

钢轨轨头复杂曲面损伤的相控阵超声检测研究^{*}

洪旭龙 李文涛 杨纪元 谢志栋

(兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

摘 要: 针对传统无损检测方法难以胜任不同半径下钢轨轨头损伤检测的问题,提出了一种基于钢轨轨头复杂曲面损伤的相控阵超声检测方法。对轨头复杂结构特征,制定了相控阵超声静态聚焦检测方案;基于费马原理,提出了轨头不同半径下的相控阵超声合成声束延迟时间计算方法;建立有限元仿真模型分析了相控阵声束在轨头中的传播特性;基于时域不连续伽辽金法(DGTD),建立轨头的相控阵超声动态响应仿真模型,分析了轨头不同缺陷位置的 A 型信号特征;最后,对轨头预埋不同位置的缺陷进行相控阵超声实验,可以对直径为 1 mm 的缺陷实现准确检测。结果表明,对中心区域缺陷检测的最优平均信噪比为 22.97 dB,对轨头曲率较大的近表面区域检测的最优平均信噪比为 17.16 dB。相较于传统单探头超声检测方法,该方法将检测速率提升约 40%;与未针对轨头曲面优化的常规相控阵方法相比,在轨头中心及近表面大曲率区域分别将缺陷平均检测信噪比提升约 10 和 12 dB。

关键词: 曲面结构;钢轨损伤;相控阵超声;无损检测

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on ultrasonic phased array testing of complex curved surface damage on rail heads

Hong Xulong Li Wentao Yang Jiyuan Xie Zhidong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional non-destructive testing methods are difficult to detect rail head damage under different radii, a phased array ultrasonic testing method based on the complex curved surface damage of rail heads is proposed. For the complex structural features of the rail head, a phased array ultrasonic static focusing detection scheme is formulated; based on Fermat's principle, a calculation method for the delay time of the phased array ultrasonic synthetic beam under different radii of the rail head is proposed; a finite element simulation model is established to analyze the propagation characteristics of the phased array beam in the rail head; based on the discontinuous Galerkin time-domain (DGTD) method, a phased array ultrasonic dynamic response simulation model of the rail head is established and the A-type signal characteristics of different defect positions in the rail head are analyzed. Finally, phased array ultrasonic experiments were conducted on defects pre-embedded at different positions of the rail head and defects with a diameter of 1 mm can be accurately detected. The results show that the optimal average signal-to-noise ratio for defect detection in the central area is 22.97 dB and for the near-surface area with a larger rail head curvature, it is 17.16 dB. Compared with the traditional single-probe ultrasonic testing method, this method increases the testing speed by approximately 40%. Compared with the conventional phased array method that has not been optimized for the rail head's curved surface, the average defect detection signal-to-noise ratio at the center of the rail head and in the large curvature area near the surface has been increased by approximately 10 and 12 dB respectively.

Keywords: curved structures; rail damage; phased array ultrasound; non-destructive testing

0 引 言

随着铁路设施的完善、货物运输及列车高密度运行的

增加,钢轨磨损问题日益严重,导致表面及内部易产生多种缺陷,威胁到列车的安全运行^[1]。铁路钢轨常见的损伤形式主要包括钢轨焊接截面缺陷^[2]、轨头剥离掉块及压溃、侧

磨、波磨、焊接接头伤损、滚动接触疲劳裂纹引起的内部裂纹等^[3]。在铁路列车的往复、周期性荷载作用下,很容易在截面处发生内部缺陷,而这些缺陷更有可能在非常高的速度下发展^[4],导致钢轨失稳、断裂,甚至脱轨等重大事故。分析数据表明,在以上各类钢轨损伤中,由钢轨表面缺陷引起的列车安全事故约占全部事故的 30%^[5]。钢轨断裂作为钢轨最为严重的损伤之一,导致火车发生脱轨的比例最高。钢轨焊接截面的内部缺陷则会导致钢轨发生胀轨、形变等情况,严重时可能发生钢轨断裂^[6]。据统计,2020 年一辆意大利列车由于钢轨缺陷导致脱轨事故,造成多人受伤以及 2 人死亡;2013 年西班牙高铁脱轨事件,因轨道几何形变未及时检测,造成 79 人死亡的严重后果。类似地,美国费城 Amtrak 事故(2015 年)中扣件松动导致轨道横向刚度下降 52%,凸显高精度动态检测技术的必要性^[7]。

现阶段钢轨缺陷的检测主要采用目视检测、机器视觉检测、涡流检测及红外热成像检测等传统方法。如孙铁强等^[8]提出一种基于 YOLO 的多模态钢轨表面缺陷检测算法 RailBiModal-YOLO,其表面缺陷平均检测精度(mean average precision, mAP)高达 95.2%,但局限在于只能检测表面以下 2 mm 以内缺陷,对于轨头内部更深处缺陷无能为力。杨延强等^[9]利用涡流脉冲热像技术,设计了一套结合裂纹响应提取和裂纹识别的流程,提高了钢轨踏面裂纹的识别能力。Xu 等^[10]研究了检测速度对涡流检测信号的影响,根据有限元仿真分析得出:随着速度的增加,缺陷信号幅度近似线性地减小,下降斜率与缺陷深度有关。上述涡流检测方法也都只针对钢轨表面或表面下 1~6 mm 内缺陷,当缺陷深度大于 6 mm 时,其信噪比会急剧下降超过 60%,同样难以触及轨头内部核心缺陷区域。

相较于上述检测方法,超声检测既可以检测内部缺陷,又可以实现在线检测,还可以对复杂结构(如曲面结构)的工件进行精确检测。基于相控阵超声的缺陷检测与识别技术因具有声束聚焦和声束偏转特性,在无损检测中凭借效率高、结构盲区少等优点^[11]逐渐成为研究焦点。魏小源等^[12]针对超声导波进行钢轨缺陷检测时宽主瓣及高旁瓣等问题,提出了一种基于 NLFM-Barker 编码激励的超声导波检测方法,结果表明 NLFM-Barker 信号主瓣宽度较传统的 Sin-Barker 缩短了 5.9%且峰值旁瓣水平降低了 2.161 4 dB。但其对微小缺陷的检测能力有限,导波的多模态与频散特性使得其对直径小于 5 mm 的微小缺陷难以实现稳定识别与精确定位,通常仅用于宏观损伤的筛查。周扬帆等^[13]提出了一种基于斯涅尔定律,用于曲面构件的相控阵聚焦延时方法,结果表明该方法计算时间较传统方法缩短约 70%,还能有效提高曲面构件内微小缺陷检测信噪比和成像质量,然而,该方法在钢轨轨头多曲率的复杂曲面结构中的应用尚未深入,对于更大曲率区域的声束散射控制方面仍存在挑战。朱甜甜等^[14]提出了一种适用于曲面构件的阵列超声频域逆时偏移成像方法,然而,其高性能算法的成

