

文章编号: 1005-0523(2025)05-0013-08



基于半解析谱元法的钢轨导波频散特性分析

罗伟兵^{1,2}, 陈华鹏¹, 李浩华^{1,3}, 康晨曦¹, 张国印¹, 周 杭¹

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西财经职业学院城乡建设学院, 江西 九江 332000;
3. 中国铁路南昌局集团有限公司萍乡工务段, 江西 萍乡 337000)

摘要:文章着重研究钢轨导波的频散特性,提出了半解析谱元法,并通过此方法建立了钢轨导波传播的有限元模型。首先,利用谱元法改进了传统半解析有限元法,推导出波导结构特征方程;其次,基于该特征方程,计算出铝板的频散曲线,分析了导波的频散特性,通过与铝板的解析解对比,验证了半解析谱元法的计算准确性;随后,建立了钢轨导波半解析谱元法的计算模型,研究了钢轨中导波的频散特性;最后,利用 RITEC RAM-5000 SNAP 非线性高能超声导波实验设备,开展了 CHN60 钢轨导波实验。结果表明,理论计算获取的群速度与实验测得的群速度高度吻合,相对误差仅为 0.99%。可见,半解析谱元法在钢轨导波频散特性分析中具有良好的精确性和可行性,为钢轨导波损伤检测提供了理论依据。

关键词:超声导波;频散特性;谱元法;钢轨

中图分类号:U213.43

文献标志码:A

本文引用格式:罗伟兵,陈华鹏,李浩华,等.基于半解析谱元法的钢轨导波频散特性分析[J].华东交通大学学报,2025,42(5):13-20.

Analysis on Guided Wave Dispersion Characteristics of Rail Through Semi-Analytical Spectral Element Methods

Luo Weibing^{1,2}, Chen Huapeng¹, Li Haohua^{1,3}, Kang Chenxi¹, Zhang Guoying¹, Zhou Hang¹

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Urban and Rural Construction, Jiangxi Vocational College of Finance and Economics, Jiujiang 332000, China; 3. Pingxiang Public Works Department, China Railway Nanchang Bureau Group Corporation, Pingxiang 337000, China)

Abstract: This study analyses the dispersion characteristics of guided waves in rails. The semi-analytical spectral element method is proposed, and the finite element model of guided wave propagation in rails is established. Firstly, the spectral element method was used to improve the traditional semi-analytical finite element method, and the characteristic equation of waveguide structure was obtained. Secondly, based on the characteristic equation, the dispersion curves of an aluminum plate were calculated, and the dispersion characteristics of guided waves were analyzed. By comparing with the analytical solution of the aluminum plate, the accuracy of semi-analytical spectral element method was verified. Subsequently, the guided wave simulation model of the rail was established, and the dispersion characteristics of the guided wave in the rail were investigated. Finally, guided wave experiment for the CHN60 rail was carried out by RITEC RAM-5000 SNAP nonlinear high-energy ultra-

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978263); 国家重点研发计划项目(2021YFE0105600); 江西省科技合作专项重点项目(20212BDH80022); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBH80002)

sonic wave experiment system. The experimental results show that the group velocity obtained by the proposed method is highly consistent with the group velocity measured by experiment, and the relative error is only 0.99%. Hence, the semi-analytical spectral element method has high accuracy and feasibility in the analysis of guided wave dispersion characteristics of the rails, which provides a theoretical basis for guided wave damage detection in rails.

Key words: ultrasonic guided wave; frequency dispersion characteristics; spectral element method; rail

Citation format: LUO W B, CHEN H P, LI H H, et al. Analysis on guided wave dispersion characteristics of rail through semi-analytical spectral element methods[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 13–20.

钢轨呈现分布距离长、结构截面复杂等特点,传统的定期人工巡检方式和钢轨位移法难以全面掌握钢轨整体的使用状况^[1-2]。导波作为一种新型无损检测技术,具有对应力与损伤敏感、检测范围大、传播距离远等优点,特别适合横截面形状一致、尺寸较长的特殊固体结构,具有检测无缝线路钢轨损伤的潜力^[3-4]。近年来,导波无损检测技术已在板^[5-6]和管道^[7-8]等得到了广泛的应用。区别于截面简单的波导结构,钢轨横截面形状的复杂性会导致各阶模态之间发生耦合,使得实验测量和理论分析更加困难。

