

何非凡,李庆春,封一凡,等.基于高速铁路列车震源信号的地震面波干涉方法[J].地球科学与环境学报,2025,47(6):1126-1140.

HE Fei-fan,LI Qing-chun,FENG Yi-fan,et al. Seismic Surface Wave Interferometric Methods Based on Seismic Source Signals from High-speed Train[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2025,47(6):1126-1140.

DOI:10.19814/j.jese.2025.03002

## 基于高速铁路列车震源信号的地震面波干涉方法

何非凡,李庆春\*,封一凡,王鹏起,郑楚涵

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**高速铁路列车震源信号绿色环保、重复稳定,在近地表探测和城市地下空间监测中具有重要应用潜力,但是使用传统地震干涉方法处理时易受串扰噪声严重干扰。为此,提出了一种适用于高速铁路列车震源数据的处理流程,以提高干涉结果的信噪比和反演成像的可靠性。首先,将高速铁路列车视为移动线源,并将轮组作用力等效为点源,构建震源时间函数;通过对比分析不同干涉方法对高速铁路列车震源数据的适用性,构建了一套包含谱白化、互相干干涉、多趟列车事件叠加及FK滤波变换的数据处理流程。基于该数据处理流程,分别对模拟和实测的高速铁路列车震源数据进行面波信号提取,并利用提取的面波信号开展地下介质速度反演。结果表明:本文提出的数据处理流程能有效抑制串扰噪声,获得高信噪比的虚拟源面波记录,谱白化可提升面波信噪比,互相干干涉方法具有较强的抗串扰能力,多趟列车事件叠加能够重建高频段的面波频散能量,FK滤波变换可凸显面波信号特征;最终的反演结果与实际地层信息吻合良好,验证了本文提出的数据处理流程的可靠性和有效性。

**关键词:**列车振动;移动震源;地震波;干涉方法;串扰噪声;虚拟炮集记录;面波成像

**中图分类号:**P631.4<sup>+</sup>12;U211.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2025)06-1126-15

### Seismic Surface Wave Interferometric Methods Based on Seismic Source Signals from High-speed Train

HE Fei-fan, LI Qing-chun\*, FENG Yi-fan, WANG Peng-qi, ZHENG Chu-han

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The seismic source signal generated by high-speed train (HST) is a green, environmentally friendly, and highly repeatable source, demonstrating significant potential for applications in near-surface exploration and urban underground space monitoring. However, when processed using traditional seismic interferometric methods, this signal is often severely contaminated by crosstalk noise. To address this issue, an interferometric processing workflow tailored for HST seismic data is proposed to enhance the signal-to-noise ratio (SNR) of the interferometric results and improve the reliability of subsequent inversion and imaging. First, the HST is treated as a moving line source, with its wheel-rail interaction forces equivalently modeled as a series of point sources to construct the source time function; by comparing the applicability of different interferometric methods for HST seismic data, a comprehensive workflow

收稿日期:2025-03-01;修回日期:2025-06-27 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA0716902);长安大学研究生科研创新实践项目(300103725010)

\*通信作者:李庆春(1961-),男,山东郓城人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dcliqc@chd.edu.cn.

incorporating spectral whitening, cross-coherence interference, stacking of multiple train events, and FK filtering is developed. Using this workflow, surface wave signals are extracted from both synthetic and field HST seismic data for subsurface shear-wave velocity inversion. The results show that the proposed workflow effectively suppresses crosstalk noise and yields high-SNR virtual-source surface wave records; specifically, spectral whitening improves the SNR of surface waves, cross-coherence interferometry exhibits strong robustness against crosstalk, stacking of multiple train events helps reconstruct dispersion energy at high-frequencies, and FK filtering enhances the characteristics of the surface wave signal; the final inversion results correlate well with actual stratigraphic information, validating the reliability and effectiveness of the proposed workflow.

**Key words:** train vibration; moving seismic source; seismic wave; interferometric method; crosstalk noise; virtual shot gather; surface wave imaging

## 0 引言

随着我国高速铁路飞速发展,高速铁路线网愈发密集,运行速度不断突破。高速铁路列车因铁路线路固定、长期重复运行,且车厢节数、长度及运行速度稳定,逐渐成为稳定且可重复的人工震源。这一发现为地震勘探开辟了新方向,国内外学者在高速铁路列车震源相关研究领域取得了丰硕成果。在高速铁路列车震源信号方面,徐善辉等通过分析高架桥段列车振动特征,发现同一位置不同列车震源信号具有良好的相似性<sup>[1]</sup>;Fuchs等研究了列车震源信号中的等距谱线成因<sup>[2]</sup>;温景充等揭示了列车震源数据的地震波场单频展宽和干涉特征<sup>[3]</sup>。在列车运行状态方面,王晓凯等运用时频分析技术实现了信号分离和速度估计<sup>[4-6]</sup>;包乾宗等通过信号同步挤压小波变换后的时变特性确定了列车速度变化<sup>[7]</sup>,为列车安全运行提供了技术支撑。在列车振动产生的地震波特征方面,张固澜等基于纵横波产生机理并结合列车及铁轨结构建立了震源子波时间函数<sup>[8]</sup>;曹健等对列车震源信号使用Green函数进行建模<sup>[9]</sup>;王之洋等提出了“分级点火”式震源模型<sup>[10]</sup>。上述研究为高速铁路列车震源研究奠定了理论基础。

利用高速铁路列车震源数据进行地下介质成像是该领域实际应用的关键环节。石永祥等利用逆时偏移成像方法对列车震源模拟数据进行处理,通过叠加多趟列车事件提高了成像结果的质量<sup>[11]</sup>;Luo等进一步将弹性波逆时偏移方法应用于列车震源数值模拟研究,有效重构地下介质结构特征,展现出该方法在列车震源数据成像中的巨大潜力<sup>[12]</sup>。近年来,随着全波形成像技术的发展,学者们将其成功应

用于高速铁路列车震源数据的处理中。Luo等利用全波形反演方法,在列车震源数据中取得了较好的反演结果<sup>[13-14]</sup>;王磊等基于列车震源数据的窄带分立谱特征选取合适的频率成分,实现了瑞雷面波多尺度全波形反演<sup>[15]</sup>。然而,全波形反演方法极度依赖于高保真波形数据及精确的震源信息<sup>[16]</sup>,这使得该方法在实际高速铁路列车震源数据处理中仍面临巨大挑战。

地震干涉成像无需精确的震源信息<sup>[17-18]</sup>,在处理移动震源等方面展现出显著优势。Nakata等利用地震干涉方法从铁路交通噪声中提取面波,成功反演剪切波速结构<sup>[19]</sup>;Quiros等应用地震干涉方法处理长时间的铁路交通数据,恢复了铁路下方地质特征的面波和体波,并发现列车产生的瑞利波频率范围特征<sup>[20]</sup>;Brenquier等进一步将该方法应用于铁路噪声数据,监测断裂带附近的地震速度变化<sup>[21]</sup>;Liu等基于循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的面波频散反演工作流程,验证了干涉方法可以从公路和铁路噪声数据中提取面波信号<sup>[22]</sup>;Rezaeifar等利用列车交通噪声数据进行互相关干涉,选择不同列车、不同速度信号干涉并叠加虚拟炮集记录来削弱交叉项影响<sup>[23]</sup>;Zhang等研究发现,对列车事件远场噪声数据进行谱白化处理后再干涉可消减伪影影响<sup>[24]</sup>。同时,地震干涉方法也为高速铁路列车振动引起的地震成像提供了新的思路。Shao等基于地震干涉方法,采用分布式声学传感(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技术采集列车震源数据,获得了面波信号<sup>[25]</sup>;张唤兰等提出将“提速”或“降速”的干涉成像方法应用于列车震源数据分析<sup>[26]</sup>;Liu等提出适用于三维标量波和弹性波的地震干涉方法新推导,同时提出堆叠不同速度列

车的震源数据来提高干涉质量<sup>[27]</sup>;Mi等证明叠加不同速度列车引起的地震干涉结果可以减弱震源自相关的影响<sup>[28]</sup>;You等应用频域归一化压制列车震源信号分立谱的特性,提取了高质量面波数据<sup>[29]</sup>。

然而,列车沿铁路线路高速行驶导致震源空间分布呈现明显的方向性特征,所产生的波场具有显著的非随机性和复杂性。现有干涉处理方法在应用过程中仍存在明显的串扰噪声,直接影响了面波频散曲线的提取精度和速度模型反演的可靠性。针对这一关键问题,本文将系统评估不同地震干涉方法处理高速铁路列车震源数据的适用性,并提出一套针对高速铁路列车震源特性的面波信号提取与数据处理流程。首先,将高速铁路列车视为沿高架桥单一方向行驶的移动线性点源,推导震源子波函数并模拟列车由桥墩向地下激发地震波的过程;接着,通过理论分析以及数据测试,对比互相关干涉、反褶积干涉、互相关干涉方法在高速铁路列车震源数据处理中的本质差异,重点研究谱白化、叠加、滤波等处理方法对干涉提取面波频散特性的影响,据此提出针对高速铁路列车震源数据的处理流程;最后,运用该数据处理流程分别处理模拟数据和实测数据,通过对比频散能量聚焦度及频散能量与理论频散曲线的拟合度,验证其在复杂噪声环境下处理高速铁路列车震源数据的鲁棒性,以期为铁路线路附近地下介质精准成像、铁路线路安全运营保障和地质灾害预防等提供参考。

## 1 理论方法

### 1.1 高速铁路列车震源时间函数的建立

为确保高速铁路系统平稳高效运行,高速铁路列车主要采用高架桥作为行驶路径。列车行驶时,其振动能量主要来自轮轨系统的相互作用。各轮组的周期性荷载首先作用于轨道结构,继而通过轨道与桥面的接触界面向桥墩传递<sup>[30]</sup>。为简化分析,假设各轮组与桥面、桥墩接触点产生的振动能量等效,且不考虑列车运行状态、位置等因素对震源子波振幅的影响。因此,轨道系统与桥面的动态接触点可视为一系列振动源,每个轮轨接触点可等效为移动点震源。由于桥墩沿铁路线路均匀分布,当列车经过时,每个桥墩都会独立激发地震波,从而可将其视为一系列离散的点震源。基于此物理机制,可将整列车视为沿行驶方向连续分布的移动线源,该线源可通过多个时移点源的线性叠加进行数学表征。

