

相控阵超声可靠性验证及波形应用

淮林林

陕西西宇无损检测有限公司 陕西 咸阳 712100

摘要：本文聚焦相控阵超声技术，系统阐述其原理、系统组成与检测模式。构建以检测灵敏度、分辨率等为核心的可靠性验证指标体系，介绍标准试块、对比实验及长期稳定性监测等验证方法。深入分析纵波、横波等常见波形特性及参数对检测的影响，并结合工业无损检测、医学成像、水下焊接监测等领域案例，展现相控阵超声在多场景的应用价值，为该技术的推广与优化提供理论参考。

关键词：相控阵超声；可靠性验证；波形应用；无损检测

1 相控阵超声技术基础

1.1 相控阵超声原理

相控阵超声技术基于惠更斯-菲涅尔原理，通过对多个超声换能器单元进行激励时序和幅度的精确控制，实现超声波束的灵活聚焦与扫查。传统超声检测依赖单一探头，波束方向和聚焦深度固定，而相控阵超声将探头分割成多个独立的小阵元。每个阵元在激励电信号作用下产生超声子波，这些子波在空间叠加形成特定指向性和聚焦特性的合成波束。通过改变各阵元激励信号的延迟时间，能够调整波束的偏转角度，实现扇形扫查；调整延迟时间和激励幅度，则可改变波束的聚焦深度和焦距，满足不同深度和精度的检测需求。例如，在检测复杂形状工件时，可通过控制阵元使波束适应工件表面曲率，提高检测的准确性和全面性。这种灵活的波束控制能力，使相控阵超声技术在检测效率和检测精度上相较于传统超声有了显著提升。

1.2 相控阵超声系统组成

相控阵超声系统主要由相控阵探头、超声发射/接收单元、控制系统和数据处理与显示单元四部分组成。相控阵探头是系统的核心部件，它由多个压电晶片组成的阵元阵列构成，不同的阵元排列方式（如线性阵列、面阵列、环形阵列等）决定了探头的适用场景。例如，线性阵列探头常用于焊缝检测，能够实现线性扫查和扇形扫查；面阵列探头则可在多个方向上灵活控制波束，适用于复杂结构件的检测。超声发射/接收单元负责产生激励电信号驱动探头阵元发射超声波，并接收探头接收到的超声回波信号，将其转换为电信号^[1]。该单元需具备高精度的信号发生和放大能力，以保证激励信号的准确性和回波信号的有效接收。控制系统是整个系统的“大脑”，它根据检测需求生成相应的控制指令，精确控制超声发射/接收单元对阵元的激励时序和幅度，实现波束

的聚焦、偏转和扫查模式的切换。数据处理与显示单元对接收的回波信号进行放大、滤波、数字化等处理，提取有用的检测信息，并以直观的图像或数据形式显示出来，方便检测人员进行分析和判断。

1.3 相控阵超声检测模式

相控阵超声检测模式丰富多样，主要包括线性扫查、扇形扫查、S形扫查和矩阵扫查等。线性扫查是最基本的检测模式，探头沿直线方向移动，阵元依次被激励，产生平行的超声波束，对工件进行逐行扫描，适用于检测形状规则、表面平整的工件。扇形扫查通过控制阵元的激励延迟，使波束在一定角度范围内偏转，形成扇形覆盖区域，能够检测工件中不同角度的缺陷，特别适合焊缝等具有一定角度的结构检测。S形扫查结合了线性扫查和扇形扫查的特点，探头在沿直线移动的同时，波束进行扇形偏转，可对工件进行更全面的检测，减少检测盲区。矩阵扫查使用面阵列探头，通过对多个阵元的复杂组合激励，实现波束在三维空间的灵活控制，能够对工件进行全方位、多角度的检测，常用于航空航天等对检测精度要求极高的领域。

2 相控阵超声可靠性验证体系

2.1 可靠性验证指标

相控阵超声技术的可靠性验证需要多个关键指标作为依据，这些指标相互关联、共同作用，构成了完整的可靠性评估体系。检测灵敏度是其中至关重要的指标之一，它直接反映了系统检测微小缺陷的能力。在实际检测中，尤其是对于航空航天、核电等对安全性要求极高的领域，即使是极其微小的缺陷也可能引发严重的安全事故。高灵敏度的相控阵超声系统能够精准识别微米级的缺陷，确保检测结果的准确性，为设备的安全运行提供可靠保障。检测分辨率用于衡量系统区分相邻缺陷的能力，这在复杂结构件的检测中意义重大。检测重复性

