology integration and intelligent testing can significantly improve testing efficiency, providing theoretical and practical support for quality and safety management in major engineering projects.

Keywords

nondestructive testing; multi-technology integration; wind turbine blades; metal welds; intelligent testing

基于多技术融合的无损检测技术研究与工程应用

毛石水

广东省特种设备检测研究院佛山检测院，中国 · 广东 佛山 528100

摘　要

随着工业装备与建筑工程快速发展，构件缺陷严重影响结构安全。传统破坏性检测难以满足工程全生命周期管控需求，无损检测[1]凭借非侵入、高效精准等优势成为核心技术。本文梳理无损检测原理与主流方法，针对风电装备、混凝土结构、金属焊缝三大场景分析缺陷特征与检测需求，提出分级联合检测选型原则，探讨智能化、多技术融合发展趋势及行业挑战。研究表明，多技术融合与智能检测可显著提升检测效能，为重大工程质量安全管控提供理论与实践支撑。

关键词

无损检测；多技术融合；风电叶片；金属焊缝；智能检测

1 概述

1.1 研究背景与意义

现代工业装备不断向大型化方向迭代，建筑工程的结构形式愈发复杂，各类新型复合材料也得到大范围普及，在此背景下，构件内部隐蔽缺陷带来的安全风险持续升高。风电叶片界面脱粘、混凝土结构体内部空洞、金属焊接部位裂纹等问题，都会直接缩短构件服役周期，甚至引发结构性安全事故。传统的破坏性检测 [2] 方法虽然能够精准定位缺陷位置并测量参数，但检测操作会对构件本体造成永久性损伤，无法适配工程现场批量抽检、在线长期监测以及全生命周期质量管控的实际工作要求。无损检测技术依托非破坏性检测、作业效率高、检测结果可靠的特点，目前已经成为工程质量管控、安全风险前置防控、缩减设备运维开支的核心技术方案。

1.2 国内外研究现状

欧美发达国家开展无损检测相关研究时间更早，整体技术体系也更为成熟，在相控阵超声检测 [3]、工业计算机断层扫描、电磁超声检测、红外热成像检测等前沿技术领域具备明显技术优势。美国 ASNT、欧盟 EN ISO 等权威机构搭建了完备的行业标准体系，为全球无损检测作业的标准化落地提供了规范依据。在技术研发层面，人工智能算法与无损检测场景的结合已经成为海外企业的重点研发方向，诸多行业头部企业均推出搭载深度学习模型的智能缺陷识别系统，能够自主完成焊缝、复合材料构件缺陷的分类判定与定量检测。

国内无损检测行业经过数十年的技术积累与工程实践，已经搭建起包含超声、射线、涡流、磁粉、渗透五大常规检测手段的完整技术体系，相关技术方案已经在风电工程、建筑建设、轨道交通等多个行业落地规模化应用。国内科研院

【作者简介】毛石水（1984–），中国浙江江山人，本科，工程师，从事承压类特种设备检验研究。

所与设备厂商近年在超声共振谱检测、无人机搭载红外巡检设备、多检测手段融合方案等方向取得了较多研究成果，但客观来看，国内行业依旧存在短板：高端检测设备核心零部件国产化程度不足、智能检测算法商业化落地程度有限、细分新材料检测标准体系仍不完善。

1.3 研究内容与技术路线

本文围绕无损检测的基础理论知识与现场工程应用场景展开分析研究，核心研究内容划分如下：

梳理无损检测各类技术的底层物理原理，对比划分不同主流检测方式的技术特征与适用边界；

选取风电叶片 [4]、建筑混凝土结构、金属焊接接头三个典型工程场景，梳理各场景下高频出现的缺陷类型与现场检测实际需求；

在三类应用场景下横向对比不同无损检测技术的适用范围、检测精度、施工成本与固有局限性；

分析人工智能算法、自动化检测设备、多技术融合方案在无损检测行业的落地应用趋势；

结合一线工程检测经验，归纳不同工况下无损检测技术的选用依据，同时给出现场检测作业的优化策略。

本文整体技术路线遵循「理论文献调研→典型应用场景剖析→多技术横向对比→行业前沿趋势分析→工程实践方案总结」的逻辑脉络，依靠文献研读、实际案例拆解、多维度技术对比三种研究方法，保证整篇研究内容兼具理论科学性、现场实用性与行业前瞻性。

2 无损检测核心原理与主流方法

2.1 核心原理

无损检测技术依托声学、电磁学、光学、热传导等基础物理与材料力学理论，通过采集被测构件声学信号、电磁参数、光学影像、温度场等物理参数的变化规律，反向推导构件内部是否存在缺陷，同时判定缺陷的位置、尺寸与损伤类型。其基础物理逻辑可以概括为两点：构件无损伤区域内部材质均匀，各项物理参数呈现均匀分布状态；缺陷区域会改变局部材料密度、弹性模量、导电率等属性，引发对应物理参数出现异常波动，设备捕捉到这类异常信号后，即可完成缺陷识别与评估。

