

基于超声波声场分布效应的钢轨轨头缺陷检测研究

薛志强^{1,2}, 许玉德^{1,2}, 王章^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要: 超声波检测是钢轨缺陷检测的主要技术之一, 但近场区复杂的声场干涉效应严重影响了缺陷检测的精度。基于惠更斯积分原理, 构建超声波在钢轨内传播的声场理论模型, 以解决钢轨轨头不同大小、不同深度缺陷的检测难题。通过数值计算分析了不同探头频率和晶片尺寸对声场分布的影响。针对轨头内不同深度(浅层和深层)的缺陷, 开展了试验验证, 重点研究了近场区和远场区对缺陷检测精度的影响。结果表明, 晶片尺寸从 10 mm×10 mm 增加至 20 mm×20 mm 时, 近场区长度从 11.9 mm 增至 51.4 mm; 不同晶片尺寸的探头频率从 1 MHz 增至 4 MHz 时, 近场区长度呈线性增加趋势。在近场区内, 缺陷回波与始波混杂, 难以清晰分辨, 尤其是浅层缺陷受近场干涉影响显著; 而在远场区, 缺陷信号显著分离, 检测精度显著提升, 深层缺陷的辨识度更高。探头频率与晶片尺寸对近场与远场区间界限具有定量影响, 针对钢轨轨头缺陷检测, 合理选择探头频率和晶片尺寸, 可有效提升检测精度。

关键词: 超声波; 钢轨; 超声频率; 晶片尺寸; 声场效应

中图分类号: U216.3

文献标志码: A

Study on Railhead Defect Detection Based on Ultrasonic Near-Field and Far-Field Characteristics

Xue Zhiqiang^{1,2}, Xu Yude^{1,2}, Wang Zhang^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Ultrasonic testing is one of the primary technologies for detecting rail defects. However, the complex sound field interference effects in the near-field zone significantly impact defect detection accuracy. Based on the Huygens integral principle, a theoretical sound field model was constructed to analyze ultrasonic wave propagation within rails, addressing the challenges of detecting defects of varying sizes and depths in rail heads. Numerical calculations were conducted to investigate the influence of different probe frequencies and crystal sizes on sound field distribution. Experimental validation was carried out for defects at varying depths (shallow and deep) within the rail head, focusing on the impact of near-field and far-field zones on detection accuracy. Results showed that as the crystal size increased from 10×10 mm to 20×20 mm, the near-field length extended from 11.9 mm to 51.4 mm. Additionally, the near-field length exhibited a linear increase as probe frequencies rose from 1 MHz to 4 MHz for various crystal sizes. In the near-field zone, defect echoes and initial waves overlapped, making clear discrimination challenging, particularly for shallow defects, which were significantly affected by near-field interference. In contrast, defect signals were distinctly separated in the far-field zone, leading to enhanced detection accuracy and improved identification of deep defects. The probe frequency and crystal size quantitatively influenced the boundary between near-field and far-field zones. For rail head defect detection, selecting appropriate probe frequencies and crystal sizes effectively enhances detection accuracy.

收稿日期: 2024-12-09

基金项目: 朔黄铁路发展有限公司科技项目(SHTL-21-01)

Key words: Ultrasonic waves; Rail; Ultrasonic frequency; Crystal size; Acoustic field effects

随着铁路运输向高速化、重载化方向发展,对钢轨的性能要求也越来越高,为此铁路管理部门提出了较为严格的检测和评价标准^[1-2]。在众多钢轨无损检测技术中,超声波以其高效、无损和成本效益的优点被广泛使用。超声波检测能够深入钢轨内部,对缺陷进行早期识别,是确保铁路安全的关键技术之一^[3-4]。超声波作为一种非接触式的检测手段,具有无损、精准和快速等显著优势。钢轨轨头内部缺陷是超声波检测的主要对象。但轨头浅表层缺陷由于受到近场区声场干涉效应的影响,现有超声波检测技术往往难以有效识别。目前缺陷深度与探头频率、晶片尺寸之间的定量关系尚未明确,导致钢轨内声场分布效应及探头的有效检测区域难以准确界定。使得探头的合理布置与最优检测工艺的选取缺乏理论依据,影响了钢轨缺陷检测精度的进一步提升。

钢轨截面形式特殊,使得轨头内部声场分布更加复杂,对超声波检测的准确性和效率提出了更高的要求。超声波检测技术在钢轨缺陷检测中得到了广泛应用,众多学者针对超声波检测钢轨缺陷开展了理论与应用方面的研究。不同的声场理论模型相继被提出,从惠更斯积分原理到基于曲面特征的优化模型,逐步探索轨头踏面曲率对声场分布及缺陷检测精度的影响^[5-8]。这些研究为提升钢轨缺陷检测的理论和技术水平奠定了重要基础。部分学者采用准蒙特卡罗方法模拟超声换能器产生的波场^[9-10],其高效和高精度的特点,突破了传统波场计算方法在准确性与效率之间的矛盾,为多类型换能器波场建模提供了重要理论支持。在超声波声场效应的研究中,多元高斯光束方法也被广泛应用于表征矩形换能器的辐射声场^[11-15],这不仅拓展了超声波技术在复杂介质和结构中的应用可能性,还为其高精度和定制化的应用奠定了理论与技术基础。同时,通过调整换能器表面的振动速度分布,可显著改善声场的均匀性并减少远场的边瓣效应,这对提高超声成像的清晰度及工业无损检测的精度具有关键作用。此外,研究局部界面曲率效应对超声场的影响^[16],进一步揭示了超声波在具有复杂截面的结构中的传播与反射规律,为精确检测缺陷提供了新的理论方法。基于上述理论,近年来部分学者通过多元高斯声束理论和边界元方法建立钢轨内声场预测模型,在一定程度上预测了钢轨内缺陷的超声响应^[17-19]。这些研究成果显著提高了钢轨缺陷检测的准确性和可靠性。

目前,超声探头有效检测区域的确定多依赖几何光学理论中的声线计算或粗略估计,这种方法在轨头区域的应用中存在显著局限性。导致探头辐射声场与轨头内部实际声场的耦合关系难以量化,从而限制了钢轨轨头内缺陷信号的分辨率和检测精度。尤其是在轨头内的近场区域,声波干涉显著增强,缺陷回波信号易与始波混杂。因此,在钢轨缺陷的超声检测过程中,开展针对钢轨内部声场分布效应的研究,构建精确的声场分布模型,对提高检测精度和可靠性具有关键价值。本文基于惠更斯积分原理,通过数值计算分析探头频率和晶片尺寸对钢轨内声场分布的影响规律。结合试验分析轨头内不同深度缺陷在近场与远场区内的回波信号特征,重点研究不同位置 and 不同大小缺陷的检测效果。通过探究探头参数、几何特性与缺陷响应之间的定量关系,为优化超声波检测技术在复杂结构中的应用提供理论依据和方法路径。