简化列车车厢的参数一致,忽略轮组对铁轨的

负载作用。参考和谐号 CRH5 车型参数,单节车厢的结构模型如图 1 所示。其中, $L$  表示车厢长度, $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$  分别表示车头与四对轮组之间的距离。

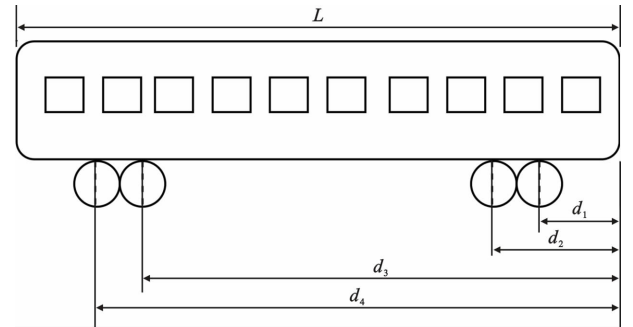


图 1 列车车厢结构示意图

Fig. 1 Schematic View of Train Car Structure

假设一列列车以速度  $v$  在高架桥上匀速行驶,列车轮组与轨道相互作用产生的震源子波为  $w(t)$ 。列车驶过某个桥墩  $x_s$  时,其轮组施加作用力激发的震源时间函数  $f(t)$  为

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N_c} \left[ w\left(t - \frac{x_s + d_i}{v}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $N_c$  是列车的轮组个数; $x_s$  是桥墩与列车车头的水平距离; $d_i$  是车头与第  $i$  组车厢轮组之间的水平距离; $t$  为时间。

列车在高架桥上行驶时,其振动信号主要通过桥墩向地下传播,形成地震波场。当列车以速度  $v$  行驶在桥墩间距为  $D$  的高架桥上时,列车每节车厢的前后轮组会对桥面施加周期性作用力,从而引起桥面振动(图 2)。这些振动信号通过桥墩  $x_s$  传递至地面,并在周围地下介质中激发地震波。忽略其他噪声的影响,在检波器 A 处观测到的波场,是由列车通过  $s$  个桥墩时激发的振动信号叠加而成。其表达式为

$$U(x_A, t) = \sum_s f(t) \quad (2)$$

式中: $U(x_A, t)$  表示检波器 A 处在时间域的波场; $x_A$  为检波器 A 处的位置; $s$  表示桥墩(震源点)的总数。

式(2)对应的频率域表达式为

$$U(x_A, \omega) = \sum_j F(\omega) e^{ik(x_A - x_j)} = \sum_j F(\omega) e^{i\omega \frac{x_A - x_j}{v}} \quad (3)$$

式中: $U(x_A, \omega)$  为检波器 A 处在频率域的波场; $F(\omega)$  表示  $f(t)$  的频率域; $k$  为波数; $x_j$  为第  $j$  个桥墩(震源点)的位置。

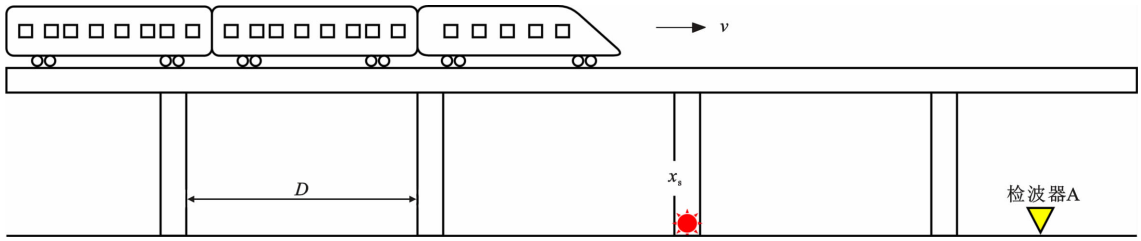


图 2 列车驶过高架桥示意图

Fig. 2 Schematic View of a Train Crossing a Viaduct

1.2 地震干涉方法

地震干涉方法是通过源对地震、微震活动、环境噪声或人为地震源产生的信号进行数据处理,从而在两个地震检波器或加速度计间构建出格林函数<sup>[31]</sup>。在这一过程中,一个检波器相当于虚拟震源,而另一个检波器则作为接收端记录由此产生的波场响应。由于这样处理得到的记录并非由实际震源激发产生,所以将所得记录称为虚拟炮集记录<sup>[32]</sup>。

目前,地震干涉方法主要包含互相关干涉、反褶积干涉和互相干干涉等 3 种方法。其中,互相关干涉方法是最早被提出且应用最为广泛的一种,该方法通过计算两个检波器记录的互相关干涉函数来提取格林函数<sup>[33-34]</sup>;反褶积干涉方法是在频率域中通过除法运算消除源信号影响,直接获取检波器间的波场响应<sup>[35-37]</sup>,该方法能更准确地反映波场传播特性;互相干干涉方法则是基于空间自相关原理推导而来,也被称为空间相干方法<sup>[19,38]</sup>。

列车运行产生的振动信号具有典型的被动震源特征。这一特征为地震干涉方法的应用提供了理想条件。在实际应用中,由于列车的震源复杂且无法确定位置,难以直接进行成像处理<sup>[39]</sup>。如图 3 所示,本文选取检波器 A、B 作为观测系统。当列车通过桥墩时,桥墩  $x_s$  激发的振动波场被两个检波器记录;针对同一激发点  $x_s$ ,将检波器 A 接收到的波场与检波器 B 接收到的波场进行干涉处理;经过处理后,检波器 A、B 接收的波场中具有共同传播路径的部分会被抵消,从而构建出从检波器 A 到检波器 B 的接收波场。这一过程有效解决了移动震源带来的成像难题,为高速铁路列车震源信号的应用提供了可靠的技术途径。

互相关干涉是通过两道数据间的互相关运算来提取检波器之间的波场。基于式(3)给出检波器 A、B 处的波场在频率域中的互相关干涉 ( $C_{AB}$ ) 表达式为

$$C_{AB} = U(x_B, \omega)U^*(x_A, \omega)$$

$$= e^{ik(x_B-x_A)} \left( \sum_{j=l} |F(\omega)|^2 \right) + \dots \dots \dots e^{ik(x_B-x_A)} \left( \sum_{j \neq l} F_j(\omega)F_l(\omega)e^{ik(x_j-x_l)} \right) \quad (4)$$

式中: $U(x_B, \omega)$ 为检波器 B 处在频率域的波场;上标 \* 表示复共轭运算; $x_B$  为检波器 B 处的位置; $|F(\omega)|^2$  为震源子波功率谱项; $F_j(\omega)$ 、 $F_l(\omega)$  为激发位置  $j$ 、 $l$  处  $f(t)$  的频率域; $e^{ik(x_B-x_A)}$ 、 $e^{ik(x_j-x_l)}$  为波场传播的相位信息。

反褶积干涉是通过两道数据间的反褶积运算来提取检波器之间的波场。对检波器 A、B 处的波场进行反褶积干涉处理,其频率域 ( $D_{AB}$ ) 表达式为

$$D_{AB} = \frac{U(x_B, \omega)}{U(x_A, \omega)} = \frac{e^{ik(x_B-x_A)} + \dots \dots \dots e^{ik(x_B-x_A)} \sum_{j \neq l} \frac{F_j(\omega)}{F_l(\omega)} e^{ik(x_j-x_l)}}{\dots \dots \dots} \quad (5)$$

互相干干涉是在频率域中对两道数据实施归一化互相关运算,进而提取检波器之间的波场<sup>[40]</sup>。对检波器 A、B 处的波场进行互相干干涉处理,其频率域 ( $H_{AB}$ ) 表达式为

$$H_{AB} = \frac{U(x_B, \omega)U^*(x_A, \omega)}{|U(x_B, \omega)| |U(x_A, \omega)|} = \frac{e^{ik(x_B-x_A)} + \dots \dots \dots e^{ik(x_B-x_A)} \sum_{j \neq l} e^{ik(x_j-x_l)}}{\dots \dots \dots} \quad (6)$$

以上公式分别给出了在高速铁路列车震源数据中 3 种地震干涉方法的表达式。在频率域中的干涉结果包含两个主要部分:①有效项(式(4)~(6)中采用下点线标记的部分),反映相同震源位置干涉形成的信号特征和震源属性;②串扰项,源于高速铁路列车移动过程中不同桥墩位置激发地震波在干涉处理时的相互干扰,这是不可避免的噪声成分。

在有效项中,3 种地震干涉方法存在差异。互相关干涉方法虽然能保留信号特征和震源属性,但受震源子波项及检波器灵敏度差异的影响,结果易产生误差;反褶积干涉和互相干干涉方法在处理上消除了震源子波的影响,保留了有效信号特征。在串扰项中,互相关干涉方法对串扰项的抑制能力较弱,串扰噪声可能对结果产生较大干扰;反褶积干涉

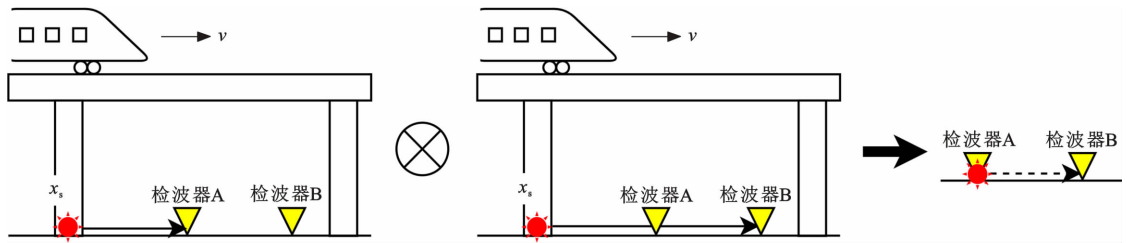


图3 列车震源信号的地震干涉示意图

Fig. 3 Schematic View of Seismic Interference for Seismic Source Signals from Train

