

文章编号: 1005-0523(2026)01-0047-10



基于超声波声场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: 针对近场干涉导致轨头近表面的缺陷回波难以识别的问题, 文章基于惠更斯积分建立钢轨内超声声场模型, 结合数值计算与试验研究探头频率与晶片尺寸对声场分布及缺陷回波特征的影响。结果表明: 晶片尺寸由10×10 mm增至20×20 mm时近场区长度由11.9 mm增至51.4 mm; 频率由1 MHz增至4 MHz时近场区长度近似线性增加, 而最大声压整体随频率与晶片尺寸增大而降低。近场区内缺陷回波与始波重叠显著, 钢轨近表面的缺陷辨识困难; 远场区内回波分离度提高, 检测精度明显提升。

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

本文引用格式: 薛志强, 许玉德, 王章. 基于超声波声场效应的钢轨轨头缺陷检测研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 47-56.

Research on Railhead Defect Detection Based on Ultrasonic Acoustic Field Effects

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, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To address the difficulty in identifying echoes from near-surface railhead defects caused by near-field interference, this paper establishes an ultrasonic sound-field model in rails based on the Huygens integral, and combines numerical simulations and experiments to investigate the effects of probe frequency and piezoelectric element size on the sound-field distribution and defect-echo features. The results show that, as the element size increases from 10×10 mm to 20×20 mm, the near-field length increases from 11.9 mm to 51.4 mm; as the frequency increases from 1 MHz to 4 MHz, the near-field length increases approximately linearly, while the peak sound pressure decreases overall with increasing frequency and element size. In the near field, defect echoes overlap significantly with the initial pulse, making near-surface railhead defects difficult to distinguish; in the far field, the echo separation improves and the detection accuracy increases markedly.

Key words: ultrasonic; rail; ultrasonic frequency; element size; acoustic field effect

Citation format: XUE Z Q, XU Y D, WANG Z. Research on railhead defect detection based on ultrasonic acoustic field effects[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 47-56.

收稿日期: 2024-12-09

基金项目: 国能朔黄铁路发展有限责任公司科技项目(SHTL-21-01); 国家重点研发计划(2022YFB2602900)

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,超声波因其高效、无损和经济性好而被广泛使用。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,致使探头的合理布置与检测工艺的优化选择缺乏理论依据,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,重点研究不同位置和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限制矩形换能器表面作为声源,换能器在 xy 平面内振动,并在介质中激发声波^[20]。存在挡板时,声压幅值 P_0 计算式为

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

式中: S 为完整的辐射表面, $j = \sqrt{-1}$; 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; 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,计算式为

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

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。

基于坐标定义,应用到式(2)中,得到表达式为

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

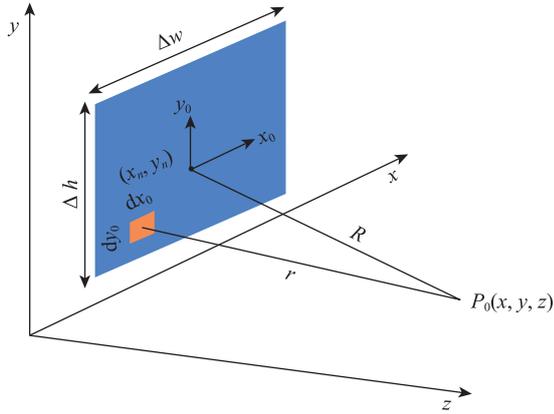


图1 坐标系和几何方案

Fig. 1 Coordinate system and geometry scheme

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,如下

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

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,从而得到如下表达式

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

根据式(7),并假设 $1/r \approx 1/R$,将其代入到式(3)中,得到关系式为

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

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

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

式(9)为复数项的直接求和,用于表征矩形源产生的声压,但仅在近似条件成立时适用。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

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

这些条件为计算中可使用的 Δw 和 Δh 提供了限制。第一个条件限制了 Δw 的大小,要求 $\pi \gg k\Delta w^2/8R$,这个条件可改写为 $R \gg \Delta w^2/4\lambda$ 。由于 $z < R$,相应可取 $z \gg \Delta w^2/4\lambda$ 。据此定义常数 F ,得到

