

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905841

钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究^{*}

胡松涛¹, 石文泽^{1,3}, 卢超^{1,2}, 陈果¹, 沈功田¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 上饶师范学院 大数据分析云检测重点实验室 上饶 334001; 3. 中科院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 钢轨踏面在车轮的重复载荷作用下会产生滚动接触疲劳裂纹。钢轨踏面裂纹是典型的滚动接触疲劳裂纹, 该类裂纹容易从轨头往下发展导致钢轨断裂, 对行车安全造成重大隐患。首先采用有限元数值方法分析超声表面波与钢轨踏面裂纹的作用规律, 研究了低频超声表面波在不同倾角、不同深度踏面裂纹上的散射特性及反射回波时域信号响应特点。其次, 设计制作了中心频率为 0.3 MHz 的表面波电磁超声换能器 (EMAT), 对钢轨踏面斜裂纹进行 B 扫成像检测, 以更好地识别显示裂纹。为克服 EMAT 提离对信号回波的影响以及适应快速巡查检测, 对裂纹反射回波采用同步挤压小波变换 (SWT) 进行去噪和重建, 实现了 B 扫快速成像。研究表明, 所设计的表面波 EMAT 能够有效地检测钢轨踏面上的多个裂纹, 采用同步挤压小波变换处理回波信号后, 超声回波信噪比至少提高 8.83 dB, 可显著提高 B 扫成像清晰度和检测速度。

关键词: 钢轨; 电磁超声; 踏面斜裂纹; 表面波; 同步挤压小波变换; B 扫成像

中图分类号: TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks

Hu Songtao¹, Shi Wenzhe^{1,3}, Lu Chao^{1,2}, Chen Guo¹, Shen Gongtian¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Key Laboratory of Large Data Analysis and Cloud Detection, Shangrao Normal University, Shangrao 340041, China;
3. State Key Laboratory of Acoustic Field and Acoustic Information, Academy of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Under the repeated load of the wheel, the rail tread is prone to fatigue cracks. Rail tread cracks are typical rolling contact fatigue cracks. These cracks can extend from the railhead to its downside, and it may cause the break-down of the railhead. It brings hidden huge damage to transport safety. Firstly, the finite element method is used to analyze the interaction law between ultrasonic surface waves and the cracks in the rail tread. The scattering features and ultrasonic reflection behaviors of the low-frequency surface waves are analyzed when inclination angles and depths of the cracks on the tread change. Secondly, a surface wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with a center frequency of 0.3 MHz is designed and established. Then, the B-scan imaging inspection is performed on the rail tread with oblique cracks to identify the cracks intuitively. To improve the worse signal-to-noise ratio (SNR) of the EMAT with a larger lift-off and conducting high-speed detection, the crack-reflected ultrasonic echo is denoised and reconstructed by synchrosqueezed wavelet transform (SWT). The B-scan images can be rapidly constructed by using SWT. Results show that the designed surface wave EMAT can effectively detect multiple cracks in the rail tread. SNR of the ultrasonic echos is improved at least 8.83 dB by using SWT de-noising method. In addition, the clarity of the B-scan image and the detection efficiency are effectively enhanced.

收稿日期: 2019-11-21 Received Date: 2019-11-21

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (51705231)、江西省自然科学基金 (20192ACBL20052)、江西省科技厅科技计划 (20192BCD40028)、南昌航空大学研究生创新专项资金 (校级项目) (YC2019039)、江西省青年科学基金 (20181BAB216020)、声场声信息国家重点实验室开放课题 (SKLA201912)、江西省教育厅科技项目 (GJJ170613) 资助

Keywords: rail; electromagnetic acoustic transducer; tread oblique crack; surface wave; synchrosqueezed wavelet transform; B-scan image

0 引 言

列车在高速运行的状态下,高速铁路轮轨滚动接触疲劳(rolling contact fatigue, RCF)是导致产生钢轨踏面裂纹伤损的主要原因^[1]。为了确保火车的行车安全,保证高速铁路轨道的质量完好无损,钢轨缺陷检测是必不可少的重要环节。常用的钢轨缺陷检测包括超声检测、涡流检测、漏磁检测等^[2],但是漏磁检测对闭合性裂纹的检出率低,涡流检测存在趋肤效应,无法对缺陷形貌做出准确评价。超声检测具有穿透力强,缺陷定位准确等优点,被广泛用于钢轨检测^[3]。超声表面波不仅能够有效地检出工件表面或近表面缺陷,而且适合远距离高效检测^[4]。对下道钢轨的伤损段现场解剖及金相分析表明,钢轨踏面裂纹向斜下方扩展深度达到踏面下约 8 mm 时,扩展方向逐渐转向横向而形成横向疲劳裂纹,最终导致钢轨横向断裂^[5]。因此,实现钢轨踏面裂纹检测,常常采用低频超声表面波。根据频率及波长的关系,在超声检测探头设计上,大多选取中心频率在 0.3 MHz 左右^[6]。

Hesse 等^[7]采用接触式压电晶片轮式探头激发低频超声表面波对钢轨踏面裂纹进行检测研究。文献[6]对自由状态下 60 型钢轨踏面上压电晶片激励的低频^[5]超声表面波传播模式进行了模式识别实验。卢超等^[8]采用压电晶片探头低频表面波探头激励接收回波信号并应用空间平均技术实现钢轨踏面斜裂纹 B 扫成像检测。与压电晶片探头的接触法检测相比,电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)技术由于不需要耦合剂,且在较粗糙表面也可以直接探伤,具有非接触、容易激发各种超声波模式等优点^[9]而得到广泛应用,Edwards 等^[10]通过建立双 EMAT 和脉冲涡流(pulsed eddy current, PEC)传感器检测系统,实现了钢轨表面及近表面缺陷的检测,相对于分别使用 EMAT 和脉冲涡流传感器进行检测,缩短了测试时间。Petcher 等^[11]将 EMAT 安装在检测车上,对钢轨进行快速扫掠检测,实验证明较低的提离条件下,其具有可用于缺陷检测的信噪比(signal noise ratio, SNR)。Shull 等^[12]建立双 EMAT 一发一收检测系统,利用表面波在钢轨轨头踏面中的传播,进而实现了钢轨表面缺陷的检测。

由于电磁超声检测容易受到 EMAT 提离的影响,且对周围环境噪声敏感度高,提离的变化和材料噪声使得检测回波信号的 SNR 差,需要有效的信号处理方法用于信号去噪处理^[13]。频域分析是超声信号处理常用的方法,但传统的频域分析方法不能揭示超声导波信号频域

随时间变化的特点^[14],时频联合分布能从时间和频率上对信号进行分析和去噪,更有利于提高表面波 EMAT 信噪比和 B 扫成像质量。同步挤压小波变换(synchrosqueezed wavelet transform, SWT)对高斯白噪声的干扰具有较好的鲁棒性,综合提取效果优于经典的经验模态分解方法,具有高分辨率和可逆的特点^[15]。SWT 是联合了小波变换和重组的新方法,其时频分辨率非常高,而且还保留了小波变换的多尺度的优点^[16]。因为 SWT 受测不准原理的限制较小,因此其时频联合域比其他的时频分析方法时频联合域的精度要高。Thakur 等^[17]利用 SWT 进一步研究多分量(AM-FM)信号的瞬时频率,并且给出了重构非均匀采样信号的瞬时频率的算法,与 Hilbert 变换相比其重构效果更好,去噪效果更明显。刘景良等^[18]将 SWT 应用到土木工程结构检测,用于结构瞬时频率的识别,并且取得了很好的效果。