1 钢轨内声场理论模型

1.1 声场理论

基于惠更斯积分原理,描述单个矩形换能器的声场。考虑一个受平面刚性挡扳限制的矩形换能器表面作为声源,换能器在 x - y 平面内振动,并在介质中激发声波。则声压幅度 P_0 在挡板存在的条件下由下式给出^[20]

$$P_0 = \frac{j\rho c}{\lambda} \int_S u \frac{e^{-(\alpha+jk)r}}{r} dS \quad (1)$$

式中：积分作用于完整的辐射表面 S ， $j = \sqrt{-1}$ 且 P_0 为观测点的声压幅度。 ρ 为介质密度， c 为声速； u 为换能器的速度幅值， α 为衰减系数， λ 和 k 分别为波长和波数，而 r 为观测点到振动面元素的距离。通过惠更斯原理，考虑矩形换能器表面微元的声波，对声场进行积分。场中某一点的总压力 P_0 则是来自每个单元的压力之和

$$P_0 = \frac{j\rho c}{\lambda} \sum_{n=1}^M u_n \int_{\Delta A} \frac{e^{-(\alpha+jk)r}}{r} dA \quad (2)$$

式中：辐射源被划分为 M 个面积为 $\Delta A = \Delta h \Delta w$ 的单元，每个单元具有复数形式的表面速度 u_n 。假设声源为矩形结构且受到均匀激发，则所有单元的表面速度 u_n 维持一致性。

为了便于分析，采用坐标 (x_n, y_n) 标识第 n 个单元的中心位置。引入辅助坐标系 (x_0, y_0) ，如图 1 所示。

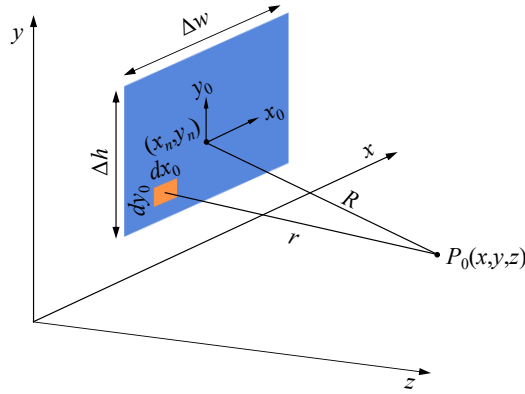


图 1 坐标系和几何方案

Fig.1 Coordinate system and geometry scheme

基于坐标定义，应用到式 (2) 中，可以得到表达式 (3)

$$P_0 = \frac{j\rho c}{\lambda} \sum_{n=1}^M u_n \int_{-\Delta h/2}^{\Delta h/2} \int_{-\Delta w/2}^{\Delta w/2} \frac{e^{-(\alpha+jk)r}}{r} dx_0 dy_0 \quad (3)$$

式中： $r = \sqrt{z^2 + (x - x_n - x_0)^2 + (y - y_n - y_0)^2}$ 。

为适用 Fraunhofer 远场近似，选取较小值的 Δh 和 Δw ，从而保证场点距离显著大于声源尺寸。引入中间变量 $x'_n = x - x_n$ 和 $y'_n = y - y_n$ ，以简化近似。在 Fraunhofer 近似中，要求源点至场点的距离远大于源的尺寸和波长，忽略微小角度变化对相位的影响。这样，声源各元素的辐射贡献几乎相同，其相位差主要由源到场点的距离引起

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{z^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \\ &= \sqrt{z^2 + (x'_n)^2 + (y'_n)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

为应用 Fraunhofer 近似条件，需确保到场点的距离 R 相对于 x_0 和 y_0 来说非常大，即 $R \gg x_0$ 且 $R \gg y_0$ 。因此，式 (3) 中的指数项可以表示为

$$e^{-(\alpha+jk)r} = e^{-(\alpha+jk)\sqrt{z^2 + (x'_n - x_0)^2 + (y'_n - y_0)^2}} = e^{-(\alpha+jk)\sqrt{R^2 - 2x'_n x_0 - 2y'_n y_0 + x_0^2 + y_0^2}} \quad (5)$$

在式 (5) 的右侧, 将根号内的表达式用二项式展开的前两项来表示, 如式 (6) 所示

$$e^{-(\alpha+jk)r} \approx e^{-(\alpha+jk)\sqrt{R^2 - \frac{x'_n x_0}{R} - \frac{y'_n y_0}{R} + \frac{x_0^2}{R} + \frac{y_0^2}{2R}}} \quad (6)$$

当 $kx_0^2/2R + ky_0^2/2R$ 相对于 π 很小时, 且 α 远小于 k 时, 相位误差可以忽略不计, 从而得到如式 (7) 所示的表达式

$$e^{-(\alpha+jk)r} \approx e^{-(\alpha+jk)\left(R - \frac{x'_n x_0}{R} - \frac{y'_n y_0}{R}\right)} \quad (7)$$

根据式 (7), 并假设 $1/r \approx 1/R$, 将其代入到式 (3) 中, 可以得到式 (8) 所示的关系式

$$P_0 = \frac{j\rho c}{\lambda} \sum_{n=1}^M \frac{u_n}{R} e^{-(\alpha+jk)R} \cdot \int_{-\Delta w/2}^{\Delta w/2} e^{j(\alpha+jk)\frac{x'_n x_0}{R}} dx_0 \cdot \int_{-\Delta h/2}^{\Delta h/2} e^{j(\alpha+jk)\frac{y'_n y_0}{R}} dy_0 \quad (8)$$

假设在 $\Delta w/2 > x_0 > -\Delta w/2$ 范围内 $e^{-(\alpha+jk)/R} \approx 1$ 成立, 以及对 y_0 的等效条件, 用于简化式 (8) 中的两个积分至傅里叶变换表达式。对这些表达式进行求解后, 得到式 (9)

$$P_0 = \frac{j\rho c \Delta A}{\lambda} \sum_{n=1}^M \frac{u_n}{R} e^{-(\alpha+jk)R} \cdot \sin c \frac{kx'_n \Delta w}{2R} \cdot \sin c \frac{ky'_n \Delta h}{2R} \quad (9)$$

式 (9) 中的关系是复数项的直接求和, 代表了由矩形源产生的压力, 但仅近似条件适用时有用。式 (9) 的三个假设是 $kx_0^2/2R + ky_0^2/2R$ 相对于 π 很小、 $1/r \approx 1/R$ 及 $e^{-(\alpha+jk)/R} \approx 1$ 。由于 x_0 和 y_0 的最大绝对值分别为 $\Delta w/2$ 和 $\Delta h/2$, 因此这些条件可以表示为

$$\begin{cases} \cos(k\Delta w^2/8R + k\Delta h^2/8R) \approx 1 \\ r/R \approx 1 \\ e^{\alpha(x'_n \Delta w + y'_n \Delta h)/R} \approx 1 \end{cases} \quad (10)$$

