

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311579

非线性超声导波钢轨裂纹检测模态选取研究*

杨文林, 史红梅, 牛笑川, 许西宁, 朱力强

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要:不同模态对不同位置裂纹的敏感程度不同,针对裂纹检测时模态选取不准的问题,研究50 kHz激励下可累积二次谐波模态对模态振型和裂纹位置的影响,提出了由3个指标评定的最优裂纹敏感模态选取方法(selection of optimal crack-sensitive mode, SOCSM),通过相对非线性系数 β 随裂纹生长的变化趋势评价模态对裂纹的敏感度。为准确激励出所需模态提出了最优模态激励算法(optimal mode excitation, OME),为验证SOCSM法和OME法的有效性和准确性,以CHN60钢轨轨腰处裂纹为例进行了数值仿真分析及实验验证。结果表明,采用OME法能准确激励出模态组合11和模态组合1;50 kHz激励下模态组合11的 β 随裂纹生长单调增加,而模态组合1几乎没有变化,说明模态组合11更适合检测轨腰处的裂纹,对裂纹的微小变化非常敏感,两个模态组合均能产生可累积二次谐波,裂纹的存在会影响导波传播,即影响信号的幅值大小。

关键词:非线性超声导波;最优裂纹敏感模态;最优模态激励;可累积二次谐波;数值仿真

中图分类号: TB553 TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 580.80

Research on mode selection for nonlinear ultrasonic guided waves rail crack detection

Yang Wenlin, Shi Hongmei, Niu Xiaochuan, Xu Xining, Zhu Liqiang

(School of Mechanical, Electrical Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The sensitivity of different modes to cracks at different locations are different. In response to the problem of inaccurate mode selection when detecting cracks, the selection of optimal crack-sensitive mode (SOCSM) method evaluated by three indicators is proposed, which considers the effects of cumulative second harmonic modes combination, mode vibration pattern and crack location under 50 kHz excitation. The sensitivity of modes to cracks is evaluated by the trend of relative nonlinear coefficients with crack growth. The optimal mode excitation (OME) algorithm is proposed to accurately excite the required modes. To evaluate the effectiveness and accuracy of the SOCSM and OME methods, numerical simulation analysis and experimental verification are conducted by using the crack at the waist of the CHN60 rail as an example. The results show that the OME method can accurately excite mode combination 11 and mode combination 1. Under 50 kHz excitation, the mode combination 11 β monotonically increases with crack growth, while mode combination 1 β has almost no change. The mode combination 11 β is more suitable for detecting cracks at the rail waist and is very sensitive to small changes in cracks. Both modal combinations can generate cumulative second harmonic. The presence of cracks can affect the propagation of guided waves, which affects the amplitude of the signal.

Keywords: nonlinear ultrasound guided waves; optimal crack-sensitive mode; optimal mode excitation; accumulable second harmonic; numerical simulation

0 引言

铁路运输业发展迅速,运营强度不断增加,在我国经

济战略布局、旅游业等方面都发挥着重要作用。但钢轨作为铁路的基础设施长期受到列车的高速冲击、振动、磨损、温变、风沙等持续作用,以及随着使用年限的增长,极易产生疲劳裂纹。尽早发现裂纹并采取相应的措施(钢

收稿日期:2023-06-20 Received Date: 2023-06-20

* 基金项目:国能朔黄铁路技术开发项目(GJNY-21-65)、国家自然科学基金(52272429)项目资助

轨表面裂纹打磨^[1]、铣磨^[2])对于保障列车的安全运行至关重要。

相较于传统(线性)超声导波检测技术^[3],非线性超声导波检测技术对于构件中存在的微裂纹非常敏感。一般认为裂纹宽度在0.2~0.5 mm^[4],长度小于超声波半波长^[5,6]的裂纹为微小裂纹。导波传播经过微裂纹,微裂纹会产生“呼吸”效应,同时导波发生畸变产生高次谐波频率成分,对高次谐波信号分析后即可实现对构件中微裂纹的检测^[7,8]。导波具有多模态特性,选择并激励出检测构件中特定部位裂纹的最优导波模态意义重大。

近年来,众多学者针对如何选择检测所需的最优模态做了大量研究^[9-11]。吴荣兴等^[9]通过判断薄板频散曲线中模态的耦合情况选取出了最佳检测模态。由于钢轨横截面复杂,超声导波在钢轨传播过程中具有多种模态,各模态的传播速度、振动形式、衰减系数等特性不同,其振动能量分别分布在轨头、轨腰、轨底和钢轨整个截面上。因此,不同的模态适用于不同的检测对象。许西宁等^[10]提出了一种用于钢轨应力检测的导波模态选取指标模型,根据指标模型选择的导波模态对钢轨应力较为敏感。Xing等^[11]建立了一种用于钢轨裂纹检测的导波模态选择模型,但所用线性超声导波选取出的对钢轨中裂纹敏感的最佳检测模态仅对宏观裂纹敏感。本文利用非线性超声导波的研究方法完善此模型,使其对于检测钢轨中存在的微小裂纹同样适用。

在研究特定导波模态的激励方法时,许多学者对规则横截面结构做了大量研究^[12-14]。Veit等^[12]使用超声相控阵探头在铝板和复合材料板中激励出了特定的超声导波模态。Khalili等^[13]在频率厚度约为20 MHzmm处激励出了低色散单模态兰姆波。在管道缺陷检测中,Niu等^[14]为检测钢管中缺陷提出一种激励和传播扭转波模态的方法。由于板和管道横截面规则,模态类型较少,通过相位和时间控制,可以准确地选择和控制在模态产生。但钢轨模态众多,激励出所需模态难度较大。为激励出钢轨中的特定模态,廖林等^[15]基于阵列传感技术在钢轨中激励出高信噪比的单模态超声导波,激励出的轨底模态对轨底缺陷灵敏度较高。胡辰阳等^[16]基于正交模态展开法激励出钢轨中单一的波模态。采用特定的激励方法激励出钢轨中的特定模态用于检测钢轨内部缺陷尤为重要。

提出对裂纹敏感的导波模态选取模型,同时提出一种改进的导波模态激励算法以确定各导波模态的激励方向和激励位置。利用半解析有限元(semi analytical finite element, SAFE)求解60轨频散曲线,分析超声导波在钢轨中的传播特性。为研究导波能否产生可累积二次谐波引入二次谐波模态幅值系数。根据二次谐波模态幅值系数选取出了能产生可累积二次谐波的模态对,依据导波

模态的振动特性以及裂纹所处位置建立了对裂纹敏感的导波模态选取模型,同时提出了导波模态激励算法。以钢轨轨腰处内部裂纹为例,根据所建立的导波模态选取模型,选择最优模态组合对微裂纹进行检测。通过ABAQUS仿真与实验室实验验证了模态选取模型的有效性,同时验证了导波模态激励算法的有效性。为验证所选取出的最优模态对微裂纹敏感,同样以轨腰处裂纹为例,设计裂纹长度生长实验,用相对非线性系数表征裂纹生长所带来的影响。

1 理论分析

为研究特定激励频率下存在的导波模态及其振动特性,用SAFE法求解了钢轨的频散曲线以进一步求解各模态振型。

1.1 钢轨频散曲线

以我国CHN60钢轨^[17]为研究对象,用SolidWorks软件建立钢轨三维实体模型,假设钢轨截面为X-Y平面,超声导波传播方向为Z方向。钢轨上各点的位移、应力、应变可表示为:

$$\mathbf{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{xy}]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz} \quad \gamma_{xy}]^T$$

应力和应变以及应变和位移的关系为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[\mathbf{L}_x \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{L}_y \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + \mathbf{L}_z \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right] \quad (3)$$

式中: \mathbf{C} 为弹性常数矩阵。 \mathbf{L}_x 、 \mathbf{L}_y 和 \mathbf{L}_z 为

$$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对钢轨截面进行有限元离散,如图1所示,网格大小为5 mm,离散后的钢轨截面共645个节点,1 096个三角形单元,其中每个节点有3个自由度,分别对应着3个方向的位移。钢轨材料参数如表1所示。

表1 CHN60钢轨的材料参数

Table 1 Material parameters of CHN60 rails

密度	杨氏模量	拉梅系数	泊松比
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	λ/GPa	ν
7 800	210	120.58	0.3

