

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.210

宽频拖曳式地震检波器的面波精细化探测成像

鲁兴林¹, 廖先¹, 胡绪权¹, 吴牧阳¹, 付志雄², 刘龙欢¹, 付志红¹

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆瑾陆探测技术有限公司, 重庆 402660)

摘要:传统的主动源面波仪采用锥形速度型检波器, 具有频带窄、纵向分辨率低的缺点。传统装置移动测点需人工手动逐一移动检波器, 无法低成本快速采集高密度面波数据, 横向分辨率低。文中提出适应于硬化路面的拖曳式地震面波数据采集方法, 设计重力耦合加速度检波器, 线性、阵列拖曳式检波器串结构, 提出高采样以提高面波探测精度的方法, 实现高密度、小道距、高采样率、宽频数据采集。分析模型数据和实测数据在不同采样率时的结果表明, 高采样能压制噪声干扰增强低频能量, 保证足够的探测深度; 检波器采集的面波数据, 能保证在足够的深度范围内精细地刻画速度层的变化, 查明潜在的塌陷位置。将拖曳式地震检波器应用于城市道路塌陷探测, 体现高效采集、精细探测的优势。

关键词:检波器; 高采样; 高密度; 面波; 拖曳式地震

中图分类号: TH89

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)07-074-12

Surface wave fine detection imaging of broadband towed seismic geophones

LU Xinglin¹, LIAO Xian¹, HU Xuquan¹, WU Muyang¹, FU Zhixiong², LIU Longhuan¹, FU Zhihong¹

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Triloop Prospecting Technology Co., Ltd., Chongqing 402660, P. R. China)

Abstract: The traditional active source surface wave instrument, employing tapered velocity geophones, suffers from narrow frequency band and low longitudinal resolution. Manual movement of geophones one by one in traditional devices for measuring points results in inefficiency and inability to rapidly acquire high-density surface wave data at low cost, leading to low lateral resolution. This paper proposes a towed seismic surface wave data acquisition method suitable for hardened roads. Linear string and array towed gravity-coupled accelerometer geophones are designed to achieve high-density data acquisition with small geophone spacing, high sampling rate, and broad bandwidth. Traditionally, the influence of sampling rate on the detection accuracy of surface waves has been neglected. This paper suggests that high sampling rates can improve the accuracy of surface wave detection. Analysis of different sampling rates between model data and measured data shows that high sampling rates can suppress noise interference, amplify low-frequency energy, and ensure sufficient investigation depth. The surface wave data collected by the geophones in this study enables detailed description of velocity layer variations and

收稿日期: 2022-02-20 网络出版日期: 2022-05-31

基金项目: 国家重点研发计划资助课题(2018YFC0406904)。

Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFC0406904).

作者简介: 鲁兴林(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事近地表地震探测研究, (E-mail)xinglinlu1992@163.com。

通信作者: 付志红, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)fuzhihong@cqu.edu.cn。

identification of potential collapse locations. The application of towed seismic geophone for urban road collapse detection showcases efficient acquisition and precise detection capabilities.

Keywords: geophone; high sampling; high density; surface wave; towed seismic

近地表横波速度分层(≤ 20 m深)是城市地下空间探测的重要部分。瑞雷面波探测方法是利用频散信息反演近地表横波速度结构,具有探测深度深、分辨率高、成像直观的优点,已广泛应用于近地表横波速度分层^[1-3]。面波探测的步骤包括数据采集、频散曲线提取^[4]、频散曲线反演和解释^[5-8]。数据采集是面波探测的关键步骤,直接影响后期数据处理和解释的精度。按照数据采集模式分类,面波方法主要分为主动源和被动源。被动源面波数据采集时应用短周期小型地震仪采集,能适应不同观测系统和地形地貌^[9-10],但工作效率和成像分辨率低,主要用于城市道路病害、深部基岩面探测、中深层速度结构分层等领域^[11]。工程勘察领域,特别是城市道路病害、塌陷、堤坝渗漏检测领域,被动源面波成像精度难以满足需求。与被动源面波方法相比,主动源面波探测深度浅、施工效率高、横向分辨率高。主动源面波数据采集时主要采用动圈式速度型检波器^[3,12],体积大、频带窄、灵敏度低。压电式加速度检波器体积小、频带宽、灵敏度高,耦合方式更简单有效^[13-15]。传统锥形速度型检波器在施工时需要人工手动逐一移动检波器,存在施工效率低、采集成本高、数据密度低和横向分辨率低的问题。面波探测需要兼顾工作效率、探测深度和分辨率。主动源面波方法具有高分辨率特点,但普遍缺乏高性能检波器,在施工方法和宽频数据采集方面依旧需要提高,尤其在城市道路病害、堤坝渗漏检测方面,迫切需要施工效率高、灵敏度高、频带宽的高性能检波器。

传统的锥形检波器无法较好地适应城市道路、堤坝等硬化路面环境,拖曳式地震是解决硬化路面面波精细化探测的发展方向。适用于城市道路环境的陆地拖缆和耦合检波器已有研究报道^[16-17]。Yue等^[18]研制浅层拖曳式地震探测系统,配置船形速度型检波器,具有高效、低成本和高可靠性的优点,并且成功应用于沿海浅滩的探测。已有的拖曳式地震检波器在施工效率方面有明显提高,但在应对城市环境噪声干扰强、施工周期短、高分辨的需求时,优势并不明显。在城市道路、堤坝结构的面波探测时,需要依据探测目标大小和深度,合理布设观测系统,便于达到最优的探测精度。若要实现深层目的层的速度分层,需要布设长排列、大偏移距观测系统。若要实现浅层目标体的三维成像,需要布设三维阵列式、短排列、小偏移距观测系统。这就要求拖曳式地震检波器在施工现场有快速组装、拆卸和快速移动的能力,能依据探测目标体快速布设对应的观测系统。目前能满足上述需求的拖曳式地震检波器鲜有研究,迫切需要研究具备上述功能的高性能拖曳式检波器。

城市环境中噪声干扰严重,包括车辆、行人、建筑施工,严重影响主动源面波数据质量。强干扰噪声能在现场实时识别,能重新采集补救。但随机噪声与面波数据相互混叠,数据采集时无法避免随机噪声的干扰。随机噪声影响面波频谱,造成低频成分能量受损,从而影响探测深度。后期数据处理方法,如曲波变换^[19]、各向异性分段梯度滤波^[20]、傅里叶滤波^[21]、聚类和经验小波变换^[22]、L1范数正则化的阈值滤波方法^[23]等,能有效滤除随机噪声,但也会损害面波的频散特性,影响面波的成像精度。数据采集参数会影响面波成像精度。采集参数中偏移距和道间距对面波频谱和探测深度的影响已有研究,却忽略了采样率的影响。随机噪声干扰严重时,尚不知采样率对面波频谱和探测深度的影响。