这些条件为计算中可使用的 Δw 和 Δh 的尺寸提供了限制。第一个条件限制了 Δw 的大小, 要求 $\pi \gg k\Delta w^2/8R$ 。这个条件可以重写为 $R \gg \Delta w^2/4\lambda$, 等价于要求场点对于尺寸为 Δw 的源处于远场区域。由于 $z < R$, 一个等价条件是 $z \gg \Delta w^2/4\lambda$ 。可以定义一个常数 F , 使得第一个条件由以下关系给出

$$\Delta w \leq \sqrt{\frac{4\lambda z}{F}} \quad (11)$$

式中: 常数 F 为场点距离与源尺寸 Δw 的近场—远场转换距离之比。不等式 (10) 要求源的宽度为 Δw 的整数倍, Δh 也适用类似的关系。通过 (10) 式可以确定 Δw 和 Δh , 以确保以上条件。

1.2 钢轨声场数值模型

铁路工务部门大多采用 2~2.5 MHz 的超声频率进行钢轨探伤作业。不同的超声频率及晶片尺寸会影响声波的透射效率和在钢轨内的传播路径, 这要求对声场分布进行详细分析, 确保检测的准确性。在本研究中, 采取了图 2 所示的研究方案, 考虑探头的频率及晶片的尺寸来进行钢轨内超声波传播的详细描述。

本文之后对晶片尺寸均简称为 10、15 mm 及 20 mm 晶片。

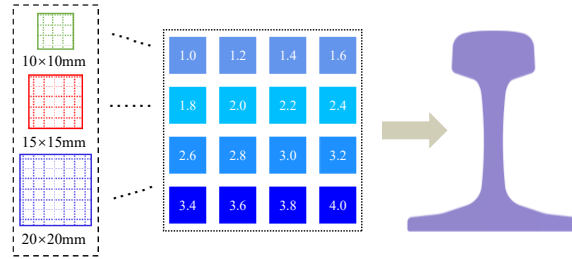


图 2 研究方案

Fig.2 Research program

构建描述超声波在 60 kg/m 的钢轨内传播的数值模型，进行声场的数值计算。结合声场分布，建立钢轨缺陷响应模型和超声波检测系统，用于评估内部缺陷的回声响应。钢轨数值模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 钢轨数值计算模型的主要参数

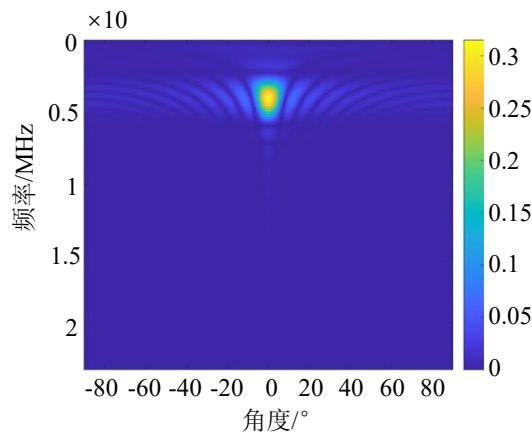
Tab.1 The main parameters of the rail numerical calculation model

材料	符号	单位	数值
杨氏模量	E	GPa	210
泊松比	ν	无量纲	0.3
密度	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850
声速	v	m/s	5 900

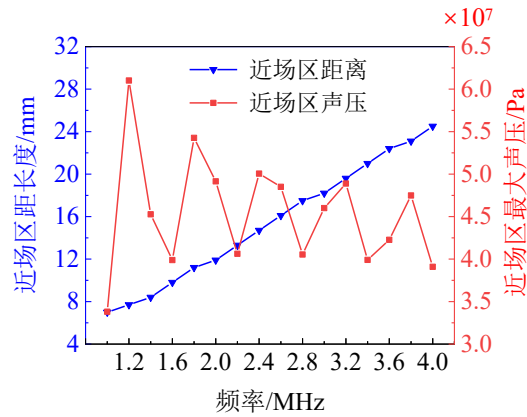
2 声场分布

2.1 探头频率对声场响应的影响

图 3 为 10 mm 晶片声场效应与频率响应图。通过图 3 (a) 可以看到，声压强度随着频率的增加和角度的变化，呈现出明显的对称性。声压的最大值集中在中心区域，尤其是角度接近 0° 的时候，声波在正前方的传播效率最高。随着角度的偏离，声压迅速减小，随着频率的升高，声压在主瓣区域内的集中度增加，但旁瓣的能量减弱。较高频率下，声波的发散角减小，但在较低频率时，声波发散较广。通过图 3 (b) 可以看到，随着频率从 1 MHz 增加到 4 MHz，近场区的长度呈现出明显的上升趋势，频率越高，近场区的距离越长。这是因为频率升高时，声波的波长减小，探头的近场区内干涉效应增强。近场区最大声压随着频率变化呈现出周期性的波动，但整体趋势较为平缓。这样的波动现象是由声波在近场区内的干涉。