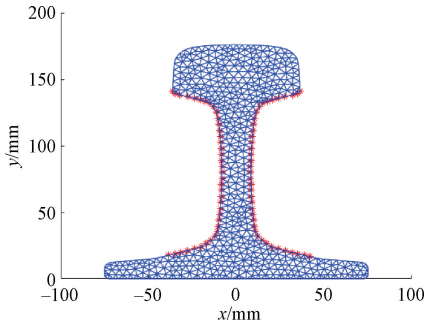


图 1 钢轨截面有限元离散

Fig. 1 Finite element discretization of rail sections

离散后单元内任意一点的位移表示为:

$$\mathbf{u}_i^{(e)}(x, y, z, t) = \mathbf{N}(y, z) \mathbf{q}^{(e)} e^{i(kx - \omega t)} \quad (5)$$

式中: k 为三角形单元的 3 个节点序号; $\mathbf{N}(y, z)$ 为形函数矩阵; $\mathbf{q}^{(e)}$ 为单元 e 的节点位移矢量。根据哈密顿原理, CHN60 钢轨中超声导波波动方程为^[18]:

$$[\mathbf{K}_1 + k\mathbf{K}_2 + k^2\mathbf{K}_3 - \omega^2\mathbf{M}]\mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

式中: \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_3 为总体刚度矩阵; \mathbf{M} 为总体质量矩阵; k 为波数; ω 为角频率; \mathbf{u} 特征向量为导波模式振型。

通过求解式(6), 得到波数与角频率之间的关系, 即相速度 C_p 为:

$$C_p = \frac{\omega}{k} \quad (7)$$

由此得到相速度 C_p 的频散曲线如图 2 所示, 为 5 mm 网格大小离散下的 CHN60 钢轨相速度频散曲线。求导式(6)得:

$$\frac{\partial}{\partial k}([\mathbf{K}_1 + k\mathbf{K}_2 + k^2\mathbf{K}_3 - \omega^2\mathbf{M}]\mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

将式(8)展开, 变换得:

$$\mathbf{u}_l^T \left[\frac{\partial}{\partial k}(\mathbf{K}_1 + k\mathbf{K}_2 + k^2\mathbf{K}_3) - 2\omega \frac{\partial \omega}{\partial k} \mathbf{M} \right] \mathbf{u} = 0 \quad (9)$$

式中: \mathbf{u}_l^T 为左特征向量。群速度定义为:

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (10)$$

将式(9)移相变换得:

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\mathbf{u}_l^T (\mathbf{K}_2 + 2k\mathbf{K}_3) \mathbf{u}}{2\omega \mathbf{u}_l^T \mathbf{M} \mathbf{u}} \quad (11)$$

根据式(11)得到 CHN60 钢轨群速度频散曲线如图 3 所示, 图 2、3 中每个数据点表示一个模态。

1.2 二次谐波模态幅值系数

超声导波在钢轨中传播时, 假设钢轨中微观粒子的位移为^[19]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{(1)} + \mathbf{u}^{(2)} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{u}^{(1)}$ 与 $\mathbf{u}^{(2)}$ 分别为导波在传播过程中引起粒子的线性和非线性位移, $|\mathbf{u}^{(1)}| \gg |\mathbf{u}^{(2)}|$ 。非线性超声波的

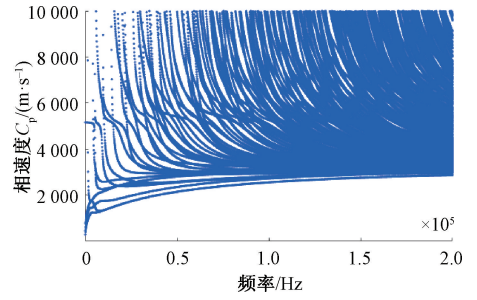


图 2 CHN60 钢轨相速度

Fig. 2 CHN60 rail phase speed

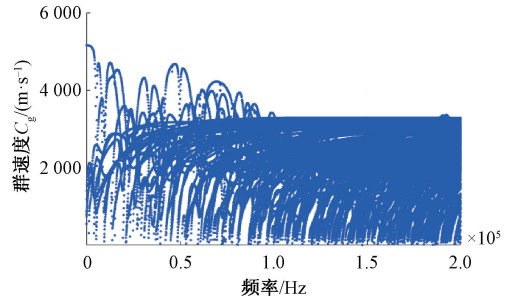


图 3 CHN60 钢轨群速度

Fig. 3 CHN60 rail group speed

波动方程和边界条件为^[19]:

$$(\lambda + \mu) \mathbf{u}_{y,yz}^{(2)} + \mu \mathbf{u}_{x,yy}^{(2)} + \mathbf{f}^{(1)} = \rho \ddot{\mathbf{u}}^{(2)} \quad (13)$$

$$\mathbf{S}^{L(2)} \mathbf{n}_\perp = -\mathbf{S}^{NL(1)} \mathbf{n}_\perp \quad (14)$$

式中: λ 、 μ 为拉梅系数; ρ 为材料密度; \mathbf{f} 为钢轨受到的体力; \mathbf{S} 为材料拉格朗日应力张量; 上标 L 、 NL 分别表示线性与非线性; \mathbf{n}_\perp 为材料表面各坐标轴方向上的单位向量。 $\mathbf{f}^{(1)} = \mathbf{f}(\mathbf{u}^{(1)})$, $\mathbf{S}^{L(2)} = \mathbf{S}^L(\mathbf{u}^{(2)})$, $\mathbf{S}^{NL(1)} = \mathbf{S}^{NL}(\mathbf{u}^{(1)})$ 。

Auld 应用模态扩展法求解式(13)和(14)得到二次谐波位移 $\mathbf{u}^{(2)}$ 的表达式为^[20]:

$$\mathbf{u}^{(2)} = \sum_{n=1}^N A_n(z) \mathbf{u}_n e^{-i2\omega t} + c. c. \quad (15)$$

角频率在 2ω 的情况时, N 为超声导波模态数量, n 为第 n 个超声导波模态, \mathbf{u}_n 为第 n 个超声导波模态的模态振型, $c. c.$ 表示复共轭, $A_n(z)$ 为第 n 个超声导波模态的幅值函数。

根据欧拉公式, 将幅值函数 $A_n(z)$ 化简、整理得:

$$\bar{A}_n(z) = \begin{cases} \left| \frac{f_n^{surf} + f_n^{vol}}{2kk \cdot P_{nn}} \sin \frac{kk \cdot z}{2} \right|, & k_n^* \neq 2k_1 \\ \left| \frac{f_n^{surf} + f_n^{vol}}{4P_{nn}} z \right|, & k_n^* = 2k_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: k_1 为基频模态波数, k_n^* 为二次谐波 n 模态波数, 上标 * 表示复共轭, $kk = k_n^* - 2k_1$; P_{nn} 为 n 模态沿导波传播方向的平均功率流; f_n^{surf} 、 f_n^{vol} 分别表示基频模态通过钢轨

的体积、表面传递到二次谐波 n 模态的功率通量; $\bar{A}_n(z)$ 的大小表示二次谐波 n 模态信号中二次谐波幅值的高低, $\bar{A}_n(z)$ 越大, 则相应二次谐波模态的幅值越高。

$$P_{nn} = -\frac{1}{2} \int_{\Omega} (\mathbf{v}_n^{\text{T}*} \cdot \mathbf{T}_{(n)}^L) \cdot \vec{\mathbf{n}} d\Omega \quad (17)$$

式中: \mathbf{v}_n 为二次谐波 n 模态的速度向量; 上标 T^* 表示转置复共轭, $\vec{\mathbf{n}}$ 为垂直于钢轨横截面的单位向量; Ω 为钢轨横截面面积; $\mathbf{T}_{(n)}^L = \mathbf{T}^L(\mathbf{u}_n)$, \mathbf{T} 为固体介质材料基尔霍夫应力张量。

$$f_n^{\text{surf}} = \int_S (\mathbf{v}_n^{\text{T}*} \cdot \mathbf{S}_{(1)}^{\text{NL}}) \cdot \vec{\mathbf{n}} dS \quad (18)$$

$$f_n^{\text{vol}} = \int_{\Omega} \mathbf{v}_n^{\text{T}*} \cdot \mathbf{f}_{(1)} d\Omega \quad (19)$$

其中, $\mathbf{S}_{(1)}^{\text{NL}} = \mathbf{S}^{\text{NL}}(\mathbf{u}_n^{(1)})$, $\mathbf{f}_{(1)} = \mathbf{f}(\mathbf{u}_n^{(1)})$, $\mathbf{u}_n^{(1)}$ 为二次谐波 n 模态对应的基频模态振型。由式(16)可知, 当 $k_n^* \neq 2k_1$ 时, 随导波传播距离增加, $\bar{A}_n(z)$ 呈振荡趋势, 当 $k_n^* = 2k_1$ 时, $\bar{A}_n(z)$ 随导波传播距离增加逐渐增大。对于能产生累积二次谐波的模态组合, 当传播距离 z 一定时, 累积二次谐波模态的振幅系数为:

$$\bar{A}_n = \left| \frac{f_n^{\text{surf}} + f_n^{\text{vol}}}{4P_{nn}} \right| \quad (20)$$

