2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2284-2294
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

蔡存军,路交通,秦雷,等.2026.多特征自适应低频噪声压制技术在数字节点地震资料处理中的应用.地球物理学进展,41(5):2284-2294,doi:10.6038/pg2026JJ0282.

CAI CunJun, LU JiaoTong, QIN Lei, *et al*. 2026. Application of multi-feature adaptive low-frequency noise suppression technology in digital nodal seismic data processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2284-2294, doi:10.6038/pg2026JJ0282.

多特征自适应低频噪声压制技术在数字节点地震资料处理中的应用

Application of multi-feature adaptive low-frequency noise suppression technology in digital nodal seismic data processing

蔡存军,路交通,秦雷,瞿维迎

CAI CunJun, LU JiaoTong, QIN Lei, QU WeiYing

中石化石油工程地球物理有限公司国际业务发展中心,北京 100020

International Department, Sinopec Geophysical Corporation, Beijing 100020, *China*

摘 要 数字节点仪器采集的加速度域数据在积分转换至速度域时,尽管增强了低频信号,有利于深层成像,但同时也非线性地放大了面波、外源干扰及低频背景噪声等不稳定分量,导致低频段信噪比下降、速度建模受限、深层反射能量被进一步掩盖.因此,如何在保留低频有效能量的同时压制积分放大的低频噪声,是当前数字节点数据处理面临的关键技术问题.对此,本文提出了多特征自适应低频噪声压制处理技术,该技术针对不同类型噪声的成因与特征,分别采用基于频散曲线的面波压制技术,通过提取和分析面波的频散特征实现面波精准分离与压制;引入基于 MAD-Trimmed 矢量中值滤波的外源干扰压制技术;并结合动态统计的阈值优化技术压制低频背景干扰.处理结果表明,本文方法在保护低频有效信号的同时,实现了对复杂低频噪声的有效压制.与传统去噪方法相比,该技术在噪声压制与信号保真之间实现了更优的平衡,速度域数据的信噪比可提升至原来的约 1.3 倍,为后续地震数据处理提供更加可靠的高质量输入数据.

关键词 数字节点仪器;积分速度域数据;速度域数据;MAD-Trimmed 矢量中值滤波;面波频散曲线

Abstract Acceleration-domain seismic data acquired by digital nodal instruments, when converted to the velocity domain through time integration, can effectively enhance low-frequency signals and thereby benefit deep imaging. However, this process also nonlinearly amplifies unstable components such as surface waves, external interferences, and low-frequency random noise, leading to a reduction in low-frequency Signal-to-Noise Ratio (SNR), limitations in velocity model building, and further masking of deep reflection energy. Therefore, how to suppress the low-frequency noise amplified during integration while preserving effective low-frequency signal energy has become a key technical challenge in the processing of digital nodal seismic data. To address this issue, this study proposes a multi-feature adaptive low-frequency noise suppression technique. According to the generation mechanisms and characteristics of different types of noise, a dispersion-curve-based surface-wave suppression method is employed to accurately separate and attenuate surface-wave interference by extracting and analyzing surface-wave dispersion characteristics. In addition, an external interference suppression method based on MAD-Trimmed vector median filtering is introduced, and a dynamic-statistics-based threshold optimization technique is incorporated to suppress low-frequency background noise. The processing results demonstrate that the proposed method can effectively suppress complex low-frequency noise while preserving the integrity of effective low-frequency signals. Compared with conventional denoising approaches, the proposed technique achieves a better balance between noise attenuation and signal fidelity, improving the signal-to-noise ratio of velocity-domain data by approximately 1.3 times, and providing more reliable, high-quality input data for subsequent seismic data processing.

Keywords Digital node instruments; Integrated velocity-domain data; Velocity-domain data; MAD-Trimmed vector median filtering; Surface wave dispersion curve

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0282

CSTR:32085.14.pg2026JJ0282

收稿日期 2025-11-18; **修回日期** 2026-03-03. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 中石化石油工程地球物理有限公司项目(SGC-2024-14)资助.

第一作者简介 蔡存军,男,1985 年生,高级工程师,现主要从事地震资料处理及方法研究工作.E-mail:744237979@qq.com

0 引 言

随着"两宽一高"地震采集技术的广泛应用,低频信号的重要性变得愈发明显. 尤其是在全波形反演(FWI)成像中的成功应用,更是凸显了其关键作用. 利用 MEMS 检波器直接获取低频信号或者通过检波器反褶积恢复速度域低频信号被认为是较为可靠的方法(谷玉田等,2021). 前者的低频优势只有在积分为速度域数据时才能体现,而后者尽管可以恢复低频信号,但同时也会影响有效频段的信噪比,难以应用于实际生产(张岩等,2023). 因此,目前获取低频信号最为可靠的方法是首先利用 MEMS 检波器接收加速度域数据,然后将其积分为速度域数据并切除低频噪声. 随着节点采集技术和 MEMS 检波器技术的发展,数字节点仪器使低成本获取高品质低频地震数据的大规模生产应用成为可能.

近年来多家节点仪器生产厂商推出了数字节点仪器,如 SERCEL 节点仪器生产商推出的 WiNG^{NT}(配置了 QuietSeis MEMS 传感器), INOVA 的 Quantum®(配置了 Accuseis® MEMS 传感器)等. 这类数字节点仪器已在实际生产项目中逐步得到推广应用,尤其在以超深层复杂构造成像为目标的地震勘探中展现出良好的应用前景. 通过将其采集的加速度域数据转换为速度域数据进行处理和解释,可有效提升成像精度,提高勘探质量.

积分转换是数字节点仪器采集数据预处理的关键步骤,通过将加速度域数据转换至速度域,在满足物理合理性的同时强化了低频有效信号,为后续处理奠定了基础(魏继东,2024). 然而该过程会同步放大低频噪声(包括面波、外源干扰及低频背景噪声等),导致数据信噪比降低,严重影响地震数据质量,进而影响资料处理效果. 因此,有必要研究针对放大噪声的压制技术,以提升数据质量. 本文首先分析了数据中噪声的主要特征,并针对面波、外源干扰及低频背景噪声进行了深入分析,探讨相应的压制技术,旨在最大程度保护有效信号的同时,降低相关噪声对数据质量的影响.

1 主要噪声特征分析

加速度域数据积分为速度域数据后,地震信号特征表现为:低频信息更加丰富,主频降低,频带变窄(文雪康等,2020). 尽管这种方法会影响高频段的分辨率,但鉴于其提高低频响应的能力,仍然是获取低频信号的最佳方法. 然而,加速度域地震数据积分为速度域后,加强低频段有效信号的同时也放大了低频段的噪声(蔡存军等,2025). 这种低频段信号与噪声的整体放大,必然会对后续的地震数据处理造成较大影响,特别是去噪处理方面.