(a) 频率与角度的声压分布图

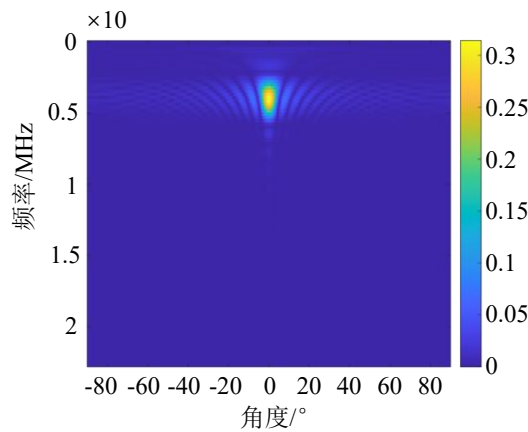


(b) 近场区长度与最大声压随频率变化的关系图

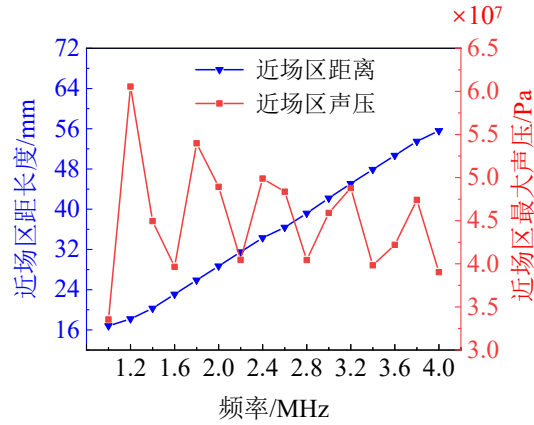
图 3 10 mm 晶片声场效应与频率响应

Fig.3 Sound field characteristics and frequency response of 10 mm transducer

图 4 为 15 mm 晶片声场效应与频率响应。通过图 4 (a) 可以看到, 与 10 mm 晶片相比, 15 mm 晶片的声压强度分布更集中, 尤其在角度为 0° 处, 表现出显著的声压集中现象, 晶片尺寸增加后, 声波的传播在中心角度区域更加集中, 远离中心角度时声压迅速减弱。在 2 MHz 以上的高频率区域, 声压能量在主瓣区域的集中效应比 10 mm 晶片显著。高频下声波辐射的发散角较小, 具有更好的方向性。通过图 4 (b) 可以看到, 随着频率从 1 MHz 增加到 4 MHz, 近场区长度呈现出线性增加的趋势。在 1 MHz 时, 近场区长度为约 17 mm, 4 MHz 时, 近场区长度增加至约 53 mm。与 10 mm 晶片相比, 15 mm 晶片的近场区长度在所有频率段上都较长, 这使其能够在更长的近场范围内保持稳定的信号。近场区声压随频率增加表现出波动性变化, 但总体趋势上, 声压并未随着频率线性增加, 而是在不同频率下出现明显的上下波动。



(a) 频率与角度的声压分布图

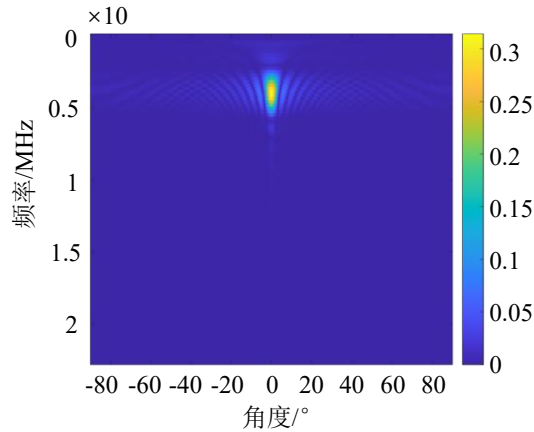


(b) 近场区长度与最大声压随频率变化的关系图

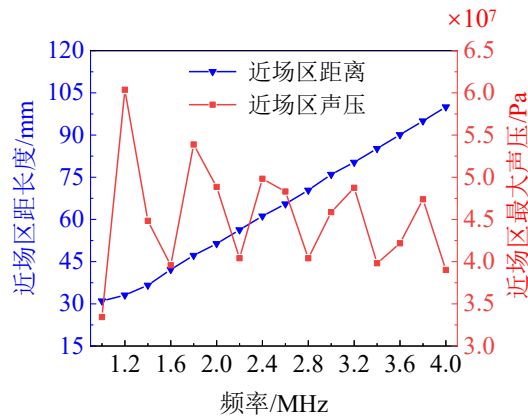
图 4 15 mm 晶片声场效应与频率响应

Fig. 4 Sound field characteristics and frequency response of 15 mm transducer

图 5 为 20 mm 晶片声场效应与频率响应图。通过图 5 (a) 可以看到, 与 10 mm 和 15 mm 晶片相比, 20 mm 晶片的声压强度分布更集中, 尤其在角度接近 0° 时表现出极高的声压强度。随着晶片尺寸的增加, 声波的发散角减小, 能量更多地集中在中心区域。20 mm 晶片具备极强的方向性, 适合定向缺陷检测。随着频率增加, 声压强度在 2 MHz 的高频段时逐渐增强。高频段的集中效应比低频段更为显著, 声波定向性更好, 辐射角度更小。通过图 5 (b) 可以看到, 随着频率从 1 MHz 增加到 4 MHz, 近场区长度呈线性增加的趋势。起始频率 1 MHz 时, 近场区长度为约 30 mm, 到 4 MHz 时, 近场区长度增至超过 100 mm。20 mm 晶片的近场区长度远超过 10 mm 和 15 mm 晶片, 使其在更长的范围内保持稳定的声场分布。声压随频率的变化表现出明显的波动性, 但声压未线性增加。



(a) 频率与角度/散度的声压分布图



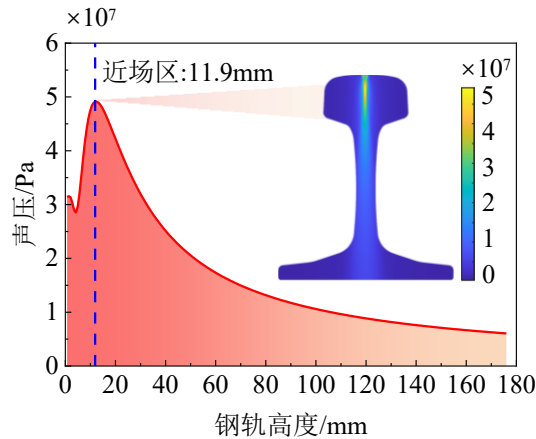
(b) 近场区长度与最大声压随频率变化的关系图

图 5 20 mm 晶片声场效应与频率响应

Fig.5 Sound field characteristics and frequency response of 20 mm transducer

2.2 不同晶片尺寸下的超声波声场分布效应

结合 2 MHz 探头, 对其声场分布效应进行进一步研究。图 6 为 10 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图。通过图 6 (a) 可以看到, 钢轨内声场近场区为 11.9 mm。近场区内声波相干性较强, 声压分布较为复杂, 会出现局部波动。图 6 (a) 中可以看到, 近场区内声压最高, 之后快速减小。11.9 mm 之后, 声压逐渐平稳地衰减, 形成远场区。远场区内, 声波能量扩散, 声压随距离的增加稳定下降。通过图 6 (b) 可以看到声场在空间中的分布, 最高声压集中在中心区域, 声压随着向外扩散逐渐减小, 声压在探头附近形成一个对称的球形分布, 且声压从中心逐渐向外均匀减弱。越靠近中心, 声压越高。



(a) 钢轨内声压分布

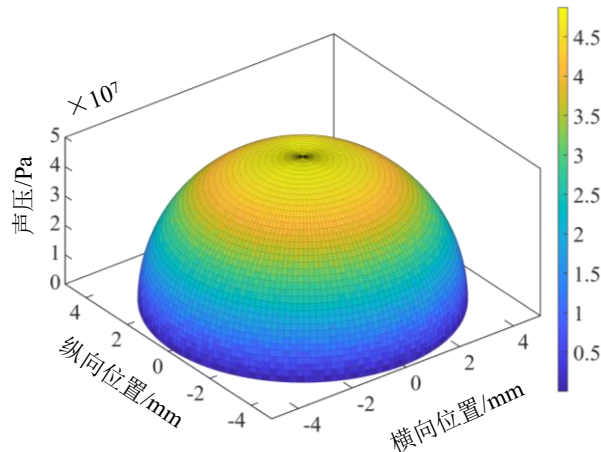


图 6 10 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图

Fig.6 Sound pressure and 3-D sound field distribution inside the rail with a 10 mm transducer element