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

式中:常数 F 表示场点距离与源尺寸 Δw 的近场—远场转换距离之比。 Δh 也适用类似的关系。

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。下文中将晶片尺寸简称为10、15 mm及20 mm晶片。

构建描述超声波在60 kg/m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。

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,声压强度随频率与角度变化呈明显对称分布,最大声压集中于主瓣中心,且在 0° 附近传播效率最高,偏离主轴后声压快速衰减。随着

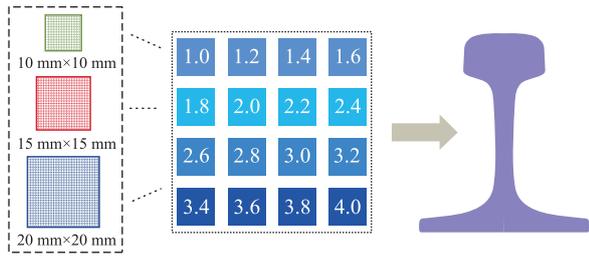


图2 研究方案

Fig. 2 Research program

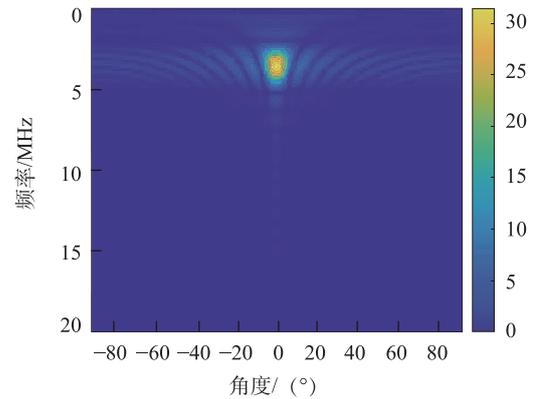
表1 钢轨数值计算模型的主要参数

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

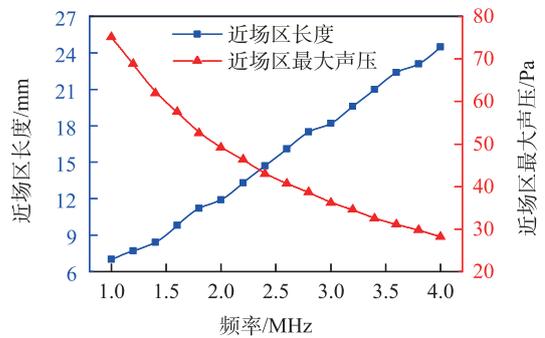
参数	数值
杨氏模量 E / GPa	210
泊松比 ν	0.3
密度 ρ / (kg/m^3)	7 850

频率升高,主瓣能量更集中、发散角减小,同时旁瓣能量减弱;低频条件下声束发散更明显。通过图3(b)可见,频率由1 MHz增至4 MHz时,近场区长度显著增加。近场区最大声压随着频率的增大,呈现近似线性减小的趋势。

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,0°方向主瓣声压峰值更突出,偏离主轴后声压衰减更快;在2 MHz以上,高频段主瓣能量集中效应更显著,声束发散角更小,方向性更强。由图4(b)可见,频率由1 MHz增至4 MHz时,近场区长度近似线性增长,约由17 mm增



