

基于面波多道分析法的无砟轨道性能劣化反演方法

胡 猛^{1,2}, 许玉德^{1,2}, 李少铮^{1,2}, 薛志强^{1,2}, 曹世豪³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;
3. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 提出了基于面波多道分析法的无砟轨道性能劣化反演方法。以无砟轨道理论面波频散曲线为基础, 分析具有不同劣化程度的无砟轨道面波频散特性, 构建无砟轨道性能劣化反演方法, 并研究激励频率与检波器布设方式对反演效果的影响。结果表明: 无砟轨道的面波频散曲线在低频与高频段分别取决于 CA 砂浆与轨道板的横波速度。为提高反演效果, 建议将激励频率取为 50 kHz, 最小偏移距取大于或等于 0.05 m, 道间距取 0.05 m, 并尽可能增大检波器排列长度。

关键词: 无砟轨道; 面波多道分析; 频散特性; 反演; 性能劣化

中图分类号: U216.3

文献标志码: A

of CA mortar and track slabs respectively determines the surface wave dispersion curve of ballastless tracks at low and high frequencies. To enhance the inversion effect, the excitation frequency is recommended to be set at 50 kHz, the minimum offset distance should be greater than or equal to 0.05 m, and the channel spacing between tracks should be 0.05 m. Moreover, the length of the detector arrangement should be increased as much as possible.

Key words: ballastless track; multi-channel analysis of surface wave; dispersion characteristics; inversion; performance degradation

Inversion Method of Ballastless Track Performance Degradation Based on Multi-channel Analysis of Surface Waves

HU Meng^{1,2}, XU Yude^{1,2}, LI Shaozheng^{1,2}, XUE Zhiqiang^{1,2}, CAO Shihao³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The inversion method of ballastless track performance degradation based on the multi-channel analysis of surface waves was proposed. Based on the theoretical surface wave dispersion curve, the dispersion characteristics of ballastless tracks with varying degrees of degradation were analyzed. A method for inverting the ballastless track performance degradation was constructed, and the effect of excitation frequency and detector placement mode on the inversion effect was studied. The results indicate that the shear wave velocity

无砟轨道因其平顺性好、稳定性高等优点在我国高速铁路得到广泛应用, 其养护维修工作对于保障高速铁路安全与平稳运行具有重要意义。在高速铁路运营期间, 由于列车荷载、温度荷载、水的长期作用, 无砟轨道不可避免地出现各种损伤现象^[1], 如轨道板破损、砂浆层脱空等。

对于无砟轨道的劣化与损伤现象, 目前国内外主要采用冲击回波法、地质雷达法、红外热成像法、超声法等无损检测方法^[2]进行检测。超声法因其检测速度快、穿透力强的特性在无砟轨道无损检测领域得到了一定应用^[3], 学者们在传统超声法的基础上研究了相应的损伤定位或成像算法。Fan 等^[4]研究了超声全聚焦法与波数法在无砟轨道层间脱空识别中的适用性, Zhu 等^[5]和 Li 等^[6]研究了基于聚焦合成孔径法的无砟轨道 CA 砂浆空洞成像算法, Zhu 等^[7]和吴刚等^[8]基于超声导波频散理论提出了可以定位无砟轨道缺陷的方法。由学者们的研究可知, 超声法在无砟轨道损伤检测方面具有良好的适用性, 但值得注意的是, 以上研究均假定无砟轨道损伤

收稿日期: 2022-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(51908197)

第一作者: 胡 猛(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为无砟轨道损伤检测。E-mail: humeng@tongji.edu.cn

通信作者: 许玉德(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道管理及养修技术。

E-mail: xuyude@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

表现为脱空或空洞形式,然后基于超声波的反射透射效应实现无砟轨道内部伤损的定位。在实际情况下,无砟轨道内部损伤往往不具有显性特征,表现在细观尺度的量级上^[9],在宏观上则体现为整体刚度或波速的折减^[2,10]。对于无砟轨道部件的劣化损伤,超声法的检测能力十分有限。

在地质勘探领域,面波多道分析法是一种通过分析面波频散特性进而评估地层剪切波速度的方法^[11]。当无砟轨道部件产生劣化后,其纵波速度与横波速度会发生一定的变化,而无砟轨道的面波正是由其体内的纵波与横波沿自由界面传播时相互叠加形成的,因此无砟轨道的面波传播特性也会发生相应的变化。此外,面波存在能量高、传播速度低的特点^[12],这些特点使得面波含有丰富信息,可以有效地刻画介质内部性能。国内外学者就面波多道分析法在混凝土损伤检测中的运用展开了一定的研究。Jaganathan^[13]通过单点冲击的方式在钢筋混凝土管道结构中激发了表面波,并基于面波多道分析法得到了该结构的多模态面波频散曲线,实现了对结构弹性参数的反演;Faure等^[14]利用面波多道分析法检查了火灾后隧道衬砌的完整性;Lee等^[15]将面波多道分析法引入Lamb波分析理论中,利用Lamb波的频散特性对混凝土宽梁的弹性波波速与尺寸进行了识别;Shahsavari^[16]基于多道面波分析法估计了混凝土结构的厚度与速度剖面;Alzate-Diaz等^[17]采集了全尺寸路面的面波信号,分析了温度与路面类型对面波多道分析法检测路面性能的影响;Zhu^[18]联合空气耦合冲击回波法与面波多道分析法测试了连续加筋混凝土路面的力学性能。

虽然学者们对面波多道分析法在混凝土无损检测中的应用展开了相应的研究,但是研究结果对无砟轨道的适用性不强。实际上,无砟轨道在几何形态上呈现出“扁平状”的特征,其宽度与长度方向是远远大于厚度方向的,这就导致了在使用面波多道分析法检测无砟轨道劣化程度时,超声波激振点与信号采集点的布设对检测效果具有较大的影响。此外,目前面波多道分析法多用于地质勘探、路隧桥检测等领域,这些领域中的被检测对象在横向与纵向均可视为无限域^[19],然而无砟轨道各部件是存在边界的,受边界效应的影响,无砟轨道的面波频散特性会发生相应的变化。目前鲜有面波多道分析法在无砟轨道部件性能劣化检测中的报道。

基于此,对面波多道分析法在无砟轨道劣化检测的应用展开研究。首先,介绍面波多道分析法检

测无砟轨道的基本原理与面波频散曲线计算方法;然后,研究无砟轨道具有不同劣化程度时的面波频散特性,并在此基础上提出无砟轨道劣化程度的反演方法;最后,开展影响因素分析,以明确使用面波多道分析法反演无砟轨道性能劣化程度的最优激振频率与检波器布设方法。

