

超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用研究

陶益锋

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 超声波相控阵技术凭借独特优势在特种设备无损检测领域应用广泛。本文先阐述超声波基本特性、相控阵技术原理及检测系统构成,接着分析特种设备类型、结构特点与无损检测需求,指出该技术与特种设备检测需求高度适配。随后探讨在检测中的实施策略,包括检测前准备、过程操作、信号处理及人员培训等方面。最后分析技术应用面临的挑战,提出解决方案并展望发展方向,为该技术在特种设备检测领域的应用提供参考。

关键词: 超声波相控阵技术;特种设备;无损检测;实施策略;发展趋势

引言:在工业生产与民生保障中,特种设备如压力容器、管道、锅炉等发挥着关键作用。其运行安全性关乎人员生命与财产安全,无损检测是保障安全的重要手段。传统检测技术在面对特种设备复杂结构、特殊材料及高效检测需求时存在局限。超声波相控阵技术以高分辨率成像、灵活检测模式和快速扫描成像等优势,为特种设备无损检测带来新契机,深入研究其应用具有重要意义。

1 超声波相控阵技术基础与原理

1.1 超声波基本特性与传播规律

超声波的产生与接收依赖压电效应实现,压电材料在电信号激励下发生机械振动,进而辐射形成超声波,接收过程则是这一过程的逆向转换,将介质中传播的超声波振动转化为可处理的电信号^[1]。超声波在介质中的传播速度由介质自身物理特性决定,不同材质的介质会导致传播速度存在明显差异,传播过程中会因介质吸收、散射等因素出现能量衰减,衰减程度与介质黏度、晶粒尺寸及超声波频率密切相关。超声波在不同介质界面处会发生反射、折射与散射现象,反射现象源于两种介质声阻抗的差异,阻抗差异越大反射现象越显著,折射遵循特定的传播规律,散射则多由介质内部缺陷、不均匀颗粒等因素引发,会改变超声波传播方向与能量分布。

1.2 相控阵技术原理

相控阵技术以超声波干涉原理为核心,通过对多个独立换能器单元的协同控制,实现声束的灵活调控与精准聚焦。其工作原理在于通过精确控制各换能器单元的激发时间延迟,使各单元发射的子波束在空间叠加,形成具有特定方向和形状的合成声束,摆脱传统单换能器机械扫描的局限。阵列换能器由多个微型压电阵元、匹

配层及背衬材料构成,阵元负责超声波的发射与接收,匹配层用于减少声阻抗差异以提升透射效率,背衬材料则吸收杂波降低干扰,整体结构设计直接决定声束调控的精度与稳定性。电子扫描与聚焦技术通过预设延迟法则实现,改变阵元激励时序可使合成声束发生偏转,通过“两端先、中间后”的激励策略实现声束聚焦,动态调整延迟参数即可完成不同角度、不同深度的扫描,无需移动换能器本身。

1.3 超声波相控阵检测系统构成

阵列换能器模块是检测系统与被检测对象接触的关键部件,根据检测需求设计为不同阵列形式,其阵元数量、排列方式直接影响声束覆盖范围与调控灵活性,是实现精准检测的基础。信号发射与接收模块承担电信号与超声波信号的转换任务,发射模块根据延迟法则向各阵元输出激励电信号,接收模块则放大、滤波反射回来的电信号,并将模拟信号转化为数字信号。信号处理与成像模块通过专用算法对数字信号进行分析,提取有效信息并抑制干扰,以多种成像模式呈现检测结果,便于后续分析与解读,部分系统会引入插值算法与数字滤波器优化成像质量。系统控制与操作界面整合各类控制功能,可完成参数设置、扫描控制等操作,同时实时显示检测状态与成像结果,为操作人员提供直观的操作与观测窗口,保障检测过程有序开展。

2 特种设备无损检测需求与超声波相控阵技术适配性

2.1 特种设备类型与结构特点

压力容器、管道、锅炉是工业生产与民生保障领域应用最广泛的常见特种设备类型,三者工业体系中承担不同功能,应用场景覆盖化工、能源、市政等多个领域^[2]。现将常见特种设备类型及其结构特点以表格形式呈现,如表1所示。

表1

特种设备类型	常用材料	结构特征	检测难点
压力容器	高强度合金、不锈钢、复合板材等	部分存在厚壁、曲面结构，焊缝密集	厚壁结构超声波传播衰减大，曲面结构声束传播复杂，焊缝密集易产生干扰信号
管道	高强度合金、不锈钢等	存在弯头、三通等异形部位，部分管道较长且直径变化多样	异形部位声束传播受阻，长管道检测范围大，直径变化影响声束聚焦
锅炉	耐热钢、合金钢等	结构复杂，包含炉膛、受热面等多种部件，存在大量高温高压区域	复杂结构导致声束传播路径复杂，高温高压区域对检测设备及人员要求高