随着城市道路病害、堤坝渗漏检测等硬化路面面波探测的有序开展,迫切需要研制能适应城市硬化路面施工的高性能检波器。文中研究适应于硬化路面的拖曳式地震检波器,设计重力耦合加速度检波器,线性、阵列拖曳式检波器串结构,实现了高效、低成本、小排列间距、小道间距、高采样率数据采集。小道间距有助于优化面波频谱。小排列间距有助于提高横向分辨率。文中试图从采样率角度压制随机噪声对面波频谱的影响。模型数据中加入不同比例的随机噪声,详细讨论了采样率对面波频谱的影响。应用实测数据详细讨论采样率对面波频谱和探测深度的影响。文中研制的拖曳式地震检波器应用于城市道路塌陷调查,论证在高效采集和精细探测方面的优势。

1 重力耦合加速度检波器

1.1 重力耦合

传统的面波仪主要配置锥形检波器,工作效率低,并且在硬化路面耦合效果不理想。文中设计新的重力耦合加速度检波器,实现检波器与地面完整耦合。所提出的检波器能快速拖曳行进,施工效率高。检波器结构如图1(a)所示,总重量为1 689 g,平面尺寸为132 mm×90 mm。为适应城市环境内花坛、草坪等非硬化路面环境,在检波器基座下方设计锥体结构(A),锥体高度80 mm。硬化路面施工时锥体放平,延伸长度32 mm,如图1(b)中B所示。

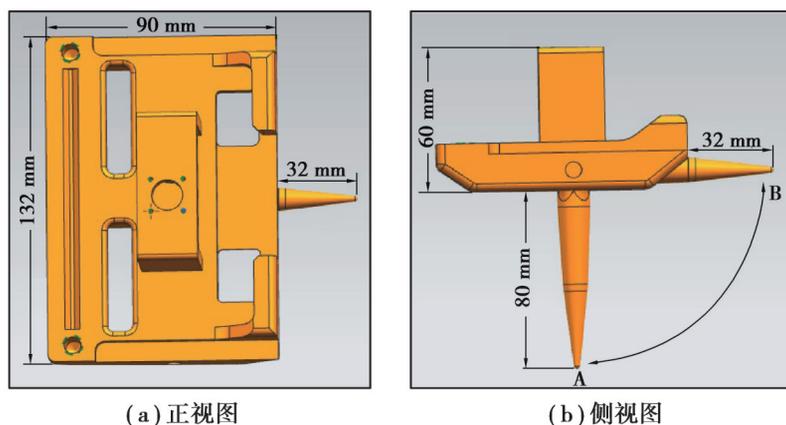


图1 重力耦合检波器结构图

Fig. 1 Gravity-coupled geophone structure

拖曳式地震仪配置48个检波器,检波器之间挂接式连接,方便快速组装和拆卸。如图2(a)和(b)为检波器断开和连接状态。图2(c)为组装完成的24道检波器正在沥青路面上拖曳式行进。因检波器的底座为金属,与柏油路面的摩擦力较小,24串检波器可轻松实现快速移动。图2(d)为组装的3排16道(48个)阵列式检波器数据采集示意图,可实现三维探测。固定道间距的排列有明显的优势:1)提高现场施工效率;2)F-V变换时能避免道间距不均匀带来的误差,保证F-V谱(面波频谱的一种表现方式)的准确性^[24]。重力耦合方式实现检波器与硬化路面的快速完整耦合。拖曳行进式采集方式能实现低成本小道距采集,为后期高密度成像提供硬件基础。

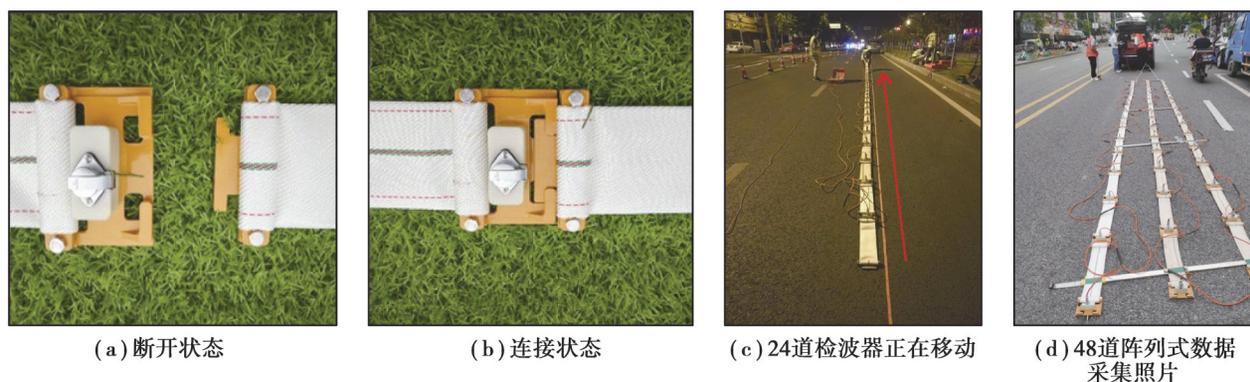


图2 检波器连接图和数据采集图

Fig. 2 Geophone connection and data collection

1.2 宽频特性

文中所设计重力耦合检波器为单分量加速度型,内部的传感器采用压电式一体化芯片。芯片稳固安

装在检波器基座,各个方向受力均匀,为宽频面波数据采集提供硬件基础。加速度检波器的频率响应为0.1~6.0 kHz,灵敏度为2.5 V/g,动态范围为126 dB,谐振频率为18 kHz。噪声小于1 μ V,幅度一致性优于 $\pm 0.2\%$,相位一致性为 ± 0.01 ms。

应用文中设计的检波器在北方某堤岸采集面波数据。实验区地层结构大致是:0.0~0.5 m为沥青路面层,0.5~3.0 m为回填黏土层,3.0 m以下为卵石层。数据采集时共用24个检波器,道间距为0.5 m,偏移距为5.0 m,采样间隔为41.7 μ s,每道采样点为4 096,震源为24磅大锤。如图3(a)和(b)为典型的单炮记录,符号A为面波。因周围环境噪声干扰小,面波的信噪比较高,频散特征明显。应用相移法^[25]计算对应的F-V谱,如图3(c)和(d)所示。F-V谱能量连续且频谱较宽,低频能达到5 Hz,高频能达到120 Hz。频谱的宽频特性能同时保证浅层分辨率和探测深度。