像质量严重依赖于对构件几何轮廓的先验知识。在实际钢轨检测中,磨损会导致轨头标准轮廓发生改变,当轮廓拟合误差超过 0.5 mm 时,其对 1 mm 当量缺陷的成像定位误差可放大至 2 mm 以上,影响检修决策。康亚轩等^[15]为解决盲测工况下双层介质全聚焦成像困难的问题,利用虚拟源法重构界面寻找折射点,但该方法在理论上要求界面曲率半径大于探头孔径的 1.5 倍。对于曲率半径仅为 13 mm 的轨头近颞区域(参见 CHN60 钢轨标准),该方法几乎无法适用,声束在该区域的散射损失可导致信噪比下降超过 10 dB。Zheng 等^[16]推导了柔性相控阵在等半径单层和双层复弯曲工件中的偏转聚焦原理,其局限性在于成本与耐用性。64 阵元柔性相控阵探头其售价约为同等规格刚性探头的 4~5 倍。同时,其柔性封装材料在野外铁路现场的恶劣工况下使用寿命和性能稳定性较低,极大地限制了其大规模普及应用。

本文基于费马原理推导出了轨头不同半径下的延迟时间计算方法;基于时域不连续伽辽金法(discontinuous Galerkin time-domain, DGTD)的动态响应仿真和检测实验,通过对轨头不同半径下的缺陷进行相控阵超声检测研究,提出了一种采用线阵换能器搭配定制曲面耦合楔块对轨头内部缺陷的检测方法。

1 基于费马原理计算钢轨轨头延迟时间

1.1 平曲面楔块耦合轨头不同半径聚焦延迟时间计算

在阵列换能器中,各阵元的延迟时间是实现相控阵声束控制的关键。然而,当涉及到多层介质或形状复杂的工件时,使用几何声程差法计算较为复杂。因此,利用费马原理^[17]可以计算出声波从各个发射(或接收)阵元到达预期聚焦点的传播时间,再通过计算各传播时间的差值,即可获得各阵元的延迟时间^[18]。以 CHN60 钢轨(简称钢轨)^[19]试样为例,根据被测工件界面形状与线阵换能器阵元几何尺寸,推导出适用于轨头不同位置缺陷检测的聚焦法则。

根据费马原理,声波在介质中传播的路径始终满足最短传播时间条件。对于本文涉及的由楔块(介质 1)和钢轨(介质 2)组成的多层曲面结构,声波从阵元发射,经过楔块-钢轨曲面界面折射后到达聚焦点的实际路径,即为所有可能路径中传播时间最短的那一条,该路径遵循 Snell 定律的广义形式。声波从第 i 个阵元 $I(x_i, 0)$ 经过楔块-钢轨界面上的某一点 $s_1(x_{i1}, y_{i1})$ 折射,最终到达轨头内的聚焦点 $U(x_u, y_u)$ 。根据费马原理,实际的声波路径 $I \rightarrow S_1 \rightarrow U$ 是使总传播时间 t_i 最小化的路径。其中,点 S_1 必须位于半径为 r_1 的圆弧上。

图 1 为简化平曲面楔块耦合轨头示意图, n 是阵元总数; $y_{i1} = y_{i2} = 0$; $x_{i1} = x_p + i_1 d$; $x_{i2} = x_p + i_2 d$ 。轨头延迟时间计算区域的圆弧半径 r_1 为 300 mm, r_2 为 80 mm,轨头区域高度 h 为 48.5 mm。

首先,根据费马原理确定第 $i_1, i_2 (i_1 \neq i_2)$ 个阵元发射

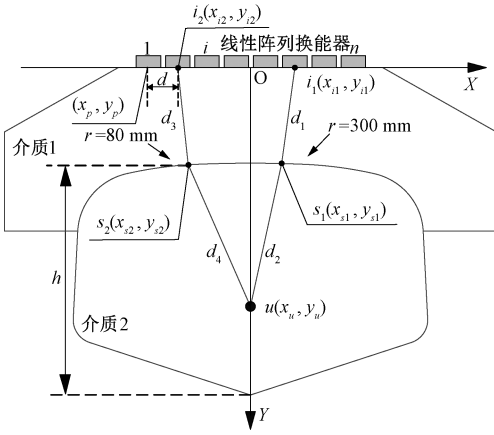


图1 轨头曲面延迟时间计算原理

Fig. 1 The calculation principle of the delay time of the rail head surface

的声波(其阵元中心坐标 $i_1(x_{i1}, y_{i1})$, $i_2(x_{i2}, y_{i2})$) 到达缺陷聚焦点 $u(x_u, y_u)$ 的声波传播时间 t_{i1} , 再确定由 $i_1(x_{i1}, y_{i1})$ 经过介质1入射到半径为 r_1 上的坐标 $s_1(x_{s1}, y_{s1})$, 由 $i_2(x_{i2}, y_{i2})$, 经过介质1入射到半径为 r_2 上的坐标 $s_2(x_{s2}, y_{s2})$ 。假设第1个阵元的中心坐标为 (x_p, y_p) , 即:

$$\begin{cases} x_{s1} = x_1 + r_1 \cos \theta_1 \\ y_{s1} = y_1 + r_1 \sin \theta_1 \\ x_{s2} = x_2 + r_2 \cos \theta_2 \\ y_{s2} = y_2 + r_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} t_{i1} = \frac{d_1}{c_1} + \frac{d_2}{c_2} \\ t_{i2} = \frac{d_3}{c_1} + \frac{d_4}{c_2} \end{cases} \quad (2)$$

取 $t_i = \min[t_{i1}, t_{i2}]$, 由于第1个阵元中心坐标已知, 因此可以求出其最小值 t_i 。式(1)、(2)可推广到不同半径下的坐标及延迟时间的计算。其中, d 是阵元中心间距; θ_1 是半径 r_1 对应的圆心角; θ_2 是半径 r_2 对应的圆心角; (x_1, y_1) 是半径为 r_1 所对应的圆心坐标; (x_2, y_2) 是半径为 r_2 所对应的圆心坐标; c_1, c_2 分别是介质1和2中的纵波声速。

其中,

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_{s1} - x_{i1})^2 + (y_{s1} - y_{i1})^2} / c_1 \\ d_2 = \sqrt{(x_u - x_{s1})^2 + (y_u - y_{s1})^2} / c_2 \\ d_3 = \sqrt{(x_{s2} - x_{i2})^2 + (y_{s2} - y_{i2})^2} / c_1 \\ d_4 = \sqrt{(x_u - x_{s2})^2 + (y_u - y_{s2})^2} / c_2 \end{cases} \quad (3)$$

