

基于超声相控阵的轨头缺陷检测研究

林凤涛^{1,2}, 熊亮^{1,2}, 金世景^{1,2}, 鲍林³, 谭荣凯^{1,2}, 杨世德^{1,2}, 杨洋^{1,2}, 刘伟^{1,2}

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道车辆智能运维技术与装备江西省重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 武汉船舶通信研究所, 湖北 武汉 430205.)

摘要: 针对钢轨轨头内部隐性缺陷检测中成像分辨率及深度定量精度受限的问题, 提出面向轨头缺陷的超声相控阵检测与成像优化流程。基于 COMSOL 建立轨头二维声场模型, 分析阵列参数对聚焦声束分布的影响并优选探头参数组合; 采用全矩阵捕获获取检测数据, 结合全聚焦成像, 提出归一化降噪、Hilbert 变换与 TF-PCF 加权结合的成像优化策略; 在 P60 钢轨试块轨头区域预制平底孔缺陷开展试验, 并与仿真结果进行对比验证。结果表明: 32 阵元、阵元间距与波长比为 0.5、阵元宽度与阵元间距比小于 0.5、偏转角不超过 45° 时成像效果较优; 优化后的成像结果可以抑制噪声与伪像, 实现缺陷定位及定量测量, 其中孔长误差不超过 10%, 垂向深度误差不超过 5%。该研究可为轨头缺陷超声相控阵检测的高分辨率成像与缺陷定量评估提供理论依据。

关键词: 超声相控阵; 钢轨缺陷; 无损检测

中图分类号: U270.335

文献标志码: A

Research on Rail Head Defects Based on Ultrasonic Phased Array

Lin Fengtao^{1,2}, Xiong Liang^{1,2}, Jin Shijing^{1,2}, Bao Lin³, Tan Rongkai^{1,2}, Yang Shide^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Liu Wei^{1,2}

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment for Rail Vehicles, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Wuhan Ship Communication Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: To address the limited imaging resolution and depth-quantification accuracy in the detection of hidden defects within the rail head, an ultrasonic phased-array detection and imaging-optimization procedure for rail-head defects is proposed. A two-dimensional acoustic-field model of the rail head is established in COMSOL to investigate the influence of array parameters on the focused beam distribution and to optimize the probe-parameter set. Inspection data are acquired using Full Matrix Capture (FMC) and reconstructed by the Total Focusing Method (TFM), and an imaging-optimization strategy combining normalization-based denoising, the Hilbert transform, and TF-PCF weighting is introduced. Experiments are conducted on a P60 rail test block with prefabricated flat-bottom-hole defects in the rail head, and the results are validated by comparison with simulations. The results show that improved imaging performance is obtained with 32 elements, an element-pitch-to-wavelength ratio of 0.5, an element-width-to-pitch ratio below 0.5, and a steering angle not exceeding 45°. The optimized imaging suppresses noise and artifacts and enables defect localization and quantitative measurement, with a hole-length error within 10% and a depth error within 5%. This study provides a theoretical basis for high-resolution imaging and quantitative evaluation of rail-head defects in ultrasonic phased-array inspection.

Key words: ultrasonic phased array; rail defect; nondestructive testing

中国铁路作为国民经济的重要支柱, 经过多年发展已在路网规模和技术体系方面达到国际领先水平。钢轨作为轨道结构的核心承载部件, 承担着引导列车行驶与传递轮轨载荷的双重功能, 其服役状态直接决定高速列车运行的安全性与平稳性。然而在长期动载服役环境下, 钢轨持续承受列车交变载荷、温度应力及复杂环境耦合作用, 导致轨头内部缺陷呈现渐进式累积特征, 这种隐性损伤已成为制约铁路运营安全的

收稿日期: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(52065021); 江西省领军人才项目(S2021GDKX1442); 江西省基金项目(20242BAB26086, 20224BAB204042, 20252BAC240051); 国铁集团科技研究开发计划课题(2024YJ081, N2024G028)

重大风险源。因此,建立有效的钢轨轨头内部缺陷检测方法对于保障轨道交通系统可靠性具有重要工程价值。

目前,钢轨检测中常用的无损检测方法主要有涡流检测、漏磁检测、磁粉检测、射线检测、超声波检测^[1-7]。然而几种检测方法中,涡流检测深度有限;漏磁检测灵敏度不足;磁粉检测依赖人工判断;射线检测存在辐射隐患,整体难以实现钢轨内部缺陷的高效、精准识别。相较于单晶探头,超声相控阵可实现声束偏转与聚焦控制,适用于钢轨等复杂截面结构的区域覆盖与定向探测。而针对钢轨轨头缺陷在空间上的分布特点,可将轨头重点检测范围划分为多个覆盖区域,并为不同区域制定相应的聚焦与偏转参数,通过多次激励实现分区聚焦扫查,从而提升对不同深度及不同取向缺陷的检出能力^[8],并且可以对材料进行全聚焦成像,从而大大提高了缺陷表征的灵敏度^[9-10]。

在此情况下国内外学者对于使用超声相控阵检测钢轨进行了很多研究。例如,爱荷华州立大学 Utrata 教授^[10]与 Sperry 铁路装备公司合作,将相控阵方法引入在役钢轨伤损检测研究,重点分析钢轨断面曲率及磨耗等几何因素对声束传播与缺陷成像效果的影响,但研究对象主要集中于轨头区域,没有实现钢轨全截面的覆盖检测。英国焊接研究所在 RAILECT 项目中开发了面向铝热焊钢轨接头的超声相控阵超声检测系统^[11],通过夹具集成多只相控阵探头实现对轨头、轨腰与轨底区域的快速覆盖扫查,提升了现场检测效率与成像判读能力,但探头数量多、系统结构复杂,硬件成本与自动化实施难度相对较高。相较于国外,国内在钢轨缺陷超声相控阵检测方面的系统化研究起步相对较晚,但近年来围绕焊缝覆盖扫查工艺、现场自动化装备集成以及缺陷定量评价方法等方向进展较快。尹段泉等^[12]提出面向钢轨焊缝的超声相控阵串列式扫查方法,在保留串列式对垂直型缺陷敏感的基础上,通过多角度声束实现对焊缝的体积覆盖。相比常规超声串列式扫查,该方法覆盖率与检测效率更高,操作更为简便,且缺陷显示信息更丰富直观,并在 YN-1 型铝热焊缝试块探伤实验中验证了工程可行性。戴万林等^[13]进一步针对轨头内部缺陷提出基于相控阵全矩阵数据的 DAC 快速定量方法,并经试块验证其优于工程常用的 -6dB 定量方法,为轨头伤损的定量评估与一致性判定提供了思路。综上所述,超声相控阵在钢轨检测领域的研究主要集中在三类:基于声束偏转与动态聚焦的扫查检测方案、基于全聚焦成像后处理的高分辨成像方法,以及面向缺陷定量评估的表征手段。现有研究为钢轨缺陷检测与成像奠定了基础,但在轨头内部隐性缺陷的噪声与伪像抑制、成像分辨率提升及深度定量精度一致性方面仍存在不足,尤其缺少阵列参数优化与成像优化策略协同设计的验证研究。

