

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412554

基于超声平面波成像的钢轨螺孔裂纹检测方法研究*

常至轩¹, 徐鑫涛¹, 武二永^{1,2}, 杨克己¹, 金浩然¹

(1. 浙江大学机械工程学院 杭州 310058; 2. 浙江大学舟山海洋研究中心 舟山 316021)

摘要: 轨道交通在当今社会生产活动中发挥着重要作用。目前在役钢轨大量采用鱼尾板和螺栓联接的方式铺设。钢轨接头在服役过程中会频繁受到冲击载荷作用, 容易诱发螺孔裂纹损伤。尽早发现螺孔裂纹, 并对裂纹进行定量测量, 是保障铁路运输安全, 避免发生严重事故的关键。超声相控阵成像检测方法具有精度高、环境适应性强、实施方便的优点, 在钢轨在役无损检测中得到了广泛的应用。然而, 传统相控阵斜入射扇扫成像方法受裂纹倾斜角度的影响, 在工业实践中依赖工人的主观判断和分析能力, 难以实现检测的量化与标准化。基于以上背景, 本文提出了一种基于超声平面波全聚焦成像的钢轨螺孔裂纹检测方法。使用复合平面波成像方法对钢轨内部螺孔及附近区域进行高精度重建, 获得裂纹损伤的初步检测图像。基于编码器信息, 将多个扫查点上的初步检测图像融合, 得到合成检测图像, 从而覆盖不同倾斜角度的裂纹。基于主成分分析方法, 对裂纹倾斜角度进行定量分析, 进而借助方向最大强度投影方法, 得到裂纹长度的定量检测结果。所述方法在钢轨螺孔裂纹试件检测试验中实现了对 $[-45^{\circ}, 45^{\circ}]$ 范围内裂纹的100%检出率; 裂纹定位误差最大值为1.47 mm, 接近1个波长; 长度检测误差最大值1.17 mm, 小于1个波长; 裂纹角度检测误差最大 5.01° 。所述方法需要的设备结构简单, 可集成于移动式钢轨巡检设备, 具备自动化实施的能力。

关键词: 超声波钢轨探伤; 裂纹检测技术; 超声平面波成像; 主成分分析; 图像融合

中图分类号: TH878.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the inspection method of railway bolt holes cracks using ultrasonic plane wave imaging

Chang Zhixuan¹, Xu Xintao¹, Wu Eryong^{1,2}, Yang Keji¹, Jin Haoran¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Rail transportation plays a significant role in contemporary societal production activities. A large number of rails in service are built by using fishplate and bolt connections, leading to frequent impact loading on rail joints, which easily induces crack damage around bolt holes. The early detection and quantitative measurement of bolt hole cracks are crucial for ensuring railway transportation safety and preventing serious accidents. Phased array ultrasonic imaging technology, characterized by high precision, strong environmental adaptability, and convenient implementation, have been widely applied in non-destructive testing of rails. However, reconstructed images on cracks through traditional phased array sector scanning methods is influenced by the tilt angle of cracks, relying on operators' subjective judgment in industrial practice, making it difficult to achieve quantitative and standardized detection. Therefore, in this paper, a quantitative detection method towards rail bolt hole crack based on ultrasonic plane wave imaging is proposed. Compounded plane wave imaging method is utilized to achieve high-precision reconstruction of the region of interest. Reconstructed images from multiple positions are fused to generate final inspection image, ensuring cracks with different tilt angles are covered. Principle components analysis is deployed to quantitatively evaluate the tilt angle of the cracks. After that, directional maximum intensity projection is utilized to measure the length of the cracks. Experiments on a railway test block shows that the proposed method makes a 100% detection rate for cracks in the range of $[-45^{\circ}, 45^{\circ}]$. The maximal measurement error of the proposed method on the location of

收稿日期: 2024-02-29 Received Date: 2024-02-29

* 基金项目: 浙江省重点研发计划(2020C01101)项目资助

cracks is 1.47 mm, which is close to a wavelength. The maximal measurement error of the length is 1.17 mm which is less than a wavelength. The maximal error of tilt angle of cracks is 5.01° . The required equipment is simple and can be conveniently mounted on mobile rail inspection vehicles to achieve automatic inspection.

Keywords: ultrasonic rail testing; crack detection technique; ultrasonic plane wave imaging; principal component analysis; image fusion

0 引言

铁路运输和轨道交通对国家经济发展、社会生产活动、人民日常出行具有重要意义。截至2023年底,中国铁路总运营里程已经达到15.9万公里。目前在役钢轨中存在大量以鱼尾板和螺栓联接方式铺设的线路。在服役过程中,列车与钢轨接头之间存在冲击载荷,容易诱发钢轨螺孔裂纹伤损。若未及时发现,裂纹会随时间逐渐生长,直至造成断轨等严重后果^[1]。因此,针对钢轨螺孔裂纹的高性能在役无损检测技术具有重要的应用价值。

超声无损检测技术由于具有检测精度高、环境适应性好、实施方便等优点^[2-4],在钢轨在役无损检测中得到了广泛的应用^[5-7]。目前主流的超声无损检测技术包括单探头扫查和超声相控阵检测技术。单探头扫查方法的优势为信号处理简单,可实现实时检测,但是易受到探轮不对中、扎轮等特殊状况的影响,且检测结果需要人工判读和复核,存在漏检的可能性^[8-9]。此外,单探头扫查受到声束散射和衍射的影响,难以对裂纹精确定量检测,不利于钢轨健康状态的评估。超声相控阵检测技术使用相控阵换能器实现超声激励和回波信号的接收,通过控制不同阵元的发射延时实现波束偏转或聚焦,并对回波信号实施波束成形算法,从而得到检测图像,相比于单探头扫查方法具有检测精度更高,检测范围更大等优点。其检测性能已经在钢轨检测中得到了验证^[10-12]。

钢轨螺孔处于钢轨内部,距离钢轨踏面较远,受到声束散射和衍射的影响更大,给螺孔裂纹伤损的检测带来了一定的困难。目前应用较多的是超声相控阵扇扫检测^[11],但是只能对一定角度范围内的裂纹得到较好的检测结果。并且,螺孔等结构特征在扇扫图像中呈现和裂纹类似的图像^[11],需要检测工人依据经验对检测图像进行判断,不利于裂纹定量检测的自动化和标准化。近年来,基于全矩阵采集(full matrix capture, FMC)技术的超声全聚焦(total focus method, TFM)成像方法得到了越来越多的研究和应用^[13-15]。相比于超声相控阵成像方法,TFM可以实现对感兴趣区域内的全部像素点聚焦成像^[16],从而得到更加精确的检测图像。然而,标准的全聚焦成像方法需要依次激励各个阵元来合成检测图像,对扫查效率有一定影响。平面波成像(plane wave imaging, PWI)通过控制相控阵换能器发射带偏转角度的平面波,实现感兴趣区域内全部像素点的聚焦成像,在不

降低成像质量的前提下大大减少了需要的发射次数,提高了扫查效率^[17]。目前已经在工业无损检测中得到了初步的应用^[18-20],并且被应用到了普通试块裂纹伤损的无损检测中^[21]。然而,钢轨结果相对更加复杂,且检测感兴趣区域距离表面较远,平面波成像的性能以及检测结果的定量表征仍有待研究。