(a) 频率与角度的声压分布图

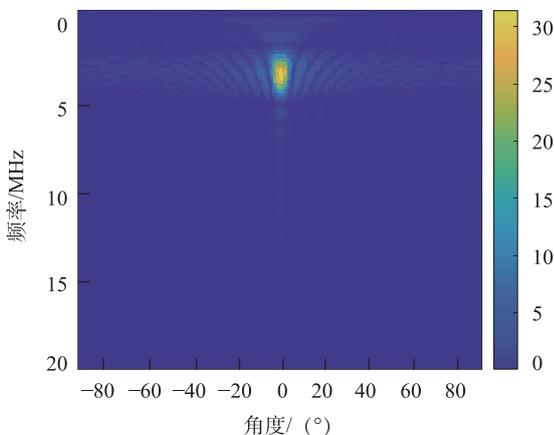


(b) 近场区长度与最大声压随频率变化的关系图

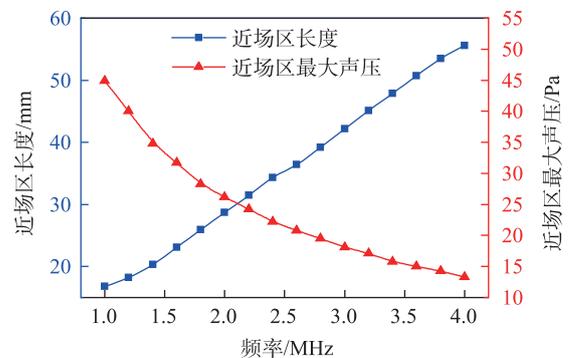
图3 10 mm晶片声场效应与频率响应

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

加至53 mm。与10 mm晶片相比,15 mm晶片在各频率下近场区均更长,可在更大近场范围内维持相对稳定的信号;同时,近场区最大声压随频率升高仍呈近似线性降低趋势。



(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

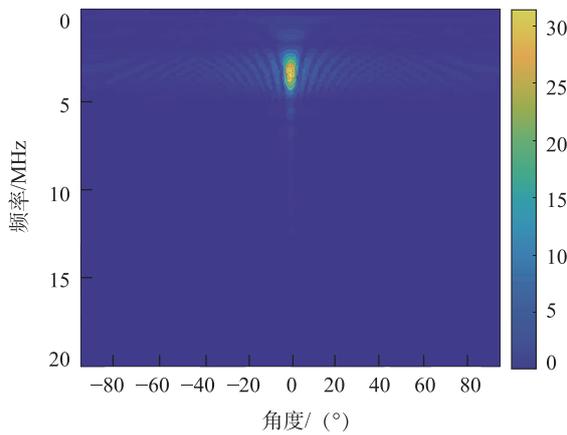
图5为20 mm晶片声场效应与频率响应图。通过图5(a)可以看到,与10 mm和15 mm晶片相比,20 mm晶片的声压强度分布更集中,0°附近声压峰值显著增大。晶片尺寸增大使声束发散角进一步减小,能量更多聚集于主瓣中心,方向性更强,适用于定向缺陷检测。随着频率升高,尤其在2 MHz以上,高频段主瓣集中效应更明显,声束辐射角更小、定向性更佳。由图5(b)可见,频率由1 MHz增至4 MHz时,近场区长度近似线性增长,约由30 mm增加至100 mm以上;其近场区长度明显大于10 mm与15 mm晶片,可在更长范围内保持相对稳定的声场分布。声压随频率的增大,逐渐减小。

2.2 不同晶片尺寸下的超声波声场分布效应

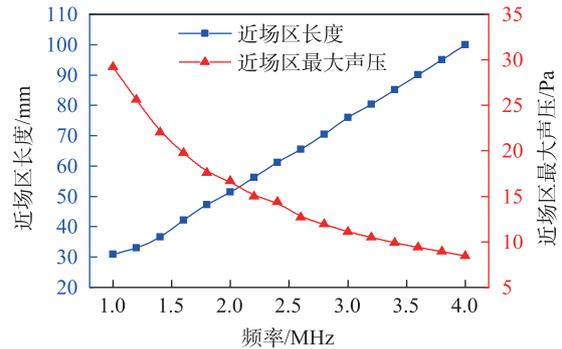
结合2 MHz探头,对其声场分布效应进行进一

步研究。图6为10 mm晶片的钢轨内声压及三维声场分布。由图6(a)可见,钢轨内近场区长度约为11.9 mm;近场内相干干涉显著,声压分布较为复杂并伴随局部波动,且近场区声压达到最大后迅速衰减。超过11.9 mm后进入远场区,声压衰减趋于平稳,能量逐渐扩散,声压随传播距离增加呈稳定下降趋势。由图6(b)可见,三维声场以中心轴为对称,最大声压集中于中心区域,并向外径向扩散逐步减弱;探头附近声压整体呈近似球形分布,且由中心向外均匀衰减。