针对钢轨中导波频散特性的研究,国内外学者做了不少的工作。其中,有限元法和有限差分法是导波分析中较为常用的数值方法,Rose等^[9]采用半解析有限元法分析了钢轨频散曲线,并将导波应用于钢轨缺陷检测。Ramatlo等^[10]采用半解析法与三维有限元耦合的计算方法对导波在钢轨中的传播进行模拟。许西宁等^[11]采用半解析有限元法得到了我国CHN60钢轨的频散曲线,并选取了适合钢轨检测的模态。戴公连等^[12]提出将有限元法与半解析有限元法相结合的方法,用以分类并追踪钢轨理想导波模态。陈嵘等^[13]提出考虑截面位置信息的三维频散曲面方法,并结合不同位置断面的波结构对钢轨频散特性沿纵向变化规律进行分析。Chen等^[14-15]利用半解析有限元方法建立了一种通用动力摄动方法,给出了损伤引起的钢轨刚度变化、钢轨受到的应力变化与导波传播模态特性变化之间的精确关系。

钢轨损伤导波检测效果很大程度上取决于所选超声导波的传播特性,如频散、波结构、衰减及可激励性。但因导波频率高而波长短,对钢轨单元网

格划分要求高导致计算工作量大、效率低,难以满足导波检测计算的实用性要求。相较于传统的有限元法,谱元法在模态分析、非线性动力学分析等领域展现出广泛的应用前景^[16-17]。在钢轨导波频散分析中,谱元法可以准确捕捉复杂结构的高阶导波模态,为导波检测技术的进一步发展提供理论支撑。

1 基于谱单元的半解析有限元法

基于谱单元的半解析有限元法,简称为半解析谱元法,是一种新兴的数值建模与分析方法。该方法结合了半解析有限元法和二维谱元法的优势,能够更有效地处理复杂形状结构的计算问题。半解析谱元法采用谱单元作为离散单元,利用频域谱分解技术来描述单元内的变量分布。相较于传统的有限元法,此方法可以利用较粗的网格实现更高的计算精度,从而大幅提高截面复杂结构的建模效率。采用半解析谱元法求解导波频散方程时,仅需对波导结构的横截面进行谱单元离散化处理,而对波导的传播方向则可采用简谐振动模态的解析方法进行求解。以CHN60钢轨为例,如图1所示,定义横截面为 y - z 平面,导波沿钢轨纵向传播方向定义为 x 方向。

根据弹性力学和有限元理论,可得钢轨中任意一点的位移场 $\mathbf{u}$ 、应力场 $\boldsymbol{\sigma}$ 和应变场 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别可以表示为

$$\mathbf{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{xy}]^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz} \quad \gamma_{xy}]^T \quad (3)$$

式中: u_x , u_y , u_z 分别为任意一点位移在 x, y, z 方向

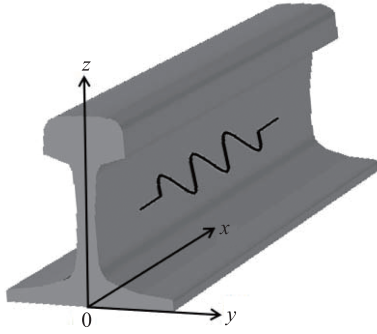


图1 CHN60钢轨导波传播模型

Fig. 1 Guided wave propagation model for CHN60 rail

的位移分量; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为3个方向的正应力分量; $\sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy}$ 分别为3个方向的切应力分量; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别为3个方向的正应变分量; $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ 分别为3个方向的切应变分量。

σ 的表达式为 $\sigma = D\varepsilon$, 其中钢轨的弹性常数矩阵 D 为

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比。

考虑钢轨为各向同性材料,其应变与位移的关系 ε 可表示为

$$\varepsilon = L_x \frac{\partial u}{\partial x} + L_y \frac{\partial u}{\partial y} + L_z \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5)$$

式中: L_x, L_y, L_z 分别为微分算子 L 在 x, y, z 方向的数值矩阵。

假设导波在钢轨中沿 x 方向传播时,位移场可以表示为简谐振动形式。则钢轨中任意一点的位移可以表达为

$$u(x, y, z, t) = u(y, z) e^{i(kx - \omega t)} \quad (6)$$

式中: k 为导波波数; ω 为导波频率; t 为导波时间; i 为虚数; e 为自然常数。

在网格单元划分方面,半解析谱元法与传统有限元的平面等参单元有些类似。半解析谱元法需要通过相应的映射函数,将钢轨横截面区域从物理单元转换到参考单元,从而使计算过程在参考单元