基于以上背景,本文提出了一种基于超声平面波成像的钢轨螺孔裂纹检测方法。在经典平面波成像技术的基础上,考虑了换能器孔径对成像结果的影响,对检测图像幅值进行归一化。在检测图像的基础上对裂纹进行定量检测,得到位置、倾斜角度和长度等定量结果。所提出的方法在实验中实现了对 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内裂纹的100%检出率。定量检测结果中,裂纹定位检测误差最大1.483 mm,接近1个波长;长度检测误差最大0.8 mm,小于1个波长;裂纹角度检测误差最大为 9.391° 。对于长度仅为3 mm,倾斜角度 45° 的裂纹,仍然有较高的检测灵敏度和定量检测精度。在钢轨运维中可以在裂纹产生的早期即获得精确的检测结果,并且可实现对裂纹状态的监控,对于铁路运维与健康状态监测具有积极意义。所述方法需要的设备相对简单,具备集成到移动式钢轨巡检设备上和实现钢轨螺孔裂纹伤损自动化检测的能力。

1 超声平面波全聚焦成像检测技术

1.1 经典超声平面波全聚焦成像方法

超声相控阵换能器由一组等间距排布的可单独激励的阵元组成。每一个阵元可单独激励,并且可独立接收超声回波信号。根据惠更斯原理,当同时激励多个阵元时,介质中产生的声场为单独激励每一个阵元所产生声场的叠加。据此,可以通过设计发射延时,在介质中激励出平面波前,如图1所示。设钢轨中的目标平面波偏转角为 θ_i ,第 j 个阵元的坐标为 $(v_j, 0)$,则相应的发射延时为:

$$\sigma_{ij} = v_j \sin \theta_i / c_0 \quad (1)$$

其中, c_0 为介质中的声速。将所有接收通道上采集到的超声回波信号保存在一个矩阵 $s_{ij}(t)$ 中,称为平面波全矩阵原始数据。

在平面波全矩阵数据的基础上,可以通过全聚焦算法得到重建图像。如图2所示,以换能器阵列平面为 x 轴,垂直换能器阵列平面指向钢轨内部的方向为 z 轴,以换能器阵列中心为原点 O 建立坐标系。当采用直接耦合

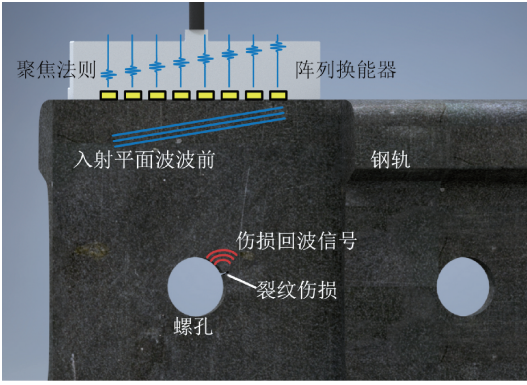


图1 基于超声平面波成像的钢轨螺孔裂纹伤损检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection of rail bolt hole cracks using ultrasonic plane wave imaging

时,对于感兴趣区域中坐标为 (x,z) 的像素,其对应的聚焦延时为:

$$\tau_{ij}(x,z) = \frac{1}{c_0} (x \sin \theta_i + z \cos \theta_i + \sqrt{(x - v_j)^2 + z^2}) \quad (2)$$

进而,可以得到平面波全聚焦成像条件为:

$$I_i(x,z) = \sum_j s_{ij}(\tau_{ij}(x,z)) \quad (3)$$

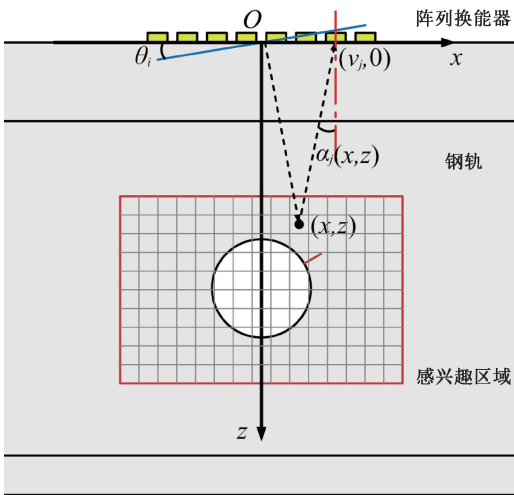


图2 超声平面波成像延时法则计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of the calculations of focal delays used in ultrasonic plane wave imaging

当采用水浸或楔块耦合时,需要按费马原理计算最短声程。此时式(2)应当修改为:

$$\tau_{ij}(x,z) = \frac{h \cos \theta'_i}{c_1} + \frac{x \sin \theta_i + z \cos \theta_i}{c_2} + \min_p \left\{ \frac{\|v_j - p\|}{c_1} + \frac{\|p - u\|}{c_2} \right\} \quad (4)$$

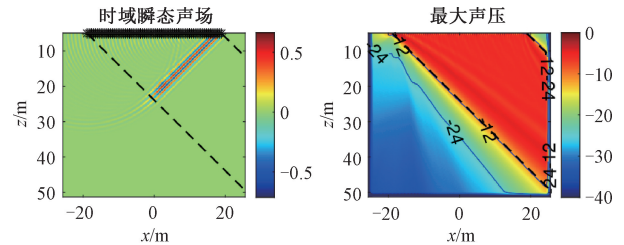
式中: p 为边界上任意一点, h 为水浸层的高度, c_1, c_2 分别是楔块与钢轨中的声速, v_j 为换能器的第 j 个阵元的坐标, $u = (x, z)$ 为像素点 (x, z) 的矢量坐标, $\|\cdot\|$ 表示矢量的模长算子。

单次平面波发射得到的检测图像信噪比较低,更常用的是复合平面波成像方法,设计一组平面波偏转角度序列 $\{\theta_i\}, i = 1, 2, \dots, N_u$,并将重建结果叠加,得到最终的检测图像:

$$I(x,z) = \sum_{i=1}^{N_u} I_j(x,z) = \sum_{i=1}^{N_u} \sum_j s_{ij}(\tau_{ij}(x,z)) \quad (5)$$

