

秦林鹏, 王赞, 张东明等. 2024. 六分量地震观测在工程勘查中的应用试验. 地球物理学报, 67(1):308-317, doi:10. 6038/cjg2023Q0195.

Qin L P, Wang Y, Zhang D M, et al. 2024. A case study: application of six-component seismic observations in urban engineering investigation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(1):308-317, doi:10. 6038/cjg2023Q0195.

六分量地震观测在工程勘查中的应用试验

秦林鹏¹, 王赞^{1*}, 张东明², 郭高原¹, 陈畅¹, 陈锋¹,
钱荣毅¹, 马振宁¹, 陈永阳¹, 汪超³

1 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

2 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074

3 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

摘要 利用面波频散曲线反演地下介质的 S 波速度结构, 是浅层工程地震领域一种重要的方法技术. 传统的面波法包括主被动源的面波多道分析方法(MASW)和被动源的空间自相关(SPAC)方法, 均需要多台地震仪同时记录地面振动; 而记录平动和旋转运动的单台站六分量地震数据理论上也可以获得面波频散曲线. 本文以河北唐山城区煤矿采空区浅层工程勘探实际六分量地震数据为例, 对比了利用单台站六分量地震数据与主、被动源法多台站提取的 Rayleigh 波频散曲线. 试验结果表明利用纵波扫描可控震源时, 30 Hz 以下频段利用单台站六分量地震数据提取的基阶 Rayleigh 波频散曲线与主、被动源 MASW 方法提取的频散曲线结果一致, 说明在浅层工程地震勘查中, 利用单物理点的六分量地震观测反演浅层横波速度是可行的.

关键词 面波; 频散曲线; 主被动源; 六分量; 基阶

doi:10. 6038/cjg2023Q0195

中图分类号 P631

收稿日期 2022-03-26, 2023-09-19 收修定稿

A case study: application of six-component seismic observations in urban engineering investigation

QIN LinPeng¹, WANG Yun^{1*}, ZHANG DongMing², GUO GaoYuan¹, CHEN Chang¹,
CHEN Feng¹, QIAN RongYi¹, MA ZhenNing¹, CHEN YongYang¹, WANG Chao³

1 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China

3 Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550081, China

Abstract Using the surface wave dispersion curves to invert the S-wave velocity of subsurface media is an important method in shallow engineering seismic exploration. Traditional surface wave analysis methods include Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) and Spatial Auto-correlation (SPAC), which require the use of z-component or 3-component leveling seismometer arrays to simultaneously record ground motion. However, the surface wave dispersion curves can be theoretically obtained by recording only the six-component seismic data from a single station with translational and rotational motions. A case study of shallow engineering exploration in Tangshan City is introduced in this paper. Through comparing the Rayleigh wave dispersion curves extracted with

基金项目 国家自然科学基金项目(62127815, 42150201, U1839208, 41874166)资助.

第一作者简介 秦林鹏, 男, 1999 年生, 在读硕士研究生, 主要从事介质结构监测和旋转地震学研究. E-mail: limeqlp@foxmail.com

* 通讯作者 王赞, 男, 1969 年生, 1998 年毕业于中国科学院地球物理研究所, 现从事地震各向异性理论与多分量地震技术的研究.

E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

different observations, the experiment shows that, when the P-wave vibroseis is used as the seismic vibration source, the fundamental Rayleigh wave dispersion curve below 30 Hz extracted from the six-component seismic data with only single-station observation is consistent with the dispersion curves extracted with array of geophones. The study suggests that in the shallow engineering seismic exploration, it is feasible and convenient to invert the S-wave velocity of subsurface media by using six-component seismic data instead of dense translational observations.

Keywords Surface wave; Dispersion curve; Active and passive sources; Six-component; Fundamental mode

0 引言

三个平动自由度和三个旋转自由度的组合完整刻画了空间中任意一点的运动状态(胡德绥, 1989), 一般称为六分量地震观测。旋转运动的直接测量提供了对地震波场的额外独立信息, 补充了地震波场的空间梯度测量, 对近地表面波层析成像等有重要意义(Lee et al., 2009; Schmelzbach et al., 2018; 王赞等, 2021)。

面波层析成像的关键点之一是频散曲线的提取。20 世纪 90 年代以来, MASW 方法(Multichannel analysis of surface wave, 面波多通道分析方法)(Park et al., 1999)得到广泛运用。对主动源激发、线性阵列布设多道台站记录的地震数据, 或由背景噪声互相关方法(NCFs)得到的虚拟炮集(Bensen et al., 2007), 使用一定的数学变换方法就可以得到频散曲线; 被动源的空间自相关法(SPAC)(Aki, 1957)也可以得到频散曲线, 但上述方法均需要多台站同时记录地面振动。

Igel 等(2005)的研究揭示单台站记录的六分量地震数据中, 长周期(1~150s)Love 波信号的水平切向加速度和垂向旋转速率拥有高波形相似性, 幅度比能准确反映 Love 波相速度, 从而可以利用单物理点上观测的平动加速度与旋转速率实现横波速度的一维反演。这一方法的有效性得到多个天然地震实例的证实(Cochard et al., 2006; Igel et al., 2007; Kurrle et al., 2010; Yuan et al., 2020; 操玉文等, 2022); 在微震定位和利用微震实现面波相速度频散曲线提取方面也获得了应用(Hadziioannou et al., 2012; Tanimoto et al., 2015; Taylor et al., 2021; Yuan et al., 2021)。

Wassermann 等(2016)首次给出了利用频率域单台站六分量地震数据提取面波频散曲线的流程与

误差估计及质控方法。该方法对面波后方位角和相速度进行扫描, 使用正交回归的算法进行误差评估; 同时引入经验系数 χ 对采集质量较差的数据进行质控。但是在主动源六分量地震勘探中, 该方法是否可行值得探究。因此, 本文针对人工源采集六分量地震数据具有高信噪比特点, 我们避免使用不确定的经验系数质控, 尝试通过简单的窄带滤波, 在时间域实现基阶面波频散曲线的提取。

1 试验区概况与地震观测

如图 1 所示, 试验区位于河北省唐山市开平区东湖生态区, 城区环境复杂, 背景噪声较强, 如图 1a 所示。试验区浅表为古滦河中-晚期冲积平原地貌(胡云壮等, 2014), 生态恢复工程使得现阶段全场地内均为人工回填, 地形起伏较小, 如图 1b 所示。由于历史上试验区地下煤矿开采时间长, 存在严重的采空塌陷隐患(刘晓燕等, 2013), 需要进行地球物理探测。在该试验区的浅层地质勘查中, 我们对主动源条件下的单台站六分量地震与主被动源条件下多道提取面波频散曲线的方法进行了试验对比。