图 1a 为数字节点接收的加速度域单炮记录,经积分转换后得到的速度域单炮记录;图 1b 为相同位置内置 5 Hz 检波器的模拟节点接收的速度域单炮记录. 对比可见,图 1a 中面波及低频外源干扰的能

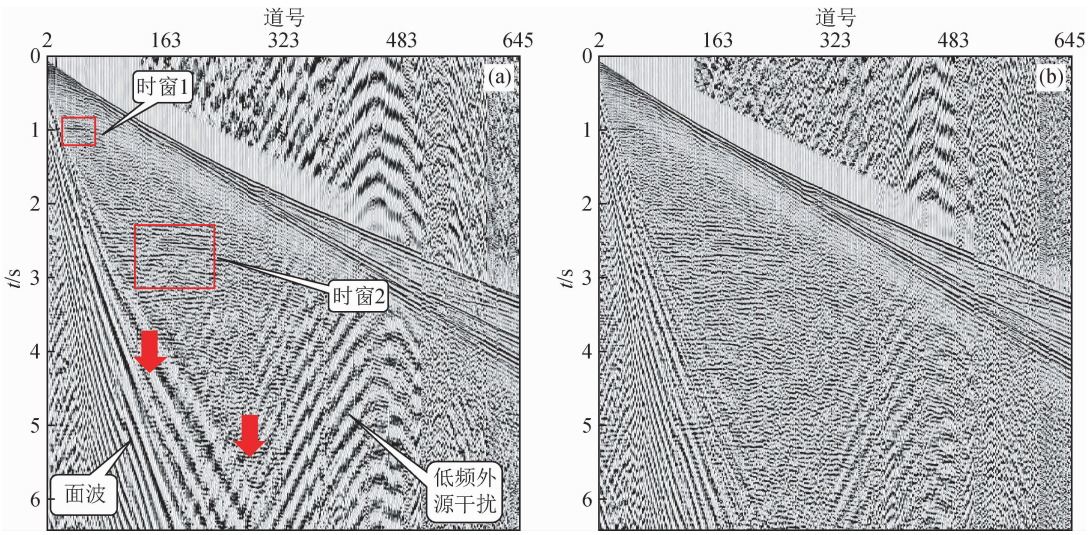


图 1 单炮记录

(a)积分速度域;(b)速度域.

Fig. 1 Single shot record

(a) Integral velocity domain; (b) Speed domain.

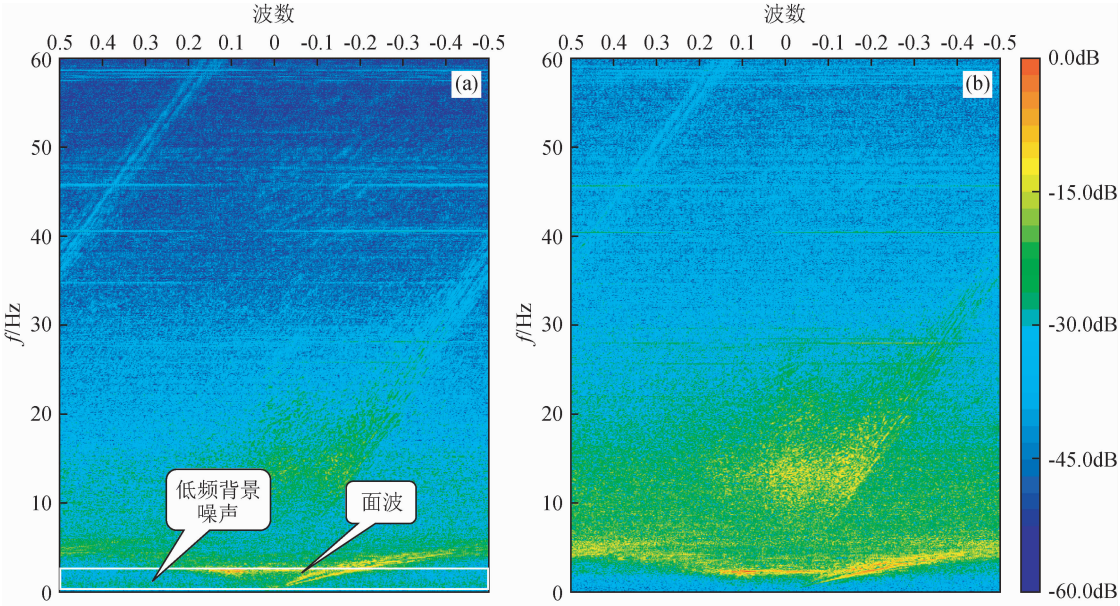


图 2 单炮 *FK* 谱

(a)积分速度域;(b)速度域.

Fig. 2 Single shot *FK* spectrum

(a) Integral velocity domain; (b) Speed domain.

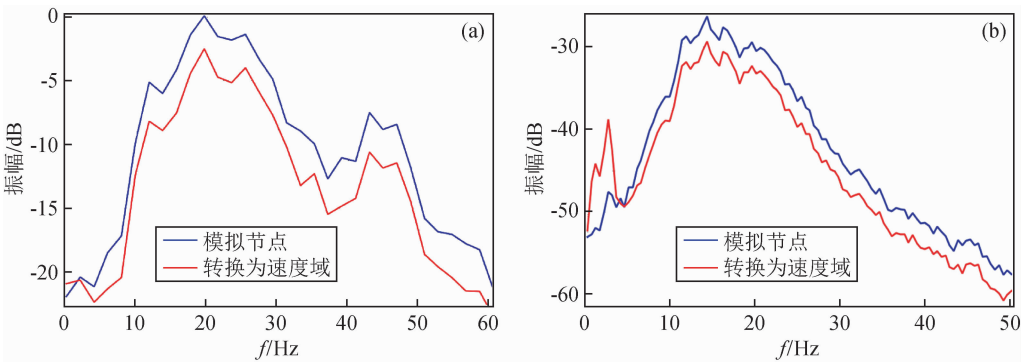


图 3 不同区域的频谱对比

(a)时窗 1;(b)时窗 2.

Fig. 3 Comparison of spectra in different regions

(a) Time window 1; (b) Window 2.

量明显强于图 1b,严重降低了地震资料的信噪比. 与图 1b 所示的速度域单炮相比,图 1a 中红色箭头所标记的有效信号被淹没于能量较强的噪声中. 图 2 显示了单炮对应的 FK 谱,对比可知:前者在 0 ~ 2 Hz 频段内的低频背景噪声及面波能量明显增强,而中高频段的背景噪声在一定程度上被削弱. 为表述简洁,文中将数字节点接收的加速度域数据积分转换后的速度域数据称为“积分速度域数据”,将模拟节点接收的速度域数据称为“速度域数据”.