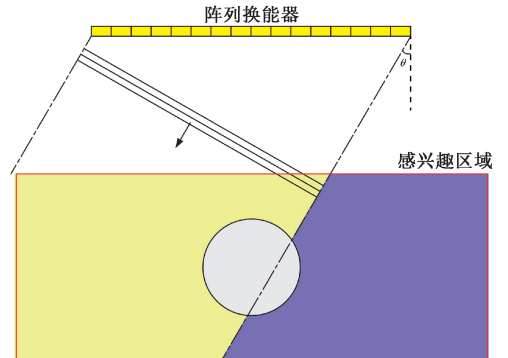
1.2 换能器孔径对检测图像的影响

前面所述的平面波全聚焦成像算法假定换能器可以在介质中激励出理想平面波,从而可以覆盖感兴趣区域中的全部像素点。然而在工业实践中,由于换能器的有效孔径总是有限的,每一次激励产生的脉冲平面波只能覆盖感兴趣区域的一部分,如图3(a)所示。图像为使用k-Wave仿真软件计算得到的时域声场信号^[22]。仿真中使用的换能器阵列包含64个阵元,阵元中心间距为0.6 mm,设定平面波偏转角度为 45° 。图3(a)左图为 $t = 10 \mu s$ 时的瞬态声场;右图为整个仿真区域中各个像素点处的最大声压分布。图中使用黑色虚线标出了通过换能器阵列左右两个阵元,倾斜角度为 45° 的直线。可以观察到,声强不低于 -12 dB的范围与换能器孔径在平面波入射方向上投影的范围基本重合。因此,可以将换能器孔径投影范围视为单次入射平面波的声束覆盖范围。



(a) 单一偏转角度平面波声场覆盖范围示意图

(a) Coverage range of plane wave ultrasound field with a single steered angle



(b) 单次平面波在感兴趣区域内的覆盖范围

(b) The coverage of a single plane wave in the region of interest

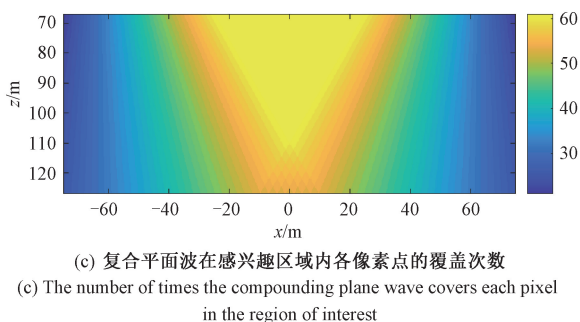


图3 有限换能器孔径对不同成像区域幅值的影响

Fig. 3 The effect of finite transducer aperture on the amplitude of different imaging area

设定平面波偏转角度序列 $\{\theta_i\}, i = 1, 2, \dots, N_u$, 对于每一个入射角度, 计算感兴趣区域中被入射平面波覆盖的区域, 使用一个 $\{0, 1\}$ 矩阵表示。被覆盖的点在矩阵中对应的位置记为 1, 未被覆盖的点记为 0。当入射平面波偏转角为 θ_i 时, 感兴趣区域中被覆盖的点 (x, z) 应当满足:

$$v_l + z \tan \theta_i < x < v_r + z \tan \theta_i \quad (6)$$

其中, v_l, v_r 分别是换能器阵列中最左侧阵元和最右侧阵元的横坐标。根据式(6)可以计算得到每一个平面波偏转角度对应的被覆盖区域, 使用矩阵 $M_i(x, z)$ 表示:

$$M_i(x, z) = \begin{cases} 1, & (x, z) \text{ 被覆盖} \\ 0, & (x, z) \text{ 未被覆盖} \end{cases} \quad (7)$$

如图3(b)所示, 感兴趣区域中, 黄色区域(左侧)对应的矩阵元素为 1, 蓝色区域(右侧)对应的矩阵元素为 0。进而可以得到全部偏转角度下, 每一个像素点被覆盖的次数矩阵:

$$M(x, z) = \sum_i^{N_u} M_i(x, z) \quad (8)$$

图3(c)所示为换能器孔径为 128 mm, 平面波偏转角度范围为 $[-30^\circ, 30^\circ]$, 步进值为 1° 时, 成像区域中不同像素点被平面波覆盖次数的分布图。可以观察到靠近感兴趣区域中心的点被覆盖的次数更多, 而靠近边缘的点则被覆盖次数较少, 导致工件内伤损靠近感兴趣区域中心时, 在检测图像中显示的幅值更高。

考虑在式(5)的基础上增加一个因子, 用于补偿换能器的有限孔径导致的感兴趣区域中不同区域伤损图像幅值的不均匀性:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^{N_u} \frac{1}{M_i(x, z)} \sum_j^{N_v} s_{ij}(\tau_{ij}(x, z)) \quad (9)$$

称为归一化平面波成像。

1.3 基于位置信息的重建图像融合

钢轨螺孔裂纹可能出现在多种不同的角度和方向上^[1]。只有当超声波入射声束与裂纹近似垂直的时候, 才能采集到有效的回波信号, 并得到较好的伤损图像重

建结果。受限于超声相控阵换能器的孔径, 当换能器固定在钢轨上的一个位置时, 难以得到全部角度裂纹的有效图像。并且由于检测之前无法预知裂纹的实际方向, 也无法通过工艺设计将换能器布置在最佳的位置上。

为了解决上述问题, 考虑将换能器沿钢轨轴线方向移动, 在多个不同的位置上进行平面波全聚焦成像, 从而得到同一个螺孔及附近区域的多个成像检测结果。根据每一个扫查点对应的位置信息, 对成像结果进行融合, 得到最终检测图像。

设换能器每次移动的距离为 δ , 重建图像中像素点的横向尺寸为 Δx 。对成像感兴趣区域中的某一个像素点, 取其在所有扫查点得到的图像中的最大幅值作为最终幅值。设第 l 个扫查点上得到的全聚焦检测图像为 $I^{(l)}$, 则融合后的检测图像为:

$$\bar{I}(x, z) = \max_l I^{(l)}(x + (l-1)\delta/\Delta x, z) \quad (10)$$

2 钢轨螺孔裂纹伤损检测仿真研究

2.1 钢轨螺孔裂纹伤损平面波成像方法

钢轨螺孔裂纹缺陷仿真采用《钢轨 第1部分: 43 kg/m~75 kg/m 钢轨》(TB/T 2344.1—2020)中 60 钢轨作为检测对象, 使用 CIVA(原子能和替代能源委员会, CEA, 法国, 2020)计算原始回波信号, 仿真场景如图4(a)所示。共设置 3 个不同角度的裂纹伤损, 伤损的详细位置和分布如图4(b)所示。所有裂纹的长度均为 5 mm。换能器采用水浸式检测, 水浸层的高度为 30 mm, 信号采样率为 50 MSPS。

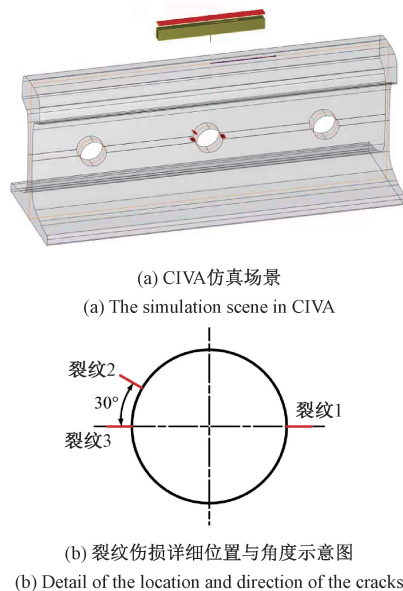


图4 钢轨试块仿真场景示意图

Fig. 4 Configurations of simulation on railway test block

换能器布置在钢轨螺孔的正上方,共设置 17 个扫查点,扫查步进距离为 5 mm,如图 5 所示。设定平面波偏转角度范围为 $[-30^\circ, 30^\circ]$,步进值为 1° ,共 61 次发射。换能器参数如表 1 所示。