图7为15 mm晶片的钢轨内声压及三维声场分布。由图7(a)可见,近场区长度增加至28.7 mm。晶片尺寸增大使探头附近的干涉区域扩大,近场干涉效应持续更长,从而延长近场区并影响缺陷检测



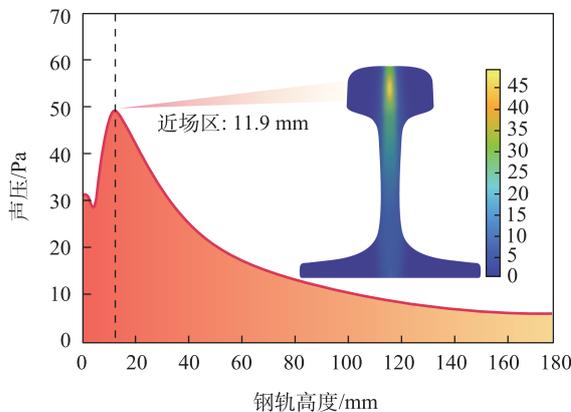
(a) 频率与角度的声压分布图



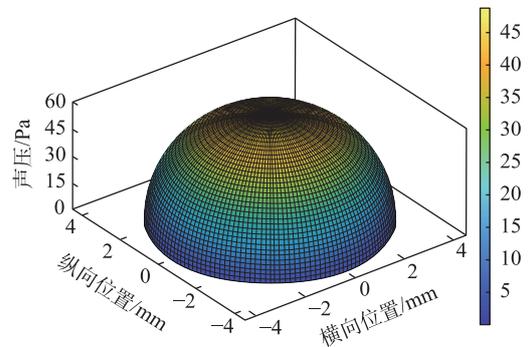
(b) 近场区长度与最大声压随频率变化的关系图

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



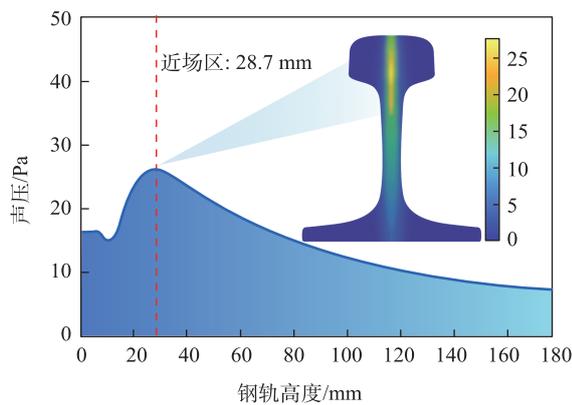
(a) 钢轨内声压分布



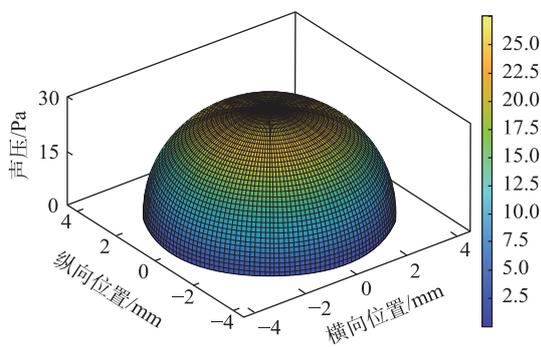
(b) 三维声场分布

图6 10 mm晶片尺寸下的钢轨内声压及三维声场分布

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



(a) 钢轨内声压分布



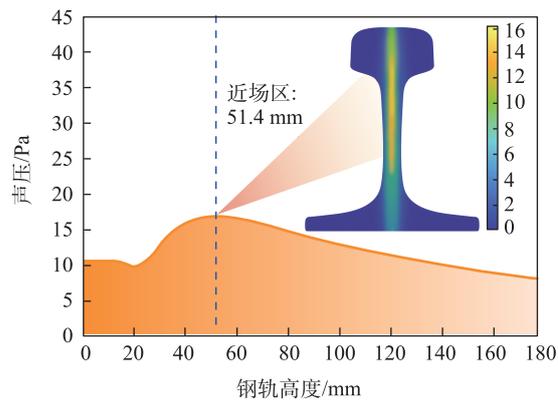
(b) 三维声场分布

图7 15 mm晶片尺寸下的钢轨内声压及三维声场分布

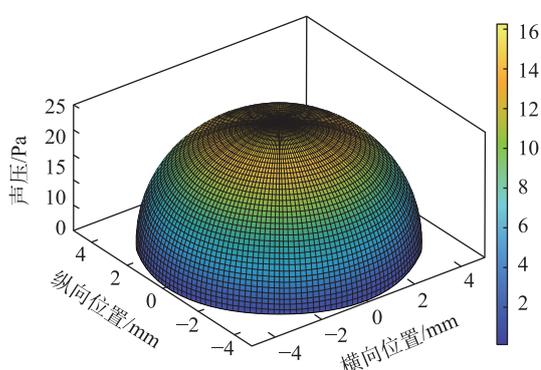
Fig. 7 Sound pressure and 3D sound field distribution inside the rail with 15 mm transducer element

的有效作用范围与分辨特性。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。由图7(b)可见,15 mm晶片的峰值声压低于10 mm晶片,但其声场覆盖范围更大、声压分布更均匀,且远场区声压衰减相对更为平缓。

