

机械设备维修中无损检测技术的实践应用

赵群飞

(中铁三局集团建筑安装工程有限公司, 山西 太原 030006)

摘 要 无损检测技术因检测方式的高度集成性, 其应用场景和技术要求越来越复杂, 在机械设备维修中体现为检测对象多样化、故障类型复杂化, 也带来了更为复杂的检测需求和技术影响形式。本文针对机械设备维修中无损检测技术的实践应用研究, 分析了无损检测技术特点, 并且在分析机械设备维修难点的基础上解析了无损检测技术在机械维修中的应用要点。研究结果表明, 通过运用无损检测技术能够保障机械设备维修的精准性、高效性, 降低维修成本, 确保机械设备能够稳定运行。

关键词 机械设备维修; 无损检测技术; 传动轴超声波检测技术; 变速器故障振动检测技术

中图分类号: TH17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.023

0 引言

机械设备维修是确保机械设备正常运行, 保障工程施工顺利进行的关键。随着工程领域发展速度不断加快, 机械设备精密度不断提升, 对于机械维修工作也有更高要求。传统的维修方法需要对设备进行全面拆解, 耗时耗力, 还会导致设备出现二次损伤的现象。无损检测技术应用后能够解决以往机械设备维修中存在的各项问题, 提高检修的效率和质量, 且防止发生二次损伤问题。无损检测技术能在不破坏设备主体结构部件的前提下, 及时、准确地掌握内部和表面缺陷, 使机械设备的维修更加准确、可靠, 也能提高机械设备的运行水平, 降低维修成本, 延长使用寿命。

1 无损检测技术分析

无损检测技术属于非破坏性的技术, 指的是在不损害或者不影响检测对象使用性能的基础下, 利用材料内部结构异常或缺陷造成的热、声、光、电、磁反应变化, 通过物理学手段, 采用现代化的技术和检验器材, 对设备表面以及内部结构性质、状态展开全面性检查以及测试。它具备下述特点: (1) 非破坏性: 无损检测技术应用后不会对机械设备产生任何损伤, 确保在检测过程中机械设备处于完好性状态。(2) 全面性: 经过对机械设备局部或者整体方面进行全面检查, 能够快速确定内部以及表面的缺陷问题。(3) 实时性: 有些机械设备无损检测技术在应用时能够达到实时检测的效果, 快速、精准地确定设备存在的各项问题。(4) 准确性高: 现代科技发展速度加快, 无损检测技术水平也在不断提升, 准确度提高, 能够精准判定机械设备缺陷的位置、大小以及性质^[1]。

2 机械设备维修难点分析

2.1 内部结构隐蔽性故障定位困难

机械设备内部组成部件较多, 尤其是高精密设备, 其内部结构更加复杂, 包含传动轴、齿轮箱、发动机、曲轴, 一旦故障存在于封闭空间或者材料内部, 采用简单的目视检查或者工具无法及时判定。例如: 有些机械设备在运行过程中长期受到交变荷载的作用, 曲轴极易发生微小的裂纹, 也会出现明显痕迹; 液压系统发生腐蚀、堵塞、电子元件潜在短路问题, 利用无损检测技术能够快速定位并解决上述问题。如果不能及时诊断和处理必然造成机械设备出现故障, 甚至引发人员伤亡事故。

2.2 复杂工况下的动态检测技术瓶颈

机械设备在运行过程中因为面对的工作条件和环境比较特殊, 在高温、高压、高速作业状态中, 采用传统静态检测方法无法精准判定故障位置和类型。例如: 高速旋转的轴承在停机状态下没有表现异常现象, 但运行的过程中因为离心力作用形成微小变形或者裂纹; 高温条件下焊接接头由于热应力出现延迟裂纹的情况, 采用常规检测技术无法精准捕捉异常信号; 复杂工况条件下, 对于检测信号产生较强干扰, 需要采用多种传感器融合技术, 或者自适应滤波算法以提高检测精度^[2]。

2.3 多材质与复合结构的检测适配性影响

现代机械设备组成日益复杂, 尤其是高精密设备所使用的材料较为特殊, 如金属、陶瓷复合材料, 其材料的导电性、磁性、声阻抗方面存在很大差异。如果单纯采用某种无损检测技术, 难以达到检测精度的要求。例如: 碳纤维复合材料层压板中, 分层缺陷需

要使用超声波相控阵技术进行检测，而金属表面微裂纹则使用磁粉或者渗透方法检测；焊接接头部位极易发生气孔、夹渣、未熔合的缺陷，需要将射线技术、超声 TOFD 技术融合后提高检测精度。

3 无损检测技术在机械维修中的具体应用

3.1 传动轴超声波检测技术应用

传动轴检测的过程中采用超声波检测技术，主要工作原理是利用超声在不同介质内传播特性差异进行判定，确定传动轴是否存在缺陷问题。

超声波检测技术在应用的过程中使用超声波探头发射高频电磁脉冲，使其转变为超声波并耦合进入传动轴。利用超声波传输特性分析确定传动轴内部是否存在缺陷，如果传动轴内部存在缺陷问题，则在缺陷位置上出现超声波的反射现象，利用测定反射波特性掌握反射信号，并且将其转变为高频电脉冲，处理后能够精准分析反射波的位置、波形特征，进而判定传动轴内部缺陷问题。

