

面波频散曲线与 H/V 谱比曲线联合反演在 西安地裂缝探测中的应用

邵广周, 杨轲, 胡景*, 王芃, 常卫帅, 霍科宇

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054)

摘要: 在城市环境中对地下不良地质体探测主要采用被动源面波频散曲线反演和 H/V 谱比反演两种方法。前者仅利用垂直分量地震记录, 未充分使用水平分量信息; 后者主要通过 H/V 谱比曲线峰值对应的场地卓越频率估算覆盖层厚度, 较少用于横波速度结构反演。结合两种方法的优势, 同时使用频散曲线和 H/V 谱比曲线进行联合反演, 利用面波的多分量信息, 进一步提升反演的精度和稳定性。文中建立了代表均匀沉积层的三层水平层状介质模型以及模拟断裂带的三层垂直断层介质模型, 对比分析了频散曲线反演、H/V 谱比曲线反演以及二者联合反演的效果。模型测试结果表明, 同时使用两种方法进行联合反演可以获得更精确的反演结果。最后以西安市 F5 地裂缝为例, 利用地铁地震数据验证了联合反演用于城市地下构造探测与监测的可行性和有效性。频散曲线和 H/V 谱比曲线联合反演对城市地下空间探测技术的发展和具有借鉴意义。

关键词: 面波, 频散曲线, H/V 谱比曲线, 联合反演, 地铁震源, 地裂缝

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.20240278

Joint inversion of surface wave dispersion and H/V spectral ratio data with application to detection of ground fissure in Xi'an

SHAO Guangzhou, YANG Ke, HU Jing, WANG Peng, CHANG Weishuai, HUO Keyu

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

Abstract: In urban subsurface investigations, characterizing adverse geological structures commonly relies on two geophysical approaches including passive-source surface wave dispersion curve inversion and horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio inversion. While the former utilizes only vertical-component seismic records, thus underutilizing horizontal-component data, the latter primarily estimates overburden thickness by predominant frequency analysis of H/V spectral peaks, with limited application to shear wave velocity structure inversion. This study develops an innovative joint inversion methodology that combines surface wave dispersion and H/V spectral ratio data, effectively leveraging multi-component surface wave information to significantly enhance inversion accuracy and stability. Meanwhile, this paper builds a three-layer horizontal layered medium model that represents uniform sedimentary layers, and a three-layer vertical fault medium model simulating fault zones. Through comprehensive comparison and analysis, the performances of individual and joint inversion approaches are evaluated. Model test results demonstrate that more accurate inversion results can be obtained by joint inversion. Finally, by taking ground fissure F5 in Xi'an as an example, the feasibility and effectiveness of employing joint inversion for the detection and monitoring of urban underground structures are verified by utilizing subway seismic data. Joint inversion of the dispersion curve and H/V spectral ratio provides references for the development and application of urban underground space exploration technology.

Keywords: surface wave, dispersion curve, H/V spectral ratio curve, joint inversion, subway seismic source, ground fissure

邵广周, 杨轲, 胡景, 等. 面波频散曲线与 H/V 谱比曲线联合反演在西安地裂缝探测中的应用[J]. 石油地球物

* 陕西省西安市雁塔区雁塔路 126 号长安大学地质工程与测绘学院, 710054. Email: hujing@chd.edu.cn

本文于 2024 年 7 月 26 日收到, 最终修改稿于 2025 年 4 月 18 日收到。

本项研究受国家重点研发计划课题“基于高铁震源的地下介质结构高精度成像与反演”(2021YFA0716902)、国家自然科学基金项目“黄土盖层缺陷三维瑞利波相速度谱与波形联合反演成像研究”(42174176)和“基于深度学习的远震 P 波接收函数与面波频散数据联合反演方法研究”(42104051)联合资助。

理勘探, 1-10.

SHAO Guangzhou, YANG Ke, HU Jing, et al. Joint inversion of surface wave dispersion and H/V spectral ratio data with application to detection of ground fissure in Xi'an[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1-10.

0 引言

西安地裂缝作为西安市主要的地质灾害之一, 现已查明并有勘查记录的地裂缝有 14 条, 主要分布在南起长安—临潼断裂、北到孙家湾—新房村、西起西户高速东侧、东到灞桥的 200 余平方千米范围内, 总延伸长度约为 120 km, 其中出露总长度约 50 km^[1]。西安地裂缝多为 NE-NEE 方向, 等间距平行排列, 分布紧密, 相邻间距仅为 1.0~1.5 km。在地裂缝发育剧烈区, 一般伴生有不均匀的地表沉降, 严重威胁到了西安城市地铁、地下管廊以及公路铁路等基础建筑的安全和稳定^[2]。怎样对城市环境可能成灾区域进行探测, 成为减灾避险亟待解决的技术难题。因此充分了解西安裂缝的构造特征并监测其构造变化, 对地裂缝附近的浅地表进行定期观测以达到预防灾害的目的, 非常必要。

在浅地表地质结构勘探技术中, 最直接也最为准确的方法为钻孔观测, 但探测成本高昂, 且需要一定的施工条件, 基本无法在城市环境中大面积使用。而高密度电法、瞬变电磁法等勘探方法^[3-6], 由于城市区域人文活动复杂及强电磁干扰等因素, 采集的数据质量经常较差, 影响勘探效果^[7]。主动源浅层地震勘探虽然相对上述技术探测效果较好, 但数据采集会对人口密集区居民的日常生活产生一定的影响。同时, 数据采集质量也会受到十分严重的干扰。因此被动源地震勘探受到了重视, 并得到了快速的发展和运用。该方法是以自然界和人类的各种活动, 例如海浪拍打海岸、自然地震、车辆行驶、工厂运转等产生的微弱震动为震源进行地下勘测^[8]。被动源面波勘探因其抗干扰能力强、震源信号多样易产生、工作效率高等优点, 近年来被广泛用于城市地下不良地质体的勘测^[9]。

被动源面波勘探主要有两种方式。第一种方式依赖于速度频散特性, 通过频散曲线反演地下介质的速度结构^[10-12]。而另一种方式依赖于瑞雷波椭圆极化特性, 通过多分量地震记录的频谱比值反演地层横波速度结构, 即微动谱比(HVSR)法^[13-16]。这两