2.2 主流检测方法分类

按照检测依托的物理原理与设备类型进行划分，现阶段主流无损检测技术可以划分为声学检测、电磁检测、光学检测、射线检测、热学检测五大类别。

3 典型工程场景无损检测技术应用

3.1 风电装备无损检测

3.1.1 场景特点与典型缺陷

风电装备长期处于野外露天环境之中，温度、湿度、风力等变化较大，叶片、塔筒、轴承等主要受力部件很容易出现各种损伤。风电叶片复合材料构件常见的缺陷有：复合材料层间脱粘、分层剥离损伤；内部蜂窝填充区域空洞、填料密实度不足；叶片外表面裂纹、边缘磕碰损伤；叶片粘接接头界面失效。

3.1.2 主流技术应用与优化方向

相控阵超声检测（PAUT）：适合精准定位叶片内部脱粘、分层类缺陷。优化方案为用柔性阵列探头适应叶片的弧形曲面结构，用人工智能算法解析超声图谱来提高缺陷识别的速度和准确度。

红外热成像检测：多用于大面积叶片外观与内部缺陷快速筛查。优化方案是在无人机上安装红外相机进行远距离高空巡检，用深度学习算法自动识别热异常区，降低人工读图的误判率。

超声共振谱检测：适合叶片出厂环节批量快速筛查。优化方案就是建立各种型号叶片的标准共振频率库，根据项目验收等级来确定检测阈值，满足各种严格的检测要求。

3.1.3 技术选型原则

现场检测采取「初筛排查 + 定点精测」的分级选择方式，即根据检测目的的不同，采用不同的检测方法。

出厂质检阶段用超声共振谱做批量初筛，快速筛除有明显缺陷的不合格叶片；

运运维阶段依靠无人机红外热成像对整个叶片进行大面积扫描，找到可疑的缺陷点位；

疑似缺陷区域用相控阵超声设备做精细扫描，测量缺陷尺寸，判定损伤等级。

3.2 建筑工程混凝土结构无损检测

3.2.1 场景特点与典型缺陷

混凝土结构施工与服役阶段常见缺陷 [5] 类型如下：内部空洞、蜂窝麻面、骨料夹渣问题；钢筋套筒注浆不饱满、套筒与钢筋界面剥离；FRP 加固复合材料层与混凝土基底脱粘；构件表层及深层结构性裂缝。

3.2.2 主流技术应用与优化方向

冲击回波检测：多用于探测混凝土内部空洞、测量裂缝深度。优化方案为使用多通道同步检测设备提高扫描速度，用频域信号分析方法来发现微小尺寸的隐蔽缺陷。

地质雷达（GPR）可以用来定位钢筋位置、探测内部空洞、检测 FRP 加固层脱粘。改进方案为采用高频天线改善微小缺陷的成像效果，用 AI 算法自动分析雷达扫描图像，减少人工读图工作量及错误。

红外热成像检测：适合排查 FRP 界面脱粘、表层裂缝。优化方案为采用热风外加热的主动热激励方式，拉大缺陷区和正常区的温度差值，并用无人机设备完成高层建筑外立面高空检测工作。

常规超声检测：针对混凝土深层裂缝、注浆缺陷检测。优化方案为采用低频超声探头提高声波穿透深度，用相控阵扫描模式对异形混凝土结构进行无死角全覆盖检测。

3.2.3 技术选型原则

遵循「由浅至深、分层检测、精准定位」的选用逻辑：表层可视缺陷：目视检测结合红外热成像快速筛查；浅层缺陷（0-50cm 深度）：优先使用冲击回波、地质雷达设备检

测；深层缺陷（深度超过 50cm）：采用低频超声检测方式；FRP 加固层脱粘问题，用红外热成像和超声检测相结合的方式进行检测，保证检测结果的可靠性。

3.3 金属结构焊缝无损检测

3.3.1 场景特点与典型缺陷

金属焊接接头在焊接成型和长期受力之后，会形成以下常见的缺陷。

焊缝根部未焊透、坡口位置未熔合；焊缝内部气孔、夹渣、夹钨等；焊接热裂纹、冷裂纹，疲劳产生的裂纹；焊缝咬边、焊接形变。

3.3.2 主流技术应用与优化方向

射线照相检测（RT）：主要检测焊缝内部气孔、夹渣、未焊透等体积型缺陷。优化方案为用数字射线 DR 成像代替传统的胶片射线检测，提高成像速度和图像分辨率，并且配合工业 CT 扫描来定位微小缺陷的三维位置，满足高精度焊缝检测的要求。