由于踏面裂纹的倾角、裂纹深度对表面波反射回波具有影响,本文首先采用有限元数值方法分析表面波在踏面裂纹上的散射特性。本文进一步设计制作了激励和接收 EMAT 对钢轨踏面裂纹进行快速检测。为克服提离变化对检测信号的影响,提升检测回波信号 SNR,同时适合于钢轨巡检使用,快速处理实时检测信号,本文应用 SWT 对 EMAT 检测回波信号进行处理并对裂纹进行 B 扫成像,以更好地显示裂纹的位置和深度。本文的研究工作为钢轨踏面裂纹的快速检测与准确识别提供了一种有效的处理方法。

1 EMAT 换能机理及控制方程

EMAT 的换能机理主要有洛伦兹力和磁致伸缩效应,由于钢轨是铁磁性材料,故洛伦兹力和磁致伸缩效应都可以在钢轨产生应力波。对于表面波 EMAT,通常采用垂直磁场方向的 N52 永磁铁和曲折线圈组合而成,而对于该类 EMAT 换能机理主要为洛伦兹力^[19]。

曲折线圈 EMAT 在金属试样激励表面波如图 1 所示。曲折线圈位于永磁铁和金属试样之间,永磁体可以产生一个垂直于金属试样的偏置磁场。当曲折线圈中通以大功率高频激励电流时,根据法拉第电磁感应定律,接近线圈的工件上表层或近表层感生出频率相同但方向相反的涡流^[20]。涡流在偏置磁场中,便产生了洛伦兹力,由于电涡流的方向是交变的,从而产生了交变的洛伦兹力。交变的洛伦兹力使得钢轨表面质点产生高频振动,从而产生超声波。当钢轨厚度超过 4 倍的波长时,超声

波在钢轨中以表面波的形式传播。电磁超声激励的声波波长与线圈间距满足式(1)的条件,即线圈间距是声波波长的 $1/2$,可以形成表面波并且使得超声波幅值达到最大^[21]。

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad (1)$$

式中: l 为线圈相邻导线间距; λ 为超声波的波长; c 为超声波声速; f 为激励频率。本文选用频率为 0.3 MHz 多匝分裂曲折线圈作为 EMAT 的激励/接收线圈,故线圈导线间距 $l=5\text{ mm}$ 。

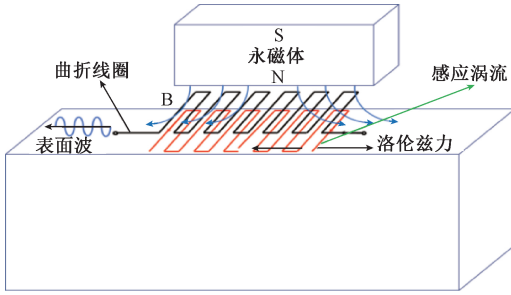


图1 表面波 EMAT 的激励换能机理

Fig.1 Conversion mechanism of surface wave EMAT

洛伦兹力所激发的表面波在金属固体中的传播过程可以利用式(2)表示^[22]。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_L \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; \mathbf{u} 为表面波位移矢量; \mathbf{T} 表示应力张量。

由于 EMAT 换能效率低,提离变化和噪声使得超声回波的 SNR 低,无法准确识别缺陷,需要有效的信号处理方法来提高 SNR。采用 SWT 可以有效去除回波信号中的噪声,单次采集的超声回波经过 SWT 处理后,也能有效提高 SNR,极大提高检测效率。

2 SWT 原理

一个时变信号 $f(t)$ 可表示为多个本征函数和一个余量的叠加^[23],即:

$$f(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos[\theta_k(t)] + e(t) \quad (3)$$

式中: $A_k(t)$ 为第 k 个分量随时间变化的幅值; $\theta_k(t)$ 为第 k 个分量随时间变化的相位; $e(t)$ 为余量; K 为信号可分解的分量数。

首先,对时变信号 $f(t)$ 进行小波变换,得到小波系数 $W_f(a, b)$ 为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子; ψ 为母小波函数;“*”为共轭;由 Plancherel 原理可得^[23]:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{1}{\sqrt{a}} \hat{f}(\xi) \hat{\psi}^*(a\xi) e^{i b \xi} d\xi \quad (5)$$

式中: ξ 为角频率; $\hat{f}(\xi)$ 为 $f(t)$ 的傅里叶变换; $\hat{\psi}(\xi)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

$f(t) = A \cos(\omega t)$ 的傅里叶变换为 $\hat{f}(\xi) = \pi A [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)]$,故其连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{A}{2\sqrt{a}} \hat{\psi}^*(a\xi) e^{i b \xi} \quad (6)$$

若 $\hat{\psi}(\xi)$ 在负频率域趋于0, ξ 在 $\xi = \omega_0$ 处集中分布,则小波系数 $W_f(a, b)$ 集中分布在时间尺度 $a = \frac{\omega_0}{\omega}$ 处,通过对小波系数求偏导数可以估计瞬时频率^[23]。

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} -\frac{j \partial_b W_f(a, b)}{W_f(a, b)}, & W_f(a, b) \neq 0 \\ \infty, & W_f(a, b) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

能量由时间-尺度平面 (b, a) 转换到时间-频率平面 $[b, \omega_f(a, b)]$,并重新进行排列,使能量得到聚焦。在 a, b, ω 均离散的情况下, $a_i - a_{i-1} = (\Delta a)_i$,通过挤压任一中心频率 ω_i 附近区间 $\left[\omega_i - \frac{1}{2} \Delta \omega, \omega_i + \frac{1}{2} \Delta \omega\right]$ 的值,获得同步挤压变换量值 $T_f(\omega_i, b)$ ^[23],即:

$$T_f(\omega_i, b) = \sum_{a_i: |\omega_f(a, b) - \omega_i| \leq \frac{\Delta \omega}{2}} W_f(a, b) a_i^{-\frac{1}{2}} (\Delta a)_i \quad (8)$$

同步挤压小波反变换为^[23]:

$$f(t) = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_i T_f(\omega_i, b) (\Delta \omega) \right] \quad (9)$$

式中: $C_\psi^{-1} = \int_0^{+\infty} \varphi^*(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$, $\varphi^*(\xi)$ 为母小波函数的共轭傅里叶变换; Re 为取实部; a_i 为离散的尺度; i 为尺度个数。

SWT 是一种可逆的时频重组方法。通过式(7)可得到回波信号瞬时频率的估计值,由于表面波在频率大于 0.3 MHz 后表现为非频散波,瞬时频率保持在 0.3 MHz 附近,缺陷信号与噪声在频域方向分离。利用式(8)将回波信号时频谱值向其中心频率位置挤压,在频率方向进一步分离,时频曲线更加精细。准确识别缺陷信号区域,采用式(9)对信号进行重构,得到去除噪声的缺陷回波。