1 面波多道分析法的检测流程与基本原理

1.1 面波多道分析法的检测流程

面波多道分析法的基本原理是对采集到的时间-空间域信号进行频散分析,将其变换到频率-相速度域以获取面波频散能量^[20],然后提取并分析结构的面波频散曲线,从而得到结构内部的力学参数。本研究使用的无砟轨道面波信号是基于超声波法得到的,无砟轨道部件劣化的检测原理如图1所示。检测过程主要包含3个阶段,分别是在无砟轨道表面激振产生超声波、超声波在无砟轨道内传播以及对检波器采集的多道超声波信号进行分析。

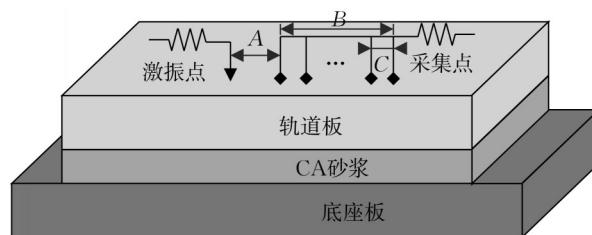


图1 面波多道分析法检测无砟轨道部件劣化

Fig.1 Detection of ballastless track component degradation by multi-channel analysis of surface waves

通常情况下,超声波激发波形采用经汉宁窗调制的周期正弦波^[21],如下所示:

$$Y = \frac{a \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi f}{N} t \right) \right) \sin(2\pi f t)}{2}, 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \quad (1)$$

式中:Y为超声波信号;t为时间;f为中心频率;N为周期数;a为超声波幅值。经调制的激发信号可有效降低因波形忽然开始或结束而造成的旁瓣现象,使超声波的能量集中于中心频率。

在无砟轨道表面激振后,体波和面波同时会在无砟轨道中传播。体波包括纵波与横波,它们均会在无砟轨道的体内传播;面波则沿着无砟轨道的表面传播,并且其能量要明显高于体波的能量,采集到的无

砟轨道表面超声波信号中面波信号占据了大部分的能量,具备很强刻画无砟轨道内部介质信息的能力。在信号采集过程中,需要关注3个参数:①最小偏移距,激振点与第1个信号采集点之间的距离(见图1中的A);②道间距,2个信号采集点之间的距离(见图1中的B);③检波器排列长度(见图1中的C)。合理的参数设置更有利于无砟轨道面波的记录,从而达到更好的检测效果。

1.2 无砟轨道面波频散能量

在提取无砟轨道表面的多道超声波信号 $U(x_j, t)$ 后,基于相移法^[22]对面波的频散能量进行分析。采用傅里叶变换将无砟轨道的多道超声波时域信号转变为频域信号,如下所示:

$$U(x_j, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x_j, t) e^{-i\omega t} dt, j=1, \dots, n \quad (2)$$

式中: x 为坐标位置; j 为信号道数; ω 为圆频率; n 为采集信号的总道数。

经变换后的超声波频谱信号可以视为如下2项乘积的形式:

$$U(x_j, \omega) = A(x_j, \omega) P(x_j, \omega) = A(x_j, \omega) e^{-i\phi_j(\omega)} \quad (3)$$

式中: $A(x_j, \omega)$ 为振幅谱,反映波的振幅衰减与球面扩散; $P(x_j, \omega)$ 为相位谱,包含波的频散信息,该项只取决于波的相速度与偏移距。 $\phi_j(\omega)$ 可表示为

$$\phi_j(\omega) = \frac{\omega x_j}{c(\omega)} \quad (4)$$

对式(3)作如下求和:

$$E(\omega, c_T) = \sum_{j=1}^n \frac{U(x_j, \omega)}{|U(x_j, \omega)|} e^{i\varphi_{T,j}(\omega)} \quad (5)$$

$$\varphi_{T,j}(\omega) = \frac{\omega x_j}{c_T(\omega)} \quad (6)$$

式中: $E(\omega, c_T)$ 为频散能量; $c(\omega)$ 为相速度; $c_T(\omega)$ 为测试相速度。

式(5)可以看作为式(3)中某一频率的波场经振幅归一化与相位移动后沿偏移距方向的叠加。对于一给定频率为 ω 的波,若 $\varphi_{T,j}(\omega)$ 的值与 $\phi_j(\omega)$ 的值接近,则面波的频散能量取得极大值。换言之,对于一给定的频率为 ω 的波,假设其测试相速度为 $c_T(\omega)$ 时面波频散能量取得极大值,则表示测试相速度的

取值正确。因此,在进行面波频散分析时可指定测试相速度的取值范围 $c_{T,\min}(\omega) \leq c_T(\omega) \leq c_{T,\max}(\omega)$ 以及测试相速度的增量 $\Delta c_T(\omega)$,通过循环迭代的方式求解出多道面波信号的频散能量,然后提取每个频率对应频散能量的最大值,最后求得实测的面波频散曲线。

1.3 面波频散曲线理论计算方法

在半无限均匀介质中,面波没有频散现象,但在层状介质中,面波是高度频散的,主要体现为不同频率的面波传播速度(相速度)不同。无砟轨道是一种典型的多层复合结构,当在其表面激发超声波时,沿着无砟轨道表面传播的波必然是频散的。通常情况下,以面波频散曲线来表征面波的频散特性。本研究中采用刚度矩阵法计算无砟轨道的理论面波频散曲线,计算模型如图2所示。需说明的是,层状结构的面波频散曲线有多种理论解法,可参考文献[20]。

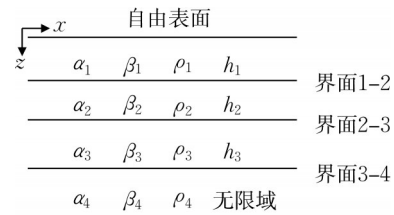


图2 无砟轨道的面波频散曲线计算模型

Fig.2 Calculation model of surface wave dispersion curve for ballastless track

图2中数字1、2、3、4分别代表轨道板、CA砂浆、底座板与路基, α 、 β 、 ρ 、 h 分别代表各部件的纵波速度、横波速度、密度以及厚度,其中路基层被视作半无限空间体。设定一系列波长 $\lambda_q (q=1, \dots, Q)$, 其对应的波数

$$k_q = \frac{2\pi}{\lambda_q}, q=1, \dots, Q \quad (7)$$

对于给定的波数 k_q 和相速度 c_q 而言,可以得到包括半无限空间体在内的无砟轨道每一层单元刚度矩阵 $K_j (j=1, 2, 3, 4)$, 此时层中的应力与位移有如下关系:

$$p_j = K_j u_j, j=1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

$$K_j = \begin{cases} \begin{bmatrix} K_{11,j} & K_{12,j} \\ K_{21,j} & K_{22,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{11,j} & \kappa_{12,j} & \kappa_{13,j} & \kappa_{14,j} \\ \kappa_{12,j} & \kappa_{22,j} & -\kappa_{14,j} & \kappa_{24,j} \\ \kappa_{13,j} & -\kappa_{14,j} & \kappa_{11,j} & \kappa_{12,j} \\ \kappa_{14,j} & \kappa_{24,j} & \kappa_{12,j} & \kappa_{22,j} \end{bmatrix}, j=1, 2, 3 \\ \begin{bmatrix} \kappa_{11,4} & \kappa_{12,4} \\ \kappa_{21,4} & \kappa_{22,4} \end{bmatrix}, j=4 \end{cases} \quad (9)$$