种被动源方法有着不同的特点。频散曲线反演方法技术已经十分成熟, 但在反演时, 往往只采用垂直分量地震记录, 无法有效约束地下介质在水平方向的各向异性特征和横向速度变化, 反演结果存在不确定性和局限性^[17]。另一方面, 频散曲线反演往往需要长排列数据采集以确保频散曲线的提取精度, 容易受场地限制。H/V(水平分量和垂直分量)谱比法通过单点多分量检波器采集数据对地下结构进行解释, 受场地限制较小, 灵活性强。同时有研究表明, 瑞雷波的水平分量地震记录相对于垂直分量对地层物性参数的变化更敏感。因此, 如果同时使用频散曲线和 H/V 谱比曲线进行联合反演, 充分利用多分量地震信息, 可进一步提高横波速度反演的稳定性^[9]。本文通过理论模型数值模拟数据对比频散曲线反演和 H/V 谱比曲线反演的效果, 探讨联合反演的可行性, 并进一步应用于地铁震源实测数据。

在众多人文活动震源中, 地铁作为城市交通的主要方式之一, 可以覆盖较大的城市区域面积, 提供丰富的地震数据以供使用^[18]。本文选取陕西省西安市 F5 地裂缝长乐东路地段进行数据采集, 该地段下方有西安地铁一号线经过, 可作为移动组合震源进行城市地下结构探测试验。

1 方法

本文对三层水平层状介质和三层垂直断层介质模型进行数值模拟, 获得相应的地震记录, 提取对应的频散曲线和 H/V 谱比曲线。对比频散曲线反演、H/V 谱比曲线反演以及二者联合反演的效果。

采用 Haskell-Thomson 矩阵法^[19]以及 Diffuse Field Assumption 理论^[20]分别求取一维模型对应的理论频散曲线和 H/V 谱比曲线。二维模型数值模拟采用交错网格有限差分方法。模型上边界采用自由边界条件, 其他三个边界选用卷积完全匹配吸收边界条件^[21]。由于本文正演模拟的是主动源瑞雷面波场, 直接提取 H/V 谱比曲线会受到高阶面波和体波的影响, 需要先对频散能量进行模式分离, 再根据基阶模式地震记录计算 H/V 谱比曲线^[22]。

时间域地震信号的水平分量和垂直分量频谱之比^[23]可表示为

$$R(f) = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (1)$$

式中 $H(f)$ 、 $V(f)$ 是瑞雷波水平、垂直分量地震信号的频谱。

本文采用模拟退火算法^[24-26]做 H/V 谱比曲线与频散曲线联合反演, 其目标函数为

$$\Phi(m) = \omega_R \sum_{j \in n_R} \frac{[R_j^{\text{obs}} - R_j^{\text{theo}}(m)]^2}{\sigma_{R_j}^2} + \omega_c \sum_{j \in n_c} \frac{[c_j^{\text{obs}} - c_j^{\text{theo}}(m)]^2}{\sigma_{c_j}^2} \quad (2)$$

式中: R_j^{obs} 、 c_j^{obs} 为实际观测的 H/V 谱比曲线和频散曲线; σ_R^2 、 σ_c^2 为二者的方差; $R_j^{\text{theo}}(m)$ 、 $c_j^{\text{theo}}(m)$ 为对应的理论计算值, m 是模型参数向量; n_R 为 H/V 谱比曲线的频点个数; n_c 是频散曲线的频点个数; ω_R 、 ω_c 为权重参数, 本文二者均取 1/2。

2 理论模型测试

地震波数值模拟对地震勘探的研究具有重要意义。为验证反演效果, 本文设计了与实际瑞雷面波勘探时情况相近的三层水平层状介质模型和三层垂直断层介质模型进行数值模拟, 以便对联合反演方法的可行性和有效性进行分析。为便于分析数据误差和提高效率, 将三层水平层状介质模型简化为一维模型进行正演计算。三层垂直断层介质模型采用二维数值模拟, 以便分析联合反演方法对断层的反

演效果。

2.1 三层水平层状介质模型

三层水平层状介质模型尺寸为 50 m×30 m (图 1), 其厚度 (h)、密度 (ρ)、横波速度 (v_s)、纵波速度 (v_p) 如表 1 所示。简化为一维模型, 应用 Haskell-Thomson 矩阵法^[19]和 Diffuse Field Assumption 理论^[20]计算模型的理论频散曲线和 H/V 谱比曲线, 并分别进行独立反演和联合反演。

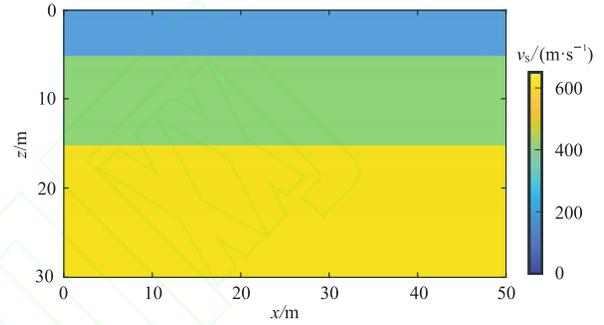
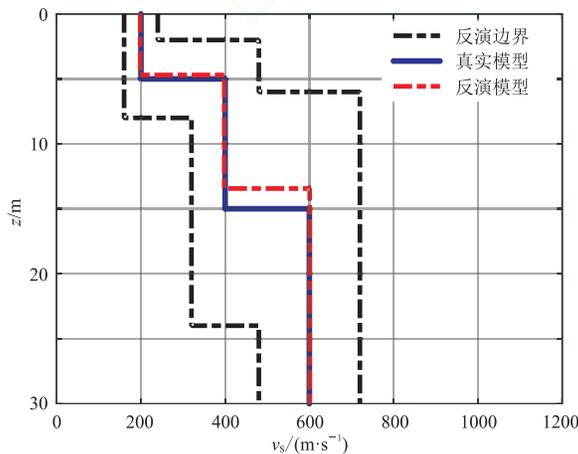


图 1 三层层状介质模型

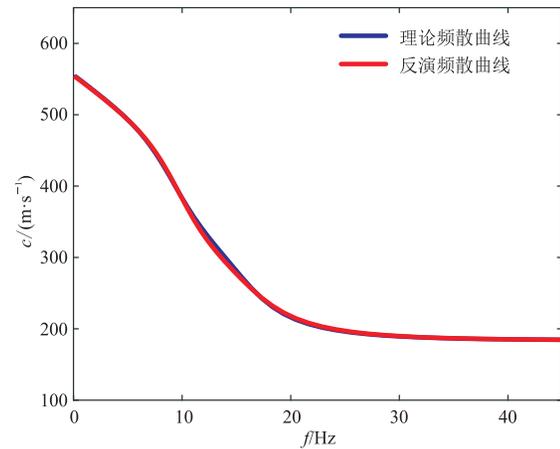
表 1 三层水平层状介质模型参数

层位	h/m	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	5	1500	200	374
2	10	1500	400	748
3	∞	1700	600	1122