图8为20 mm晶片的钢轨内声压及三维声场分布。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,三维声场中的最大声压值相较于10 mm和15 mm的晶片,有显著的减小。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。



(a) 钢轨内声压分布



(b) 三维声场分布

图8 20 mm晶片尺寸下的钢轨内声压及三维声场分布

Fig. 8 Sound pressure and 3D sound field distribution inside the rail with 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2 MHz,激励施加点位于轨面中心处,激励信号波形如图9所示。

同时,为验证钢轨声场计算结果与缺陷响应特征,搭建完整的超声检测实验系统。考虑实际运营环境中外部干扰因素较多,易影响检测精度与可靠性,为突出探头参数对声场分布及缺陷信号的作用规律,试验在理想化条件下进行,即环境温度恒定且钢轨不受外部应力与机械振动影响。实验系统的具体组成如图10所示。

系统由钢轨试块、接触式超声波探头、耦合剂、信

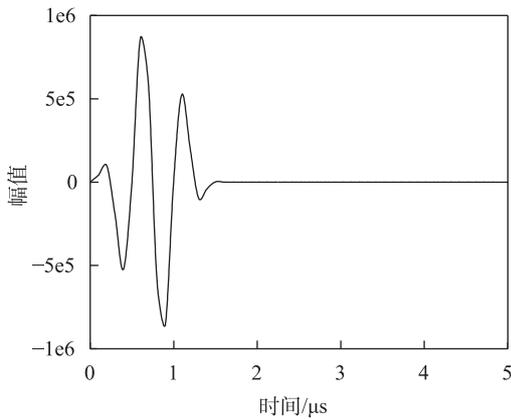


图9 脉冲形式的激励信号图
Fig. 9 Pulse-type excitation signal

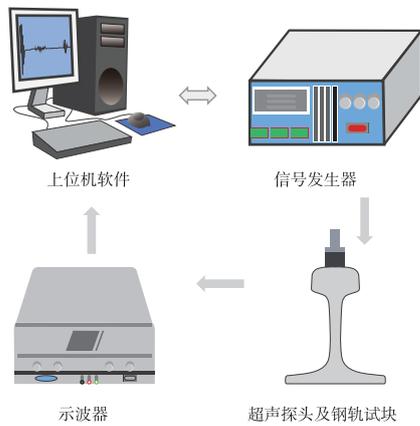


图10 超声波检测系统
Fig. 10 Ultrasonic detection system

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 mm×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地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90 mm。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。所有预设缺陷均位于钢轨横截面中心线上,分别距离轨顶面4、8、12 mm及24 mm,如图11所示。