式中: p_j 为第 j 层的外荷载向量; u_j 为第 j 层的位移向量; $K_{11,j}$ 、 $K_{12,j}$ 、 $K_{21,j}$ 、 $K_{22,j}$ 为第 j 层刚度矩阵的子矩阵, 各元素具体数值参考文献[23]。

同样地, 参考文献[23], 对无砟轨道系统总刚度矩阵进行集成, 如下所示:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11,1} & K_{12,1} & & & \\ K_{21,1} & K_{22,1} + K_{11,2} & K_{12,2} & & \\ & K_{21,2} & K_{22,2} + K_{11,3} & K_{12,3} & \\ & & K_{21,3} & K_{22,3} + K_4 & \end{bmatrix} \quad (10)$$

同理, 整个无砟轨道系统的应力与位移也具有如下关系:

$$p = Ku \quad (11)$$

当系统的外荷载向量为零时, 可以得到表面波传播的固有模态, 即:

$$Ku = 0 \quad (12)$$

若等式(12)具有非零解, 则系统刚度矩阵的行列式必须为零, 即:

$$F_R(c, k) = \det(K) = 0 \quad (13)$$

在频散曲线的求解过程中, 设定初始相速度 c_{in} 与相速度增量 Δc , 然后求解不同相速度对应系统刚度矩阵的行列式, 直到行列式的正负号出现变化, 此

时的相速度值就是如式(13)所示的频散方程解。需要说明的是, 对于同一个波数而言, 频散方程可能有多个解, 相速度较小的解为基模态解, 其余解为高模态解。因此, 相速度的增量值应当取小一些, 否则将混淆基模态解与高频模态解, 出现“模式接吻”现象^[20]。如无特殊说明, 后文所提出的面波频散曲线均指频散方程的基模态解。

表1给出了无砟轨道结构各部件的力学参数。首先, 基于有限差分法^[24]模拟超声波激励作用(激励信号如式(1)所示, 中心频率取 50 kHz, 周期数取 3)下无砟轨道内的超声波场, 并提取无砟轨道的表面超声波信号 ($A=B=0.05$ m, $C=1.00$ m), 结果如图 3a 所示; 然后, 分别基于相移法与刚度矩阵法提取面波频散能量与求解该模型的理论频散曲线, 结果如图 3b 所示。

表1 模型参数

Tab.1 Model parameters

层号	部件	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	厚度/m
1	轨道板	3 972	2 432	2 500	0.20
2	CA 砂浆	2 591	1 634	1 600	0.05
3	底座板	3 600	2 204	2 400	0.30
4	路基	357	191	2 000	∞

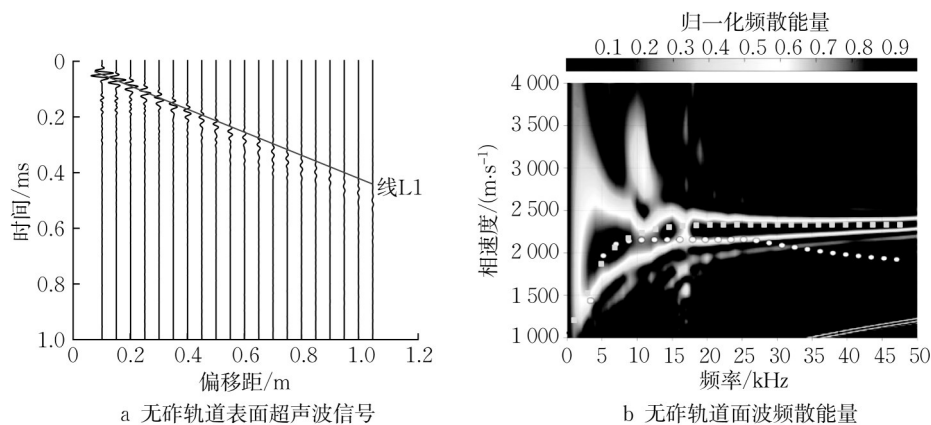


图3 无砟轨道表面超声波信号及其面波频散能量

Fig.3 Ultrasonic signal of ballastless track surface and its surface wave dispersion energy

图 3a 展现了无砟轨道表面的超声波信号, 其前段峰值部分对应着面波信号。可以发现, 随着偏移距的增大, 面波信号呈现出后移的趋势, 后移的时间量与偏移距增量之间明显具有非线性关系, 说明无砟轨道的面波信号具有较大的频散效应。图 3b 展现了无砟轨道表面超声波信号的面波频散能量。在 0~20 kHz 内, 面波的相速度随频率的增大呈非线性增大的趋势; 在 20~50 kHz 内, 无砟轨道面波的相速

度维持在 2 200 m·s⁻¹ 左右, 约为轨道板横波速度的 91%。此外, 图 3b 中圆点表示利用刚度矩阵法与如表 1 所示模型求解出的无砟轨道面波频散曲线的理论解。在 0~10 kHz 内, 理论频散曲线与频散能量存在较好的拟合关系, 但在 10 kHz 后高频部分明显与频散能量分离。这表明, 无砟轨道的理论频散曲线无法与频散能量拟合, 最主要原因是理论计算时未考虑面波的穿透深度。文献[25]中针对该问题(低

速夹层问题)提出了替代模型法,即当半空间上某一层的横波速度比表层的横波速度低时,将低速层视作半空间并忽略低速层以下层以求解频散曲线。图3b中的方点为采用替代模型法计算得到的无砟轨道理论频散曲线,该处理方法很好地解决了低速层频散曲线的错误计算问题,面波频散能量与理论面波频散曲线拟合度较好。因此,后续分析中均采用替代模型法计算无砟轨道的理论面波频散曲线。