中完成。图2所示为局部坐标系下25节点二维谱单元,每个节点具有3个位移自由度, ξ 与 η 为二维空间中两个维度方向的参数变量。

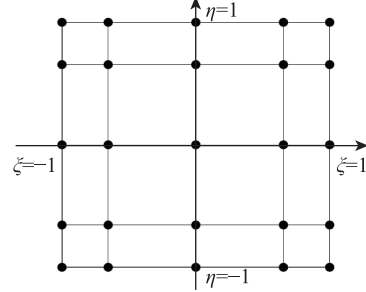


图2 25节点的二维谱单元

Fig. 2 2D spectral element with 25 nodes

根据半解析谱元法,对CHN60钢轨横截面作二维4×4阶谱单元离散,如图3所示。

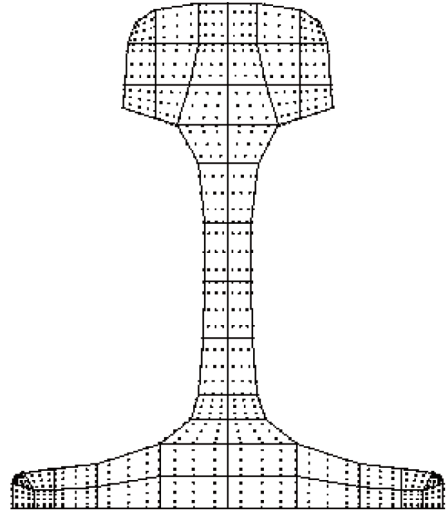


图3 CHN60钢轨谱单元离散

Fig. 3 Mesh of spectral elements for the CHN60 rail

钢轨横截面中任意单元节点的位移向量为

$$u^{(e)}(x, y, z, t) = N(y, z) q^{(e)} e^{i(kx - \omega t)} \quad (7)$$

式中: $N(y, z)$ 为二维谱单元形函数矩阵; $q^{(e)}$ 为单元节点位移向量,上标 (e) 为单元符号, (e) 只在 MATLAB 中赋值循环计算,式中不赋值。

将式(7)代入到式(5)中,单元应变可表示为

$$\varepsilon^{(e)} = (B_1 + ikB_2) q^{(e)} e^{i(kx - \omega t)} \quad (8)$$

式中: B_1 和 B_2 为应变矩阵,表示成

$$\begin{cases} B_1 = L_y N_{,y} + L_z N_{,z} \\ B_2 = L_x N \end{cases} \quad (9)$$

式中: $N_{,y}$ 和 $N_{,z}$ 两个偏导数(下标前置逗号)不能

直接由显式表达,谱元法中的形函数取决于参考坐标。根据复合函数求导规则,可以得到

$$\begin{bmatrix} N_{i,y} \\ N_{i,z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} N_{i,\xi} \\ N_{i,\eta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵,定义为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ y_{,\eta} & z_{,\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{25} N_{i,\xi} y_i & \sum_{i=1}^{25} N_{i,\xi} z_i \\ \sum_{i=1}^{25} N_{i,\eta} y_i & \sum_{i=1}^{25} N_{i,\eta} z_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $N_{i,y}$, $N_{i,z}$ 分别为单元中第 i 个节点形函数在 y 方向和 z 方向的求导; $N_{i,\xi}$, $N_{i,\eta}$ 分别为单元中第 i 个节点形函数在物理坐标林标系 ξ 和 η 方向的求导。

在一维空间中,谱元法中单元内节点位置可通过 Legendre 多项式构造基函数,将其转换为某种特定 Gauss-Labatto-Legendre (GLL) 点,节点坐标定义为下式的解

$$(1 - \xi^2)P'_N(\xi) = 0 \quad (12)$$

式中: $P_N(\xi)$ 为 N 阶 Legendre 正交多项式, $P'_N(\xi)$ 为其一阶导数; $\xi_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 为式 (12) 的零点,即谱元法中的节点。Legendre 多项式的递推式为

$$\begin{aligned} P_0(\xi) &= 1, P_1(\xi) = \xi \\ (N+1)P_{N+1}(\xi) &= (2N+1)\xi P_N(\xi) - NP_{N-1}(\xi) \end{aligned} \quad (13)$$