图 3 显示了时窗 1、时窗 2 两个区域的频谱曲线. 其中,时窗 1 对应浅层有效反射信号,时窗 2 对应中深层有效反射信号. 对于浅层有效反射信号而言,积分速度域数据的振幅强度整体上低于速度域数据. 对于中深层有效反射信号,在 0 ~ 4 Hz 频段内,积分速度域数据的振幅强度高于速度域数据;而在 4 Hz 以上频段,则低于速度域数据. 此外,积分速度域数据的有效频带略窄:速度域数据的有效频带为 5 ~ 33 Hz,而积分速度域数据的频带为 6 ~ 30 Hz.

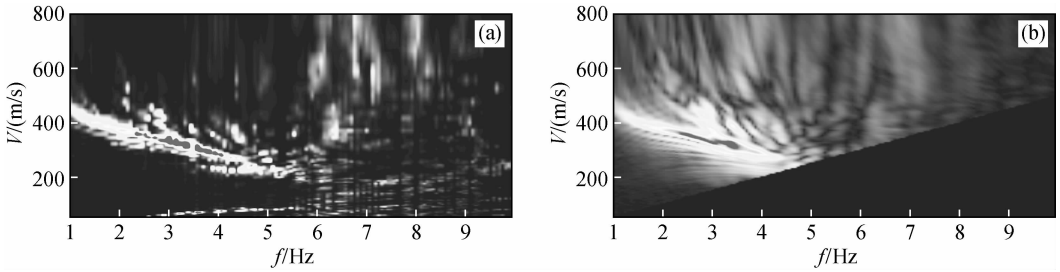


图 4 不同方法的面波频散能量谱

(a)高分辨率线性 Radon 变换法;(b)*f-k* 法.

Fig. 4 Energy spectra of surface wave dispersion using different methods

(a) High resolution linear Radon transform method; (b) *f-k* method.

2 技术原理

2.1 基于频散曲线的面波压制技术

在陆上采集的地震数据中,面波作为典型的规则干扰波,其低频、低速、强能量及频散性等特征会显著降低地震记录的信噪比. 尤其在数字节点接收的积分速度域数据中,面波的低频能量明显增强,中深层有效反射波被能量占据优势频段的面波所掩盖,导致地震资料信噪比的下降,损害资料品质,进而对后续的地表一致性反褶积处理、速度分析以及偏移成像等关键处理环节产生不利影响.

面波噪声压制是地震资料处理中的关键问题之一. 针对该问题,国内外学者开展了大量研究,提出了多种处理方法. 其中,基于频散曲线的面波预测与压制算法(孙郧松等,2023)是近年来具有突破性进展的一种方法,其理论根基源于面波频散曲线与近地表速度结构的本征关联性. 该技术包含四个递进式环节:(1)基于高分辨率频散能量谱解析,实现面波多模态频散特征的定量表征;(2)通过多阶频散曲线智能拾取算法,建立频率与相速度的数学映射关系;(3)基于波动方程正演或频率-相速度关系,构建精确的面波噪声模型;(4)基于非线性自适应匹配滤波技术,从原始地震记录中减去噪声模型,最终实现保幅的面波噪声压制.

作为该技术的核心环节,频散能量谱的生成精度直接决定了后续处理流程的有效性. 高分辨率线性 Radon 变换法因其对噪声干扰的强鲁棒性、频散模态的高分辨能力以及工程实现的低复杂度,具有显著优势. 其具体实施流程可归纳为以下标准化步骤:首先基于面波走时特征截取数据时窗,构建面波优势能量数据体;其次对时窗数据进行傅里叶变换,获取频率-空间域波场特征;随后采用高分辨率 Radon 变换算法,沿预设速度参数进行多道倾斜叠加处理;最终通过坐标变换将 Radon 域结果映射至频率-速度域,形成具有聚焦特性的面波频散能量谱(于涵等,2022). 如图 4 所示的对比实验结果表明,相较于传统 *f-k* 变换法,高分辨率 Radon 变换生成的频散能量谱在能量收敛性及频散曲线连续性方面具有更明显的优势.

假设最小偏移距为 h_0,道距为 dx,频率为 f,则第 n 道面波信号的频谱可以表示为:

$$S_n(f) = A(f)\,\mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{i}2\pi f[h_0+(n-1)\mathrm{d}x]}{v(f)}}, \tag{1}$$

式中:$v(f)$ 表示频率 f 的相速度.

对式(1)做傅里叶逆变换即可得到第 n 道的面波记录. 为了消除面波模型与实际数据在振幅与相位方面的差异,采用 L2 范数自适应匹配相减的方法(齐鹏,2022),从原始数据中减去面波模型,从而获取压制面波后的地震记录.

2.2 基于 MAD-Trimmed 矢量中值滤波的外源干扰压制技术

随着现代工业化程度的提高,城镇区域的地震数据采集难以避免受到外界各类机械震动源(如车辆、重锤、打桩机等)的干扰. 这类干扰在单炮记录上通常具有相干性,频带范围较宽,能量相对较强. 在积分速度域数据中,该类噪声的能量更强,严重降低了地震资料的信噪比.

外界机械震动源在地震记录中可等效视为与主震源同步激发的各类副震源,其产生的外源干扰噪声在记录上与主震源信号发生叠加,呈现出类似于多震源混叠采集中的能量叠加特征. 因此,该类外源干扰噪声可被视为一种特殊形式的混叠噪声,具有影响范围相对有限、速度相对固定的特点.

基于上述认识,可借鉴成熟的混叠噪声压制技术对外源干扰噪声进行压制.随着高效混叠采集技术的发展,关于混叠数据分离的研究不断深入,相关方法可归纳为三类:(1)基于主炮与混叠炮在不同数据域差异性的分离或去噪方法;(2)将数据分离问题转化为引入正则化约束的欠定矩阵求解问题;(3)通过迭代预测多震源数据中各震源响应,并逐步从原始记录中分离以获得单炮记录的方法.

围绕不同的技术路线,学者们提出了多种具体实现方法.其中,α-trimmed 矢量中值滤波方法(王文闯等,2014)具有计算效率高、稳定性好、适应性强等优点,具备较好的工程应用价值.鉴于其在混叠噪声压制中的优势,本文尝试将该方法引入外源干扰噪声的压制研究.

α-trimmed 矢量中值滤波法中,α 是关键参数,用于减小异常矢量对去噪效果的影响,其取值对去噪效果影响较大.α 值越小,去噪效果越强,但可能损失主炮能量;α 值越大,去噪效果越弱,主炮能量损失越小.因此,通常需要根据试验选定合适的 α 值.实际地震资料受采集因素、近地表条件及深层地质条件等影响,振幅强弱变化较大,单一的 α 取值难以适应复杂的数据特征.