方法通过频谱归一化处理降低了串扰项的干扰程度;互相干干涉方法直接消除震源子波的影响,能更进一步压制串扰噪声。

对于高速铁路列车震源信号数据,反褶积干涉和互相干干涉方法处理时都需要引入正则化因子,以避免频率域运算中分母为0的情况。正则化参数的选择至关重要,过大的参数会使方法退化为简单的互相关运算,而过小的参数会导致运算不稳定。本文参考 Mehta 等的研究结果<sup>[40-41]</sup>,在反褶积运算和互相干运算中均采用 0.01 作为正则化因子,确保处理结果的稳定性。

### 1.3 数据处理流程

在对高速铁路列车震源数据干涉处理中,不同震源产生的波场间存在相互串扰<sup>[42]</sup>,会严重降低干涉结果的信噪比,因此,需要采用数据处理流程来降低这种串扰噪声的影响,以提高干涉结果的准确性和可靠性。

图4展示了完整的数据处理流程。首先,为确保后续处理的数据质量,需要对高速铁路列车震源数据进行筛选,从中挑选出人为活动干扰较少、列车振动信号强烈的数据段。完成筛选后进入预处理阶段,该阶段包含一系列关键操作:①去除存在严重噪声、信号缺失或异常的坏道,保证数据完整准确;②消除检波器耦合效应及仪器漂移等因素的影响,使数据更平稳;③进行时域归一化,统一不同时间段信号幅度范围,减少人为活动干扰,增强数据可比性;④对数据谱白化处理,通过对数据频谱进行归一化,对有效频段内振幅谱归一化,提高频谱分辨率,增强有效信号信噪比并抑制干涉导致的虚假同相轴干扰<sup>[24,43]</sup>;⑤进行均方根振幅归一化,平均信号能量水平。预处理完成后,将数据按统一时间窗口分割,作为后续地震干涉处理的数据集。随后,运用互相干干涉方法对分割后的数据构建虚拟炮集记录;再将多趟列车事件的虚拟炮集记录进行叠加,以增强面波信号。最后,对叠加后的数据进行滤波处理,使用FK滤波变换滤除负视速度的同相轴,保留面

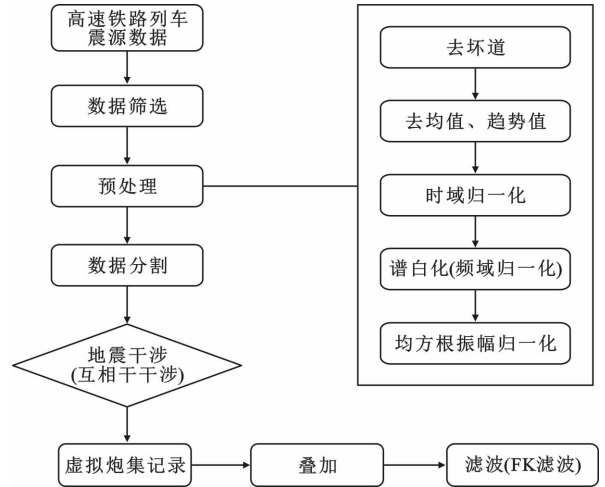


图4 列车震源信号数据处理流程

Fig. 4 Data Processing Flow of Seismic Source Signals from Train

波信号,为地下结构成像提供可靠的数据支撑。

## 2 理论模拟数据测试

实际地下介质普遍具有黏弹性特征,地震波在地层中传播时会伴随能量的衰减。鉴于此,本文依据构建的高速铁路列车震源时间函数,采用二维 Kelvin 介质黏弹性波方程的交错网格有限差分方法,对高速铁路列车行驶经过高架桥的过程进行了数值模拟。

在数值模拟前,参照我国高速铁路列车标准,设定列车为 8 节车厢( $N=8$ ),每节车厢长度( $L$ )统一为 25 m。每节车厢通常有两组轮组,这里给出部分轮组与车头的距离,分别为  $d_1=2.4$  m、 $d_2=5.1$  m、 $d_3=19.9$  m、 $d_4=22.6$  m(针对每对轮组与车头的相对位置),其他轮组位置可根据车厢排列和轮组间距规律推算。对于高架桥部分,设定 30 个桥墩( $s=30$ ),桥墩之间的间距  $D=30$  m。列车震源子波函数选用雷克子波,其主频  $F_m=20$  Hz。

在数值模拟中,构建三层均匀半空间模型:第一层为低速层,层厚为 10 m,密度为  $1\ 363\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,纵波速度为  $374\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,横波速度为  $200\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

第二层同样为低速层,层厚为 20 m,密度为  $1\ 620\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,纵波速度为  $748\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,横波速度为  $400\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;第三层为高速层,层厚为 70 m,密度为  $1\ 698\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,纵波速度为  $900\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,横波速度为  $600\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。模型设置品质因子  $Q_p=50$ (纵波品质因子)、 $Q_s=50$ (横波品质因子)来模拟黏弹性地层。模型网格大小为  $450 \times 50$ ,网格间距为 2 m,时间步长为 1 ms。检波器被部署在地面(0 m),道间距为 2 m,接收范围为 0~900 m。

图 5 是模拟列车以  $210\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度驶过高架桥 30 s 的数据记录。为保证图像清晰,本文仅显示观测长度为 150 m、道间距为 6 m 的波形记录。根据图 5 中列车震源信号在时间-距离图上的斜率,可以计算出列车速度,该速度与设定的速度一致。为进一步分析模拟记录特征,本文提取图 5 中红色箭头所指的地震记录,并对其时间域和频率域信息进行分析,结果如图 6 所示。地震记录的振幅随列车与检波器的距离变化,形成了纺锤状的列车震源信号[图 6(a)]。图 6(b)的频谱图显示出显著的分立谱特征,这是列车震源信号的典型特征之一<sup>[4-7,44-47]</sup>;时频谱图[图 6(c)]也反映了这一特性。这种现象是不同位置处列车轮组产生的震源激发的波场相互累加所致。

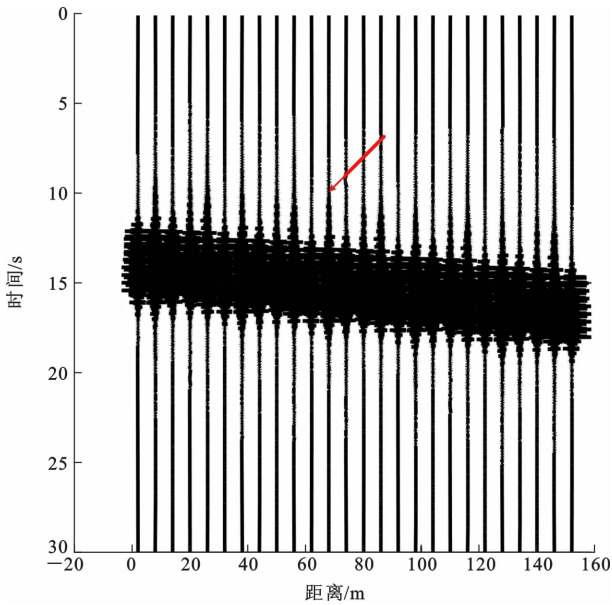


图 5 列车振动引起的地震波场记录

Fig. 5 Seismic Wavefield Record Caused by Train Vibration

本文选择图 5 的地震数据,使用 3 种干涉方法提取出 2 s 时间窗口的虚拟炮集记录(图 7),并用红色虚线段表示理论面波相速度在虚拟炮集记录中的斜率。从互相关干涉结果可以明显看到许多串扰噪

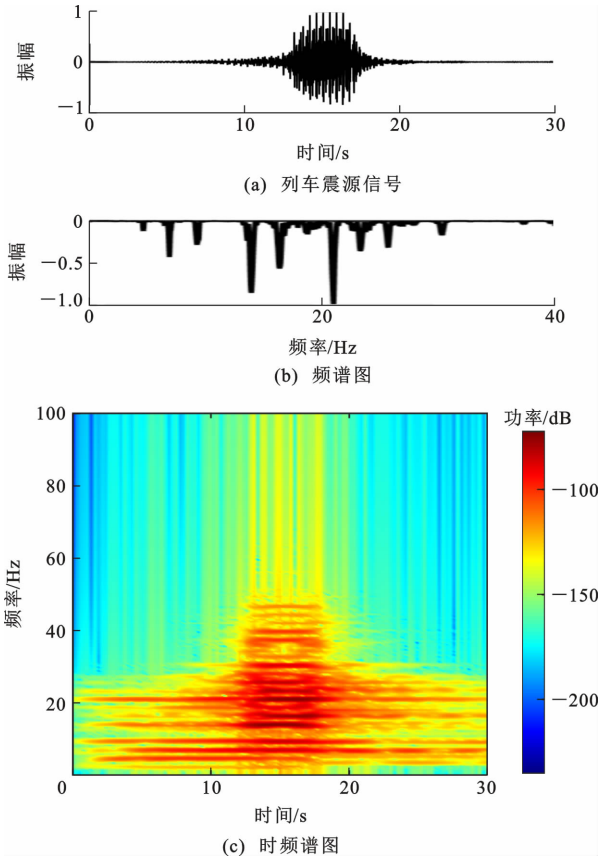


图 6 地震波场单道记录的时频域分析

Fig. 6 Time-frequency Domain Analyses of a Single-trace Seismic Wavefield Record

声(多重伪影)的影响[图 7(a)]。其中,串扰噪声是不同震源位置处激发的波场在干涉叠加过程中产生的,对干涉结果产生了显著干扰,进而降低了虚拟炮集记录的信噪比。这一串扰在反褶积干涉和互相干涉结果[图 7(b)、(c)]中明显减弱,红色虚线以下的串扰噪声得到一定程度的压制。图 8 展示了基于图 7 计算得到的归一化振幅谱。结果显示:相较于反褶积干涉和互相干涉提取的虚拟炮集记录,直接对模拟记录采用互相关干涉提取的归一化振幅谱频带宽度较窄。其中,互相干涉处理的振幅谱呈现出最佳的宽频带特征。

