

Comparative Study of DR and PAUT in Nondestructive Testing and Discussion on Engineering Application

Qiang Chen Lianchang He Xiao Tan

State Pipeline Network Group West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

DR (Digital Radiography) and PAUT (Pulsed Acoustic Testing) are two widely adopted non-destructive testing (NDT) methods that significantly enhance product quality assurance and structural safety evaluation in engineering. These technologies currently serve as indispensable tools in mechanical manufacturing, energy pipeline systems, and aerospace engineering. Given their distinct technical principles, it is essential to evaluate their application advantages and limitations based on specific characteristics, testing performance, and operational scenarios. This approach facilitates targeted and appropriate implementation of DR and PAUT technologies, ultimately improving the quality and efficiency of NDT processes.

Keywords

DR technology; PAUT technology; nondestructive testing technology; engineering application

DR 与 PAUT 在无损检测中的对比研究及工程应用探讨

陈强 和连昌 谭啸

国家管网集团西部管道有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要

DR技术和PAUT技术是现阶段无损检测中的常用检测方法，可以为保障工程产品品质分析和结构安全评测提供更多助力。就现阶段来看，DR、PAUT技术在机械制造、能源管道、航空航天等相应领域都发挥着不可替代的作用。而DR和PAUT技术的技术原理是存在鲜明差异的，需根据其技术特性、检测性能、适用场景来明确不同技术的应用优势和局限性，为DR、PAUT技术科学应用提供更多助力，保障技术应用的针对性、适切性，进而提高无损检测的质量和效率。

关键词

DR技术；PAUT技术；无损检测技术；工程应用

1 引言

在现代工业生产及设备运维中无损检测技术可以在不损伤被检测对象的基础之上完成结构缺陷及产品质量的检测，确保运行安全，而得到了广泛应用。无论是石油天然气长输管道的环焊缝检测还是航空发动机零部件的内部质量筛查都会应用到无损检测技术，其中 DR 和 PAUT 作为最常用的两项无损技术，其技术原理和核心特征是存在鲜明差异的。随着人工智能和大数据技术的发展，两种技术都在向自动化、智能化方向发展。DR 技术正朝着更高分辨率、更低辐射剂量的方向发展，而 PAUT 技术则在向全聚焦、更高检

测精度的方向演进。

2 DR 与 PAUT 技术的检测原理及核心特性

2.1 DR 技术

DR 技术即数字射线检测技术，该项技术的检测原理是利用 X/Y 射线穿透特性来对被检测物质进行成像分析。射线穿透被检测对象时，不同材质、不同厚度区域的射线衰减能力存在显著差异，利用这一特性为气孔、裂纹、夹渣等相应缺陷的识别提供更多帮助。衰减后的射线会被数字平板探测器捕获并转化为电信号，通过图像处理生成高分辨率的数字图像，检测人员则可根据图像中的灰度变化、轮廓形态完成缺陷的识别与定性分析。

DR 的核心优势在于成像直观性强，能有效反馈缺陷的二维形态和空间分布，检测范围更全，尤其是气孔、夹渣、缩孔等相应体积性缺陷的检出率更高，数据可追溯，可为后续质量复核、缺陷追溯提供更多帮助。DR 技术也存在明显局限性，该项技术的平面型缺陷检出灵敏度较低，很容易会出现漏检问题，且定量精度有限。DR 还存在辐射安全风险，

【作者简介】陈强（1979—），男，中国新疆克拉玛依人，本科，副高级工程师，研究方向：油气储运及长输管道工程与附属工程、油田地面建设，长输管道运维，道路、桥梁、隧道工程、工业建筑及民用建筑工程、市政公用工程、地质勘查、工程测绘等研究。

可能会威胁工作人员的人体健康。此外 DR 在实践应用过程中设备初期投入也是相对较高的，容易受环境温度、湿度等因素影响导致检测结果准确性、真实性和可靠性受到冲击。辐射安全和成本始终是决策过程中需要重点考量的因素。

2.2 PAUT 技术

PAUT 技术即相控阵超声检测技术，是利用超声波传播与反射原理，借助相控阵探头完成检测。相控阵探头多由独立的压电晶片组成，通过电子方式控制各晶片激发时间延迟 (ΔT)，形成可聚焦、可偏转的超声波束（扇形扫描），超声波束的角度可根据实际情况灵活调整。在检测过程中超声波束遇缺陷时会发生反射、折射，这些信号会被探头接收，经过数据处理系统生成灰度化的截面图像，检测人员则可根据图像特征和信号强度完成缺陷的定量、定性、定位分析。