3 钢轨踏面斜裂纹电磁超声表面波散射特性

3.1 跑道线圈 EMAT 设计参数及有限元模型

以带有裂纹的钢块模拟钢轨,建立表面波传播有限

元模型,如图2所示,试样长为600 mm,宽为100 mm,钢块的杨氏模量为200 GPa,泊松比是0.30,密度为7 850 kg/m³。两个裂纹的倾角和深度均一致,裂纹的倾角变化范围为10°~170°,深度变化范围为3~30 mm。有限元模型采用自由三角形网格进行分割,为保证计算的准确性和计算速度,网格单元大小为超声波波长的1/10~1/20。因激励频率为0.3 MHz,故最大网格单元尺寸为1 mm。为保证计算结果收敛,时间应步长不大于1/(100f),故瞬态求解器最大时间步长设置为0.01 μs。

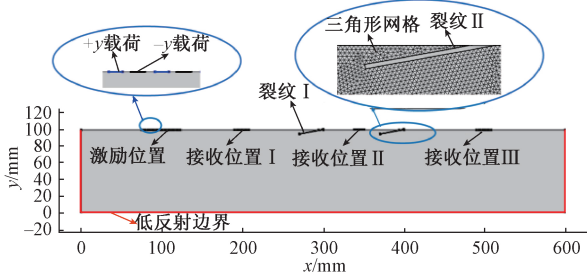


图2 表面波传播有限元模型

Fig.2 The finite element model for the surface wave propagation in the rail specimen

在钢块上布置10个线加载区域,对应的奇数序号加载一个正向的线作用力,偶数序号加载一个反向的线作用力,均以单位长度力的类型进行加载。在每个线区域加载力载荷,用于模拟在偏置永磁场作用下,脉冲电流涡流形成的洛伦兹力,激励力函数如下:

$$h(t) = \begin{cases} (-1)^k [1 - \cos(\omega t/n)] \cos(\omega t), & 0 \leq t \leq (2\pi n)/\omega \\ 0, & t > (2\pi n)/\omega \end{cases} \quad (10)$$

式中: k 代表线加载区域的序号; $\omega = 2\pi f$ 为中心频率; n 表示正弦脉冲串个数。

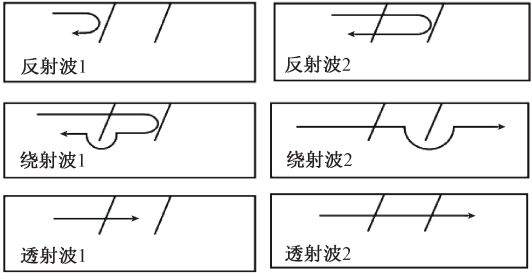
为了获取表面波与裂纹的作用规律,导出不同时刻下表面波传播云图,如图3所示。从图3中可以看出,在72.9 μs表面波信号传播到裂纹处,表面波信号与裂纹相互作用,在86.4 μs产生透射波1和反射波1。透射波1继续向前传播,在95.7 μs经过第2个裂纹,在117.9 μs产生透射波2和绕射波2。在129.6 μs,第2个裂纹的反射波经过第1个裂纹,在154.8 μs产生反射波2和绕射波1。仿直接收到波形的幅值如图4所示,从图4中可以看出,绕射波到达时间紧随反射波,但绕射波幅值小于反射波幅值。

3.2 裂纹反射回波特性

从第1个裂纹的反射波信号中提取反射波的峰值,得到反射系数的变化规律,如图5所示。从图5中可发现,表面波反射信号具有如下特点。

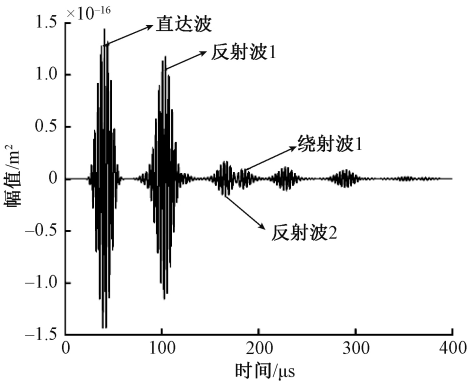


(a) 超声表面波瞬态传播云图
(a) Ultrasonic surface wave propagation process in the rail

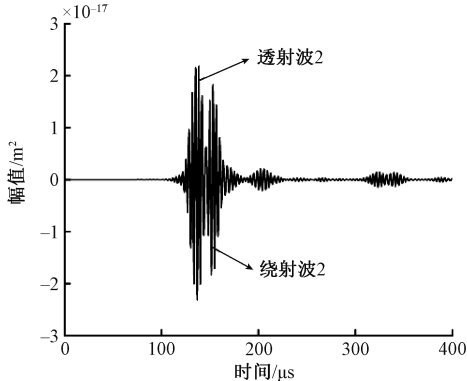


(b) 超声表面波与裂纹的作用
(b) The schematic diagram of ultrasonic surface waves interacting with cracks

图3 表面波在钢轨踏面裂纹上的散射
Fig.3 Scattering of surface waves on rail tread cracks

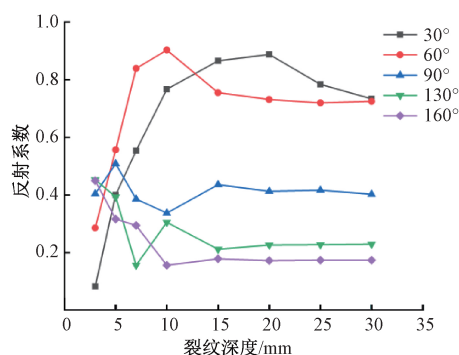


(a) 两条深度30 mm和倾角10°裂纹对应的反射波
(a) Reflected waves corresponding to two cracks with 30 mm depth and 10° inclination angle



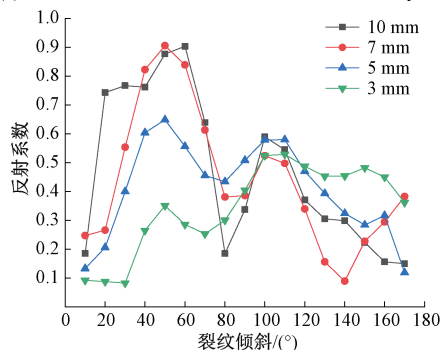
(b) 两条深度30 mm和倾角10°裂纹对应的透射波
(b) Transmitted waves corresponding to two cracks with 30 mm depth and 10° inclination angle

图4 钢轨中两条裂纹对应的反射波和透射波
Fig.4 The reflected and transmitted waves corresponding to the rail with two cracks



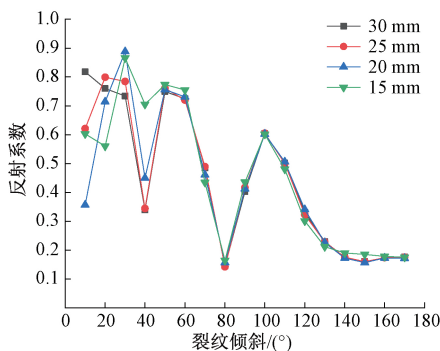
(a) 反射系数随裂纹深度变化

(a) Variation of the reflection coefficient with crack depths



(b) 反射系数随裂纹倾斜角变化

(b) Variation of the reflection coefficient with crack inclination angles



(c) 反射系数随裂纹倾斜角变化

(c) Variation of the reflection coefficient with crack inclination angles

图5 裂纹深度和倾角对超声波反射系数的影响

Fig.5 Influence of crack depths and inclination angles on ultrasonic reflection coefficient