为提升钢轨轨头内部缺陷的成像质量和深度识别精度,本文将基于 COMSOL 的钢轨轨头二维声场仿真与超声相控阵 FMC 全矩阵捕获和 TFM 全聚焦成像相结合,建立了面向轨头缺陷超声相控阵检测的“仿真优化—实验验证”一体化方法。首先,利用声场仿真软件系统分析探头关键参数对声束分布和聚焦性能的影响,在此基础上优选出适用于钢轨轨头检测的参数组合;随后,在信号处理与成像环节,在常规 TFM 成像图上依次引入归一化降噪、Hilbert 变换及 TF-PCF 加权成像技术,对噪声、旁瓣和伪影进行分级抑制,突出缺陷的真实回波信息,使缺陷区域的对比度和边界清晰度得到明显改善;最后,在工程验证阶段,采用多浦乐便携式超声相控阵检测系统和所优化的阵列参数,对含孔长为 $10\sim 40\text{mm}$ 的圆孔型缺陷的钢轨试块开展检测实验,并与相同参数条件下的仿真成像结果以及试块标定深度进行对比,结果表明成像位置与信号特征与缺陷真实分布具有良好一致性,孔长检测误差在 10% 以内,垂向深度检测误差在 5% 以内,说明所提出方法在保证检测灵敏度的同时提高了深度定量能力,具有较好的工程应用前景。

1 相控阵相关仿真

1.1 声场聚焦与偏转理论

由于钢轨廓形结构复杂，包含多段不同曲率的曲线轮廓，为优化钢轨内部缺陷检测效果，通常通过楔块调整声束入射角。因楔块与钢轨材料间存在声阻抗差异，超声波在界面传播时遵循斯涅尔定律，产生折射并发生模式转换。如图 1 所示，在合适的入射角条件下，可以有效促使纵波全反射，仅允许横波进入钢轨进行检测。这种方法不仅能优化超声波的模式转换，提高横波信号的纯净度，还能增强探测系统对缺陷的敏感度，减少回波干扰，提高检测精度^[14]。

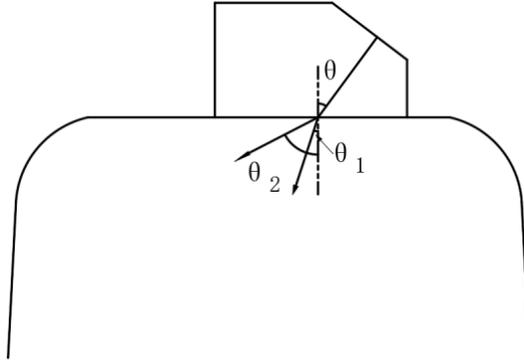


图 1 钢轨中声波折射示意图

Fig.1 Schematic of ultrasonic-wave refraction in a steel rail

依据斯涅耳定律可知：

$$\frac{\sin \theta}{c_{\text{楔}}} = \frac{\sin \theta_1}{c_{\text{横}}} = \frac{\sin \theta_2}{c_{\text{纵}}} \quad (1)$$

式中： θ 为楔块中入射角、 θ_1 为在钢轨中形成的横波折射角， θ_2 为在钢轨中形成的纵波折射角、 $C_{\text{楔}}$ 、 $C_{\text{横}}$ 、 $C_{\text{纵}}$ 分别为楔块介质声速、钢轨中横波声速与钢轨中纵波声速。本文通过选择合适的入射角使纵波在界面处全反射，从而仅横波进入钢轨进行缺陷探测。图 2 展示了超声相控阵在钢轨内部传播至缺陷区域的路径示意图。假设楔块的自带角度为 θ_1 ，通过 N 阵元阵列的第 n 个阵元为例进行描述，设定缺陷位置相对于检测接触面的深度为 h_1 ，该阵元相对于检测接触面的高度为 h_2 ，该阵元相对于缺陷位置的水平距离为 l_1 。

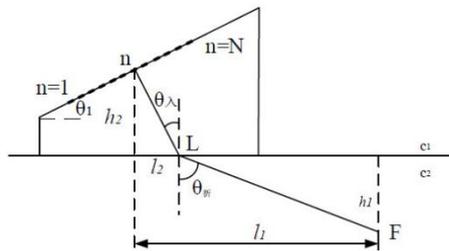


图 2 声波在钢轨中传播示意图

Fig.2 Schematic of ultrasonic-wave propagation in a steel rail

因此该阵元发射的信号到达缺陷中心的时间 t_i 为：

$$t_i = \frac{\sqrt{l_2^2 + h_2^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{h_1^2 + (l_1 - l_2)^2}}{c_2} \quad (2)$$

计算好各阵元发射的信号到达缺陷中心的时间 t_i ，按照时间顺序依次给各阵元 i 添加延迟 Δt_i 就可以达到声波聚焦的效果：

$$\Delta t_i = t_{\max} - t_i \quad (3)$$

式中： t_{\max} 为所有阵元发射的信号到达缺陷中心的最大时间。

1.2 阵列参数对声场的影响

为评估探头阵列参数对轨头区域声场分布与聚焦特性的影响，通过在瞬态声学物理场中建立参数化相控阵探头与轨头仿真模型，仿真软件的全局参数设置便于快速修改实现不同探头性能仿真，主要考察阵元数目、阵元间距、阵元宽度以及波束偏转角度等关键因素。不同参数的有限元仿真分析过程，在其余实验参数一致的条件下进行，同时利用延时计算法则计算出超声相控阵声束聚焦于预设焦点的每一个阵元的延迟时间，从而实现声场的聚焦，如图 3 所示为不同聚焦深度下 32 阵元的延迟分布曲线。其中阵元宽度为 0.5mm，阵元间距为 0.7mm，从图中可以看出，当偏转角度为 0° 、聚焦声束垂直入射时，相应的延迟规律呈现近似抛物线特征。随着聚焦深度增加，各阵元的整体延迟逐渐减小；而聚焦深度减小时，则需要更大的延迟补偿。

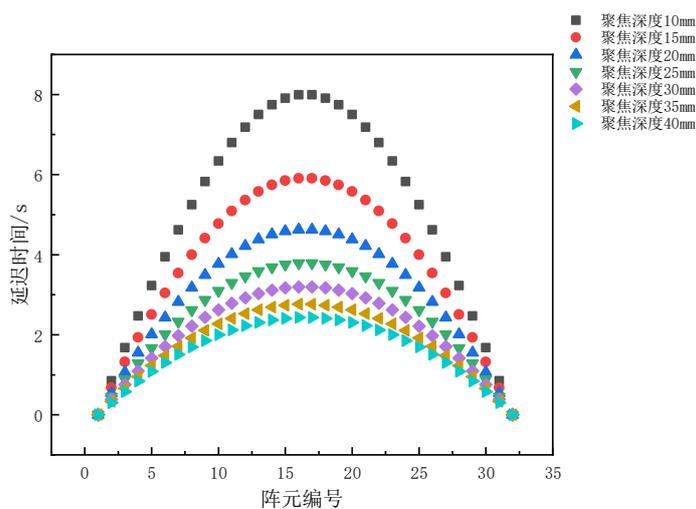


图 3 不同聚焦深度下 32 阵元延时图

Fig.3 Delay-time distribution of 32 array elements at different focusing depths

1.2.1 阵元数目

如图 4 所示，在阵元宽度、间距、偏转角恒定条件下，分别构建 8、16、32、64 阵元的线性阵列进行对比分析。结果表明，阵元数量增加可显著提升主瓣能量并缩小焦斑，但旁瓣增强且计算开销显著上升。综合分辨率、旁瓣抑制与计算成本，选定 32 阵元阵列作为后续研究配置。