PAUT 最显著优势是平面型缺陷的检出灵敏度较高，通过波束角度调整提升检出率，定量精度较高，可完成深度、高度、长度等三维尺寸的测量^[1]。PAUT 无辐射危害、安全环保、检测适应性强，能够适配不同环境。PAUT 技术的局限性则是成像直观度不足，超声截面图像为信号重构的灰度图像，对缺陷形态的呈现不如 DR 图像直观，检测人员需具备丰富的专业经验才可以准确完成缺陷的识别与定位。同时该项技术的体积型缺陷的识别能力有限，在检测过程中还会受工件表面粗糙度、涂层厚度的影响。此外，PAUT 对粗晶材料（如奥氏体不锈钢）、厚壁工件（声束能量衰减）的检测效果也有较大的提升空间。

简言之，DR 和 PAUT 技术的技术差异是较为鲜明的，如图 1 所示为 DR 和 PAUT 技术关键性能参数对比。

表 1 DR 技术和 PAUT 技术的关键性能参数对比

对比项目	DR 技术	PAUT 技术
平面型缺陷检出率	$\leq 60\%$	$\geq 95\%$
体积型缺陷检出率	$\geq 90\%$	$\leq 70\%$
缺陷定量误差	平面尺寸 $\pm 5\%$, 深度 $\pm 20\%$	深度 / 高度 $\pm 10\%$, 长度 $\pm 8\%$
辐射风险	有（需防护）	无
设备投入成本	高（30-80 万元）	中（20-50 万元）
表面预处理要求	低（清除明显杂质即可）	高（需精细打磨）
检测环境要求	较高（温湿度可控）	较低（-10-50°C 均可）
单工件检测时间	短（15-20 分钟 / 件）	中（20-30 分钟 / 件）
人员资质要求	中等（需辐射安全培训）	较高（需超声图像解读培训）

3 DR 与 PAUT 技术的系统性对比分析

3.1 检测性能对比

在缺陷检出能力方面，DR 和 PAUT 技术呈现出互补特性。例如在检测类型上，DR 技术可快速完成体积型缺陷的检测，检测精度较高，而 PAUT 更适用于平面型缺陷检测。在定量精度方面 DR 可完成平面尺寸的测量，通过图像像素校准获得缺陷长度、宽度的精准量化数据。PAUT 可以完成三维尺寸的测量，通过波束聚焦定位缺陷的深度与高度。在检出效率方面，DR 可通过实时成像，提高检测效率。PAUT 的单工件检测时间略长，但是在复杂结构检测中不需要多次调整设备，其综合效率反而更优。因此，理解它们各自的优势和适用场景，对于制定最优的无损检测方案至关重要。

3.2 适用场景对比

从作业环境看 DR 更适用于开阔场景或检测工位固定的情况，例如在工厂车间可借助 DR 技术完成批量生产检测。PAUT 更适配于空间较为狭窄、人员较为密集的区域，其作业灵活性相对较强。从工件类型上 DR 更适用于大厚度、结构复杂的工件，例如厚度接近 100mm 的厚壁压力容器、大型铸件等。PAUT 更适用于厚度在 80mm 的中薄厚度工件检测。从行业应用上，DR 多应用于航空航天、机械制造、建筑建材等相应领域，而 PAUT 更多的是应用于石油天然气、

船舶制造、轨道交通等相应领域^[2]。在选择时，需结合自身的生产规模、工件类型和长期质量管控战略进行综合权衡。

3.3 经济性对比

DR 和 PAUT 技术在实践应用的过程中需考量经济成本，可从设备投入成本、运行成本和维护成本三个维度来展开讨论。

从设备投入成本上来看，DR 的初期采购成本是相对较高，但是从长远来看，因 DR 检测效率较高，在批量检测上其单位成本反而更低。

从运行成本上来看，DR 需定期更换射线源，射线源的平均寿命为 3~5 年，更换成本约为 5~10 万元，在实践应用的过程中需要购买防护设备，约 2~5 万元；PAUT 在应用过程中并无耗材更换需求，只需要定期对探头进行校准，一般情况下每年需校准一次，成本约 1 万元，因此 PAUT 技术的运行成本较低。

从维护成本来看，DR 的数字平板探测器对环境要求高，很容易会受冲击、湿度等多重因素的影响出现故障，因此维护成本也相对较高。PAUT 的探头和主机稳定性相对较强，维护成本较低。

总体来看，批量检测环境下 DR 技术的经济性更优。但若在小批量和复杂结构检测中 PAUT 技术的综合成本更低，可根据生产规模、检测对象特性来分析适配技术^[3]。在