图 2a 是频散曲线单独反演获得的一维横波速度曲线, 图 2b 是反演模型的频散曲线与理论频散曲线拟合结果。反演结果及其相对误差 (E) 如表 2 所示, 可见, 频散曲线反演对横波速度的反演效果较好, 但对地层厚度尤其是中间层厚度的反演效果相对较差。



(a) 反演横波速度曲线与真实模型的对比



(b) 最佳拟合频散曲线与理论曲线的对比

图 2 单独频散曲线反演结果

表 2 单独频散曲线反演结果统计

层位	h/m	$E_h/\%$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$E_{v_s}/\%$
1	4.86	2.80	198.29	0.86
2	8.58	14.20	397.90	0.53
3	—	—	600.86	0.14

图 3a 是 H/V 谱比曲线单独反演得到的一维横波速度曲线,图 3b 是反演模型的最佳拟合 H/V 谱比曲线。反演结果及其相对误差如表 3 所示,可见, H/V 谱比曲线反演对横波速度的反演效果较频散曲线略差,对中间层厚度的反演精度略高于频散曲线反演,但也存在一定误差。

通过对频散曲线反演和 H/V 谱比曲线反演结果的对比、分析,这两种反演方法的反演结果都能够一定程度上反映真实的地下结构,但与真实模型之间仍存在一定的误差,尤其是中间层误差较为明显。若同时使用这两种方法进行联合反演,理论上可以充分发挥各自的优势,通过多源信息互补约束反演解空间,降低由多解性引起的不确定性,提高反演精度。

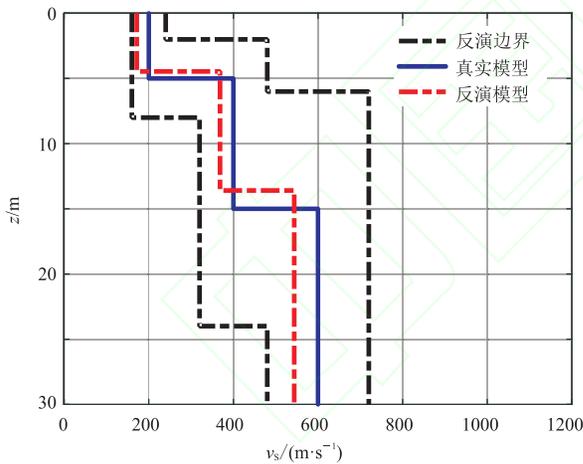
表 3 单独 H/V 谱比曲线反演结果统计

层位	h/m	$E_h/\%$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$E_{v_s}/\%$
1	4.46	10.80	171.50	14.25
2	9.13	8.70	368.39	7.90
3	—	—	543.82	9.03

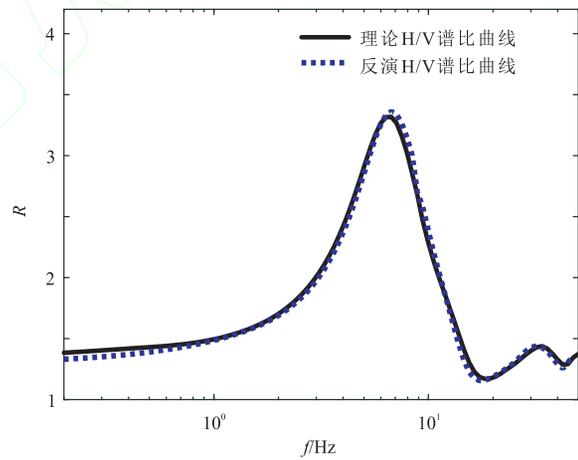
图 4a 是联合反演得到最佳拟合频散曲线与所有反演模型的频散曲线对比;图 4b 是最佳拟合 H/V 谱比曲线与所有反演模型的 H/V 谱比曲线对比;图 4c 是联合反演与独立反演结果的对比。联合反演结果与真实模型参数的相对误差如表 4 所示,可见,联合能够准确地反演中间层厚度,且相较于仅使用 H/V 谱比曲线反演,各层横波速度的反演误差更小。说明联合反演可以获得更准确的地下结构信息。

表 4 联合反演结果统计

层位	h/m	$E_h/\%$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$E_{v_s}/\%$
1	4.86	2.80	199.88	0.60
2	10.11	1.10	424.62	6.16
3	—	—	602.21	0.37