基于 α-trimmed 矢量中值滤波法,引入中位数绝对偏差(MAD)识别异常值的策略,提出 MAD-Trimmed 矢量中值滤波算法用于压制外源干扰.具体步骤如下:

(1) 假设地震数据为 $X(i,j)$,$i=1,2,\cdots,M$,$j=1,2,\cdots,N$.其中 i 表示时间方向的采样点序号,j 表示空间方向的道序号.

(2) 对于每个样点,选取以其为中心的窗口,窗口大小为 $n\times n$(n 为奇数).窗口包含多个矢量(有限时窗长度内的一段地震数据).记窗口中心位置处的样点振幅值为 S_c.

(3) 对窗口中的矢量数据按振幅值排序,得到有序数据集 $Xa=\{x_{(k)}\}_{k=1}^{n*n}$,其中 k 表示排序后的序号.则窗口矢量中值的中心样点振幅值可表示为:

$$S_m = x\left(\frac{n*n+1}{2}\right). \tag{2}$$

(4) 计算窗口中每个矢量数据与 S_m 的绝对偏差,并计算所有绝对偏差的中位数 SMAD,即:

$$\mathrm{SMAD}=\mathrm{Median}(|x_{(k)}-S_m|). \tag{3}$$

(5) 按公式(4)计算异常值检测门槛值 th.

$$th=S_m+3*\mathrm{SMAD}, \tag{4}$$

从数据集 $\{x_{(k)}\}_{k=1}^{n*n}$ 中剔除大于 th 的异常矢量,若剔除后剩余的矢量个数为 m,且 $m\leqslant n*n$.

(6) 则可按公式(5)计算 MAD-trimmed 的均值为:

$$S_\alpha=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}x(k), \tag{5}$$

于是,基于 MAD-trimmed 的矢量中值滤波可表示为:

$$S_c=\begin{cases}S_c & S_c\leqslant S_\alpha\\ S_m & S_c>S_\alpha\end{cases}. \tag{6}$$

图 5 展示了该算法的伪代码.窗口大小 n 为关键参数,其值越大,平滑效果越强,但易损失细节,建议取 5 或 7.

```
Input: X (M×N seismic data), window size n, threshold factor c (default c=3)
Output: X_filtered
For each sample X(i,j):
  # 1. Extract local n×n window
  W ← window centered at X(i,j)
  # 2. Sort window samples by amplitude
  Xa ← sort(abs(W))
  # 3. Compute amplitude median
  Sm ← Xa[(n*n + 1)/2]
  # 4. Compute median absolute deviation (MAD)
  SMAD ← median(|Xa - Sm|)
  # 5. Compute threshold
  th ← Sm + c * SMAD
  # 6. Trim outliers (> th)
  Xa_trim ← {x ∈ Xa | x ≤ th}
  m ← length(Xa_trim)
  # 7. Compute trimmed mean
  Sα ← mean(Xa_trim)
  # 8. Replace center sample if it is an outlier
  If X(i,j) > Sα:
    X_filtered(i,j) ← Sα
  Else
    X_filtered(i,j) ← X(i,j)
End For
```

图 5 MAD-Trimmed 矢量中值滤波算法的伪代码

Fig. 5 Pseudo code of MAD-Trimed vector median filtering algorithm

2.3 基于动态统计的阈值优化技术

将加速度域地震数据转换至速度域时,会对低频成分产生放大效应.与内置 5 Hz 高灵敏度检波器采集的速度域数据相比,积分速度域数据在低频段振幅相对更大,而在中高频段,两类数据的振幅差异不显著.为定量表征两类速度域数据在不同频段的能量分布差异,本文采用振幅谱比率法,系统对比了二者在 0~250 Hz 频带内的频谱响应特征,重点分析低频能量提升的量化特征.具体计算方法如下:

(1)积分速度域单炮数据以 $d_j(t)$ 表示,速度域

单炮数据以 $s_j(t)$ 表示,其中 j 为道序号;

(2)对每一道数据 $d_j(t)$ 和 $s_j(t)$ 进行傅里叶变换,并归一化频谱,得到 $D_j(f)$ 和 $S_j(f)$.

(3)按照公式(7)和(8)计算叠加振幅谱:

$$A_d(f) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} D_j(f) , \tag{7}$$

$$A_s(f) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} S_j(f) . \tag{8}$$

(4)按照公式(9)计算各频率 f 处的振幅谱比率,并取对数:

$$R(f) = \lg\left[\frac{A_d(f)}{A_s(f)}\right] . \tag{9}$$

图 6 显示了多个积分速度域炮集数据与速度域炮集数据在不同频率下的振幅谱比率. 由图可见,在 0~2 Hz 频段,积分速度域数据的振幅谱比率大于 1,表明其能量强于速度域数据;而在 2~200 Hz 频段,比率接近 1,反映两者能量差异不大.

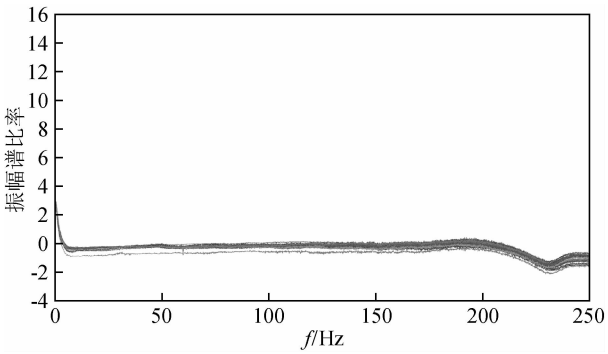


图 6 积分速度域炮集数据与速度域炮集数据在不同频率处振幅谱比率(全频带)

Fig. 6 Amplitude spectrum ratio (full frequency band) of integrated velocity domain shot data and velocity domain shot data at different frequencies

需特别关注 0.1~2 Hz 频段,积分速度域数据的振幅明显高于速度域数据. 这主要是因为积分增强了低频信号,既包括有效信号也包括噪声信号,其中低频噪声增强的幅度更大(图 7). 尽管低截滤波可以去除部分低频噪声,但难以避免对有效信号或目标低频信号造成影响.

图 8 展示了某地震道的时频特征. 由图可见,在 0~2 Hz 频段存在明显的条带状强能量分布,该能量并非有效地震信号,而是低频背景噪声的主要组成成分. 因此,压制该类噪声的关键在于在时频域针对性削弱其强能量条带. 具体步骤如下:

(1)假设输入的地震数据为 X,利用常规滤波方法将其分解为低频部分 X_{LF} 和高频部分 X_{HF}.