如图 1a 所示, 试验区内容布置了一条近南北向的地震测线。如图 2 所示, 测线上布设了 24 台 SmartsoloIGU-16 节点地震仪, 间距 2 m, 自然频率为 5 Hz; 测线开始处放置了 1 台光纤旋转地震仪, 仪器频带为 30s~50 Hz。可控震源车在测线不同位置进行纵波激发, 扫描频带为 10~100 Hz, 扫频时间为 7 s。光纤旋转地震仪及其自身携带的加速度计有效记录了六分量地震数据, 用于后续单点提取面波频散曲线。

观测期间 Smartsolo 节点式地震仪设置采样频率为 1000 Hz, 仪器有效观测时间 350 min; 北京自动化控制设备研究所研制的 FOSN-II 光纤旋转地震仪设置采样频率为 1000 Hz, 有效观测时间 235 min。

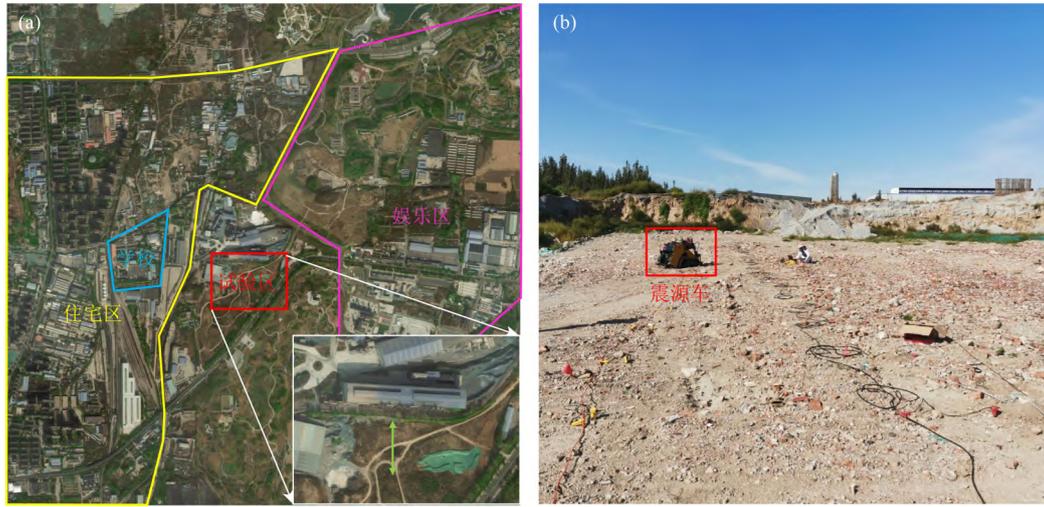


图 1 (a) 试验区位置(红色方框)及附近功能区划分, 及测线位置(白色放大图). 白色矩形是试验区的放大图, 其中绿线代表测线; (b) 试验区地表面情况

Fig. 1 (a) Field test location (the red rectangle) and surrounding urban functional areas. The white rectangle is an enlargement of the test area and the green line represents the survey line; (b) The surface conditions in work area

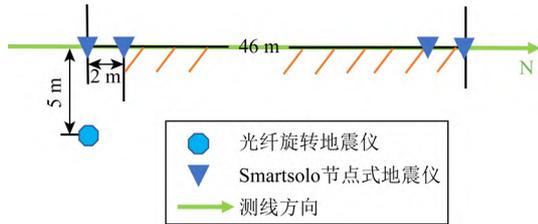


图 2 地震仪器布局

Fig. 2 Layout map of seismic sensors

2 原理及方法

2.1 利用六分量地震数据提取频散曲线的原理

假设已知空间某点 $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ 处的平动位移波场 u , 自由地表旋转位移 ω^{FS} 可以近似表示为 (Cochard et al., 2006; Schmelzbach et al., 2018; 孙丽霞等, 2021):

$$\omega^{\text{FS}} = \frac{1}{2} \nabla \times u = \begin{pmatrix} \partial_y u_z \\ -\partial_x u_z \\ \frac{1}{2}(\partial_x u_y - \partial_y u_x) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

在二维工程地震勘查中, 可认为 Rayleigh 波主要记录在平动径向分量 R 、垂向分量 Z 、旋转切向分量 T 上 (图 3), 其六分量的波场可表示为 (Sollberger et al., 2020):

$$\begin{cases} \ddot{u}_R(r, t) = -A\omega \sin \xi \sin(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ \ddot{u}_T(r, t) = 0 \\ \ddot{u}_Z(r, t) = -A\omega \cos \xi \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ \dot{\omega}_R(r, t) = 0 \end{cases} \quad (2a)$$

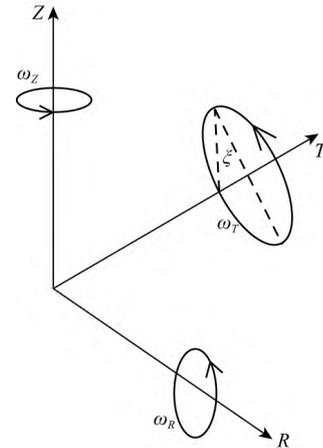


图 3 Rayleigh 波在 RTZ 坐标系下的传播示意图

$\dot{\omega}_R, \dot{\omega}_Z$ 仅为 R, Z 方向上旋转分量的一个示意, 理论上在 $R-Z$ 面内传播的 Rayleigh 波在这两个分量上数值为 0.

Fig. 3 Schematic drawing of Rayleigh wave propagation in RTZ coordinate system

The Z -axis point upwards, opposite to traditional Z -axis' direction; $\dot{\omega}_R$ and $\dot{\omega}_Z$ are schematic diagrams of the rotation components in the R -axis's and Z -axis' directions, which are all equal to zero for Rayleigh wave propagating along the $R-Z$ plane.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_T(r, t) = Ak \cos \xi \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ \dot{\omega}_Z(r, t) = 0, \end{cases} \quad (2b)$$

其中, \ddot{u} 代表平动加速度, $\dot{\omega}$ 代表旋转速率, 它们均是空间位置与时间的函数. 下标 R, T, Z 代表右手笛卡尔坐标系的三个方向; 旋转分量中, 正值代表顺时针旋转, 负值代表逆时针旋转. A 代表波场振幅, ξ 为 Rayleigh 波的椭圆率角, \mathbf{k} 代表波矢量, 等于波数 k 与波传播矢量 $[l_R, l_T, l_Z]^T$ 的乘积, 即 $\mathbf{k} = k[l_R, l_T, l_Z]^T$; $k = \frac{\omega}{c}$,

其中 ω 为角频率, c 为 Rayleigh 波的相速度.

