

机械设备无损检测技术现状及运维优化策略

贾常青 畅静静

天辰化工有限公司 新疆 石河子 832000

摘要：机械设备作为现代工业体系的基石，其结构完整性与运行可靠性直接关乎生产安全、效率与经济效益。无损检测（Non-Destructive Testing, NDT）技术因其在不损害被检对象的前提下，精准识别内部与表面缺陷的能力，已成为保障设备全生命周期健康的核心手段。本文系统性地梳理了当前主流无损检测技术的物理原理、应用特性与发展现状，并深入探讨了在工业4.0背景下，如何将无损检测数据与预测性维护、数字孪生等先进运维理念深度融合，构建从“被动响应”到“主动预见”的智能化运维优化策略。文章进一步展望了人工智能、机器人自动化与多模态信息融合驱动下的无损检测技术未来演进方向，旨在为提升我国高端装备的可靠性与智能化运维水平提供理论参考。

关键词：无损检测；超声检测；射线检测；预测性维护；运维优化

引言

在当今高度自动化与智能化的工业生产环境中，机械设备的复杂性与集成度不断提升，其一旦发生故障，不仅会导致高昂的停产损失，更可能引发灾难性的安全事故。因此，对设备进行定期、有效的健康评估与状态监控，是确保工业系统稳定、高效、安全运行的关键环节。传统的破坏性检测方法因会损伤甚至报废被检件，显然无法满足在役设备的常态化监测需求。在此背景下，无损检测（NDT）技术应运而生并迅速发展，它通过利用声、光、磁、电、热等物理场与材料相互作用时产生的信号变化，来探测和评估材料或结构中的不连续性（如裂纹、气孔、夹杂、腐蚀等），而不会对其使用性能造成任何影响。无损检测的重要性已得到全球工业界的广泛公认，其应用范围横跨航空航天、能源电力、轨道交通、石油化工、重型制造等几乎所有关键领域。随着新一轮科技革命的浪潮，特别是人工智能、物联网、大数据和数字孪生等技术的迅猛发展，无损检测正经历一场深刻的智能化变革。其角色也正在从单一的“缺陷发现者”向“健康管理师”转变，成为连接物理世界与数字世界的桥梁，并为更高阶的运维优化策略提供坚实的数据基础。本文将围绕这一主题，首先阐述当前主流无损检测技术的现状，继而探讨基于这些技术的现代化运维优化路径，并对未来发展趋势进行展望。

1 主流无损检测技术现状分析

经过长期的发展与实践，无损检测技术已形成一套成熟且多样化的技术体系。其中，超声、射线、磁粉、渗透和涡流检测被公认为五大常规方法，各自凭借独特的物理原理和适用场景，在工业检测中发挥着不可替代的作用。

1.1 超声检测（Ultrasonic Testing, UT）

超声检测是利用频率高于人耳听觉上限（通常大于20kHz）的机械波在材料中传播的特性来进行检测。当超声波在均匀介质中传播时，其能量衰减较小；但当遇到声阻抗不同的界面（如缺陷、底面）时，会发生反射、折射和散射。通过精确测量回波信号的时间延迟和幅度变化，可以确定缺陷的位置、大小和性质。超声检测以其强大的穿透能力（可检测数米厚的金属构件）、高灵敏度（能识别微米级的微小缺陷）以及对缺陷定量评估的准确性而著称^[1]。近年来，相控阵超声（PAUT）和全聚焦法（TFM）等先进成像技术的出现，更是极大地提升了超声检测的空间分辨率和成像直观性，使其能够对复杂几何形状的工件进行快速、全面的扫查，并生成类似医学B超的清晰图像，显著降低了对操作人员经验的依赖。

1.2 射线检测（Radiographic Testing, RT）

射线检测是基于不同物质对射线（主要是X射线或 γ 射线）的吸收系数存在差异这一原理。当射线穿透被检物体时，内部的缺陷（如气孔、夹渣）会改变局部区域的射线强度，这种强度变化被记录在胶片或数字探测器上，形成一幅反映物体内部结构的二维投影图像。射线检测的最大优势在于其结果的直观性和永久可记录性，能够清晰地展示缺陷的平面投影形态、尺寸和分布，特别适用于焊缝、铸件等体积型缺陷的检测。然而，该技术也存在明显的局限性，例如对裂纹等面状缺陷（尤其是当裂纹面与射线方向平行时）的检出率较低，同时涉及放射性安全防护问题，操作复杂且成本较高。随着数字成像技术（如计算机射线照相CR、数字射线照相DR）和工业CT（Computed Tomography）技术的普及，射线检测正朝着更高效率、更低辐射剂量和三维可视化方向发展