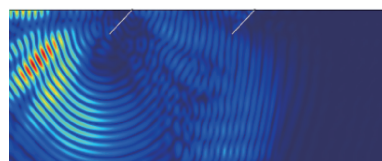
1) 由图 5(a) 可知, 在裂纹倾角相同的情况下, 小倾角裂纹的反射系数随深度增加而增大, 大倾角裂纹的反射系数随深度增加而减小; 裂纹深度达到一倍波长后, 不同倾角裂纹反射系数均趋于平稳; 裂纹深度到达一倍波长后, 定量评估的误差会逐渐增大, 踏面以下较深裂纹的检测, 有必要采用低频表面波。

2) 由图 5(b) 可知, 当裂纹深度小于一倍波长时, 随着倾角的增大, 相同深度裂纹的反射系数先增大后减小; 并在 50°、100° 倾角出现极大值, 80° 倾角出现极小值。

3) 由图 5(c) 可知, 裂纹深度大于一倍波长时, 相同深度裂纹的反射系数随倾角增大呈下降趋势; 裂纹倾角

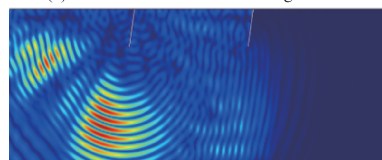
大于 60° 后, 不同深度裂纹的反射系数差别越来越小, 在 40°、80°、140° 倾角时, 反射系数出现极小值。

当裂纹倾角为 40°、80°、140° 时, 反射系数出现极小值, 反射波信号幅值降低, 不利于缺陷检测。在这些倾角下, 表面波与钢块裂纹作用的声场云图如图 6 所示。从图 6 中可以发现, 表面波信号传播到第 1 个裂纹处, 发生了模态转换, 声波大部分转换为横波与纵波, 向试样内部传播, 致使反射波信号幅值降低。



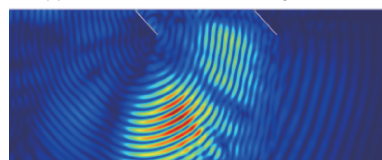
(a) 裂纹倾角为 40°

(a) Crack with an inclination angle of 40°



(b) 裂纹倾角为 80°

(b) Crack with an inclination angle of 80°



(c) 裂纹倾角为 140°

(c) Crack with an inclination angle of 140°

图6 不同倾角裂纹对应的瞬态声场云图

Fig.6 Ultrasonic surface waves interacting with cracks of different angle

3.3 裂纹透射回波特性

从第 1 个裂纹的透射波信号中提取透射波的峰值, 得到透射系数的变化规律, 如图 7 所示。从图 7 中可发现, 表面波透射信号具有如下特点: 1) 由图 7(a) 可知, 在裂纹倾角相同的情况下, 深度越大, 透射系数越小; 裂纹深度为半倍波长时, 透射系数出现极大值; 相同倾角裂纹的透射系数与深度近似服从指数关系。2) 由图 7(b) 可知, 当裂纹的深度相同时, 随着倾角的增大, 透射系数先减小后增大, 呈对称分布。

3.4 钢轨踏面裂纹 B 扫成像仿真

对第 1 个裂纹的透射波信号分析可知, 踏面裂纹倾角为 80° 时, 产生了严重的模态转换, 容易造成漏检。为保证表面波 EMAT 对踏面多条裂纹的检出能力, 现场检测时, 所安装表面波 EMAT 向踏面边沿一侧倾斜 10°, 同时, 考虑到实际踏面裂纹二维反射面角度和延伸对检测表面波反射回波的影响, 根据探头距离裂纹的情况, 采用

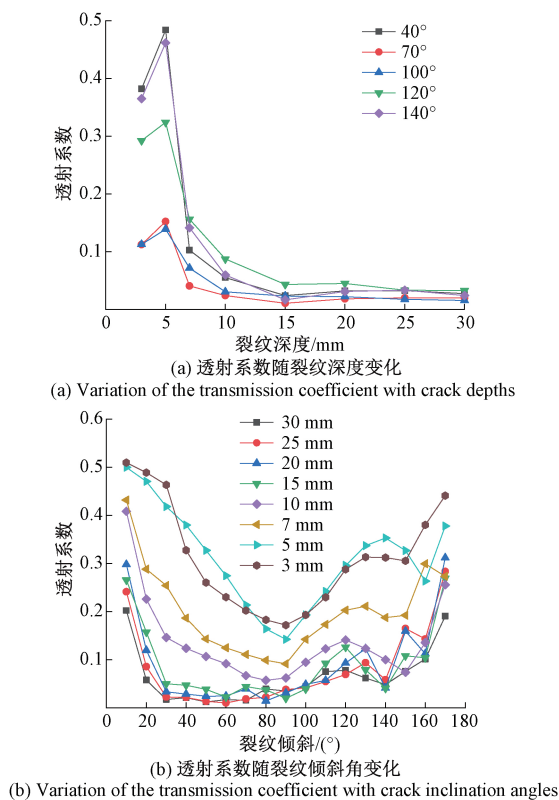


图7 裂纹深度和倾角对超声波透射系数的影响
Fig.7 Influence of crack depths and inclination angles on ultrasonic transmission coefficient

沿钢轨踏面B扫成像的方式显示裂纹,以更好的凸显识别裂纹缺陷。

以3 mm为间隔移动探头对钢轨踏面裂纹进行B扫成像仿真,得到的B扫成像如图8所示。从图8中可以看到直达波、两条裂纹反射波以及微弱的边界反射回波。图8中清晰地显示了第1条裂纹的位置信息,但第2条裂纹位置信息模糊,容易漏检。

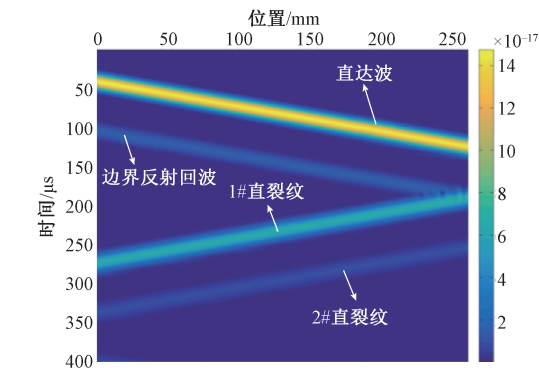


图8 钢轨踏面裂纹B扫成像仿真
Fig.8 Simulated B-scan images of rail tread crack

4 钢轨踏面裂纹表面波 EMAT 检测实验

4.1 钢轨踏面裂纹B扫成像

钢轨踏面裂纹电磁超声表面波检测实物如图9(a)所示,激励EMAT与接收EMAT分布在缺陷的同一侧,激励频率为0.3 MHz。两条裂纹采用电磁测量得到垂直深度分别为10、15 mm,两条裂纹相隔126 mm。第1条裂纹到接收EMAT的距离为326 mm,第2条裂纹距离钢轨右端面的距离107 mm,激励EMAT与接收EMAT间距保持111 mm不变,两个探头距离钢轨的提离均为0.5 mm。激励与接收EMAT采用20匝4根分裂曲折线圈,永磁铁的长、宽、高分别为50、50、20 mm,激励与接收EMAT均朝向缺陷侧倾斜10°,如图9(b)所示。激励与接收EMAT沿靠近裂纹方向进行检测,每隔3 mm采集一组A扫回波数据,采样频率为40 MHz,平均次数为64,共采集88组数据。