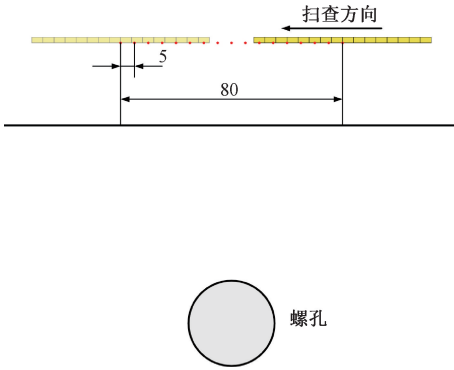


图 5 扫查点序列设置

Fig. 5 Configuration of scanning sequence

表 1 线性阵列换能器参数

Table 1 The properties of the linear array transducer

属性	参数值
中心频率/MHz	5
-6 dB 相对带宽/%	80
阵元数量	128
阵元宽度/mm	0.9
阵元间距/mm	1.0

对得到的重建结果进行 Log 变换,可得:

$$\bar{I}(x, z) = 20 \lg I(x, z) \quad (11)$$

设置动态范围为 $[-30, 0]$ dB,得到的重建结果如图 6 所示。顶部的圆弧形图像为螺孔顶部的回波信号,其余 3 个图像分别是 3 个裂纹的检测图像。对于设定的 3 个裂纹,检出率为 100%。提取裂纹检测图像的局部信号,对局部图像进行归一化处理,并设置动态范围为 $[-30, 0]$ dB。

2.2 钢轨螺孔裂纹检测图像定量分析

从图 6 所示的最终检测图像中,可以定性观察到 3 个裂纹伤损,但是无法从图像中直接得到裂纹的定量检测结果。针对一个裂纹伤损,提取其附近的局部检测图像,并作归一化处理。取出裂纹局部图像中强度不小于 -6 dB 的像素点 $S = \{(x_i, z_i) \mid i = 1, 2, \dots, M\}$ 作为裂纹伤损的表征。

裂纹的位置测量结果通过计算 S 中所有元素坐标的平均值得到:

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i, \bar{z} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z_i \quad (12)$$

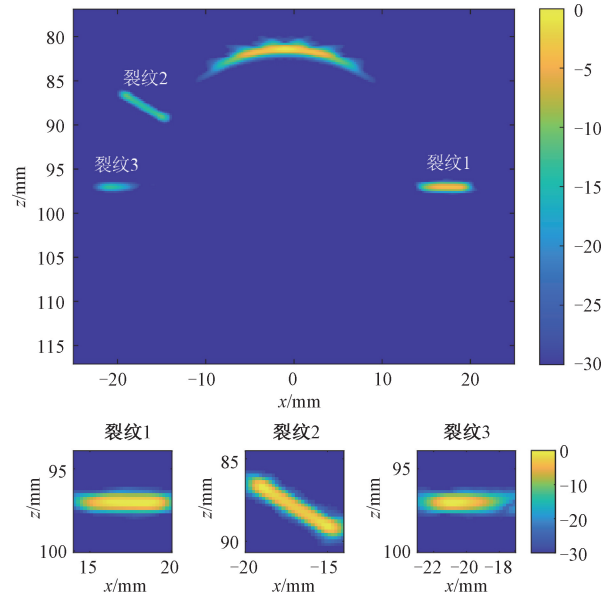


图 6 钢轨螺孔裂纹仿真重建图像

Fig. 6 The reconstructed images of railway bolt hole cracks in simulation

裂纹的定位误差计算方法为:

$$E_{pos} = \sqrt{(\bar{x} - x_{exact})^2 + (\bar{z} - z_{exact})^2} \quad (13)$$

式中: (x_{exact}, z_{exact}) 为裂纹实际中点的坐标。

裂纹角度的定量分析采用主成分分析 (principle component analysis, PCA) 方法计算。也即,找到一个方向 α ,使得 S 中的点在 α 方向上的投影能尽可能分散。设 β 为 α 的正交方向。等价地,在 β 方向上, S 中的点的投影分布尽可能集中。将 S 中的点写成矩阵形式:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_M \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \end{bmatrix} \quad (14)$$

对其进行中心化:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X} - \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} \quad (15)$$

主成分方向可以通过^[23]式(16)得到。

$$\max_{\mathbf{W}} \text{tr}(\mathbf{W}^T \mathbf{X}' \mathbf{X}'^T \mathbf{W}) \quad (16)$$

s. t. $\mathbf{W}^T \mathbf{W} = \mathbf{I}$

其中, $\mathbf{W}$ 的两个列向量即主成分方向和正交方向的方向向量。式(16)可通过拉格朗日乘子法求解^[23]。主成分方向的方向向量实际上是矩阵 $\mathbf{X}' \mathbf{X}'^T$ 的最大特征值对应的特征向量:

$$\mathbf{X}' \mathbf{X}'^T \mathbf{w}_1 = \lambda_{\max} \mathbf{w}_1 \quad (17)$$

进而, $\mathbf{w}_1$ 与 x 轴的夹角即为裂纹的角度定量分析结果:

$$\hat{\theta} = \arctan \frac{w_{1,2}}{w_{1,1}} \quad (18)$$

式中: $w_{1,1}, w_{1,2}$ 是主成分方向向量 $\mathbf{w}_1$ 的两个分量。如图 7 所示为裂纹 2 在主成分方向和正交方向上的投影,图中黑色点为裂纹检测图像中幅值不小于 -6 dB 的像素点,“+”标记点为像素点在主成分方向上的投影,“x”标记点为像素点在正交方向上的投影。

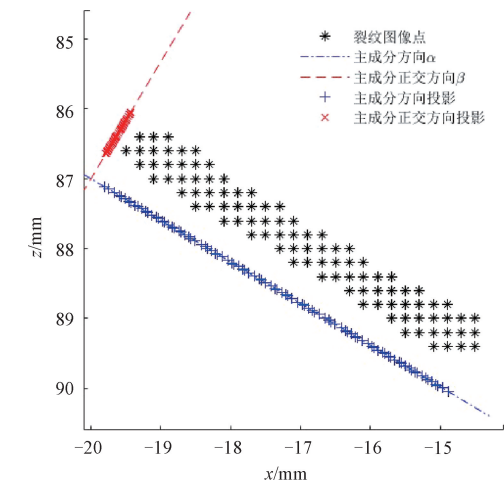


图 7 裂纹 2 主成分分析结果

Fig. 7 Principal components analysis results of crack 2#

对于点状缺陷,通常采用在水平方向和竖直方向上的最大强度投影曲线的半高全宽作为缺陷的大小。类似地,可以通过裂纹在主成分方向上的投影计算裂纹长度。

对于图 6 所示的裂纹局部图像,将每一个像素点的坐标表示为一个列向量,并将全部的像素点组成一个矩阵:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