展,工业CT甚至能够提供被检物体内部结构的完整三维模型,实现真正的“透视”。

1.3 磁粉检测 (Magnetic Particle Testing, MT) 与渗透检测 (Penetrant Testing, PT)

磁粉检测和渗透检测是两种主要针对工件表面和近表面开口缺陷的检测方法。磁粉检测仅适用于铁磁性材料,其原理是通过磁化工件,使缺陷处产生漏磁场,从而吸附施加在其表面的磁粉,形成肉眼可见的磁痕,以此指示缺陷的存在。该方法操作简便、成本低廉、灵敏度高,尤其擅长发现细微的表面裂纹。渗透检测则是一种更为通用的方法,适用于所有非多孔性材料。它利用毛细作用原理,让含有荧光或着色染料的渗透液渗入表面开口缺陷中,清洗掉表面多余渗透液后,再施加显像剂将缺陷中的渗透液吸出,从而在紫外光或白光下显示出缺陷的轮廓。这两种方法虽然简单有效,但都属于表面检测技术,无法探测材料内部的缺陷,且检测过程通常需要人工目视判读,主观性强。

1.4 涡流检测 (Eddy Current Testing, ET)

涡流检测是基于电磁感应原理。当通有交变电流的检测线圈靠近导电材料时,会在材料表面及近表面感应出涡流。材料的电导率、磁导率以及是否存在缺陷等因素都会影响涡流的流动状态,进而改变检测线圈的阻抗。通过监测线圈阻抗的变化,即可判断材料的性质或探测缺陷。涡流检测具有非接触、检测速度快、易于实现自动化等优点,特别适合于管材、棒材、线材等形状规则产品的在线高速检测,以及涂层厚度、电导率等参数的测量^[2]。然而,其检测深度受到“趋肤效应”的限制,主要适用于表面和近表面缺陷的检测,且对被检材料的电磁特性较为敏感。

2 基于无损检测的运维优化策略、

无损检测的价值不应仅仅停留在“发现问题”的层面,而应深度融入到设备的全生命周期管理中,为运维决策提供科学依据,从而实现从传统维修模式向智能化运维模式的根本性转变。

2.1 从定期检测到预测性维护 (PdM)

传统的设备维护策略主要包括事后维修和预防性维护。前者是“坏了再修”,代价高昂;后者是“到期就修”,容易造成过度维护。预测性维护 (Predictive Maintenance, PdM) 则代表了更先进的理念,其核心在于“该修才修”。无损检测技术,特别是那些能够对同一部位进行重复、量化检测的技术(如超声测厚、涡流检测),为PdM提供了关键的数据输入。通过对设备关键部位进行周期性的无损检测,可以建立起缺陷尺寸(如裂纹长度、壁

厚减薄量)随时间演变的数据库。基于这些历史数据,结合材料力学和断裂力学模型,可以外推预测缺陷的扩展速率和临界尺寸,从而精准估算设备的剩余使用寿命 (Remaining Useful Life, RUL)。这使得维护计划可以从固定的日历时间驱动,转变为基于设备实际健康状态驱动,极大提高了维护的针对性和经济性。

2.2 数字孪生驱动的智能运维闭环

数字孪生 (Digital Twin) 技术为无损检测数据的深度应用开辟了全新的维度。数字孪生是指在虚拟空间中构建一个与物理设备完全对应的、动态更新的数字化模型。这个模型不仅包含了设备的几何、材料、工艺等静态信息,更重要的是,它能够通过传感器网络(包括无损检测数据)实时映射物理设备的运行状态。当一次无损检测完成后,其发现的缺陷信息(位置、尺寸、类型)可以被精确地标注并融入到设备的数字孪生体中。随后,可以在虚拟模型上进行应力仿真、疲劳分析等,评估该缺陷对设备整体性能和安全裕度的影响^[3]。更进一步,数字孪生体可以模拟不同的维修方案(如打磨、补焊、更换)的效果,辅助工程师选择最优的维护策略。维修完成后,新的无损检测数据又会反馈回孪生体,更新其健康状态,从而形成了一个“检测-评估-决策-执行-验证”的智能运维闭环。这种虚实融合的方式,使得运维决策从经验驱动走向了模型驱动和数据驱动,显著提升了决策的科学性和前瞻性。