实际决策中，选择哪种技术更经济，不能一概而论，需要结合具体的检测对象、缺陷类型、产量要求、安全规范以及预算限制，进行综合的经济技术论证。

4 DR 和 PAUT 技术的工程应用优化探讨

为了发挥 DR 和 PAUT 的技术优势，在工程应用过程中可从如下几点着手做出优化和调整，提高技术应用的适切性、针对性和有效性。

4.1 基于检测需求进行技术选型

技术选型是十分重要的一环，这对检测效率、质量及结果准确性会起到至关重要的影响。在技术选型的过程中可根据检测需要做好技术调整。在体积型缺陷为主的检测中可通过 DR 技术实现批量检测，提高检测效率。例如在铸件、锻件的内部质量筛查中就可以采用 DR；而在平面型缺陷为主的检测中可以采用 PAUT，有效检测焊接接头、结构件疲劳裂纹问题。针对复杂场景检测，例如受限空间内管道检测可通过 PAUT 技术来保证作业灵活性，而开阔场地的厚壁设备检测则可以采用 DR 技术。在技术选型的过程中还需要考量成本预算，例如中小型企业若检测批量小、资金有限可以选用 PAUT 技术，满足大多数场景的检测需求。而大型企业则涉及到了批量检测问题，对于检测效率要求较高，可以采用 DR 技术^[4]。在现代工业检测中，DR 和 PAUT 并非总是“二选一”的竞争关系，越来越多的场合开始采用多技术融合的方案。

4.2 检测流程优化

优化检测流程也是提高检测效率与质量的关键所在。在 DR 应用中需要先做好预处理，清除工件表面杂质，根据工件的厚度、材质来对管电压、管电流等相应参数作出适当调节，减少后期参数调整时间，通过 AI 图像识别算法进行图像智能化分析，完成缺陷区域的标注，减少人工分析误差，在提高工作效率的同时保证工作质量。

若用 PAUT 技术，需要精细化落实预处理工作，制定标准化打磨流程，确保工件表面粗糙度达到标准要求，在此基础之上引入耦合剂涂抹工具，为提高超声波传播效率提供更多的帮助^[5]。需要对波束参数做出优化和调整，根据缺陷类型确定波束角度，保障检出灵敏度。需要通过专用软件完成数据的自动化处理，生成标准化检测报告。

若采用组合检测模式这时则需要明确两项技术的先后顺序，制定疑似缺陷的判定标准和复核阈值，避免重复检测

或遗漏检测，通过数据关联的方式为后续追溯分析提供更多帮助。

4.3 加强设备及人员能力建设

设施设备是检测工作重要物质基础，检测人员是检测工作开展的重要落脚点，加强设备、人员管理是十分必要的。在设备管理上需根据检测需求具体问题具体分析，确定设备型号，明确设备要求，例如 DR 技术应用中设备可优先选择高分辨率数字平板探测器，保障图像清晰度。而 PAUT 技术应用中设备则需要关注扇扫、线扫、矩阵扫等相应扫描模式的应用需求，搭配柔性探头和专用夹具满足复杂结构的检测需要。在此基础之上可购入便携设备，为野外检测和受限空间检测提供更多帮助，也可通过购买固定设备为批量检测提供助力，具体需要根据检测方案来对设备配置方案做出适当调整，为高效检测提供物质支撑。

在人才建设的过程中可通过复合技能培训帮助人员掌握 DR 和 PAUT 的技术原理、操作流程、图像解读方法，明确不同技术的适用范围、应用优势、缺陷及不足，通过实操训练和典型案例分析的方式让检测人员能够结合实践工作需求进行技术选择，提高技术应用成效。还需通过培训内容的适当调节和优化提高检测人员的质量意识、学习意识，为检测工作的落实提供人才基础^[6]。

5 结语

DR 和 PAUT 技术在无损检测中应用可更好地提高无损检测效率和质量，需要根据 DR 和 PAUT 技术检测性能、适用场景、经济性的差异和实践需求来做好技术选择，通过检测流程优化、设备及人员能力建设提高技术应用成效。总之 DR 和 PAUT 是工具，但最终决定检测成效的，是使用人以及背后的管理体系。将先进技术与优化的流程、合格的设备和专业的人员三者结合，才能真正实现无损检测效率和质量的双重飞跃。

参考文献

- [1] 刘刚,王笑春. 相控阵超声检测技术在风电项目焊缝检测中的应用 [J]. 热处理技术与装备, 2025, 46 (05): 77-80.
- [2] 张宽,王树强. 基于改进SSD模型的环焊缝DR图像缺陷检测 [J]. 化工装备技术, 2025, 46 (05): 33-37.
- [3] 周燕,刘元庆,刘吉波,等. 相控阵超声检测技术在核岛大型锚固螺栓应力腐蚀裂纹检测中的应用 [J]. 科技视界, 2025, 15 (28): 67-71.