由式(16)可知, 若满足一个模态的二次谐波随距离增加可累积, 需满足两个条件, 分别为相位匹配以及能量传递不为 0, 即:

$$C_{pn} = 2C_{p1} \quad (21)$$

$$f_n^{\text{surf}} + f_n^{\text{vol}} \neq 0 \quad (22)$$

式中: C_{pn} 表示二次谐波 n 模态的相速度; C_{p1} 表示基频模态的相速度; f_n^{surf} 、 f_n^{vol} 、 P_{nn} 的详细计算公式参考文献[19]。根据式(21)可选出能产生可累积二次谐波的模态组合。

1.3 模态振型与相对非线性系数

由文献[19]可知, f_n^{surf} 、 f_n^{vol} 和 P_{nn} 均由二次谐波模态振型 \mathbf{u}_n 及对应的基频模态振型 $\mathbf{u}_n^{(1)}$ 决定。所以, 只需求解得二次谐波模态振型 \mathbf{u}_n 及其对应的基频模态振型 $\mathbf{u}_n^{(1)}$, 即可求得该模态组合的幅值系数。

求解式(6)得到的特征向量 \mathbf{u} 即为导波模态振型, 由图 2 可知, 低频下模态数量较少, 随频率增大, 模态数目逐渐增多。频率为 50 kHz 时钢轨中存在 31 种模态, 而频率为 100 kHz 时钢轨中存在 73 种模态。

文献[19,21]关于非线性超声波的研究中, 通常用相对非线性系数来表征材料的非线性以及接触声学非线性, 而接触声学非线性是超声波使裂纹产生“呼吸”效应的部分, 即超声波经过裂纹后产生了二次谐波信号。相对非线性系数表示如下:

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (23)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为接收信号基频和二次谐波的幅值。理论推导下, 基频的振幅不会发生改变, 相对非线性系数 β 主要由二次谐波的幅值决定。因此, 振幅系数 \bar{A}_n 与相对非线性系数 β 呈正相关, 理论推导中 \bar{A}_n 的变化规律可以通过实验中 β 的变换所反映。

2 最优裂纹敏感模态(SOCSM)选取

同一裂纹对不同模态的作用机理不同, 选取对裂纹最敏感的模态有利于微裂纹的检测, 为选取对微裂纹敏感的最优导波模态(selection of optimal crack sensitive mode, SOCSM), 提出 3 个评价指标。指标 1 为二次谐波模态幅值系数 \bar{A}_n , 选取出能产生可累积二次谐波的模态对。通过分析导波模态振型与裂纹所处位置建立了另外两个指标, 裂纹能量分布和裂纹衰减度。

2.1 振幅系数评价指标

当激励信号中心频率为 50 kHz 时, 根据式(21)从 CHN60 轨的频散曲线中选取出能产生可累积二次谐波的模态对, 计算模态对的模态振型后代入式(20)中计算模态幅值系数 \bar{A}_n 。模态对的相速度、群速度以及模态幅值系数如表 2 所示。

由表 2 可知, 模态对 1~16 均满足能量传递不为 0 这一条件, 则这些模态对都可以产生可累积的二次谐波。每个模态对的 \bar{A}_n 都不同, \bar{A}_n 越大, 表示在相同的传播距离下该模态对产生的二次谐波幅值越高, 相对非线性系数 β 越大。

2.2 裂纹能量分布评价指标

导波检测钢轨中存在的裂纹时, 为用特定模态准确探测到裂纹, 选择在裂纹位置有明显振动而其他位置没有明显振动的模态。用裂纹能量分布指标来表征各导波模态在裂纹位置处的振动情况, 分别计算基频与二次谐波的该指标值, 用同一模态组合中基频与二次谐波的平均值作为对应模态组合的值。

在轨腰处创建裂纹, 如图 4 所示, 裂纹两 endpoints 坐标分别为 $C_1(x_{c1}, y_{c1})$ 和 $C_2(x_{c2}, y_{c2})$, 三角形为裂纹的两 endpoints, 根据式(24)求出裂纹中点的横纵坐标 $O(x_o, y_o)$, 圆圈为裂纹中心。以 D 为阈值, 如式(25)所示。以点 O 为圆心, D 为半径作圆, 此圆范围即为裂纹区域, 将在圆内的节点作为裂纹区域节点, 个数记为 N_{crack} 。星形为在阈值范围内的节点。

$$x_o = \frac{x_{c1} + x_{c2}}{2}, y_o = \frac{y_{c1} + y_{c2}}{2} \quad (24)$$

$$D = \sqrt{(y_{c2} - y_{c1})^2 + (x_{c2} - x_{c1})^2} \quad (25)$$

各模态钢轨截面节点的振动用 $U(N, m)$ 表示, 该振

表 2 50 kHz 下模态组合参数

Table 2 Modal combination parameters at 50 kHz

模态组合	频率/kHz	相速度/(m·s ⁻¹)	群速度/(m·s ⁻¹)	\bar{A}_n
1	50	2 547	2 923.3	4.94
	100	2 553	3 242.7	
2	50	2 578	2 852.98	4.48
	100	2 557	3 242.7	
3	50	2 801	3 174.1	13.67
	100	2 817	3 194.9	
4	50	2 952	3 021.3	10.06
	100	2 959	3 039.5	
5	50	3 003	2 924.3	30.76
	100	3 002	2 994.9	
6	50	3 019	2 924.3	85.98
	100	3 013	3 006.7	
7	50	3 055	2 855.6	55.17
	100	3 043	3 039.1	
8	50	3 091	2 648.4	72.67
	100	3 098	2 970.3	
9	50	3 316	2 461.7	23.33
	100	3 322	2 892.6	
10	50	3 623	2 165.1	2.52
	100	3 618	2 655.3	
11	50	3 807	2 554.1	44.25
	100	3 809	2 480.2	
12	50	4 125	2 300.5	12.54
	100	4 138	2 208.2	
13	50	4 254	2 256.4	49.85
	100	4 264	2 331.1	
14	50	5 011	2 058.5	12.19
	100	4 995	2 287.0	
15	50	5 382	2 762.8	30.24
	100	5 374	2 771.2	
16	50	6 116	1 936.1	28.37
	100	6 112	2 391.6	

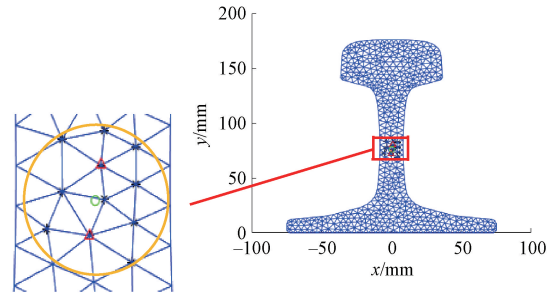


图 4 裂纹附近区域节点

Fig. 4 Nodes in the area around the crack

$$AvDis_{crack}^m = \frac{\sum_{N_1}^{N_{crack}} U(N, m)}{N_{crack}} \quad (27)$$

$$AvDis_{all}^m = \frac{\sum_{N_1}^{N_{all}} U(N, m)}{N_{all}} \quad (28)$$

式中: N_{all} 为钢轨截面所有节点数。裂纹区域占总截面能量分布为:

$$Av^m = \frac{AvDis_{crack}^m}{AvDis_{all}^m} \quad (29)$$

设频率 f 下有 m 个导波模态, 第 mi 个导波模态的裂纹能量分布 M_1 如下:

$$M_1 = \left[\frac{Av^{mi}}{\max [Av^1 \dots Av^{mi} \dots Av^m]} \right] \quad (30)$$

式中: 分子为当前模态裂纹区域占总截面的能量分布; 分母为所有模态中裂纹区域占总截面能量分布的最大值。

由式(30)可知, $M_1 \in [0, 1]$ 。模态裂纹能量分布指标 M_1 越大, 该模态在裂纹区域的振动越大, 对裂纹越敏感。因此, 选择 M_1 较大的模态检测裂纹。

2.3 裂纹衰减度评价指标

裂纹的存在会影响导波传播, 导波经过裂纹时会有一定程度的衰减, 在第 4 节进行了验证。选择导波模态衰减程度这一评价指标来模拟裂纹对导波传播的作用。二次谐波的产生是导波在经过裂纹后所产生的, 不存在衰减, 因此只选取 50 kHz 超声导波激励情况下所产生的导波模态进行研究。