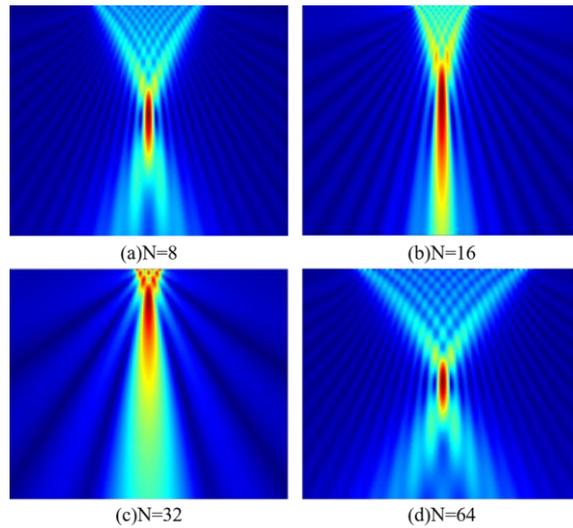


图 4 不同阵元数目声场分布图

Fig.4 Sound-field distributions with different numbers of elements

1.2.2 阵元间距

如图 5 所示，在阵元数目为 32 且其它参数不变的情况下，当阵元间距与波长之比 $d/\lambda = 0.5$ 时，聚焦性能与旁瓣抑制达到较好平衡；间距继续增大时伪影明显、分辨率下降。综合考虑，选择了阵元间距 d 与波长 λ 之比为 0.5 的阵列参数进行研究。

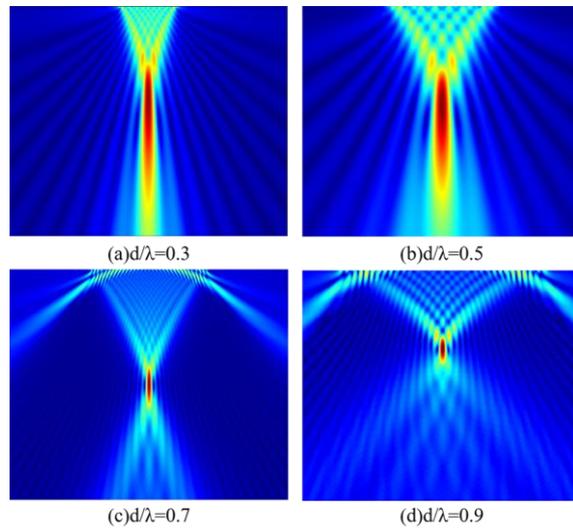


图 5 不同阵元间距的声场分布图

Fig.5 Sound-field distribution with different element spacing

1.2.3 阵元宽度

如图 6 所示，在 32 阵元、阵元间距为 0.5λ 条件下，随阵元宽度与间距之比 w/d 增大，主瓣能量提高，但超过 0.5 后出现明显旁瓣和声场畸变，易引发成像伪影。为兼顾聚焦性能与旁瓣抑制，该比值应控制在 0.5 以下。

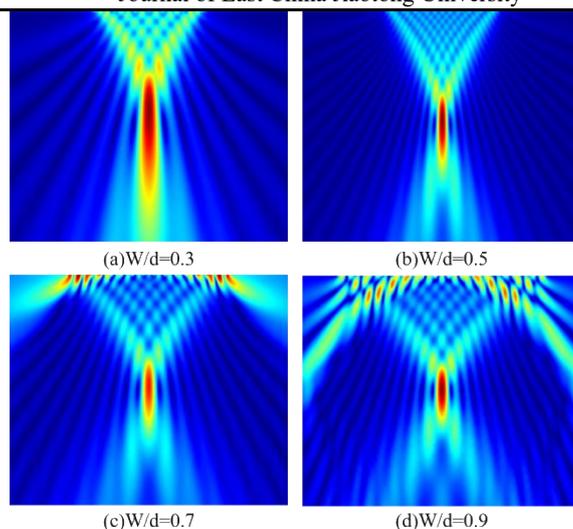


图 6 不同阵元宽度的声场分布图

Fig.6 Sound-field distribution with different element widths

1.2.4 偏转角度

如图 7 所示，为波束偏转角度 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时的波束图像，随着偏转角度 θ 增大可覆盖更大区域，但旁瓣与近场干扰同步加剧、分辨率下降。工程上偏转角度 θ 通常不超过 60° ，结合钢轨几何与耦合条件，偏转角度应控制在 45° 以内。

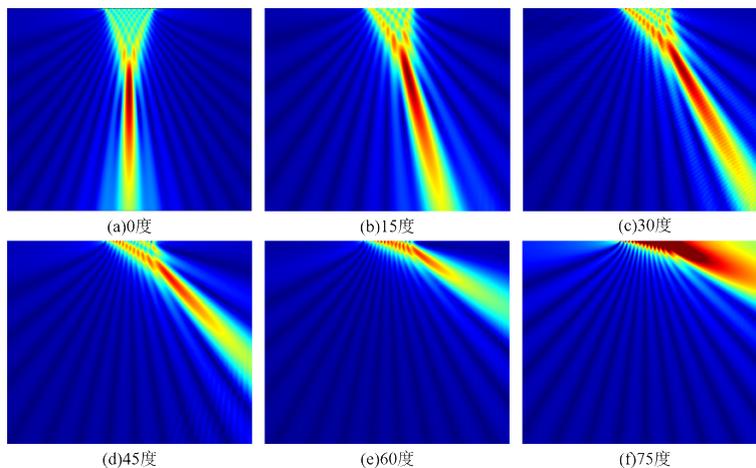


图 7 不同偏转角度的声场分布图

Fig.7 Sound-field distributions at different steering angles

1.3 轨头缺陷检测信号仿真

1.3.1 模型与边界

在 COMSOL 软件中建立声场仿真模型时，首先需要选取合适的物理场接口。鉴于本文关注的是纵波在固体结构中的传播特性，故采用压力声学瞬态物理场，以模拟结构内部声压随时间的演化规律。针对轨头区域建立仿真模型，采用直接接触法在轨头上表面设置添加 32 阵元相控阵用以激发超声信号进行检测。材料参数方面，轨头部分设置如下：弹性模量为 206GPa，泊松比为 0.33，密度为 7850kg/m^3 ，纵波波速 c_L 为 5792m/s。模型外边界设置吸收层 (PML) 以抑制反射，网格在缺陷与界面附近加密，其余区域适度稀疏，满足最小单元与波长配比要求，以控制计算量。轨头部分网格划分如图 8 所示。