与传统有限元法不同,谱元法中单元的节点位置并非均匀分布,而是采用特殊的分布方式。根据式 (12),确定了这些节点的位置分布后,可以运用 Lagrange 插值法得到一维参考坐标系下基于 GLL 配置点的 N 阶基函数 $h_i(\xi)$, 表达式为^[18]

$$h_i(\xi) = \frac{-1}{N(N+1)P'_N(\xi_i)} \frac{(1 - \xi^2)P'_N(\xi)}{\xi - \xi_i} \quad (14)$$

本文采用 Legendre 正交多项式,建立钢轨结构二维谱单元计算模型,在二维空间中,单元的基函数 N_{mn} 表示为一维基函数的乘积

$$N_{mn} = h_m(\xi)h_n(\eta) \quad (15)$$

式中: $h_m(\xi)$, $h_n(\eta)$ 分别为一维空间中 ξ 方向和 η 方向的基函数, m 和 n 为单元内二维空间中两个维度方向的节点编号。根据基函数的正交性有

$$N_{mn} = h_m(\xi_p)h_n(\eta_q) = \begin{cases} 1, & m=p, n=q \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (16)$$

在结构的二维空间中任意函数 $u_N^{(e)}(\xi, \eta)$ 可以近似地表示为

$$u_N^{(e)}(\xi, \eta) = \sum_{m=1}^{n_1} \sum_{n=1}^{n_2} u_N^{(e)}(\xi_m, \eta_n) N_{mn} \quad (17)$$

式中: n_1, n_2 分别为二维谱单元两个维度方向的 GLL 点的个数,当 $n_1=n_2=5$ 时,二维谱单元如图 2 所示。式 (17) 在二维空间区域的数值积分可以通过 GLL 积分进行计算

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 u_N^{(e)}(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} W_i W_j u_N^{(e)}(\xi_i, \eta_j) \quad (18)$$

式中: i, j 均为节点编号; W_i, W_j 均为积分权重,表示为

$$W_i = \frac{2}{N(N+1)[P'_N(\xi_i)]^2} \quad (19)$$

根据 Hamilton 原理,在不考虑外力作用的情况下,可以通过对拉格朗日泛函进行积分,得到以变分形式表示的动力学控制方程为

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T \boldsymbol{\rho} \ddot{\mathbf{u}} dV = 0 \quad (20)$$

式中: ρ 为结构密度; V 为结构体积。

利用结构单元划分与组装,建立单元质量矩阵和单元刚度矩阵,最后得到结构系统矩阵,并形成特征方程为

$$[\mathbf{K}_1 + ik\mathbf{K}_2 + k^2\mathbf{K}_3 - \omega^2\mathbf{M}]\mathbf{q} = 0 \quad (21)$$

式中: $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ 为系统刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为系统质量矩阵; $\mathbf{q}$ 为波导结构横截面所有节点的全部位移矢量。系统刚度矩阵和系统质量矩阵分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \bigcup_{e=1}^{N_e} \mathbf{K}_1^{(e)}, \mathbf{K}_2 = \bigcup_{e=1}^{N_e} \mathbf{K}_2^{(e)} \\ \mathbf{K}_3 &= \bigcup_{e=1}^{N_e} \mathbf{K}_3^{(e)}, \mathbf{M} = \bigcup_{e=1}^{N_e} \mathbf{M}^{(e)} \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{K}_1^{(e)}, \mathbf{K}_2^{(e)}, \mathbf{K}_3^{(e)}$ 为各单元刚度矩阵, $\mathbf{M}^{(e)}$ 为单元质量矩阵; N_e 为波导截面网格单元数。利用公式 (18),各单元刚度矩阵和单元质量矩阵分别可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1^{(e)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} W_i W_j (\mathbf{B}_i^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j | \mathbf{J})_{ij} \\ \mathbf{K}_2^{(e)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} W_i W_j ((\mathbf{B}_1^T \mathbf{D} \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_2^T \mathbf{D} \mathbf{B}_1) | \mathbf{J})_{ij} \\ \mathbf{K}_3^{(e)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} W_i W_j (\mathbf{B}_2^T \mathbf{D} \mathbf{B}_2 | \mathbf{J})_{ij} \\ \mathbf{M}^{(e)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} W_i W_j (\mathbf{N}^T \boldsymbol{\rho} \mathbf{N} | \mathbf{J})_{ij} \end{cases} \quad (23)$$

通过式 (21) 可以求解特定频率 ω 下的波数 k 和特征向量 $\mathbf{q}$ 。利用一般特征值问题求解方法,根据

频率 ω 和对应的特征值,可以将相速度 C_p 和群速度 C_g 随频率和波数的关系定义为

$$C_p = \frac{\omega}{k}$$

(24)