Rayleigh 波的相速度表示为 (Ferreira and Igel, 2009; Kurrle et al., 2010; Lin et al., 2011):

$$c_{\text{Rayleigh}} = -\frac{\ddot{u}_z(f)}{\dot{\omega}_T(f)}, \quad (3)$$

同理 Love 波的相速度表示为

$$c_{\text{Love}} = -\frac{\ddot{u}_T(f)}{2\dot{\omega}_z(f)}, \quad (4)$$

时域中上述关系仍然成立 (Igel et al., 2007):

$$c_{\text{Rayleigh}} = -\frac{\ddot{u}_z(r,t)}{\dot{\omega}_T(r,t)}, \quad (5)$$

$$c_{\text{Love}} = -\frac{\ddot{u}_T(r,t)}{2\dot{\omega}_z(r,t)}.$$

公式(5)的有效性在天然地震引起的长周期面波信号 (Cochard et al., 2006; Igel et al., 2007; Kurrle et al., 2010; Yuan et al., 2020) 及较高频段的微震事件 (Hadziioannou et al., 2012; Tanimoto et al., 2015; Taylor et al., 2021; Wassermann et al., 2016; Yuan et al., 2021) 中得到证实.

2.2 频散曲线提取方法

MASW 方法自提出以来, 因其对体波干扰不敏感、能识别低速层等优点, 被广泛使用在提取线性阵列主、被动源地震的面波频散曲线中 (Cheng et al., 2016; Park et al., 1999, 2007). 常见用于提取多通道数据频散曲线的数学方法包括频率-波数谱法 ($f-k$ 法) (Capon, 1969; Lacoss et al., 1969)、相移法 (Park et al., 1998)、 $\tau-p$ 法 (McMechan and Yedlin, 1981) 或拉东变换 (Luo et al., 2008).

理论研究表明, 同时记录的不同台站背景噪声数据的互相关函数与经验格林函数只有幅值上的区别 (Snieder, 2004; Weaver and Lobkis, 2001), 因而可以获取面波的频散特征. Bensen 等 (2007) 给出了时间域的背景噪声数据处理流程, 主要步骤包括单台数据预处理、台站对的互相关数据计算及叠加、频散曲线提取.

基于单台站六分量地震数据提取浅层介质的面波频散曲线已被理论和诸多数值模拟结果验证. 陈锋等 (2023) 从数值模拟的角度验证了不同模型下利用单台站六分量数据估算 Rayleigh 波相速度的可靠性; Wassermann 等提出了在频率域提取面波频散曲线的方法, 但在实际数据应用中发现, 高阶面波的干扰很难避免 (Kurrle et al., 2010; Wassermann et al., 2016). 特别是在浅层工程勘查中, 高阶面波的能量强, 频带范围宽, 频域的算法会导致一定误

差. 本文不再论述数值模拟测试结果, 而直接针对实际观测数据测试方法的适用性和精度. 针对浅层工程勘查中主动源六分量数据能量强、信噪比高, 二维探测方向唯一的特点, 我们提出了在频域进行窄带滤波, 并在时域进行相速度的计算及误差估计, 具体技术流程如下.

(1) 数据预处理

去仪器响应、去均值、去趋势. 去仪器响应的操作必不可少, 地震仪记录的数据等于震源项、路径项与仪器响应的卷积结果. 去仪器响应操作对应着地震仪记录数据与仪器响应的反卷积, 操作后得到台站记录的地面运动的绝对振幅值. 地震六分量数据求解后方位角时需要用到绝对振幅信息.

(2) 后方位角校正

根据实际后方位角或计算出的后方位角得到图 3 坐标系下的六分量数据, 计算方法可以采用六分量极化分析方法 (Sollberger et al., 2020).

(3) 相速度及其误差估计

受噪声影响, 第二步得到的数据并不能直接代入公式(5)中. 设定合理长度的时窗, 通过平动垂向分量与旋转切向分量 (Rayleigh 波) 或平动切向分量与垂向旋转分量 (Love 波) 的相关性扫描, 需要利用相关系数判定数据是否适用于相速度计算. 扫描前, 合适的带通滤波有助于在时域上初略分离不同阶的面波信号. 误差估计使用标准偏差进行估计, 代表带通滤波中心频率相速度值的波动性.

3 数据分析与试验结果

3.1 数据分析

如图 4 显示了一次震源车纵波激发的结果, Smartsolo 仪器记录显示激发能量充分; 由于吸收衰减, 远炮检距接收到的面波信号优势频带为 20~50 Hz, 后文数据不做特殊说明则均为此次激发结果.

3.2 传统方法提取频散曲线

首先, 以零偏移距台站为参考台站, 使用互相关方法进行震源车扫频结果的处理, 其结果如图 5a 所示, 显然面波发育. 然后利用商业软件 SurfWave 中的 MASW 方法进行分析, 相移法得到频散曲线如图 5b 所示, 基阶面波频散曲线能量强、连续, 信噪比较高.