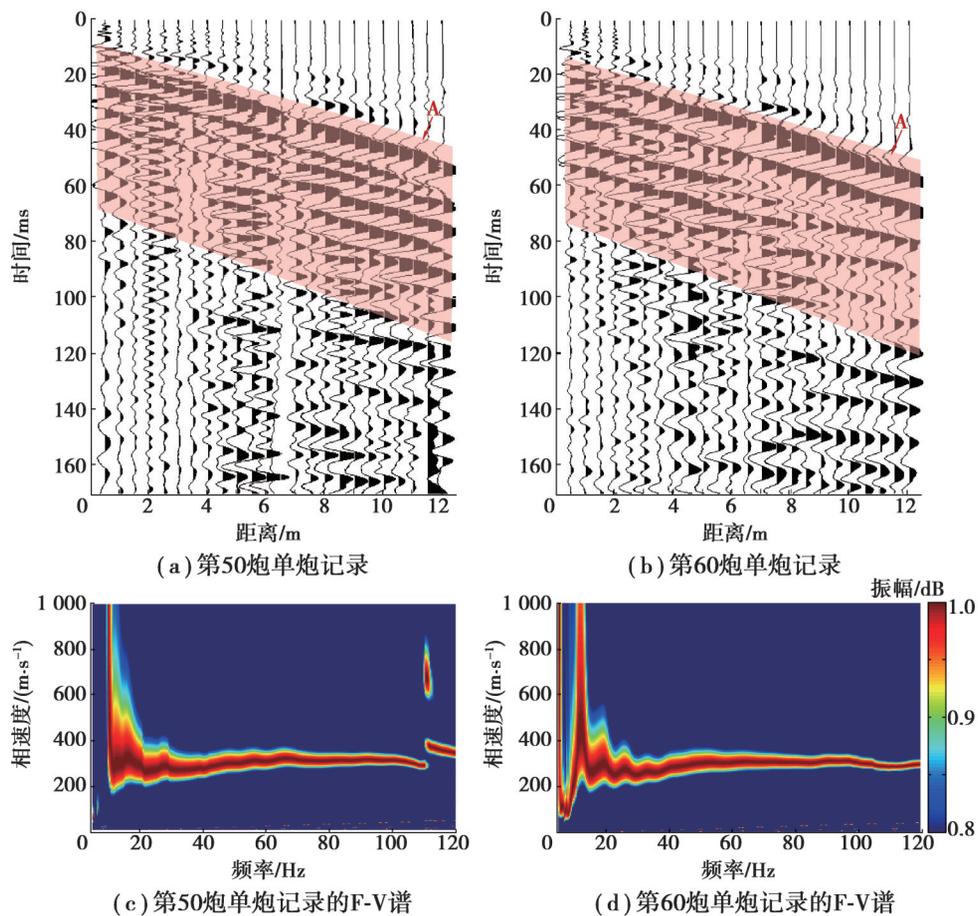


图3 面波和频谱图

Fig. 3 Surface wave and spectrum

2 随机噪声分析

城市环境中随机噪声不可避免,文中试图从数据采集角度压制随机噪声对面波频谱的影响。本部分应用数值模拟,详细分析在不同程度的随机噪声时,采样率对F-V谱的影响。建立均匀层状速度模型,如图4所示, U_p 是纵波速度, V_s 是横波速度, ρ 是密度。模型大小为50 m \times 50 m,均匀网格大小为0.5 m,偏移距为3 m,以主频为200 Hz的雷克子波为震源子波,采样间隔为40 μ s,采样长度为120 ms。以时域有限差分法实现瑞雷面波模拟,并加入水平自由地表条件^[24],以完全匹配层为边界吸收条件。

如图5(a)为震源点为0 m时的单炮记录。依次加入10%、30%、50%随机噪声,得到如图5(b)~(d)的单炮记录。图5中符号A为直达波,B为反射波,C和D为面波。随机噪声会影响面波的分辨率。相比于无噪