2 无砟轨道面波频散特性与性能劣化反演方法

2.1 无砟轨道面波频散特性

在列车荷载、温度荷载以及水的长期作用下,无砟轨道结构不可避免地会出现各种损伤与劣化现象,引起结构刚度退化。为此,引入了轨道板与CA砂浆的劣化系数 D_{slab} 与 D_{ca} 来表示折减后无砟轨道部件材料的弹性模量,即:

$$E_{\text{slab}} = (1 - D_{\text{slab}}) E_{\text{slab, ini}} \quad (14)$$

$$E_{\text{ca}} = (1 - D_{\text{ca}}) E_{\text{ca, ini}} \quad (15)$$

式中: $E_{\text{slab, ini}}$ 与 $E_{\text{ca, ini}}$ 分别为未劣化轨道板与CA砂浆的弹性模量。

为分析无砟轨道出现劣化现象时面波的频散特性,取轨道板与CA砂浆的劣化系数为0~0.5。首

先根据式(16)与式(17)计算轨道板与CA砂浆的横波与纵波速度,然后基于刚度矩阵法与替代模型法计算无砟轨道面波的理论频散曲线,结果分别如图4与图5所示。

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)(1+\mu)}} \quad (16)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (17)$$

式中: v_p 与 v_s 分别为纵波与横波速度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为密度。

图4为轨道板劣化对波速与无砟轨道面波频散曲线的影响。根据图4a可知,无论是纵波速度还是横波速度,它们的值都随着劣化系数的增大而减小。由图4b可知,轨道板劣化对20 kHz以后高频段的面波相速度有显著影响,劣化系数越大,面波在高频段的相速度值越低。比较图4a与图4b中不同劣化系数对应的轨道板横波速度与面波频散曲线,可以发现高频段面波相速度趋近于0.9倍轨道板横波速度。图5为CA砂浆劣化对波速与无砟轨道面波频散曲线的影响。同样地,由图5a可知,CA砂浆的纵波与横波速度也随着劣化系数的增大而减少。此外由图5b可知,CA砂浆劣化主要影响面波在0~10 kHz左右低频段的相速度,劣化系数越大,无砟轨道面波在低频段的相速度越低。

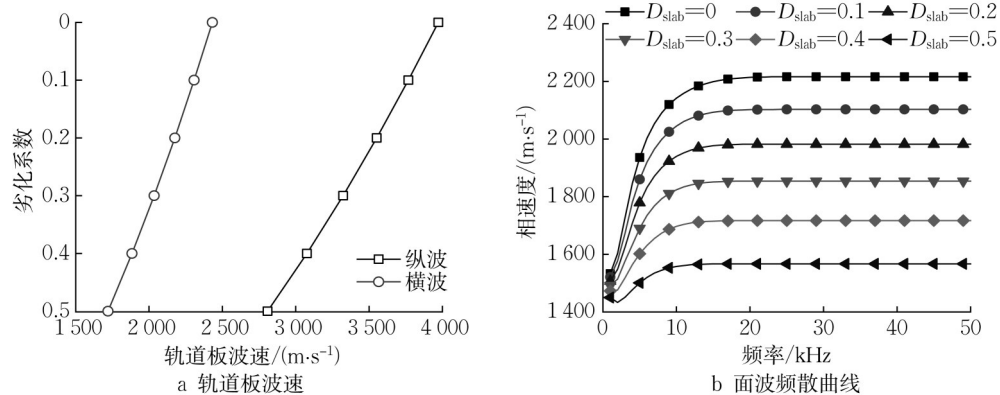


图4 轨道板劣化对无砟轨道面波频散曲线的影响

Fig.4 Effect of slab degradation on surface wave dispersion of ballastless track

综上所述,轨道板或CA砂浆的劣化对无砟轨道面波的频散特性有着较大影响,无砟轨道的面波相速度在高频段取决于轨道板的横波速度,而在低频段取决于CA砂浆的横波速度。因此,在实际无砟轨道劣化的检测过程中,可以通过提取无砟轨道结构的面波频散曲线,进而反演出各部件的力学参数。

2.2 无砟轨道性能劣化反演方法

从上述分析可知,无砟轨道部件劣化程度分析可以依据以下步骤进行:首先基于相移法对无砟轨道表面的超声波信号进行频散分析,提取各频率对应的频散能量最大值处的相速度,进而获取无砟轨道的实测面波频散曲线,然后结合无砟轨道面波频散曲线的理论计算方法与反演方法,实现对无砟轨

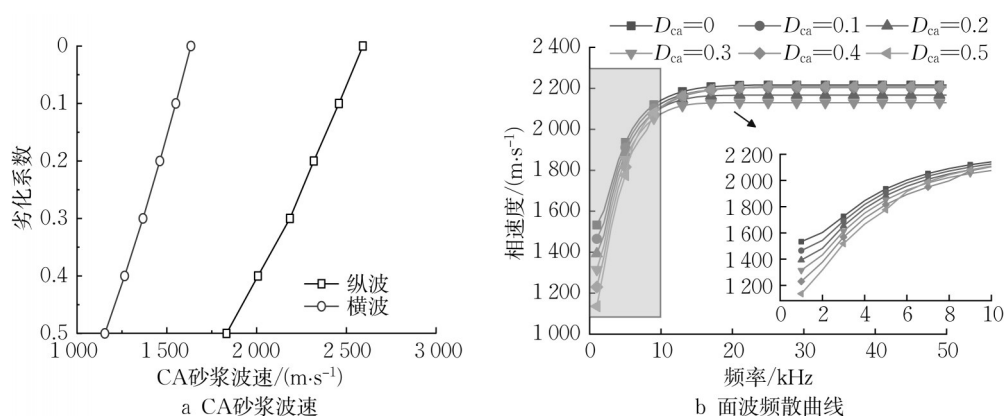


图5 CA砂浆劣化对无砟轨道面波频散曲线的影响

Fig.5 Effect of CA mortar degradation on surface wave dispersion of ballastless track

道部件力学参数的反演,具体流程如图6所示。

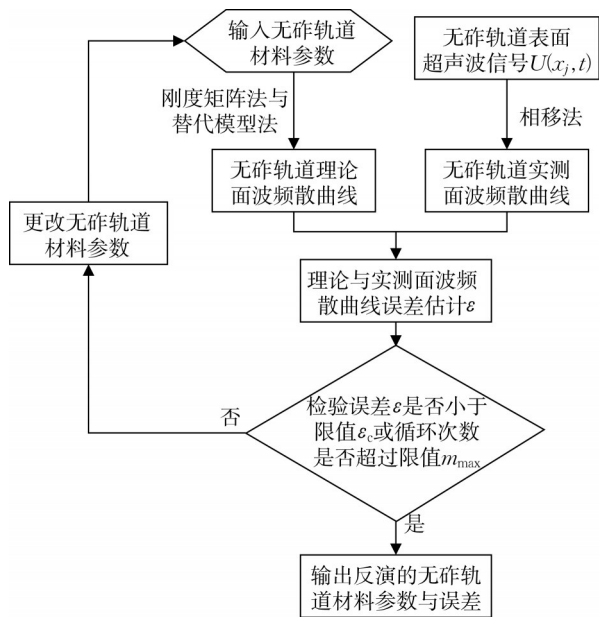


图6 无砟轨道力学参数反演流程

Fig.6 Inversion process of ballastless track material parameters

在应用面波多道分析法与反演方法对无砟轨道力学参数反演之前,需要初步估计并输入力学参数的初始值,其中材料横波速度的初始值可基于实测的面波频散曲线获取,如下所示:

$$\begin{cases} v_{s, \text{slab}, 1} = 1.09c_e(\lambda_{\min}) \\ v_{s, \text{ca}, 1} = 1.09c_e(\lambda_{\max}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $v_{s, \text{slab}, 1}$ 与 $v_{s, \text{ca}, 1}$ 分别为轨道板与CA砂浆的横波速度初始值; c_e 为实测的面波相速度; λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别为最小波长与最大波长。