对 Smartsolo 测线记录的 350 分钟被动源记录进行背景噪声互相关得到虚拟炮集及面波频散曲

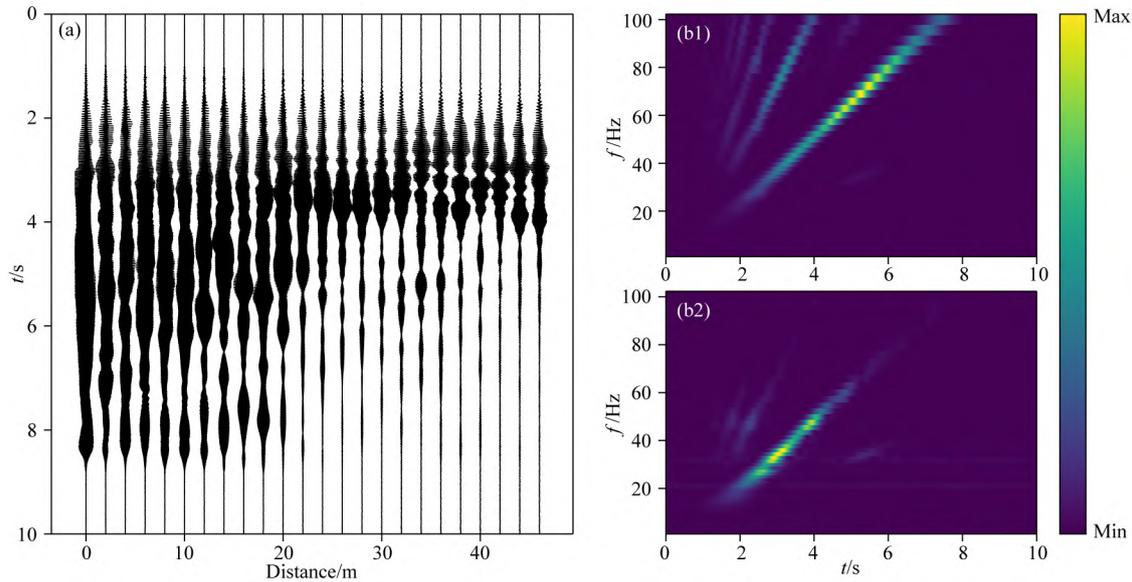


图4 Smartsolo 记录的波形图(a)及其连续小波变换(b1,炮检距 0 m,b2 炮检距 46 m)

Fig. 4 Records of the Smartsolo (a) and continuous wavelet transform results (b1, where the b1 represents Offset=0 m, and b2 is of Offset=46 m)

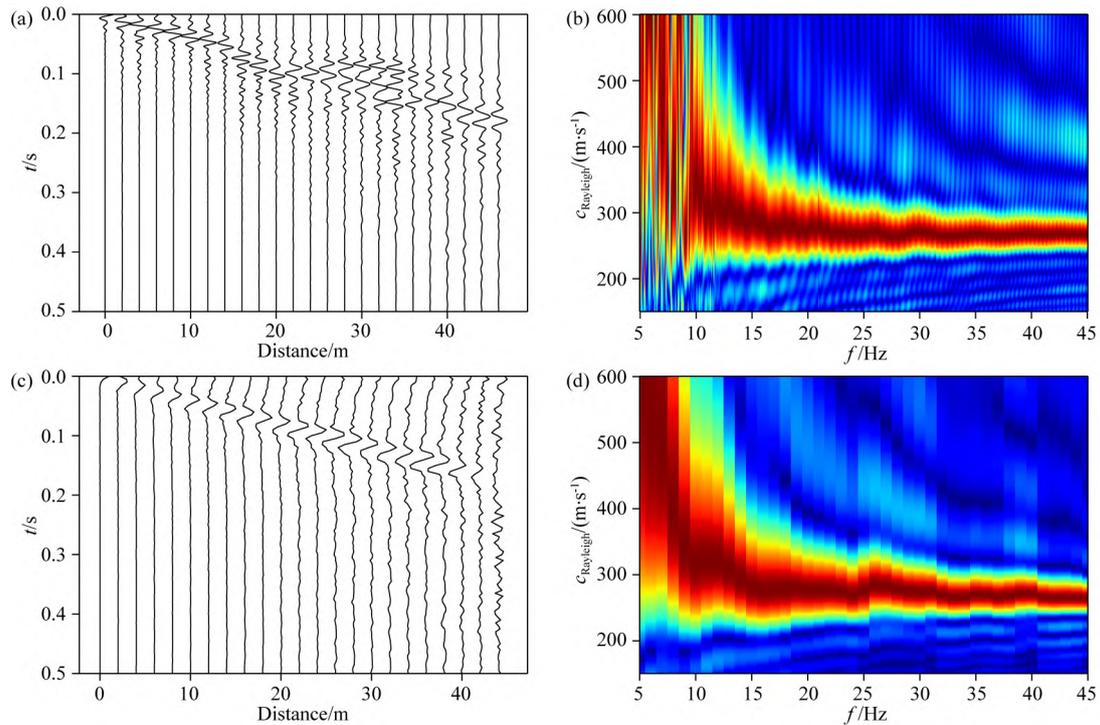


图5 (a),(b)为互相关后的多道地震 Z 分量记录及面波频散曲线;

(c),(d)为背景噪声互相关方法得到的虚拟炮集及面波频散曲线

Fig. 5 (a),(b) Multi-channel seismic Z-component recordings and surface wave dispersion curve after cross-correlation;

(c),(d) Virtual shot set and surface wave dispersion curve obtained by the Noise Cross-correlation Functions(NCFs)

线,如图 5c 和 d 所示. 显然,该频散曲线与主动源 Z 分量记录中提取的面波频散曲线(图 5a 和 5b)具有很好的相似性.

需要说明的是,在被动源噪声频散谱提取中,时域归一化使用滑动绝对平均法(RAMN),且使用

Welch 法(Welch, 1967)提高面波的信噪比. Welch 法消除了背景噪声可能对选择的时间序列起止窗的依赖性,减小了单个高幅度瞬时信号对整体平均值的影响(Lawrence and Prieto, 2011; Prieto et al., 2011). 图 6a 为不同重叠率及时窗数量条件下