重复上述计算过程, 获得阵列孔径中各个阵元到达聚焦点 u 的声波传播时间, 并得到其最大值 $t_{\max}$ 。则第 i 个阵元所对应的延迟时间^[20], 即:

$$\Delta t_i = t_{\max} - t_i \quad (4)$$

1.2 斜曲面楔块耦合轨头聚焦延迟时间计算

轨头横向裂纹源或气孔等缺陷一般位于距胎面 8~12 mm, 距轨头纵向内侧 5~10 mm, 横向裂纹方向几乎垂

直于轨头侧面, 胎面多呈 $10^\circ \sim 25^\circ$ ^[21] 的横向裂纹, 对于半径为 r_3 的轨头近表面横向裂纹, 由于该轨头区域曲率较大, 对声波产生的散射非常严重, 用平曲面楔块对该区域内的横向裂纹或气孔等缺陷进行检测时无明显回波信号, 并有许多杂波信号的干扰, 故采用斜曲面楔块对其进行检测的方法, 如图2所示。

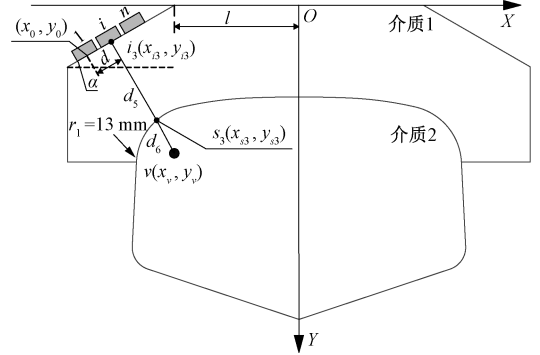


图2 斜曲面楔块耦合轨头延迟时间计算原理

Fig. 2 The calculation principle of the delay time of the inclined surface wedge coupling rail head

假设第1个阵元中心坐标为 (x_0, y_0) :

$$x_0 = \frac{y_0}{\tan \alpha} - l \quad (5)$$

式中: α 为斜曲面楔块的斜面偏转角度; l 为斜曲面楔块平面水平长度的一半。

$$\begin{cases} x_{i3} = x_0 + (i_3 - 1)d \cos \alpha \\ y_{i3} = y_0 + (i_3 - 1)d \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_3 是楔块斜面上的第 i 个阵元。

故第 i_3 个阵元的中心坐标 (x_{i3}, y_{i3}) 由式(5)、(6)可得, 其延迟聚焦法则计算同理式(1)~(4)。

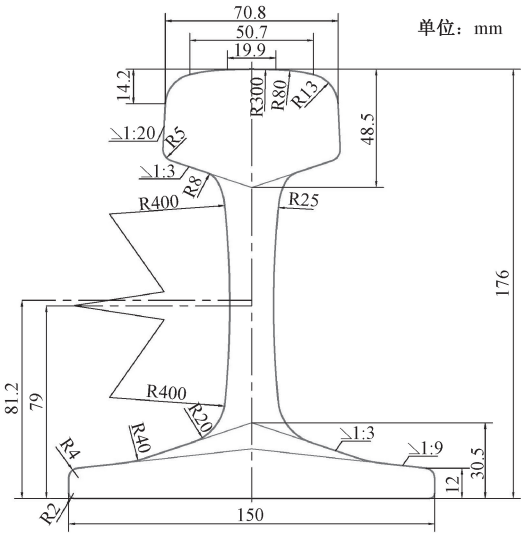
2 相控阵超声检测轨头动态响应仿真

2.1 检测方案的设计

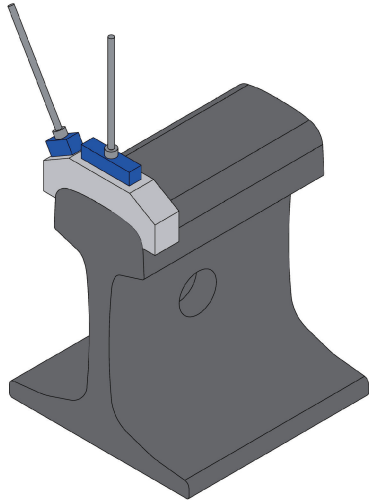
钢轨模型绘制及尺寸标注如图3(a)所示, 以轨头为检测对象, 检测方案如图3(b)所示。检测需满足两个条件: 1) 保证各阵元发射的声束尽量垂直或在一定范围内入射到轨头表面区域内, 避免过大入射角导致的能量损失; 2) 保证各阵元发射的声束能够覆盖大部分的轨头, 实现对轨头不同类型及位置的缺陷检测。

2.2 有限元仿真模型的建立

DGTD^[22] 以其能够更好地拟合曲面结构, 减少阶梯误差被广泛的应用于复杂结构的仿真计算。DGTD还可以对不同材料或区域采用不同尺寸的网格划分, 能有效提高仿真精度, 降低计算资源需求, 使得仿真结果更加准确可靠。钢轨材料为 U71Mn 钢, 楔块材料为聚苯乙烯, 其仿真参数如表1所示。本文主要采用 64 阵元及 5 MHz 频率的线阵换能器, 基于 DGTD 的 COMSOL 有限元仿真软件建立钢轨的弹性波-时域显式动态响应仿真模型, 分析超声波在钢



(a) 60 钢轨截面尺寸
(a) Cross-sectional dimensions of 60 kg/m rail



(b) 钢轨轨头检测方案
(b) Rail head detection plan

图 3 钢轨截面尺寸及轨头检测方案

Fig. 3 Rail cross-sectional dimensions and rail head inspection plan

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	钢轨	楔块	单位
密度	7 840	1 050	kg/m ³
杨氏模量	210×10 ⁹	4. 007 7×10 ⁹	Pa
泊松比	0. 29	0. 32	/
纵波声速	5 925	2 337	m/s
横波声速	3 222	1 202	m/s
纵波波长	1. 185	0. 467 4	mm

轨试样中的传播路径与回波信号。

考虑计算精度和效率,确定楔块的网格尺寸大小为 $\Delta x_1 = \Delta z_1 = 0.271 \text{ mm}$,轨头的网格尺寸为 $\Delta x_2 = \Delta z_2 = 0.269 \text{ mm}$ 。根据 Courant 稳定性条件^[23],二维 DGTD 计

算中的时间步长 Δt 满足式(7):

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_L \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (7)$$

式中: Δt 为时间步长, c_L 为超声波纵波声速, Δx 和 Δz 是网格尺寸。

考虑计算精度和效率,只需满足 Δt 小于钢轨和楔块中的时间步长即可,根据上述条件由式(7)计算确定 Δt 为 $2.5 \times 10^{-3} \mu\text{s}$,以满足稳定性要求,并设置超声波的激励信号为加窗调制的正弦波函数。