此外,由式(16)与式(17)可知,在泊松比固定不

变的条件下,材料纵波速度与横波速度的比值是确定的,如下所示:

$$\beta = \frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \quad (19)$$

无砟轨道部件的纵波速度在初始输入与后续迭代循环的计算过程中可依据式(19)取值。在输入无砟轨道部件材料的力学参数后,基于刚度矩阵法与替代模型法计算无砟轨道的理论面波频散曲线 $c_T(\lambda)$,并定义其与实测面波频散曲线的误差,计算式如下所示:

$$\epsilon = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{|c_T(\lambda) - c_e(\lambda)|}{c_e(\lambda)} d\lambda \times 100\% \quad (20)$$

无砟轨道力学参数的反演计算过程有2个终止条件,一是理论与实测面波频散曲线之间的误差小于限值 ϵ_c ,二是循环次数超过限值 m_{\max} 。若反演计算过程不满足终止条件,则在下一次循环中重新设置无砟轨道材料的力学参数,如下所示:

$$\begin{cases} v_s = v_{s,1} + \text{rand}(-0.1, 0.1)v_{s,1} \\ v_p = \beta v_s \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\text{rand}(-0.1, 0.1)$ 为在-0.1到0.1范围内的随机取值。

通过如图6所示的反演流程可不断地更正无砟轨道材料的力学参数,减少实测与理论面波频散曲线的误差。在满足终止条件后,输出最小误差值以及对应的无砟轨道部件力学参数作为反演结果。

3 面波多道分析法反演无砟轨道性能劣化效果影响因素分析

在基于面波多道分析法反演无砟轨道部件性能劣化程度时,需关注激励频率、最小偏移距、道间距、

检波器排列长度4个关键参数,本节针对这些影响因素展开分析。需说明的是,本节中使用的无砟轨道表面超声波信号是基于有限差分法模拟得到的。

3.1 激励频率的影响

为分析超声波激励频率对面波多道分析法反演

无砟轨道性能劣化效果的影响,取超声波激励频率20~50 kHz,轨道板和CA砂浆的劣化系数为0.2,计算无砟轨道表面超声波信号,并进行面波频散能量分析,结果如图7所示。

图7为超声波激励频率不同时无砟轨道表面超

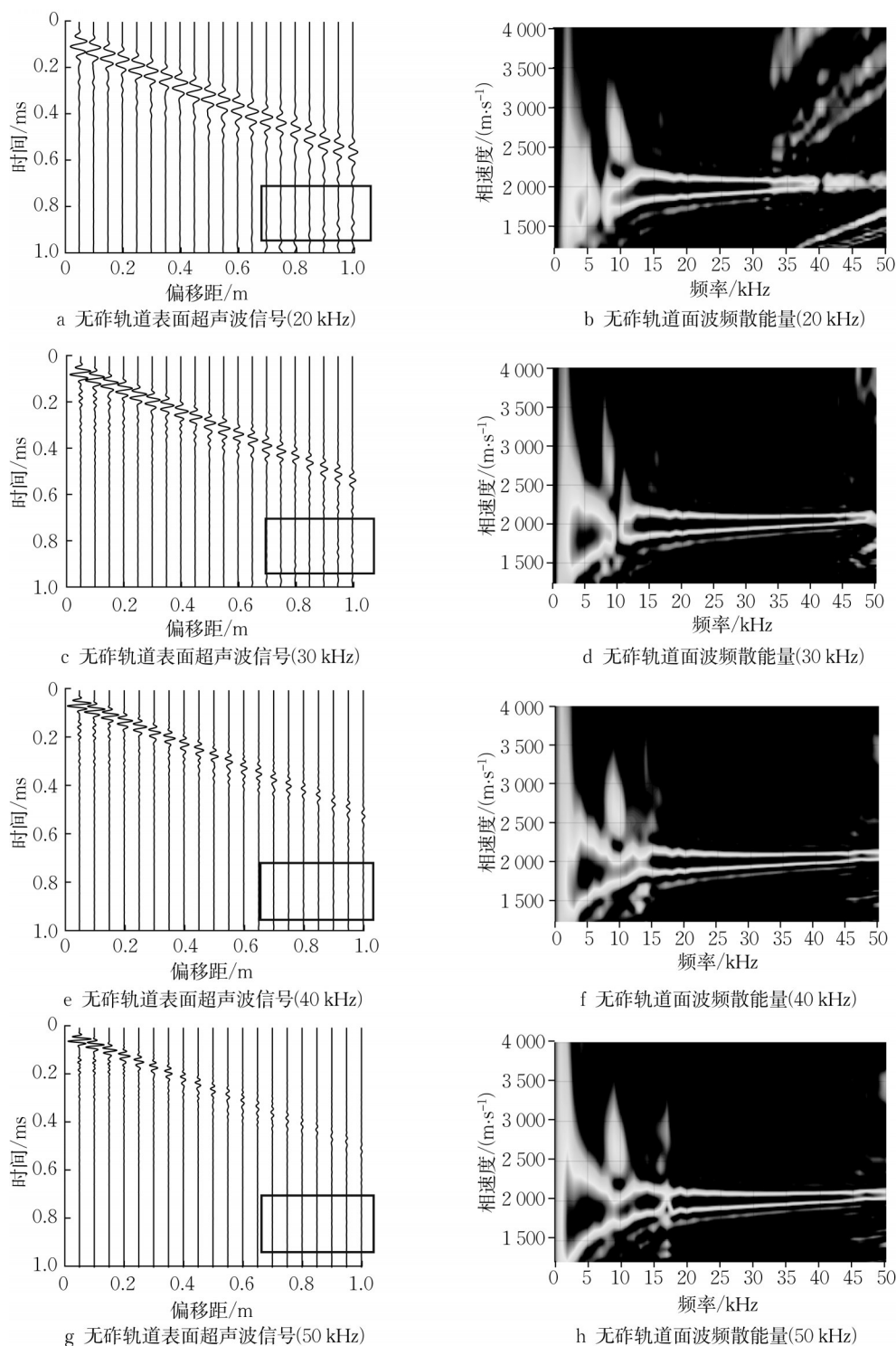


图7 不同激励频率时无砟轨道表面超声波信号及其面波频散能量

Fig.7 Ultrasonic signal of ballastless track surface and its surface wave dispersion energy at different excitation frequencies