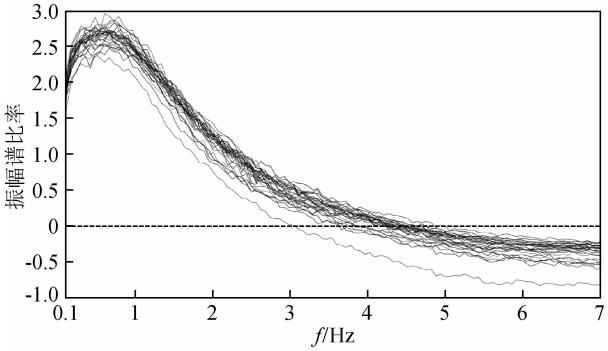


图 7 积分速度域炮集数据与速度域炮集数据在不同频率处振幅谱比率(0.1~7 Hz)

Fig. 7 Amplitude spectrum ratio (0.1~7 Hz) of integrated velocity domain shot data and velocity domain shot data at different frequencies

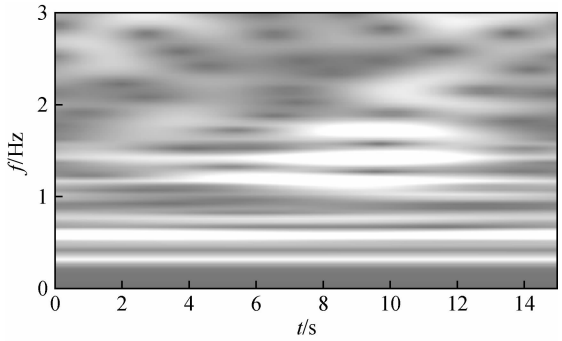


图 8 某地震道时频分析结果

Fig. 8 Time frequency analysis results of a certain seismic channel

(2)对低频部分 X_{LF} 采用短时傅里叶变换(余锐和赵国庆,2009)(STFT)进行时频域展开,得到其时频谱表示:

$$S(p,q) = \mathrm{STFT}(X_{LF}) , \tag{10}$$

其中 p,q 分别表示频率索引和时间窗索引.

(3)将所有时频点按幅值大小排序,取前 $\rho\%$ 处的振幅值作为阈值 T,并将所有振幅大于 T 的时频点标记为异常点:

$$M(p,q) = \begin{cases} 1, & S(p,q) > \mathrm{sort}(S(:),'\mathrm{descend}')[\lceil \rho . N \rceil] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} , \tag{11}$$

式中 N 为总的时频点数.

(4)假设以 $(\Delta p, \Delta q)$ 表示邻域窗口大小,对每个异常点($M(p,q)=1$),将其幅值替换为其邻域内正常点幅值的中位数 R,即:

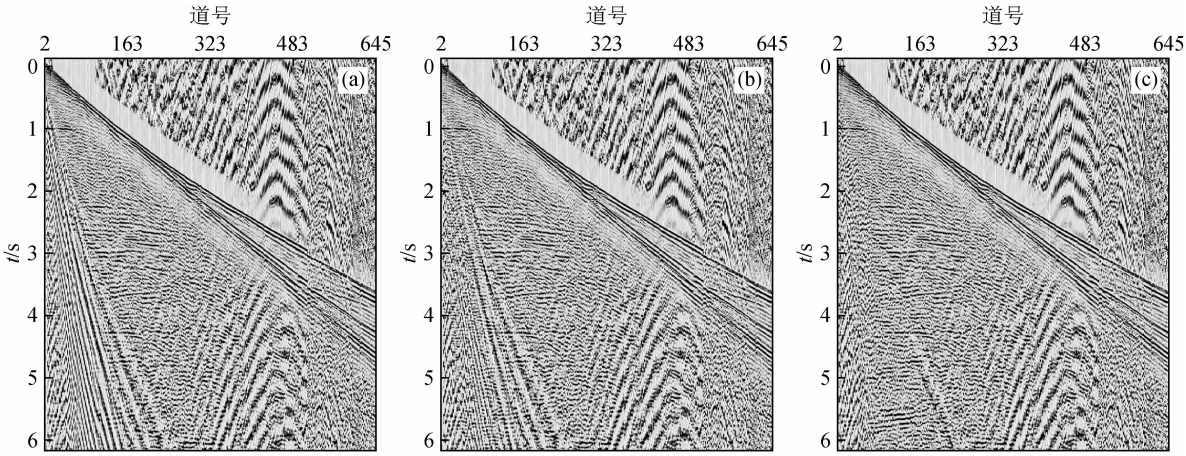


图 9 不同压制面波方法对比

(a)原始单炮;(b)应用 *f-k* 法构建面波模型的去噪结果;(c)应用 Radon 变换法构建面波模型的去噪结果.

Fig. 9 Comparison of different surface wave suppression methods

(a) Original single shot; (b) Apply the *f-k* method to construct the denoising results of the surface wave model; (c) Application of Radon transform method to construct denoising results of surface wave model.

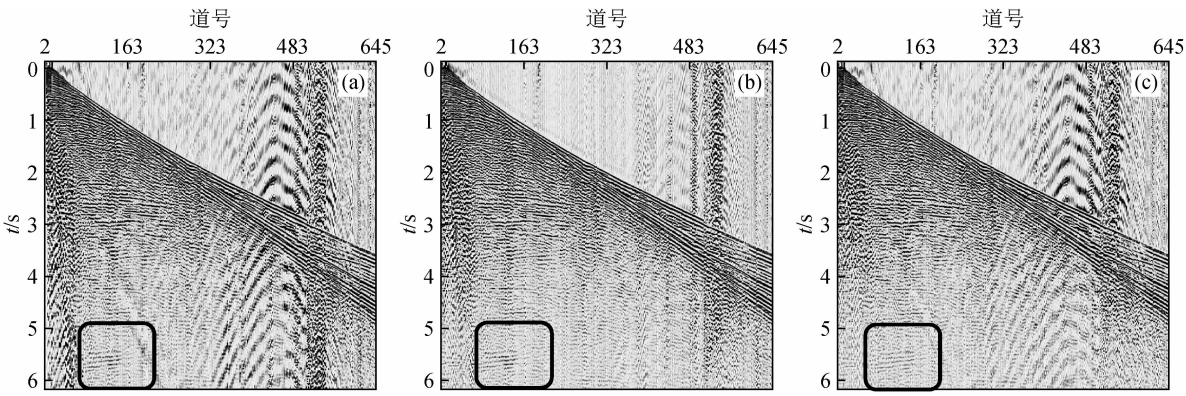


图 10 不同方法压制外源干扰效果

(a)原始单炮;(b)本文方法;(c)传统异常振幅衰减方法.