图 9 展示了对虚拟炮集记录使用相移法提取的面波频散能量。图 9 中白色虚线为根据 Shi 等提出的谱元法所求解计算的分层黏弹性介质中面波理论频散曲线<sup>[48]</sup>。从图 9 可以看出,3 种干涉方法提取的面波频散能量与面波理论频散曲线的变化趋势一致,但识别效果较为模糊,这证明了干涉方法用于高速铁路列车震源数据处理的可靠性。然而,在 1~10 Hz 低频段内,面波频散能量谱与解析解存在较大误差;在 10~40 Hz 高频段内,成像精度较低。

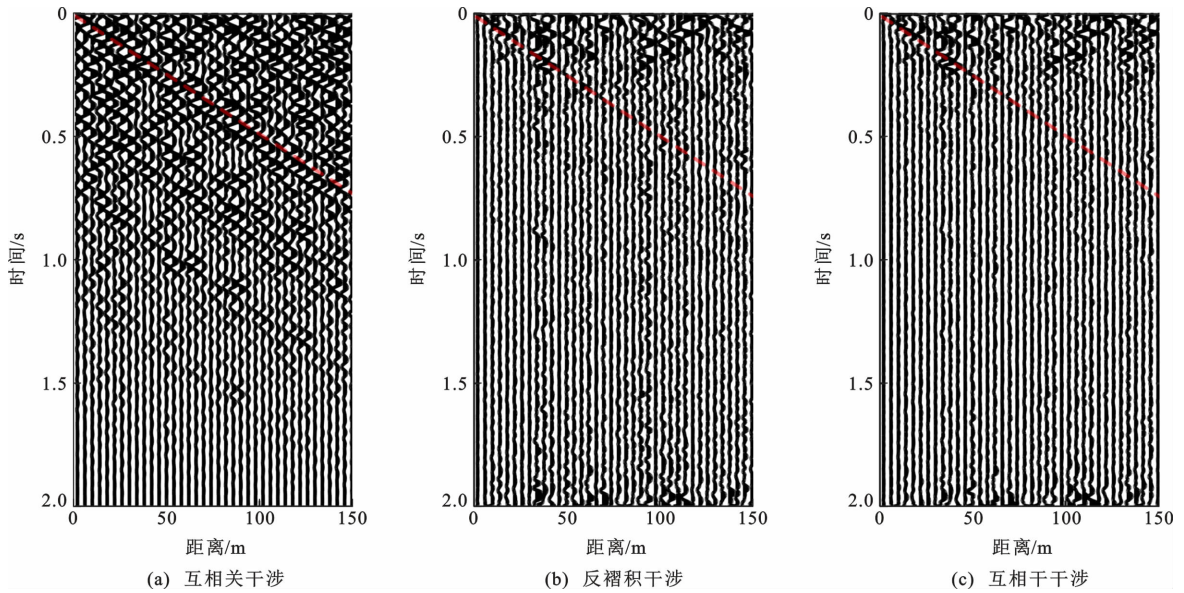


图 7 根据地震波场记录提取的 2 s 时间窗口虚拟炮集记录

Fig. 7 Virtual Shot Gathers with 2-second Time Window Extracted from Seismic Wavefield Record

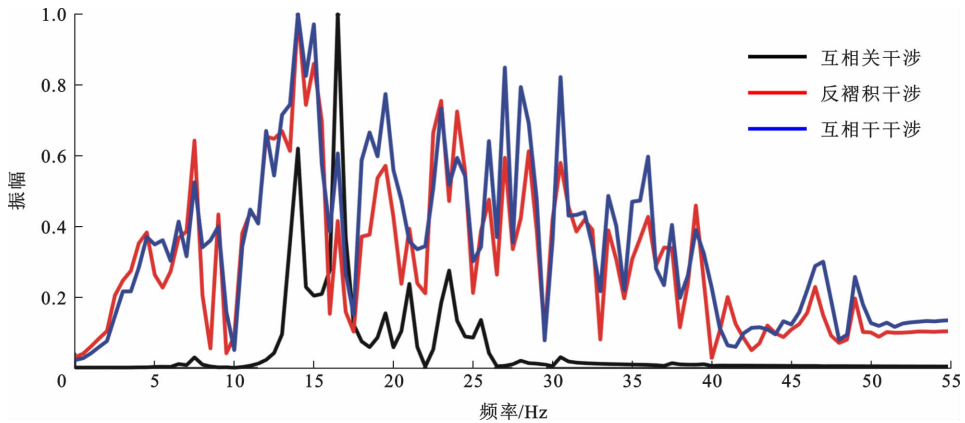


图 8 虚拟炮集记录的归一化振幅谱

Fig. 8 Normalized Amplitude Spectra of Virtual Shot Gathers

图 10 引入不同的高速铁路列车震源数据处理方法,使用干涉方法对比并分析不同数据处理方法对结果的影响。图 10(a)为直接干涉获得的结果。对数据进行 1~40 Hz 频率的谱白化处理(谱白化即频域归一化)后再进行干涉处理[图 10(b)],可以明显看到图中红色虚线上部分的串扰消减,获得了清晰的同相轴,但结果仍受到负视速度同相轴的干扰。在此基础上,引入 FK 滤波变换对负视速度信号进行滤除[图 10(c)]。该处理有效地消除了负视速度的伪影,获得了更高质量的虚拟源记录。图 11 展示了从图 10 中虚拟炮集记录提取到的面波频散能量。在 1~40 Hz 频段,面波频散能量均表现出连续性,且与面波理论频散曲线(白色虚线)有一定程度的拟合。然而,当频率为 6~40 Hz 时,直接干涉得到的面波频散能量连续性较差[图 11(a)],与面波理论

频散曲线的匹配度也显著降低。经过 1~40 Hz 频率的谱白化处理之后,面波频散能量的结果得到了显著提升[图 11(b)]。进一步结合 1~40 Hz 频率的谱白化和负视速度信号进行 FK 滤波变换处理,所得结果在高频段展现出最优的面波频散能量分布特征[图 11(c)],与面波理论频散曲线拟合较好。

为进一步提高提取面波结果的精度,本文引入多趟列车事件干涉叠加的方法,并讨论了该方法对结果产生的影响。首先,模拟 100 趟列车以 200~300 km·h<sup>-1</sup> 的随机速度驶过高架桥时产生的地震记录,作为叠加处理的数据集;然后,采用图 4 中的数据流程,通过对比不同速度列车事件干涉叠加结果,以及对虚拟炮集记录提取的面波频散能量与面波理论频散曲线拟合程度,来评价干涉重构的波形信息。图 12 展示了使用图 4 中的数据流程