2.3 构建综合健康管理 (PHM) 体系

无损检测数据是设备综合健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 体系中的重要组成部分。一个完整的PHM体系是一个多源信息融合的系统,它不仅包含定期的无损检测数据,还整合了设备运行过程中的在线监测数据(如振动、温度、压力、电流等)。在线监测数据反映了设备的动态性能退化,而无损检测数据则提供了关于结构完整性损伤的直接证据。将这两类数据进行时空对齐和关联分析,可以构建更为全面和准确的设备健康指标 (Health Index)。例如,轴承振动信号的异常可能预示着潜在的损伤,而后续的超声或涡流检测则可以确认损伤的具体形式和严重程度。这种多维度、多层次的健康评估,能够有效避免单一数据源的误报和漏报,为制定精细化的运维策略提供坚实支撑。

3 无损检测技术的未来发展趋势

面向未来智能制造和工业互联网的需求,无损检测技术正沿着自动化、智能化、集成化和远程化的方向加速演进。

3.1 人工智能与自动化检测深度融合

人工智能,特别是深度学习技术,正在深刻改变无损检测的各个环节。在数据采集端,搭载多种传感器的自动化检测机器人(如爬壁机器人、管道机器人、无人机)正逐步取代人工作业,能够在高空、高压、有毒、狭窄等危险或难以触及的环境中自主完成检测任务,极大地提高了检测的安全性和效率。在数据分析端,深度学习模型(如卷积神经网络CNN)被广泛应用于自动识别和分类射线底片、超声B/C扫描图像、涡流信号图谱中的缺陷,其识别速度和准确率已达到甚至超越人类专家的水平,有效解决了传统人工判读主观性强、效率低、易疲劳的痛点。AI的应用正推动无损检测从“能识别”向“会分析”、“能决策”的更高阶段发展。

3.2 多模态信息融合与新型检测技术

单一的无损检测方法往往存在局限性,未来的趋势是将多种检测技术进行有机融合,以实现优势互补。例如,将超声检测的高穿透性与射线检测的直观成像能力相结合,或将涡流检测的高速扫描与磁粉检测的高表面灵敏度相协同。此外,一些新兴的无损检测技术也展现出巨大潜力,如基于激光超声、太赫兹波、红外热成像等的检测方法,它们在特定应用场景下(如复合材料、非接触检测)具有独特的优势^[4]。多模态信息融合不仅指多种物理场的融合,还包括将无损检测数据与设备的设计、制造、运行等全生命周期数据进行深度融合,以构建更全面的设备健康画像。

3.3 云平台、物联网与远程专家系统

随着工业物联网(IIoT)技术的成熟,无损检测设备正变得越来越“智能”和“联网”。检测数据可以实时上传至云端平台,实现数据的集中存储、管理和分析。这不仅便于进行大数据挖掘和长期趋势分析,还能支持远程专家会诊。现场检测人员遇到疑难问题时,可以将原

始数据和初步分析结果即时共享给远端的领域专家,专家通过专业的软件工具进行深度分析并给出诊断意见,打破了地域限制,实现了优质检测资源的共享。同时,基于云平台的标准化检测流程和知识库,也有助于提升整体行业的检测水平和一致性。

4 结语

无损检测技术作为保障机械设备安全可靠运行的“工业之眼”,其内涵与外延正在不断丰富和拓展。从经典的五大常规方法到如今融合了相控阵、工业CT等先进技术的现代检测体系,无损检测在精度、效率和适用性方面均取得了长足进步。然而,其真正的价值释放,在于将其深度嵌入到现代化的设备运维体系之中。通过与预测性维护、数字孪生、综合健康管理等先进理念相结合,无损检测数据得以从孤立的“体检报告”转变为驱动智能决策的“健康基因”。展望未来,在人工智能、机器人自动化、多模态融合及云边协同等技术的共同驱动下,无损检测必将朝着更高水平的自主化、智能化和系统化方向发展,为构建安全、高效、绿色的现代工业体系提供不可或缺的技术支撑。持续推动无损检测技术的创新与应用,对于提升我国高端装备制造的核心竞争力和本质安全水平具有深远的战略意义。

参考文献

- [1]冯治国.浅谈机械设备维修中无损检测技术的实践应用[J].机械工程与自动化,2023,(03):219-220+223.
- [2]李俊峰.机械设备无损检测技术与安全分析[J].造纸装备及材料,2022,51(09):16-18.
- [3]李云鹏.机械设备维修中无损检测技术的应用[J].内蒙古煤炭经济,2020,(16):174-175.
- [4]庄会峰.机械设备无损检测与安全分析[J].造纸装备及材料,2021,50(11):110-112.