

文章编号: 1001-8360(2023)02-0093-07

钢轨中超声导波模式激励方法研究

胡辰阳^{1,2}, 陈 嵘^{1,2}, 江文强^{1,2}, 徐井芒^{1,2}, 李浩然^{1,2}, 王 平^{1,2}

(1. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 超声导波具有传播距离长、探测范围大的优点,可应用于铁路快速、远距离的检测。较为单一导波模式的激发和传播有利于信号处理和损伤识别。本文基于正交模式展开方法对钢轨中较单一波模式的激励方法开展研究,给出考虑切向激励的横截面振幅因子经验公式,分析不同位置激励时钢轨中不同导波模式的振幅因子;通过有限元仿真对激励方法进行验证,使用上述激励方法对轨头和轨底缺陷进行检测,结果表明该激励方法激励的波模式较为单一,可明显识别损伤回波信号。该方法可用于开发适用于损伤识别的单一波模式激励策略,显示无损检测和结构健康监测应用的潜力。

关键词: 钢轨; 超声导波; 正交模式展开法; 激励方法

中图分类号: U213.2 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2023.02.010

Study on Excitation Method of Ultrasonic Guided Wave Mode in Rails

HU Chenyang^{1,2}, CHEN Rong^{1,2}, JIANG Wenqiang^{1,2}, XU Jingmang^{1,2}, LI Haoran^{1,2}, WANG Ping^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Ultrasonic guided waves, with the advantages of long propagation distance and wide detection range, can be used for rapid and long-distance detection of railways. The excitation and propagation of a relatively single guided wave mode is conducive to signal processing and damage identification. In this paper, based on the normal mode expansion method, the excitation method of the single wave mode in the rail was studied. At the same time, the empirical formula of the cross-sectional amplitude factor that can consider the tangential excitation was given to analyze the amplitude factors of different guided wave modes in the rail when excited at different positions. The excitation method, verified by finite element simulation, was used to detect the damage of rail head and rail bottom. The results show that the method, with the excitation of relatively single wave mode, can clearly identify the damage echo signal. The method can be used to develop a single-wave mode excitation strategy suitable for damage identification, showing the potential for non-destructive testing and structural health monitoring applications.

Key words: rail; ultrasonic guided wave; normal mode expansion method; excitation method

超声检测是无损检测的一种常用方法,因其检测范围广、检测效率高的优点,广泛应用于无损检测和结构健康监测^[1]。在运用超声波技术检测一些特殊材质(如板材、管道、钢轨)时,超声波在介质内部传播,遇到边界会不断发生折射、反射及模式转换,从而能够有效的识别缺陷。导波具有频散、多模式特性,选择最

佳的导波模式和激励频率对伤损检测具有重大的实践意义。

在基于超声导波的缺陷检测研究中,许多学者已对简单的波导结构(板、管道)开发特定检测模式的激励方法。Ditri等^[2]基于正交模式展开(NME)方法以确定通过规定的表面牵引力可产生结构的任何引导波模式的振幅,并应用于空心圆柱体导波模式的激励。Zhang等^[3-4]利用磁致伸缩换能器激励弹性空心圆柱中的轴对称和非轴对称导波,使用时滞圆形阵列换能器激励弹性空心圆柱体中的主要弯曲导波。Niu等^[5]

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-02-20
基金项目: 国家自然科学基金(51978586, 52122810); 四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0033)
第一作者: 胡辰阳(1991—),男,河北石家庄人,博士研究生。
E-mail: yang250513@163.com
通信作者: 徐井芒(1987—),男,河北清河人,教授,博士。
E-mail: mang080887@163.com

通过有限元数值模拟和试验研究,提出一种激励和传播扭转 $T(0,1)$ 波模式的方法,以检测钢管中的缺陷。Ren 等^[6]在表面贴装压电元件的平板中模拟导波激励;马书义等^[7]考虑两种典型的非轴对称载荷,采用正交模式展开方法建立导波激励声场与边界载荷的量化关系,进而分析各模式导波的产生机理及载荷阵列对纵向导波激励的影响。Pelts 等^[8]采用梳状换能器,通过设置换能器的数量、空间、大小、激励脉冲序列和其他参数来激发特定模式,并通过大量的仿真证明。吴斌等^[9]根据波结构特征将位移荷载加载到有限元模型上来激发板上的单一 S_0 和 A_0 模式。He^[10]通过优化电磁声阵列元件的类型,抑制某些模式的产生和激励信号能量的增加。Rose 等^[11]设计多通道时间延迟控制系统,通过控制换能器阵列中的时差来激发管道中的特定模式。Zhang 等^[12]基于正交模式展开方法研究 T 型板中导波模式的激发和传播。Philtrona 等^[13]基于可量化的波特征来识别最佳模式点,在搜索附近的模式点之后,可以选择对缺陷具有最高敏感性或提供最大穿透能力的最佳模式和频率。