Fig. 10 Effectiveness of different methods in suppressing external interference

(a) Original single shot; (b) The method described in this article; (c) Traditional abnormal amplitude attenuation method.

$$Y(p,q) = \max(0,R). \tag{12}$$

(5)对处理后的时频谱 $Y(p,q)$ 进行短时傅里叶逆变换(蔡姗等,2025)(ISTFT),重建去噪后的低频信号:

$$X_{\mathrm{LF}} = \mathrm{ISTFT}(Y(p,q)). \tag{13}$$

(6)则最终的去噪地震数据由重构的低频部分与未做去噪处理的高频部分叠加而成:

$$X = X_{\mathrm{LF}} + X_{\mathrm{HF}}. \tag{14}$$

上述算法中,振幅阈值百分比与邻域窗口大小是影响去噪效果的关键参数. 实际资料测试结果显示,阈值百分比越小,去噪效果越明显,但同时会对有效信号造成一定影响,因此通常取值为 80%~90%. 邻域窗口过小会导致异常振幅压制不充分,而窗口过大则会对信号产生明显的平滑现象,需根据资料的时频特征合理选择. 考虑到低频背景噪声在时频域中通常呈条带状分布,时间方向窗口长度可适当取大,因此选用矩形窗口. 本文试验中所采用的窗口大小为 81×9.

3 应用效果

全波形反演(FWI)技术(Wang *et al.*,2019;Dy *et al.*,2023;Zhang *et al.*,2023; Fei *et al.*,2022;Liu *et*

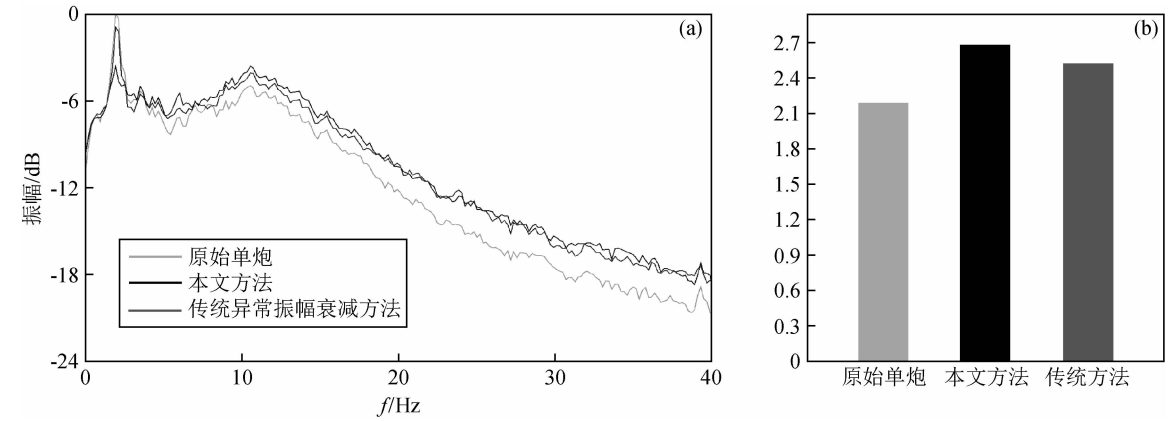


图 11 不同方法压制外源干扰效果分析图

(a)频谱;(b)信噪比.

Fig. 11 Analysis of the effect of suppressing external interference by different methods

(a) Spectrum; (b) Signal to noise ratio.

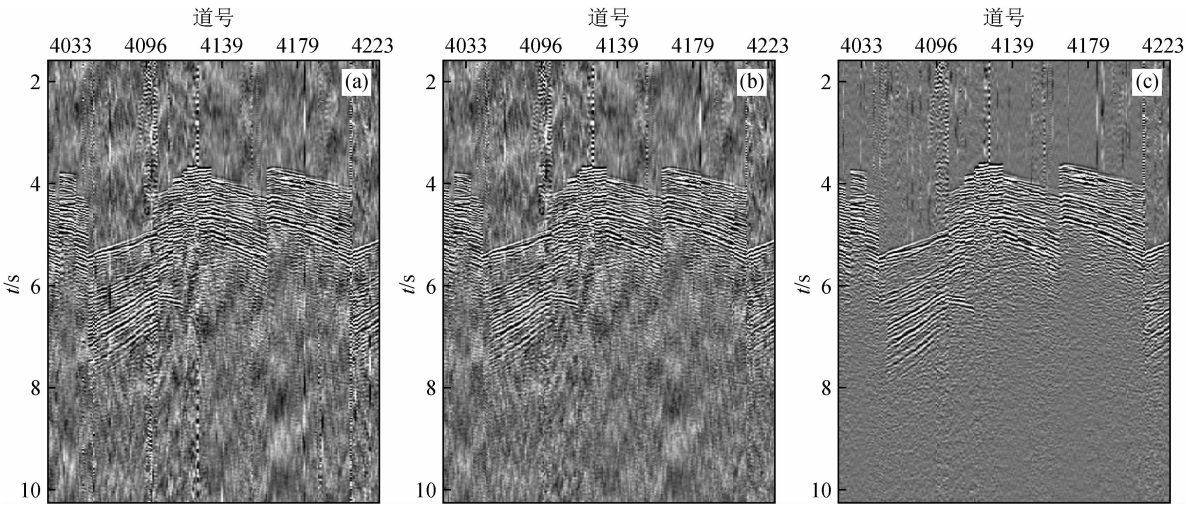


图 12 原始单炮及利用不同方法压制低频背景干扰后的单炮

(a)原始单炮;(b)传统异常振幅压制方法;(c)本文方法.

Fig. 12 Original single shot and single shot after suppressing low-frequency background interference using different methods

(a) Original single shot; (b) Traditional abnormal amplitude suppression method; (c) The method described in this article.

al.,2023)已成为提升复杂盐体成像质量的关键技术.其应用效果受多项因素影响,其中尤为关键的一点是地震数据中需含有信噪比较高的低频分量(Djebbi *et al*.,2022;Gu *et al*.,2023).利用低频信息构建较为准确的初始速度模型,有助于减小实际数据与模拟数据之间的相位差,从而有效缓解周期跳跃问题,并提高反演过程的稳定性和收敛性.

海外某项目的目标是提升中生代层段(侏罗纪和白垩纪)的成像精度,重点落实深层的构造-地质模型与断裂系统,特别是加强盐丘复杂构造的照明.为此,项目采用数字节点仪器(配备 MEMS 检波器)进行地震数据采集,以加强 5 Hz 以下低频信号能量,为后续全波形反演提供高品质的基础数据.

为充分发挥数字节点采集数据的低频优势,积分转换是必不可少的预处理环节.然而,这一过程也带来了诸如面波能量增强、外源干扰噪声及低频背景噪声增强的问题.