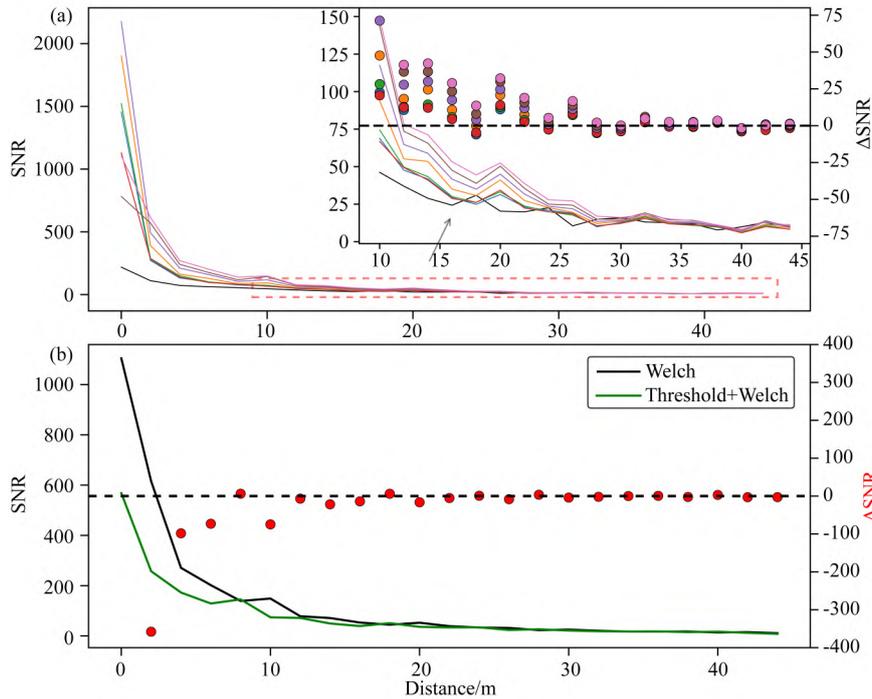


图6 (a) 利用 Welch 法提高互相关法提取的 Rayleigh 波信噪比; (b) 阈值法对虚拟炮集数据信噪比的影响
图中实线表示数据信噪比, 散点表示 Welch 法应用前后数据信噪比的差值, 信噪比定义为面波信号时间窗内振幅的最大值
与噪声时间窗内振幅的均方根之比。

Fig. 6 (a) Using Welch's method to improve the SNR of Rayleigh wave extracted by cross-correlation;
(b) Influence of threshold method on SNR of virtual shot set
Solid lines represent the SNR; scattered points represent the difference of SNR before and
after Welch's method is applied.

Welch 法的改进效果。保持时窗数目不变, 重叠率 $Overlap=50\%$ 时, 数据信噪比更高; 保持 $Overlap$ 不变时, 数据信噪比随时窗数目增加明显增大; 但在时窗数目从 20 变为 50 时, 信噪比增量不大, 因此可以判断为互相关结果逐渐收敛。我们最后使用 $Overlap=50\%$, 时窗数目为 50 作为 Welch 法的参数, 以增强虚拟炮集的面波信噪比。显然, Welch 法使得小炮检距的数据有过大的信噪比, 这实际上是野外试验期间多种类型的主动源实验(锤击、震源车)以及复杂微震信号导致的(行车、人员走动等)。因此我们使用阈值法将大于噪声水平的数据置零, 以去除仪器中大量记录的主动源及微震信号。如图 6a 显示, 去除主动源信号后, 近炮检距的信号信噪比显著下降。

3.3 利用单点六分量地震数据提取频散曲线

本次试验 FOSN-II 光纤旋转地震仪记录到了高信噪比的六分量地震数据; 采集数据为旋转速率, 单位 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 无需进行去仪器响应处理。由于仪器通频带为 $30 \text{ s} \sim 50 \text{ Hz}$, 因此进行 50 Hz 的低通滤波。数据预处理及后方位角矫正后的六分量数据波

型及其连续小波变换结果显示(图 7): 震源车纵波激发结果的主要能量集中于平动径向、垂向和旋转切向的方向上。根据六分量地震数据的对应关系(图 3), 显然该能量主要是 Rayleigh 波模式。平动切向分量及旋转径向分量中出现的信号能量是由于仪器放置倾斜, 地下介质存在非均匀体干扰, 或后方位角不完全准确导致, 可以忽略。

在天然地震领域, 震源位置是未知的, 即后方位角是需要求取的参数。基于六分量极化分析可计算后方位角, 实际应用已证实该方法的有效性 (Yuan et al., 2021)。假设本主动源试验中, 震源位置也未知, 限定 Rayleigh 波速在 $250 \sim 600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 变化, 进行 $10 \sim 40 \text{ Hz}$ 频率扫描, 极化分析得到的结果如图 8 所示, 计算出的后方位角接近实际后方位角(偏差为 4°), 精度可接受。

在时间域通过不同频段扫描提取频散曲线需要对时窗长度、不同频段进行试验。试验结果发现时窗长度选用 0.01 s , 即所求频散曲线最短周期的半周期长度进行扫描效果最好。频率窗的大小影响所求频散点的数目, 窗越短, 最终得到的频散点越多。但