2.3 动态响应仿真

建立轨头缺陷 I~IV 的检测仿真模型如图 4 所示。介质 1 为楔块,介质 2 为钢轨的轨头部分,用实心圆点模拟线阵换能器阵元,其轨头缺陷直径均为 1 mm。缺陷深度分别距中心区域上表面 10、20、30 和 40 mm。

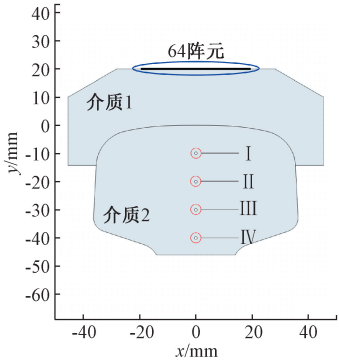


图 4 轨头中心区域缺陷仿真模型

Fig. 4 Simulation model of defects in the central area of the rail head

采用 64 阵元的线阵换能器置于楔块平面对轨头中心区域处的 4 处缺陷进行仿真检测,声束聚焦位置分别为缺陷 I、II、III、IV 处,动态响应仿真结果如图 5 所示,A 型信

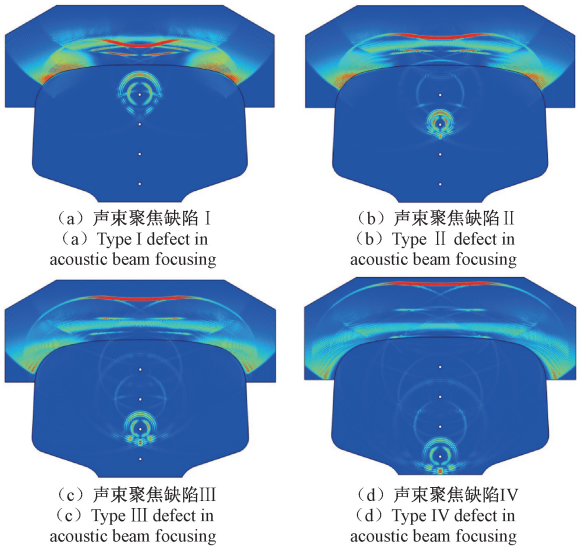
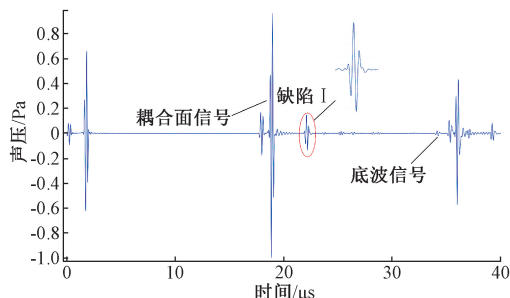


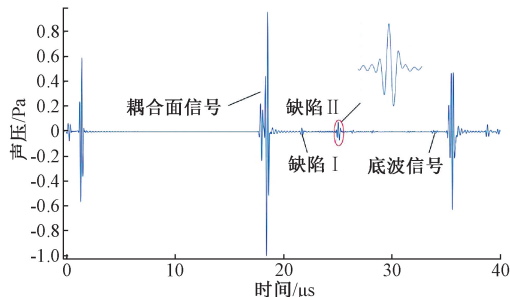
图 5 缺陷 I~IV 的动态响应

Fig. 5 The dynamic responses of defects I~IV

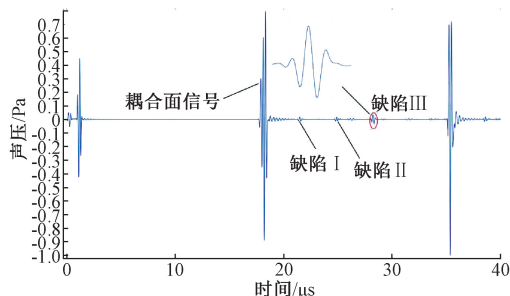
号结果如图6所示,为更好的分析仿真结果,仿真图中声压已做归一化处理。图6(c)和(d)由于超声波在传播过程中遇到多个缺陷损耗大量能量,导致缺陷回波信号大幅降低,并无明显底波信号。



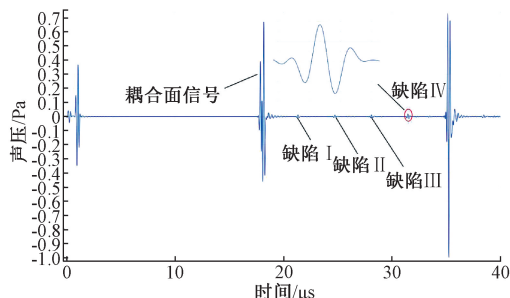
(a) 声束聚焦缺陷 I
(a) Type I defect in acoustic beam focusing



(b) 声束聚焦缺陷 II
(b) Type II defect in acoustic beam focusing



(c) 声束聚焦缺陷 III
(c) Type III defect in acoustic beam focusing



(d) 声束聚焦缺陷 IV
(d) Type IV defect in acoustic beam focusing

图6 缺陷 I~IV 的 A 型信号

Fig. 6 Type A signals of defects I~IV

建立轨头左侧区域缺陷检测仿真模型如图7(a)和(b)所示。其缺陷深度分别距中心区域上表面 12、20 和 30 mm。图7(b)为(a)的对照仿真缺陷检测图,对比线阵

换能器在楔块平面或斜面对缺陷 V~VII 的检测效果。

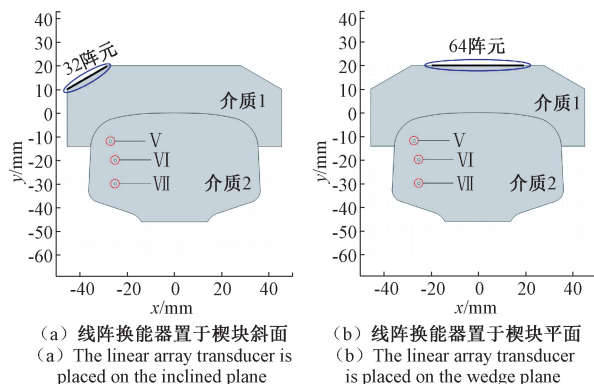


图7 轨头左侧区域缺陷仿真模型

Fig. 7 Simulation model of defects in the left area of the rail head

如图7所示,将线阵换能器置于楔块平面或斜面处,分别采用 64 和 32 阵元对轨头左侧 3 处缺陷进行仿真,声束聚焦位置分别为缺陷 V、VI、VII 处,线阵换能器置于楔块平面的动态响应仿真结果如图8所示,A 型信号仿真结果如图9所示。