图 7 为 15 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图。通过图 7 (a) 可以看到, 近场区长度增加至 28.7 mm。增大晶片尺寸使得超声波在探头附近的干涉区域扩大, 从而近场区的长度增长。晶片尺寸增大后, 声波的干涉效应持续时间变长, 这会对超声波检测缺陷的范围和分辨率产生影响。由于近场区较长, 能够在较长的距离内保持较高的声压值, 特别是在近场区和远场区的过渡过程中, 声压衰减较为平缓。这对于声波在材料中的传播会产生显著的影响, 尤其是在缺陷检测时, 能够在更大的范围内保持较高的灵敏度。通过图 7 (b) 可以看到, 15 mm 晶片的三维声场分布图中, 声场的最高声压值略低于 10 mm 晶片的声压峰值。但由于晶片尺寸增大, 声场的覆盖范围更大, 声压的分布更加均匀, 远场区的声压衰减相对更加平缓。

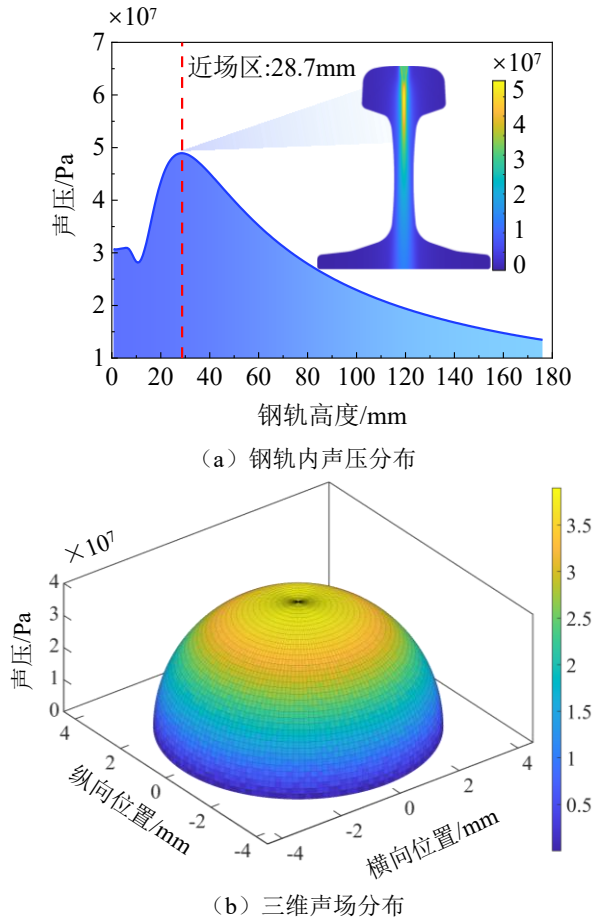


图 7 15 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图

Fig.7 Sound pressure and 3-D sound field distribution inside the rail with a 15 mm transducer element

图 8 为 20 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图。通过图 8 (a) 可以看到, 钢轨内近场区长度增加至 51.4 mm。即晶片尺寸越大, 近场区的长度也相应增加, 近场区的干涉效应范围显著扩大。20 mm 晶片由于探头面积更大, 能量集中度更高, 且覆盖范围更广。通过图 8 (b) 可以看到, 对于 20 mm 晶片, 尽管三维声场中的最大声压值没有显著增加, 但声场的空间覆盖范围进一步扩大, 声压分布更加均匀。即 20 mm 晶片在大面积的声场中能够保持稳定的声压分布, 适用于更大范围的缺陷检测。

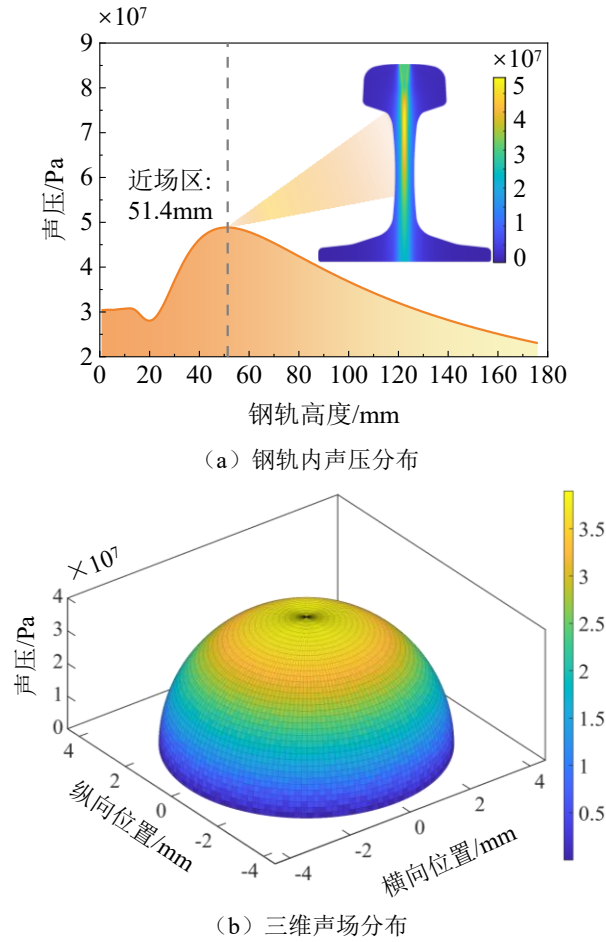


图 8 20 mm 晶片的钢轨内声压及三维声场分布图

Fig.8 Sound pressure and 3-D sound field distribution inside the rail with a 20 mm transducer element

3 缺陷响应的数值计算与试验验证

基于超声波声场分布效应进行超声波检测钢轨内缺陷的数值计算, 研究钢轨内的缺陷响应及回波信号。数值计算中模型参数与前述声场分布效应一致。数值计算中采用 0° 探头作为声源, 并在钢轨截面两端设置吸收边界条件, 以模拟超声波在钢轨内的传播过程。激励信号为 3 周期汉宁窗调制正弦函数。频率选择 2MHz, 激励施加点位于轨面中心处, 激励信号波形如图 9 所示。