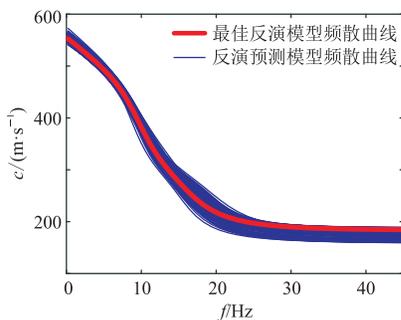


(a)反演横波速度曲线与真实模型的对比

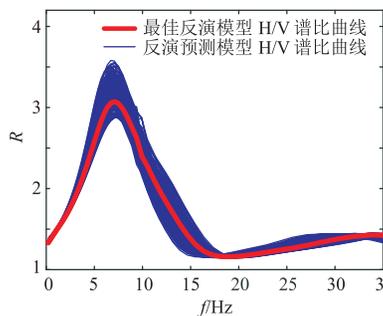


(b)最佳拟合 H/V 谱比曲线与理论曲线的对比

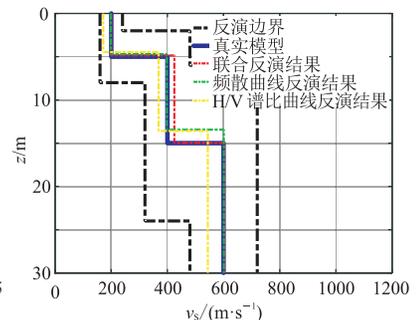
图 3 单独 H/V 谱比曲线反演结果



(a)反演模型与最佳模型速度频散曲线



(b)反演模型与最佳模型 H/V 谱比曲线



(c)最佳反演横波速度曲线的对比

图 4 频散曲线与 H/V 谱比曲线联合反演结果

2.2 三层垂直断层介质模型

三层垂直断层模型尺寸为 50 m×20 m(图 5),模型参数如表 5 所示。垂直断层位置处于模型的中

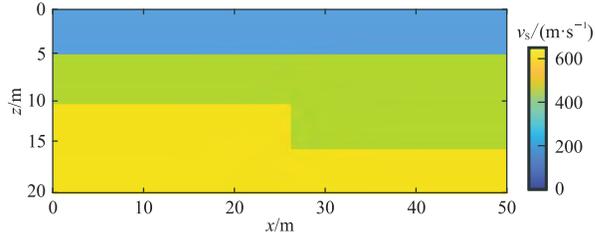


图5 三层垂直断层模型图

间位置。在进行二维数值模拟时,网格间距为 $\Delta x=$
 $\Delta z=0.5$ m,采样时间 0.4 s,采样间隔 0.2 ms,采样
点数为 2000,震源为主频 30 Hz 的 Ricker 子波。

模拟过程中,震源波动首先从水平地表 0 处激
发,采用 30 道检波器接收,道间距为 1 m,水平排列
在地表 11~40 m 处,以便提取 H/V 谱比曲线。接
着 20 个检波器开始排列滚动,以提取频散曲线。正
演模拟得到的水平和垂直方向地震记录如图 6a、图 6b
所示,可以发现瑞雷面波能量占据主要部分并存在
频散现象。如果直接对原始地震记录进行傅里叶变

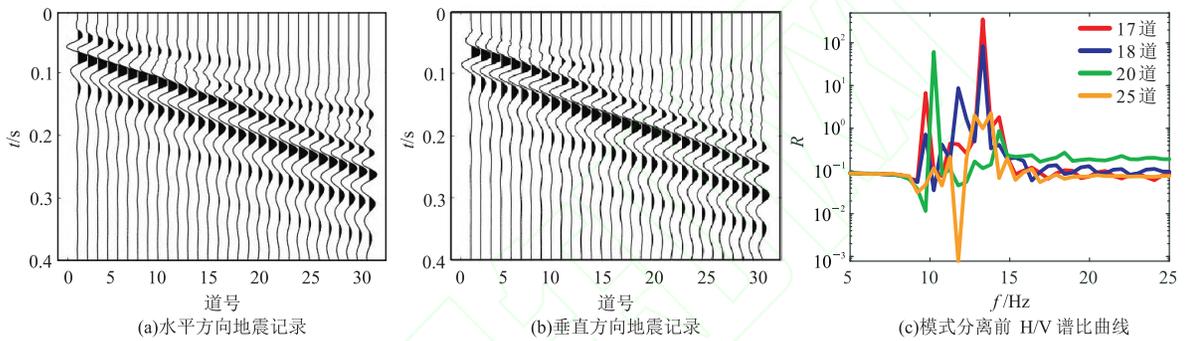


图6 模式分离前地震记录与 H/V 谱比曲线

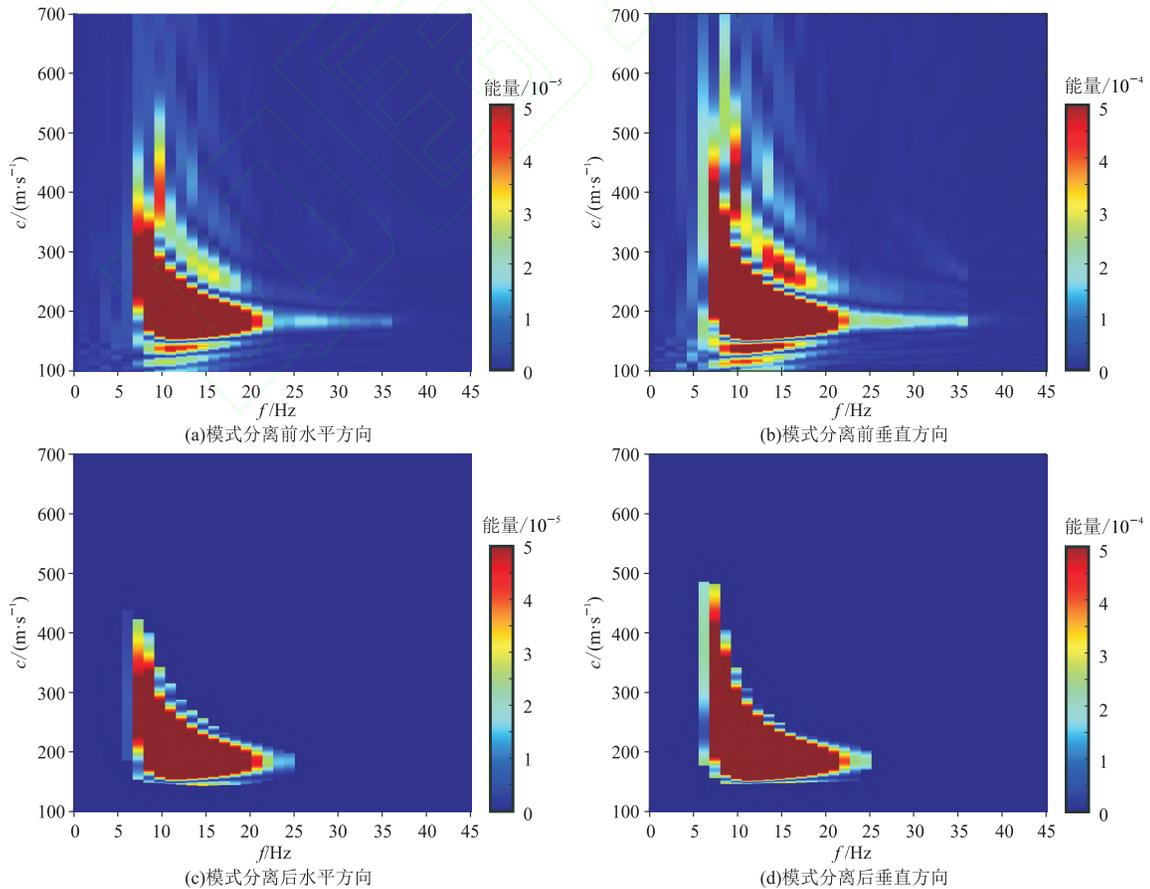


图7 模式分离前、后频散能量谱

换并计算 H/V 谱比曲线,结果如图 6c 所示,曲线十分杂乱且各道没有相同的趋势。其原因是由于波场中存在高阶瑞雷波、体波等干扰。因此,在利用主动源瑞雷波进行正演模拟时必须首先进行模式分离,提取基阶频散能量后再计算 H/V 谱比曲线。对原始地震记录进行线性 Radon 变换得到的频散能量谱如图 7a、图 7b 所示,进行模式分离后提取的基阶频散能量如图 7c、图 7d 所示。图 8 为线性 Radon 反变换得到的新地震记录。此时再计算各个检波器的 H/V 谱比曲线,明显看出各个曲线具有相近的规律,如图 8c 所示。