声波信号及其面波频散能量。当超声波激励频率为 20 kHz 时,通过相移法获得的无砟轨道面波频散能量的发育程度较差,无法从频散能量图中获取无砟轨道面波在低频段与高频段的相速度,随着激励频率的增大,面波频散能量的发育得到了很大的改善,特别是低频段的改善更为明显。理论上,超声波激励的频率越高,面波频散能量在高频段的发育就越好,而在低频段则会发育得越差。然而,如图 7 所示的频散能量图在低频段却给出了相反的规律,造成这种现象的主要原因是无砟轨道表面超声波信号受到了边界效应的影响。从图 7a、c、e、f 中的框线区域可以明显看出,超声波激励频率越低,由边界反射回的面波信号越明显,进而对相移法获取面波频散能量产生较大干扰。从这个角度出发,在使用面波多道分析法检测无砟轨道结构时,超声波激励频率应当取大一些。然而,实际上无砟轨道不是均质的,是由骨料、砂浆、孔隙等散射体组成的多相多尺度复合

结构,超声波在其内部传递的过程中会发生衰减、散射频散等各种行为,进而对超声波的传递产生较大干扰。根据文献[26]的研究可知,超声波波长与散射体特征长度的比值越大,超声波传递受到的影响越小。因此,随着超声波频率的升高,超声波在无砟轨道中的散射效应也就越明显,所以超声波激励频率也不宜设置得过高。

综合以上分析,建议在使用面波多道分析法检测无砟轨道劣化时,宜采用 50 kHz 的超声波激励频率。

3.2 检波器布置方式的影响

在应用面波多道分析法检测无砟轨道劣化时,检波器的位置与排列方式是影响检测效果的重要因素,合理的布置方案更有利于检测效果的提高。为此,取超声波激励频率为 50 kHz,比较不同最小偏移距、道间距和检波器排列长度条件下提取的无砟轨道面波频散能量,结果如图 8 所示。

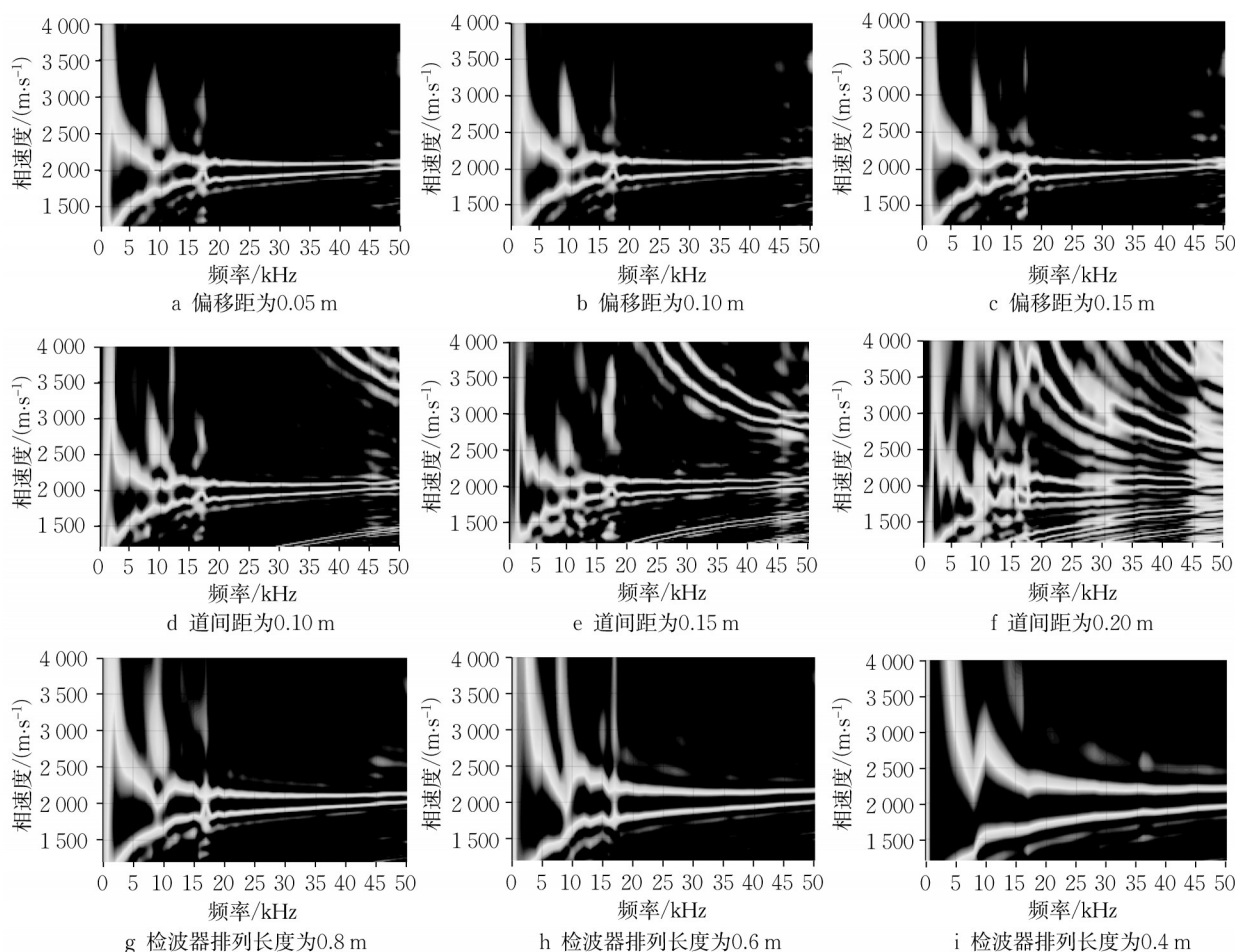


图8 检波器布设对无砟轨道面波频散能量的影响

Fig.8 Effect of detector placement on surface wave dispersion energy of ballastless track

图 8a—c 给出了道间距与检波器排列长度相同 (0.05 m), 最小偏移距分别为 0.05、0.10、0.15 m

时,由相移法计算得到的无砟轨道面波频散能量。理论上,在距离超声波激振点一定范围内面波尚未

形成,因此最小偏移距应当大于面波可以被观测到的最短距离。由图 8 可知,随着偏移距的增大,面波频散能量在高频与低频部分均没有明显的改善,这表示最小偏移距只要大于或等于 0.05 m 都可体现出无砟轨道的基模态面波频散曲线。图 8d—f 展现了道间距分别为 0.10、0.15、0.20 m 时的无砟轨道面波频散能量。对比图 8a 可知,道间距的增大影响了面波频散能量在低频部分的发育,不利于基模态面波频散能量的提取。实际上,道间距决定了无砟轨道表面超声波信号数据中的最小波长,因此道间距的选择应同无砟轨道模型的最薄层厚度相一致。图 8g—i 展现了检波器排列长度为 0.8、0.6、0.4 m 时的无砟轨道面波频散能量。在测试时,检波器的排列长度决定了无砟轨道表面超声波信号中的最大