裂纹对模态的作用越大, 模态衰减越大。用裂纹方向向量在模态振动方向向量上的投影来表示裂纹对模态的作用。当模态振动方向与裂纹方向平行时, 裂纹的存在对模态传播几乎没影响; 当模态振动方向与裂纹方向互相垂直时, 裂纹方向向量在模态振动方向向量上的投影为 0, 此时, 模态传播会受到极大的影响。

动数据包括 x, y, z 3 个方向的振动:

$$U(N, m) = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (26)$$

式中: U_x, U_y, U_z 分别为模态在 x, y, z 3 个方向的振动位移; N 为截面节点序号; m 为导波模态序号。裂纹附近节点平均振动位移如式(27)所示, 钢轨截面节点平均振动位移如式(28)所示。

对于轨腰处裂纹来说,裂纹两端点坐标分别为 $C_1(x_{c_1}, y_{c_1})$ 、 $C_2(x_{c_2}, y_{c_2})$, 裂纹方向向量为:

$$\mathbf{Crack} = [x_{c_2} - x_{c_1}, y_{c_2} - y_{c_1}, 0] \quad (31)$$

遍历钢轨截面所有节点,分别找到距离 C_1 、 C_2 最近的两个节点 C_3 、 C_4 ,根据式(6)计算节点 C_3 、 C_4 在3个方向上的振动 $U_x(N, m)$ 、 $U_y(N, m)$ 、 $U_z(N, m)$, 模态振动方向向量为:

$$\mathbf{ModeVib}(m) = [U_x^4 - U_x^3, U_y^4 - U_y^3, U_z^4 - U_z^3] \quad (32)$$

其中, $U_x^3 = U_x(3, m)$, $U_x^4 = U_x(4, m)$ 。振动位移和为:

$$SVib(m) =$$

$$\sqrt{(U_x^4 - U_x^3)^2 + (U_y^4 - U_y^3)^2 + (U_z^4 - U_z^3)^2} \quad (33)$$

用裂纹方向向量在模态振动方向向量上的投影来表示裂纹衰减度评价指标 M_2 ,当激励频率为 f ,导波模式 mi 的衰减度评价指标为:

$$M_2 = \left\{ \frac{|\mathbf{Crack} \cdot \mathbf{ModeVib}(mi)|}{SVib(mi)} \right\} \left/ \max \left[\frac{|\mathbf{Crack} \cdot \mathbf{ModeVib}(m)|}{SVib(m)} \right] \right. \quad (34)$$

式中:分子为裂纹方向在当前模态振动方向上的投影占比;分母为裂纹方向在所有模态振动方向上投影占比的最大值。

由式(34)可知, $M_2 \in [0, 1]$,模态衰减度 M_2 越小,该模态振动方向与裂纹夹角越接近 90° ,即裂纹对导波模态的作用越大,此时模态衰减最严重。因此,尽量选择 M_2 较大的模态检测裂纹。

2.4 求解指标与模态选取

激励频率为 50 kHz,设置轨腰处裂纹两端坐标分别为 $C_1(0.85, 79.98)$ 、 $C_2(-0.37, 72.08)$ 。根据式(30)和(34)计算所有模态组合的 M_1 和 M_2 ,如图5所示,同时将二次谐波模态幅值系数进行对比。可以看出,模态组合11轨腰裂纹能量分布 M_1 最大,模态组合6振幅系数值 \bar{A}_n 最大,说明在相同的传播距离下,模态组合6将产生最大的二次谐波幅值。

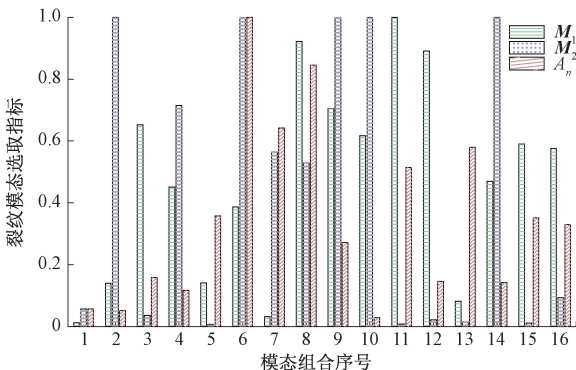


图5 轨腰裂纹评价指标

Fig.5 Indicators for evaluating rail waist cracks

3个指标对裂纹敏感度有不同的影响,因此各自的权重系数并不相同,而裂纹能量分布评价指标是选取导波模态的主要指标^[11],该指标的权重系数设置为最大。而裂纹衰减度评价指标只要保证衰减不为0即满足条件,所以该指标的权重设置较小。裂纹敏感度 M 表征不同导波模态组合对裂纹的敏感程度,本文设置 M_1 所占比重为0.8, M_2 与可累积二次谐波 \bar{A}_n 所占比重分别为0.1,如式(35)所示。

$$M = 0.8 \times M_1(m) + 0.1 \times M_2(m) + 0.1 \times \bar{A}_n(m) \quad (35)$$

根据式(35)求解 M ,并对 M 归一化处理如图6所示,从图6可以看出,模态组合11的 M 最大,因此选用模态组合11来检测轨腰处的裂纹,选用 M 较低的模态组合1作为对比。本文提出的模态选取方法适用于任意复杂截面的波导结构,具有普适性。

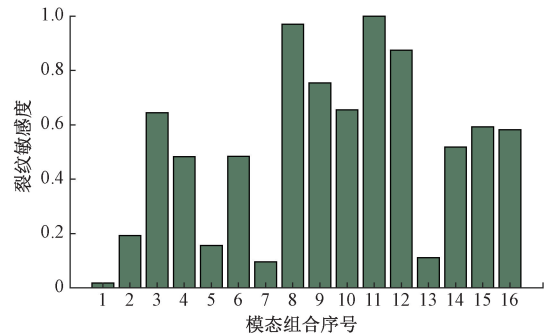


图6 裂纹敏感度

Fig.6 Crack sensitivity

本文选取出的模态组合11只适合用于检测2.2节创建的位于轨腰中心的裂纹,当钢轨内微裂纹位置改变,如微裂纹距离轨面的位置发生变化时,选取出的针对该裂纹的检测的最优模态组合也会发生变化,微裂纹位置改变主要会对裂纹能量分布与裂纹衰减度这两个评价指标产生影响。裂纹能量分布评价指标的选取原则是选择在裂纹位置有明显振动而其他位置没有明显振动的模态,由于各模态振型不同,裂纹位置改变,直接影响各模态裂纹能量分布评价指标的大小。不同位置裂纹造成导波模态衰减程度也并不相同,导致裂纹衰减度评价指标会发生变化。所以针对钢轨中具体位置的微裂纹,需要综合考虑模态振型与微裂纹所在位置,开展对应的研究分析。

3 最优模态激励算法

随机施加激励,激励出所需要的模态几乎不可能,因此有必要确定合适的激励位置和方向。提出了最优模态激励(optimal modal excitation, OME)算法,包括激励方向选择和激励位置确定,基频为50 kHz。

图 7 所示为模态组合 11 和模态组合 1 的基频模态振型图,包括钢轨原始截面和导波模态振动图,象征了导波模态在钢轨横截面上所引起的节点位移,揭示了导波模态的振动方式。由图 7 可知,不同模态在钢轨中传播时的振动位置及振动位移并不相同,模态组合 11 振动集中在轨腰,说明该模态主要在轨腰传播,适合检测轨腰裂纹;而模态组合 1 振动主要出现在轨底,表明其主要在轨底传播,不适合检测轨腰处的裂纹。与 2.4 节裂纹能量分布指标求解结果一致。

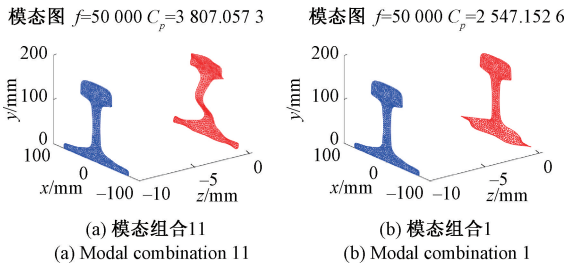


图 7 模态基频振型图

Fig. 7 Modal fundamental frequency vibration diagram

3.1 激励方向选择

采用振动位移直方图法,统计各模态在 x 、 y 、 z 3 个方向的振动。模态位移向量为钢轨整个截面上所有节点分别在 x 、 y 、 z 3 个方向的振动,如式(36)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_i] \\ \mathbf{y} &= [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_i] \\ \mathbf{z} &= [z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_i] \end{aligned} \quad (36)$$