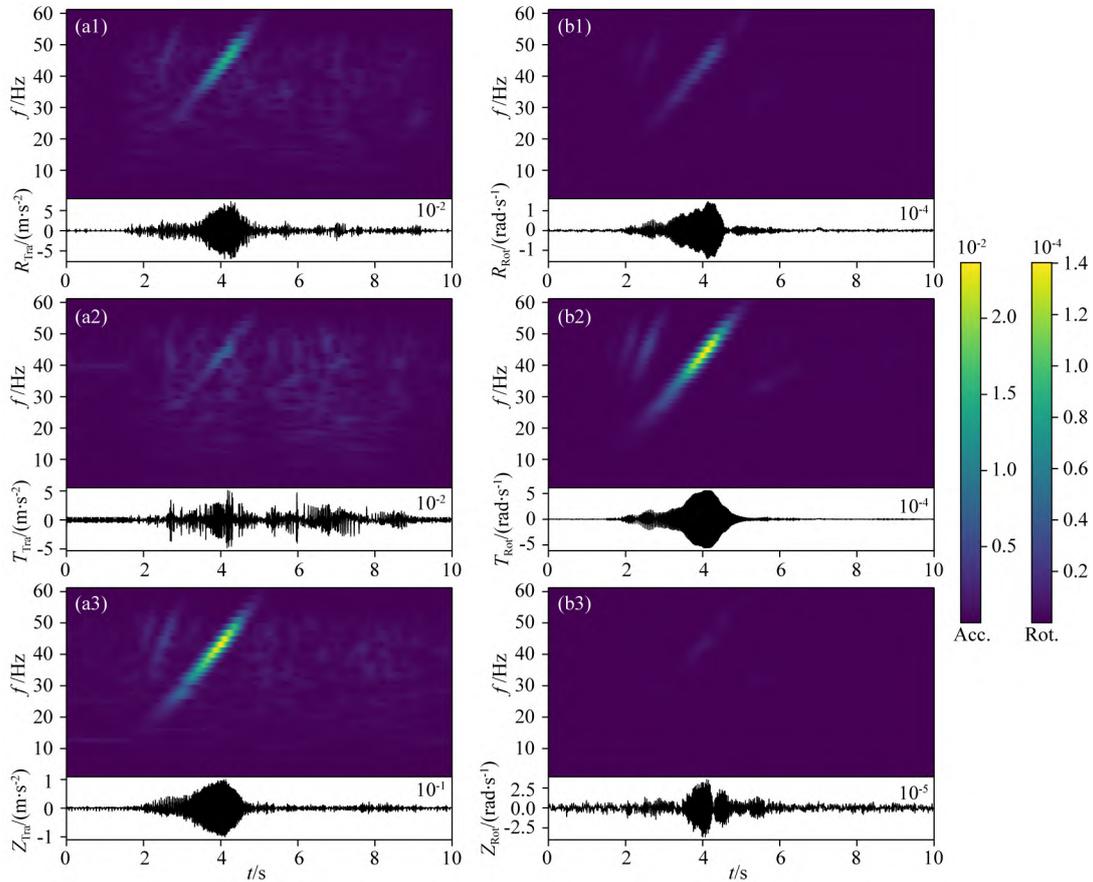


图7 六分量数据波形及其连续小波变换结果

(a1— a3) R , T , Z 平动分量; (b1— b3) R_R , R_T , R_Z 旋转分量.

Fig. 7 Six-component seismic data and its continuous wavelet transform results

(a1— a3) Translational R , T , and Z components from top to bottom; (b1— b3) Rotational R_R , R_T , R_Z components from top to bottom.

当频率窗过小时,一个频率窗内优质数据点的数量减少,对所求相速度值的误差估计不利. 优质数据点的评判标准为上述时间窗和频率窗限定下的平动垂向分量和旋转切向分量(Rayleigh 波)或平动切向分量和垂向旋转分量(Love 波)的相关系数是否大于 0.75. 相速度值使用优质数据点的值代入公式(5)进行求解,并用均值代表最终该频带范围中心频率的相速度值.

如图 9 是 18 Hz 中心频率下(带通滤波 16~22 Hz)利用扫描法得到的相速度结果. 在 Rayleigh 波信号范围时间窗内计算垂向加速度和切向旋转速度的相反数的互相关系数大于 0.75 的相速度,通过平均值得到最终该频率的相速度值. 最终 18 Hz 中心频率对应的横波相速度值为 $282.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与回填土的速度结构是吻合的(刘培玄等,2019).

对不同的时窗进行频域扫描,得到完整的频散曲线如图 10 所示. 其中误差棒代表该点中心频率对应相速度的标准偏差,该值反映了该中心频率所求

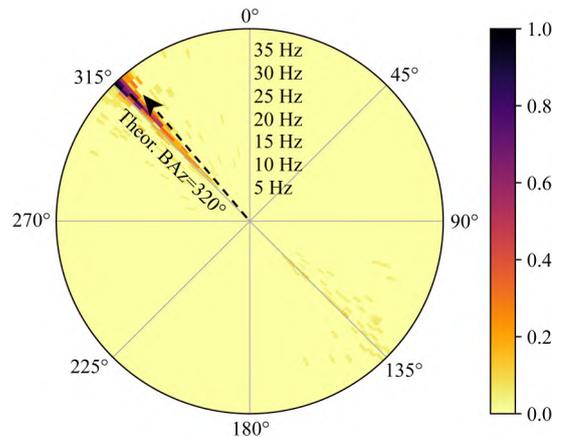


图8 六分量极化分析方法估计的后方位角
色标柱代表分布的归一化密度,极坐标系的径向代表频率,角度代表后方位角值;虚线箭头指向实际的后方位角.

Fig. 8 Back-azimuth estimates using polarization analysis method with six-component seismic data

The color bar represents the normalized densities of the distribution, the radial direction of the polar coordinate system represents the frequency, and the angle represents the back azimuth; the dotted arrow marks true back azimuth.

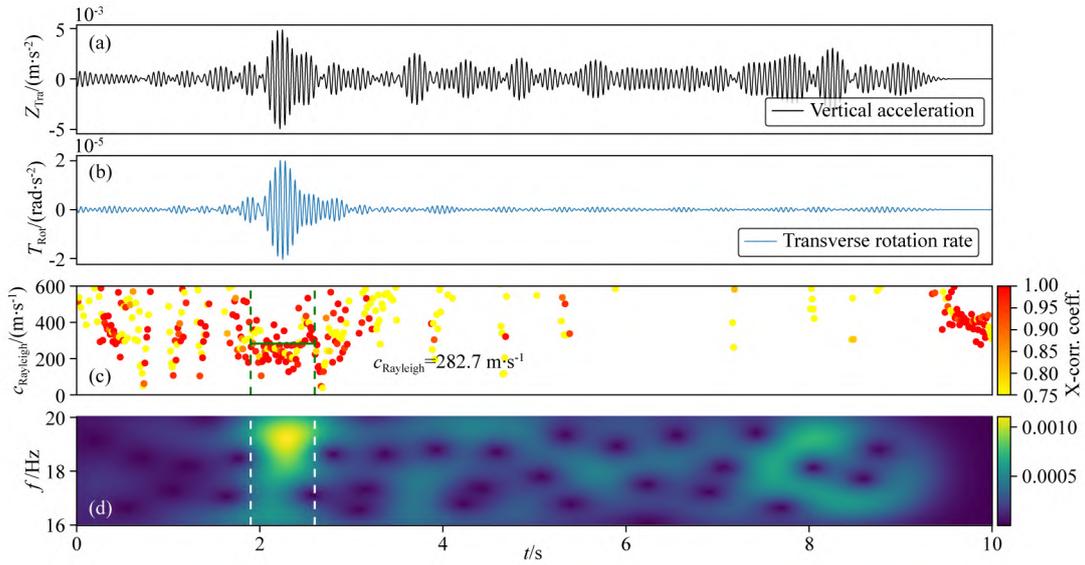


图 9 18 Hz 中心频率下的 Rayleigh 波相速度求取

(a), (b) 分别代表带通滤波后的垂向加速度和切向旋转速度; (c) 代表扫描法得出的 Rayleigh 波相速度, 虚线代表 Rayleigh 波信号时窗; (d) 为垂向加速度分量的连续小波变换结果.

Fig. 9 Rayleigh wave phase velocity at 18 Hz center frequency

(a), (b) represent the vertical acceleration and tangential rotational velocity after band-pass filtering, respectively; (c) represents the Rayleigh wave phase velocity obtained by the scanning method. The dotted line represents the time window of the Rayleigh wave signal; (d) The continuous wavelet transform result of the vertical acceleration component.