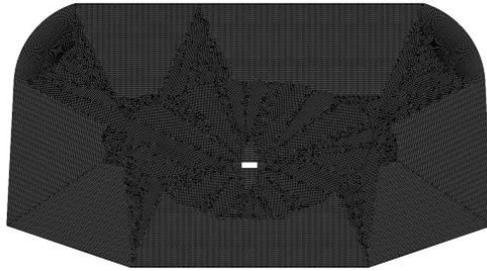


图 8 轨头缺陷模型网格划分图

Fig.8 Mesh of the rail-head defect model

1.3.2 激励与采样

选取四个循环周期的汉宁窗调制的脉冲信号作为激励源，其激励函数方程为：

$$y=0.5*(1-\cos(2\pi f_i/4))*\sin(2\pi f_i), t \leq \frac{4}{f} \quad (4)$$

式中， t 为信号脉冲时间， f 为超声波激发频率。当探头激励频率为 5MHz 时，汉宁窗调制信号呈现出一种特定的波形，这类脉冲信号波形如图 9 所示。

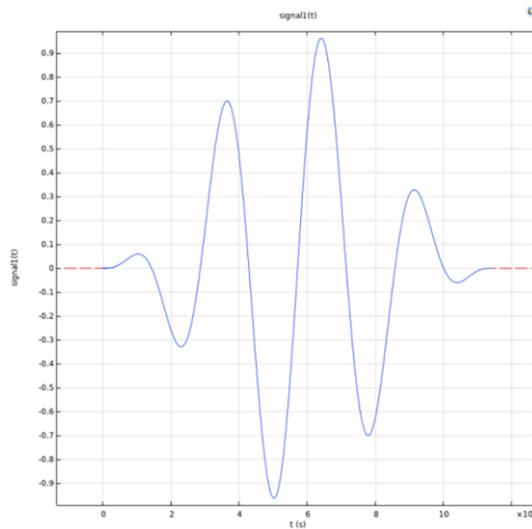


图 9 脉冲信号波形图

Fig.9 Waveform of the excitation pulse

1.3.3 仿真信号与校核

通过提取每个阵元上的边界探针信号，并对比缺陷回波在中间阵元处的实际到达时间与理论到达时间，并计算两者之间的相对误差，从而验证模型有效性，并分析缺陷结构。如图 10 所示为 50 个步长时间内，接收到的 32×32 信号在有无缺陷轨头模型内整个过程的信号变化对比图。结果显示，缺陷回波在理论 TOF 附近出现，且随入射角与阵元位置呈可预期的相位变化。

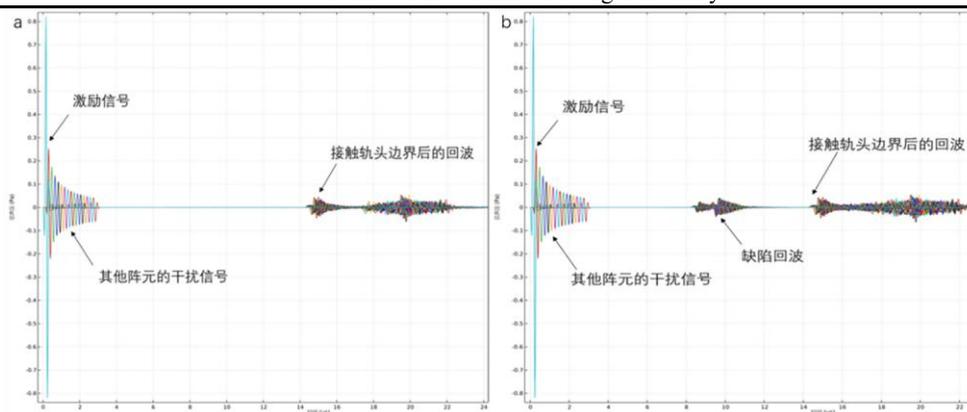


图 10 轨头检测信号图

Fig.10 Rail head detection signal diagram

1.4 成像方法与优化

为实现轨头缺陷的高分辨率成像，本文采用全矩阵数据捕获（FMC）与全聚焦成像（TFM）相结合的流程，并在此基础上引入归一化、Hilbert 包络与 TF-PCF 加权等优化策略，以提升对比度、边界清晰度与鲁棒性。

1.4.1 全矩阵数据捕获

全矩阵捕获（FMC）是一种高效的数据采集方法，能够精准获取超声相控阵结构内部特定区域的完整信号数据。与传统的相控阵数据采集方式相比，FMC 采集的数据更为完整和精细，能够在后处理中实现动态全聚焦，提升成像的灵活性和适应性。该技术为高分辨率无损检测提供了更为强大的数据支撑，可以优化超声图像质量，实现更精准的缺陷识别和分类^[15]。全矩阵捕获的采集流程为阵列中每个阵元依次发射、全阵列同步接收，形成尺寸为 $N \times N$ 的通道数据集 $\{s_{ij}(t)\}$ （ i 为发射通道， j 为接收通道）。在超声相控阵数据采集过程中，不同阵元在激励和接收阶段具有对应的操作状态，如图 11 所示，上方的阴影区域表示当前阵元处于激励状态，而下方的黑色区域则表示当前阵元处于负责接收回波信号的状态。

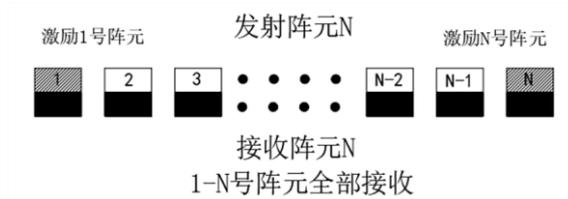


图 11 全矩阵数据捕获图

Fig.11 Schematic of Full Matrix Capture

1.4.2 全聚焦成像

全聚焦成像（TFM）基于阵元位置、波速模型与传播路径，结合预设的参考坐标系进行信号重构，实现高分辨率成像。一般设定 X 轴为阵列与介质接触面， Z 轴为阵列中心法线方向，并合理设置重构点间隔以优化聚焦性能。最终，通过全聚焦算法对各重构点进行信号叠加，准确还原检测区域内的缺陷特征^[16]，TFM 原理与几何关系见图 12。