钢轨是常见的波导结构,其结构形式复杂。超声导波在钢轨中的传播模式相对于简单波导(板、管道)要多,最佳导波模式激励难度大,许多学者致力于钢轨中特定模式激励方法的研究。Xu 等^[14]提出一种在轨道中激发特定形式超声导波的方法,通过截面模式形状来确定每种模式的激励方向、激励系数、激励位置。Shi 等^[15]利用模式形状矩阵计算出模态的最佳激励方向和激励节点得到期望的波模式并仿真验证该方法的正确性。卢超等^[16]采用一种模式力锤激发轨头的垂直振动模式;Gharaibeh 等^[17]选择能量集中在轨头上的模式来检测轨头缺陷,通过试验对信号进行激励并成功地确定距激励位置 9 m 处的轨头横向缺陷;余祖俊等^[18]通过仿真计算来研究激励位置、激励方向与响应结果的关系,替代传统的试验验证方法,在钢轨中激励出特定模态的导波信号。胡剑虹等^[19]根据导波在钢轨中传播的相速度频散曲线确定梳状传感器的工作点,设计能够在钢轨中激励特定模态导波的梳状传感器。

钢轨横截面复杂且模式类型多种多样时,控制相对困难。因此,采用寻求一种激励方法来激励对钢轨缺陷敏感的单一模式导波具有重要意义。本文重点研究钢轨中的导波模式的激励方法,通过正交模式展开法(NME)确定不同位置激励时每种波模式的振幅因子,给出考虑切向激励方式的横截面振幅因子经验公式,进而确定最佳导波模式的激励方式以指导无损检测和结构健康检测。

1 半解析有限元方法

在半解析有限元方法中,仅对波导的横截面进行有限元离散,对传播方向进行解析处理。该方法能高效地计算导波频散特性,但需要假设沿传播方向的钢轨横截面几何形状和材料特性是恒定的。我们考虑一个弹性各向同性钢轨,波在 x 方向上传播,在 $y-z$ 平面上为等截面。可用空间分布函数 u 来表示钢轨种任一点的位移值^[20-21],表达式为

$$u(x, y, z, t) = \begin{bmatrix} u_x(x, y, z, t) \\ u_y(x, y, z, t) \\ u_z(x, y, z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_x(y, z) \\ U_y(y, z) \\ U_z(y, z) \end{bmatrix} e^{j(kx - \omega t)} \quad (1)$$

式中: k 为波数; ω 为频率; t 为时间; 虚数单位 $j = (-1)^{0.5}$ 。

采用有限元法建立单元质量矩阵和刚度矩阵,并将其组合成整体矩阵和自由谐波振动的矩阵特征值问题。

$$[K_1 + jkK_2 + k^2K_3 - \omega^2M]U = 0 \quad (2)$$

式中: K_n ($n = 1, 2, 3$) 为与波数相关的矩阵; M 为质量矩阵; U 为特征向量。

为计算特定频率下的波数,式(2)可等价代换为

$$[A - kB]\bar{U} = 0 \quad (3)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} K_1 - \omega^2M & 0 \\ 0 & -K_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -jK_2 & -K_3 \\ -K_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} U \\ kU \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(3)产生 m 个正向和 m 个反向特征值对的 $2m$ 个特征值输出。计算出的特征值可以是实数、复数或虚数。复数和虚数特征值表示渐逝模式,而实数特征值表示选定频率下的传播模式。群速度 v_g 计算式为

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{U^T(jK_2 + 2kK_3)U}{2\omega U^T M U} \quad (7)$$