图 9a 为仅利用频散曲线反演得到的二维横波速度剖面,图 9b 为仅利用 H/V 谱比曲线反演出每一道记录的最佳反演结果后根据检波器的位置依次排列得到横波速度剖面,即 H/V 多道反演结果。使用频散曲线与 H/V 谱比曲线联合反演,得到每一道的最佳反演模型。同样根据检波器的位置依次排列

得到横波速度剖面,结果如图 9c 所示。

对比图 9a~图 9c 可知,仅频散曲线反演虽然较准确的划分出地层界面,但未能清晰识别出断层;仅 HV 谱比曲线反演的第一层厚度和横波速度较准确,断层左侧第二层的厚度反演结果与真实厚度接近,但在部分区域偏小,断层右侧地层与第三层地层之间出现了高低错落的情况,表现不稳定。与单独使用 H/V 谱比曲线相比,联合反演第二层地层横波速度的反演精度得到了较大的提高,第二层与第三层间界面更清晰。联合反演的横波速度剖面更精确地反映了真实的地层形态,地下介质结构更准确。

表 5 三层垂直断层模型参数

地层	h/m		ρ kg/m ³	v_s m/s	v_p m/s
	断层左	断层右			
1	5	5	2000	200	400
2	5	10	2000	450	900
3	10	5	2000	600	1200

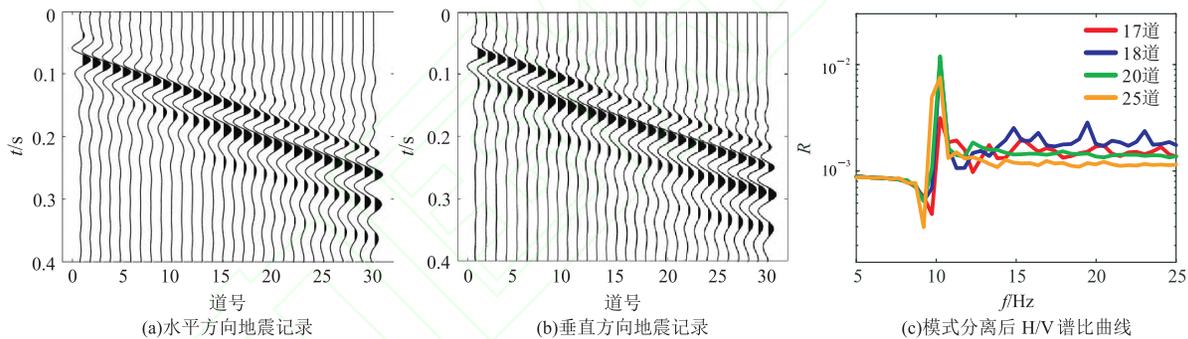


图 8 模式分离后地震记录与 H/V 谱比曲线

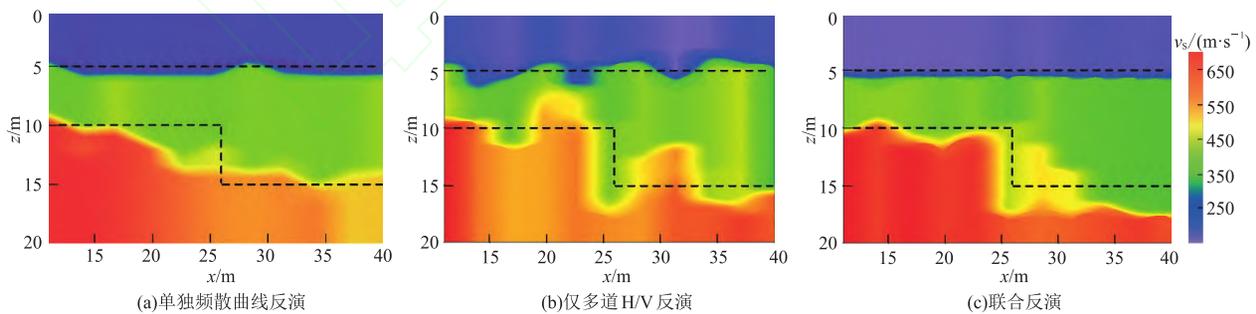


图 9 垂直断层模型三种方式的反演剖面

虚线为实际地层界面和垂直断层位置。

3 实际数据处理

西安 F5 地裂缝整体走向为 NE70°,倾向 SE,倾角约为 72°~80°,发育带最大宽度达 110 m,总长度 15.8 km^[27]。测线以西安市新城区幸福路与长乐

路交叉口为起点,平行于长乐路由西向东排列。测线范围内共布设 I-Nodal 节点单分量检波器 186 个,道间距为 1 m。其中,在第 51 道至第 80 道之间,同时布设有 Minimus-5 节点式三分量地震采集站。仪器时间采样间隔为 2 ms,采集时间为 4 h。震源为背景噪声和地铁振动信号。基于此重合采集

段(I-Nodal单分量/Minimus-5三分量)的地震数据开展处理分析。工区现场测线布置与地裂缝监测标识点如图10所示。检查数据、剔除坏道后进行预处理以方便提取频散曲线和H/V谱比曲线。为了后续进行滚动排列从而得到地下二维横波速度结构剖面,采用地震干涉法对相邻的30个的单分量地震记录进行地震干涉处理。每次干涉时,选取第一个接收器作为虚拟震源进行叠加,叠加窗口长度选取为10s,窗口重叠率设置为90%,叠加完成后使用带通滤波保留0.5~40.0 Hz范围内的信号。图11是干涉法得到的虚炮集记录,以及用相移法得到相应的频散能量谱及多道面波分析方法(MASW)^[28-29]提取的频散曲线。