特种设备选用材料需满足耐高温、耐高压、耐腐蚀等严苛要求，常用材料包括高强度合金、不锈钢、复合板材等，材料成分与微观结构直接影响使用安全性与使用寿命。特种设备结构设计需结合工作场景需求，呈现出显著复杂性，部分设备存在厚壁、曲面、焊缝密集等结构特征，部分管道存在弯头、三通等异形部位，增加检测难度。特种设备检测环境与条件具有鲜明特殊性，多数设备长期处于高温、高压、强腐蚀工况下运行，部分设备安装于密闭空间、高空等特殊位置，检测空间受限，对检测技术的适应性提出更高要求。

2.2 特种设备无损检测需求分析

特种设备运行安全性直接关系人员生命与财产安全，因此高精度检测成为核心要求，需精准识别微小缺陷，明确缺陷尺寸、形态与分布情况，避免因检测误差导致安全隐患。特种设备结构复杂性决定复杂结构内部缺陷检测需求，传统检测技术难以穿透厚壁结构或绕过异形部位，无法全面覆盖内部缺陷，需检测技术具备穿透能力与灵活适配能力，实现内部缺陷全方位检测。工业生产连续性要求特种设备检测具备实时性与高效性，需在不影响正常生产运行的前提下，快速完成检测工作，及时反馈检测信息，为设备维护与运行调整提供支撑，减少因检测停机带来的经济损失，兼顾检测质量与检测效率。

2.3 超声波相控阵技术与特种设备检测需求的适配性

超声波相控阵技术具备高分辨率成像能力，通过精准控制声束参数，可清晰呈现缺陷细节特征，有效区分微小缺陷与干扰信号，能够满足特种设备高精度检测需求，为缺陷识别与分析提供可靠依据。该技术拥有灵活多变的检测模式，可通过调整声束角度、聚焦深度与扫查方式，适配不同结构类型的特种设备，轻松应对厚壁、曲面、异形部位等复杂结构的检测需求，实现无死角覆盖检测。快速扫描与成像技术是超声波相控阵技术的突出优势，无需频繁移动换能器，通过电子扫描即可完成大面积扫查，同时快速完成信号处理与成像，大幅缩短检测时间，显著提高检测效率，契合特种设备实时性与高效性检测需求，实现检测工作与生产运行的协同

推进。

3 超声波相控阵技术在特种设备检测中的实施策略

3.1 检测前准备与系统配置

阵列换能器的选择与布局规划需结合特种设备结构特点与检测需求，根据设备材质、厚度及可能存在的缺陷类型，确定换能器阵列形式、阵元数量与频率范围，布局规划需充分考虑设备表面形态与检测可达性，确保声束能够有效覆盖检测区域，避免出现检测盲区^[3]。检测参数设置与优化是保障检测质量的关键，频率选择需兼顾穿透能力与分辨率，波束角度调整需适配设备结构曲面与检测深度，通过反复调试参数，平衡检测精度与信号稳定性，减少干扰信号对检测结果的影响。检测环境评估与准备需全面排查检测现场工况，清理设备表面杂物与锈蚀，调整检测区域温度与湿度至适宜范围，对密闭空间、高空等特殊检测环境，提前做好通风、防护等准备工作，为检测工作顺利开展提供保障。

3.2 检测过程中的技术操作

扫描路径规划与执行需结合特种设备结构特征，结合检测需求设计科学合理的扫查路径，确保路径覆盖所有待检测区域，路径规划需避免重复扫查与遗漏区域，执行过程中保持换能器与设备表面良好耦合，控制扫查速度均匀稳定。实时信号监测与调整需全程关注检测信号变化，及时识别异常信号，根据信号强度、波形等特征，微调检测参数与扫查角度，确保信号清晰稳定，减少因耦合不良、参数偏差导致的检测误差。缺陷信号识别与初步定位需依托检测人员专业经验，结合信号波形、幅值等特征，区分缺陷信号与干扰信号，根据信号出现位置与传播规律，初步确定缺陷大致范围与深度，为后续信号处理与缺陷分析奠定基础。

3.3 信号处理与成像技术

信号预处理与去噪技术是提升检测精度的重要环节，通过滤波、放大、平滑等处理手段，抑制环境干扰与设备杂波，保留有效缺陷信号，减少无关信号对检测结果干扰，提升信号信噪比。成像算法选择与应用需结合检测需求与设备结构，合成孔径聚焦技术等常用算法可有效提升成像分辨率，清晰呈现缺陷细节，根据