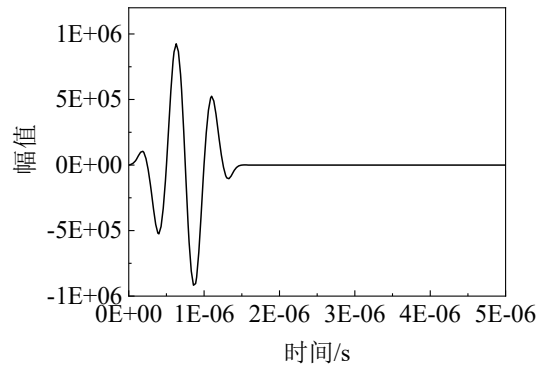


图 9 脉冲形式的激励信号图

Fig.9 Pulse-Type Excitation Signal

同时搭建完整的超声波检测系统以验证钢轨声场计算结果和缺陷响应。在钢轨实际运营环境中, 缺陷检测受多种外部干扰因素的影响, 会对检测精度和可靠性造成影响。本文为了突出探头参数对声场分布和

缺陷信号的影响，试验过程采用了理想化的条件，即在环境温度恒定及钢轨无外部应力或机械振动作用状态下开展试验。钢轨缺陷检测试验系统具体组成如图 10 所示。

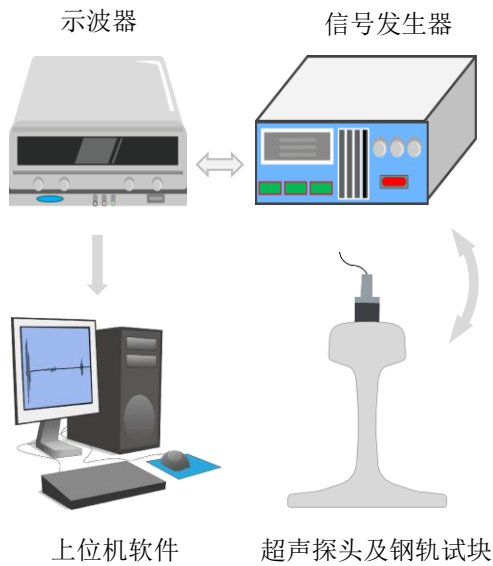


图 10 超声波检测系统

Fig.10 Ultrasonic detection system

系统由钢轨试块、接触式超声波探头、耦合剂、信号发生器、上位机软件及示波器构成。使用的超声波探头为接触式探头，探头晶片尺寸为 10×10 mm，工作频率为 2.0 MHz。选用机油作为耦合剂，以确保探头与钢轨表面之间的良好耦合。使用的 0° 超声波探头，位于轨头与缺陷中心线对齐的位置，确保超声波能够有效穿过轨头并检测到缺陷。

数值计算及试验中均选用标准的 60 kg/m 钢轨作为试块，长度为 90mm。试块上设置直径 2 mm 的平直孔，其在纵向贯通，模拟钢轨轨头缺陷。所含设置缺陷均位于钢轨横截面中心线上，分别距离轨顶面 4 mm、8 mm、12 mm 及 24 mm，如图 11 所示。

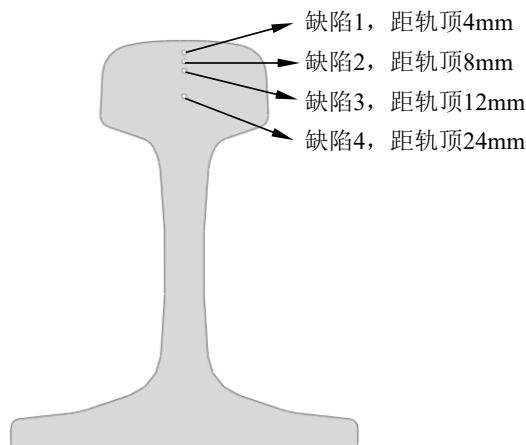
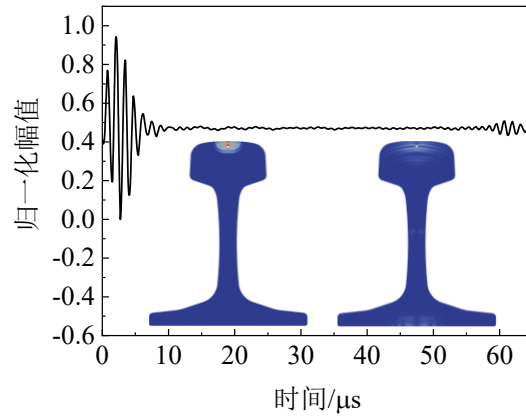


图 11 数值计算及试验中钢轨缺陷的分布

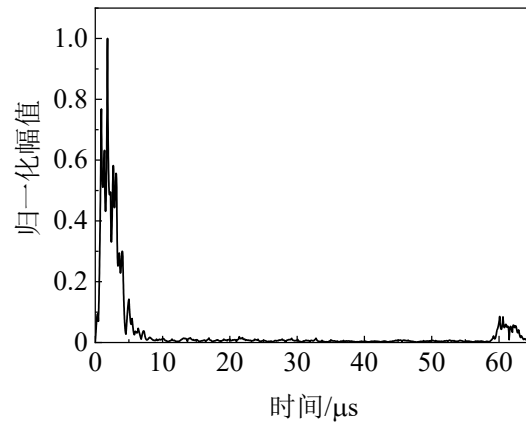
Fig.11 Distribution of Rail Defects in Numerical Calculations and Experiments

图 12 为钢轨顶面下 4 mm 处的缺陷回波信号图。通过图 12 (a) 可以看到，回波信号的幅度变化和复杂的振荡表明缺陷信号很难从其他干扰中分辨出来。特别是在 $6 \mu\text{s}$ 内，信号存在显著的波动，这与近场区内的复杂波动行为相一致。图 12 (b) 的试验数据同样显示了在前 $6 \mu\text{s}$ 时间段内，波形有较大的噪声和复杂性。与数值计算结果类似，试验中近场区的复杂信号验证了在这一区域内难以清晰地识别缺陷信号。可