2 正交模式展开(NME)方法

Auld^[22]使用互异性原理证明无损耗材料中导波模式的正交性,表达式为

$$\nabla \cdot (V_2^* \cdot T_1 + T_2^* \cdot V_1) = 0 \quad (8)$$

$$V_1 = V_m e^{-jk_m x} \quad T_1 = T_m e^{-jk_m x} \quad (9)$$

$$V_2 = V_n e^{-jk_n x} \quad T_2 = T_n e^{-jk_n x} \quad (10)$$

式中: V_1 、 T_1 和 V_2 、 T_2 分别为控制弹性波在均匀各向

同性和线弹性连续体中传播的弹性力学方程的两个不同解的质点速度、应力场; V_m 、 V_n 、 T_m 、 T_n 分别为波模式 m 、 n 的速度和应力振型。

应用正交模式展开法求得简谐波激发时波模式 m 在正传播方向的幅值 $A_m(x)$ 、功率流 P_m 分别为

$$A_m(x) = \frac{e^{-jk_m x}}{4P_m} \oint e^{jk_m x} [\oint_l V_m^* \cdot (T \cdot n) dl] dx \quad (11)$$

$$P_m = -\frac{1}{4} \int_s (V_m^* \cdot T_m + T_m^* \cdot V_m) \cdot x ds \quad (12)$$

式中: $T \cdot n$ 为外表面法向加载条件 n 为外法向矢量; V 、 T 分别为速度场、应力场; l 为钢轨横截面外轮廓; k_m 为波模式 m 的波数。

本文仅考虑在结构边界上 x (纵向)、 n (垂直于封闭表面的向外矢量) 方向的荷载分布, 其表达式为

$$T \cdot n = \begin{cases} -p_1(x) p_2(y, z) n & |x| \leq L \quad (y, z) \in l \\ 0 & |x| > L \end{cases} \quad (13)$$

式中: $p_1(x)$ 、 $p_2(y, z)$ 分别为轴向、法向加载函数; L 为加载区域的轴向范围。

将式(13)代入式(11)可得

$$A_m(x) = \frac{e^{-jk_m x}}{4P_m} \langle p_1(x) e^{jk_m x} \rangle \langle p_2(y, z) V_m^* \cdot n \rangle \quad (14)$$

式中 $\langle p_1(x) e^{jk_m x} \rangle$ 、 $\langle p_2(y, z) V_m^* \cdot n \rangle$ 分别为轴向、横截面振幅因子, 其定义为

$$\langle p_1(x) e^{jk_m x} \rangle = \int_{-L}^L e^{jk_m x} p_1(x) dx \quad (15)$$

$$\langle p_2(y, z) V_m^* \cdot n \rangle = \oint_l p_2(y, z) V_m^* \cdot n \cdot n dl \quad (16)$$

3 导波模式激发

3.1 波模式选取

应用半解析有限元方法计算钢轨的频散曲线和导波结构, 其中, 材料密度为 7 850 kg/m³, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 网格最大尺寸为 5 mm。30 kHz 下波模式的波结构见图 1。图中纵向模态振型用颜色表示, 其中波模式名称按波数 k 从大到小排序。



图1 30 kHz 下波模式的波结构

上述波模式的相速度频散曲线见图 2。由图 2 可知, 当波模式相速度变化较大时, 由不同频率分量组成的波包将发生频散, 使接收信号的波形相对于发射信号失真。因此, 需选择具有良好非频散特性的模式。

在 30 kHz 频率下, 波模式 1~8 频散曲线相速度变化缓慢, 不易发生频散。其中, 波模式 1、2 的模态振型集中于轨底, 适用于轨底裂纹检测; 波模式 7 的模态振型集中于轨头, 适用于轨头检测; 波模式 8 的模态振型集中于轨腰和轨头, 适用于轨头、轨腰检测。