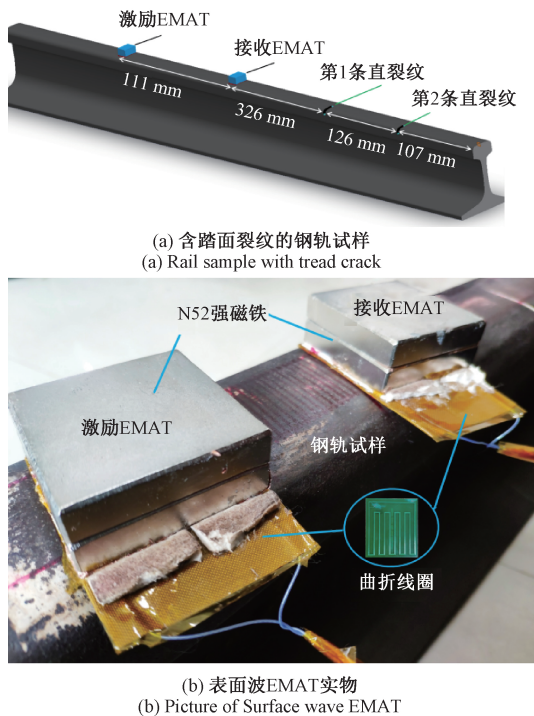


图9 钢轨踏面电磁超声表面波检测实物
Fig.9 Picture of the rail tread detected by the surface wave EMAT

当激励和接收表面波EMAT移动3 mm时,得到的超声反射回波信号如图10(a)所示,回波信号的SNR为24.76 dB。从图10(a)中可以明显看到两个缺陷回波和端面回波。图10(b)为两条踏面直裂纹对应的基于幅值的B扫图像,右侧颜色条表示回波信号幅值的高低,图10(b)中清楚地显示了两条直裂纹的位置。

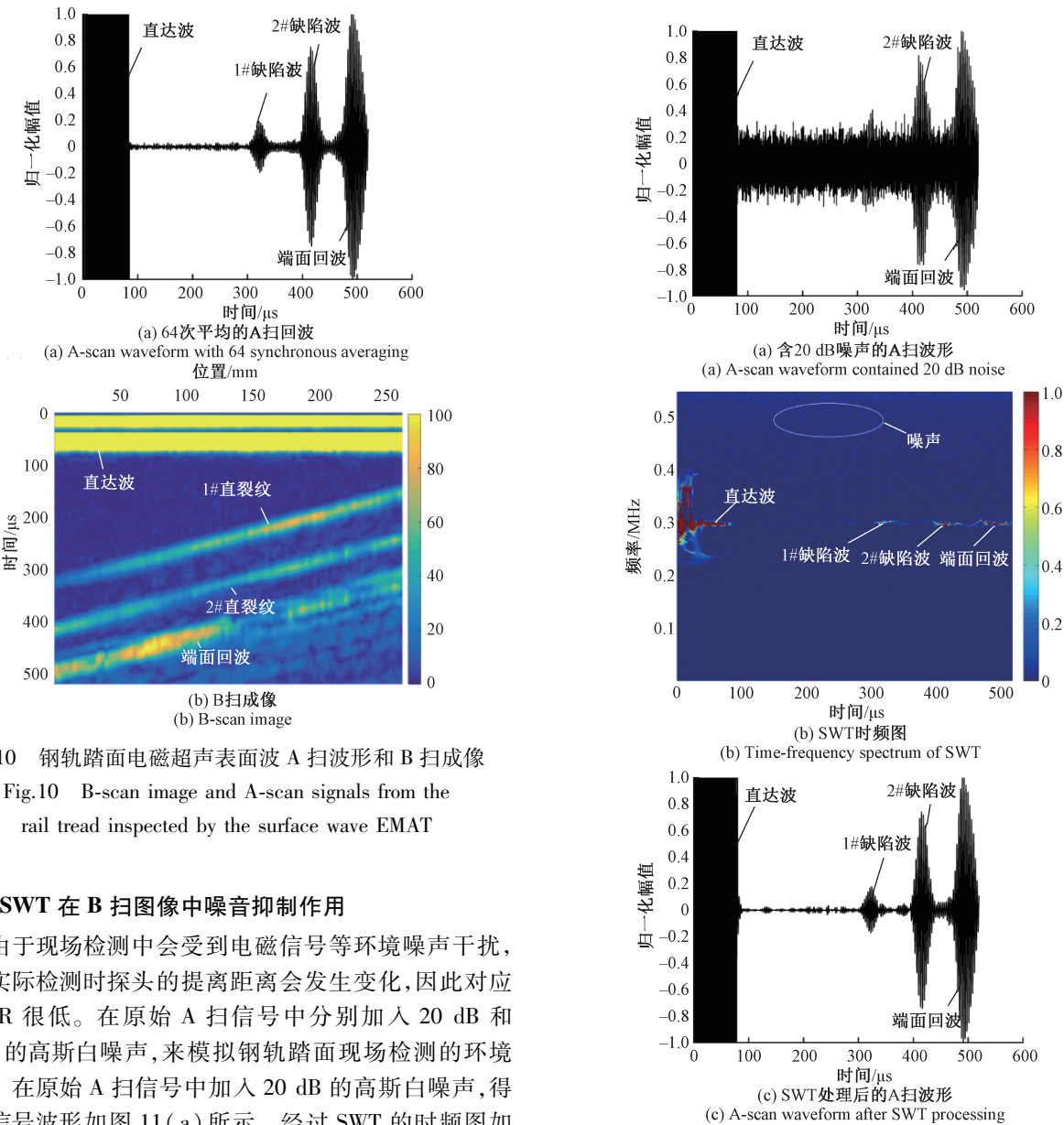


图 10 钢轨踏面电磁超声表面波 A 扫波形和 B 扫成像
Fig.10 B-scan image and A-scan signals from the rail tread inspected by the surface wave EMAT

4.2 SWT 在 B 扫图像中噪音抑制作用

由于现场检测中会受到电磁信号等环境噪声干扰,而且实际检测时探头的提离距离会发生变化,因此对应的 SNR 很低。在原始 A 扫信号中分别加入 20 dB 和 30 dB 的高斯白噪声,来模拟钢轨踏面现场检测的环境噪音。在原始 A 扫信号中加入 20 dB 的高斯白噪声,得到的信号波形如图 11(a) 所示。经过 SWT 的时频图如图 11(b) 所示,从图 11(b) 中可以看出,在高频部分出现点状的噪声,缺陷信号与噪音有了明显分离。原始信号的主频成分为 0.3 MHz,采用式(8)将时频谱值向中心频率位置挤压后,SWT 能量团在时间和频率方向上得到聚焦,时频分辨率显著提高。提取频率方向的谱系数,采用式(9)重建 A 扫信号,得到的信号如图 11(c) 所示。从图 11(c) 中可以看出,回波信号的 SNR 和分辨率均得到提高。