声的单炮记录(见图5(a),红框D),含50%的噪声的单炮记录(见图5(d),红框D)中弱能量的面波被随机噪声掩盖。

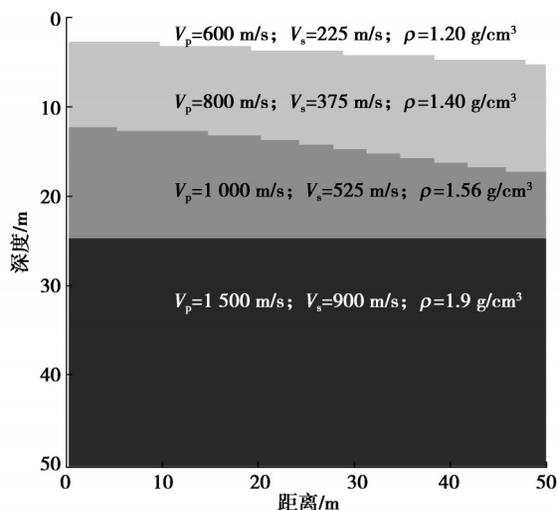


图4 速度模型

Fig. 4 Velocity model

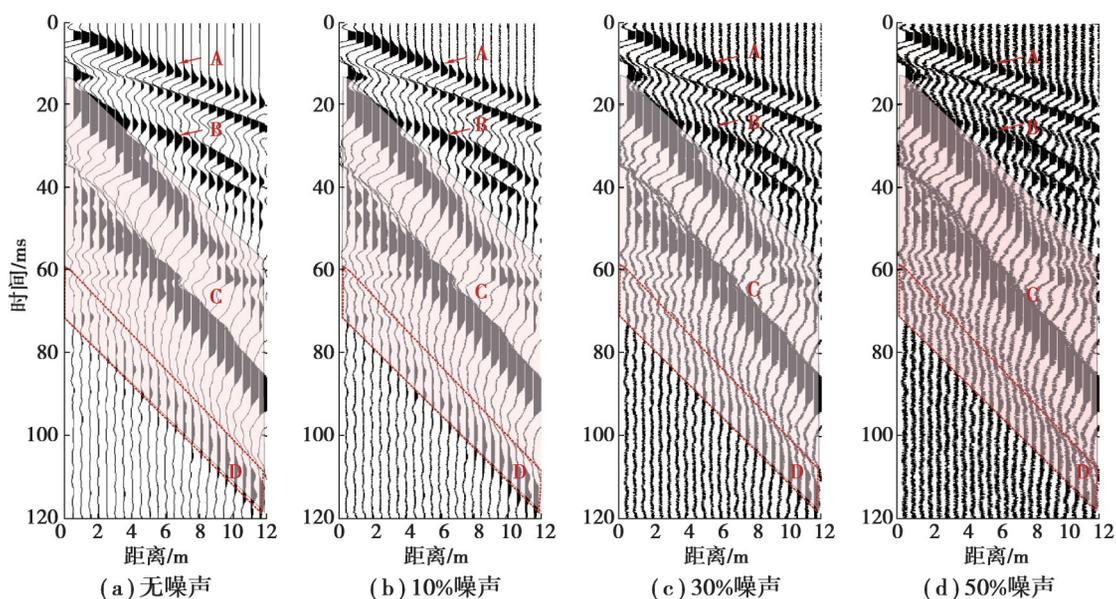
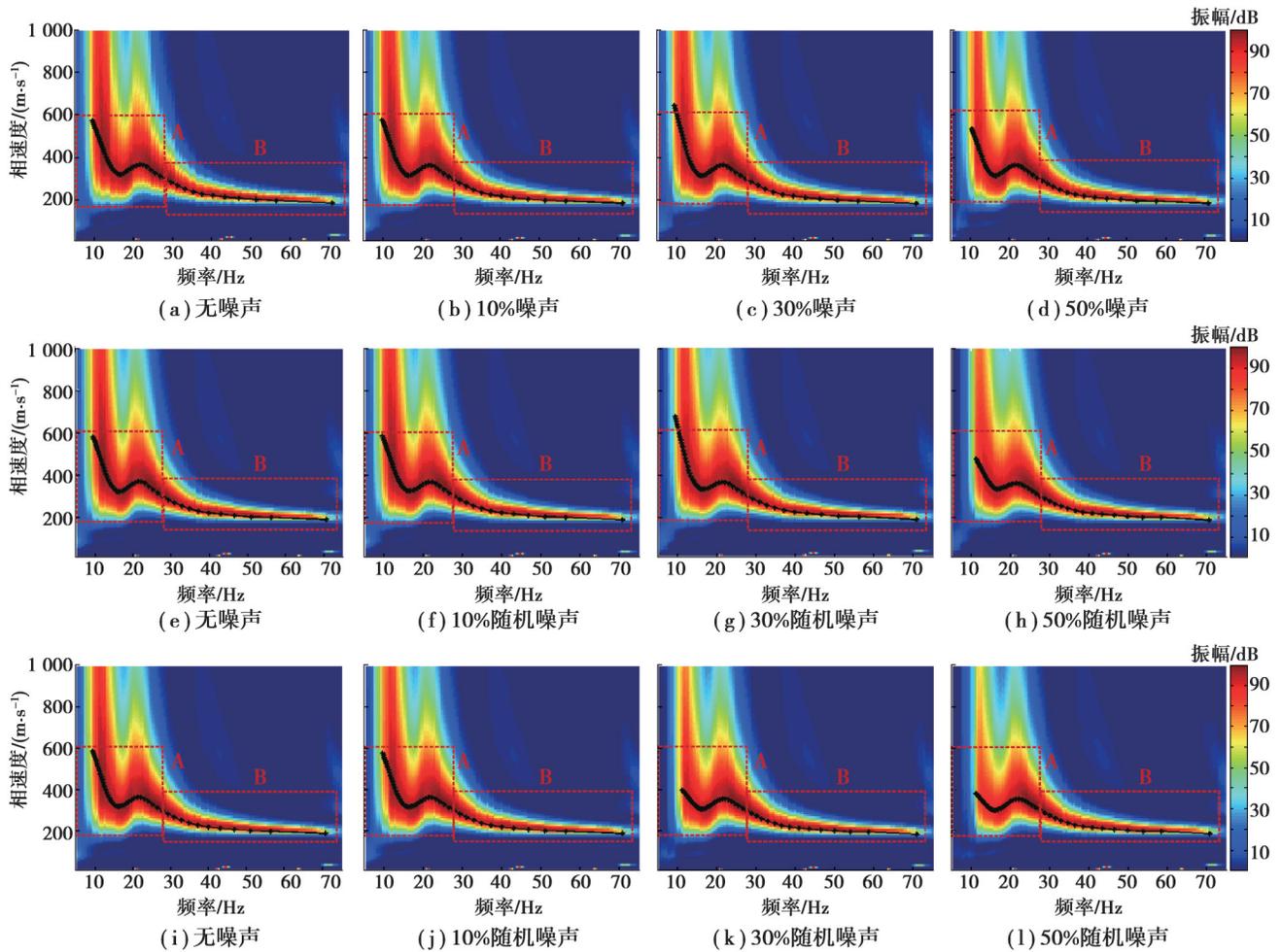


图5 Z分量单炮记录

Fig. 5 Z-component single-shot record

图5中单炮记录的采样间隔为0.04 ms,通过重采样处理,采样间隔变换为0.16 ms和0.24 ms的单炮记录。将所有单炮记录通过相移法变换为F-V谱,结果如图6所示。采样间隔为0.04 ms时,F-V谱几乎完全相同(图6(a)~(d),A和B);采样间隔为0.16 ms时,F-V谱高频部分几乎完全相同(B),低频部分有微小的差异(图6(e)~(h),A);采样间隔为0.24 ms时,F-V谱高频部分几乎完全相同(B),而低频部分有明显的差异(图6(i)~(l),A)。随机噪声和采样间隔变化时,F-V谱的低频成分容易受到影响,而高频成分无明显变化。随机噪声越强,采样间隔越大,F-V谱的低频成分能量越低。F-V谱的低频成分与探测深度有关,低频成分的损失,会造成探测深度浅。城市环境作业时易受到环境噪声干扰,为保证有足够能量的低频成分用于反演尽可能深的目标层位,需要高采样率的数据。



注: (a) ~ (d) 采样间隔为0.04 ms; (e) ~ (h) 采样间隔为0.16 ms; (i) ~ (l) 采样间隔为0.24 ms

图 6 不同采样间隔时加入不同比例的随机噪声的 F-V 谱

Fig. 6 F-V spectrum of random noise with various proportions at different sampling intervals

3 工程应用

因连日降雨导致地表水渗漏等原因,重庆市某居民小区发生明显的地表塌陷,塌陷区域直径有 8 m,深度超过 3 m。因居民楼修建的需求,近地表覆盖层为回填黏土、砂砾土,厚度约 10 m。基岩类型为砂岩,砂砾岩,塌陷区附近地表也有明显的变形。为准确探明潜在的塌陷区,在柏油路面应用拖曳式地震仪开展面波勘探工作。