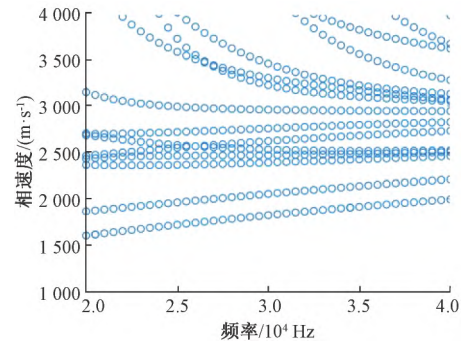


图2 相速度频散曲线

3.2 振幅因子

将正交模式展开法用于钢轨表面牵引力的工况。

由式(12)可得 30 kHz 频率下波模式功率流, 见图 3。

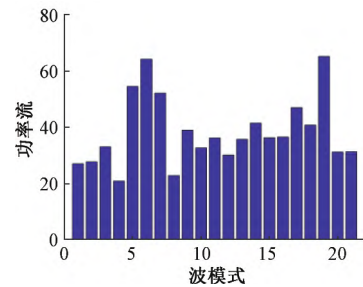


图3 30 kHz 频率下波模式功率流

考虑牵引载荷是均匀载荷分布。载荷分布函数

$p_1(x)$ 、 $p_2(y, z)$ (无时间延迟) 表达式为

$$p_1(x) = \begin{cases} P_1 & |x| \leq L \\ 0 & |x| > L \end{cases} \quad (17)$$

$$p_2(y, z) = \begin{cases} P_2 & (y, z) \in l \\ 0 & (y, z) \notin l \end{cases} \quad (18)$$

将式(17)代入式(15), 可得载荷长度为 $2L$ 、第 m 个波模为波数 k_m 的轴向振幅因子函数表达式为

$$\langle p_1(x) e^{jk_m x} \rangle = \frac{2P_1 \sin(k_m L)}{k_m} \quad (19)$$

当 $k_m L = (2q+1) \times \pi/2$ $q=0, 1, 2, \dots, \infty$ 时, 轴向振幅因子将达到最大值。因此 $2L = (2q+1) \pi \lambda_m$ $q=0, 1, 2, \dots, \infty$ 是在特定频率下模式的有效加载长度; λ_m 为波模式的波长。

将式(18)代入式(16), 可得横截面振幅因子为

$$\langle p_2(y, z) V_m^* \cdot n \rangle = P_2 \oint_l V_m^*(y, z) \cdot n dl \quad (20)$$

由式(20)可知, 横截面振幅因子与位移波结构有

关(速度是位移的时间导数),当在钢轨外轮廓(y, z)位置处 m 波模式波结构幅值最大,而其他波模式波结构幅值接近 0 时,该位置易激发较为单一的波模式 m ;对于横截面对称的波导结构,当在对称位置激励对称波结构的波模式 m ,而此处其他波模式波结构幅值接近于 0,或存在具有较大幅值的非对称波模式时,也容易激发较为单一的波模式 m ;对于横截面对称的波导结构,当在对称位置反对称激励反对称波结构的波模式 m 时,而此处其他波模式幅值接近于 0,或存在具有较大幅值的对称波模式时,也容易激发较为单一的波模式 m 。

式(20)是针对轮廓法向的激励,波模式能否激励与波结构幅值有很大的联系。本文根据式(20)给出同时考虑切向激励的横截面振幅因子经验公式用于导波模式的激励,其表达式为

$$\langle p_2(y, z), \mathbf{V}_m^* \cdot \mathbf{n} \rangle = P_2 \oint_l \mathbf{V}_m^*(y, z) \cdot \mathbf{x} dl \quad (21)$$

式中: \mathbf{x} 为横截面坐标系 y, z 轴的单位矢量。

30 kHz 频率下钢轨外轮廓节点波结构垂向幅值见图 4。图 4 中,横坐标表示节点号。节点是轨道轮廓上的离散点。以钢轨轨头顶点为初始节点,沿轮廓线逆时针排序离散点。波模式 7 在图 4 所示的节点 1 处振幅最大,而其他波模式振幅均接近 0。因此,模式 7 在这个节点可以被有效激发,因为它的振幅很大,而其他的波模式由于振幅相对较低,可以被激发的波模式数量非常少。对称波模式 1 在图 4 所示的节点 47 和 88 处振幅最大,此处还存在一个幅值较大的反对称模式,其他波模式振幅均接近 0。因此,对称激励时波模式 1 在这个节点可以被有效激发,模式 2 同理。