含噪信号 B 扫成像如图 12(a) 所示,从图 12(a) 中可以看出,B 扫图像中保留了缺陷的部分位置信息,但背景噪音较大,图像分辨率较低。经过 SWT 处理并重建的图像如图 12(b) 所示,从图 12(b) 中可以看出,重建图像清晰地显示了裂纹在钢轨表面的位置信息,同时降低了背景噪音,提高了清晰度。

图 11 含 20 dB 噪声 A 扫信号经过同步挤压小波变换前后对比
Fig.11 Comparison of A-scan signals contained 20 dB noise before and after SWT

在原始 A 扫信号中加入 30 dB 的高斯白噪声,如图 13(a) 所示。从图 13(a) 中可以看出,原始信号缺陷波已经完全被噪声淹没。生成的 B 扫图像如图 14(a) 所示,从图 14(a) 中可以看出,由于 B 扫图像背景噪音太大,无法获取裂纹的数量和位置信息。SWT 处理后,A 扫波形如图 13(b) 所示,经过 SWT 处理并重建图像如图 14(b) 所示,从图 14(b) 中可以看出,重建图像保留了缺陷的位置信息,成功区分出踏面直裂纹。

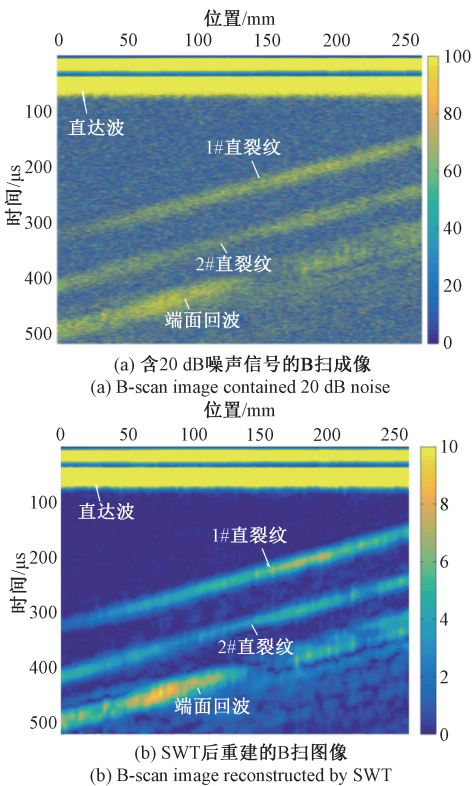


图 12 含 20 dB 噪声 B 扫图像经过 SWT 前后对比
Fig.12 Comparison of B-scan images before and after
SWT with 20 dB noise added

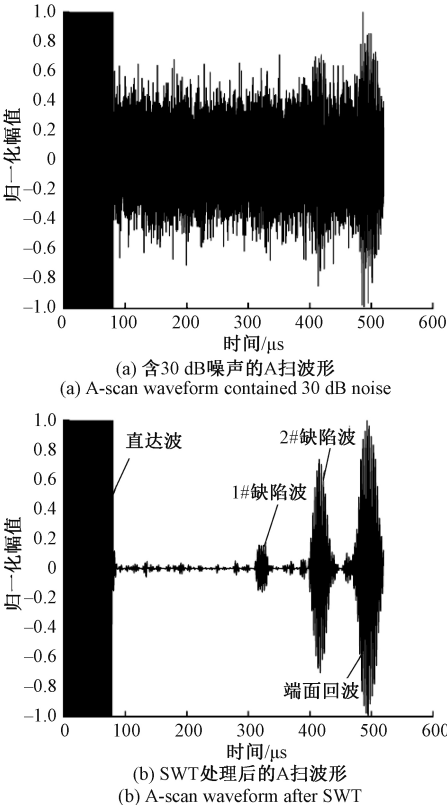


图 13 含 30 dB 噪声 A 扫信号经过 SWT 前后对比
Fig.13 Comparison of A-scan signals contained 30 dB
noise before and after SWT

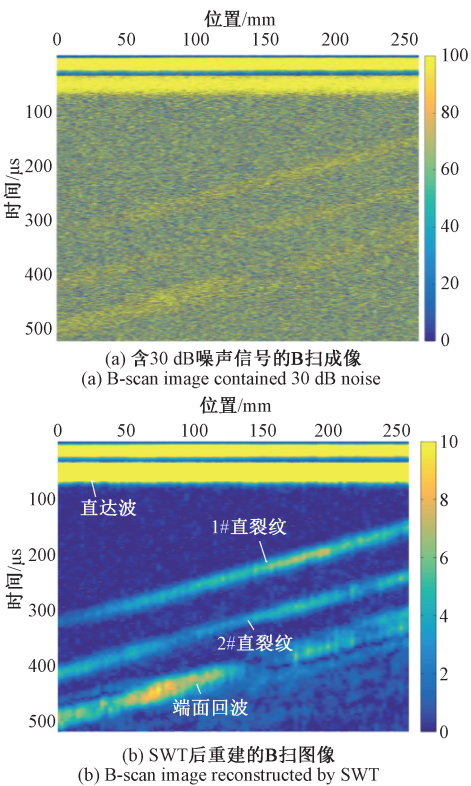


图 14 含 30 dB 噪声 B 扫图像经过同步 SWT 前后对比
Fig.14 Comparison of B-scan images before and after
SWT with 30 dB noise added

4.3 同步挤压小波在高提离和 B 扫快速检测的应用对比

平均次数为 64 次的情况下,回波信号的 SNR 很高,但需要时间较长,不利于高速铁路的快速检测,为实现钢轨踏面快速 B 扫成像,只采集一次,使用同步挤压小波对原始信号进行消噪处理。探头提离为 0.5 mm 采集得到的表面波回波信号如图 15(a) 所示,回波信号 SNR 为 16.38 dB。从图 15(a) 中可以看出,回波信号的 SNR 显著降低,第 1 个缺陷回波被淹没在噪声中。采用 SWT 处理所得时频图如图 15(b) 所示,右侧颜色条表示幅值的高低,从图 15(b) 中可以看出,缺陷信号与噪音有了明显分离。原始信号的主频成分为 0.3 MHz,重构信号如图 15(c) 所示,重构信号 SNR 为 25.21 dB,信号 SNR 提高了 8.83 dB。从图 15(c) 中可以看出,回波信号的 SNR 和分辨率均得到提高,钢轨两侧边缘效应形成的微小杂波也显示在 A 扫信号中。对比图 10(a) 和图 15(c) 可知,一次采集信号使用 SWT 后,有着比 64 次平均更高的 SNR。探头提离 0.5 mm,单次采集信号得到的 B 扫成像如图 16(a) 所示,显然 B 扫图像中保留了缺陷的位置信息,但背景噪音较大,图像分辨率较低。