基于频散曲线的面波压制技术,关键在于构建与原始数据中面波特征高度匹配的噪声模型.本文分别采用 f-k 法和高分辨率线性 Radon 变换法构建

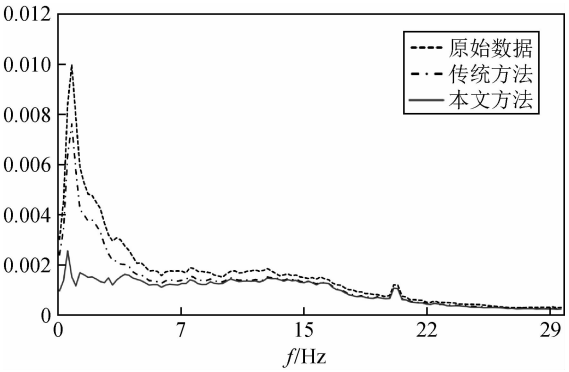


图 13 原始单炮及利用不同方法压制低频背景干扰后的单炮振幅谱曲线

Fig. 13 The amplitude spectrum curves of the original single shot and the single shot after suppressing low-frequency background interference using different methods

面波模型,并基于 L2 范数进行自适应匹配相减,从原始数据中减去面波模型,从而实现面波压制. 由图 9 的对比结果可以看出,相较于 *f-k* 法,Radon 变换法能够更准确地表征实际面波特征,在有效压制低频强能量面波噪声的同时,更好地保真低频有效信号.

图 10 对比了本文方法与传统"多道识别,单道压制"传统方法在外源干扰压制方面的效果. 本文方法不仅能有效压制噪声,还能更好地保护有效信号. 以黑色框标记区域为例,传统方法明显削弱了有效信号的能量,而本文方法在有效压制外源干扰及其他异常噪声的同时,基本未对该区域的有效信号产生影响. 频谱及信噪比分析结果(图 11)表明,本文方法能够有效压制低频外源干扰,其信噪比优于传统异常振幅衰减方法. 综合来看,本文方法在外源干扰压制方面显著优于传统方法.

传统低截滤波方法在压制低频背景噪声时存在固有矛盾. 一方面,当截止频率设置较高(如 > 4 Hz)时,虽能有效压制背景噪声,但滤波器陡峭的截止特性会对有效信号的低频成分(2 ~ 4 Hz)造成明显损伤;另一方面,当截止频率设置较低(如 < 2 Hz)时,虽可较好地保留低频有效信号,但对 3 ~ 5 Hz 频段内的背景噪声压制能力有限.

在实际处理中,通常采用分频异常振幅衰减方法来压制强能量噪声,但该方法有效的前提是噪声

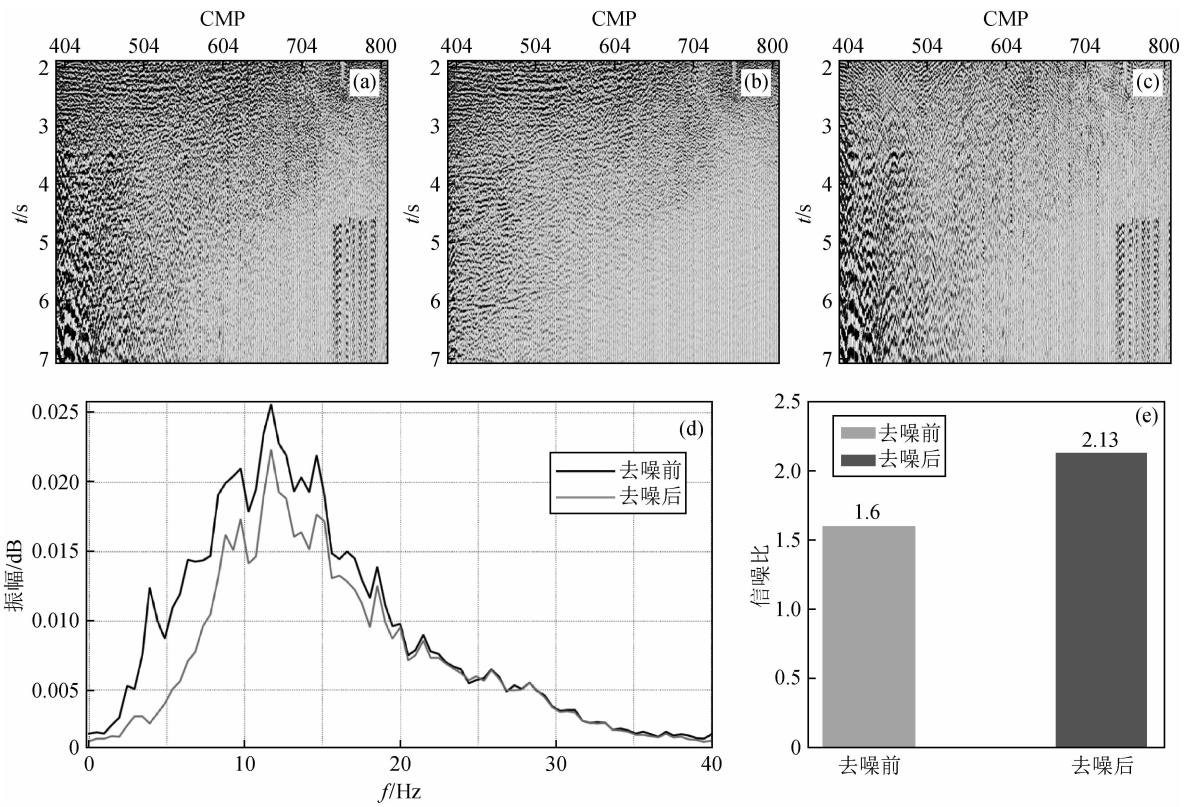


图 14 应用本文关键处理技术前(a)、后(b)、噪声(c)、频谱(d)及信噪比(e)对比

Fig. 14 Comparison of key processing techniques before (a), after (b), noise (c), spectrum (d), and signal-to-noise ratio (e) in this article

在局部范围内具有显著的振幅异常特征.然而,低频背景噪声的能量在各道之间分布相对均匀,振幅差异不明显,导致传统分频异常振幅衰减方法难以发挥作用.

本文方法能够在压制低频背景噪声的同时,较好地保留低频有效信号.图 12 对比了两种方法的处理效果,结果表明传统方法效果有限,而本文方法去噪效果更优.图 13 为对应单炮的振幅谱分析结果,频谱特征进一步印证了本文方法在低频段背景噪声压制方面的优势.

需要指出的是,本文方法主要针对数字节点加速度数据经积分转换后速度域数据中面波强、低频噪声突出的特点而设计,在实际使用中仍具有一定的适用条件.

基于频散曲线的面波压制方法依赖于清晰的频散特征,当近地表结构复杂、频散模态混叠严重时,其效果可能受到一定影响;MAD-Trimmed 矢量中值滤波方法对外源干扰具有较好的鲁棒性,在外源干扰具有一定的空间局部性且有效信号连续性较好的情况下效果更为理想;但若窗口参数选择不当,可能影响局部有效反射信号.基于动态统计的时频阈值方法针对时频域中呈现条带状分布的低频噪声具有针对性的压制能力,但当低频有效信号与噪声在时频域高度重叠时,阈值参数设置不当可能对有效信号造成影响,严重时甚至导致方法失效.在计算效率方面,本文方法参数数量有限,实现过程简单,整体计算效率能够满足地震资料生产处理需求.