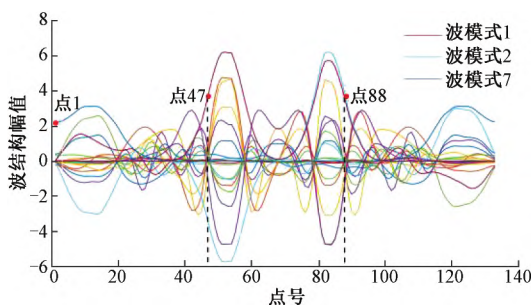


图 4 30 kHz 频率下钢轨外轮廓节点波结构垂向幅值

钢轨外轮廓节点波结构横向幅值见图 5。图中横坐标表示节点号,节点是轨道轮廓上的离散点。以钢轨轨头顶点位置为初始节点,沿轮廓线逆时针排序离散点。模式 8 在节点 1 处振幅最大,除波模式 9 外其他波模式振幅均接近 0。因此,模式 8 在这个节点可以被有效激发,因为它的振幅很大,而其他的波模式由于振幅相对较低,可以被激发的波模式数量非常少。

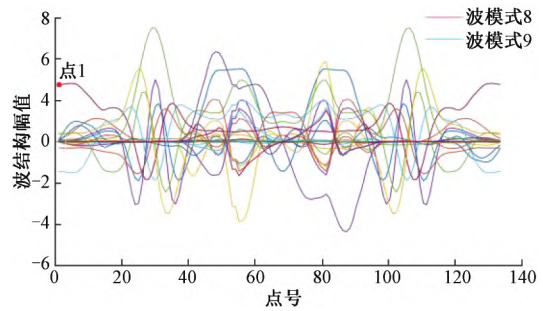


图 5 钢轨外轮廓节点波结构横向幅值

3.3 波模式激励仿真与验证

利用 Ansys/LS-Dyna 模拟导波在钢轨中的传播。仿真中钢轨材料的密度为 7850 kg/m^3 ,杨氏模量取 210 GPa,泊松比取 0.3。本文采用 8 节点实体单元对钢轨 3D 实体单元模型进行网格划分,网格尺寸为 4 mm。

仿真过程中,在基本轨端面(或中心位置)的网格加载垂向激励信号,激励信号为 Hanning 窗调制的中心频率为 30 kHz 的 10 周期正弦波信号。距离激励位置 1.5、3.5 m 范围内,每隔 4 mm 设置一组数据采集阵列,有 500 个数据采集节点。

以波模式 7、1、8 为例,对提取的结果进行 2D-FFT 处理,并转换到频率-波数-振幅域。将半解析有限元方法得到的频散曲线与 2D-FFT 的结果进行比较。

(1) 波模式 7

图 6 为波模式 7 模拟计算结果提取的垂向位移云图,导波在钢轨轨头传播。

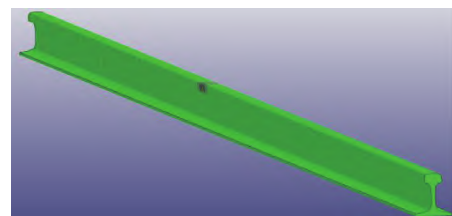


图 6 波模式 7 垂向位移云图

波数频散曲线见图 7。由图 7(a)可知,激发的主要模式为波模式 7。由图 7(b)可知,对结果进行二维滤波,保留波模式 7。将滤波后节点 1 垂向位移信号按照空间位置扫描的顺序进行组合,得到时空波场信号,结果如图 8 所示。拾取距激励点 2.5 m 处的信号,其信号时域见图 9。由图 8、图 9 可知,扫描过程中接收到的导波信号主要由一个主波包组成。

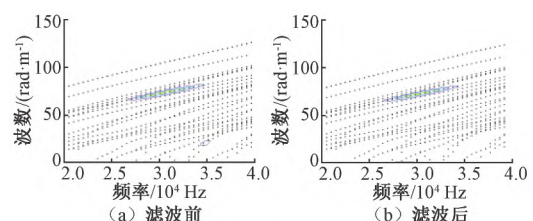


图 7 波数频散曲线

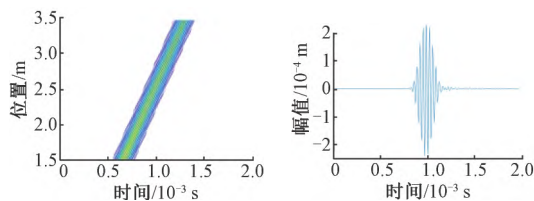


图8 时空波场信号

图9 信号时域

(2) 波模式 1

图 10 为波模式 1 模拟计算结果提取的垂向位移云图, 导波在钢轨轨底传播。



图 10 模式 1 垂向位移云图

由图 11 的波数频散曲线对比图可知, 激发的主要模式为波模式 1。将节点 47 垂向位移信号按照空间位置扫描的顺序进行组合, 得到时空波场信号, 结果如图 12 所示。拾取距激励点 2.5 m 处的信号, 其信号时域见图 13。由图 12、图 13 可知, 扫描过程中接收到的导波信号主要由一个主波包组成。