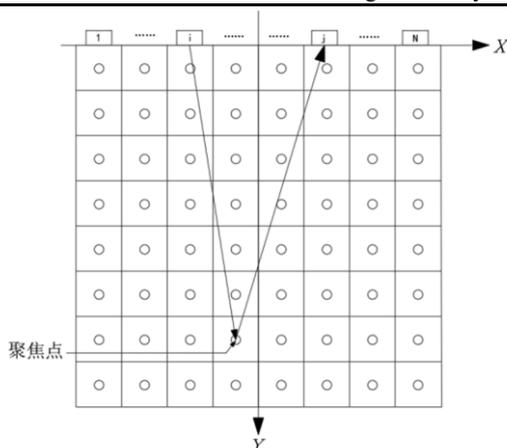


图 12 全聚焦算法原理图

Fig.12 Schematic diagram of the Total Focusing Method

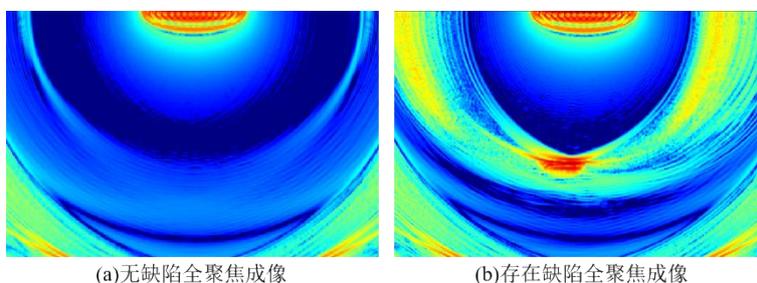
假设阵列由 N 个阵元组成，每个阵元的宽度为 W ，阵元间隔为 d ，将阵列中心设为坐标原点以简化计算。假设重构成像区域的横向长度为 x_i ，纵向深度为 y_i ，并在其范围内分别设定 n 和 m 个聚焦点，则整个区域可划分为 $n \times m$ 的规则网格，每个交点对应一个聚焦点，每个聚焦点位的具体坐标如下：

$$(x, y) = \left(\pm \frac{x_l}{n} \left(\frac{1}{2} \times (2x_{ii} - 1) \right), \frac{y_l}{m} \left(\frac{1}{2} \times (2y_{ii} - 1) \right) \right) \quad (5)$$

在成像阶段，所有信号经过计算模型叠加，遍历所有发射和接收路径，并累加相应的回波信号，最终得到综合叠加幅值 $I(x, y)$ 。这一过程优化了超声信号的空间处理，使成像结果更清晰，并提高目标区域的信噪比和分辨率。因此其结果可通过如下公式计算：

$$I(x, y) = \left| \sum_{i=N}^1 \sum_{j=N}^1 (s_{ij}(t_{ij}(x, y))) \right| \quad (6)$$

将图 10 所示轨头检测信号提出后，在 MATLAB 中通过全聚焦算法进行图像重构得到初步 TFM 成像图形如图 13 所示。图 13(a)显示了没有缺陷的钢轨轨头部位的成像结果，图 13(b)显示出在缺陷处能量较为聚集，但其阵元近场区有着强烈的能量，甚至超出缺陷中心处的能量。初步全聚焦成像图较为粗糙，还需后续优化。



(a)无缺陷全聚焦成像 (b)存在缺陷全聚焦成像

图 13 全聚焦初步成像图

Fig.13 Preliminary TFM images

1.4.3 成像优化策略

为进一步提升成像质量，本文在 TFM 图上采用以下三种互补的优化方法：

归一化与阈值处理：对 TFM 幅值做全局归一化，并设置统一阈值抑制近场伪影与背景纹理。结果如

图 14 所示。可以看到，当阈值设置为-12dB 时，相较于原始成像图已有一定改善，但噪声伪影依然较为显著；当阈值提高至-10dB 时，噪声伪影得到了进一步削弱，缺陷位置更加突出，但仍存在少量残余伪影；当阈值达到-8dB 时，噪声伪影已基本被剔除，成像效果较为理想；在阈值为-6dB 时，噪声伪影被完全清除，缺陷信号显示清晰、明显；然而，当阈值进一步提高至-4dB 时，尽管噪声伪影已完全消失，但部分弱缺陷信息也被削弱，仅保留了信号最强的区域，导致图像出现一定程度的失真问题。综合分析来看，选择-6dB 的阈值处理效果最佳，能够在完全剔除噪声伪影的同时，清晰保留缺陷信息。

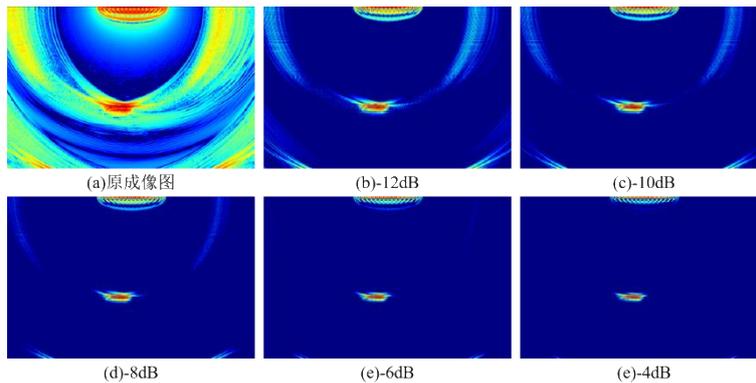


图 14 基于不同阈值剔除伪像像素点后全聚焦成像图

Fig.14 TFM images after artifact-pixel removal using different threshold values

Hilbert 变换:对各通道 A 扫信号施加 Hilbert 变换以提取包络,削弱相位起伏导致的振铃与干涉条纹,突出缺陷反射的包络峰值,通过该变换,可以有效增强短时信号的瞬时特性,使得信号的包络更加清晰,并能抑制噪声、减少高频干扰,提高信号处理的稳定性和可靠性。如图 15 所示,添加 Hilbert 变换后,成像图中的反射信号更加明显,特别是在缺陷区域,信号强度变得更加突出,缺陷区域的边界更加清晰。

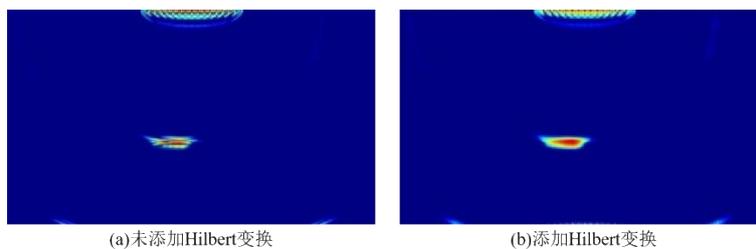


图 15 Hilbert 变换前后全聚焦成像对比图

Fig.15 Comparison of TFM images before and after Hilbert transform

TF-PCF 加权:通过时频域分解技术提取信号能量分布特征,并设计加权函数,能够针对缺陷区域的高频响应成分实施增益调节,同时针对非相干噪声谱进行自适应衰减。这种基于时频联合分析的加权调节方式,能够有效提升目标反射体的空间分辨率。从图 16 中可以直观地看出,在相同的条件下,TF-PCF 加权方法通过时频分析和相位校正,显著提升了成像质量。具体而言,该方法有效地抑制了由于超声波传播路径不同引起的相位误差,这种误差在多阵元超声成像中尤为常见,尤其是在阵元近场区域。通过相位校正,TF-PCF 加权不仅减少了近场区的信号强度干扰,还显著增强了目标缺陷区域的信号强度,从而提高了缺陷检测的灵敏度和成像效果。