式中: x_i 、 y_i 、 z_i 分别为节点 i 在对应方向上的位移。将 x 、 y 、 z 3 个方向的位移分别按从小到大划分为 10 个区间,以振动幅值区间为横坐标。振动幅值包括正负,靠近区间 1(幅值为负)或区间 10(幅值为正)代表振动幅值较大,而在区间 5 附近代表振动幅值较小。纵坐标为 x 、 y 、 z 3 个方向对应区间振动幅值的大小,纵坐标值越大,说明模态在该方向的振动越大,选择该方向作为模态的最佳激励方向。

图 8 所示为模态组合 11 的基频振动位移直方图。从图 8 可以看出,直方图呈现“U”型分布,即区间 5 附近的振动幅值较小,靠近两边区间的振动幅值较大。区间 1 的 Y 方向柱状的纵坐标最大,即模态组合 11 的最优激励方向为 Y 方向。

3.2 激励位置确定

文献[22]提出,在模态的最大振幅节点处激励,便可激励出所需模态,但其将钢轨截面外部节点作为研究对象存在一定弊端,当振动幅值最大处不在钢轨外部节点或出现多个振幅极值点时会出现误判。本文首先对所

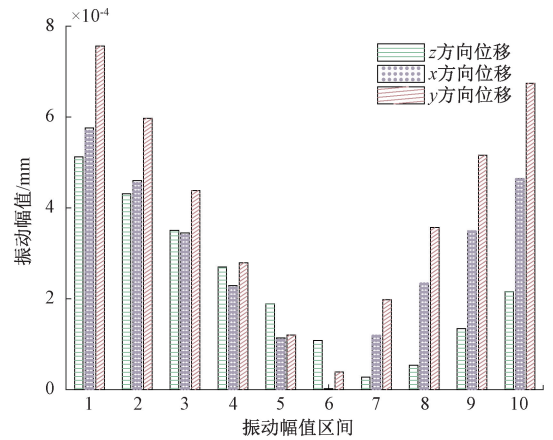


图 8 模态组合 11 基频振动位移直方图

Fig. 8 Histogram of fundamental frequency vibration displacements for modal combination 11

有的振动位移排序;在钢轨截面中标出振动最大的前 6 个点;观察这 6 个节点分为几簇,使用 K-means 聚类算法找出这几簇的质心;遍历钢轨截面外部可激励节点(实际现场中为保障列车安全行驶,仅在轨腰附近安装激励探头^[22],图 1 中星形)找出离质心最近的节点,即为对应模态的最佳激励位置。

模态组合 11 最佳激励节点如图 9 所示。图 9 中星形为模态组合 11 振幅最大的前 6 个节点,分布在轨腰处且接近轨腰两端,因此 $k = 2$, k 为聚类的簇数,聚类质心坐标位置分别为 (cen_{x1}, cen_{y1}) 、 (cen_{x2}, cen_{y2}) (图 9 中三角形)。钢轨外部节点与质心之间的最短距离:

$$dis_i = \min \sqrt{(cen_x - x_i)^2 + (cen_y - y_i)^2} \quad (37)$$

式中: i 为钢轨截面外部可激励节点序号; dis_i 为节点 i 和质心 cen 之间的最短距离; cen_x 、 cen_y 分别为质心 cen 的横纵坐标; x_i 、 y_i 分别为节点 i 的横纵坐标。遍历钢轨截面所有外部可激励节点,选出了距质心最近的外部可激励节点(图 9),即 69 号与 122 号节点为模态组合 11 的最佳激励位置,圆圈所在位置节点,细节如图 10 所示。

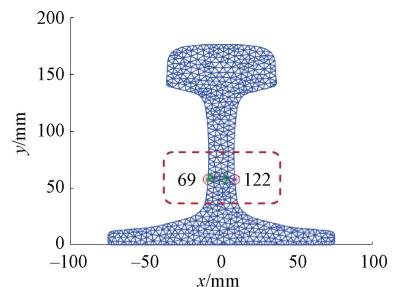


图 9 模态组合 11 最佳激励节点

Fig. 9 Optimum excitation nodes of modal combination 11

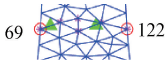


图10 图9局部放大图

Fig. 10 Partial enlarged drawing of figure 9

3.3 激励算法小结

通过 OME 算法清晰直观地给出模态组合 11 的最佳激励方向和最佳激励位置。该方法适用于任何激励频率下所有模态最佳激励方向和位置的确定,同时为实际钢轨健康监测过程提供了理论指导基础。

表 3 所示为 50 kHz 激励频率下能产生可累积二次谐波模态组合的最佳激励方向和位置,其中部分模态需要在两个或 3 个节点处同时激励。对比不同模态的最佳激励节点发现一些模态具有相同的激励位置,是因为这些模态的最大振幅位置位于轨头或轨底等远离可激励节点处,而为保障列车安全运行只在可激励节点处安装探头,轨腰处的激励节点不受影响。

表 3 50 kHz 下模态组合的最佳激励方向、位置

Table 3 Optimal excitation direction and position for modal combinations at 50 kHz

模态组合	基频相速度(m·s ⁻¹)	最佳激励方向	最佳激励节点
1	2 547	y	61,27
2	2 578	y	27,61
3	2 801	y	13,20
4	2 952	y	20,13
5	3 003	y	61,27
6	3 019	x	61,27
7	3 055	x	27
8	3 091	x	61,27
9	3 316	y	61
10	3 623	y	27,61
11	3 807	y	69,122
12	4 125	y	22,13
13	4 254	x	61,27
14	5 011	x	70,85,109
15	5 382	y	27,61
16	6 116	z	81

4 仿真及实物实验验证

采用有限元仿真软件设计仿真实验以及实验室现场实验两种方法对上述提出的算法进行验证。

4.1 仿真实验

以我国高速铁路铺设的无缝钢轨 CHN60 为研究对象,建立长为 3 000 mm 的有限元模型。设置仿真材料如表 1 所示。激励信号采用中心频率 $f=50$ kHz 汉宁窗调制的 10 周期正弦信号,如图 11 所示。有限元划分钢轨的网格大小 L_e 需满足式(38):

$$L_e \leq \frac{\lambda_{\min}}{20} = \frac{1}{20f\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (38)$$

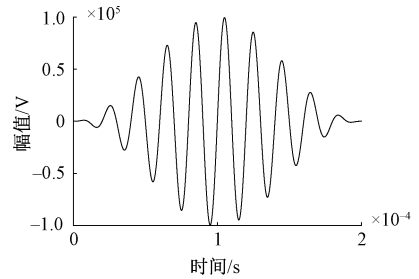


图 11 激励信号

Fig. 11 Excitation signal

其中, λ_{\min} 为声波最小波长,计算得 $\lambda_{\min}=103.8$ mm, $L_e \leq 5.19$ mm,采用裂纹附近网格细化的方法划分网格,大网格尺寸 5 mm,小网格尺寸 0.5 mm,网格类型为六面体,通过删除网格的方法制造微裂纹,删除一个网格即制造了 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm 大小的裂纹。在轨腰处设置裂纹,裂缝的位置与图 4 的相同,轨腰位置网格划分如图 12 所示。

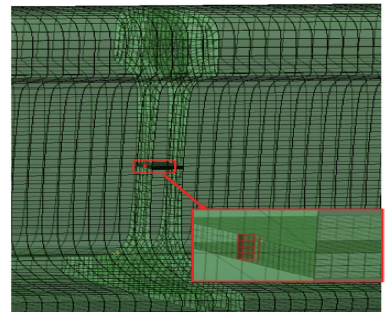


图 12 仿真模型

Fig. 12 Simulation model

模态组合 11 激励位置采用图 10 计算出的 122 和 69 号节点,激励方向为 y 方向,在距钢轨左端 1 000 mm 处设置激励点,接收节点与激励节点在同一水平线上,接收方向与激励方向一致。设置接收节点与激励节点的距离逐渐增加,最大接收位置距激励节点 600 mm,激励点和距离激励点 600 mm 的接收点在钢轨中所处位置如图 13 所示。模态组合 1 最佳激励位置为 27、61 号节点,激励方向为 y 方向,激励与接收点之间距离的设置同上。