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\hat{q}(\hat{K}_2 + 2kK_3)\hat{q}}{2\omega\hat{q}M\hat{q}}$$

(25)

式中: $\hat{K}_2$ 为带虚数的刚度矩阵; K_3 为刚度矩阵; $\hat{q}$ 为位移向量。

2 半解析谱元法计算结果分析

为了验证本文提出的半解析谱元法的准确性,选取一块厚度为 2 mm 的铝板作为研究对象。该铝板的材料参数如下:密度为 2 700 kg/m³,弹性模量为 68.5 GPa,泊松比为 0.34。对铝板的横截面进行建模时,沿板厚方向共划分为 10 个单元,并使用 MATLAB 软件编程对铝板中导波的传播特性进行数值模拟。对获取的铝板相速度频散曲线的解析解、半解析有限元解和半解析谱元法解进行对比,结果如图 4 所示。

铝板在低阶频率下只存在反对称模式 A0 与对称模式 S0 两种传播模式,且随着频率的增加,除 A0 与 S0 两种模式外,其他模式均存在截止频率。铝板中导波模式数量随着频率的增大而增多,各模式间传播特性的差异逐渐增大。

从图 4 可以分析出,半解析法计算的相速度结果普遍高于解析法的计算结果,且在较高速度传播模式上两者存在较大偏差。而半解析谱元法和解析法的计算结果能够吻合很好,并且随着激励频率

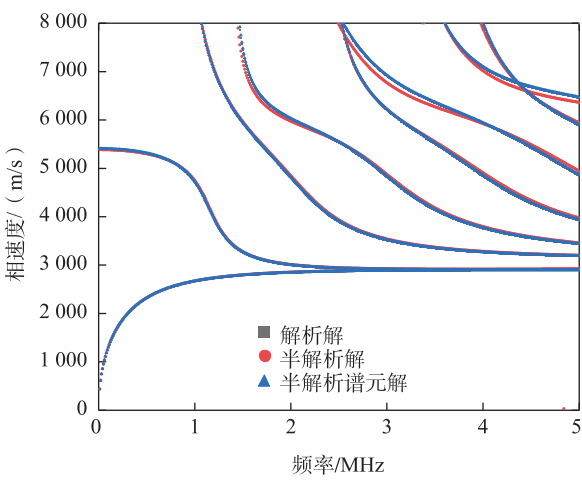


图4 铝板相速度频散曲线的半解析解、半解析谱元解和解析解对比图

Fig. 4 Comparisons of results from semi-analytical solution, semi-analytical spectral element solution and analytical solution of phase velocity dispersion curves of aluminum plate

的增加,两种方法在同一传播模式下的偏差呈现总体缩小的趋势。

表 1 列出了不同频率下,半解析谱元法和解析法的相速度计算结果并进行了误差对比。根据表中数据可知,在 1~5 MHz 的频率范围内,对于反对称 A0 模式,相速度计算在 4 MHz 频率处的相对误差最大,达到 0.38%;对于对称 S0 模式,相速度计算在 1 MHz 频率下的相对误差最大,为 0.30%。该结果充分验证了半解析谱元法在研究导波传播特性方面的准确性和可行性。

表 1 不同频率的相速度半解析谱元法求解误差
Tab.1 Solution errors of phase velocity by the semi-analytical spectral element for different frequencies

频率/MHz	A0			S0		
	解析法 结果/(m/s)	半解析谱元法 结果/(m/s)	相对误差/%	解析法 结果/(m/s)	半解析谱元法 结果/(m/s)	相对误差/%
1	2 665.12	2 668.99	0.14	4 711.04	4 725.26	0.30
2	2 843.28	2 848.40	0.18	2 998.07	3 004.84	0.23
3	2 882.79	2 887.29	0.16	2 910.16	2 915.23	0.17
4	2 891.29	2 902.24	0.38	2 897.23	2 897.42	0.01
5	2 893.24	2 899.31	0.21	2 895.10	2 899.57	0.15

与传统数值方法相比,半解析谱元法能更准确地捕捉铝板结构中高频传播模式的特性。可见,该方法能够准确研究不同频率传播模式在一定频率范围内的导波特征,为进一步分析导波在波导结