3.1 工作布置

所用的拖曳式地震仪器为 TS-24 仪器,配置文中设计的 24 道重力耦合加速度检波器。震源为 24 磅大锤。测线设计 68.0 m,拖曳式地震排列长度为 11.5 m,排列的道间距为 0.5 m,偏移距为 3.0 m,排列移动间距为 1.0 m。采样间隔为 0.041 ms,采样长度为 8 192。重力耦合方式突破了传统的锥形检波器的耦合方式,实现硬化路面检波器与地面的完整耦合。所设计的挂接连接方式,能实现快速组装拆卸,施工效率高,现场采集 68 炮大约需要 60 min。如图 7(a)为测线布设图,图 7(b)为现场塌陷照片,图 7(c)为拖曳式地震数据采集照片。

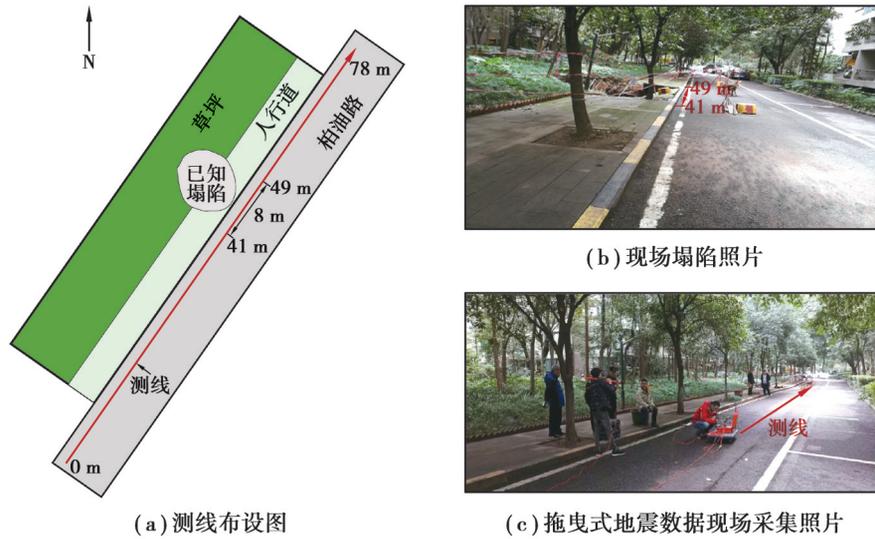


图7 测线图和数据采集照片

Fig. 7 Survey line and data collection photos

3.2 数据分析

图8为原始单炮记录,符号A为面波,红框B有明显的随机噪声。面波(A)有明显的相似性,但随机噪声(B)却有明显的差异。反射波不易识别,几乎被强能量的面波(A)和随机噪声(B)所掩盖。近地表的成像主要以面波信息为主。

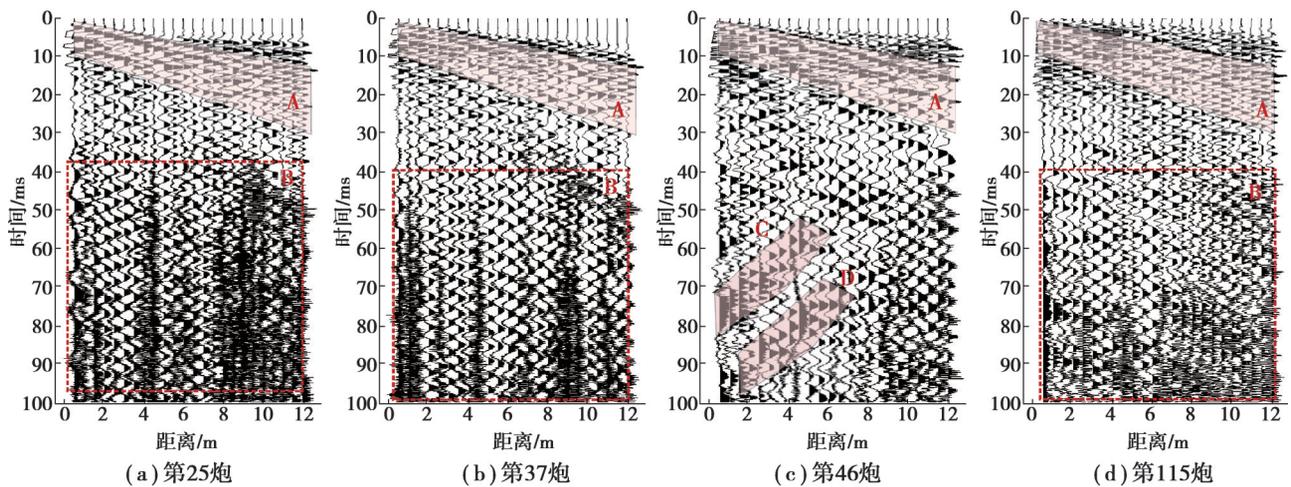


图8 原始单炮记录

Fig.8 Raw single-shot records

应用相移法提取面波记录的F-V谱,结果如图9所示。F-V谱特征较好,基阶面波频谱集中在10~80 Hz之间。依次拾取频散曲线(见图9,黑线)。

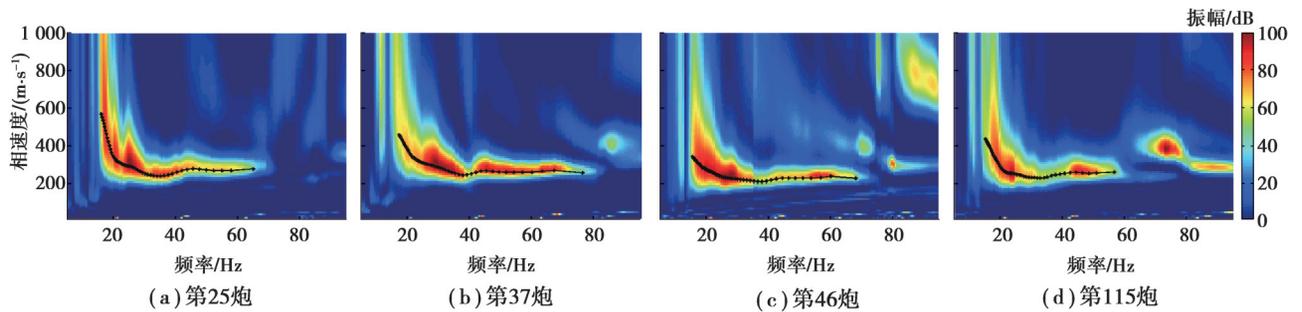


图9 F-V谱

Fig. 9 F-V spectrum

应用阻尼最小二乘反演方法实现频散曲线反演,计算得到横波和深度,结果如图10所示。最大深度在10~16 m之间。受到表层沥青路面的影响,2 m以内速度相对较高,深度大于2 m时,横波速度随着深度递增。横波速度随深度的变化规律,符合现场地层的变化特征。反演深度超过10 m能达到探测的需求。