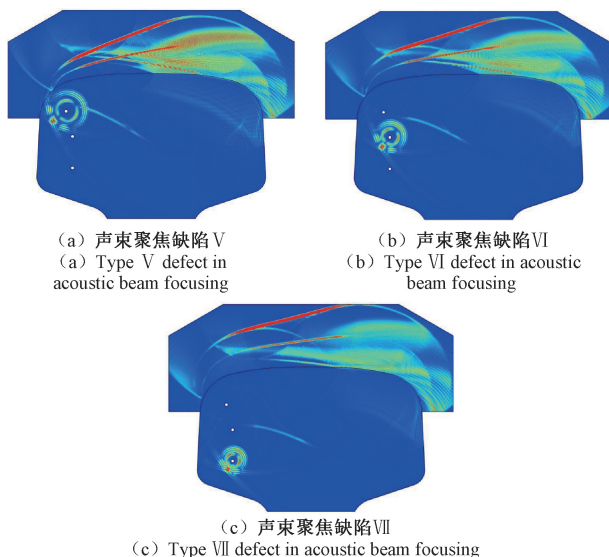


图8 线阵换能器置于楔块平面检测缺陷 V~VII 的动态响应

Fig. 8 The linear array transducer is placed on the wedge plane to detect the dynamic response of defects V~VII

线阵换能器置于斜面的动态响应仿真结果如图10所示,A 型信号仿真结果如图11所示。

通过对比分析图9(a)及图11(a)所示的 A 型信号结果可知,将线阵换能器置于楔块斜面,用 32 个阵元对缺陷 V~VII 进行检测,对近表面缺陷 V 的检测信号无过多干扰信号,可以准确判断缺陷所在位置。如图9所示,将线阵换能器置于楔块平面只能检测出左侧 1 个缺陷。由图11(c)分析可知,将声束聚焦于缺陷 VII,缺陷 V~VII 可以全部检出。采用楔块斜面对缺陷 V~VII 的检测方法,可以避

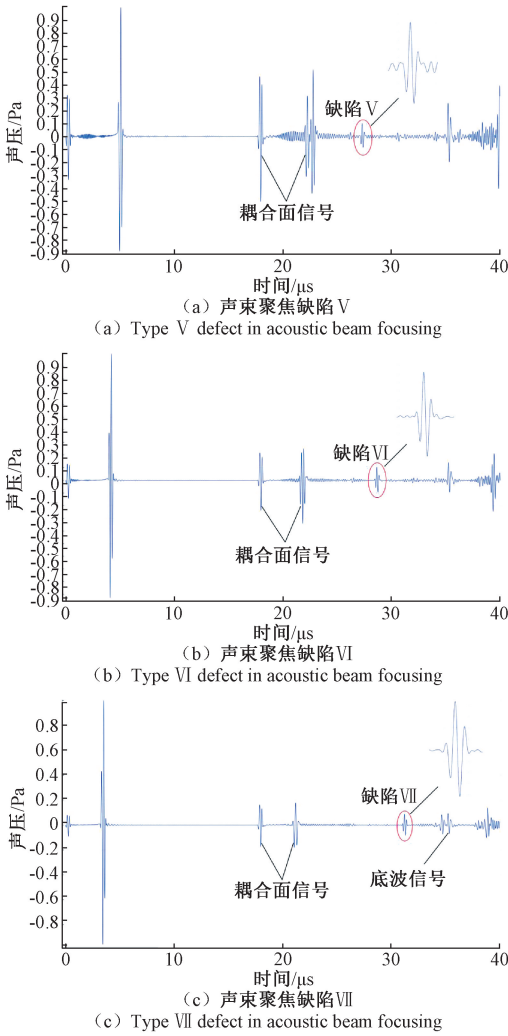


图 9 线阵换能器置于楔块平面时检测缺陷 V~VII 的 A 型信号
Fig. 9 The linear array transducer is placed on the wedge plane to detect the A-type signal of defects V~VII

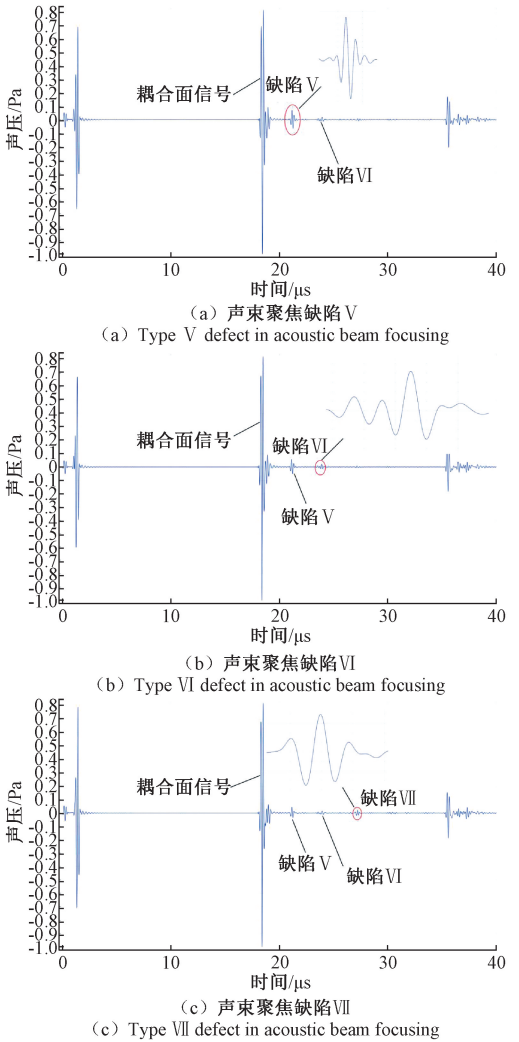


图 11 线阵换能器置于楔块斜面时检测缺陷 V~VII 的 A 型信号
Fig. 11 The linear array transducer is placed on the inclined plane of the wedge to detect the A-type signal of defects V~VII

免声束产生较大偏转角,使声束聚焦时的能量更为集中,相较于楔块平面能实现更好的检测效果。

3 检测实验

3.1 相控阵超声检测实验平台

对上述仿真过程搭建相控阵超声检测实验平台如图 12 所示,实验平台由阵列相控阵超声检测系统、线阵换能器、超声板卡、楔块及钢轨组成。

3.2 实验结果

针对轨头的预埋缺陷进行相控阵超声实验检测,实验检测参数,如楔块和试样的声速、线阵换能器参数、聚焦深度等均与上述仿真模型一致,轨头实际预埋缺陷位置与上述仿真中的缺陷位置一致。将线阵换能器置于楔块平面对轨头缺陷 I~IV 进行 5 次重复检测,提取第 1 次检测的 I、II、III、IV 四个缺陷所在通道的 A 型信号如图 13 所示。为