对上述坐标矩阵按 (15) 中心化得到 $\mathbf{U}'$,进而计算像素点在裂纹倾斜方向 $\mathbf{w}_1$ 上的投影到原点的距离:

$$\mathbf{d} = \mathbf{w}_1^T \mathbf{U}' \quad (20)$$

以 d 为横坐标,像素点对应的幅值为纵坐标,绘制出投影后的裂纹最大强度投影散点图,并对其取包络,如图 8 所示。对裂纹方向最大投影曲线取幅值 -6 dB (像素强度 0.5) 范围内的最大宽度,即为裂纹长度的定量分析结果。

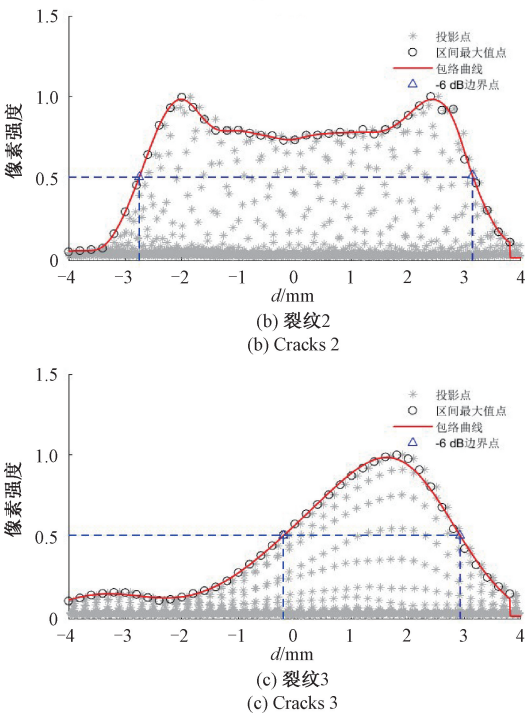
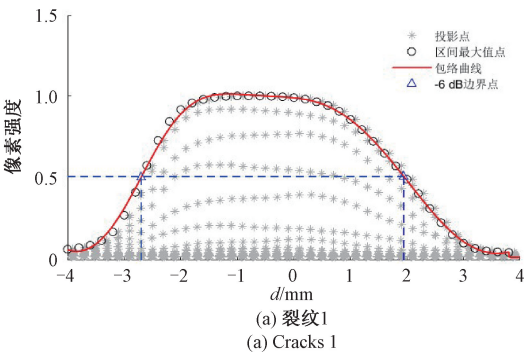


图 8 裂纹局部图像方向最大强度投影曲线

Fig. 8 Directional maximum intensity projection curve of crack local images

对另外两个裂纹图像进行同样的处理,得到三个裂纹的位置、方向和长度定量结果。如表 2~4 所示。超声波在待测工件中的波长会对图像的分辨率和检测精度有一定的影响。钢轨中的声速为 5 900 m/s,使用的换能器的中心频率为 5 MHz,因此钢轨中的纵波波长如式 (21) 所示,为 1.18 mm。

$$\lambda = c_0 / f_c \quad (21)$$

从表 2~4 可以观察到,裂纹 1、裂纹 2 的定位误差和长度误差均小于一个波长。但是裂纹 3 的定位误差为 1.48 mm、长度误差为 -1.88 mm,超过了一个波长。原因在于裂纹 3 所处的位置受到了裂纹 2 的遮挡。一方面导致到达裂纹 3 的声波较少,另一方面也导致来自裂纹 3 的反射回波无法被换能器阵列完整接收。角度测量误差方面,最大误差仅为 0.97°,可以满足实际检测的需要。

表 2 裂纹位置定量检测仿真结果

Table 2 The qualified location of cracks in simulation			
序号	检测值/mm	实际值/mm	误差值/mm
1	(18.38, 97.18)	(18.00, 97.00)	0.42
2	(-15.97, 88.03)	(-15.59, 88.00)	0.38
3	(-19.48, 97.15)	(-18.00, 97.00)	1.48

表3 裂纹长度定量检测仿真结果

Table 3 The qualified length of cracks in simulation			
序号	检测值/mm	实际值/mm	误差值/mm
1	4.64	5.0	-0.36
2	5.89	5.0	0.89
3	3.12	5.0	-1.88

表4 裂纹角度定量检测仿真结果

Table 4 The qualified tilt angle of cracks in simulation			
序号	检测值	实际值	误差值
1	0.40°	0.00°	0.40°
2	30.80°	30.00°	0.80°
3	-0.97°	0.00°	-0.97°

3 实验验证与结果分析

实验使用《双轨式钢轨超声波探伤仪暂行技术条件》(TJ/GW 157—2017)附录 A 指定的 GTS-60SG 试块作为检测对象。在两个螺孔上进行成像检测实验,螺孔 1 带有两个 0°裂纹伤损,一个裂纹长度 3 mm,另外一个长度 5 mm,如图 9 (a)所示;螺孔 2 带有 4 个裂纹伤损,其中两个为 15°裂纹,另外两个为 45°裂纹,4 个裂纹的长度全部为 3 mm,如图 9 (b)所示。使用 OLYMPUS 5L128-NW3 型超声换能器进行平面波全矩阵数据的采集,其参数与表 1 一致。采样率设置为 62.5 MSPS。实验场景如图 10 所示。

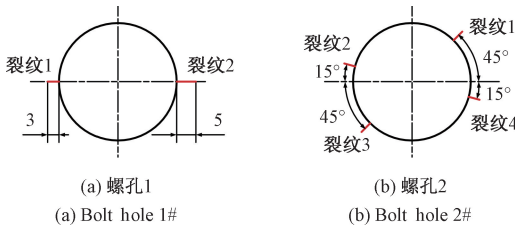


图9 实验螺孔裂纹伤损尺寸与位置示意图
Fig. 9 Size, direction and location of the crack damages used in experiments

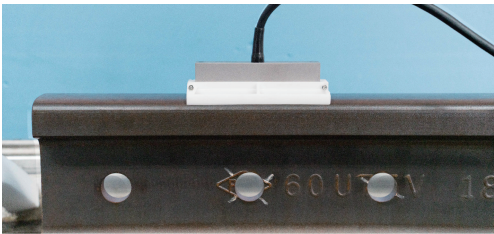


图10 钢轨螺孔裂纹伤损检测实验场景
Fig. 10 The inspection scene of railway bolt hole cracks

设定平面波偏转角度范围 $[-45^{\circ}, 45^{\circ}]$,间隔为 1° ,在每一个扫查点上进行 91 次发射,重建得到平面波检测图像。将多个扫查点上得到的平面波检测图像进行融合,得到合成平面波检测图像。螺孔 1 扫查范围为 $[-20, 20]$ mm,扫查间隔为 10 mm,共 5 个扫查点,螺孔 2 扫查范围为 $[0, 40]$ mm,扫查间隔同样为 10 mm,共 5 个扫查点,如图 11 所示。所得到的重建图像如图 12~13 所示。