在超声波检测技术应用过程中，需要落实各项参数设置工作，具体如下：选择适宜频率的探头，主要为 2.5 MHz 或 4.0 MHz，如采用直径 20 mm、2.5 MHz、0° 的直探头进行探测，能够提高传动轴的检测精度；合理设置量程，通常为 1 000 mm，能够精准检测传动轴状态；超声波检测灵敏度调教，将反射回来的超声波高度调整到 80% FSH，检测具备较高的精准性；缺陷定位，经过对反射波位置展开精准计算，确定缺陷在传动轴中的坐标数据。例如：X 点为缺陷发现时探头所处水平轴向位置，Y 点是缺陷被发现时探头所处深度 h（垂直轴向）：

计算公式为 $h=mD/n$

其中， n 是第一次界面与传动轴底波间的距离， D 为传动轴直径， m 为第一次界面波与缺陷回波间的最大距离。

3.2 变速器故障振动检测技术应用

在变速器故障检测过程中，选择振动检测技术主要是利用探测变速器齿轮、轴承、轴在运动时产生的振动现象。利用传感器能够获取振动特征数据，进而

精准识别异常振动信号，再判断变速器是否出现故障问题^[3]。如果变速器在投入使用过程中存在磨损、裂纹、装配误差的缺陷问题，利用振动特性的方式测定幅值、频率相位的各项参数，可提升变速器故障诊断精度。振动传感器具备较高精度，在检测过程中能够精准识别上述振动异常的数据信息，通过频谱分析、时域分析的方式获取特征频率，和正常条件下振动特征展开对比分析，进而能够确定故障源。振动检测技术在变速器故障诊断应用时，关键性参数见表 1。

3.3 发动机曲轴磁粉检测技术应用

在发动机检测过程中采用磁粉检测技术，它通过分析磁性材料在磁场中磁化现象，表面或近表面缺陷而形成的漏磁场与磁粉相互作用能够实现缺陷实时显示。在磁粉检测技术应用的过程中，利用直流电、交流电或者永磁体对曲轴施加磁场，如果曲轴内部存在裂纹、夹渣的缺陷，其缺陷位置的磁导率和基体存在较大差异，进而引起磁力线的畸变，在曲轴内部形成漏磁场。该条件下在曲轴表面喷洒磁粉，磁粉在漏磁场作用下被吸附并且堆积在缺陷位置形成可以观察的磁痕。因此，检测过程中利用分析磁痕的分布、形状、长度，能够精准判定缺陷的位置、形态以及延伸方向^[4]。

在磁粉检测技术应用的过程中，选择适宜磁化方法能够提高精度，具体包含如下几种：周向磁化法，采用通入电流的方式使得电流沿着曲轴传输，进而精准检测曲轴的纵向裂纹；纵向磁化法，利用线圈给曲轴形成轴向磁场，能够精准发现其轴向裂纹；复合磁化法，同时施加周向以及纵向磁场形成旋转矢量磁场，能够精准确定任意方向的缺陷；磁粉施加方法主要包含干粉法与湿粉法，湿粉法一般联合荧光磁粉应用，采用紫外线照射方式使得磁痕位置表现出黄绿色荧光，提高检测的精度和效率。曲轴检测完成后，采取退磁措施消除残余磁场对曲轴产生的影响。该技术应用中需做好下述控制措施：磁化电流，如周向磁化电流 $I=(5\sim10)D$ ， D 为曲轴直径）、磁悬液浓度（0.5～3 g/L；环境照度，如荧光磁粉检测时紫外线强度 $\geq 1\ 000\ \mu\text{m}/\text{cm}^2$ ，进而提高检测精度。

表 1 振动检测技术应用参数

关键数据项	数据描述	典型值范围
采样频率	振动信号采集的每秒采样次数，确保高频信号不丢失	10～20 kHz
振动幅值阈值	振动速度的报警阈值，超过此值时触发故障预警	0.1～1.0 mm/s
特征频率范围	齿轮啮合频率或轴承故障特征频率的分布范围，用于故障模式识别	齿轮： $z\times f_s$ （ z 为齿数， f_s 为轴频） 轴承：依故障类型计算
阶次分析精度	阶次分辨率，用于区分不同旋转部件的振动贡献	0.1 阶

3.4 齿轮箱内部缺陷的射线检测技术应用

齿轮箱内部缺陷检测中使用射线检测技术,通过发 X 射线、 γ 射线或中子射线,使其穿透齿轮箱材料,射线传入齿轮箱内部时,当存在材料密度、厚度以及缺陷问题时,如裂纹、气孔、夹杂物、强度出现衰减的情况,缺陷区域的射线吸收能力和基体材料存在很大差异,导致射线在透射过程中分布极为不均匀,造成其形成较大差异。通过射线检测设备能够及时、准确地接收透射射线,并且将其转变为可视化图像,从而能够精准掌握齿轮箱内部状态,判断是否存在缺陷问题^[5]。