通过应用本文所述的多特征自适应低频噪声压制技术,加速域数据转换至速度域数据后增强的低频面波、外源干扰以及低频背景噪声得到了有效压制,整体信噪比提升约 1.3 倍,同相轴连续性明显增强(图 14).

4 结论与认识

(1)通过积分法将数字节点接收的加速度域数据转换至速度域时,在有效地提升低频段有效信号的同时,也放大了低频段的噪声,包括面波、外源干扰以及低频背景噪声等.

(2)针对积分速度域数据中不同类型的噪声,采用相应方法进行有效压制.对于增强的面波,通过高精度 Radon 变换构建高精度频散谱,反演建立面波模型,并结合自适应匹配算法精准剥离噪声;对于增强的外源干扰,采用时窗内振幅样点的数学统计分析结合 MAD-Trimmed 均值滤波,有效识别并剔除;对于低频背景噪声,采用动态统计阈值分析方法进行压制.

(3)基于动态统计的阈值优化方法在低频背景噪声压制方面已取得较好效果,但实际应用中,阈值参数 ρ% 对地震数据特征依赖性较强,仍需进一步研究基于数据驱动的自适应阈值优化方法.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Cai C J, Lu J T, Qu W Y, *et al*. 2025. Analysis of the impact of integration conversion on data acquired by digital nodes. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 22(3): 459-468.

Cai S, Wang L, Guo S, *et al*. 2025. Inverse short-time Fourier transform-based Hmong language speech synthesis method. Journal of Applied Acoustics (in Chinese), 44(2): 339-349.

Djebbi R, Bekara M, Ramos-Martinez J, *et al*. 2022. Low-frequency data reconstruction for full-waveform inversion. //Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. SEG, 3379-3383, doi: 10.1190/image2022-3751101.1.

Dy T, Wang M S, Mothi S, *et al*. 2023. FWI imaging of complex subsalt Mesozoic targets from land to shallow waters. //Third International Meeting for Applied Geoscience & Energy. SEG, 610-614, doi: 10.1190/image2023-3910876.1.

Fei W H, Chen J R, Yang M, *et al*. 2022. Improving subsalt images using FWI and FWI imaging: A streamer case study at Big Foot. //Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. Houston, Texas, USA, 902-906, doi: 10.1190/image2022-3746207.1.

Gu Y T, Wei J D, Zhang X, *et al*. 2021. Sensing and recovery of low-frequency signals in onshore surveys. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 60(4): 539-545, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2021.04.002.

Gu Z Y, Chai X T, Yang T H. 2023. Deep-learning-based low-frequency reconstruction in full-waveform inversion. Remote Sensing, 15(5): 1387, doi: 10.3390/rs15051387.

Liu H, Rollins F, Pratt K, *et al*. 2023. Solving Mad Dog subsalt imaging in two decades: From WATS to OBN to elastic FWI. The Leading Edge, 42(6): 398-405, doi: 10.1190/tle42060398.1.

Qi P. 2022. Dispersive curve-based surface wave simulation suppression technology. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(3): 1132-1137, doi: 10.6038/pg2022FF0249.

Sun Y S, Li P M, Guo Z B, *et al*. 2023. A data-driven surface wave prediction and adaptive attenuation method. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 58(3): 626-631, 640.

Wang P, Zhang Z G, Mei J W, *et al*. 2019. Full-waveform inversion for salt: A coming of age. The Leading Edge, 38(3): 204-213, doi: 10.1190/tle38030204.1.

Wang W C, Li H Q, Zhao B, *et al*. 2014. Suppression of crosstalk from simultaneous sources with alpha-trimmed vector median filtering. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 49(6): 1061-1067.

Wei J D. 2024. Discussions on three typical seismic sensors and their data. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 63(1): 138-148, doi: 10.12431/issn.1000-1441.2024.63.01.012.

Wen X K, Yuan Y, Tang J M, *et al*. 2020. Analysis and application of velocity and acceleration geophone in ultra deep seismic exploration: a case study of Chishui area in south Sichuan basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(4): 1489-1496, doi: 10.6038/pg2020DD0343.

Yu H, Liu C, Wang D, *et al*. 2022. Energy spectrum calculation of

surface wave dispersion. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 52(2): 602-612, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210108.

Yu R, Zhao G Q. 2009. Parameter measurement of radar pulse signals based on STFT-digital channelization. Electronic Design Engineering (in Chinese), 17(4): 32-33, 36.

Zhang Y, Zhou Y F, Song L W, *et al*. 2023. Low frequency continuation of seismic data based on physically constrained U-Net network. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 58(1): 31-45, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.01.003.

Zhang Z G, Wu Z D, Wei Z Y, *et al*. 2023. Enhancing salt model resolution and subsalt imaging with elastic FWI. The Leading Edge, 42(3): 207-215, doi: 10.1190/tle42030207.1.

附中文参考文献

蔡存军, 路交通, 瞿维迎, 等. 2025. 积分转换对数字节点接收数据的影响分析. 工程地球物理学报, 22(3): 459-468.

蔡姗, 王林, 郭胜, 等. 2025. 短时傅里叶逆变换的苗语语声合成方法. 应用声学, 44(2): 339-349.

谷玉田, 魏继东, 张旭, 等. 2021. 陆上勘探低频信号的接收与恢复. 石油物探, 60(4): 539-545, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2021.04.002.

齐鹏. 2022. 基于频散曲线的面波模拟压制技术. 地球物理学进展, 37(3): 1132-1137, doi: 10.6038/pg2022FF0249.

孙郧松, 李培明, 郭振波, 等. 2023. 一种数据驱动的面波预测和自适应衰减方法. 石油地球物理勘探, 58(3): 626-631, 640.

王文闯, 李合群, 赵波, 等. 2014. 基于 α-trimmed 矢量中值滤波压制同步激发邻炮干扰. 石油地球物理勘探, 49(6): 1061-1067.

魏继东. 2024. 对 3 种典型检波器及其数据的几点看法. 石油物探, 63(1): 138-148, doi: 10.12431/issn.1000-1441.2024.63.01.012.

文雪康, 袁莹, 唐建明, 等. 2020. 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. 地球物理学进展, 35(4): 1489-1496, doi: 10.6038/pg2020DD0343.

于涵, 刘财, 王典, 等. 2022. 面波频散能量谱计算方法. 吉林大学学报(地球科学版), 52(2): 602-612, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210108.

余锐, 赵国庆. 2009. 基于 STFT 数字信道化的雷达脉冲参数测量. 电子设计工程, 17(4): 32-33, 36.

张岩, 周一帆, 宋利伟, 等. 2023. 基于物理约束 U-Net 网络的地震数据低频延拓. 石油地球物理勘探, 58(1): 31-45, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.01.003.