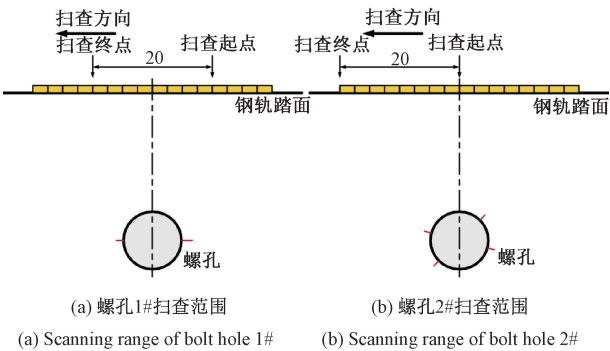


图11 钢轨螺孔检测扫查范围
Fig. 11 Scanning range of railway bolt hole inspection

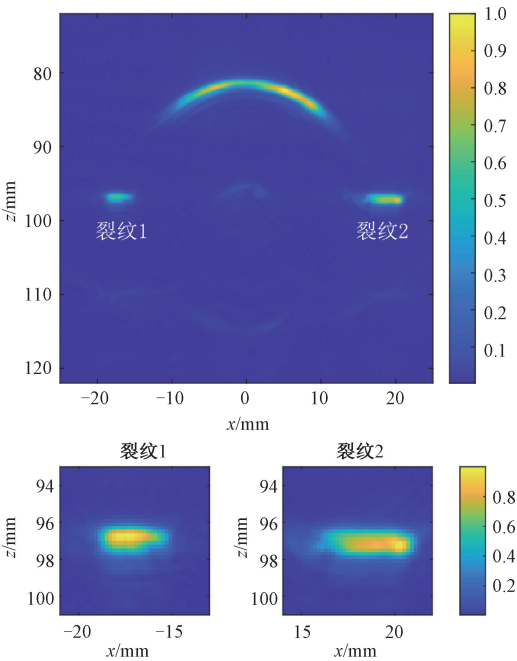


图12 螺孔1裂纹检测图像
Fig. 12 Inspection images of cracks on bolt hole 1#

从检测图像中,可以很容易分辨螺孔顶部图像和裂纹的图像。对于实验中设定的 6 个不同裂纹,检出率为 100%。提取裂纹局部图像,以局部图像中的最大幅值为参考值对局部图像作归一化处理。提取归一化之后幅值强度不小于-6 dB 的点,按式 (12)、(13) 计算裂纹的定

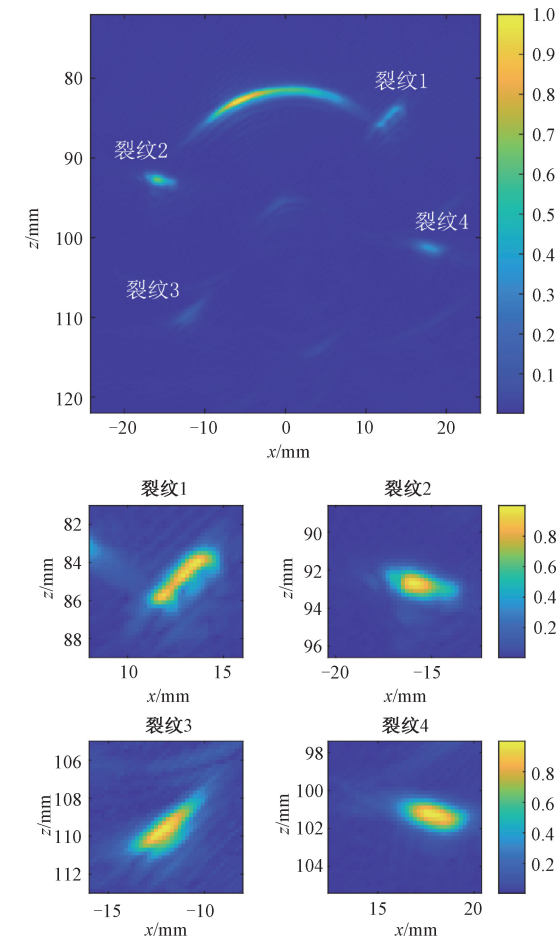


图 13 螺孔 2 裂纹检测图像

Fig. 13 Inspection images of cracks on bolt hole 2#

位结果和定位误差。所得到的结果如表 5 所示。按式 (15)、(17)、(18) 计算每一个裂纹的倾斜角度,进而按式 (19)、(20) 计算裂纹的方向最大强度投影曲线,如图 14~15 所示。从而得到裂纹长度测量结果,如表 6~7 所示。

裂纹的定量检测结果显示,定位的最大误差为 1.47 mm,接近 1 个波长,出现在螺孔 2 裂纹 4,处于钢轨螺孔中心线以下。全部 6 个裂纹的长度测量误差均小于

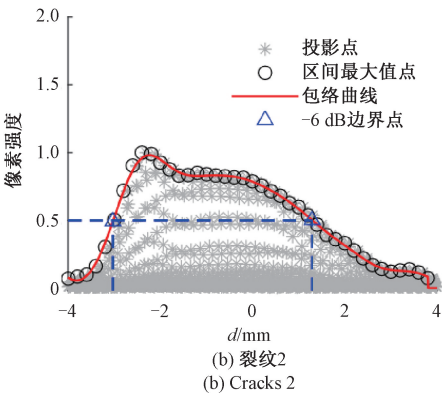
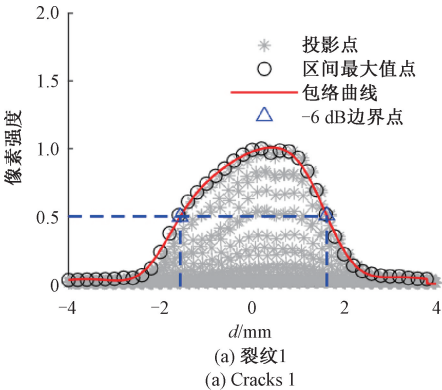
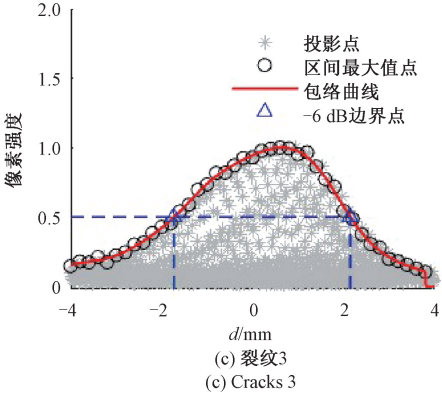
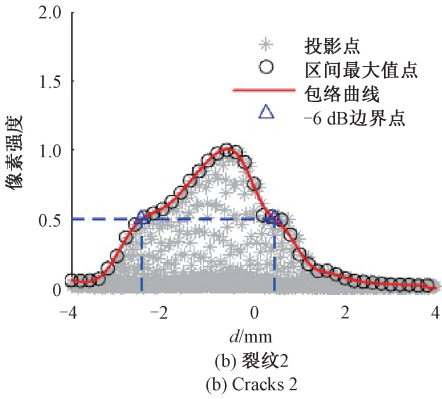
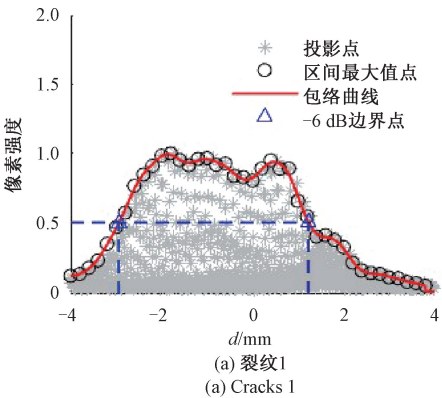