以看到，在远离近场区后，信号变得相对清晰。



(a) 数值计算结果

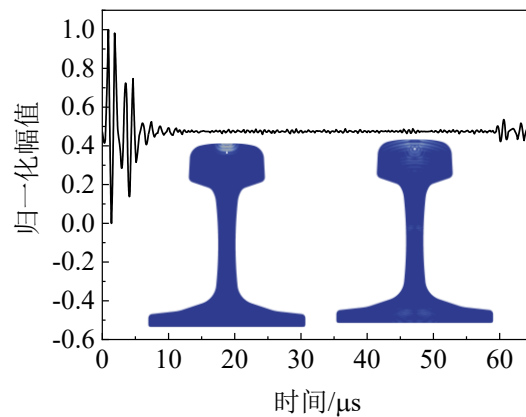


(b) 试验结果

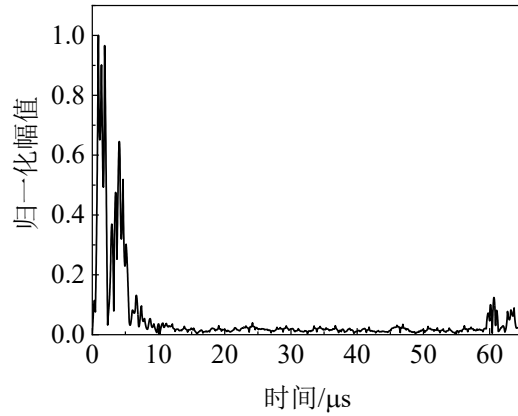
图 12 钢轨顶面下 4 mm 处的缺陷回波信号

Fig.12 Defect echo signal at 4 mm below the top surface of the rail

图 13 为钢轨顶面下 8 mm 处的缺陷回波信号图。通过图 13 (a) 可以看到，信号在前 6 μs 时间段内出现了较大的振幅波动，数值计算结果表明，尽管在该时间段内存在缺陷的影响，但由于近场区的干涉效应，缺陷回波信号并未形成清晰的特征峰值。通过图 13 (b) 的试验数据可知，在接近 5 μs 时出现了较为显著的反射峰，这与数值计算结果中的早期波动相一致。前 6 μs 的时间段内，由于近场区内的多次反射和干涉影响，信号振幅表现出较大的不稳定性。数值计算与试验结果均表明，缺陷回波信号在近场区内难以分辨。这一现象与近场区内超声波波束尚未完全聚焦、信号干涉和反射多次重叠的特点相一致。



(a) 数值计算结果

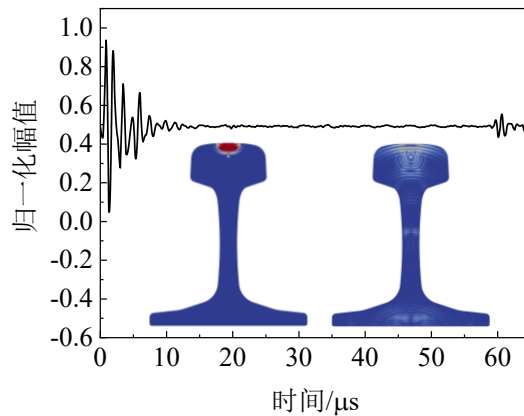


(b) 试验结果

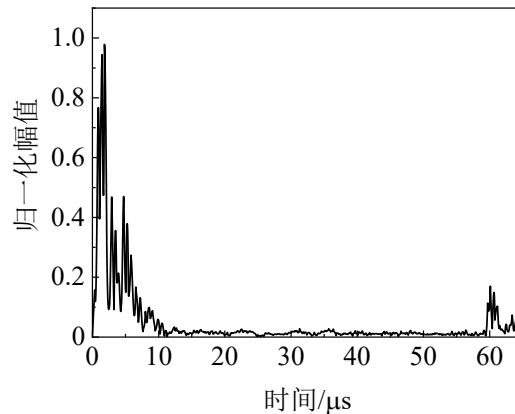
图 13 钢轨顶面下 8 mm 处的缺陷回波信号

Fig.13 Defect echo signal at 8 mm below the top surface of the rail

图 14 为钢轨顶面下 12 mm 处的缺陷回波信号图。通过图 14 (a) 数值计算结果可以看到, 始波在信号的早期阶段存在强烈的振幅变化。缺陷回波信号没有形成独立、清晰的峰值, 说明缺陷回波与始波有较大程度的重叠。因为缺陷回波在时间和振幅上与始波过于接近, 导致其被始波所掩盖, 难以清晰区分。由于数值计算中的理想化假设导致能量分布集中于始波, 使得后续的回波信号未能得到足够的能量反射和增强, 回波信号表现出较为微弱的特征。通过图 14 (b) 可以发现, 与数值计算结果相比, 试验中始波的衰减更快, 使得缺陷回波信号相对清晰。尽管在初期信号仍受到一定的干扰, 但可以明显看到缺陷回波的特征峰。这是由于试验中的钢轨材料衰减效应, 始波的能量在钢轨中迅速衰减, 削弱了其缺陷回波的影响。



(a) 数值计算结果



(b) 试验结果

图 14 钢轨顶面下 12 mm 处的缺陷回波信号

Fig.14 Defect echo signal at 12 mm below the top surface of the rail

图 15 为钢轨顶面下 24 mm 处的缺陷回波信号图。通过图 15 (a) 可以看到, 24 mm 处的缺陷回波信号虽然伴随有一些干扰, 但振幅相对较强, 可以辨识出与缺陷相关的回波信号, 尤其是在后续的波形中更为明显。在图 15 (b) 试验结果中, 始波信号在前 6 μs 的时间段内清晰可见, 并且在 10 μs 左右出现明显的缺陷回波峰值。相比数值计算, 试验中的回波信号更加明确, 始波能量迅速衰减, 使得缺陷回波信号显得更加突出。

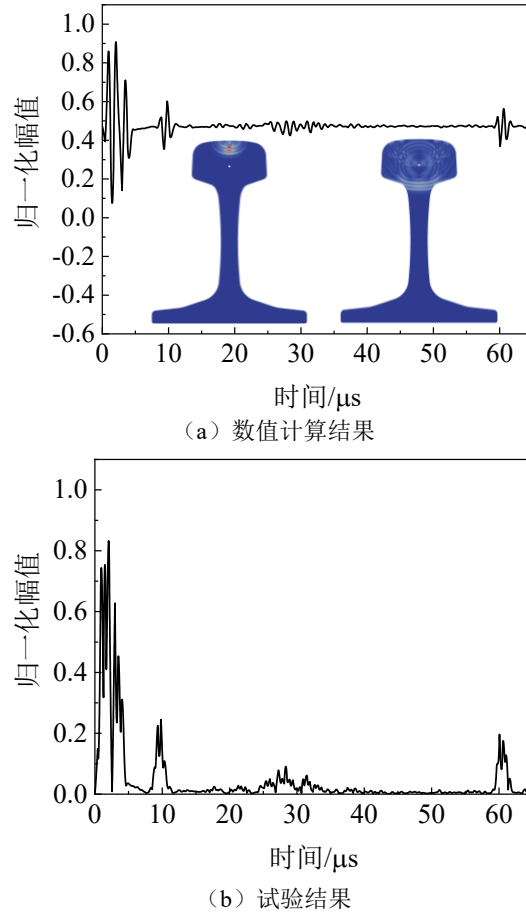


图 15 钢轨顶面下 24 mm 处的缺陷回波信号

Fig.15 Defect echo signal at 24 mm below the top surface of the rail

综上所述, 4 mm 和 8 mm 缺陷均处于近场区内, 近场区声场复杂, 波束尚未聚焦, 回波信号受干涉效应影响较大, 缺陷信号与始波难以区分。12 mm 处的缺陷回波信号较为清晰, 但干扰仍然存在, 缺陷回波的特征峰不如远离近场区的缺陷明显。24 mm 缺陷处于远场区, 信号传播稳定, 波束集中, 缺陷回波信号与始波的分离度有了明显的改善, 回波信号特征明显。