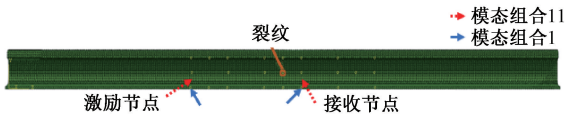


图 13 激励接收节点位置

Fig. 13 Location of excitation receiving nodes

1) OME 算法验证

为证明裂纹的存在对最优模态的提取不存在影响,分别仿真了是否存在裂纹的两个有限元模型,此处激励与接收点之间的距离为 600 mm。

模态组合 11 检测轨腰处裂纹时,仿真接收到的时域信号如图 14 所示,轨腰处删除 4 个网格,即裂纹长度为 2 mm,对比这两个信号发现,损伤模型时域信号幅值小于无损模型,可见裂纹的存在对信号传播有衰减作用,即裂纹的存在影响了导波传播。提取无损模型接收信号第 1 波包的峰值点时刻,根据式 (39) 计算得仿真群速度为 3 868.1 m/s。图 15 所示为图 14 虚线放大图,即模态组合 11 损伤模型时域信号。同样提取第 1 波包的峰值点时刻,根据式 (39) 计算得仿真传播的群速度为 3 567.4 m/s。

$$v_g = \frac{s}{\Delta t} = \frac{s}{t_2 - t_1} \quad (39)$$

式中: t_1 为激励信号的峰值点时刻,为 0.000 104 95 s; t_2 为接收信号第 1 波包的峰值点时刻。

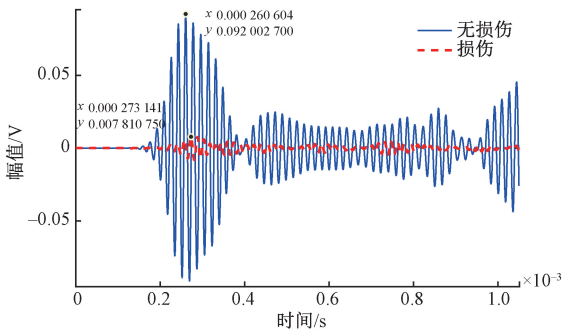


图 14 模态组合 11 仿真时域信号

Fig. 14 Time domain signals of modal combination 11

模态组合 1 检测轨腰处裂纹,其无损模型与损伤模型仿真接收到的时域信号如图 16 所示,分别提取接收信号第 1 波包峰值点时刻,根据式 (39) 计算得无损模型仿真群速度为 2 440.8 m/s,损伤模型仿真群速度为 2 558.9 m/s。

表 4 所示为模态组合 11 和模态组合 1 的两种模型的理论群速度与仿真群速度对比,从表 4 可以看出,相对误差都在 7% 以内,由此验证了裂纹的存在对最优模态的提取不存在影响。

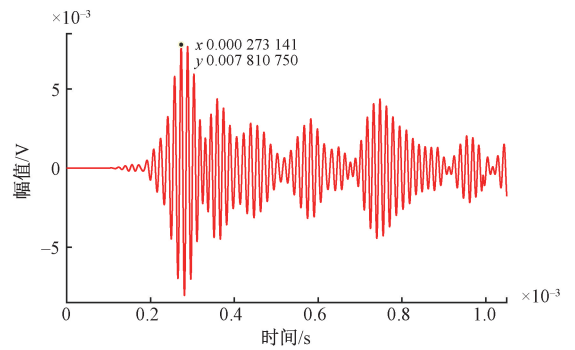


图 15 模态组合 11 损伤模型时域信号

Fig. 15 Mode combination 11 damage model time domain signal

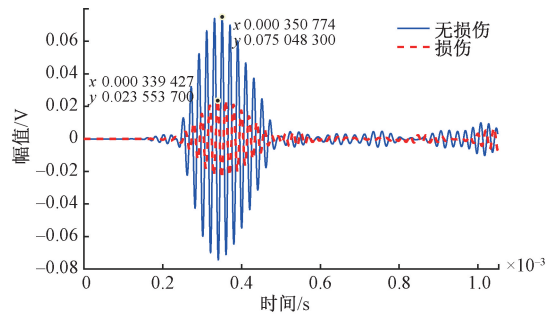


图 16 模态组合 1 仿真时域信号

Fig. 16 Time domain signals of modal combination 1

表 4 仿真与理论群速度

Table 4 Simulation and theoretical group speeds

模态组合	有限元模型	理论群速度/ (m·s ⁻¹)	仿真群速度/ (m·s ⁻¹)	相对误差/ %
11	无损模型	3 807	3 868.1	1.60
	损伤模型	3 807	3 567.4	6.29
1	无损模型	2 547	2 440.8	4.17
	损伤模型	2 547	2 558.9	0.47

对比图 14 和 16 损伤模型与无损模型时域信号可以看出,与模态组合 1 相比模态组合 11 中损伤模型的时域信号幅值远低于无损模型,这是因为模态组合 11 的激励节点位于轨腰处而模态组合 1 激励节点靠近轨底部分远离裂纹,因此模态组合 11 在钢轨传播过程中受裂纹影响更大。与图 5 所得模态组合 1 大于模态组合 11 的裂纹衰减度这一结论一致。

验证了模态组合 11 和模态组合 1 的最优激励算法,通过对比分析无损模型与损伤模型的仿真结果,发现裂纹的存在影响波包的峰值。对比仿真群速度与理论群速度发现,两者群速度非常接近,相对误差在一定范围内,

证明 OME 算法的有效性。

2) 可累积性验证

为验证模态组合 11 和模态组合 1 的二次谐波可累积,模拟仿真损伤模型(轨腰处删除 4 个网格,即裂纹长为 2 mm)激励和接收节点间的传播距离逐渐增加。

将时域信号的第 1 波包做快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)进行频域分析,两者的对数幅频曲线如图 17 所示,从图 17 可以看出,除激励信号中心频率分量 50 kHz 外,还出现了二次谐波 100 kHz 频率分量。二次谐波是非线性超声的典型特征。提取基波和二次谐波幅值代入式(23),计算随传播距离增加对应的相对非线性系数 β ,如图 18 所示。由图 18 可知, β 均随距离的增加而逐渐增大,说明模态组合 11 与模态组合 1 都能产生可累积二次谐波。且模态组合 11 的 β 值大于模态组合 1,这与表 2 中模态组合 11 的二次谐波幅值系数大于模态组合 1 结果一致。

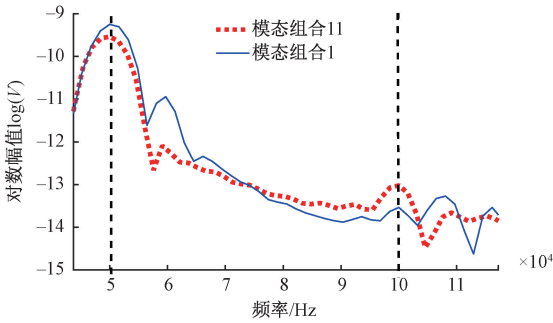


图 17 频域图

Fig. 17 Frequency domain diagram

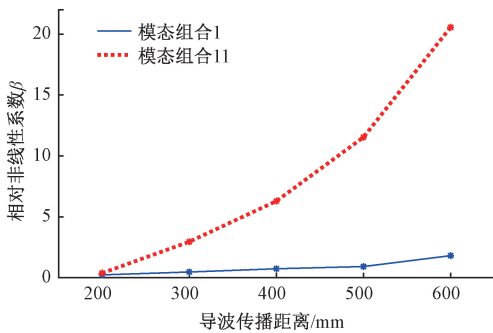


图 18 相对非线性系数随传播距离变换曲线

Fig. 18 Relative nonlinear coefficient with propagation distance

3) 裂纹敏感度验证

为判断哪对模态组合对轨腰处裂纹敏感度较强,分别用模态组合 11 与模态组合 1 对轨腰处裂纹进行仿真识别,进一步验证 SOCSM 算法。

模拟仿真微裂纹由 0.5 mm 逐渐扩展为 3 mm,选择距离激励节点 600 mm 的位置接收信号,将采集到的时域信号第一波包进行 FFT 处理,分别求得两个模态在不同

裂纹下的 β ,如图 19 所示。从图 19 可以看出,模态组合 11 的 β 随裂纹生长在逐渐增加,而模态组合 1 的 β 随裂纹生长几乎稳定在一个值附近。与此同时,模态组合 1 的 β 要小于模态组合 11 的 β 。由此可见模态组合 11 对位于轨腰处的裂纹较为敏感,模态组合 11 更适合检测识别轨腰处裂纹。

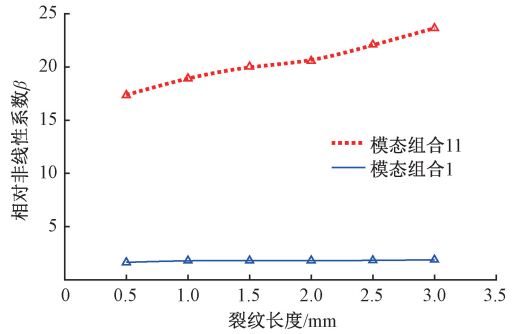


图 19 相对非线性系数随裂纹生长曲线

Fig. 19 Relative nonlinearity coefficient with crack growth

4.2 实验

为验证理论推导及仿真结果的准确性,搭建了钢轨实验平台,钢轨型号为 CHN60,轨长 2 170 mm。实验系统框图如图 20 所示。非线性超声测试系统如图 21(a)所示,实验钢轨如图 21(c)所示,通过在钢轨轨腰处粘贴不同重量的质量块模拟裂纹生长,质量块如图 21(d)所示,等级从小到大分别模拟裂纹以 0.5 mm 的间隔从 0.5 mm 生长到 3 mm 的过程。