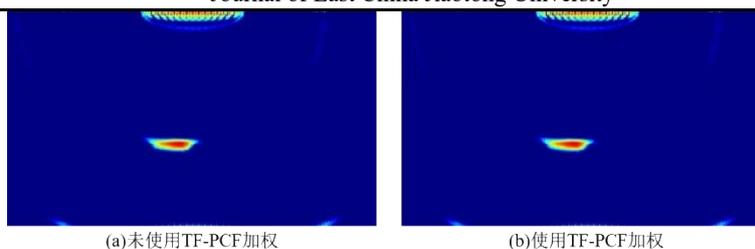


图 16 基于 TF-PCF 的加权全聚焦成像对比图

Fig.16 Comparison of TF-PCF weighted TFM images

2 实验与结果分析

2.1 超声相控阵钢轨缺陷检测

基于前期的数值模拟研究，已证实超声相控阵技术应用于钢轨缺陷检测的技术可行性。为进一步验证该技术的工程实用性，本节开展钢轨试件实验研究，系统评估相控阵系统对实际钢轨缺陷的识别能力与检测精度。

2.1.1 超声相控阵检测钢轨实验设置

实验平台搭建选用 P60 钢轨试块，钢轨试块总长 0.18 米。如图 17 所示在轨头区域预制 4 处圆孔型平底孔缺陷，4 个平底孔均从轨头缺陷侧面沿轨头横向方向水平加工，均位于轨顶面下方 30mm 深度处，孔长依次为 10mm、20mm、30mm 与 40mm，用于改变缺陷在横向上的位置。孔径均为 2mm。相控阵探头布置在对侧耦合面进行检测，因此孔底端距探头耦合面的横向距离为轨头横向宽度减去对应孔长，可在不改变耦合与入射条件的前提下，对不同垂向深度缺陷的成像与定量能力进行间接评估。

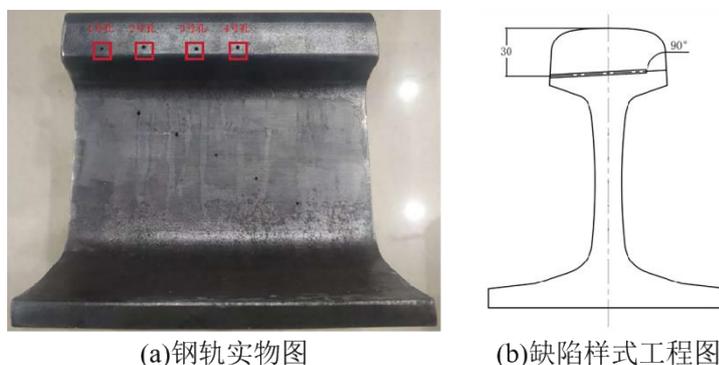


图 17 预制缺陷钢轨试块图

Fig.17 Rail test block with prefabricated defects

本实验采用多浦乐便携式超声相控阵检测仪实施钢轨缺陷检测，该设备配置了经声场仿真优化的 32 阵元等核心参数线性阵列探头，采用中心频率 5MHz 的高频激励模式，以及采用聚苯乙烯材质制造的 45° 声束定向楔块。如图 18 所示，该系统通过集成化探头模块实现缺陷区域的高精度扫描，嵌入式处理单元同步完成信号采集与特征提取，充分兼顾了实验室级检测精度与工业现场操作便捷性的双重要求。



图 18 超声仪器对钢轨缺陷进行检测实验

Fig.18 Portable ultrasonic phased array inspection of the rail test block

2.1.2 试块缺陷检测

将相控阵探头垂直耦合于轨头圆孔型缺陷对侧的轨头侧面表面，保持声束入射角度不变，耦合剂使用了粘稠水基耦合剂。采用全聚焦成像方法对检测数据进行后处理，通过全矩阵捕获模式获取所有发射-接收组合的原始波形信号。在 TFM 算法中，系统自动对检测区域内每个像素点实施动态声程补偿，无需预设机械焦距即可实现空间分辨率优化，对轨头区域进行全聚焦扫描成像。成像后可清晰识别轨头上四个孔的反射信号。对孔长为 10mm 的圆孔型缺陷（1 号孔）进行成像，其全聚焦成像结果如图 19 所示。

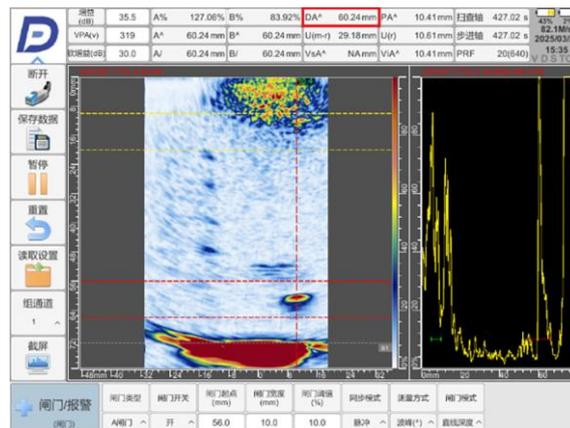


图 19 轨头孔长为 10mm 的圆孔型缺陷全聚焦检测成像图

Fig.19 TFM image of a hole-type defect with a hole length of 10 mm in the rail head

全聚焦成像技术通过缺陷回波信号实现精确定位，其孔长检测结果需结合轨头几何参数进行换算。以轨头横向宽度 73mm 为基准，圆孔型缺陷的横向定位距离计算结果应该为轨头横向宽度减去孔长。据此对于孔长为 10mm 的圆孔型缺陷（1 号孔）扫描的横向定位距离标准结果应是 63mm。同理相对应的其余圆孔型缺陷的横向定位距离标准检测结果应为 53mm、43mm、33mm。检测成像图 19 中标红框部分即是缺陷检测横向定位距离。所有圆孔型缺陷的检测结果如图 20 所示。