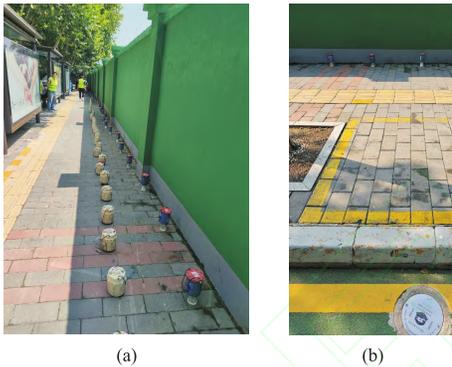


图10 现场测线布置(a)与地裂缝监测标识点(b)

对三分量地震采集站采集的数据进行对比,选取数据质量最好的第一小时振动数据进行H/V谱比曲线提取。图12为第二台三分量地震采集站采集的1000s地震数据及相应的功率谱,可以看出,有小部分极高幅值的瞬变信号,可能是数据采集时近

距离强震动异常事件导致,在数据处理过程中,采用短长时窗比值法^[30-31]将其剔除,随后计算H/V谱比曲线。实际数据反演流程如图13所示。

图14a为仅利用频散曲线反演的地下二维横波速度剖面图,图14b为仅利用H/V谱比曲线反演的横波速度剖面,图14c为将频散曲线数据和H/V谱比曲线数据同时作为输入,采用模拟退火方法进行联合反演得到的横波速度剖面。图中黑色方框标注的范围为地面实况验证区,红色线条为地裂缝位置,白色线条为已知钻探工程地质剖面的地层分界线。

图15是幸福路路口钻探工程地质剖面,黑色方框区域位置与图14中黑色方框实际位置一致。可见,西安F5地裂缝幸福路口地段地层大概可以分为三层,最上层为杂填土、素填土和新黄土,第二层为黏土壤,最下层为老黄土、粉砂黏土、砾砂等岩层。对照图14,单独频散曲线反演结果在10至15m之间不太稳定,且反演出的黏土壤层厚度相对实际厚度较小,未能反映出地裂缝位置。单独H/V谱比曲线反演虽然清晰的划分出第二界面,但第一界面与实际相差较大。相较于单独曲线反演,联合反演结果的地层空间展布更符合地裂缝实际位置,且地层界面更易识别。单独H/V谱比曲线反演与联合反演的断层左右第二、第三地层分界面深度误差统计如表6所示(单独频散曲线反演未划分出断层位置)。结合图14c反演结果可知,联合反演结果与地质情况更为相符。对比断层两侧第二、三地层分界面可以明显看出右盘下降,地裂缝倾角约为80°,地裂缝的位置与钻探剖面较为吻合,地裂缝右侧地层

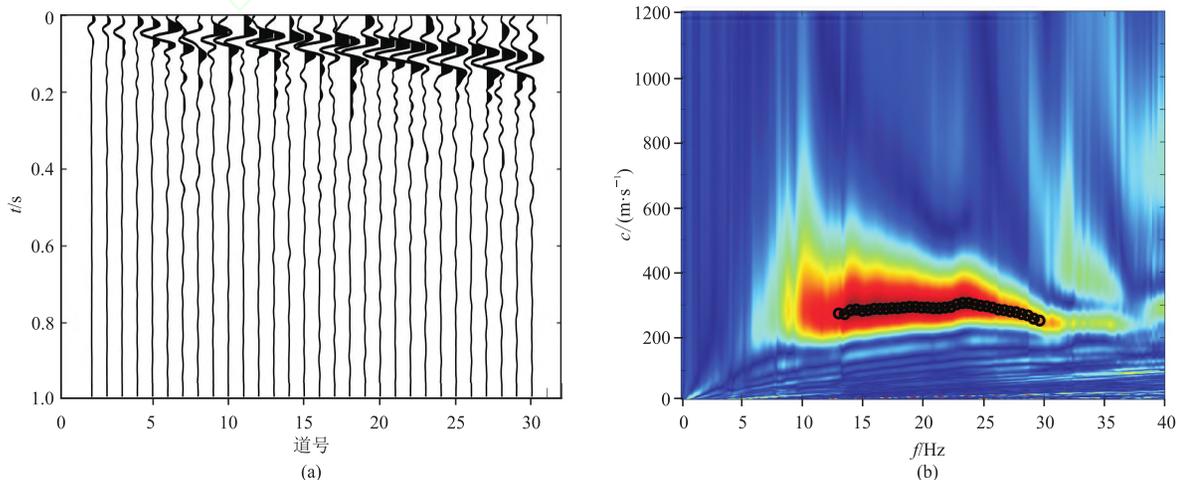


图11 使用干涉法获得的虚炮集(a)及其对应的频散能量谱及频散曲线(b)

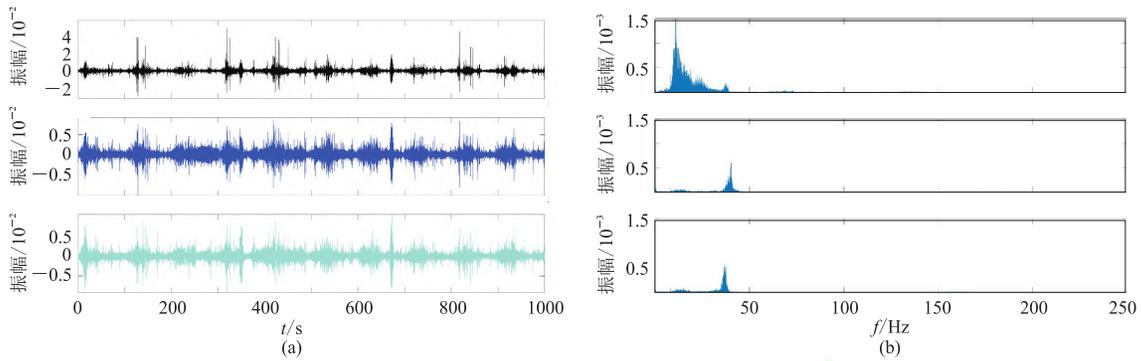


图 12 实际 1000 s 三分量地震信号 (a) 及相应的功率谱 (b)