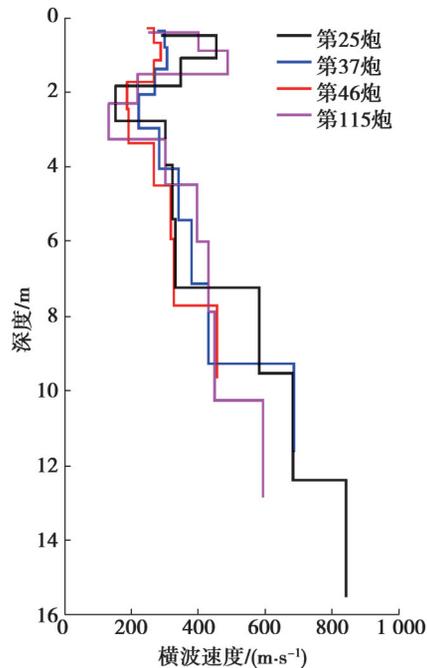


图10 速度-深度曲线

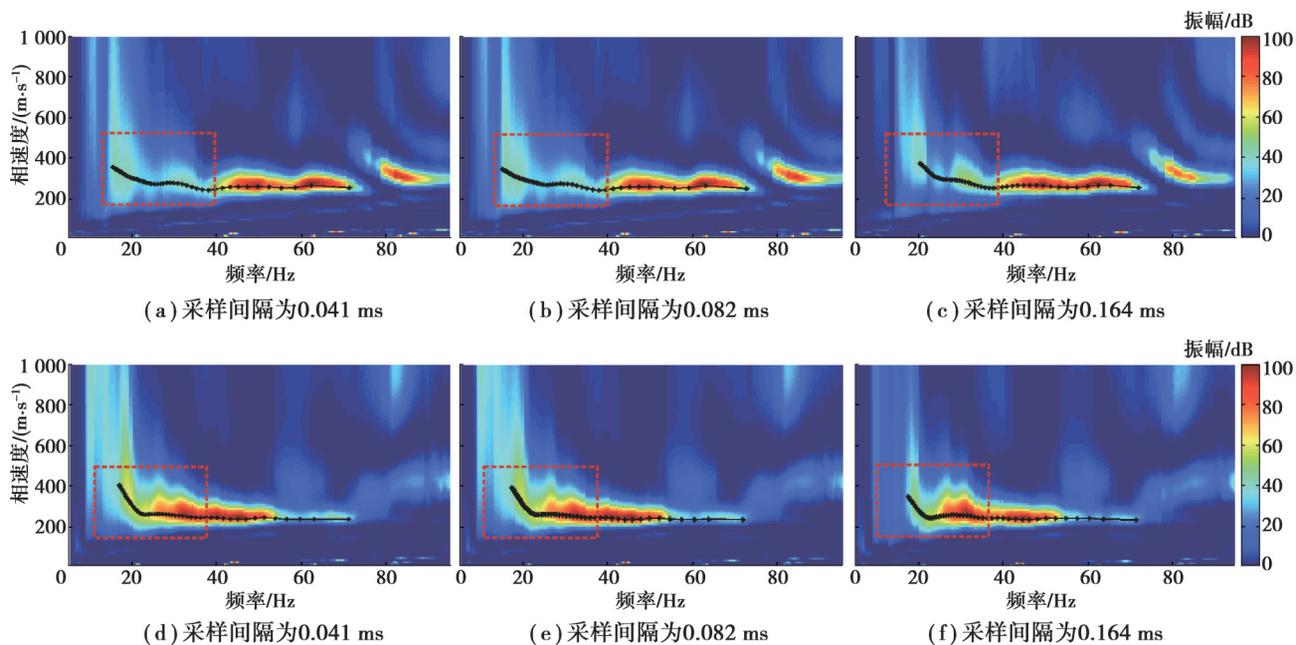
Fig. 10 Velocity-depth curve

3.3 采样率影响分析

原始数据的采样间隔为0.041 ms,重采样处理为采样间隔0.082 ms和0.164 ms的单炮记录。再变换为F-V谱提取频散曲线,结果如图11所示。采样间隔逐渐变大时,F-V谱有明显的差异。采样间隔为0.041 ms和0.082 ms时,F-V谱中低频和高频成分无明显差异(图11(a)~(e));采样间隔为0.164 ms时,F-V谱中低频成分能量损失(A),而高频成分无明显变化(图11(c)和(f))。低频成分的损失,严重影响到探测深度。图12显示采样间隔为0.164 ms时,横波速度的最大深度不超过8 m。采样间隔为0.041 ms和0.082 ms时,横波速度的相似性较高,最大深度能达到10 m,能满足勘探的最低要求(见图12)。

如图11、图12所示,依次拾取计算所有单炮记录不同采样率时的横波速度曲线,结果如图13所示。在距离10~18 m(A),36~44 m(B),47~56 m(C)和64~76 m(D)差异最明显。图13(c)显示采样间隔为0.164 ms时,横波速度的反演深度不足,尤其在区域C和D处最明显。横波速度为350 m/s和600 m/s的速度界面被认为物性分界面,依次追踪这2个速度界面,结果如图13(d)所示。图13(a)~(c)显示,随深度递增,横波速度也递增,符合地层的变化规律。低速层(350~600 m/s)主要是回填土层和相对不密实层,高速层(≥ 600 m/s)主要是回填密实层和砂砾石层。低速层较厚,横向变化快的区域,容易形成塌陷。低速层相对较薄,横向变化平稳的区域,形成塌陷的可能性较小。图13(a)显示,区域A和B中低速层较薄,横向变化相对平稳,而区域C和D中低速层较厚,横向变化相对较快。由此推测区域A和B发生塌陷的可能性较小,而区域C和D更容易发生塌陷。现场的地质资料显示区域C为已知塌陷区,区域D地表有明显的变形。等值线对比能直观显示不同采样率时横波速度的纵向和横向变化。采样间隔为0.041 ms和0.082 ms时,等值线的纵向和横向差异变化较小,仅在细节方面有微小差异(图13(d))。反演深度的不足间接影响横向分辨率。采样间隔为0.164 ms时,塌陷位置C处横波速度(600 m/s)的深度较浅,横向差异较小,使得真实塌陷区的位置和深度不