综上所述, 不考虑钢轨温度应力、扣件扣压力及噪声干扰时, 在理想环境下数值计算结果与试验数据在近场区长度、缺陷回波信号特征等方面具有较好的一致性, 验证了所提出理论计算的声场分布效应的准确性。本方法能够有效检测钢轨轨头缺陷, 尤其是在远场区的深层缺陷检测中表现良好。

4 结论

本文重点关注钢轨的轨头缺陷, 研究了探头频率和晶片尺寸对声场分布效应的影响, 以及不同深度的轨头缺陷回波特征。基于数值计算与试验验证, 得出以下主要结论:

(1) 通过建立基于惠更斯积分原理的声场理论模型,对超声波在钢轨内部的声场分布效应进行了数值计算,有效界定了探头的近场与远场检测范围。以此为依据,针对钢轨主要缺陷区域,定量分析了探头频率与晶片尺寸对近场区长度及缺陷回波识别度的影响,为合理选择探头参数与优化检测方案提供了明确的理论参考。

(2) 探头参数对近场区长度的调控作用具有显著的量化特征。探头频率为 2 MHz 时,晶片尺寸由 10 mm 增至 20 mm,近场区长度由约 11.9 mm 增大到 51.4 mm;晶片尺寸为 10 mm 时,频率从 1 MHz 增至 4 MHz,则近场区长度增幅超过一倍。

(3) 数值计算与试验结果在近场区长度及缺陷回波信号的识别特征等方面具有较好地匹配,为声场模型的准确性和适用性提供了验证支撑。对于浅缺陷,高频率及大晶片尺寸的探头易导致近场干涉增强,从而影响缺陷信号分辨,可通过适当降低频率或减小晶片尺寸以缩短近场区并提高识别度;对于深缺陷,较长的近场区对超声波检测影响较小,反而为更高分辨率的远场检测创造条件。远场区,缺陷回波信号与始波有效分离,声波能量的扩散更加均匀,检测精度显著提升。

参考文献

- [1] 胡文博,邱实,许馨月等.基于深度学习的钢轨伤损超声检测与分类[J].铁道学报,2021,43(04):108-116.
HU W B, QIU S, XU X Y, et al. Ultrasonic Detection and Classification for Internal Defect of Rail Based on Deep Learning[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(04):108-116.
- [2] 王雪梅,倪文波,王平.高速铁路轨道无损探伤技术的研究现状和发展趋势[J].无损检测, 2013,35(02):10-17.
WANG X M, NI W B, WANG P. Overview and Future Development of Rails Nondestructive Inspection[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(02): 10-17.
- [3] ZHAO Y L, LIU Z Q, YI D, et al. A review on rail defect detection systems based on wireless sensors[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6409.
- [4] XIONG L H, JING G Q, WANG J R, et al. Detection of rail defects using NDT methods[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4627.
- [5] XU Q, WANG H T. Sound field modeling method and key imaging technology of an ultrasonic phased array: A review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 7962.
- [6] FRANCO E E, ANDRADE M A B, ADAMOWSKI J C, et al. Acoustic beam modeling of ultrasonic transducers and arrays using the impulse response and the discrete representation methods[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2011, 33(4):408-416.
- [7] REN Y, HANEDA Y. Two-dimensional exterior sound field reproduction using two rigid circular loudspeaker arrays[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(4): 2236-2247.
- [8] YUE Y F, MAO X H, ZHANG L. Theoretical study on the acoustic field characteristics of a rectangular transducer for ultrasonic testing[C]//AOPC 2020: Optics Ultra Precision Manufacturing and Testing. SPIE, 2020, 11568: 447-452.
- [9] ZHANG S Z, HUANG Y T, LI X B, et al. Modeling of wave fields generated by ultrasonic transducers using a quasi-Monte Carlo method[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(1):7-15.
- [10] ZHANG S Z, CHENG C H, LI X B, et al. Modeling ultrasonic wave fields using a Quasi-Monte Carlo method: Wave transmission through complicated interfaces[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(2):994-102.
- [11] JIANG X P, HAN H B, JIA J, et al. Theoretical Study on the Characteristics of Sound Field Radiated by a Gaussian Rectangular Transducer[C]//Conference on Applied Optics and Photonics China.2020.
- [12] LELLO D A, PNG M, LAN B. Efficient numerical frameworks for modelling ultrasonic beams propagating across interfaces[J]. arXiv preprint arXiv:2408.06765, 2024.
- [13] LI Xi B, SONG Y F, ARGUELLES A P, et al. Diffuse ultrasonic backscatter using a multi-Gaussian beam model[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(1):195.
- [14] WANG Z, FAN Z C, CHEN X D, et al. Modeling and experimental analysis of roughness effect on ultrasonic nondestructive evaluation of micro-crack[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 1-12.
- [15] DONG M, TIAN H, MA H W, et al. Ultrasonic Water Immersion Nondestructive Testing for Nylon Bars Based on a Multi-Gaussian Beam Model[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2023, 42(2): 53.
- [16] LYU J R, LIU H B, GAO S J, et al. Ultrasonic field analysis with local interface curvature effect based on the multi-Gaussian

beam model[J].Journal of Vibration and Control, 2017, 29(15-16):3679-3691.

- [17] 张书增,李雄兵,杨岳等.钢轨轨头内多元高斯声场模拟及其缺陷响应[J].铁道学报,2014,36(01):76-80.

ZHANG S Z, LI X B, YANG Y, et al.Multi-Gaussian Beam Simulation and Flaw Response for Rail Head[J].Journal of the China Railway Society,2014,36(01):76-80.

- [18] 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 quantitative method of ultrasonic phased array for rail head defects[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018 , 15 (01): 188-195.

- [19] ZAK A, KRAWCZUK M .Assessment of rod behaviour theories used in spectral finite element modelling[J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(11):2099-2113.

- [20] TRREEBY 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.



第一作者: 薛志强 (1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为钢轨无损检测及智能化监测。E-mail: xuezq@etongji.edu.cn。



通信作者: 许玉德 (1965—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为钢轨的智能化修理和城市轨道交通的运营安全评价。E-mail: xuyude@tongji.edu.cn。