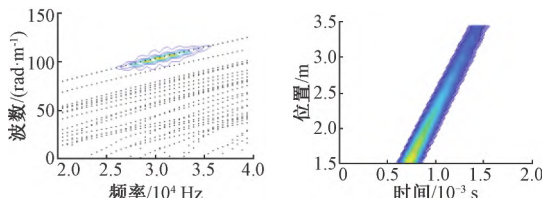


图 11 波数频散曲线

图 12 时空波场信号

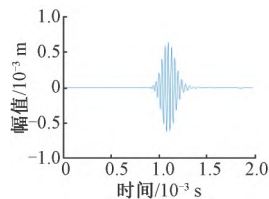


图 13 信号时域

(3) 波模式 8

图 14 为波模式 8 模拟计算结果提取的横向位移云图, 导波在钢轨轨头和轨腰传播。

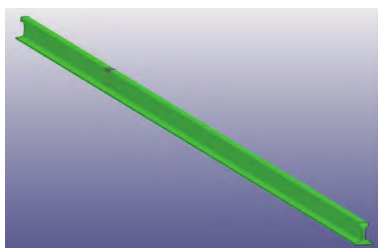


图 14 模式 8 横向位移云图

由图 15 的波数频散曲线对比图可知, 激发的主要模式为波模式 8。将节点 1 横向位移信号按照空间位置扫描的顺序进行组合, 得到时空波场信号, 结果见图 16。拾取距激励点 2.5 m 处的信号, 其信号时域见图 17。由图 16、图 17 可知, 扫描过程中接收到的导波信号主要由一个主波包组成。

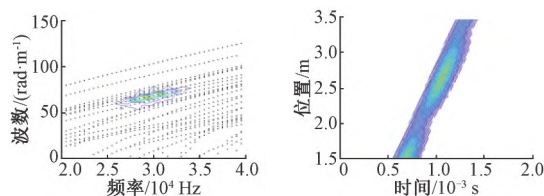


图 15 波数频散曲线

图 16 时空波场信号

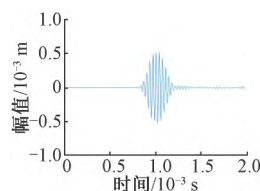


图 17 信号时域

3.4 缺陷检测

采用有限元仿真方法验证导波检测钢轨轨头和轨底缺陷的可行性, 分别激励波模式 8、1。钢轨长度为 10 m, 激励位置为 5 m 处, 信号拾取位置为 6 m 处。激励信号为 Hanning 窗调制的中心频率为 30 kHz 的 10 周期正弦波信号。钢轨轨头和轨底缺陷示意图 18, 其中轨头裂纹距轨顶的距离为 3 cm, 轨底裂纹距轨底边缘的距离为 6 cm。

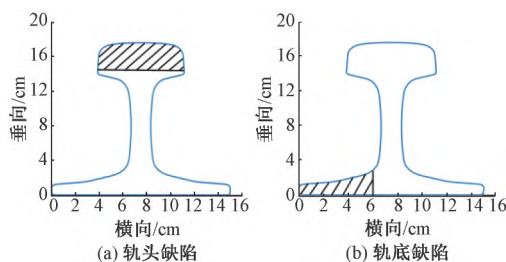
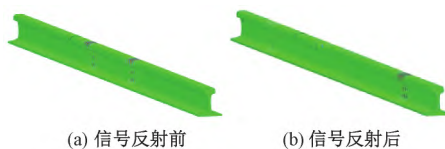


图 18 钢轨轨头和轨底缺陷示意

图 19 为轨头缺陷检测的横向位移云图, 导波在钢轨轨头和轨腰传播, 遇到裂纹后产生反射。信号拾取位置处横向位移时域见图 20, 主要由两个波包组成, 可以看到明显的回波信号。