构中的传播特性提供了可靠的理论基础。

3 钢轨超声导波频散特性分析

以高速铁路常见的 CHN60 钢轨为研究对象,

其材料弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ 。针对钢轨横截面,采用二维 4×4 阶谱单元进行离散处理,如图 3 所示。通过求解特征方程式(21),并利用式(24)和式(25)即可得到自由状态下钢轨的波数、相速度和群速度频散曲线,如图 5 至图 7 所示。

从图 5 钢轨波数频散曲线可知,图中每一条频散曲线代表着一种导波传播模式。随着频率的增加,钢轨中可传播的导波模式数逐渐增多。对于大部分频散曲线,其波数随频率的增加呈现持续增加的趋势。而在个别频率范围内,存在两种可传播的导波模式,其中一种模式的波数随频率的增加而减小至消失,另一种模式的波数则随频率的增加而不断增大。

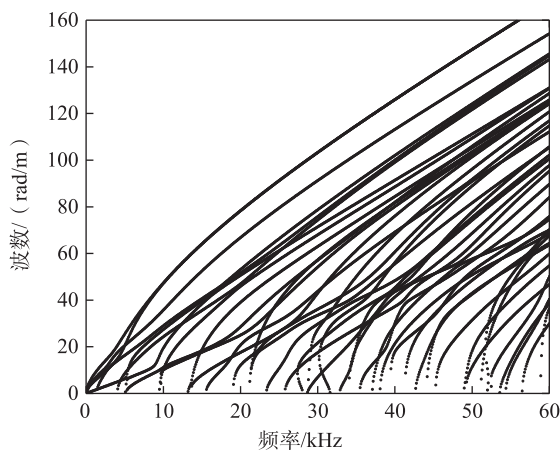


图5 钢轨波数频散曲线

Fig. 5 Wave-number dispersion curves of the rail

从图 6 钢轨相速度频散曲线可以看出,由于钢轨具有复杂的异形截面形状,其导波模式数量众多。在低频率范围内,钢轨主要存在 4 种基本导波模式,包括水平弯曲模式、垂直弯曲模式、扭转模式和伸展模式。除了这 4 种基本模式外,其他模式均有截止频率。大多数模式的相速度呈现持续下降的趋势。但也有个别模式如扭转模式表现出“增大-减小-增大”或伸展模式则表现出“减小-增大”等复杂的变化规律。

从图 7 钢轨群速度频散曲线可知,与相速度频散曲线相比,钢轨群速度频散曲线更为复杂,频散程度更严重,随着频率的增大,一般呈现出“增大-减小-增大”的复杂变化规律。在接近截止频率时,这些模式的群速度变化尤其剧烈。值得注意的是,有一部分导波模式在 $2\,900\sim 3\,300\text{ m/s}$ 的群速度范

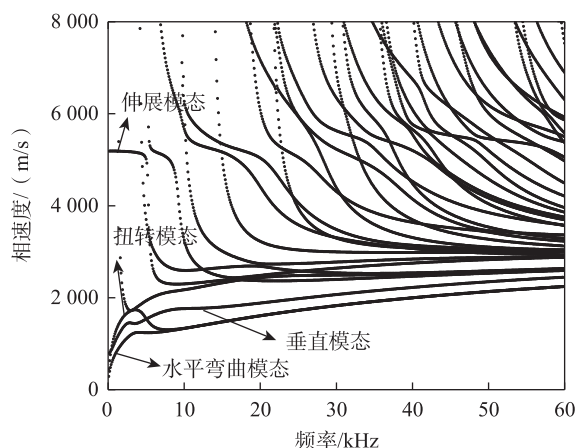


图6 钢轨相速度频散曲线

Fig. 6 Phase velocity dispersion curves of the rail

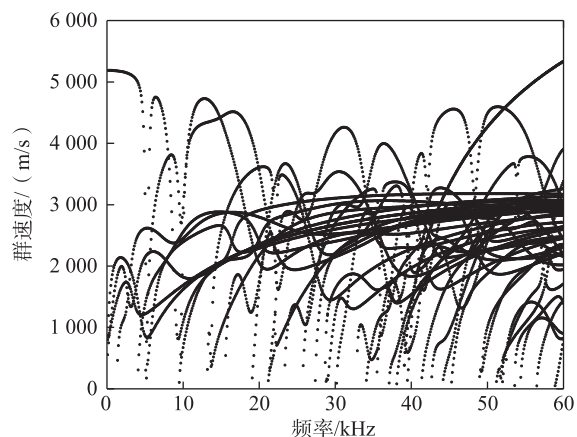


图7 钢轨群速度频散曲线

Fig. 7 Group velocity dispersion curves of the rail

围内,随频率的提高,群速度变化趋于平缓,呈现出明显的非频散特性,这些非频散导波模式特征为钢轨的弯曲模式,可用于钢轨导波检测。

4 实验验证

频散曲线反映了导波在钢轨中的传播特性,研究钢轨中的导波频散特性是钢轨导波无损检测的基础。为了进一步验证半解析谱元法求解得到频散曲线的正确性,利用 RITEC RAM-5000 SNAP 非线性高能超声导波实验装置,开展了 CHN60 钢轨导波实验研究。