缺陷类型与检测场景,选择适配的成像算法,优化成像参数,确保成像结果能够准确反映缺陷特征。图像增强与缺陷特征提取需通过灰度调整、边缘增强等技术,优化成像质量,突出缺陷轮廓与细节,提取缺陷尺寸、形态、分布等关键特征,为缺陷定性分析提供可靠依据。

3.4 检测人员技能要求与培训

技术操作与解读能力是检测人员的核心素养,需熟练掌握超声波相控阵检测系统的操作方法,能够精准完成参数设置、扫查操作等流程,同时具备较强的信号与图像解读能力,能够准确识别缺陷信号,分析缺陷特征。检测流程与规范的理解与掌握要求检测人员熟悉特种设备无损检测相关技术标准,严格遵循检测流程开展工作,规范操作步骤,避免因操作不规范导致检测结果偏差。持续培训与技能提升是保障检测工作质量的重要举措,随着技术不断更新与设备升级,检测人员需通过系统培训,掌握新型检测技术与设备操作方法,积累检测经验,提升专业技能,适应特种设备检测领域的发展需求。

4 超声波相控阵技术在特种设备检测中的挑战与未来展望

4.1 技术挑战与难题

复杂结构检测中的信号干扰与衰减问题始终制约检测精度,特种设备多存在厚壁、曲面、焊缝密集等结构特征,超声波在传播过程中易因界面反射、结构遮挡产生干扰信号,同时介质吸收、散射会导致信号能量衰减,严重时掩盖缺陷信号,影响缺陷识别准确性^[4]。高精度成像与实时处理之间存在难以平衡的矛盾,高精度成像需要复杂算法与大量数据处理支撑,会延长检测时间,而特种设备检测对实时性要求较高,如何在提升成像精度的同时缩短处理时间,成为当前技术应用中的重要难题。特殊材料检测中的技术难题日益突出,部分特种设备采用高强度合金、复合材料等特殊材质,这类材料内部晶粒结构复杂,会加剧超声波散射与衰减,导致信号失真,难以精准捕捉内部缺陷特征,现有技术难以完全适配这类材料的检测需求。

4.2 解决方案探索与研究方向

先进信号处理算法的研发与应用是破解信号干扰与衰减问题的关键,通过优化滤波算法、自适应信号处理技术,可有效抑制干扰信号,增强缺陷信号辨识度,减少信号衰减带来的影响,提升检测准确性。检测系统性能的优化与提升需聚焦硬件与软件协同升级,优化阵列换能器性能,提升信号发射与接收的灵敏度,同时完善

信号处理软件功能,优化成像算法,实现高精度与实时性的协同提升。多技术融合检测策略的探索成为重要研究方向,超声波相控阵与TOFD技术结合可互补优势,TOFD技术擅长缺陷高度测量,与超声波相控阵高分辨率成像能力结合,可全面提升缺陷检测的精准度与全面性,此外与其他无损检测技术融合,可拓宽检测适用范围,适配更多复杂检测场景。

4.3 未来发展趋势与展望

技术创新方向聚焦更高分辨率成像技术与智能化检测系统研发,更高分辨率成像技术可实现微小缺陷的精准识别,突破现有检测精度局限,智能化检测系统依托人工智能、大数据技术,可实现检测参数自动优化、缺陷信号自动识别与分析,减少人工干预,提升检测效率与稳定性。应用领域拓展重点指向新兴特种设备检测,随着新能源、高端制造等领域发展,新型特种设备不断涌现,需探索超声波相控阵技术在这类设备中的适配方法,拓宽技术应用场景,满足新兴领域检测需求^[5]。国际合作与交流逐渐深化,通过跟踪国际技术动态,吸收先进技术经验,开展国际合作项目,推动技术研发与应用的国际化,促进超声波相控阵技术在特种设备检测领域的持续完善与发展,助力行业整体检测水平提升。

结束语

超声波相控阵技术在特种设备无损检测中展现出巨大潜力,虽面临复杂结构信号干扰、高精度与实时处理矛盾等挑战,但通过研发先进算法、优化系统性能和多技术融合等策略可逐步解决。随着技术创新,更高分辨率成像与智能化检测系统将不断涌现,应用领域也将向新兴特种设备拓展。国际合作的深化将推动技术持续完善,提升行业整体检测水平,保障特种设备安全稳定运行。

参考文献

- [1]黄志鹏.超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用[J].数码设计,2022(11):140-142.
- [2]段军志.超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用研究[J].科学技术创新,2021(32):11-13.
- [3]巩政,代宁宁,高军英.超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用[J].警戒线,2023(19):137-140.
- [4]冯华丽.现代无损检测技术在特种设备检验中的创新应用[J].实验室检测,2025,3(22):148-150.
- [5]丁小平.特种设备相控阵超声检测监督检验方法探讨[J].中国设备工程,2023(6):186-188.