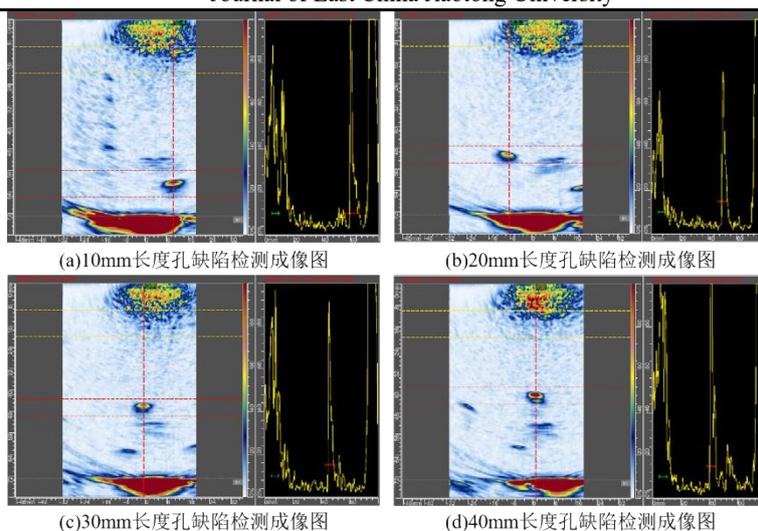


图 20 轨头圆孔型缺陷全聚焦检测成像图

Fig.20 TFM images of hole-type defects in the rail head

基于 COMSOL 建立含缺陷的轨头有限元仿真模型，在设置同样的条件下对圆孔型缺陷进行检测。仿真过程中采用参数化扫描，即逐阵元激励-全阵元接收的方式获取等效全矩阵数据。随后将该仿真全矩阵数据导入 MATLAB，并采用优化后的 TFM 重构算法对目标区域进行成像，以增强缺陷回波并抑制旁瓣伪像，得到轨头圆孔型缺陷仿真 TFM 成像结果，如图 21 所示。将仿真成像结果与试块实验在缺陷位置与形态特征上进行对照，从而验证声束参数与成像流程设置的合理性。

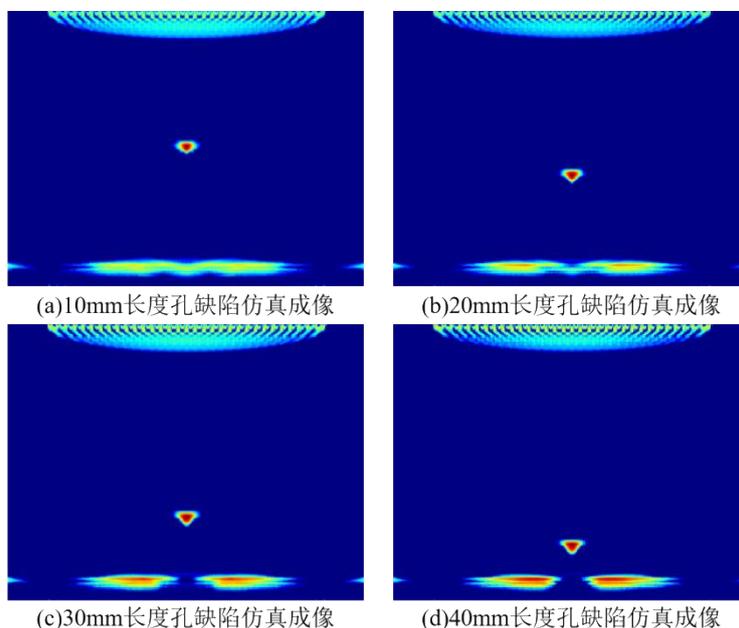


图 21 轨头圆孔型缺陷全聚焦仿真成像图

Fig.21 Simulated TFM images of hole-type defects in the rail head

为验证轨头长孔缺陷的埋深测量能力，将相控阵探头垂直耦合于轨头正上方，保持声束入射角度不变，选择扇扫成像方式体现检测结果。对轨头区域 4 处孔径为 2mm 的垂直长孔缺陷分别成像，如图 22 所示。扇扫图中可直接读取缺陷回波相对于轨顶面的距离，并与预设孔垂向深度 30mm 进行对比，计算垂向深度检测误差。

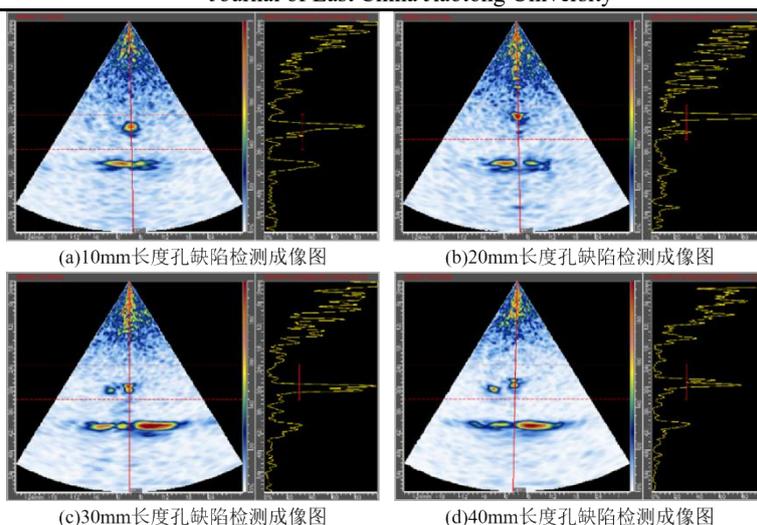


图 22 轨头圆孔型缺陷扇扫检测成像图

Fig.22 Sector-scan images of hole-type defects in the rail head

2.2 结果分析

从图 20 全聚焦检测成像图中可以清晰看出缺陷信号为圆孔状，随着圆孔型缺陷孔长的增加，检测圆孔型缺陷回波成像在图像中的位置逐渐上移。此外，图像右侧的信号波形清晰地展现了缺陷回波的特征，可以看到在缺陷位置处，回波信号的强度显著增强，形成明显的峰值。这与全聚焦成像结果相匹配，表明超声波在遇到圆孔型缺陷时发生强烈的反射，进而被探测系统捕捉到。

检测图像的底部普遍存在的高强度信号部分是由于超声波在传播过程中遇到了钢轨的外轮廓，从而形成了明显的回波。这种回波通常是由超声波在钢轨底部或其他边界处的反射所引起的。由于钢轨材料的边界界面与周围介质之间存在较大的声阻抗差异，超声波在这些界面上会发生较强的反射，导致回波信号在成像图底部呈现出高亮区域。图 20(a)底部的轮廓回波对应上方的缺陷处不平整，这是因为圆孔型缺陷的深度值较小，其缺陷信号回波会掩盖一部分外轮廓回波，使底部的轮廓回波存在一个缺口。同时成像图中存在一些局部伪影，应是钢轨内部存在一些微小缺陷引起的回波成像，工程中可通过不同角度的检测确定其具体参数。

整体而言，该成像结果验证了超声相控阵全聚焦方法的可靠性。提取检测成像图中的横向定位距离与垂向深度数据，可得到圆孔型缺陷孔长及垂向深度的定量误差，确定缺陷检测的准确性，其具体数值如表 1 所示。

表 1 试块检测结果

Tab.1 Detection results for the rail test block

孔长 (mm)	横向定位距离 (mm)	实际检测距离 (mm)	横向定位距离误差 (%)	实际垂向深度 (mm)	检测垂向深度 (mm)	垂向深度检测误差 (%)	
缺陷 1	10	63	60.24	4.38	30	29.75	0.83
缺陷 2	20	53	50.48	4.75	30	28.82	3.93
缺陷 3	30	43	45.24	5.21	30	29.69	1.03
缺陷 4	40	33	36.07	9.30	30	29.42	1.93