易识别。不同采样率的面波成像结果表明高采样率能提高面波反演深度,间接地提高横向分辨率。实验区内采样间隔最低要达到0.082 ms才能精细化描述潜在塌陷区位置和速度的横向变化特征。



注: (a)~(c)为第42炮; (d)~(f)为第132炮

图 11 F-V 谱

Fig. 11 F-V spectrum

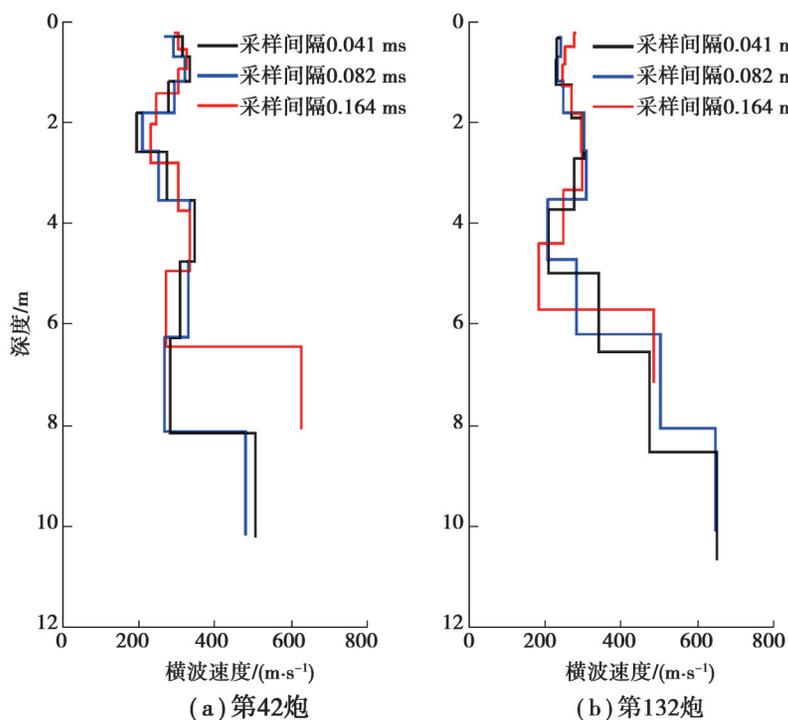


图 12 深度-速度曲线

Fig. 12 Depth-velocity curve

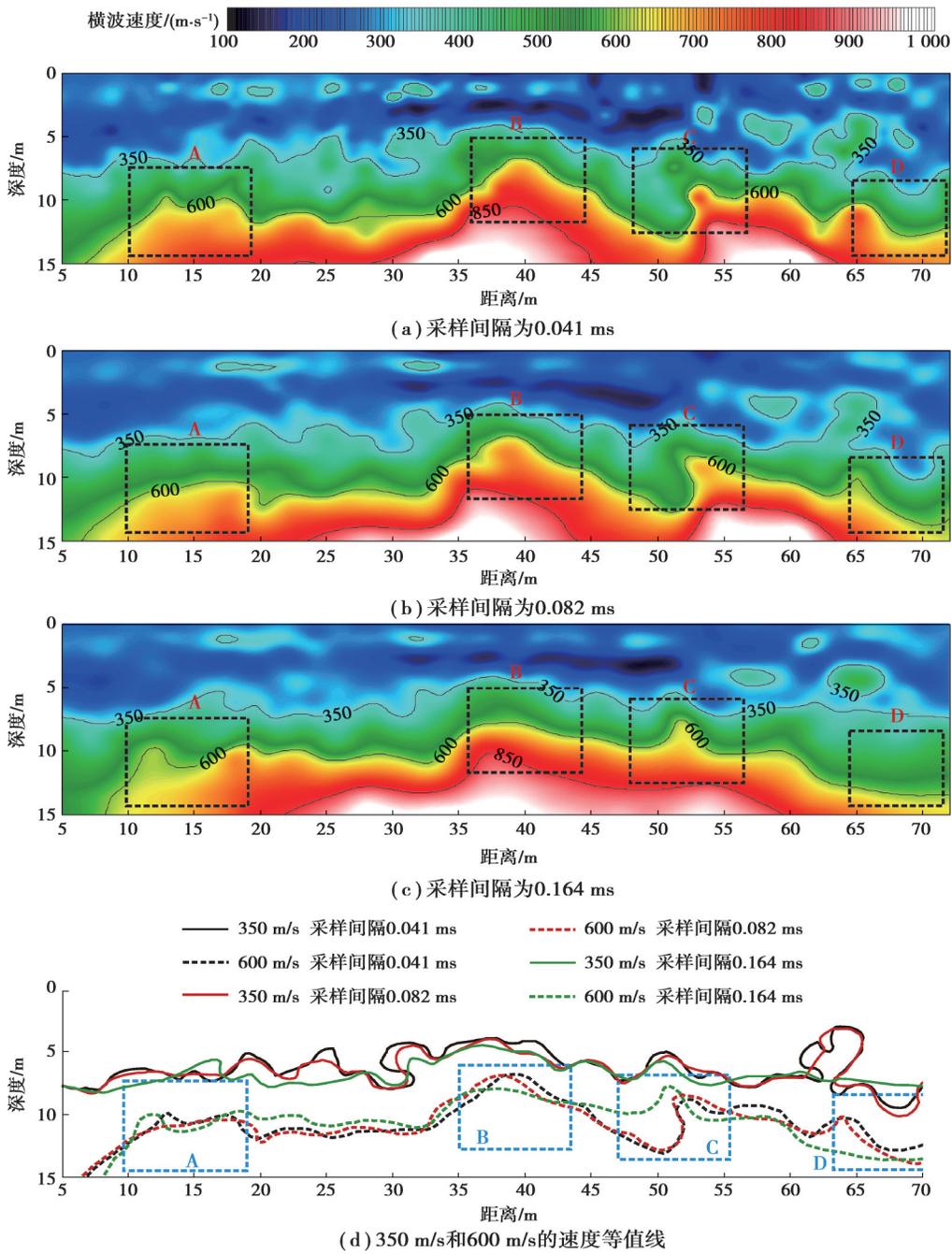


图 13 横波速度剖面

Fig. 13 Shear velocity profile

4 结 论

为实现硬化路面的高效、低成本、高采样率、高密度地震数据采集,文中提出拖曳式地震数据采集方法。配置重力耦合加速度检波器,实现检波器与硬化路面的完整耦合。依据模型数据和实测数据,总结得出:

1)重力耦合加速度检波器能实现快速组装拆卸和快速移动,施工效率高,采集成本低。加速度检波器灵敏度高、频带宽,能采集到宽频的面波信号。文中实验区内面波的低频能达到5 Hz,高频能达到120 Hz,能同时保证浅层分辨率和探测深度。

2)传统探测认为面波探测精度和深度与道间距、偏移距和排列长度有关,却忽略采样率的影响。低采样

率且随机噪声干扰严重时,会损害面波频谱的低频成分,导致探测深度不足。文中从数据采集分析得出高采样率能压制随机噪声,增强低频能量,保证足够的探测深度。

3)城市面波成像的范围在20 m以内,需要精细地描述横波速度的横向变化特征,准确定位异常体的位置。所设计的重力耦合加速度检波器为高密度、高采样率的宽频面波数据采集提供硬件基础,尤其适用于城市道路病害和堤坝渗漏检测领域。文中仅从原始单炮记录中提取面波频散曲线,同时也可以提取反射波实现叠加成像,反射波和面波相互弥补,可提高探测准确性。

参考文献

- [1] 林志平, 林俊宏, 吴柏林, 等. 浅地表地球物理技术在岩土工程中的应用与挑战[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2664-2680.
Lin Z P, Lin J H, Wu B L, et al. Applications and challenges of near surface geophysics in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2664-2680. (in Chinese)
- [2] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 等. 高频面波方法的若干新进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2591-2605.
Xia J H, Gao L L, Pan Y D, et al. New findings in high-frequency surface wave method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2591-2605. (in Chinese)
- [3] Cheng F, Xia J H, Shen C, et al. Imposing active sources during high-frequency passive surface-wave measurement [J]. Engineering, 2018, 4: 685-693.
- [4] 吴华礼, 陈晓非, 潘磊. 基于频率-贝塞尔变换法的关东盆地S波速度成像[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3400-3407.
Wu H L, Chen X F, Pan L. S-wave velocity imaging of the Kanto basin in Japan using the frequency-Bessel transformation method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(9): 3400-3407. (in Chinese)
- [5] Lu Y X, Peng S P, Du W F, et al. Rayleigh wave inversion using heat-bath simulated annealing algorithm [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134: 267-280.
- [6] Sun C Y, Wang Y Y, Wu D S, et al. Nonlinear rayleigh wave inversion based on the shuffled frog-leaping algorithm [J]. Applied Geophysics, 2017, 14(4): 551-558.
- [7] Wang X, Shen H Y, Li X X, et al. Rayleigh wave dispersion curve inversion with the artificial bee colony algorithm [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2021, 26(2): 99-110.
- [8] 高旭, 于静, 李学良, 等. 自适应权重蜻蜓算法及其在瑞雷波频散曲线反演中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4): 745-757.
Gao X, Yu J, Li X L, et al. Rayleigh wave dispersion curve inversion based on adaptive weight dragonfly algorithm [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4): 745-757. (in Chinese)
- [9] Dai K S, Liu K, Li X F, et al. Application of passive multichannel analysis of surface waves method at sites close to underground railways-problems and a case study [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 164: 191-199.
- [10] Pang J Y, Cheng F, Shen C, et al. Automatic passive data selection in time domain for imaging near-surface surface waves [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 162: 108-117.
- [11] Xu P F, Ling S Q, Long G, et al. ESPAC-based 2D mini-array microtremor method and its application in urban rail transit construction planning [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104070.
- [12] Ben D, David G, Giulio C, et al. Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 174: 103923.
- [13] 任立刚. 速度与加速度检波器地震资料响应特征分析及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2159-2165.
Ren L G. Analysis and application of velocity and acceleration geophone's seismic response characteristic [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2159-2165. (in Chinese)
- [14] Zhang J, Liu S D, Wang B, Yang H P. Response of triaxial velocity and acceleration geophones to channel waves in a 1-m thick coal seam [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 166: 112-121.
- [15] 文学康, 袁莹, 唐建明, 等. 速度、加速度检波器在超深层地震勘探中应用效果分析——以川南赤水地区为例[J]. 地球物理学进展, 2020, 33(4): 1489-1496.

- Wen X K, Yuan Y, Tang J M, et al. Analysis and application of velocity and acceleration geophone in ultra deep seismic exploration: a case study of Chishui area in south Sichuan basin [J]. Progress in Geophysics, 2020, 33(4): 1489-1496. (in Chinese)
- [16] Bojan B, Alireza M, Christopher J, et al. Multicomponent broadband digital-based seismic landstreamer for near-surface applications [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 123: 227-241.
- [17] Wadas S H, Polom U, Krawcayk C M. High-resolution shear-wave seismic reflection as a tool to image near-surface subrosion structures-a case study in Bad Frankenhausen, Germany [J]. Solid Earth, 2016, 7(5): 1491-1508.
- [18] Yue H Y, Zhang B W, Wang K, et al. A towed-type shallow high-resolution seismic detection system for coastal tidal flats and its application in Eastern China [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(6): 967-979.
- [19] Hojjat H L, Ali G. Curvelet-TV regularized Bregman iteration for seismic random noise attenuation [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 109: 233-241.
- [20] Wang D H, Gao J H. A new method for random noise attenuation in seismic data based on anisotropic fractional-gradient operators [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 110: 135-143.
- [21] Zhou J X, Lu W K, He J W, et al. A data-dependent Fourier filter based on image segmentation for random seismic noise attenuation [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 114: 224-231.
- [22] Chen W, Song H. Automatic noise attenuation based on clustering and empirical wavelet transform [J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 159: 649-665.
- [23] Cao J J, Cai Z C, Liang W Q. A novel thresholding method for simultaneous seismic data reconstruction and denoising [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 177: 104027.
- [24] 秦臻, 张才, 郑晓东, 等. 高精度有限差分瑞雷面波模拟及频散特征提取[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 40-46.
Qin Z, Zhang C, Zheng X D, et al. High precision finite difference Rayleigh wave simulation and frequency dispersion characteristics extraction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 40-46. (in Chinese)
- [25] 邵广周, 李庆春. 联合应用 τ -p 变换法和相移法提取面波频散曲线[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 836-840.
Shao G Z, Li Q C. Joint application of τ -p and phase-shift stacking method to extract ground wave dispersion curve [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 836-840. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)