(a) 信号反射前

(b) 信号反射后

图 19 轨头缺陷检测的横向位移云图

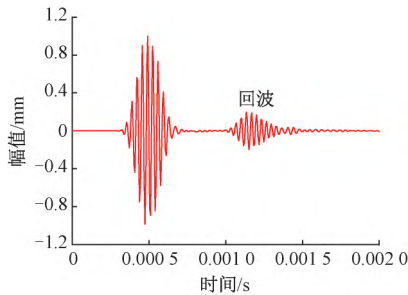


图 20 信号拾取点处横向位移时域

图 21 为轨底缺陷检测的垂向位移云图, 导波在钢轨轨底传播, 遇到裂纹后产生反射。信号拾取点处垂向位移时域见图 22, 主要由两个波包组成, 可以看到明显的回波信号。

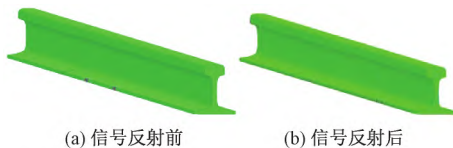


图 21 轨底垂向位移云图

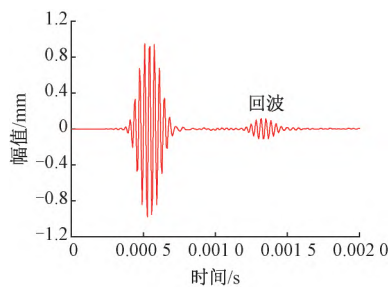


图 22 信号拾取点处垂向位移时域

4 结论

超声导波具有传播距离长、探测范围大等优点, 可应用于铁路快速、远距离检测。在连续焊接钢轨的完整性检测中具有相当大的优势。由于轨道的截面形状复杂, 存在许多导波模式, 因此, 通过导波技术对轨道进行无损检测的前提是研究导波模式的激励方法以激发特定的模式。较好的激励方式可激发较为单一的导波模式, 且有利于导波信号处理及损伤识别。本文有如下结论:

(1) 本文基于正交模式展开 (NME) 方法对钢轨中较单一波模式的激励方式开展研究, 分析不同导波模式的功率流、轴向振幅因子和横截面振幅因子, 并给出可考虑切向激励的横截面振幅因子经验公式。所提方法可通过振幅因子 (尤其是横截面振幅因子) 给出合适的导波激励位置, 以激发期望的导波模式。

(2) 使用半解析有限元法获取 30 kHz 频率下 CHN60 钢轨中导波模式的波结构特征, 分别选取适用

于轨头、轨腰和轨底检测的导波模式, 并给出所选取导波模式的最佳激励位置, 仿真结果表明钢轨中超声导波激励方法的正确性较好。在轨头和轨腰位置设置缺陷, 使用上述激励方法对伤损进行检测, 结果表明该激励方法所激励的波模式较单一, 可明显识别伤损回波信号。

(3) 伤损有效识别与导波波长相关, 频率越高, 波长越小, 所能识别的伤损尺寸也越小。当频率较高时, 钢轨中的传播的导波模式越多, 波结构特征越复杂, 此时需要在波结构特征分析的基础上, 进一步结合梳状激励方式以激发特定波数的导波模式。未来将针对不同的伤损类型, 进一步结合该方法开展面向钢轨缺陷检测的超声传感器研究、传感器分布方式、信号收发及处理方式、钢轨探测长度和范围等研究, 以有效指导钢轨伤损监测的工程化应用。

参考文献:

- [1] ROSE J L, Ultrasonic Guided Waves in Solid Media: Plates [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] DITRI J J, ROSE J L. Excitation of Guided Elastic Wave Modes in Hollow Cylinders by Applied Surface Traction [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(7): 2589-2597.
- [3] ZHANG X W, TANG Z F. Excitation of Axisymmetric and Non-axisymmetric Guided Waves in Elastic Hollow Cylinders by Magnetostrictive Transducers [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2016, 17(3): 215-229.
- [4] ZHANG X W, TANG Z F, LÜ F, et al. Excitation of Dominant Flexural Guided Waves in Elastic Hollow Cylinders Using Time Delay Circular Array Transducers [J]. Wave Motion, 2016, 62: 41-54.
- [5] NIU X, DUAN W, CHEN H P, et al. Excitation and Propagation of Torsional T(0,1) Mode for Guided Wave Testing of Pipeline Integrity [J]. Measurement, 2019, 131: 341-348.
- [6] REN B Y, LISSENDEN C J. Modeling Guided Wave Excitation in Plates with Surface Mounted Piezoelectric Elements: Coupled Physics and Normal Mode Expansion [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(4): 045014.
- [7] 马书义, 武湛君, 刘科海, 等. 非轴对称多元载荷条件下管道中纵向模态导波激励 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 90-97.
- MA Shuyi, WU Zhanjun, LIU Kehai, et al. Longitudinal Guided Waves in Pipes Excited by Non-axisymmetric Multielement Surface Loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 90-97.
- [8] PELTS S P, JIAO D, ROSE J L. A Comb Transducer for Guided Wave Generation and Mode Selection [C]//1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. San Antonio: IEEE, 1996: 857-860.

- [9] 吴斌,周伟,郑阳,等. 基于波结构的 Lamb 波单一模态激励仿真 [J]. 无损检测, 2011, 33(7): 1-4, 10.
WU Bin, ZHOU Wei, ZHENG Yang, et al. Excitation of Single Mode Lamb Wave Simulation Based on Wave Structure [J]. Nondestructive Testing Technology, 2011, 33(7): 1-4, 10.
- [10] HE C F. Array of Fundamental Torsional Mode EMATs and Experiment in Thick-wall Pipe with Small Diameter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 14-20.
- [11] LI J, ROSE J L. Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2001, 48(3): 761-768.
- [12] ZHANG J Q, WU Z J, YANG Z Y, et al. Excitation of Guided Wave Modes in Arbitrary Cross-section Structures by Applied Surface Traction [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(6): 065010.
- [13] PHILTRON J H, ROSE J L. Mode Perturbation Method for Optimal Guided Wave Mode and Frequency Selection [J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1817-1824.
- [14] XU X N, ZHUANG L, XING B, et al. An Ultrasonic Guided Wave Mode Excitation Method in Rails [J]. IEEE Access, 2018, 6: 60414-60428.
- [15] SHI H M, ZHUANG L, XU X N, et al. An Ultrasonic Guided Wave Mode Selection and Excitation Method in Rail Defect Detection [J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1170.
- [16] 卢超,刘芮辰,常俊杰. 钢轨垂直振动模态的导波频散曲线、波结构及应用 [J]. 振动工程学报, 2014, 27(4): 598-604.
LU Chao, LIU Ruichen, CHANG Junjie. Guided Waves Dispersion Curves and Wave Structures of the Rail's Vertically Vibrating Modes and Their Application [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4): 598-604.
- [17] GHARAIBEH Y, SANDERSON R, MUDGE P, et al. Investigation of the Behaviour of Selected Ultrasonic Guided Wave Modes to Inspect Rails for Long-range Testing and Monitoring [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(3): 311-324.
- [18] 余祖俊,许西宁,史红梅,等. 钢轨中超声导波激励响应计算方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2068-2075.
YU Zujun, XU Xining, SHI Hongmei, et al. Study on the Computation Method for the Response of Ultrasonic Guided Waves in the Rail under Sinusoidal Excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2068-2075.
- [19] 胡剑虹,唐志峰,蒋金洲,等. 基于 SAFE 方法的钢轨梳状传感器激励特定模态导波研究 [J]. 中国铁道科学, 2017, 38(1): 37-42.
HU Jianhong, TANG Zhifeng, JIANG Jinzhou, et al. Research on Excitation of a Particular Mode Guided Wave in Rail by Comb Transducer Based on Safe Method [J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 37-42.
- [20] HAYASHI T, SONG W J, ROSE J L. Guided Wave Dispersion Curves for a Bar with an Arbitrary Cross-section, a Rod and Rail Example [J]. Ultrasonics, 2003, 41(3): 175-183.
- [21] BARTOLI I, MARZANI A, LANZA DI SCALEA F, et al. Modeling Wave Propagation in Damped Waveguides of Arbitrary Cross-section [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3/4/5): 685-707.
- [22] AULD B A. Acoustic Fields and Waves in Solids [M]. New York: Wiley-Interscience Pub., 1973.

(责任编辑 贾红梅 周乐云)