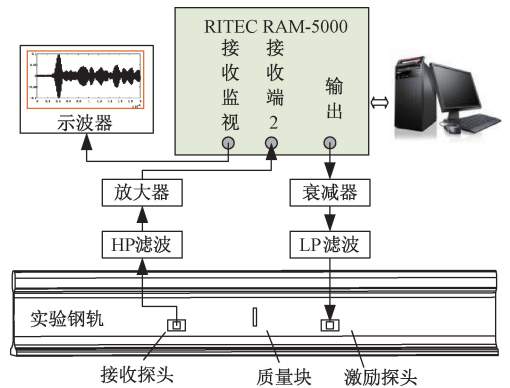


图 20 实验系统框图

Fig. 20 Experimental system block diagram

实验采用中心频率为 50 kHz 的汉宁窗调制的 10 周期正弦信号作为激励信号,如图 21(b)所示。激励探头距离钢轨最近端 66 mm,激励、接收方式采用 3.3 节所确定的方式,激励探头与接收探头之间的距离逐渐增加,最大接收位置距激励探头 600 mm,进行 OME 算法验证以及裂纹敏感度验证时接收探头距激励探头 600 mm。

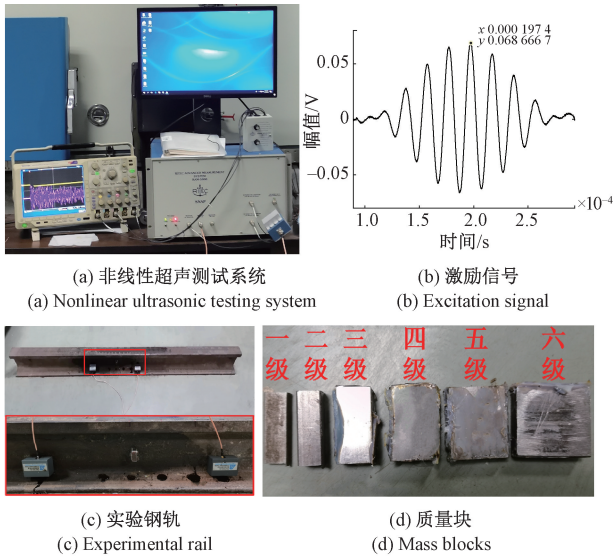


图 21 实物实验
Fig. 21 Physical experiment

1) OME 算法验证

图 22 所示为采用模态组合 1 激励接收时接收探头所接收信号,无损伤为没有粘贴质量块所接收信号(无损钢轨),损伤为粘贴 4 级质量块所接收信号(裂纹长为 2 mm 的损伤钢轨)。分别提取这两个信号第 1 波包的峰值点时刻,根据式(39)计算得无损情况下导波传播的群速度为 2 548.9 m/s,与理论群速度 2 547 m/s 相比相对误差为 0.07%,损伤情况导波传播的群速度为 2 551.0 m/s,相对误差为 0.16%。

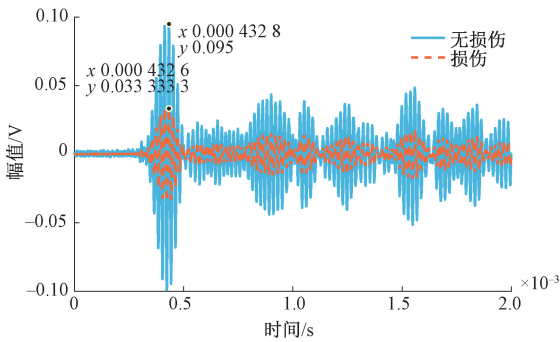


图 22 模态组合 1 时域图

Fig. 22 Time domain diagram of modal combination 1

图 23 所示为采用模态组合 11 激励接收时接收探头所接收信号,其中无损伤为没有粘贴质量块所接收信号,损伤为粘贴 4 级质量块所接收到的信号。分别提取这两个信号第 1 波包的峰值点时刻,根据式(39)计算得无损情况下导波传播的群速度为 3 807.1 m/s,与理论群速度 3 807 m/s 一致,损伤情况导波传播的群速度为 3 460.2 m/s,相对误差为 9.11%。由此证明 OME 算法能准确激励出

所需模态,且裂纹的存在并不影响模态的提取。对比图 22 和 23 发现,损伤钢轨时域信号的幅值均小于无损钢轨,可见裂纹的存在对信号传播有衰减作用,即裂纹的存在影响了导波传播。与理论和仿真结果一致。

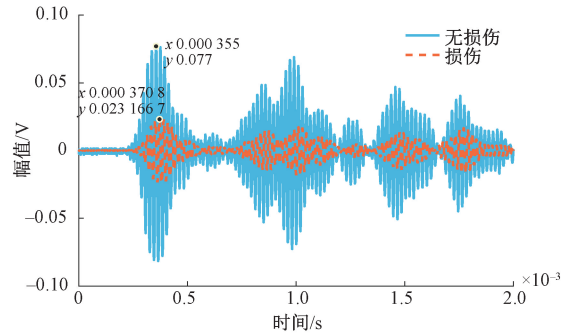


图 23 模态组合 11 时域图

Fig. 23 Time domain diagram of modal combination 11

2) 可累积性验证

在轨腰处粘贴 4 级质量块,同时激励和接收探头之间的传播距离逐渐增加。将时域信号的第 1 波包做 FFT 处理,两种模态组合的对数幅频曲线如图 24 所示,从图 24 可以看出,既有激励信号中心频率 50 kHz,又有二次谐波 100 kHz 频率成分。提取基波和二次谐波幅值代入式(23),计算随传播距离增加对应的 β ,如图 25 所示。由图 25 可知, β 均随距离的增加而逐渐增大,说明模态组合 11 与模态组合 1 都能产生可累积二次谐波。且模态组合 11 的 β 值大于模态组合 1,与理论以及仿真结果一致。

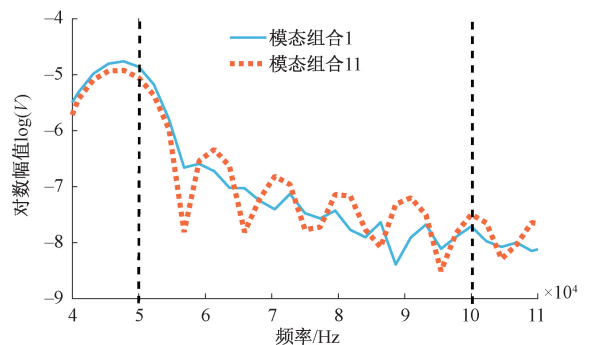


图 24 频域图

Fig. 24 Frequency domain diagram

3) 裂纹敏感度验证

逐步更换粘贴不同等级的质量块(在同一位置),模拟裂纹由 0.5 mm 逐步生长到 3 mm,选择距离激励节点 600 mm 的位置接收信号,将采集到的时域信号第 1 波包进行 FFT 分析,分别求得两个模态在不同裂纹下的 β ,如图 26 所示。

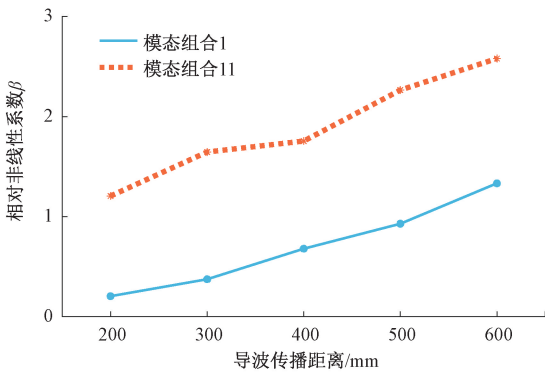


图 25 相对非线性系数随传播距离变换曲线

Fig. 25 Relative nonlinear coefficient with propagation distance

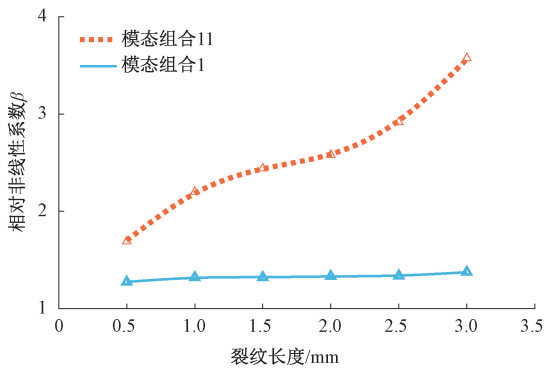


图 26 相对非线性系数随裂纹生长曲线

Fig. 26 Relative nonlinearity coefficient with crack growth

从图 26 可以看出,模态组合 11 随裂纹生长 β 在逐渐增加,而模态组合 1 随裂纹生长 β 几乎稳定在一个值附近。由此可见模态组合 11 对位于轨腰处的裂纹较为敏感,模态组合 11 更适合检测识别轨腰处裂纹。与理论结果和仿真结果一致。