体现了系统在相同检测条件下，多次检测同一工件得到相同结果的能力，它是检测结果稳定性的重要体现。若重复性不佳，检测结果波动大，将严重影响检测的可信度。检测准确性则是检测结果与实际缺陷情况的符合程度，综合反映了系统在材料特性、检测环境等多种因素影响下的检测精度^[2]。系统的稳定性决定了其在长时间连续工作中的性能表现，抗干扰能力则保障系统在复杂电磁环境等干扰因素下的可靠运行，这些指标同样对相控阵超声技术的可靠性有着不可忽视的影响。

2.2 可靠性验证方法

2.2.1 标准试块验证法

标准试块验证法是相控阵超声可靠性验证中应用广泛且行之有效的方法。标准试块的制作有着严格的规范流程，需选用与实际检测对象材质相近的材料，通过精密加工技术，在试块内部和表面加工出已知形状、尺寸和缺陷特征的人工缺陷，这些缺陷包括不同深度的平底孔、不同长度和宽度的裂纹槽等，其参数精度可达微米级别，以确保试块能精准模拟实际工件中的各类缺陷。在验证过程中，检测人员按照标准化的操作流程，使用相控阵超声系统对标准试块进行全面检测。将系统检测到的缺陷信息，如位置、大小、回波强度等数据，与试块预先设定的已知信息进行细致比对。例如，当系统能够准确检测出试块中仅0.1mm深的微小平底孔的位置和尺寸，说明其检测灵敏度和准确性达到较高水平；若能清晰分辨试块上间距仅0.5mm的两条相邻裂纹槽，则充分表明系统具备出色的分辨率。这种验证方法操作流程清晰、结果直观明确，能够快速且有效地验证相控阵超声系统的检测灵敏度、分辨率等基本性能指标，为系统的可靠性评估提供坚实的数据基础。

2.2.2 对比实验验证法

对比实验验证法是通过将相控阵超声检测结果与射线检测、磁粉检测等其他成熟检测方法的结果进行细致比对，从而科学验证相控阵超声技术可靠性的重要手段。在实施对比实验时，需严格遵循标准化流程，精准选择相同的检测对象与检测区域，确保各检测方法在统一的条件下开展检测工作。不同检测方法各有优劣，适用场景也不尽相同。以射线检测为例，其凭借穿透能力强的特性，能够清晰呈现金属焊缝内部的缺陷形状与尺寸，如同给工件拍摄一张“内部X光片”，但面对某些非金属夹杂物时，却难以精准识别。磁粉检测则对铁磁性材料表面和近表面的缺陷极为敏感，检测效率高且结果直观，然而对深层缺陷却无能为力。相较之下，相控阵超声技术凭借灵活的波束控制能力，对不同类型、不同

位置的缺陷均展现出良好的检测性能，同时还具备实时成像的优势，检测人员可实时观察检测过程与结果，及时调整检测策略。在实际验证过程中，通过详细对比不同检测方法的结果，能够深入分析相控阵超声技术在检测特定类型缺陷时的准确性与可靠性，为该技术在不同领域的科学应用提供坚实的数据支撑与理论依据。

2.2.3 长期稳定性监测法

长期稳定性监测法主要用于评估相控阵超声系统在长时间使用过程中的性能稳定性。在一段时间内，定期使用系统对相同的检测对象进行检测，记录检测结果并分析其变化趋势。通过监测系统的检测灵敏度、分辨率等指标随时间的变化情况，判断系统是否出现性能下降或漂移。例如，如果在长期监测过程中发现系统的检测灵敏度逐渐降低，可能意味着探头的性能衰减或系统的电子元件出现老化，需要及时维护 and 校准。长期稳定性监测法能够提前发现系统潜在的问题，保证相控阵超声技术在长期使用中的可靠性^[3]。

3 相控阵超声波图谱分析

3.1 气孔缺陷图谱分析

气孔是焊接过程中常见的缺陷之一，表现为材料内部的小空洞。在相控阵超声检测中，气孔通常呈现为尖锐的回波信号，其幅度和宽度与气孔的大小和形状有关。图谱上，气孔缺陷的回波信号往往具有较强的反射强度，且回波后沿陡峭，这是因为气孔与超声波束的相互作用产生了明显的反射和散射，气孔的位置可以通过调整波束角度和聚焦深度来精确定位，图谱上会显示为一个或多个清晰的亮点。

3.2 裂纹缺陷图谱分析

裂纹是材料中最为危险的缺陷之一，其扩展可能导致结构的失效。在相控阵超声检测图谱中，裂纹缺陷的回波信号通常表现为连续或不连续的波形，具体形态取决于裂纹的长度、宽度及取向。对于较长的裂纹，回波信号可能呈现为连续的、幅度逐渐衰减的波形，这是因为超声波在裂纹内部多次反射，形成了类似于谐振的现象。而对于较短的裂纹或裂纹尖端，回波信号则可能较为尖锐，且可能伴随有旁瓣或杂波，这是因为裂纹的几何形状和取向导致了超声波的复杂散射。