实验选用长度为 1.71 m 的 CHN60 钢轨,考虑到实际铁路现场环境,为保障列车安全运行,难以在轨头部位安装传感器。本研究将 PZT4 压电传感器置于轨腰部位,实验中导波信号激励和接收的方式是采用一个激励传感器和一个接收传感器,其中激励信号采用 Hanning 窗调制的中心频率为 55 kHz

的5周期正弦波,如图8所示。

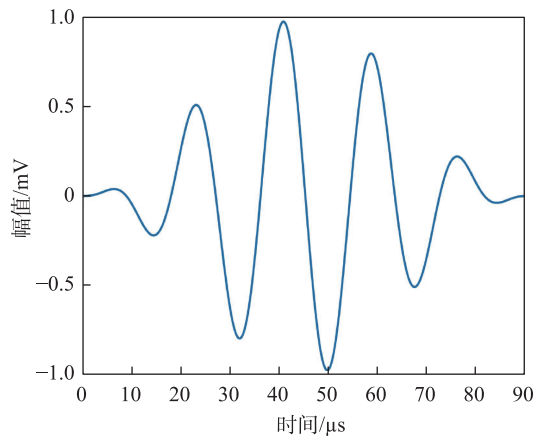


图8 导波激励信号

Fig. 8 Guided wave excitation signals

图9为钢轨实验中激励与接收信号的波形。通过测量激励信号波包峰值点与接收信号首个波包峰值点之间的时间差,可确定导波的飞行时间。对采集的导波信号进行降噪和滤波处理后,根据钢轨长度和测得的飞行时间,计算得到实验中钢轨导波的群速度为2 964.37 m/s。

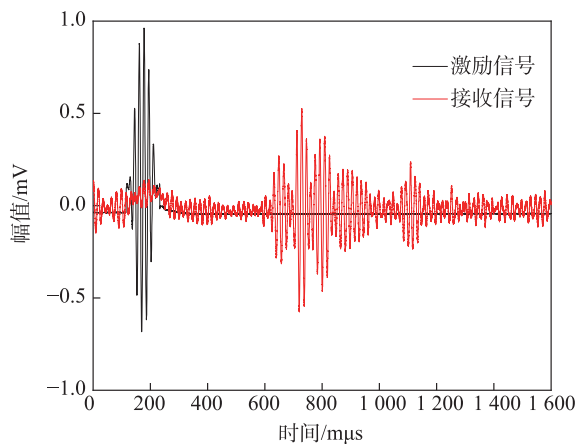


图9 钢轨导波激励与接收信号

Fig. 9 Excitation and received signal of rail guided wave

从图7钢轨导波群速度频散曲线可得激励频率为55 kHz对应的理论群速度 C_g 为2 934.92 m/s。如表2所示,将实验测得的群速度值与理论计算结果对比,二者之间的相对误差仅为0.99%。验证了该理论分析方法的准确性。

5 结论

为了分析钢轨的频散特性,本文提出了半解析

表2 钢轨频率为55 kHz时计算群速度与实验群速度对比
Tab.2 Comparison of calculated and experimental group velocities at the frequency of 55 kHz of the rail

导波 频率/kHz	计算群速度/ (m/s)	实验群速度/ (m/s)	相对误差/%
55	2 934.92	2 964.37	0.99

谱元法,通过此方法获得了钢轨的频散曲线,分析了钢轨导波的频散特性,最后通过钢轨的超声导波实验,验证了本文所提出半解析谱元法的精确性和可行性,得出以下结论。

1) 随着频率的增大,波数值也逐渐增大;而大多数模态的相速度值呈现下降趋势,最终趋于平稳数值;群速度值变化较为复杂,一般呈现出“增大-减小-增大”的复杂变化规律。

2) 钢轨在导波激励下,存在多种导波传播模态,频率越高,导波传播模态种类越多,频散现象越弱;在2 900~3 300 m/s的群速度范围内,模态的群速度变化趋于平缓,此范围内传播群速度适合用于钢轨导波检测。