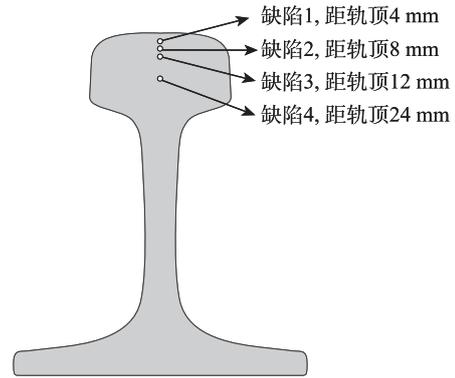


图11 数值计算及试验中钢轨缺陷的分布
Fig. 11 Distribution of rail defects in numerical calculations and experiments

图12为轨顶下4 mm处的缺陷回波信号图。由图12(a)可见,回波幅值变化大且伴随复杂振荡,缺陷特征很难从干扰中分辨出来。尤其在前6 μs内波形波动显著,这与近场区内的复杂波动行为相一致。图12(b)的试验结果同样表明,前6 μs噪声较强、波形紊乱,而在远离近场区后信号逐渐清晰,缺陷回波

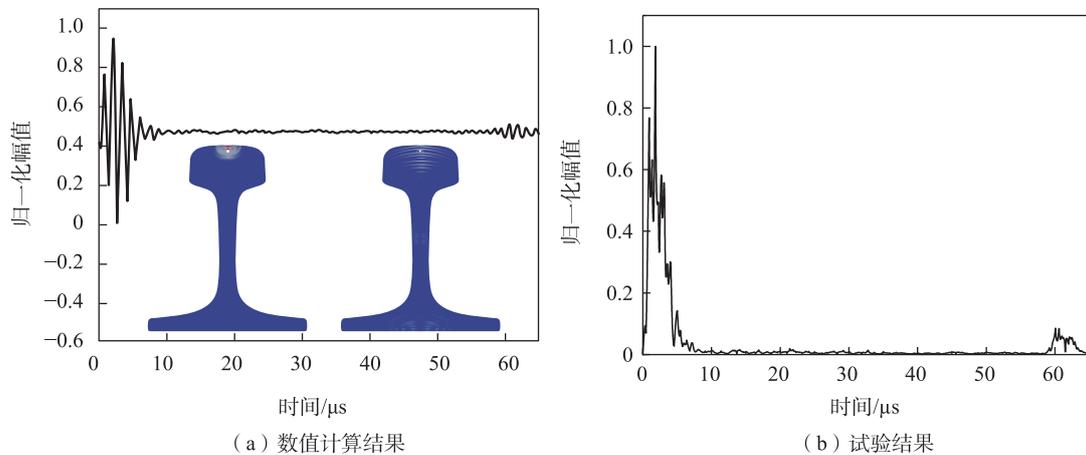


图12 轨顶下4 mm处的缺陷回波信号
Fig. 12 Defect echo signal at 4 mm below the top surface of the rail

的可辨识度提高。

图13为轨顶下8 mm处的缺陷回波信号图。由图13(a)可见,前6 μs 内仍出现较大振幅波动,数值结果表明缺陷虽已产生响应,但受近场干涉影响,未形成清晰稳定的特征峰。由图13(b)可见,约在5 μs 处出现较明显的反射峰,与数值计算中的早期波动相对应。综合数值计算与试验结果,近场区内多次反射与干涉叠加使信号振幅不稳定,缺陷回波难以分辨;该现象与近场区声束尚未充分聚焦、反射信号重叠显著的声场特性一致。

图14为轨顶下12 mm处的缺陷回波信号图。由图14(a)可见,信号早期始波振幅变化强烈,缺陷回波未形成独立清晰的峰值,表明其在时间与幅值上与始波高度重叠,易被始波掩盖而难以区分。同时,数值计算采用理想化假设使能量更集中于始

波,导致后续回波反射与增强不足,缺陷回波特征相对较弱。由图14(b)可见,试验中始波衰减更快,使缺陷回波相对更为清晰,尽管早期仍存在一定干扰,但可辨识的特征峰已出现;其原因在始波能量在钢轨中更快衰减,从而减弱了对缺陷回波的影响。