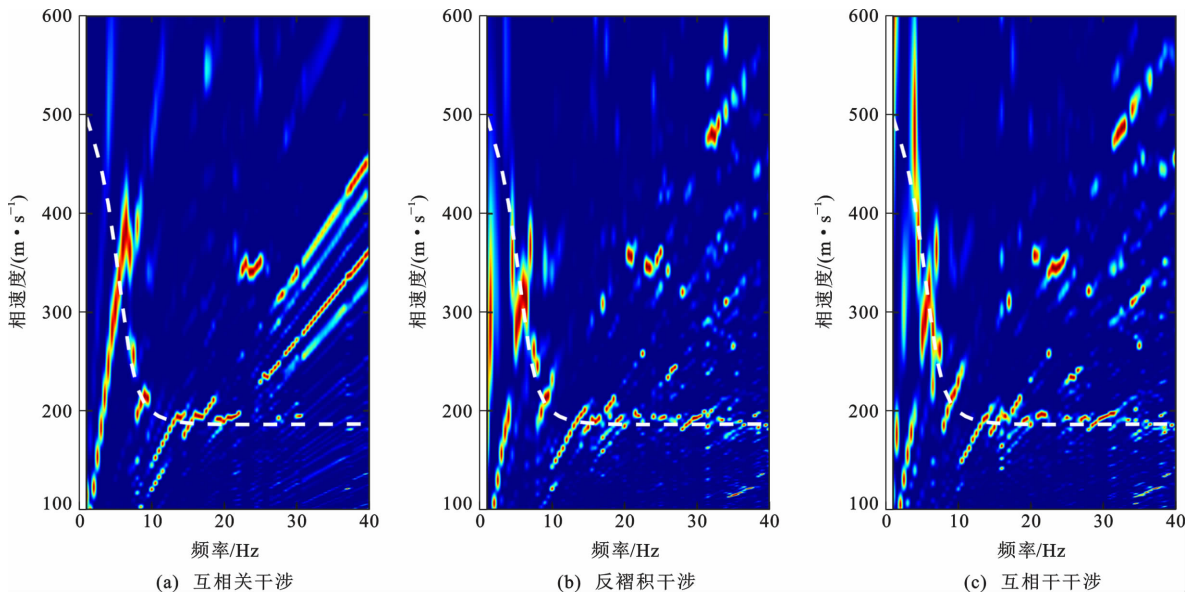


图 9 从虚拟炮集记录提取的面波频散能量

Fig. 9 Surface Wave Dispersion Energies Extracted from Virtual Shot Gathers

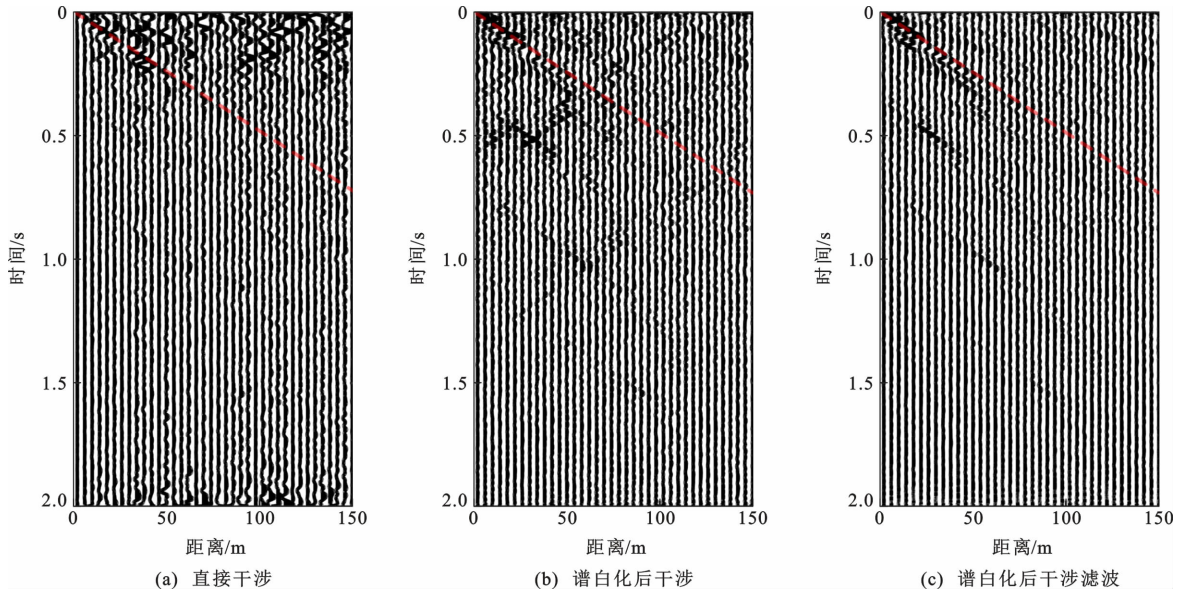


图 10 单趟列车事件下互相干涉提取的虚拟炮集记录

Fig. 10 Virtual Shot Gathers Extracted by Cross-coherence Interference for Single Train Event

程叠加不同速度列车事件所得的虚拟炮集记录。随着叠加列车事件次数的增加,面波信号也显著增强(图中红色虚线表征理论面波相速度对应的斜率)。这一现象表明,多次叠加处理能够有效提升面波信号的可识别性。图 13 展示了从图 12 中提取的面波频散能量。从图 13 可以看出:面波频散能量集中在面波理论频散曲线附近,不同的是叠加的列车事件越多,面波频散能量越连续,信噪比越高;同时,随着列车事件叠加次数的增加,面波频散能量中逐渐显现出若干高阶模态能量团。这些能量团的分布特征与面波理论频散曲线(白色虚线)展现出良好的一

致性。

本文采用 Yan 等提出的多阶模态联合反演策略<sup>[49]</sup>,运用全局优化算法开展反演计算。具体来说,通过使用本文提出的数据处理流程并叠加 30 趟列车事件的面波频散谱[图 13(b)],进行面波频散曲线提取;并以此为基础反演成像,获取了一维横波速度剖面(图 14)。将反演结果与设定的模型数值进行对比分析发现,本文提出的数据处理流程能够高效提取高质量的面波信号。反演所得的横波速度在深度和速度方面均与真实值高度吻合,这一结果充分验证了该数据处理方法的可靠性和准确性。

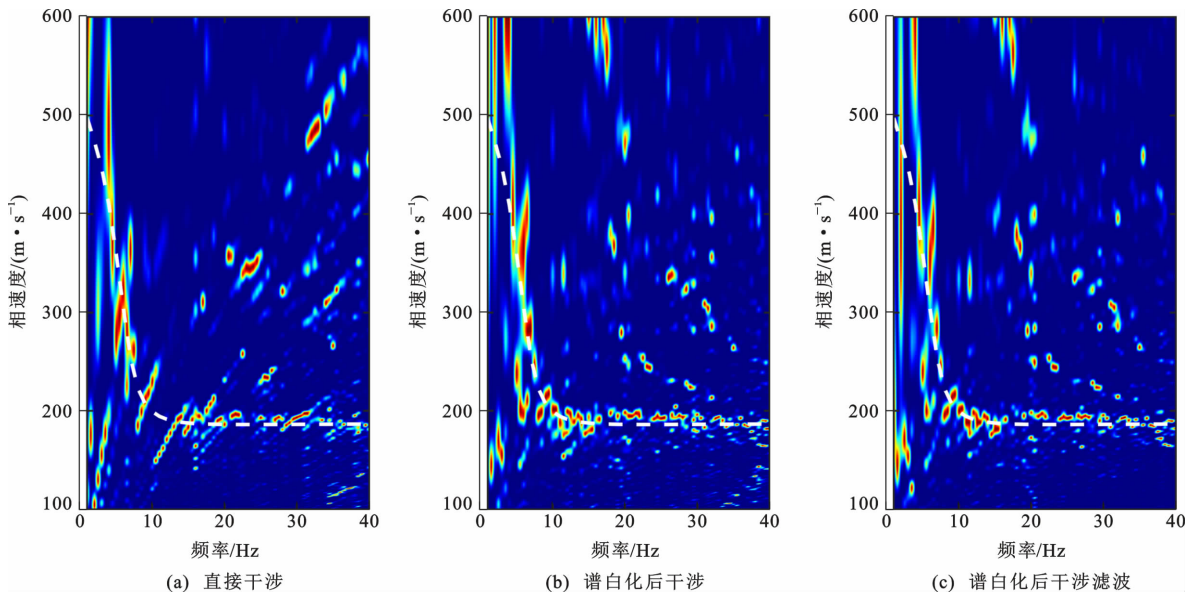


图 11 单趟列车事件下互相干涉提取的面波频散能量

Fig. 11 Surface Wave Dispersion Energies Extracted by Cross-coherence Interference for Single Train Event

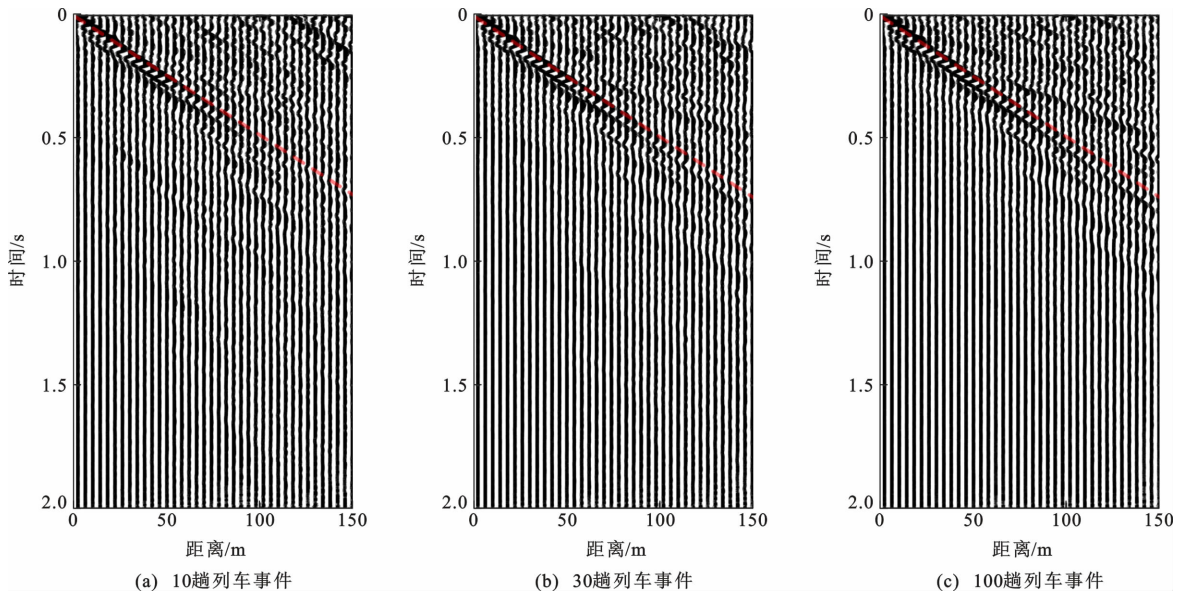


图 12 多趟列车事件叠加提取的虚拟炮集记录

Fig. 12 Virtual Shot Gathers Extracted from the Stacking of Multiple Train Events

### 3 实际采集数据处理

本文采用的高速铁路列车震源数据于 2023 年 8 月在陕西省西安市鄠邑区采集获取。观测系统沿铁路线路走向布设,检波器阵列设置于高架桥下方。现场使用的检波器为三分量低频检波器,型号为 UGL-3C 短周期 4G 地震仪,主频为 4.5 Hz,道间距设置为 10 m。

图 15(a)展示了采用高架桥下方布设的观测系统所采集的 1 h 高速铁路列车震源数据。从图 15(a)可清晰辨识出 13 趟列车事件。列车事件同相轴

的斜率反映了列车的移动方向及速度,1 h 内列车速度为  $54 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 15(b)展示了人为活动和汽车事件较少、列车事件特征明显的震源数据。根据图 15(b)可计算出该列车速度为  $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 16 进一步展示了该列车事件的第 14 道(图 15 中红色箭头所指道数)震源信号数据。从图 16(a)可以看出,列车震源信号呈现出类纺锤状形态。这些具有强烈振幅的能量信号持续了 4 s,由此可以推断列车驶过检波器的时间为 4 s。已知列车速度为  $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,将其代入速度方程进行计算,可得列车长度约为 248 m。考虑到实际测量可能存在一定误