3.3 未熔合缺陷图谱分析

未熔合是焊接接头中常见的缺陷，表现为焊缝与母材或焊缝层间未完全熔合的区域。在相控阵超声检测图谱中，未熔合缺陷的回波信号通常表现为较宽的波形，且幅度可能随未熔合区域的大小和深度而变化。由于未熔合区域往往具有较大的界面面积，超声波在其中传播

时会发生明显的反射和散射,导致回波信号的幅度增强。此外,未熔合的位置和形状可以通过调整波束角度和扫查模式来精确识别,图谱上会显示为一片或多片连续的亮区。

3.4 夹渣缺陷图谱分析

夹渣是焊接过程中残留在焊缝中的非金属夹杂物,如氧化物、硫化物等。在相控阵超声检测图谱中,夹渣缺陷的回波信号通常呈现为不规则的波形,其幅度和宽度与夹渣的大小、形状及成分有关。夹渣的复杂形状和成分多样性导致了超声波在其内部的复杂传播和散射,使得回波信号在图谱上表现为多个亮点或暗区的组合。通过仔细分析回波信号的形态和强度,可以推断出夹渣的类型和位置。

4 相控阵超声波形应用案例分析

4.1 工业无损检测领域应用

在工业无损检测领域,相控阵超声技术有着广泛的应用。以管道焊缝检测为例,传统超声检测方法对管道环焊缝的检测效率较低,且存在检测盲区。而相控阵超声技术采用扇形扫查模式,能够快速、全面地检测管道环焊缝中的各种缺陷,如未焊透、气孔、裂纹等。通过调整波束角度和聚焦深度,相控阵超声可以适应不同管径和壁厚的管道检测需求,大大提高了检测效率和准确性。在压力容器检测中,相控阵超声技术可以对容器的焊缝和本体进行检测。对于复杂形状的压力容器,如球形储罐,利用相控阵超声的面阵列探头和矩阵扫查模式,能够实现对储罐表面和内部缺陷的全方位检测,及时发现潜在的安全隐患,保障压力容器的安全运行。

4.2 医学超声成像领域应用

在医学超声成像领域,相控阵超声技术为疾病的诊断提供了重要的手段。相控阵超声成像通过快速切换波束的扫描方向,能够实时获取人体内部器官的图像。例如,在心脏超声检查中,利用相控阵超声探头可以快速获得心脏各个切面的图像,清晰显示心脏的结构和功能,帮助医生诊断心脏疾病,如先天性心脏病、心脏瓣膜疾病等^[4]。在妇产科超声检查中,相控阵超声能够清晰显示胎儿的发育情况,检测胎儿是否存在畸形等问题。

相控阵超声成像具有实时、无创、无辐射等优点,相较于其他医学成像技术,如CT和MRI,更适合对人体进行多次检查和长期监测,在医学诊断中发挥着不可替代的作用。

4.3 水下焊接监测应用

水下焊接是海洋工程建设中的关键技术,而相控阵超声技术在水下焊接监测中具有独特优势。由于水下环境复杂,传统的检测方法难以实施,相控阵超声技术可以通过特殊设计的防水探头,在水下对焊接接头进行实时监测。在水下焊接过程中,相控阵超声能够及时检测焊接接头中的缺陷,如未熔合、夹渣等,帮助焊接操作人员及时调整焊接参数,保证焊接质量。通过对焊接接头的长期监测,可以评估焊接接头在水下环境中的性能变化,为海洋工程结构的安全运行提供保障。例如,在海底管道焊接和海上平台建设中,相控阵超声技术的应用有效提高了焊接质量和工程的可靠性。

结束语

相控阵超声技术凭借灵活的波束控制、可靠的检测性能及多样化的波形应用,在多领域彰显独特优势。其在工业质量把控、医学精准诊断和海洋工程安全保障中发挥关键作用。未来,随着技术持续创新,相控阵超声有望在智能化、高精度检测方向取得突破,拓展更多应用场景,为各行业发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]左明兵,彭建平,邱春蓉,等.空心车轴锥型相控阵超声声场仿真与优化[J].计算机仿真,2025,42(4):208-212. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2025.04.038.
- [2]陈志坚.相控阵超声检测部分熔透焊缝[J].广州建筑,2024,52(3):37-41. DOI:10.3969/j.issn.1671-2439.2024.03.010.
- [3]赵灿,闫明巍,王建超,等.锁底结构焊缝相控阵超声检测技术[J].火箭推进,2024,50(3):124-130. DOI:10.3969/j.issn.1672-9374.2024.03.014.
- [4]杨艳滨,任国庆,汪超.相控阵超声检测技术在板材中的应用[J].无损检测,2024,46(7):47-53. DOI:10.11973/wsdc202407009.