波长,排列长度越大,对于低频部分面波分离能力则越强。通过对比图 8a 可以发现,无砟轨道的基模态面波频散曲线在低频段的体现能力随检波器排列长度的增大而增大。因此,建议在使用面波多道分析法反演无砟轨道力学参数时,最小偏移距应当大于或等于 0.05 m,道间距应当设置为 0.05 m,并尽可能增大检波器的排列长度。

3.3 无砟轨道部件性能劣化反演效果

假定轨道板与 CA 砂浆的劣化系数均为 0.2,在 50 kHz 激励频率与建议的检波器布设方法(最小偏移距与道间距为 0.05 m,检波器排列长度为 1.0 m)下,基于有限差分法与相移法获取了无砟轨道的实测面波频散曲线,然后基于如图 6 所示的流程反演无砟轨道各部件力学参数,结果如图 9 所示。

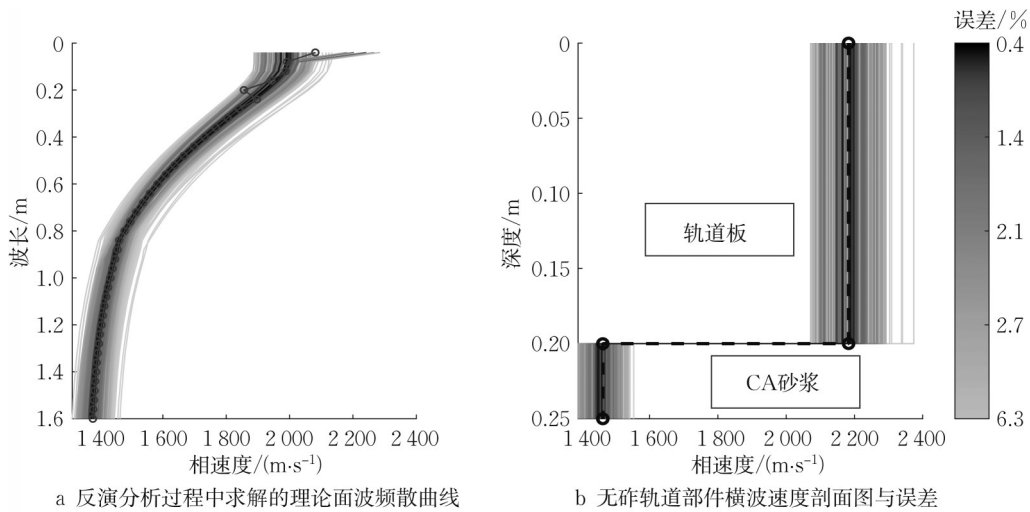


图 9 无砟轨道部件力学参数反演结果

Fig.9 Inversion results of mechanical parameters of ballastless track components

图 9 给出了无砟轨道各部件力学参数的反演结果,其中反演的循环次数为 200 次,误差限值 ϵ_c 取为 0。图 9a 中的带有圆圈的标注线为实测的无砟轨道面波频散曲线,其余实线为 200 次反演循环中求解的理论面波频散曲线,图 9b 为 200 次循环中采用的轨道板与 CA 砂浆力学参数。从图 9 可以发现,部分循环求解的无砟轨道理论面波频散曲线与实测面波频散曲线误差较小,最小误差为 0.4%,该误差值对应的无砟轨道部件力学参数如图 9b 粗虚线所示,实际计算采用的力学参数如表 2 所示。可以看出,反演值与实际仿真计算所采用的波速值非常接近。

同理,当无砟轨道的劣化系数不同时,面波多道分析法反演无砟轨道部件力学参数的结果如图 10 所示。图 10a 中的散点代表实测的面波频散曲线,虚

表 2 无砟轨道力学参数反演值与实际值
Tab.2 Inverse and actual values of mechanical parameters for ballastless track

层号	部件	纵波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		横波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		反演值	实际值	反演值	实际值
1	轨道板	3 537	3 552	2 166	2 175
2	CA 砂浆	2 332	2 318	1 470	1 461

线代表反演过程中误差最小的无砟轨道面波频散曲线,该面波频散曲线对应的无砟轨道横波速度剖面图如图 10b 虚线所示,此外图 10b 的散点代表实际的横波速度剖面。由图 10 可以发现,无砟轨道力学参数的反演值与实际值相差较小,这进一步说明了所提出的方法、超声波激励频率的设置以及检波器的布设位置对于无砟轨道部件性能劣化程度反演具有良好的效果。

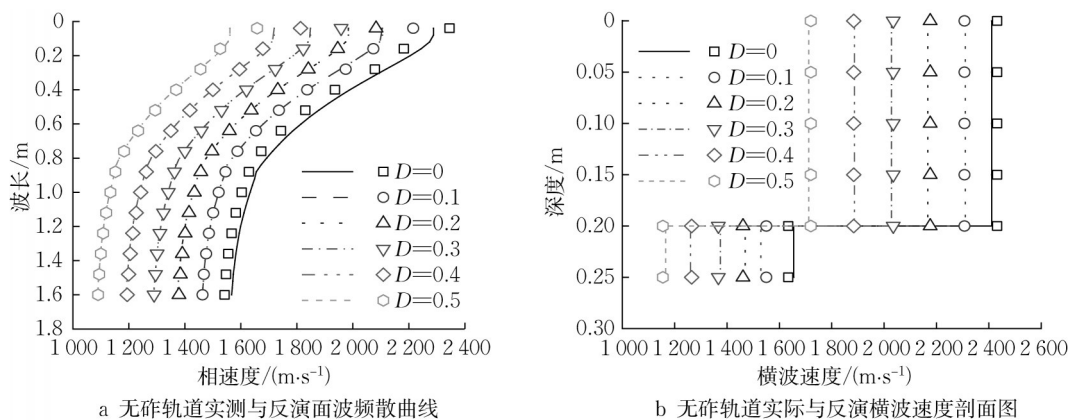


图10 劣化系数不同时的无砟轨道力学参数反演结果

Fig.10 Inversion results of mechanical parameters for ballastless track with different degradation factors

4 结论

(1) 对于无砟轨道结构而言,基于刚度矩阵法计算得到的理论面波频散曲线在20~50 kHz高频段无法与相移法获取的面波频散能量拟合。在采用替代模型法后,无砟轨道的面波频散能量与理论面波频散曲线展现出较好的拟合关系。