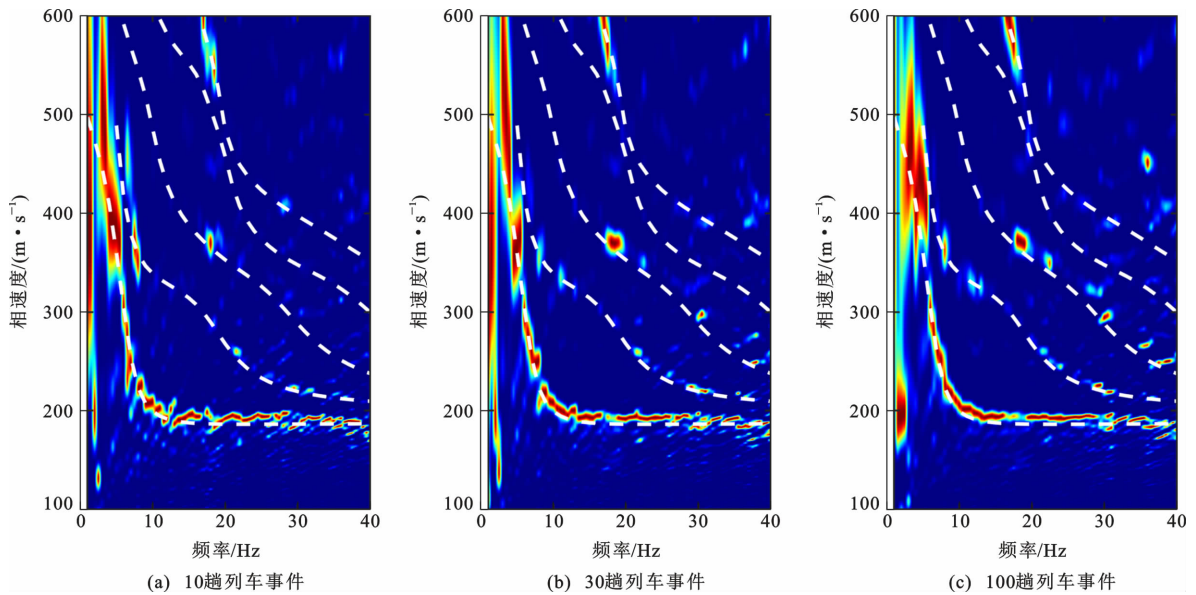


图 13 多趟列车事件叠加提取的面波频散能量

Fig. 13 Surface Wave Dispersion Energies Extracted from the Stacking of Multiple Train Events

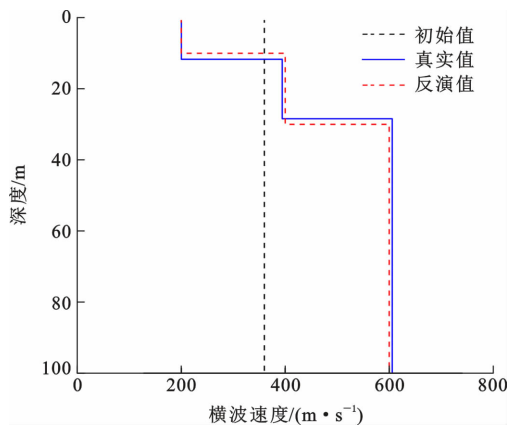


图 14 面波频散曲线反演得到的一维横波速度剖面

Fig. 14 1D Shear-wave Velocity Profile Inversed by Surface Wave Dispersion Curve

差,参照我国高速铁路列车标准,该事件对应的列车车厢数为 8 节。从图 16(b)、(c)可以看出,高速铁路列车震源信号具有窄带分立谱的特性。这一特性是由列车的车厢数量以及列车速度等因素共同决定的,反映了列车运行过程中产生的特定震源特征<sup>[4-7,44-47]</sup>。

图 17 展示了使用本文提出的数据处理流程对实际采集的高速铁路列车震源数据进行地震干涉处理并运用 3 种干涉方法提取的虚拟炮集记录(图 17)。从图 17 可以看出:互相关干涉虽然让串扰噪声得到了一定程度的抑制,但仍存在部分残留;相比之下,反褶积干涉和互相干干涉得到的虚拟炮集记录信噪比较高。图 18 展示了图 17 提取的虚拟炮集记录对应的面波频散能量。从图 18 可以看出,从长

达 1 h、包含 13 趟列车事件的列车震源数据记录中成功提取出 1~7 Hz 频率连续面波频散能量。其中,低频信号最为丰富,具体提取到 1~4 Hz 基阶能量和 4~7 Hz 高阶能量。基阶面波频散能量分布在 1~4 Hz 频率内,而 4~7 Hz 频率内则对应高阶面波频散能量。高阶面波频散能量与基阶面波频散能量均呈现出集中、连续且光滑完整的特征。然而,在 5~7 Hz 频率内,低相速度面波频散能量谱区域中噪声较为明显,分布着较多不规则的高频能量噪声块。这种现象通常是干涉结果中的噪声导致面波频散能量谱成像结果不完整引起的。从图 18 还可以发现,互相关干涉提取的虚拟炮集记录对应的面波频散能量谱信噪比相较于其他两种干涉方法更高。

本文实际采集的高速铁路列车震源数据取自渭河盆地南缘的秦岭山前地带。为最大程度减少人为干扰,本文选取远离村庄的实测数据开展反演测试,最终得到 0~240 m 深度的二维横波速度剖面(图 19)。从图 19 能够清晰识别出灞河组泥岩与上覆盖层的分界面,其深度约为 200 m,这与刘林等的研究结果<sup>[50]</sup>高度吻合。该地区浅层地质结构主要由风积层、洪积层、冲积层(黄土及粉砂质黏土)构成,其中西安市鄠邑区秦岭山前区域的区域性盖层厚度约为 200 m,盖层之下为灞河组泥岩,其埋深为 200~400 m。反演结果表明,本文所提出的数据处理流程在实测数据中具有较好的适用性。

鉴于观测采集数据的研究区域受场地条件、设备布置等因素的特定限制,本文仅采用了高架桥下

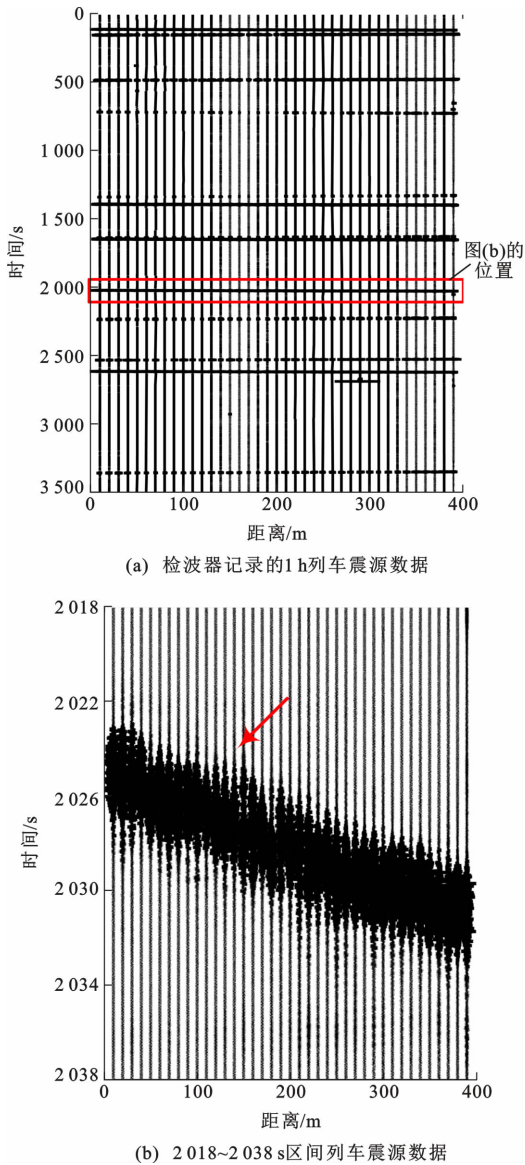


图 15 实际采集的列车震源数据

Fig. 15 Field-acquired Train Seismic Source Data

方布设的观测数据,尚未深入探究其他观测模式下的数据处理方法。高速铁路列车运行环境除高架桥场景外,还包含贴地轨道、隧道等多种情况,因此,后续研究有必要针对不同观测系统及运行环境下的高速铁路列车震源数据应用进行更深入的探索。例如,建立更接近真实地质条件的模型,以深入探究数据处理流程的适用性;同时,重点关注串扰噪声的进一步抑制方法、成像方法的优化。这些问题的解决将进一步提升高速铁路列车震源干涉成像方法的可靠性和实用性。

## 4 结 语

本文针对高速铁路列车震源数据干涉成像,对比分析了互相关干涉、反褶积干涉和互相干涉方

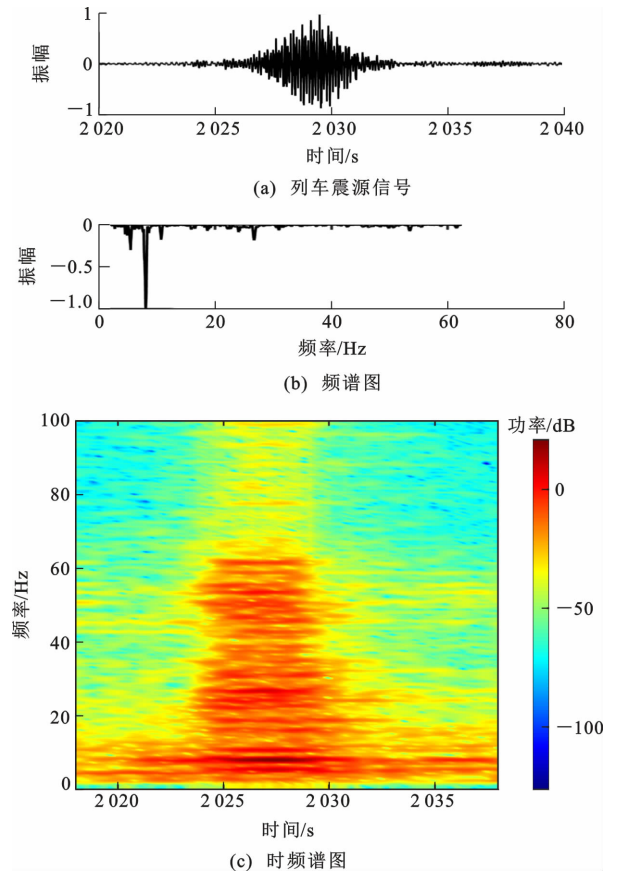


图 16 实际采集的地震波场单道记录的时频分析

Fig. 16 Time-frequency Domain Analyses of a Single-trace Field-acquired Seismic Wavefield Record