表 1 数据表明，基于相控阵钢轨缺陷成像结果的缺陷深度信息与试块中预制缺陷的深度具有较好一致

性。对于 10mm 至 40mm 孔长的圆孔形缺陷,实际检测孔长换算误差皆在 10%以内,垂向深度检测误差在 5%以内,验证了成像系统对中小尺度缺陷的精确定位能力。

对比图 20 轨头圆孔型缺陷全聚焦检测成像图和图 21 轨头圆孔型缺陷全聚焦仿真成像图,二者在缺陷形态、位置和信号分布上呈现高度一致性,由于仿真不存在其他微小缺陷,底部的外轮廓回波信号受到圆孔型缺陷的覆盖更加明显。仿真和实验的高度一致性双向验证了超声相控阵检测技术对轨头缺陷定量检测的可靠性。本文试块中 4 处缺陷孔顶端埋深一致(30mm),通过设置不同孔长使孔底端相对于探头耦合面距离覆盖 33–63mm,从而在不改变入射与耦合条件的前提下,对距探头耦合面更远区域缺陷的可成像能力进行间接评估。试验结果表明,在本检测参数与耦合条件下,对距探头耦合面最大约 63mm 处的缺陷仍可获得稳定回波与成像。

3 结论

本文针对钢轨轨头内部缺陷通过传统无损检测方法难以实现高精度识别的问题,提出基于超声相控阵的轨头缺陷检测方法。通过综合运用声场仿真建模、FMC 数据采集、TFM 全聚焦成像及图像优化处理技术,系统提升了轨头内部缺陷的可检测性与成像质量。主要结论如下:

1)构建了基于 COMSOL 平台的钢轨轨头二维声场仿真模型,系统分析了阵列参数(阵元数目、阵元间距、阵元宽度、偏转角度)对声场分布与聚焦特性的影响,确定了 32 阵元、间距与波长比为 0.5、宽度与间距比不超过 0.5、偏转角不超过 45°的最优参数组合,为后续系统设计提供理论依据。

2)基于全矩阵捕获与全聚焦成像构建了高分辨率缺陷成像流程,并引入归一化降噪、Hilbert 变换与 TF-PCF 加权等多维信号处理技术,实现缺陷回波信号的高信噪比可视化重构。结果表明,该方法在消除伪影、提升成像分辨率与缺陷边界清晰度方面具有显著优势。

3)通过便携式相控阵系统对含 4 处不同孔长平底孔缺陷的 P60 钢轨试块进行检测,结果显示最大孔长检测误差控制在 10%以内,垂向深度检测误差在 5%以内,验证了方法的可行性与工程实用性。仿真成像与实测成像的高度一致性,进一步证实该方案在缺陷识别、形态判断与深度测量方面的可靠性。

参考文献:

- [1] Song Z, Yamada T, Shitara H, et al. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2011, 3(12): 546-550.
- [2] 段春辉, 石洪生. 涡流检测技术在钢轨焊缝探伤中的应用[J]. 铁路技术创新, 2019, (02): 15-18.
DUAN C H, SHI H S. Application of eddy current testing technology in rail weld flaw detection [J]. Railway Technology Innovation, 2019, (02): 15-18.
- [3] Antipov G A, Markov A A. Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50(8): 481-490.
- [4] Bertil E, Bob C. Inspecting Welds in Rail[J]. Inspection Trends: The Magazine for Materials Inspection and Testing Personnel, 2004, 7(3): 19-21.
- [5] Wan Y S, Lu L D, Liu Y S, et al. High Energy Radiographic Testing in Railway Industry[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1923(190-191): 1144-1147.
- [6] 全聪. 基于超声相控阵的钢轨损伤识别关键技术研究[D]. 北京交通大学, 2023.
TONG C. Research on Key Technologies of Rail Damage Identification Based on Ultrasonic Phased Array[D]. Beijing Jiaotong University, 2023.
- [7] 冯青松, 袁佳鹏, 刘健, 等. 重载铁路道岔尖轨声发射波传播特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(05): 93-103.
FENG Q S, YUAN J P, LIU J, et al. Propagation characteristics of acoustic emission waves in heavy-haul railway switch point rails [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(05): 93-103.

- [8] Lokesh B, Thittai A K. Diverging beam transmit through limited aperture: A method to reduce ultrasound system complexity and yet obtain better image quality at higher frame rates[J]. *Ultrasonics*, 2019, 91:150-160.
- [9] Mondal S C, Wilcox P D, Drinkwater B W. Design of Two-Dimensional Ultrasonic Phased Array Transducers[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005, 127(3):336-344.
- [10] Utrata D, Clark R. Groundwork for rail flaw detection using ultrasonic phased array inspection[C]//AIP Conference Proceedings. Amer Inst Physics, Melville, 2003(A):799-805.
- [11] Raude A, Colombier T. Phased array inspection of aluminothermic rail welds. The automated solution – a fast convenient means of inspecting rail joints arrives[C]//5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011). IET, 2011:1-5.
- [12] 尹段泉,莫若,李冈宇,等. 钢轨的相控阵串列式扫查检测[J]. *无损检测*, 2021, 43(11): 27-30+40.
YIN D Q, MO R, LI G Y, et al. Phased-array tandem scanning inspection of rails [J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(11): 27-30+40.
- [13] 戴万林,杨岳,刘希玲,等. 钢轨轨头内缺陷的超声相控阵 DAC 定量方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(01):188-195.
DAI W L, YANG Y, LIU X L, et al. DAC-based quantitative method for ultrasonic phased-array inspection of internal defects in the rail head [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(01): 188-195.
- [14] 成瑶. 钢轨缺陷的超声稀疏全聚焦成像方法研究[D]. 上海工程技术大学, 2022.
CHENG Y. Research on Ultrasonic Sparse Total Focusing Imaging Method for Rail Defects[D]. Shanghai University of Engineering Science, 2022.
- [15] 杨博,万策,王永锋,等. 超声相控阵全聚焦缺陷定位技术分析 [J]. *物理测试*, 2025, 43 (02): 38-42.
YANG B, WAN C, WANG Y F, et al. Analysis of ultrasonic phased array full focusing defect location technology[J]. *Physics Examination and Testing*, 2025, 43 (02): 38-42.
- [16] 严瑞. 全多层高压储氢容器对接接头裂纹缺陷超声相控阵检测方法研究[D]. 华南理工大学, 2024.
YAN R. Research on ultrasonic phased array testing method for crack defects in butt-joint welds of fully multilayer high-pressure hydrogen storage vessels [D]. South China University of Technology, 2024.



第一作者: 林凤涛 (1977-), 男, 教授, 博导/博士, 江西省“双千计划”科技创新领军人才, 江西省主要学科学术和技术带头人、从事列车安全技术等科研和教学工作。E-mail: ecjtu411@163.com。



通信作者: 谭荣凯 (1990-), 男, 讲师, 硕导/博士, 研究方向为轨道车辆关键部件服役性能。E-mail: tanrongkai7@163.com