上:垂直分量;中:E-W向水平分量;下:N-S向水平分量。

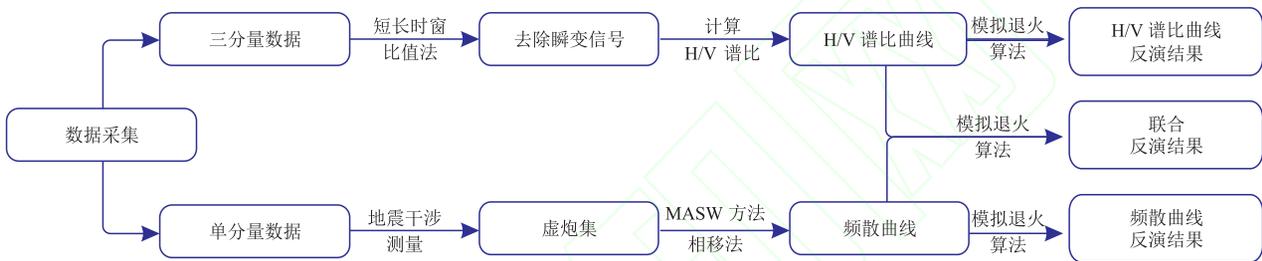


图 13 实际数据反演流程

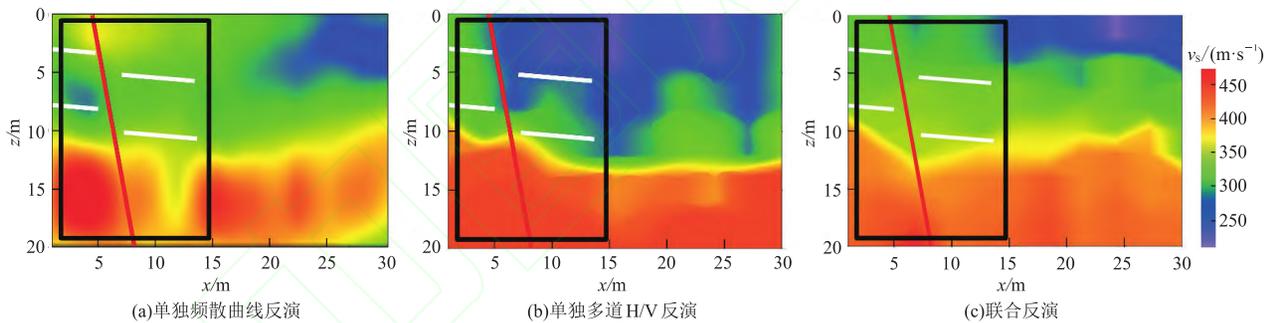


图 14 实际资料不同数据的反演结果

红线表示实际地裂缝,白线表示地层界面。

表 6 黏土壤与老黄土分界面实际资料两种反演结果统计

位置	真实深度/m	单独 H/V 谱比反演		联合反演	
		深度/m	相对误差/%	深度/m	相对误差/%
断层左 2 m	9.41	10.34	9.88	10.14	7.75
断层右 2 m	13.30	10.89	18.12	13.59	2.18

上方低速层清晰可见,分层情况均与钻探剖面对应准确。此外,探测区域起点位于工区左侧第一条地裂缝上盘边缘,该裂缝只在工区第三层介质中出现,且岩性保持连续未出现明显物性差异界面,因此未有效探明。综上,可以验证 H/V 谱比曲线与频散曲线联合反演能更清晰地识别地裂缝。

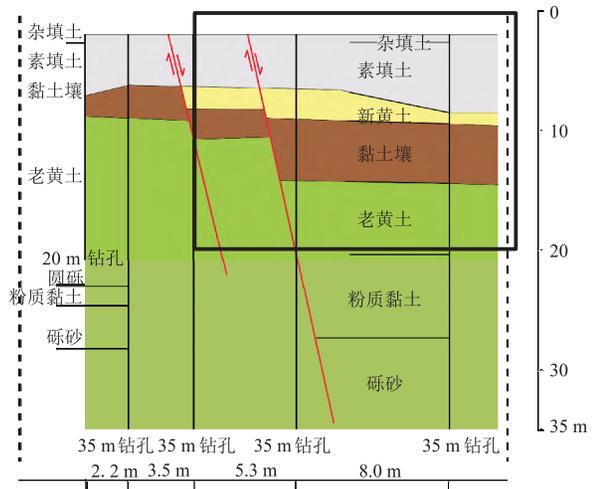


图 15 幸福路路口钻探工程地质剖面

4 结论

针对城市环境或地下介质存在横向不均匀性等情况,一般反演方法未能充分利用多分量数据信息、反演结果可能受到诸多限制的问题,本文进行两种数据的联合反演,由理论模型和实际数据反演结果可得到如下结论。

(1)H/V谱比反演相比于频散曲线反演,不拘泥于检波器排列长度或排列方式,受场地的限制较小,使用大量单个检波器灵活布设,可以降低疏漏重要区域的可能性。

(2)将频散曲线和H/V谱比曲线作为输入进行联合反演,再将每一道的最佳反演结果根据检波器的位置便可得到该区地下速度结构剖面,反演结果清晰明确。相比于单种数据反演具有更高的横向分辨率,提高了反演结果的精度和稳定性,能够更加准确地描绘出地下介质的构造形态。

(3)利用地铁振动等移动组合震源的面波数据反演能有效揭示城市地下介质的浅层速度结构,验证了该方法在城市地下结构探测和长期监测中的可行性和有效性。

参考文献

[1] 郭夏涛. 基于FLAC3D的西安f5地裂缝数值模拟与防治对策研究[D]. 西安:长安大学,2021.
GUO Xiatao. Study on Numerical Simulation and Prevention and Control of Ground Fissure in Xi'an f5 Based on FLAC3D[D]. Xi'an:Chang'an University, 2021.

[2] 张雨童. 西安地裂缝活动环境下综合管廊结构变形规律及安全预警方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
ZHANG Yutong. Research on Structure Deformation Regularity and Safety Early Warning Method of Integrated Pipe Gallery in Active Environment of Xi'an Ground Fissure[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2020.

[3] 郑智杰,曾洁,赵伟,等. 高密度电阻率法在岩溶区找水中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(3):1262-1267.
ZHENG Zhijie,ZENG Jie,ZHAO Wei,et al. Application research of high density resistivity method in water exploring in karst area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3):1262-1267.

[4] 胡祖志,石艳玲,何展翔,等. 瞬变电磁法在西部黄土层勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(增刊1):131-136.
HU Zuzhi,SHI Yanling,HE Zhanxiang,et al. Tran-

sient electromagnetic exploration in loess layer,Western China[J]. Oil Geophysical Prospecting,2016, 51(S1):131-136.