5 结 论

为利用非线性超声导波选取并激励出对钢轨中某一特定位置裂纹较为敏感的导波模态,提出了 SOCSM 算法,确立了 3 个指标以提取对裂纹最敏感的导波模态组合;提出了 OME 算法,确定了导波模态组合的最佳激励方向与最佳激励位置。

创建轨腰处裂纹,用裂纹敏感模态选取算法选取出对轨腰裂纹敏感的模态组合 11,为对比验证,选取对轨腰裂纹不敏感的模态组合 1。根据 OME 算法确定激励方式,设计仿真实验与实物实验,结果表明,1)在 OME 算法所确定方向和位置激励,能激励出模态组合 11 和模态

组合 1,仿真群速度与理论群速度均在一定误差范围内。2)裂纹的存在会影响导波传播,导波传播路径越靠近裂纹所受影响越大,即幅值衰减越大。3)模态组合 11 和模态组合 1 均能够产生可累积的二次谐波,且模态组合 11 的相对非线性系数较大,与理论求解的幅值系数中模态组合 11 较大结果一致。4)经过分析相对非线性系数随裂纹生长的变化趋势发现,模态组合 11 对轨腰处裂纹的微小变化非常敏感,而模态组合 1 对轨腰处裂纹的变化及其不敏感。

参考文献

- [1] 焦彬洋,王军平,蒋俊,等. 钢轨打磨对轨面疲劳裂纹扩展的影响[J]. 中国铁路, 2022,61(4):86-91.
JIAO B Y, WANG J P, JIANG J, et al. Effect of rail grinding on the expansion of fatigue cracks in rail surface[J]. China Railway, 2022,61(4): 86-91.
- [2] 苏宝贵. 论钢轨铣磨替代传统打磨的必要性[J]. 中国设备工程, 2022,38(12):110-112.
SU B G. On the necessity of replacing traditional grinding by rail milling [J]. China Equipment Engineering, 2022,38(12):110-112.
- [3] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(11):62-70.
SHEN Y P, WU D, ZHANG B N, et al. Research on flexible piezoelectric composite material sensing technology for rail crack guided wave detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(11): 62-70.
- [4] 梁柯欣. 基于振动声调制的钢轨疲劳微裂纹损伤评价[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
LIANG K X. Evaluation of rail fatigue microcrack damage based on vibration sound modulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [5] ZHAN Y, LI F, CAO P, et al. Generation mechanism of nonlinear ultrasonic Lamb waves in thin plates with randomly distributed micro-cracks [J]. Ultrasonics, 2017,79(4):60-67.
- [6] ZHU W, XU Z, XIANG Y, et al. Nonlinear ultrasonic detection of partially closed cracks in metal plates using static component of lamb waves [J]. NDT & E

- International, 2021, 124(12):102538.
- [7] WANG K, LIU M, SU Z, et al. Analytical insight into “breathing” crack-induced acoustic nonlinearity with an application to quantitative evaluation of contact cracks[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88(5):157-167.
- [8] 门平, 董世运, 康学良, 等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5):1101-1118.
- MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Nonlinear ultrasonic diagnosis of early material damage [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5):1101-1118.
- [9] 吴荣兴, 李建中, 于兰珍, 等. 兰姆波飞机结冰传感器的最佳工作模态研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(7):8-10.
- WU R X, LI J ZH, YU L ZH, et al. Study on the optimal operating mode of the Lamb wave aircraft icing sensor [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(7):8-10.
- [10] 许西宁, 叶阳升, 江成, 等. 钢轨应力检测中超声导波模态选取方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11):2473-2483.
- XU X N, YE Y SH, JIANG CH, et al. Research on ultrasonic guided waves mode selection method in rail stress detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11):2473-2483.
- [11] XING B, YU Z, XU X, et al. Mode selection model for rail crack detection based on ultrasonic guided waves[J]. *Shock and Vibration*, 2020(9):1-19.
- [12] VEIT G, BÉLANGER P. An ultrasonic guided wave excitation method at constant phase velocity using ultrasonic phased array probes[J]. *Ultrasonics*, 2020, 102(3):106039.
- [13] KHALILI P, CAWLEY P. Excitation of single-mode lamb waves at high-frequency-thickness products [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(2):303-312.
- [14] NIU X, DUAN W, CHEN P, et al. Excitation and propagation of torsional T(0,1) mode for guided wave testing of pipeline integrity [J]. *Measurement*, 2019, 131(8):341-348.
- [15] 廖林, 袁懋诞, 纪轩荣, 等. 钢轨中高频超声导波单模态激励技术研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(18):23-31.
- LIAO L, YUAN M D, JI X R, et al. Research on high frequency ultrasonic guided waves unimodal excitation technique in steel rails [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(18):23-31.
- [16] 胡辰阳, 陈嵘, 江文强, 等. 钢轨中超声导波模式激励方法研究[J]. *铁道学报*, 2023, 45(2):93-99.
- HU CH Y, CHEN R, JIANG W Q, et al. Study on the excitation method of ultrasonic guided waves mode in steel rails [J]. *Journal of Railways*, 2023, 45(2):93-99.
- [17] 中华人民共和国铁道部. 中华人民共和国铁道行业标准:TB/T 1778—2010[S]. 北京:中国铁道出版社, 2010.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. Steel rails part 1: 43 kgm to 75 kgm rails:TB/T 2344. 1—2020 [S]. Beijing: State Railway Bureau, 2010.
- [18] 许西宁, 郭保青, 余祖俊, 等. 半解析有限元法求解钢轨中超声导波频散曲线[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10):2392-2398.
- XU X N, GUO B Q, YU Z J, et al. Solving ultrasonic guided waves dispersion curves in steel rails by semi-analytic finite element method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10):2392-2398.
- [19] NIU X, ZHU L, YU Z. The effects of stress on second harmonics in plate-like structures[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15):5124.
- [20] MULLER M F, KIM J Y, QU J, et al. Characteristics of second harmonic generation of Lamb waves in nonlinear elastic plates [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(4):2141-2152.
- [21] WANG C, ZHANG W, WANG H. Experimental study on crack detection at bolt hole edge in rail joint using the third harmonic [J]. *Journal of Physics. Conference Series*, 2020, 1676(1):12177.
- [22] 许西宁. 基于超声导波的无缝线路钢轨应力在线监测技术应用基础研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.

XU X N. Basic research on the application of ultrasonic guided waves online stress monitoring technology for seamless line rails [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

作者简介



杨文林, 2021 年于北京交通大学获得学士学位, 现为北京交通大学硕士研究生, 主要研究方向为非线性超声导波检测技术。

E-mail: 21121281@bjtu.edu.cn

Yang Wenlin received her B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2021. She is currently a M. Sc. candidate at Beijing Jiaotong University. Her main research interest includes nonlinear ultrasound guided waves detection technology.



史红梅, 1994 年于北京交通大学获得学士学位, 1997 年于北京交通大学获得硕士学位, 2012 年于北京交通大学获得博士学位, 现为北京交通大学教授, 主要研究方向为轨道交通安全状态检测与监测技术。

E-mail: hmshi@bjtu.edu.cn

Shi Hongmei received her B. Sc. , M. Sc. , and Ph. D. degrees all from Beijing Jiaotong University in 1994, 1997, and 2012, respectively. She is currently an associate professor at Beijing Jiaotong University. Her main research interest includes measurement and monitoring technology for rail transportation safety.



牛笑川 (通信作者), 2014 年于北京交通大学获得学士学位, 2021 年于北京交通大学获得博士学位, 现为北京交通大学讲师, 主要研究方向为无损评估、非线性超声检测和高速铁路基础设施检测技术。

E-mail: xchniu@bjtu.edu.cn

Niu Xiaochuan (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Beijing Jiaotong University in 2014 and 2021, respectively. He is currently a lecturer at Beijing Jiaotong University. His main research interests include nondestructive evaluation, nonlinear ultrasonic testing and testing technology for high-speed railway infrastructure.