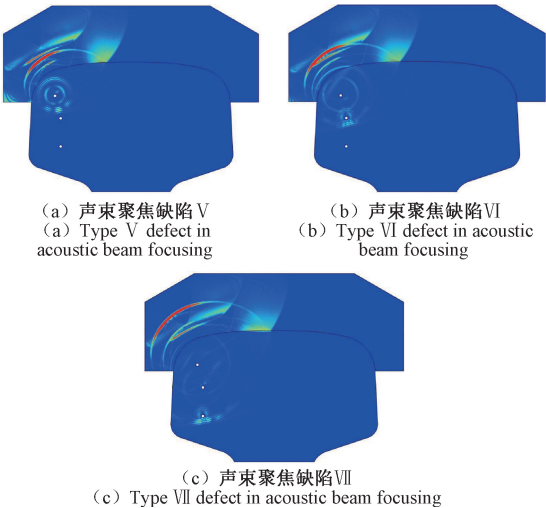


图 10 线阵换能器置于楔块斜面检测缺陷 V~VII 的动态响应
Fig. 10 The linear array transducer is placed on the inclined plane of the wedge to detect the dynamic response of defects V~VII

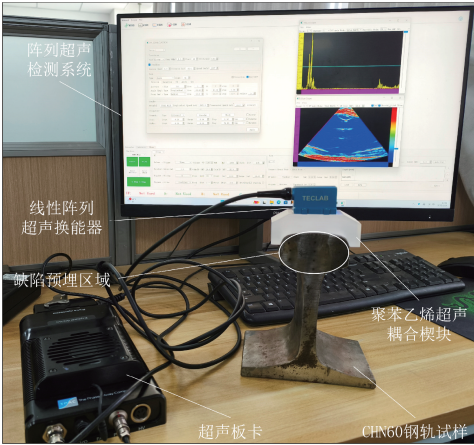
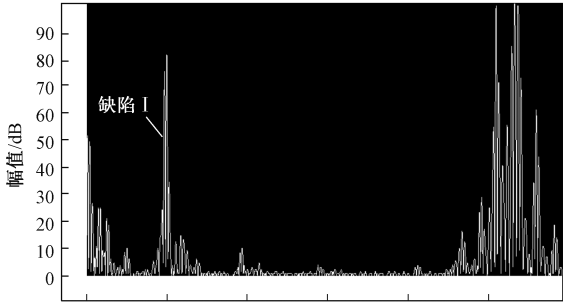
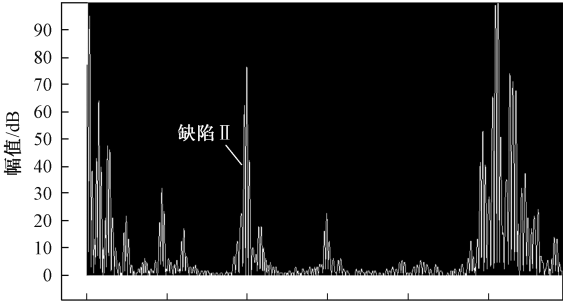


图 12 钢轨相控阵超声检测实验平台

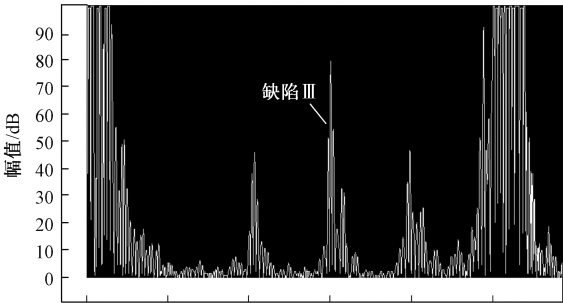
Fig. 12 Phased array ultrasonic testing experimental platform



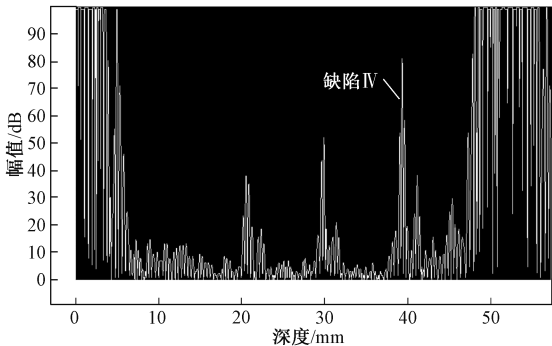
(a) 声束聚焦缺陷 I
(a) Type I defect in acoustic beam focusing



(b) 声束聚焦缺陷 II
(b) Type II defect in acoustic beam focusing



(c) 声束聚焦缺陷 III
(c) Type III defect in acoustic beam focusing



(d) 声束聚焦缺陷 IV
(d) Type IV defect in acoustic beam focusing

图 13 缺陷 I~IV 的 A 型信号

Fig. 13 Type A signals of defects I~IV

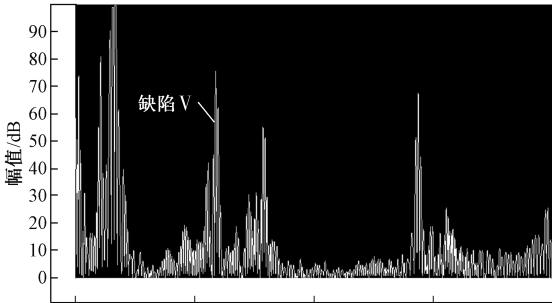
更加直观展现相控阵超声对轨头缺陷 I~VII 的检测能力, 量化相控阵超声检测参数, 引入衡量有效回波信号强度与背景噪声能量的关键参数信噪比。同时, 为使实验结果更加可靠, 对缺陷 I~VII 进行 5 次重复检测, 得到其平均检测信噪比的结果。由表 2 可得缺陷 I~IV 的平均检测信噪比分别为 22.97、21.25、17.13 和 14.38 dB。

表 2 线阵换能器置于楔块平面对缺陷 I~IV 的 n 次重复实验信噪比结果 ($n=5$)