- [5] 周建美,李貅,戚志鹏. 浅水域各向异性地层中的瞬变电磁响应分析[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(4):821-830.
ZHOU Jianmei,LI Xiu,QI Zhipeng. Transient electromagnetic response analysis for anisotropic media in shallow water[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(4):821-830.
- [6] 刘江平,王莹莹,刘震,等. 近地表反射和折射法的进展及应用[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3286-3305.
LIU Jiangping,WANG Yingying,LIU Zhen,et al. Progress and application of near-surface reflection and refraction method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(9):3286-3305.
- [7] 范长丽,贾慧涛,蔡向阳. 微动在城区岩溶勘探中的效果研究[J]. 工程地球物理学报,2020,17(5):652-657.
FAN Changli,JIA Huitao,CAI Xiangyang. Study on the effect of microtremor exploration in karst exploration in urban area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2020,17(5):652-657.
- [8] OKADA H, SUTO K. The Microtremor Survey Method[M]. Tulsa:SEG,2003.
- [9] 沈志平,陈发达,张虎,等. HVSR探测方法在城市岩溶勘察中的应用[J]. 地球物理学进展,2022,37(4):1757-1763.
SHEN Zhiping,CHEN Fada,ZHANG Hu,et al. Application of HVSR detection method in urban karst investigation[J]. Progress in Geophysics, 2012, 37(4): 1757-1763.
- [10] 恒翔天. 主动源瑞雷波速度频散与H/V谱比曲线联合反演研究[D]. 西安:长安大学,2022.
HENG Xiangtian. Joint Inversion of Rayleigh Wave Velocity Dispersion and H/V Spectral Ratio Curve from Active Source[D]. Xi'an:Chang'an University, 2022.
- [11] 邵广周,李远林,岳亮. 主动源与被动源面波联合勘探在黄土覆盖区三维成像中的应用[J]. 物探与化探,2022,46(4):897-903.
SHAO Guangzhou,LI Yuanlin,YUE Liang. Joint application of active and passive surface wave in 3D imaging of loess covered area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(4):897-903.
- [12] 赵容容,杨振涛,任承豪,等. 基于F-J法微动探测的表层结构调查[J]. 石油地球物理勘探,2023,58(4):789-800.
ZHAO Rongrong,YANG Zhentao,REN Chenghao,et al. Surface structure survey by microtremor based on F-J method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(4):789-800.
- [13] YAMAZAKI F, ANSARY M A. Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1997,26(7):671-689.
- [14] UEBAYASHI H, KAWABE H, KAMAE K. Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the

- sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(2):1060-1074.
- [15] 王芑,邵广周,恒翔天,等. 滑坡面瑞雷波波场模拟及 H/V 谱比探测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3):1031-1041.
WANG Peng, SHAO Guangzhou, HENG Xiangtian, et al. Rayleigh wave field simulation and H/V spectral ratio detection on landslide surface[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(3):1031-1041.
- [16] 梁东辉,甘伏平,张伟,等. 微动 HVSR 法在岩溶区探测地下河管道和溶洞的有效性研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1):95-100.
LIANG Donghui, GAN Fuping, ZHANG Wei'et al. Study on the effectiveness of the microtremor HVSR method in detecting underground river pipelines and caves in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1):95-100.
- [17] BROSSIER R, OPERTO S, VIRIEUX J. Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion[J]. *Geophysics*, 2009, 74(6):WCC105-WCC118.
- [18] 徐佩芬,侍文,凌苏群,等. 二维微动剖面探测“孤石”:以深圳地铁 7 号线为例[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(6):2120-2128.
XU Peifen, SHI Wen, LING Suqun, et al. Mapping spherically weathered“Boulders”using 2D microtremor profiling method;a case study along subway line 7 in Shenzhen[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6):2120-2128.
- [19] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1953, 43(1):17-34.
- [20] PIÑA-FLORES J, PERTON M, GARCÍA-JEREZ A, et al. The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA) [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2):577-588.
- [21] 陈汉明,汪焱林,周辉. 一阶速度-压力常分数阶黏滞声波方程及其数值模拟[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(2):302-310.
CHEN Hanming, WANG Yilin, ZHOU Hui. A novel constant fractional-order Laplacians viscoacoustic wave equation and its numerical simulation method[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(2):302-310.
- [22] FÄH D, KIND F, GIARDINI D. Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects[J]. *Journal of Seismology*, 2003, 7(4):449-467.
- [23] LUO Y H, XU Y X, LIU Q S, et al. Rayleigh-wave dispersive energy imaging and mode separating by high-resolution linear Radon transform[J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(11):1536-1542.
- [24] KIRPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598):671-680.
- [25] GARCÍA-JEREZ A, PIÑA-FLORES J, SÁNCHEZ-SESMA F J, et al. A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 97(4):67-78.
- [26] 郭强,雒聪,刘红达,等. 自适应优化参数模拟退火的叠前地震联合反演方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2023, 58(3):670-679.
GUO Qiang, LUO Cong, LIU Hongda, et al. Prestack seismic hybrid inversion based on simulated annealing algorithm with adaptive optimization parameters[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023, 58(3):670-679.
- [27] 王卫东. 西安地裂缝形成的区域稳定动力学背景研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
WANG Weidong. Study on the Regional Stability Dynamical Background in the Forming of Xi'an Ground Fissures[D]. Xi'an:Chang'an University, 2009.
- [28] PARK C B, MILLER R D, XIA J. Multichannel analysis of surface waves[J]. *Geophysics*, 1999, 64(3):800-808.
- [29] 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):17-24, 46.
JIANG Fuhao, LI Peiming, ZHANG Yimeng, et al. Frequency dispersion analysis of MASW in real seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(1):17-24, 46.
- [30] STEVENSON P R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976, 66(1):61-80.
- [31] 邱磊,李彩华. STA/LTA 方法拾取天然地震波初至及其改进分析[J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(4):1497-1506.
QIU Lei, LI Caihui. STA/LTA method for picking up the first arrival of natural seismic waves and its improvement analysis[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(4):1497-1506.

(本文编辑:宜明理)

作者简介



邵广周 教授,博士生导师,1977 年生;2000 年、2003 年、2009 年分别获长安大学电子信息工程专业学士学位、地球探测与信息技术专业硕士学位和地质工程专业博士学位;现为 SEG 会员、中国地球物理学会环境地球物理专业委员会副主任委员、中国地球物理学会浅地表地球物理专业委员会、中国石油学会石油物探专业委员会委员;就职于长安大学地质工程与测绘学院,主要从事地震成像和地球物理信息处理领域的教学与科研。