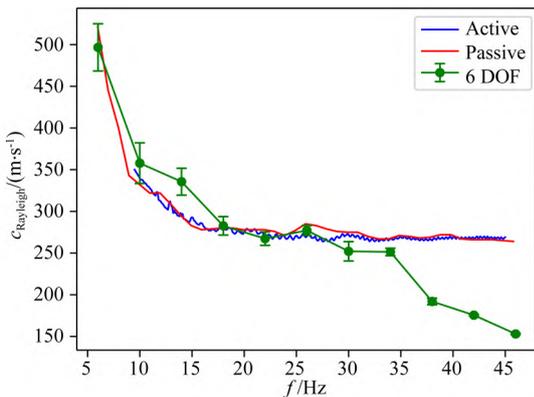


图 10 不同方法得到的频散曲线

绿线代表由单台站六分量数据提取的频散曲线, 红线和蓝线分别代表被动源和主动源数据处理的结果, 被动源使用 NCFs 法形成虚拟炮集后, 同主动源一样使用面波多道分析方法(MASW)进行频散曲线拾取.

Fig. 10 Dispersion curves extracted by using different methods

The dispersion curve extracted by the six-component seismic data (green line), the passive source data (red line) and the active source data (blue line). After the passive source data uses the NCFs method to form a virtual shot, it uses the Multi-channel Analysis Surface Wave method (MASW) to extract the dispersion curve like the active source data.

相速度值的误差情况. 从图中可以看出, 单点六分量方法所求频散曲线在 30 Hz 以下频段和常规方法

(主动源和被动源的多道分析法)基本一致; 但 30 Hz 以上频段, 求解出的相速度值逐渐偏离. 因此, 单台站记录的地震六分量信号在时间域通过不同时窗分频滤波的方法, 可以提取低频基阶面波频散曲线, 高频段的影响因素需要进一步研究讨论.

4 讨论

无论主被动源数据, 面波多道分析方法(MASW)都是提取频散曲线的有力手段. 工程勘查领域, 被动源数据的处理除传统流程外, Welch 法的加入大大提高了被动源数据信噪比, 为短时观测的背景噪声数据提取频散曲线提供了可能.

利用单台站记录的六分量地震数据提取频散曲线的原理十分简洁, 但高阶面波的干扰消除是重点和难点(Igel et al., 2005; Wassermann et al., 2016; Yuan et al., 2020). 在本实验中, 由单台站六分量数据提取的高频段的频散曲线和传统主被动源方法提取的频散曲线有明显差异. 这可能是高阶面波受体波影响, 波场分离不干净的结果. 由于各阶频散曲线在同一频率点处的相速度不一, 工程地震关注的地震频段内, 在时间域进行窄带滤波用以分离提取不同阶面波频散曲线需要进一步研究.

在工程地震勘查领域, 仅需单台站仪器便能获取面波频散曲线, 从而实现一维的速度结构反演, 将会带来人力、财力、时间等成本的巨大节约, 尤其在城市环境中应用具有明显的优势. 随着国产光纤旋转地震仪的迅速发展, 其精度及稳定性不断提高 (Cao et al., 2021), 使用单物理点六分量地震仪提高工程地震勘探效率值得期待.

5 结论

通过本次的主被动源六分量地震联合观测试验, 可获得如下结论.

(1) 利用面波多道分析方法 (MASW) 方法, 从震源车纵波激发、Smartsolo 单分量节点地震仪测线记录中提取主动源面波频散曲线, 和利用背景噪声虚拟炮集获得 5~50 Hz 频段的 Rayleigh 波频散曲线, 两者结果一致性很好; 其中 Welch 法的使用大大提高了虚拟炮集的面波信噪比.

(2) 利用单物理点六分量地震数据提取面波频散曲线, 在后方位角缺失的情况下, 利用六分量极化分析方法求解后方位角也是可靠的.

(3) 唐山城区观测试验与分析说明使用单物理点六分量地震记录提取频散曲线同其他两种传统方法在低频 5~30 Hz 段内一致性很好, 可用于基阶面波提取和反演.

致谢 本文部分图件采用 Obspy 绘制 (<https://docs.obspy.org/>).

References

- Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 35(3): 415-456.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Cao Y W, Chen Y J, Zhou T, et al. 2021. The development of a new IFOG-based 3C rotational seismometer. *Sensors*, 21(11): 3899, doi: 10.3390/s21113899.
- Cao Y W, Zeng X F, Li Z B, et al. 2022. Rotational and translational motions induced by the M_s 6.4 Yunan Yangbi earthquake recorded by co-located FOGs and seismometer. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 663-672, doi: 10.6038/cjg2022P0551.
- Capon J. 1969. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8): 1408-1418, doi: 10.1109/PROC.1969.7278.
- Chen F, Wang Y, Li W, et al. 2023. Numerical verification of extracting surface wave dispersion spectrum from a single point six-component seismic observation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 66(10): 4269-4278, doi: 10.6038/cjg2022Q0380.
- Cheng F, Xia J H, Luo Y H, et al. 2016. Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations. *Geophysics*, 81(5): EN57-EN66, doi: 10.1190/geo2015-0505.1.
- Cochard A, Igel H, Schubert B, et al. 2006. Rotational motions in seismology: Theory, observation, simulation. // Teisseyre R, Majewski E, Takeo M eds. *Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 391-411, doi: 10.1007/3-540-31337-0_30.
- Ferreira A M G, Igel H. 2009. Rotational motions of seismic surface waves in a laterally heterogeneous earth. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 1429-1436, doi: 10.1785/0120080149.
- Hadziioannou C, Gaebler P, Schreiber U, et al. 2012. Examining ambient noise using colocated measurements of rotational and translational motion. *Journal of Seismology*, 16(4): 787-796, doi: 10.1007/s10950-012-9288-5.
- Hu D S. 1989. *The Dynamics of the Elastic Wave* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Hu Y Z, Zhang J Q, Bai Y N, et al. 2014. Records of regional tectonic and climatic evolution since 3.45 Ma BP at Borehole TD1 of Tangshan in the middle part of Luanhe River fluvial fan. *Journal of Palaeogeography* (in Chinese), 16(2): 249-262, doi: 10.7605/gdxb.2014.02.023.
- Igel H, Schreiber U, Flaws A, et al. 2005. Rotational motions induced by the M 8.1 Tokachi-Oki earthquake, September 25, 2003. *Geophysical Research Letters*, 32(8): L08309, doi: 10.1029/2004GL022336.
- Igel H, Cochard A, Wassermann J, et al. 2007. Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions. *Geophysical Journal International*, 168(1): 182-196, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03146.x.
- Kurrle D, Igel H, Ferreira A M G, et al. 2010. Can we estimate local Love wave dispersion properties from colocated amplitude measurements of translations and rotations? *Geophysical Research Letters*, 37(4): L04307, doi: 10.1029/2009GL042215.
- Lacoss R T, Kelly E J, Toksöz M N. 1969. Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34(1): 21-38, doi: 10.1190/1.1439995.
- Lawrence J F, Prieto G A. 2011. Attenuation tomography of the western United States from ambient seismic noise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B6): B06302, doi: 10.1029/2010JB007836.
- Lee W H K, Igel H, Trifunac M D. 2009. Recent advances in rotational seismology. *Seismological Research Letters*, 80(3): 479-490, doi: 10.1785/gssrl.80.3.479.
- Lin C J, Huang H P, Pham N D, et al. 2011. Rotational motions for teleseismic surface waves. *Geophysical Research Letters*, 38