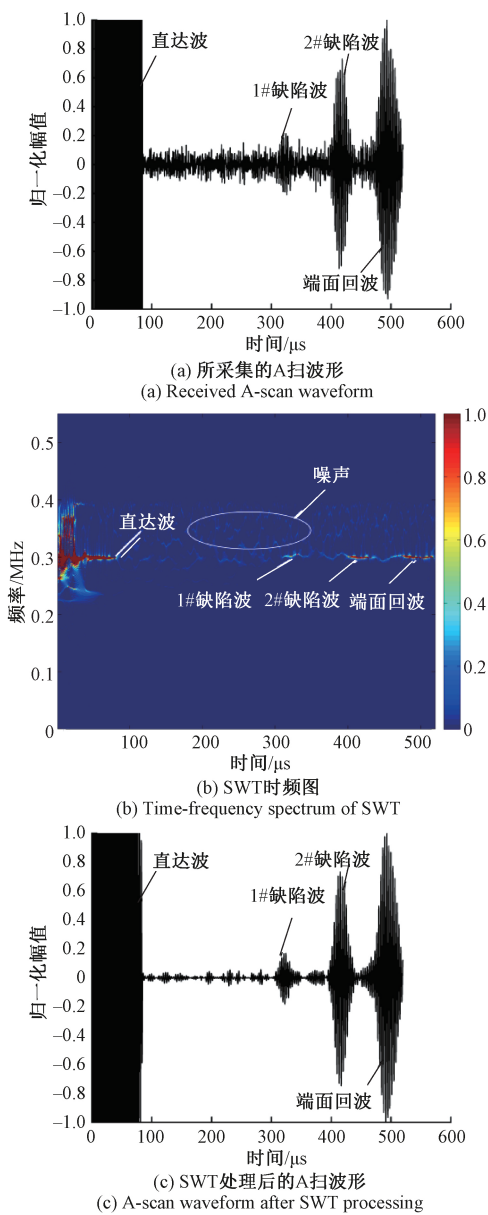


图 15 提离 0.5 mm 单次采集信号经过 SWT 前后对比
Fig.15 Comparison of raw signals before and after SWT with 0.5 mm lift-off

采用同步挤压小波重建图像结果如图 16(b) 所示,从图 16(b)中可以看出,重建图像清晰地显示了裂纹在钢轨表面的位置信息,同时降低了背景噪声,提高了清晰度。对比图 10(b)和图 16(b)可知,单次采集信号使用 SWT 后,B 扫成像图比 64 次平均得到的 B 扫成像图清晰度还要好,SWT 可以显著提高检测效率。

由于现场检测中长期使用的钢轨踏面并不平整,钢轨表面各处磨损有变化,这容易导致 EMAT 探头的

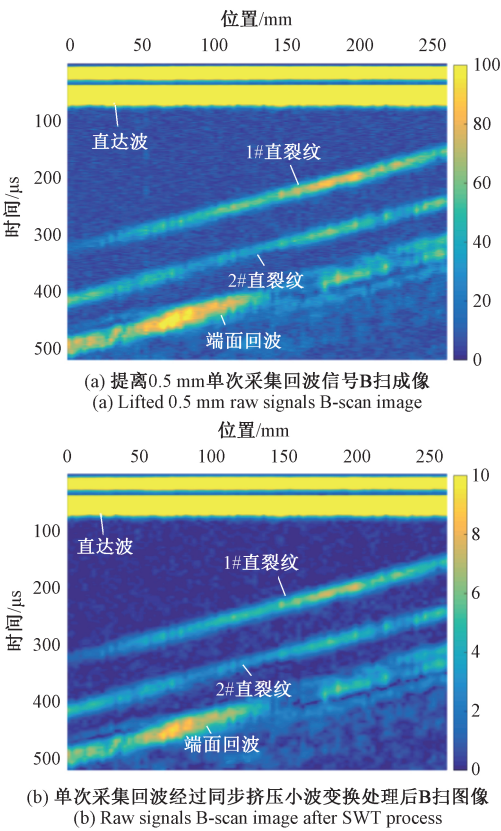
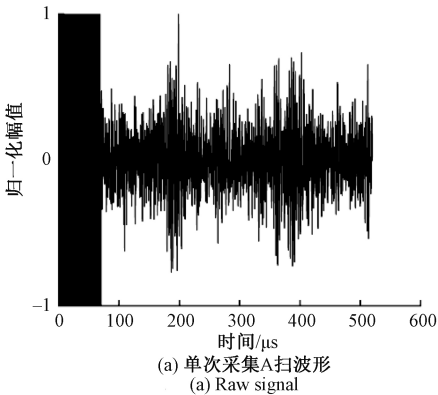


图 16 提离 0.5 mm 单次采集信号 B 扫图像对比
Fig.16 Comparison of B-scan images before and after SWT with 0.5 mm lift-off and one average

提离也在发生变化,实际测试表明这会影响检测回波的信号质量,导致信号 SNR 降低。实验测试显示,激励 EMAT 与接收 EMAT 距离钢轨的提离为 1 mm 时,所采集 A 扫信号如图 17(a) 所示,信号的 $SNR = 0.74$ dB。从图 17(a)中可以看出,缺陷回波信号很差,很难识别缺陷回波。采用同步挤压小波变换处理的结果如图 17(b)所示,处理后信号的 $SNR = 12.50$ dB,SNR 提高了 11.76 dB。



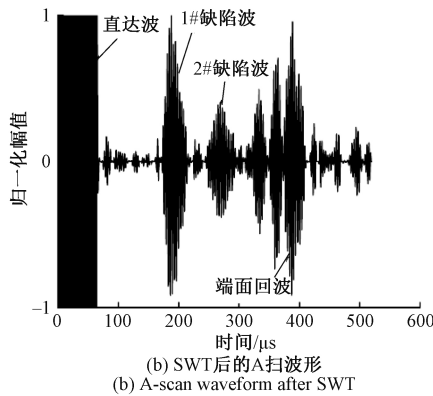


图 17 提高 1 mm 单次采集信号经过 SWT 处理前后对比
Fig.17 Comparison of raw signals before and after SWT with 1 mm lift-off

从图 17(b)中可以清楚地看到两个缺陷回波和端面回波,信号的 SNR 得到明显提高。探头提高 1 mm,单次测量得到的 B 扫图像如图 18(a)所示,回波信号经过 SWT 后,重建图像如图 18(b)所示。从图 18(b)中可以看出,重建图像清楚地显示了缺陷位置信息,很好地区分出踏面裂纹。

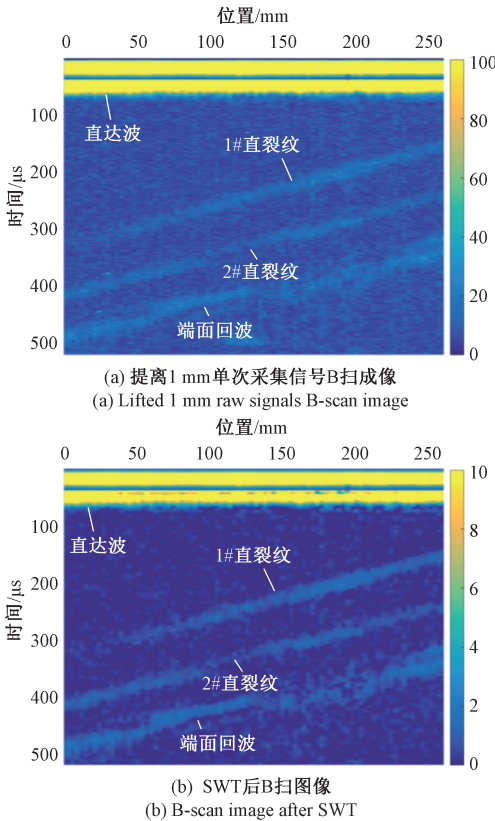


图 18 提高 1 mm 单次采集信号处理前后 B 扫图像对比
Fig.18 Comparison of B-scan images before and after SWT with 1 mm lift-off and one average