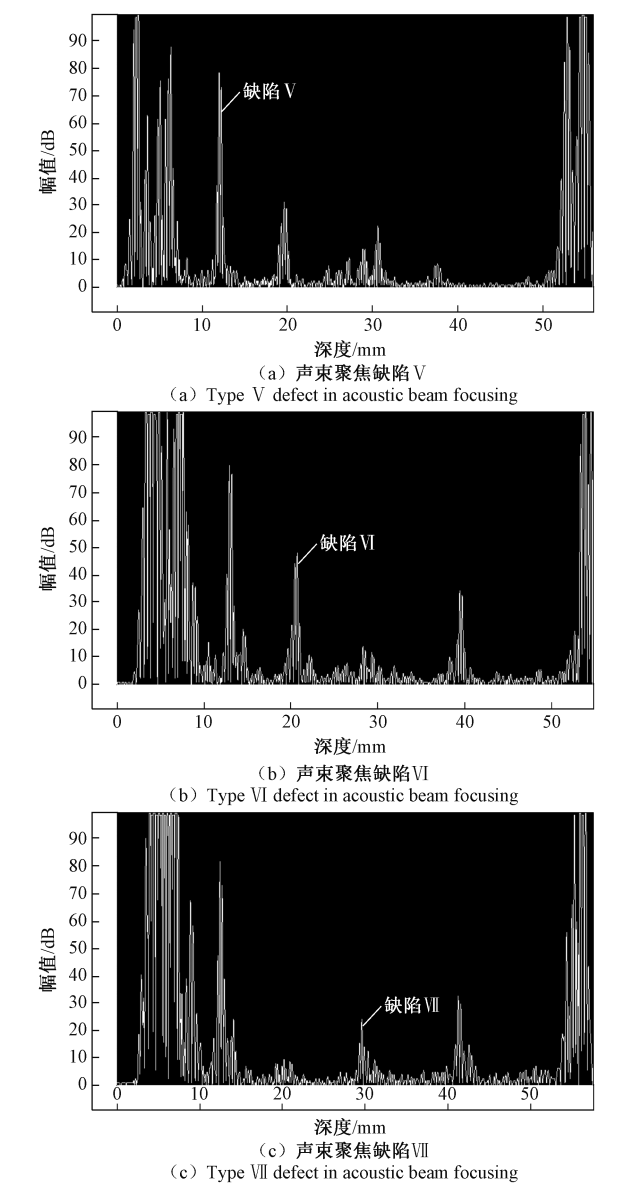
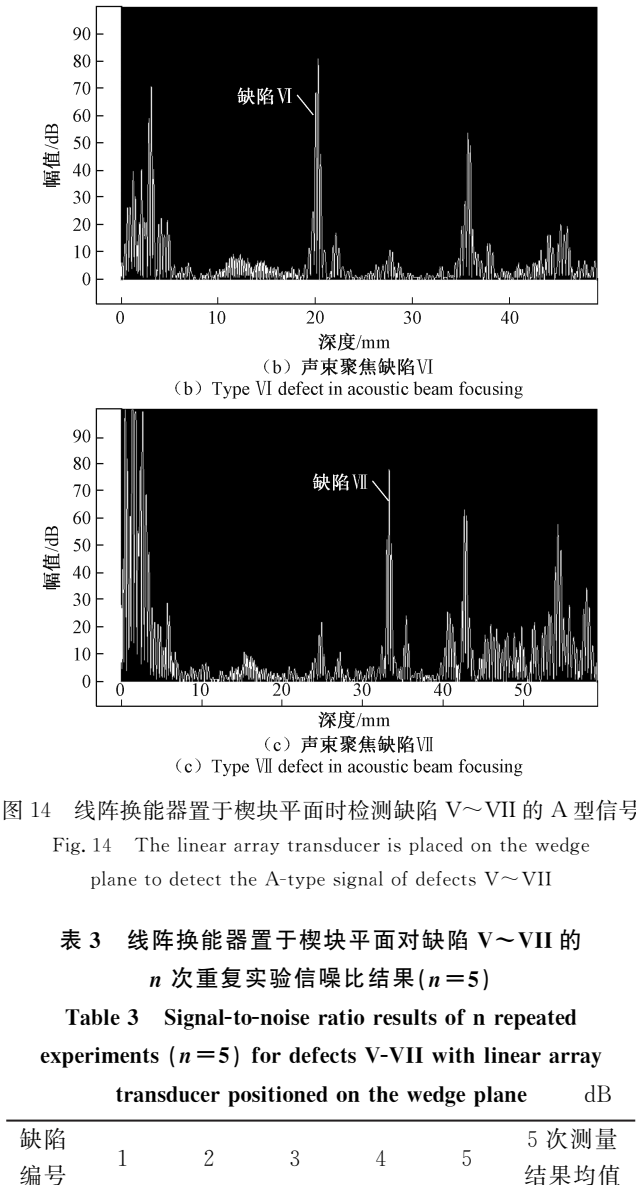
Table 2 Signal-to-noise ratio results of n repeated experiments ($n=5$) for defects I-IV with linear array transducer positioned on the wedge plane

缺陷 编号	1	2	3	4	5	5 次测量 结果均值
I	24.39	21.99	22.23	22.44	23.82	22.97
II	22.26	19.25	21.01	23.29	20.42	21.25
III	17.66	17.10	16.43	17.12	17.33	17.13
IV	14.22	13.72	13.1	15.74	15.12	14.38

将线阵换能器置于楔块平面对轨头缺陷 V~VII 进行 5 次重复检测, 提取第 3 次检测的 V、VII、VI 3 个缺陷所在通道的 A 型信号如图 14 所示。由表 3 可得缺陷 V~VII 的平均检测信噪比分别为 8.81、18.12 和 9.39 dB。



(a) 声束聚焦缺陷 V
(a) Type V defect in acoustic beam focusing



将线阵换能器置于楔块斜面对轨头缺陷 V~VII 进行 5 次重复检测,提取第 1 次检测的 V、VII、VI 3 个缺陷所在通道的 A 型信号如图 15 所示。由表 4 可得缺陷 V~VII 的平均检测信噪比分别为 17.16、10.26 和 11.80 dB。

由上述实验结果可知,对轨头曲率较大区域处的近表面缺陷 V,对比两种不同的检测方式,其平均检测信噪比从 8.81 dB 提升至 17.16 dB,较深处缺陷 VII 的平均检测信噪比从 9.39 dB 提升至 11.80 dB。线阵换能器置于楔块斜面对缺陷 VI 进行检测时,因为声束聚焦过程中经历缺陷 V 消耗大部分能量且检测时使用的阵元数量较少,导致信噪比大幅降低。由图 11 和 15 可知仿真与实验结果保持高度

图 15 线阵换能器置于楔块斜面对检测缺陷 V~VII 的 A 型信号

Fig. 15 The linear array transducer is placed on the inclined plane of the wedge block to detect the A-type signal of defects V~VII

表 4 线阵换能器置于楔块斜面对缺陷 V~VII 的 n 次重复实验信噪比结果 ($n=5$)

Table 4 Signal-to-noise ratio results of n repeated experiments ($n=5$) on defects V-VII with the linear array transducer placed on the inclined plane of the wedge

缺陷编号	1	2	3	4	5	5 次测量结果均值
V	17.18	16.66	17.06	17.55	17.37	17.16
VI	10.58	9.35	10.84	10.09	10.46	10.26
VII	11.73	13.1	11.9	9.61	12.68	11.80