超声检测（UT）：擅长识别焊缝内部裂纹、未熔合等面状缺陷。优化方案为相控阵超声设备可以做多角度扇形扫查，提高角焊缝、管板异形焊缝的扫描覆盖率，配合超声衍射时差法，对微小裂纹高度进行准确测量。

电磁超声检测（EMAT）[6] 可以在高温环境下、异形金属构件表面进行焊缝检测。优化方案是用迭代优化换能器结构来提高信号接收灵敏度，用人工智能模型自动识别、分类缺陷种类和尺寸，减少人工判读的依赖。

磁粉检测（MT）：专门针对焊缝表面与近表面裂纹缺陷检测。优化方案使用荧光磁粉提高缺陷显示的对比度，用自动化磁粉探伤设备对焊缝进行批量流水线检测，保证检测结果的一致性。

3.3.3 技术选型原则

采用「表面缺陷筛查 + 内部缺陷精检」联合检测思路：表面、近表面裂纹缺陷：磁粉检测、渗透检测快速筛查；焊缝内部纵深缺陷：射线检测、相控阵超声设备精准定量检测；高温、异形曲面等特殊工况：选用电磁超声检测方案适配复杂作业环境。

4 无损检测前沿技术融合应用趋势

4.1 人工智能与无损检测深度融合

缺陷智能识别，用 CNN 卷积神经网络、U-Net 分割网络等深度学习模型，自动解析超声图谱、红外热图、雷达扫描图像中的缺陷特征，行业主流算法的识别准确率可以达到 95% 以上，大大降低了人工读图的成本和主观误判。

缺陷量化评价，即用训练好的缺陷特征参数和实际物理尺寸之间的关系模型，直接得到缺陷长度、深度等量化的数据，给构件寿命评价和维修决策提供数据支持。

智能扫描路径规划，用强化学习算法自动规划检测设备移动扫描轨迹，在复杂异形构件检测中提高扫描覆盖率和整体作业效率。

4.2 自动化与智能化检测

自动化检测工作站是机械臂上装有多种传感器的自动检测设备，可以完成扫描、成像、判读全过程无人作业，避免人工操作造成的检测误差。

无人化户外检测，利用无人机、轨道巡检机器人、地面无人巡检车对高空、高危、大型野外构件进行检测作业，避免人员高空作业的安全风险。

长期在线监测体系，在重要的构件上布置分布式传感器阵列，利用云端数据平台连续采集分析信号，对缺陷的发展变化进行实时跟踪，提前发出结构失效预警。

5 结论与展望

5.1 结论

无损检测技术已经成为重大工程质量控制、结构安全防护不可或缺的技术手段，本文对风电叶片、建筑混凝土结构、金属焊缝三种典型工程场景进行系统性分析研究，得到如下结论：不同的应用场景下构件缺陷产生的机理、形态特征是不一样的，没有通用型的最优检测技术，需要根据场景缺陷的特点来选择相应的检测技术组合；多检测技术融合方案、人工智能智能判读模式可以很好地弥补传统单一检测技术的不足，提高检测精度和现场作业效率；标准化作业流程、自动化设备、智能算法迭代属于无损检测行业长久发展的必然趋向，可以促使整个行业向着规范化、高质量化迈进。

5.2 展望

无损检测技术体系未来发展方向为以下几点。

全流程智能化升级，从检测硬件设备、扫描采集数据、缺陷判读到出具检测报告，建立端到端的智能化检测工作体系；构件全生命周期监测，打通构件出厂检测、施工验收检测、在运定期巡检三个阶段的数据链路，创建动态监测评价体系，达成缺陷早发觉。低碳环保型检测技术研发，开发低辐射、低功耗的新式检测设备，削减检测作业期间的能耗和环境影响，达成绿色检测作业；跨领域技术交叉融合，和数字孪生技术、物联网感知、大数据分析平台深度融合，创建起检测、评价、运维一体化的智能管控平台，改善工程整体质量控制水平。

参考文献

[1] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测术语[S]. GB/T 12604.1-2021. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[2] 郑晖, 林树青. 无损检测（第3版）[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2018.

[3] 王海涛, 李秋锋. 相控阵超声检测技术发展与应用[J]. 无损检测, 2020, 42(5): 1-8.

[4] 张宏, 刘松平. 复合材料风电叶片无损检测技术研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 140-158.

[5] 李军, 陈积懋. 混凝土结构无损检测技术现状与展望[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2): 1-8.

[6] 赵友亮, 周进节. 深度学习在焊缝无损检测图像识别中的应用综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 120-136.