法,并就列车震源特性提出了一套新的面波信号提取与数据处理流程。

(1)本文通过建立高速铁路列车移动线性点源模型,成功表征了轮组-轨道-桥墩耦合振动的地震波激发机制。数值模拟结果与实际观测数据特征高度吻合,验证了模型的合理性。

(2)互相干涉方法在抑制串扰噪声和保持信号宽频特性方面表现最优,能有效消除震源子波的影响,在处理复杂方向性噪声信号具有更加良好的性能。

(3)针对高速铁路列车震源数据干涉成像中的串扰问题,本文提出了一套以谱白化、互相干涉、多趟列车事件叠加及FK滤波变换为核心的数据处理流程。该数据处理流程在合成数据和实测数据的处理中,不仅有效提升了面波频散能量聚焦度,使面波信号得以清晰提取,而且合成数据反演结果与理论模型高度吻合,实测数据反演结果也与实际地下介质结构匹配一致。这充分证明了该数据处理流程对于高速铁路列车震源数据处理的适用性和可靠性。与传统被动源勘探方法相比,采用本文提出的

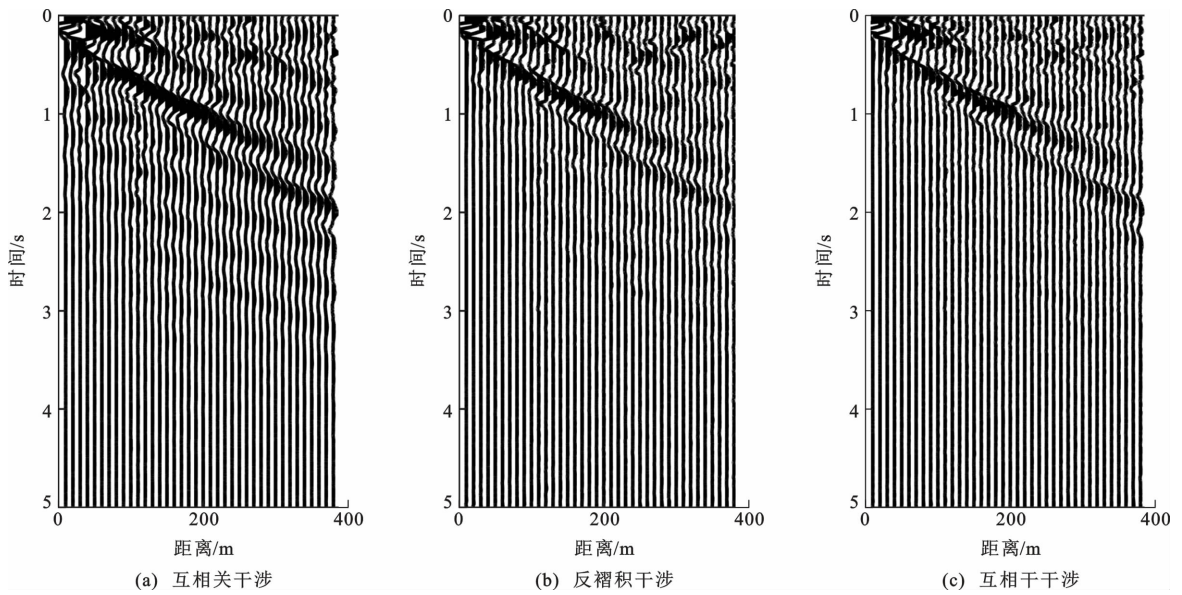


图 17 根据实际采集的地震波场记录提取的虚拟炮集记录

Fig. 17 Virtual Shot Gathers Extracted from Field-acquired Seismic Wavefield Record

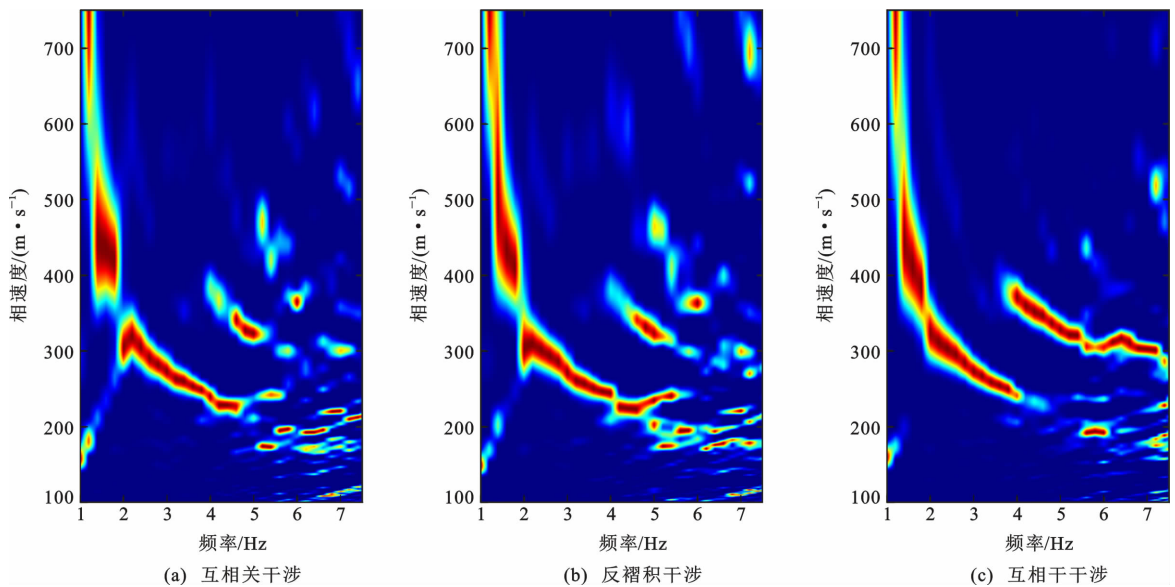


图 18 从实际采集的虚拟炮集记录提取的面波频散能量

Fig. 18 Surface Wave Dispersion Energies Extracted from Field-acquired Virtual Shot Gathers

数据处理流程, 仅需利用单日内多趟列车事件数据, 即可快速提取出可识别的面波信号进行反演成像, 实现高速铁路沿线区域的快速成像, 从而避免了传统被动源勘探方法中漫长的观测记录过程。

参考文献:

References:

[ 1 ] 徐善辉, 郭建, 李培培, 等. 京津高铁列车运行引起的地表振动观测与分析[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 421-425.  
 XU Shan-hui, GUO Jian, LI Pei-pe, et al. Observation and Analysis of Ground Vibrations Caused by the Bei-

jing-Tianjin High-speed Train Running[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 421-425.  
 [ 2 ] FUCHS F, BOKELMANN G, GROUP T A W. Equidistant Spectral Lines in Train Vibrations[J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(1): 56-66.  
 [ 3 ] 温景充, 石永祥, 宁杰远. 高铁地震面波相速度频散曲线提取[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3246-3256.  
 WEN Jing-chong, SHI Yong-xiang, NING Jie-yuan. Measurement of High-speed Rail Surface-wave Phase-velocity Dispersion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3246-3256.  
 [ 4 ] 王晓凯, 陈建友, 陈文超, 等. 高铁震源地震信号的稀

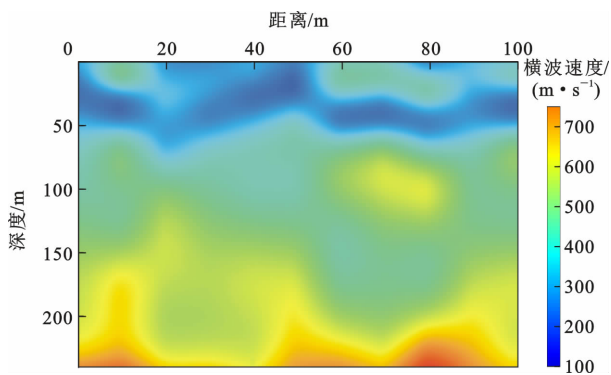


图 19 实际采集的列车震源数据反演得到的  
二维横波速度剖面

Fig. 19 2D Shear-wave Velocity Profile Inversed by  
Field-acquired Train Seismic Source Data

硫化建模[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2336-2343.

WANG Xiao-kai, CHEN Jian-you, CHEN Wen-chao, et al. Sparse Modeling of Seismic Signals Produced by High-speed Trains[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2336-2343.

[5] 王晓凯, 陈文超, 温景充, 等. 高铁震源地震信号的挤压时频分析应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2328-2335.

WANG Xiao-kai, CHEN Wen-chao, WEN Jing-chong, et al. Applications of Synchrosqueezing Time-frequency Analysis in High-speed Train-induced Seismic Data Processing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2328-2335.

[6] 王晓凯, 王保利, 陈文超, 等. 利用单检波器数据估计高铁列车运行速度[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 798-804.

WANG Xiao-kai, WANG Bao-li, CHEN Wen-chao, et al. Using the Data from One Receiver to Estimate Running Velocity of High-speed Train[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(5): 798-804.

[7] 包乾宗, 许杰, 许明瑞. 高铁地震信号时频特征对比分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 805-812.

BAO Qian-zong, XU Jie, XU Ming-rui. Comparative Analysis of Time-frequency Characteristics of Seismic Signal Induced by High-speed Train[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(5): 805-812.

[8] 张固澜, 何承杰, 李勇, 等. 高铁地震震源子波时间函数及验证[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2344-2354.