(2) 轨道板与CA砂浆的纵波与横波速度都随着劣化程度的增大而减少,波速的变化对无砟轨道的面波频散特性有较大影响。在低频段,无砟轨道面波的相速度取决于CA砂浆的横波速度,在高频段则取决于轨道板的横波速度。

(3) 为改善无砟轨道面波频散能量在高低频段的发育状况并提高面波频散曲线的体现能力,建议在使用面波多道分析法反演无砟轨道部件力学参数时,将超声波激振频率设置为50 kHz,最小偏移距大于或等于0.05 m,道间距取0.05 m,并尽可能增大检波器的排列长度。

(4) 在最优激励频率与建议的检波器布设方法下,使用面波多道分析法可以准确地反演出无砟轨道不同劣化状态时的力学参数,反演分析的精准度较高。

作者贡献声明:

胡 猛:研究思路和方法提出,论文写作,数据分析处理,模型仿真。

许玉德:研究思路和方法提出,资金筹措,研究结果分析。

李少铮:数据分析处理,计算结果整理。

薛志强:数据分析处理,计算结果整理。

曹世豪:研究结果分析,模型建立。

参考文献:

- [1] 杨荣山, 胡猛, 孔晓钰, 等. 双块式无砟轨道枕边裂缝水力损伤特性[J]. 铁道学报, 2022, 44(2): 81.
YANG Rongshan, HU Meng, KONG Xiaoyu, *et al.* Hydraulic damage characteristics of cracks adjacent to sleepers of twinblock ballastless track[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(2): 81.
- [2] 田秀淑. 基于弹性波的无砟轨道砂浆层脱空检测和识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
TIAN Xiushu. Detection and identification of mortar void in ballastless track based on elastic wave method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [3] 李再伟, 吴刚, 朱文发, 等. 基于Lamb波的CRTS II型板式无砟轨道层间损伤检测方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 7.
LI Zaiwei, WU Gang, ZHU Wenfa, *et al.* CRTS II slab ballastless track interlayer damage detection method based on Lamb wave[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 7.
- [4] FAN Guopeng, ZHANG Haiyan, ZHU Wenfa, *et al.* Numerical and experimental research on identifying a delamination in ballastless slab track[J]. Materials, 2019, 12(11): 1788.
- [5] ZHU Wenfa, CHEN Xingjie, LI Zaiwei, *et al.* A SAFT method for the detection of void defect inside a ballastless track structure using ultrasonic array sensors[J]. Sensors, 2019, 19(21): 4677.
- [6] LI Zaiwei, ZHU Wenfa, MENG Xiangzhen, *et al.* Multi-layer imaging method for void defects in ballastless track using forward ray tracing with SAFT[J]. Measurement, 2021, 173: 108532.
- [7] ZHU Wenfa, SHAO Wei, CHEN Xingjie, *et al.* Detection method for cavity defects in ballastless track structures of high-speed railways based on air-coupled ultrasonic Lamb waves[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2019, 3: 143.
- [8] 吴刚, 李再伟, 朱文发, 等. 基于空耦超声导波的无砟轨道

- CA 砂浆脱空检测方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1375.
- WU Gang, LI Zaiwei, ZHU Wenfa, *et al.* Ballastless track CA mortar void detection method based on air-coupled ultrasonic guided wave [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1375.
- [9] 马昆林, 龙广成, 谢友均. 蒸养混凝土轨道板劣化机理研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 116.
- MA Kunlin, LONG Guangcheng, XIE Youjun. Deterioration mechanism of steam-cured concrete track slab [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 116.
- [10] 徐浩, 林红松, 颜华, 等. CRTS I 型CA砂浆劣化对其疲劳寿命的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 30.
- XU Hao, LIN Hongsong, YAN Hua, *et al.* Effect analysis of CRTS I type CA mortar degradation on its fatigue life [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(12): 30.
- [11] 姜福豪, 李培明, 张翊孟, 等. 多道面波频散分析在实际大炮数据中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 9.
- JIANG Fuhao, LI Peiming, ZHANG Yimeng, *et al.* Frequency dispersion analysis of MASW in real seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 9.
- [12] SOCCO L V, STROBBIA C. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial [J]. Near Surface Geophysics, 2004, 2(4): 165.
- [13] JAGANATHAN A P. Multichannel surface wave analysis of reinforced concrete pipe segments using longitudinal and circumferential waves induced by a point impact [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 163: 40.
- [14] FAURE R M, LEFEBVRE G, KARRAY M, *et al.* The MASW method for testing tunnel lining integrity [C]// Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress, Underground Space, the 4th Dimension of Metropolises. London: Taylor & Francis Group, 2007: 1475-1480.
- [15] LEE Y H, OH T. The simple Lamb wave analysis to characterize concrete wide beams by the practical MASW test [J]. Materials, 2016, 9(6): 437.
- [16] SHAHSAVARI V. Applying the MASW method to estimate the thickness of superficial layers in concrete [M]. Ottawa: Library and Archives Canada, 2012.
- [17] ALZATE-DIAZ S P, POPOVICS J S. Application of MASW to characterize pavement top layers [C]// 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes: Laboratoire central des ponts et chaussées, 2009.
- [18] ZHU Jinying. Non-contact NDT of concrete structures using air coupled sensors [M]. Champaign County: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
- [19] 杨鸿凯, 车爱兰, 汤政, 等. 基于弹性波理论的高铁线下结构病害快速检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1010.
- YANG Hongkai, CHE Ailan, TANG Zheng, *et al.* Elastic-wave-based detection method for under line structure of high-speed railway [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 1010.
- [20] 夏江海. 高频面波方法 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2015.
- XIA Jianghai. High frequency surface wave method [M]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [21] 张雯皓. 基于压电陶瓷的双块式轨枕与道床界面损伤识别 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- ZHANG Wenhao. Damage detection at the interfaces between double-block sleepers and slabs using PZT [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [22] 伍敦仕, 孙成禹, 林美言. 基于互相关相移的主动源地震面波频散成像方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1693.
- WU Dunshi, SUN Chengyu, LIN Meiyan. Active seismic surface wave dispersion imaging method based on cross-correlation and phase-shifting [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1693.
- [23] KAUSEL E, ROËSSET J M. Stiffness matrices for layered soils [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(6): 1743.
- [24] JAFARGANDOMI A, TAKENAKA H. Non-standard FDTD for elastic wave simulation: two-dimensional P-SV case [J]. Geophysical Journal International, 2009, 178(1): 282.
- [25] PAN Yudi, XIA Jianghai, GAO Lingli, *et al.* Calculation of Rayleigh-wave phase velocities due to models with a high-velocity surface layer [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 96: 1.
- [26] SCHUBERT F, KÖHLER B. Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity [J]. Journal of Computational Acoustics, 2001, 9(4): 1543.