3) 利用本文所提出的方法获得的钢轨计算群速度为2 934.92 m/s,而实验群速度为2 964.37 m/s,二者之间的相对误差仅为0.99%,可见,半解析谱元法在钢轨导波特性分析具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] 杨文林, 史红梅, 牛笑川, 等. 非线性超声导波钢轨裂纹检测模态选取研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 141-154.
YANG W L, SHI H M, NIU X C, et al. Research on mode selection for nonlinear ultrasonic guided waves rail crack detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 141-154.
- [2] 陈华鹏, 鹿守山, 雷晓燕, 等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 27-44.
CHEN H P, LU S S, LEI X Y, et al. Advance in research on applications of digital twin in intelligent railway operation management[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 27-44.
- [3] 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 C Y, CHEN R, JIANG W Q, et al. Study on excitation method of ultrasonic guided wave mode in rails[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(2): 93-99.

- [4] SUN K, CHEN H P, FENG Q S, et al. Propagation characteristics of ultrasonic guided waves in tram rails[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2020, 75(4): 435-444.
- [5] WEI D P, LIU X F, WANG B X, et al. Damage quantification of aluminum plates using SC-DTW method based on lamb waves[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(4): 045001.
- [6] 吕炎, 林晓磊, 高杰, 等. 基于级数法的热弹各向异性层合板兰姆波频散特性分析[J]. *力学学报*, 2023, 55(9): 1939-1949.
- LYU Y, LIN X L, GAO J, et al. Analysis of Lamb wave dispersion characteristics of thermoelastic anisotropic laminates based on the polynomial method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(9): 1939-1949.
- [7] NIU X D, MARQUES H R, CHEN H P. Sensitivity analysis of circumferential transducer array with $T(0, 1)$ mode of pipes[J]. *Smart Structures and Systems*, 2018, 21(6): 761-776.
- [8] 王松浩, 胡芷逸, 张应红, 等. 超声导波管道缺陷定位方法研究[J]. *应用声学*, 2022, 41(4): 558-567.
- WANG S H, HU Z Y, ZHANG Y H, et al. Ultrasonic guided waves for defect location in pipeline[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2022, 41(4): 558-567.
- [9] ROSE J L, AVIOLI M J, MUDGE P, et al. Guided wave inspection potential of defects in rail[J]. *NDT & E International*, 2004, 37(2): 153-161.
- [10] RAMATLO D A, WILKE D N, LOVEDAY P W. Development of an optimal piezoelectric transducer to excite guided waves in a rail web[J]. *NDT & E International*, 2018, 95(Apr): 72-81.
- [11] 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. Semi-analytical finite element method for calculating dispersion curves of ultrasonic guided waves in a rail[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10): 2392-2398.
- [12] 戴公连, 葛浩. 基于半解析有限元法的钢轨导波适用模式研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(1): 18-24.
- DAI G L, GE H. Modal applicability analysis of rail guided wave based on semi-analytical finite element method[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(1): 18-24.
- [13] 陈嵘, 龚政, 胡辰阳, 等. 高速道岔尖轨弹性波频散特性研究[J]. *铁道学报*, 2022, 44(4): 82-88.
- CHEN R, GONG Z, HU C Y, et al. Investigation on dispersion characteristics of elastic wave in high-speed railway turnout switch rail[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(4): 82-88.
- [14] CHEN H P, ZHOU H, YE L. Dispersive modal characteristics of guided waves propagating in damaged rails[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2023, 36(3): 04023001.
- [15] CHEN H P, ZHANG G Y, HU W C, et al. Nondestructive determination of longitudinal rail stress from guided wave dispersion properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408: 133618.
- [16] YU Z X, XU C, SUN J Y, et al. Guided wave propagation analysis in stiffened panel using time-domain spectral finite element method[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(10): 208-221.
- [17] ZAKIAN P, KHAJI N. A stochastic spectral finite element method for wave propagation analyses with medium uncertainties[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 63: 84-108.
- [18] SHIRAZIAN M. A new acceleration of variational iteration method for initial value problems[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2023, 214: 246-259.



第一作者: 罗伟兵(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为钢轨超声导波无损检测。E-mail: 363143315@qq.com。



通信作者: 陈华鹏(1964—), 男, 教授, 研究方向为结构健康监测与智能运维。E-mail: hp.chen@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)