一致,当线阵换能器置于楔块斜面,将声束聚焦缺陷 VII,可以全部检出缺陷 V~VII,无需多次调整聚焦位置,并展现出良好的信噪比优势。

该实验结果为理论及仿真模型的正确性提供了重要的数据支撑,基于本文提出的方法检测时能够覆盖轨头所有区域的缺陷,并能够有效提升其检测信噪比和准确率。

4 结 论

为提高轨头近表面及曲率较大的复杂结构区域的缺陷检测准确率,本研究提出线阵换能器搭配定制曲面楔块对轨头的检测方案作为相控阵超声检测的技术手段,解决了传统无损检测技术的单一性和对轨头近表面区域缺陷检测困难的问题。利用费马原理推导出轨头不同半径下的声束聚焦法则,通过仿真建立相控阵超声对轨头不同缺陷位置的声束传播路径。结合轨头不同位置缺陷的相控阵超声检测实验,验证了理论及仿真的准确性。

综上,本研究提出的方法能有效提升轨头复杂曲面缺陷的识别能力,检测信号的幅值稳定性和信噪比。研究结果为实际应用中检测轨头内部缺陷提供了理论依据与指导,采用线阵换能器搭配曲面楔块检测轨头,可实现多角度扫查且无需多次移动线阵换能器,线阵换能器还具有高灵敏度与分辨率能适应复杂工况,同时能实现自适应检测,有望在将来与自动化设备结合进行高效的智能化超声检测。

参考文献

- [1] 马伯瑞,杨明来,曹振丰. 基于局部平均的钢轨轮廓点云精简方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 205-212.
MA B R, YANG M L, CAO ZH F. The rail profile point cloud simplification method based on local averaging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(2): 205-212.
- [2] 张志宏,张力玲,马婷婷,等. 轨道缺陷无损检测技术研究现状综述[J]. 电子测量技术, 2025, 48(18): 53-72.
ZHANG ZH H, ZHANG L L, MA T T, et al. Review of the current status of non-destructive testing technology for railway track defects [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(18): 53-72.
- [3] 侯博文,乔林川,高亮,等. 钢轨擦伤形成机理、检测与防治综述[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(2): 65-84.
HOU B W, QIAO L CH, GAO L, et al. Review on the formation mechanism, detection and prevention of rail scratches [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(2): 65-84.
- [4] 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.
- [5] 罗晖,章硕生,曾伟,等. 基于改进 Retinex 与双 CNNs

- 的钢轨表面缺陷图像增强算法研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(13): 189-198.
- LUO H, ZHANG SH SH, ZENG W, et al. Research on image enhancement algorithm for rail surface defects based on improved retinex and double CNNs [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(13): 189-198.
- [6] 许溢航,王平,杨元,等. 脉冲压缩在超声导波钢轨断裂检测的应用研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(3): 112-117.
XU Y H, WANG P, YANG Y, et al. Research on the application of pulse compression in ultrasonic guide wave rail fracture detection [J]. Electric Measurement Technology, 2025, 48(3): 112-117.
 - [7] ZHAO Y L, LIU ZH Q, YI D, et al. A review on rail defect detection systems based on wireless sensors [J]. Sensors, 2022, 22(17): 6409.
 - [8] 孙铁强,魏光辉,宋超,等. 基于 YOLO 的多模态钢轨表面缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(21): 72-81.
SUN T Q, WEI G H, SONG CH, et al. Multi-modal rail surface defect detection method based on YOLO [J]. Electric Measurement Technology, 2024, 47(21): 72-81.
 - [9] 杨延强,朱俊臻,冯辅周,等. 涡流脉冲热像对钢轨滚动接触疲劳裂纹表面长度的量化评估研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 144-149.
YANG Y Q, ZHU J ZH, FENG F ZH, et al. Quantitative evaluation research on the surface length of rolling contact fatigue cracks in rails by eddy current pulsethermal imaging [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 144-149.
 - [10] XU P, ZHU C L, ZENG H M, et al. Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system [J]. Measurement, 2020, 166: 108152.
 - [11] 常至轩,徐鑫涛,武二永,等. 基于超声平面波成像的钢轨螺孔裂纹检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 144-155.
CHANG ZH X, XU X T, WU ER Y, et al. Research on the detection method of rail screw hole cracks based on ultrasonic plane wave imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 144-155.
 - [12] 魏小源,戴晶,井晶,等. NLFM-Barker 编码激励超声导波的钢轨缺陷检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(8): 101-114.
WEI X Y, DAI J, JING J, et al. Research on rail defect detection method of NLFM-Barker encoding excited ultrasonic guided wave [J]. Journal of Electronic

- Measurement and Instrumentation, 2025, 39(8): 101-114.
- [13] 周扬帆, 涂君, 毛轶豪, 等. 用于曲面构件超声相控阵检测的聚焦延时方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 222-230.
- ZHOU Y F, TU J, MAO Y H, et al. Research on focus delay method for ultrasonic phased array inspection of curved surface components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(2): 222-230.
- [14] 朱甜甜, 周正干, 周文彬, 等. 曲面构件阵列超声频域逆时偏移成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 156-165.
- ZHU T T, ZHOU ZH G, ZHOU W B, et al. Research on inverse time-lapse offset imaging method of surface component array in ultrasonic frequency domain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 156-165.
- [15] 康亚轩, 陈俊超, 龚真珍, 等. 面向非规则界面双层介质超声全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 307-315.
- KANG Y X, CHEN J CH, GONG ZH ZH, et al. Fullfocusing ultrasonic imaging of bilayer media for irregular interfaces [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 307-315.
- [16] ZHENG Y, ZHAO X, SONG S J, et al. Beam generating and sound field modeling of flexible phased arrays for inspecting complex geometric components [J]. Wave Motion, 2020, 94: 102494.
- [17] ZHANG J Q, QI H, REN Y T, et al. Acoustic tomography of temperature and velocity fields by using the radial basis function and alternating direction method of multipliers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122660.
- [18] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L 型构件 R 区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 419-425.
- XU N, ZHOU ZH G, LIU W P, et al. Ultrasonic phased array detection method for the R area of L-shaped components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 419-425.
- [19] XIE J S, DING W X, ZOU W, et al. Defect detection inside a rail head by ultrasonic guided waves [J]. Symmetry, 2022, 14(12): 2566.
- [20] 李文涛, 周正干. 一种复杂结构件圆柱面扩散焊缝阵列超声检测方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 1-7.
- LI W T, ZHOU ZH G. An array ultrasonic testing method for cylindrical diffusion welds of complex structural components [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 1-7.
- [21] 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.
- [22] KELLY J F, MARRAS S, ZHAO X F, et al. Linear and nonlinear ultrasound simulations using the discontinuous Galerkin method[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(4): 2438-2448.
- [23] LIU Q Q, ZHAO W S, WANG H, et al. 3-D domain decomposition method with nonconformal meshes for thermoelastic modeling [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 1-5.

作者简介

李文涛(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为智能传感器与无损检测、相控阵超声检测等。

E-mail: liwentao@lut.edu.cn

洪旭龙, 硕士研究生, 主要研究方向为相控阵超声无损检测。

E-mail: 17350511875@163.com