ZHANG Gu-lan, HE Cheng-jie, LI Yong, et al. Wave-

let Time Function of High-speed Train Seismic Source and Verification[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2344-2354.

[9] 曹健, 陈景波. 移动线源的 Green 函数求解及辐射能量分析: 高铁地震信号简化建模[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2303-2312.

CAO Jian, CHEN Jing-bo. Solution of Green Function from a Moving Line Source and the Radiation Energy Analysis: A Simplified Modeling of Seismic Signal Induced by High-speed Train[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2303-2312.

[10] 王之洋, 陈朝蒲, 白文磊, 等. 高铁列车通过高架桥桩基础激发地震波响应分析[J]. 地球物理学报, 2022, 65(7): 2622-2635.

WANG Zhi-yang, CHEN Chao-pu, BAI Wen-lei, et al. Analysis of Seismic Wave Responses Excited by Pile Foundations of Viaduct Under High-speed Train Passage[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(7): 2622-2635.

[11] 石永祥, 温景充, 宁杰远, 等. 高铁震源地下介质成像的理论分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(5): 893-902.

SHI Yong-xiang, WEN Jing-chong, NING Jie-yuan, et al. Theoretical Analysis of High-speed Rail Seismic Imaging[J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(5): 893-902.

[12] LUO J R, WANG X K, CHEN W C. Imaging the Subsurface with the High-speed Train Seismic Data-based Elastic Reverse Time Migration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 4505409.

[13] LUO J R, WANG X K, CHEN W C. Subsurface Elastic Parameter Reconstruction Based on Seismic Data from the High-speed Trains Using Full Waveform Inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 4508008.

[14] ZHOU N N, CHEN W C, LUO J R, et al. Elastic Wave Equation Traveltime Inversion with Dynamic Time Warping Based on High-speed Train Seismic Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5914511.

[15] 王磊, 任志明, 包乾宗. 高铁地震数据瑞雷面波全波形反演浅地表速度建模[J]. 地球物理学报, 2025, 68(4): 1444-1456.

WANG Lei, REN Zhi-ming, BAO Qian-zong. Full-waveform Inversion of Rayleigh Wave from High-speed-train Seismic Data for Shallow-surface Velocity Building[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025, 68(4):

- 1444-1456.
- [16] 王浩,陈景波. 高铁震源合成数据的频率域弹性波全波形反演[J]. 地球物理学报, 2025, 68(4): 1430-1443.  
WANG Hao, CHEN Jing-bo. Frequency-domain Elastic-wave Full-waveform Inversion Based on the Synthetic Data from High-speed Train[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025, 68(4): 1430-1443.
- [17] 李振春,刘畅,曲英铭,等. 基于染色算法的地震干涉成像技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 37-43.  
LI Zhen-chun, LIU Chang, QU Ying-ming, et al. Seismic Interferometric Imaging Based on Staining Algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(3): 37-43.
- [18] LIU C, QU Y M, ZHAO W J, et al. Interferometric Imaging by Cross-correlation in Surface Seismic Profile with Double Green's Function[J]. Journal of Seismic Exploration, 2023, 32: 243-256.
- [19] NAKATA N, SNIEDER R, TSUJI T, et al. Shear Wave Imaging from Traffic Noise Using Seismic Interferometry by Cross-coherence [J]. Geophysics, 2011, 76(6): SA97-SA106.
- [20] QUIROS D A, BROWN L D, KIM D. Seismic Interferometry of Railroad-induced Ground Motions; Body and Surface Wave Imaging [J]. Geophysical Journal International, 2016, 205(1): 301-313.
- [21] BRENGUIER F, BOUÉ P, BEN-ZION Y, et al. Train Traffic as a Powerful Noise Source for Monitoring Active Faults with Seismic Interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(16): 9529-9536.
- [22] LIU L, LIU Y J, LI T, et al. Inversion of Vehicle-induced Signals Based on Seismic Interferometry and Recurrent Neural Networks [J]. Geophysics, 2021, 86(3): Q37-Q45.
- [23] REZAEIFAR M, LAVOUÉ F, MAGGIO G, et al. Imaging Shallow Structures Using Interferometry of Seismic Body Waves Generated by Train Traffic [J]. Geophysical Journal International, 2023, 233(2): 964-977.
- [24] ZHANG H Y, XING L, ZHENG X P, et al. Imaging of Train Noise with Heavy Traffic Events Recorded by Distributed Acoustic Sensing [J]. Geophysical Prospecting, 2024, 72(9): 3399-3413.
- [25] SHAO J, WANG Y B, CHEN L. Near-surface Characterization Using High-speed Train Seismic Data Recorded by a Distributed Acoustic Sensing Array [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5912911.
- [26] 张唤兰,王保利,宁杰远,等. 高铁地震数据干涉成像技术初探[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2321-2327.  
ZHANG Huan-lan, WANG Bao-li, NING Jie-yuan, et al. Interferometry Imaging Using High-speed-train Induced Seismic Waves [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2321-2327.
- [27] LIU Y J, YUE Y B, LUO Y, et al. Effects of High-speed Train Traffic Characteristics on Seismic Interferometry [J]. Geophysical Journal International, 2021, 227(1): 16-32.
- [28] MI B B, XIA J H, XU Y X, et al. Retrieval of Surface Waves from High-speed-train-induced Vibrations Using Seismic Interferometry [J]. Geophysics, 2023, 88(5): KS113-KS126.
- [29] YOU B Y, MI B B, GUAN B, et al. High-quality Surface Wave Retrieval from Vibrations Generated by High-speed Trains Moving on Viaducts [J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 212: 105005.
- [30] WANG X K, PAN X Y, LUO J R, et al. Forward Modeling of Seismic Wavefield Induced by the High-speed Trains in 3-D Space [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 4508111.
- [31] WAPENAAR K. Green's Function Retrieval by Cross-correlation in Case of One-sided Illumination [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(19): 2006GL-027747.
- [32] WANG X K, XIA S P, PAN X Y, et al. The Broadband Virtual Shot Gathers Construction Based on High-speed Train-induced Seismic Wave [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5932012.
- [33] WAPENAAR K, FOKKEMA J. Green's Function Representations for Seismic Interferometry [J]. Geophysics, 2006, 71(4): SI33-SI46.
- [34] WAPENAAR K, SLOB E, SNIEDER R. Unified Green's Function Retrieval by Cross Correlation [J]. Physical Review Letters, 2006, 97(23): 234301.
- [35] WAPENAAR K, VAN DER NEUT J, RUIGROK E. Passive Seismic Interferometry by Multidimensional Deconvolution [J]. Geophysics, 2008, 73(6): A51-A56.
- [36] WAPENAAR K, DRAGANOV D, SNIEDER R, et al. Tutorial on Seismic Interferometry; Part 1, Basic Principles and Applications [J]. Geophysics, 2010, 75(5): 75A195-75A209.
- [37] WAPENAAR K, SLOB E, SNIEDER R, et al. Tutorial

- on Seismic Interferometry; Part 2, Underlying Theory and New Advances [J]. *Geophysics*, 2010, 75 (5): 75A211-75A227.
- [38] AKI K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors [J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1957, 35: 415-456.
- [39] XIA S P, WANG X K, CHEN W C, et al. Extracting Dispersion Spectrum Directly from the High-speed Train-induced Seismic Signal [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 22: 7501805.
- [40] MEHTA K, SNIEDER R, GRAIZER V. Extraction of Near-surface Properties for a Lossy Layered Medium Using the Propagator Matrix [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(1): 271-280.
- [41] MI B B, XIA J H. Extraction of Rayleigh, Love, and Virtual Refraction Waves from 3C High-speed-train-induced Vibrations for Near-surface Characterization [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5919710.
- [42] CHANG W S, SHAO G Z, WU H, et al. Improving the Retrieval of Empirical Green's Function Using Adaptive Covariance Filter and Weighted Stacking [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5909416.
- [43] DOLL W E, CORUH C. Spectral Whitening of Impulsive and Swept-source Shallow Seismic Data [C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1995. Houston: SEG, 1995: 398-401.
- [44] 刘磊, 蒋一然. 大量高铁地震事件的属性体提取与特性分析 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62 (6): 2313-2320.
- LIU Lei, JIANG Yi-ran. Attribution Extraction and Feature Analysis for Large Amount of High-speed Train Seismic Events [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2313-2320.
- [45] 蒋一然, 鲍铁钊, 宁杰远, 等. 高架桥下方高铁地震信号频谱特征研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 829-838.
- JIANG Yi-ran, BAO Tie-zhao, NING Jie-yuan, et al. Spectral Characteristics of High-speed Rail Seismic Signal Under Viaduct [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(5): 829-838.
- [46] 温景充, 鲍铁钊, 冯永革, 等. 北京大学道路地震学观测阵列设计及数据特点 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 791-797.
- WEN Jing-chong, BAO Tie-zhao, FENG Yong-ge, et al. PKU ROSE Array: A Road Seismological Array Deployed by Peking University [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55 (5): 791-797.
- [47] WANG X K, CUI C M, LIU D W, et al. Seismic Data Separation Based on the Equidistant-spectral Constrained Morphological Component Analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5919312.
- [48] SHI C W, YUAN S C, CHEN X F. Solutions of Surface-wave Dispersion and Attenuation in Stratified Viscoelastic Media Using a Spectral-element Approach [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2024, 114(4): 1789-1802.
- [49] YAN Y W, CHEN X F, HUAI N, et al. Modern Inversion Workflow of the Multimodal Surface Wave Dispersion Curves: Staging Strategy and Pattern Search with Embedded Kuhn-Munkres Algorithm [J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 231 (1): 47-71.
- [50] 刘林, 芮会超. 渭河盆地结构特征及演化研究 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24(1): 60-69.
- LIU Lin, RUI Hui-chao. Exploration on Structural Characteristics of the Weihe Basin and Its Evolution [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(1): 60-69.