图15为轨顶下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。

综上,4 mm与8 mm缺陷均位于近场区。由于

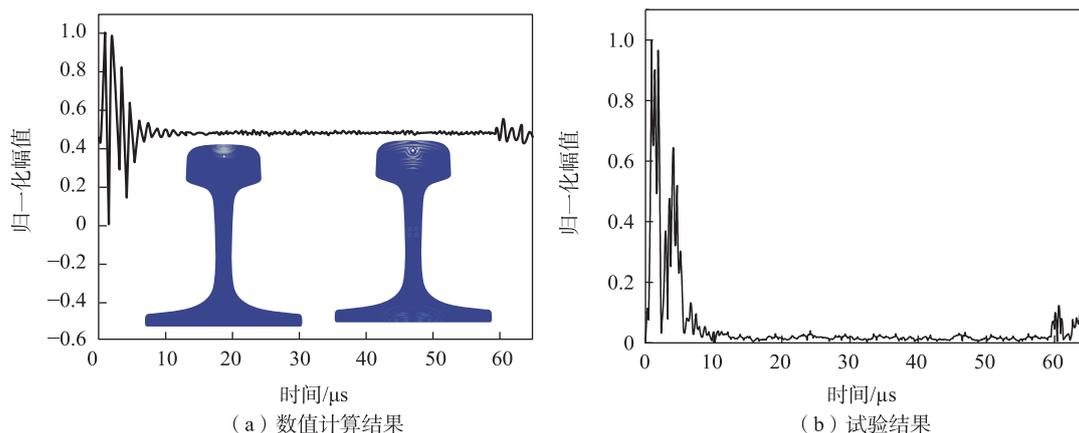


图13 轨顶下8 mm处的缺陷回波信号

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

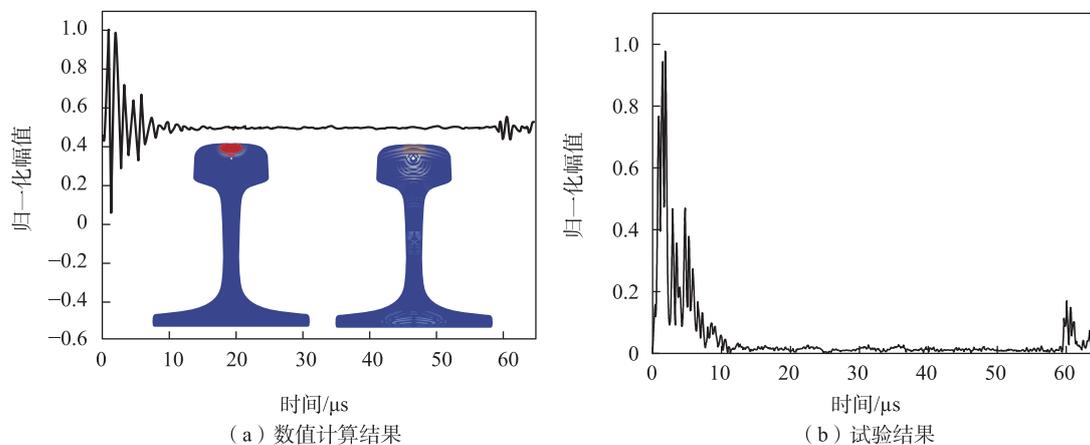


图14 轨顶下12 mm处的缺陷回波信号

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

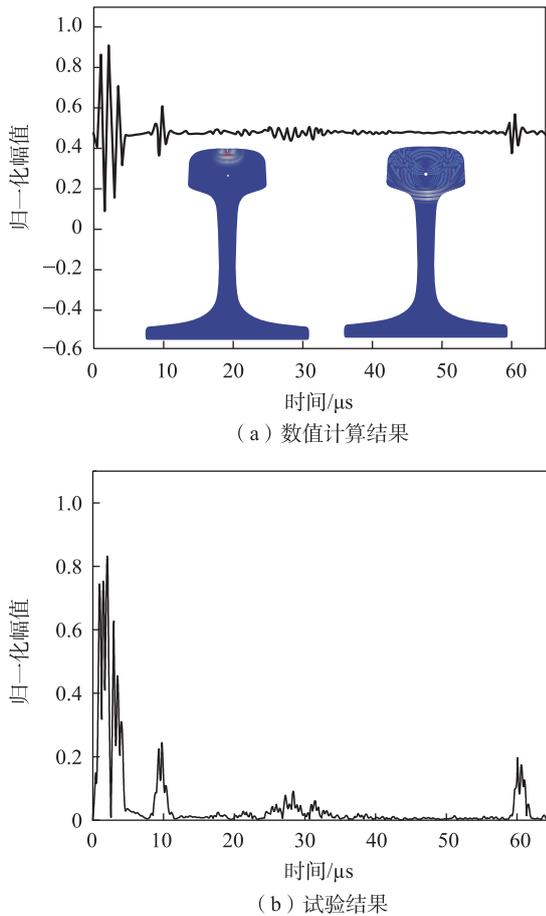


图15 轨顶下24 mm处的缺陷回波信号

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

近场声场分布复杂、波束尚未充分聚焦,回波信号受干涉效应影响显著,缺陷回波与始波高度重叠,难以有效分辨。12 mm处缺陷回波相对清晰,但仍存在一定干扰,其特征峰清晰度低于远离近场区时的缺陷响应。24 mm缺陷位于远场区,声场传播更稳定且波束更集中,缺陷回波与始波的分离度明显提高,回波特征更为突出。

在不考虑钢轨温度应力、扣件扣压力及环境噪声等因素的理想条件下,数值计算与试验结果在近场区长度及缺陷回波特征等方面表现出较好一致性,从而验证了本文声场分布效应理论计算的有效性和准确性。该方法可实现轨头缺陷的有效检测,且在远场区缺陷识别方面具有较好的适用性。

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识别特征方面匹配良好,为声场模型的准确性提供了验证依据。对于靠近轨顶的浅缺陷,高频率与大晶片尺寸易增强近场干涉、降低缺陷回波可分辨性,可通过适当降低频率或减小晶片尺寸缩短近场区,从而提升识别效果;对于远离轨顶的深缺陷,近场效应影响较弱,更有利于发挥远场检测的分辨优势。在远场区,缺陷回波与始波分离度提高,声场传播更稳定且能量分布更均匀,检测精度相应提升。

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(4):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(4): 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(2):10-17.
WANG X M, NI W B, WANG P. Overview and future development of rails nondestructive inspection[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(2): 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.
- [8] YUE Y F, MAO X H, ZHANG L. Theoretical study on the acoustic field characteristics of a rectangular transducer for ultrasonic testing[C]// Beijing: Optics Ultra Precision Manufacturing and Testing, 2020: 85.
- [9] ZHANG S Z, HUANG Y, LI X B, et al. Modeling of wave fields generated by ultrasonic transducers using a quasi-Monte Carlo method[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(1): 7.
- [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]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(2): 994-1002.
- [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]//SPIE. AOPC 2020: Optics Ultra Precision Manufacturing and Testing. Beijing: SPIE, 2020, 11568: 426-432.
- [12] LELL O D A, PNG M, LAN B. Efficient numerical frameworks for modelling ultrasonic beams propagating across interfaces[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025: 119321.
- [13] LI X B, SONG Y F, ARGUELLES A P, et al. Diffuse ultrasonic backscatter using a multi-Gaussian beam model [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(1): 195-205.
- [14] WANG Z, FAN Z C, CHEN X D, et al. Modeling and experimental analysis of roughness effect on ultrasonic non-destructive evaluation of micro-crack[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 114.
- [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, 2023, 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(1): 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(1): 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(1): 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(1): 188-195.
- [19] ŽAK A, KRAWCZUK M. Assessment of rod behavior theories used in spectral finite element modelling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(11): 2099-2113.
- [20] 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.



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@tongji.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。

(责任编辑:吴海燕)