5 结 论

本文提出了钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速探伤方法。首先在分析钢轨踏面裂纹形貌和特征的基础上,建立了超声表面波 EMAT 钢轨检测有限元模型,分析了钢轨踏面表面波传播过程中,裂纹倾角和深度对表面波传播和散射的影响,为裂纹的定量定位检测提供了有益参考。为提高检测巡检效率并克服钢轨踏面不平整对检测回波信号的影响,采用 SWT 进行去噪和 B 扫成像重建,主要结论如下:

1) 钢轨踏面裂纹倾角为 40° 、 80° 及 140° 时,表面波信号会产生严重的模态转换,反射回波信号幅值降低,容易造成漏检。

2) 采用 0.3 MHz 的电磁超声表面波 B 扫成像能够有效地检测钢轨踏面上的裂纹,单次采集信号经 SWT 处理后,有着比 64 次平均信号处理所得信号具有更高的 SNR,基于此所形成的 B 扫图像清晰度更高,显著提高了高速铁路踏面钢轨伤损的检测效率。

3) EMAT 探头的提高会对检测信号质量有较大影响,探头的安装因素或钢轨踏面的磨损状况导致的提高变化会使得回波信号被噪声严重干扰,对踏面伤损裂纹的 B 扫图像不能清晰地显示裂纹数量和位置;对单次采集原始信号经过 SWT 后再重建 B 扫图像,就能清楚地显示出裂纹位置信息,可为钢轨表面不平整的检测条件下,利用表面波 EMAT 快速检测钢轨踏面伤损这一难题提供一种新的方法。

参考文献

- [1] 钟雯,董霖,王宇,等. 高速与重载铁路的疲劳磨损对比研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 96-101.
ZHONG W, DONG L, WANG Y, et al. A comparative investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed and heavy-haul railway[J]. Tribology, 2012, 32(1): 96-101.
- [2] 田贵云,高斌,高运来,等. 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, et al. Review of railway defect non-destructive testing and monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [3] THOMAS H M, HECKEL T, HANSPACH G. Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, 49(6):

- 341-344.
- [4] LU CH, MEN P, LI L X. An experimental study of EMAT ultrasonic surface waves modes in railhead [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3-4): 1127-1133.
- [5] 刘学文, 邹定强, 邢丽贤, 等. 钢轨踏面斜裂纹伤损原因及对策的研究[J]. 中国铁道科学, 2004(2): 83-88.
- LIU X W, ZOU D Q, XING L X, et al. Causes of rail tread oblique crack and countermeasures [J]. China Railway Science, 2004(2): 83-88.
- [6] HESSE D, CAWLEY P. Surface wave modes in rails[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(2): 733-740.
- [7] HESSE D. Excitation of surface wave modes in rails and their application for defect detection[M]. AIP Conference Proceedings, 2006: 1593-600.
- [8] 卢超, 魏运飞, 徐薇. 钢轨踏面斜裂纹超声表面波 B 扫成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2272-2278.
- LU CH, WEI Y F, XU W. Study on B-scan imaging detection for rail tread tilted cracks using ultrasonic surface wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2272-2278.
- [9] 刘素贞, 李礼, 蔡智超, 等. 非线性电磁超声对铝合金拉伸变形评价研究[J]. 声学学报, 2017, 42(1): 60-66.
- LIU S ZH, LI L, CAI ZH CH, et al. Evaluation of the tensile deformation of aluminum alloy using EMAT for nonlinear ultrasonic detection[J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 60-66.
- [10] EDWARDS R S, SOPHIAN A, DIXON S, et al. Dual EMAT and PEC non-contact probe: applications to defect testing[J]. NDT & E International, 2006, 39(1): 45-52.
- [11] PETCHER P A, POTTER M D G, DIXON S. A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail[J]. NDT & E International, 2014, 65: 1-7.
- [12] SHULL P J, PALMER S B, GYEKENYESI A L, et al. Transverse and longitudinal crack detection in the head of rail tracks using rayleigh wave-like wideband guided ultrasonic waves [M]. Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV, 2005.
- [13] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(04): 59-66.
- HE C F, DENG P, LYU Y, et al. A new surface wave EMAT with high SNR and the application for defect detection in thick-walled pipes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [14] 周正干, 冯占英, 高翌飞, 等. 时频分析在超声导波信号分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 833-837.
- ZH ZH G, FENG ZH Y, GAO Y F, et al. Application of time-frequency analysis to ultrasonic-guided-wave signals interpretation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 833-837.
- [15] 汪祥莉, 王斌, 王文波, 等. 混沌干扰中基于同步挤压小波变换的谐波信号提取方法[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 15-24.
- WANG X L, WANG B, WANG W B, et al. Harmonic signal extraction from chaotic interference based on synchrosqueezed wavelet transform [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(10): 15-24.
- [16] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [17] THAKUR G, WU H T. Synchrosqueezing-Based recovery of instantaneous frequency from nonuniform samples[J]. Siam Journal on Mathematical Analysis, 2010, 43(5): 2078-2095.
- [18] 刘景良, 任伟新, 王佐才, 等. 基于同步挤压小波变换的结构瞬时频率识别[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 37-42.
- LIU J L, REN W X, WANG Z C, et al. Instantaneous frequency identification based on synchrosqueezing wavelet transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 37-42.
- [19] XIE Y, LIU Z, YIN L, et al. Directivity analysis of meander-line-coil EMATs with a wholly analytical method[J]. Ultrasonics, 2017, 73: 262-270.
- [20] 石文泽, 吴运新, 龚海, 等. 非铁磁性金属材料螺旋线圈电磁超声换能器接收效率场路耦合分析[J]. 中

南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3200-3208.

SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Circuit-field coupled analysis of receiving efficiency of spiral coil electromagnetic acoustic transducer in non-ferromagnetic metal material[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3200-3208.

[21] HAO K S, HUANG S L, ZHAO W, et al. Modeling and finite element analysis of transduction process of electromagnetic acoustic transducers for nonferromagnetic metal material testing [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3): 749-754.

[22] DUTTON B, BOONSANG S, DEWHURST R J. Modelling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound[J]. Ultrasonics, 2006, 44:e657-e665.

[23] 刘晗, 张建中, 黄忠来. 应用同步挤压小波变换去除面波[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 71-79.
LIU H, ZHANG J ZH, HUANG ZH L. Surface wave removal with synchrosqueezing wavelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 71-79.

作者简介



胡松涛, 2018 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学的硕士研究生, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: 1598091433@qq.com

Hu Songtao received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.



卢超(通信作者), 1995 年于江西师大获学士学位, 1998 年于中国科技大学获硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@163.com

Lu Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, received his M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and received his Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.