图 14 螺孔 1 裂纹方向最大投影曲线

Fig. 14 Directional maximum intensity projection curves of cracks on bolt hole 1#



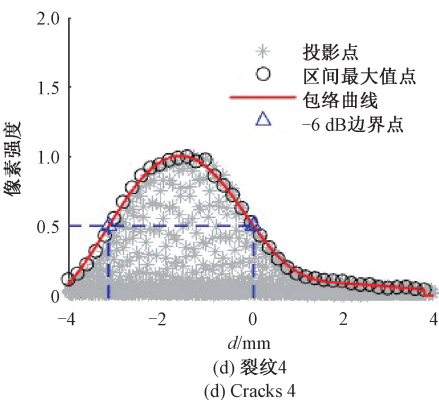


图 15 螺孔 2 裂纹方向最大投影曲线

Fig. 15 Directional maximum intensity projection curves of cracks on bolt hole 2#

表 5 裂纹位置定量检测结果

Table 5 The measurement of the location of cracks			
序号	检测值/mm	实际值/mm	误差值/mm
1	(-17.26, 96.89)	(-17.00, 97.00)	0.28
2	(18.84, 97.16)	(18.00, 97.00)	0.85
3	(12.85, 84.77)	(12.02, 84.98)	0.86
4	(-15.66, 92.77)	(-16.42, 92.60)	0.78
5	(-11.99, 109.7)	(-12.02, 109.0)	0.67
6	(17.88, 101.29)	(16.42, 101.4)	1.47

表 6 裂纹长度定量检测结果

Table 6 The measurement of the length of cracks			
序号	检测值/mm	实际值/mm	误差值/mm
1	3.19	3	0.19
2	4.32	5	-0.68
3	4.17	3	1.17
4	2.91	3	-0.08
5	3.88	3	0.88
6	3.18	3	0.18

表 7 裂纹角度定量检测结果

Table 7 The measurement of the direction of cracks			
序号	检测角度/(°)	实际值/(°)	误差值/(°)
1	1.98	0	1.98
2	2.79	0	2.79
3	-42.36	-45	2.64
4	12.54	15	-2.46
5	-39.99	-45	5.01
6	13.70	15	-2.3

介质中的典型波长,实验中出现的最大误差为 1.17 mm,出现在螺孔 2 裂纹 1。角度检测结果中,误差最大值为 5.01°,出现在螺孔 2 裂纹 3,同样处于钢轨螺孔中心线以下。此外,螺孔 1 中的两个裂纹具有不同的长度,分别是 3 mm 和 5 mm,因此,从图 12 可以看出,裂纹 1 在检测图像中的幅值明显小于裂纹 2,符合理论预期。同时,二者的定位误差、长度检测误差均小于 1 个波长。二者的角度检测误差都小于 3°。

从上述实验结果中可以观察到,基于扫查图像合成的平面波成像检测方法对于不同倾斜角度、不同长度的裂纹均具有较高的检测精度和灵敏度。对于±45°范围内的裂纹均可得到直观且准确的检测结果。对于长度仅为 2.5 个波长的裂纹,同样可以达到较高的检测精度。对于螺孔中心线以下的裂纹,虽然检测灵敏度和精度整体低于螺孔中心线以上的裂纹,但是仍然可以得到有效的定量检测结果。

根据表 7 得到的结果中,可以看到对于较大倾斜角度的裂纹,角度定量检测结果误差相对较大,在本文所述方法下,角度检测误差又会影响到裂纹长度的检测误差。如前所述,当入射平面波的偏转角度和裂纹缺陷的角度垂直时,可以得到最强的回波信号。实验中设定的平面波偏转范围[-45°,45°],步进为 1°,则对于 45°裂纹来说,只有偏转角度为 45°及接近 45°入射的声波可以得到有效的成像结果。而其他偏转角度的入射平面波得到的几乎全部是噪声信号。此现象仅仅在实验中出现,而在仿真中,0°和 30°裂纹得到的定量误差几乎是一致的。原因在于 CIVA 在计算 RF 信号的模型中忽略了声波传播过程中的结构噪声。增大平面波的偏转范围是比较直接的解决方法。但是,平面波的偏转角度受到换能器阵元的声场指向性影响。基于活塞模型,对压电型换能器进行建模,可以得到声场的指向性函数为^[24]:

$$D(\theta) = \frac{\sin(kb\sin\theta)}{kb\sin\theta}$$

(22)

其中, b 是换能器阵元宽度的一半, $k = 2\pi f/c_0$ 是介质中的波数, f 是换能器的中心频率, c_0 是介质中的典型声速。绘制得到实验中使用的换能器的指向性函数图像如图 16 所示。

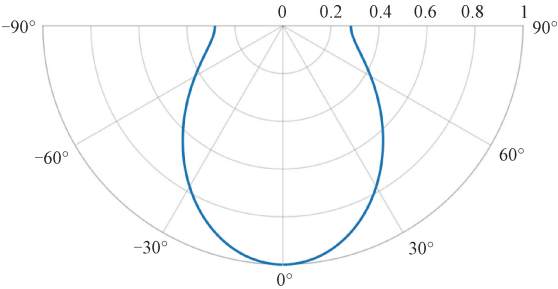


图 16 换能器阵元的声场指向性函数

Fig. 16 The directivity of the transducer element used in experiments

因此,平面波的偏转角度具有一定的限制。针对大倾斜角度的裂纹,要提高检测的精度,可以考虑采用斜入射的方式针对特定裂纹进行检测。

综上,本文所述平面波成像方法,对于 0° 、 15° 、 45° 等不同倾斜角度的裂纹实现了100%的检出率。对于螺孔中心线以上的裂纹,定位误差和长度测量误差均小于1个波长,角度测量误差不超过 3° 。对于螺孔中心线以下的裂纹,定位误差和长度测量误差接近1个波长,角度测量误差最大为 5.01° ,可以满足实际钢轨缺陷检测和运维的需要。

4 结 论

本文提出了一种面向钢轨螺孔裂纹的复合平面波成像检测方法,根据平面波发射覆盖区域对成像结果进行归一化;并提出了一种基于-6 dB原则的裂纹位置定量检测方法,一种基于线性回归方法的裂纹伤损倾斜角度定量检测方法,一种基于方向最大强度投影曲线的裂纹长度定量检测方法。实现了钢轨螺孔裂纹的高精度图像重建和定量检测。

仿真分析与实验结果证明,所述方法可以获得钢轨螺孔裂纹伤损的直观检测图像,且具备螺孔裂纹定量检测的能力。GTS-60SG试块检测实验中,所述方法对设定的6个裂纹缺陷检出率为100%。裂纹定位检测误差最大为1.47 mm,接近一个波长;长度检测误差最大值为1.17 mm,小于一个波长;角度检测误差最大值为 5.01° 。对于长度仅为3 mm,倾斜角度 45° 的裂纹,仍然有较高的检测灵敏度和检测精度,从而可以在实际钢轨中裂纹产生的早期即检出,并且可以实现裂纹状态的监测,对于钢轨维护和健康状态监测具有积极意义。

所述方法只需在钢轨踏面布置换能器,且在不更换换能器和楔块的情况下,即可实现 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内的裂纹的精确定量检测。所需的设备简单,实施方便,具备集成到移动式钢轨巡检设备上的能力,进而可以实现钢轨螺孔裂纹的自动化检测。

参考文献

[1] 张勤,姚存治. 钢轨螺孔裂纹伤损特点及防治措施[J]. 铁道建筑, 2010(8): 122-124.