- (15); L15301, doi: 10.1029/2011GL047959.
- Liu P X, Li X J, Lu D W, et al. 2019. Discussion on the properties of strong ground motion on backfill sites. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(5): 1734-1743, doi: 10.6038/cjg2019M0475.
- Liu X Y, Li Z, Yuan S H. 2013. Investigation and stability analysis of Tangshan mining collapse. *Mining Technology* (in Chinese), 13(6): 68-71, doi: 10.3969/j.issn.1671-2900.2013.06.027.
- Luo Y H, Xia J H, Miller R D, et al. 2008. Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear radon transform. *Pure and Applied Geophysics*, 165(5): 903-922, doi: 10.1007/s00024-008-0338-4.
- McMechan G A, Yedlin M J. 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46(6): 869-874, doi: 10.1190/1.1441225.
- Park C B, Miller R D, Xia J H. 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998. Society of Exploration Geophysicists, 1377-1380, doi: 10.1190/1.1820161.
- Park C B, Miller R D, Xia J H. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3): 800-808, doi: 10.1190/1.1444590.
- Park C B, Miller R D, Xia J H, et al. 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1): 60-64, doi: 10.1190/1.2431832.
- Prieto G A, Denolle M, Lawrence J F, et al. 2011. On amplitude information carried by the ambient seismic field. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(8-9): 600-614, doi: 10.1016/j.crte.2011.03.006.
- Schmelzbach C, Donner S, Igel H, et al. 2018. Advances in 6C seismology: Applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology. *Geophysics*, 83(3): WC53-WC69, doi: 10.1190/geo2017-0492.1.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(4): 046610, doi: 10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Sollberger D, Igel H, Schmelzbach C, et al. 2020. Seismological processing of six degree-of-freedom ground-motion data. *Sensors*, 20(23): 6904, doi: 10.3390/s20236904.
- Sun L X, Wang Y, Yang J, et al. 2021. Progress in rotational seismology. *Earth Science* (in Chinese), 46(4): 1518-1536.
- Tanimoto T, Hadziioannou C, Igel H, et al. 2015. Estimate of Rayleigh-to-Love wave ratio in the secondary microseism by colocated ring laser and seismograph. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2650-2655, doi: 10.1002/2015GL063637.
- Taylor G, Hillers G, Vuorinen T A T. 2021. Using array-derived rotational motion to obtain local wave propagation properties from earthquakes induced by the 2018 geothermal stimulation in Finland. *Geophysical Research Letters*, 48(6): e2020GL090403, doi: 10.1029/2020GL090403.
- Wang Y, Sun L X, Li D Q, et al. 2021. Six-component observation for exploration seismology. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 60(1): 13-24, 33, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2021.01.002.
- Wassermann J, Wietek A, Hadziioannou C, et al. 2016. Toward a single-station approach for microzonation: Using vertical rotation rate to estimate love-wave dispersion curves and direction finding. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3): 1316-1330, doi: 10.1785/0120150250.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2001. Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies. *Physical Review Letters*, 87(13): 134301, doi: 10.1103/PhysRevLett.87.134301.
- Welch P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2): 70-73, doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.
- Yuan S H, Simonelli A, Lin C J, et al. 2020. Six degree-of-freedom broadband ground-motion observations with portable sensors: Validation, local earthquakes, and signal processing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(3): 953-969, doi: 10.1785/0120190277.
- Yuan S H, Gessele K, Gabriel A A, et al. 2021. Seismic source tracking with six degree-of-freedom ground motion observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3): e2020JB021112, doi: 10.1029/2020JB021112.

附中文参考文献

- 操玉文, 曾祥方, 李正斌等. 2022. 云南漾濞 $M_S 6.4$ 地震信号的旋转和平动分量面波记录分析研究. *地球物理学报*, 65(2): 663-672, doi: 10.6038/cjg2022P0551.
- 陈锋, 王赞, 李维等. 2023. 利用单点六分量地震提取面波频散谱的数值验证. *地球物理学报*, 66(10): 4269-4278, doi: 10.6038/cjg2022Q0380.
- 胡德绥. 1989. 弹性波动力学. 北京: 地质出版社.
- 胡云壮, 张金起, 白耀楠等. 2014. 3.45Ma 以来滦河冲积扇中部唐山 TD1 孔记录的区域构造和气候演化. *古地理学报*, 16(2): 249-262, doi: 10.7605/gdlib.2014.02.023.
- 刘培玄, 李小军, 卢大伟等. 2019. 回填料场地强震动性质讨论. *地球物理学报*, 62(5): 1734-1743, doi: 10.6038/cjg2019M0475.
- 刘晓燕, 李忠, 袁四化. 2013. 唐山市采空塌陷调查及稳定性分析. *采矿技术*, 13(6): 68-71, doi: 10.3969/j.issn.1671-2900.2013.06.027.
- 孙丽霞, 王赞, 杨军等. 2021. 旋转地震学的研究进展. *地球科学*, 46(4): 1518-1536.
- 王赞, 孙丽霞, 李栋青等. 2021. 勘探地震中的六分量观测. *石油物探*, 60(1): 13-24, 33, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2021.01.002.

(本文编辑 汪海英)