根据齿轮箱的材质、厚度等参数确定适宜的射线能量,如 X 射线管电压为 50 ~ 450 kV,使得射线具备较强的穿透能力,进而提高检测的精度和效率。在射线检测的过程中需要将射线源和探头安装在齿轮箱两侧,按照检测要求调整射线束焦点尺寸,如 0.1 ~ 3 mm,使得射线检测具备较强的精度。对于齿轮箱结构组成比较复杂的情况,还要联合使用计算机断层扫描 CT 技术,采用旋转射线源与探测器能够精准掌握多个角度的投影信息,再利用三维重建算法构建立体图形,使得缺陷定位精准并且对齿轮箱缺陷进行量化分析。

检测结果需结合图像灰度值、对比度 $\Delta I/I$ 及散射比等参数进行判定。例如:通过分析射线图像中缺陷区域的黑度变化 (ΔI) 与射线强度 (I) 的比值,能够精准判定缺陷问题位置、大小以及形态,确保后续维修工作顺利开展。根据检测精度要求确保射线发射源与被检测表面保持 500 ~ 1 500 mm 距离,曝光时间 0.1 ~ 10 s,数字探测器像素尺寸 50 ~ 200 μm ,需要严格控制上述参数以确保检测精确度达标。

3.5 轴承表面裂纹的渗透检测技术应用

机械设备维修的过程中使用渗透检测技术,能够精准判定轴承表面裂纹缺陷,通过其毛细作用和显像剂显像的原理,利用液体渗透、吸附、扩散的方式能够确定缺陷问题。

渗透检测技术在应用的过程中其原理如下:根据渗透技术检测要求选择适宜渗透液,主要为红色着色剂或荧光剂,均匀涂抹在轴承结构表面,静置 5 ~ 30 min,其渗透时间和温度、材料表面粗糙度存在直接关系。渗透液经过毛细作用后进入开口、裂纹、气孔的缺陷中,进而形成液体填充的状态,为后续精准检测提供基础。

1. 清洗阶段。选用水剂或溶剂型的清洗剂,先将轴承表面的渗透液清理掉,并且根据轴承表面情况确定适宜清洗力度、时间,防止缺陷内部渗透液被洗出而影响检测精度。通常情况下,水洗压力在 0.34 MPa 以内,水洗时间在 1 min 以下。

2. 显像阶段。根据渗透检测要求,选用适宜的喷涂显像剂,主要为干粉型或水悬浮型,利用毛细作用将缺陷内部渗透液反向析出,进而使其缺陷位置形成肉眼可见的红色或荧光痕迹。荧光渗透检测需要在暗室内使用波长 320 ~ 400 nm 的黑光灯照射,荧光强度 $\geq 1\ 000\ \mu\text{m}/\text{cm}^2$ 时能够精准确定缺陷问题。

3. 缺陷评估。通过掌握渗透检测时的痕迹、形态、长度、宽度信息,能够精准判定缺陷等级。例如:线性缺陷长度 $\geq 1\ \text{mm}$ 或圆形缺陷直径 $\geq 0.5\ \text{mm}$ 都能精准测定。

4. 技术参数控制。渗透液温度:15 ~ 52 $^{\circ}\text{C}$,温度较低极易引发渗透性不足,过高则会导致渗透液蒸发影响检测精度。显像时间:7 ~ 60 min,温度提高的情况下能够快速显像,提高检测效率和精度。灵敏度等级:根据渗透检测要求选择灵敏度较高的标准块进行验证,需按照 ISO3452 标准的灵敏度要求进行控制。

5. 注意事项。轴承表面没有油污、锈蚀等情况,且粗糙度 $R_a \leq 12.5\ \mu\text{m}$ 。渗透液和显相剂具备兼容性,防止检测过程中发生反应而导致检测失效。检测阶段将残留的渗透液及时清理干净,以免在后续轴承使用过程中引发腐蚀性现象而给轴承的性能或者运行安全性造成不利影响。

4 结束语

在机械设备维修中,无损检测技术的应用具有较高的价值,它在提升机械设备维修效率、保障设备安全运行、降低运行成本、延长设备使用寿命方面具有重要意义。虽然无损检测技术在应用的过程中还存在不完善的地方,会影响到检测效果,但是要运用无人检测技术更好地为机械设备维修提供全面的服务,则需要根据实际情况做好无人检测技术的创新与优化,以发挥先进无损检测技术的优势,提高机械设备维修检测水平,为现代工程施工领域的长远发展奠定稳固的基础。

参考文献:

- [1] 阚凯. 机械设备维修中无损检测技术的实践应用[J]. 内燃机与配件, 2017(22):68-69.
- [2] 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.
- [3] 严露. 机械设备维修中无损检测技术的应用分析[J]. 南方农机, 2017,48(18):67-68.
- [4] 余铜柱. 试析无损检测技术在煤矿机械设备维修中的应用[J]. 设备监理, 2020(01):42-43.
- [5] 毛华晋. 无损检测技术在煤矿机械设备维修中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(04):166-168.