ZHANG Q, YAO C ZH. Characteristics of rail screw hole crack injury and preventive measures [J]. Railway Engineering, 2010(8): 122-124.

[2] 胡宏伟,王泽湘,彭凌兴,等. 基于均方根速度的水浸超声合成孔径聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 365-370.

HU H W, WANG Z X, PENG L X, et al. Immersion

ultrasonic imaging using the synthetic aperture focusing technique based on the root mean square velocity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 365-370.

[3] 胡宏伟,王泽湘,王向红,等. 有限角度水浸超声检测空间复合成像[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1118-1123.

HU H W, WANG Z X, WANG X H, et al. Limited-angle spatial compound imaging for immersion ultrasonic testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 1118-1123.

[4] 周正干,李洋,陈芳浩,等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 371-378.

ZHOU ZH G, LI Y, CHEN F H, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 371-378.

[5] XUE ZH Q, XU Y D, HU M, et al. Systematic review: Ultrasonic technology for detecting rail defects [J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130409, 1-15.

[6] 田贵云,高斌,高运来. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.

TIAN G Y, GAO B, GAO Y L. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.

[7] 张辉,宋雅男,王耀南,等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.

ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.

[8] 李锦,牟国义,马铁雷. 钢轨探伤漏检螺孔裂纹的原因分析和应对措施[J]. 铁道建筑, 2010(11): 132-134.

LI J, MOU G Y, MA T L. Analysis of the reasons for the leakage of rail flaw detection screw hole cracks and countermeasures [J]. Railway Engineering, 2010(11): 132-134.

[9] 秦怀兵. 钢轨探伤车漏检伤损原因分析及对策研

- 究[J]. 铁道建筑, 2016(12): 117-120.
- QIN H B. Analysis of the reasons for the leakage of the rail flaw detection vehicle and countermeasures research[J]. Railway Engineering, 2016(12): 117-120.
- [10] 兰晓峰, 张渝. 重载铁路钢轨相控阵探伤系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 47-55.
- LAN X F, ZHANG Y. Research on heavy haul railway inspection system based on the phased array technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 47-55.
- [11] KIM G, SEO M K, KIM Y I, et al. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 311:112086.
- [12] GARCIA G, ZHANG J. Application of ultrasonic phased arrays for rail flaw inspection [R]. Federal Railroad Administration, 2006.
- [13] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 454-461.
- ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 454-461.
- [14] ZHU W, XIANG Y, ZHANG H, et al. Research on ultrasonic sparse DC-TFM imaging method of rail defects[J]. Measurement, 2022, 200:111690,1-10.
- [15] PERROT V, POLICHETTI M, VARRAY F, et al. So you think you can DAS? A viewpoint on delay-and-sum beamforming[J]. Ultrasonics, 2021, 111: 106309.
- [16] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT and E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [17] MONTALDO G, TANTER M, BERCOFF J, et al. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control, 2009, 56(3): 489.
- [18] LE JEUNE L, ROBERT S, VILLAYERDE E L, et al. Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging [J]. Ultrasonics, 2016, 64: 128-138.
- [19] MERABET L, ROBERT S, PRADA C. 2D and 3D reconstruction algorithms in the fourier domain for plane-wave imaging in nondestructive testing[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control, 2019, 66(4): 772-788.
- [20] COSARINSKY G, FERNANDEZ-CRUZA J, CAMACHO J. Plane wave imaging through interfaces [J]. Sensors (Basel), 2021, 21(15):4967.
- [21] MERABET L, ROBERT S, PRADA C. The multi-mode plane wave imaging in the Fourier domain: Theory and applications to fast ultrasound imaging of cracks [J]. NDT & E International, 2020, 110:102171.
- [22] TREEBY B E, COX B T. k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(2): 021314,1-12.
- [23] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- ZHOU ZH H. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [24] SCHMERR Jr L W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

作者简介



常至轩, 2019 年于浙江大学获得学士学位, 现于浙江大学机械工程学院攻读博士学位, 主要研究方向为超声无损检测、以及钢轨自动化运维。

E-mail: chang_zhixuan@zju.edu.cn

Chang Zhixuan received his B.Sc. degree in 2019 from Zhejiang University. He is now a Ph. D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Zhejiang University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and evaluation, and railway automatic maintenance.



徐鑫涛, 2019 年于西安交通大学获得学士学位, 现于浙江大学机械工程学院攻读博士学位, 主要研究方向为超声无损检测以及复杂焊缝无损检测。

E-mail: xintaoxv@zju.edu.cn

Xu Xintao received his B.Sc. degree in 2019 from Xi'an Jiaotong University. He is now a Ph. D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Zhejiang University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and evaluation, and complex weld inspection.



武二永, 分别于 2001 年、2004 年、2007 年于浙江大学获得学士、硕士、博士学位, 现为浙江大学机械工程学院讲师、浙江大学舟山海洋研究中心研究人员, 主要研究方向为自动化超声检测设备、以及水下机器人。

E-mail: wueryong@zju.edu.cn

Wu Eryong received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees in 2001, 2004, and 2007 from Zhejiang University, respectively. Now he is a lecturer in the School of Mechanical Engineering, and researcher (informal) in the Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University. His main research interests include automatic ultrasonic testing equipment, and underwater robotics.



杨克己, 1986 年于浙江大学获得学士学位, 1989 年于浙江大学获得硕士学位, 1997 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学机械工程学院教授, 主要研究方向为信号处理与智能检测、以及机电一体化。

E-mail: yangkj@zju.edu.cn

Yang Keji received his B. Sc. degree in 1986 from Zhejiang

University, received his M. Sc. degree in 1989 from Zhejiang University, received his Ph. D. degree in 1997 from Zhejiang University. Now he is a professor in the School of Mechanical Engineering, Zhejiang University. His main research interests include signal processing and intelligent inspection, and mechatronics.



金浩然 (通信作者), 2012 年于浙江大学获得学士学位, 2017 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学机械工程学院研究员, 主要研究方向为超声无损检测、机器人超声成像, 超声无损检测, 医疗超声。

E-mail: jinhr@zju.edu.cn

Jin Haoran (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees in 2012 and 2017 from Zhejiang University, from Zhejiang University, respectively. Now he is a researcher in the School of Mechanical Engineering, Zhejiang University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and evaluation, robotic ultrasonic imaging, and medical ultrasonics.