

重型外源机械干扰噪声分离技术及应用

肖盈, 涂远良, 王斌, 钟家均, 曾涛, 李华科

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041)

摘要: 近年来地震勘探野外采集工区范围内覆盖了越来越多的各种大中型厂矿, 给野外采集地震记录造成了十分严重的外源重型机械干扰, 严重降低了原始资料信噪比。常规基于去噪思路的压制方法要么去噪力度不足, 要么容易伤害有效信号, 难以适应重型机械干扰的情况。将重型机械干扰视作正常单炮的干涉混叠单炮, 将去噪问题转化为数据分离问题, 采用以广义曲波变换和同步压缩变换为核心的稀疏反演数据分离技术对有效信号和机械干扰进行精准分离和去噪。数值模拟及龙门山前带 YC 工区实际资料应用表明, 稀疏反演方法较常规去噪对重型机械干扰压制效果较好, 能够有效提高单炮信噪比, 改善成像质量。

关键词: 机械干扰; 外源干扰; 噪声分离; 稀疏反演; 信噪比

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.08

0 引言

外源干扰是在地震勘探野外采集过程中一种常见的干扰波类型, 它是由机械设备引发地面及地下介质振动, 振动能量以震源点为中心向外扩散, 最终被检波点接收到。常见的引发外源干扰的类型主要包括公路干扰、重锤、打桩机、碎石机干扰以及采油区的大钻干扰等^[1-2]。

常规去噪方法利用噪声与有效信号视速度和频率的明显差异, 可以直接用 F-X 相干噪音去除技术或者 FK 滤波技术进行噪声压制^[3-4]。也可以利用大钻干扰倒置抛物线的相关性特点, 通过在炮域拾取符合时距双曲线规律的干扰波曲线, 间接利用 FK 滤波对大钻干扰进行压制^[5]。常规机械干扰影响范围有限, 以点震源为中心通常只影响几道、十几道的范围, 主要表现为特定频率的单频高能异常振幅, 可以利用特定检波器组合方式^[6]或者地震异常振幅自适应压制^[7]方法对噪声进行压制, 也可以利用

基于堆叠生成器神经网络压制抽油机噪音的方法^[8]。

随着社会经济的发展, 野外采集地震单炮记录出现了越来越多、越来越严重的重型外源机械干扰, 其特点在于影响范围广(以干扰源为中心影响连续上百道)、视速度与频带范围与有效波高度重合^[9]。常规直接应用 F-X 相干法或者 F-K 域滤波法容易伤害有效信号; 间接应用 F-K 滤波的拾取法极大的依赖人工, 工作量大, 难以大规模应用; 利用特定检波器组合压噪方法不适用本区单点节点仪采集情况; 基于能量差异的去噪方法又对重型机械干扰去噪力度不足。

近年来多震源混采技术在陆地可控震源和海洋资料采集过程中得到了推广和应用, 与之配套的基于稀疏反演的高效混采数据分离技术也较为成熟和完善^[10-11]。将重型机械干扰单炮视为正常震源位置的主炮和作为干涉炮的机械干扰的混叠记录, 将去噪问题转化为数据分离问题, 采用基于稀疏反演的数据分离技术对有效信号和机械干扰进行精准分离和去噪。

1 干扰波特点

对典型重型外源机械干扰单炮(图 1(a))进行噪音特点分析,外源干扰影响范围广,连续两百多道都受到重型机械干扰影响。对地震道的均方根能量进行统计,重型干扰的能量是有效反射信号的上千倍。有效反射波能量淹没于机械干扰之下,单炮信噪比极低。

通过分频扫描分析(图 1(a))可见,外源干扰频带分布范围广,原始单炮、10 Hz 低通扫描、10 Hz~20 Hz 带通扫描、20 Hz~40 Hz 带通扫描、30 Hz~60 Hz 带通扫描范围内均可见明显机械干扰,40 Hz~80 Hz 及

50 Hz~100 Hz 带通扫描的机械干扰主要表现为 50 Hz 的单频成分干扰。外源干扰表现为类似双曲线反射特征,视速度变化快,随着频率增加,视速度也相应增加。10 Hz 以下低频范围内视速度在 1 000 m/s 左右,在 30 Hz~60 Hz 较高频带范围内视速度最高可达 4 000 m/s,与有效反射波视速度区间重合,难以区分。通过频谱分析(图 1(b))可见,单炮频谱优势频段集中在 4 Hz~40 Hz 之间,有效波与干扰波在频带范围内重合度高,难以单从频率上将有效波和噪音信号分开。通过图 1(a)原始单炮整炮的 FK 谱(图 1(c))和对黑框范围噪音区域 FK 谱(图 1(d))对比来看,噪音能量强,分布范围也完全覆盖了有效信号的范围。

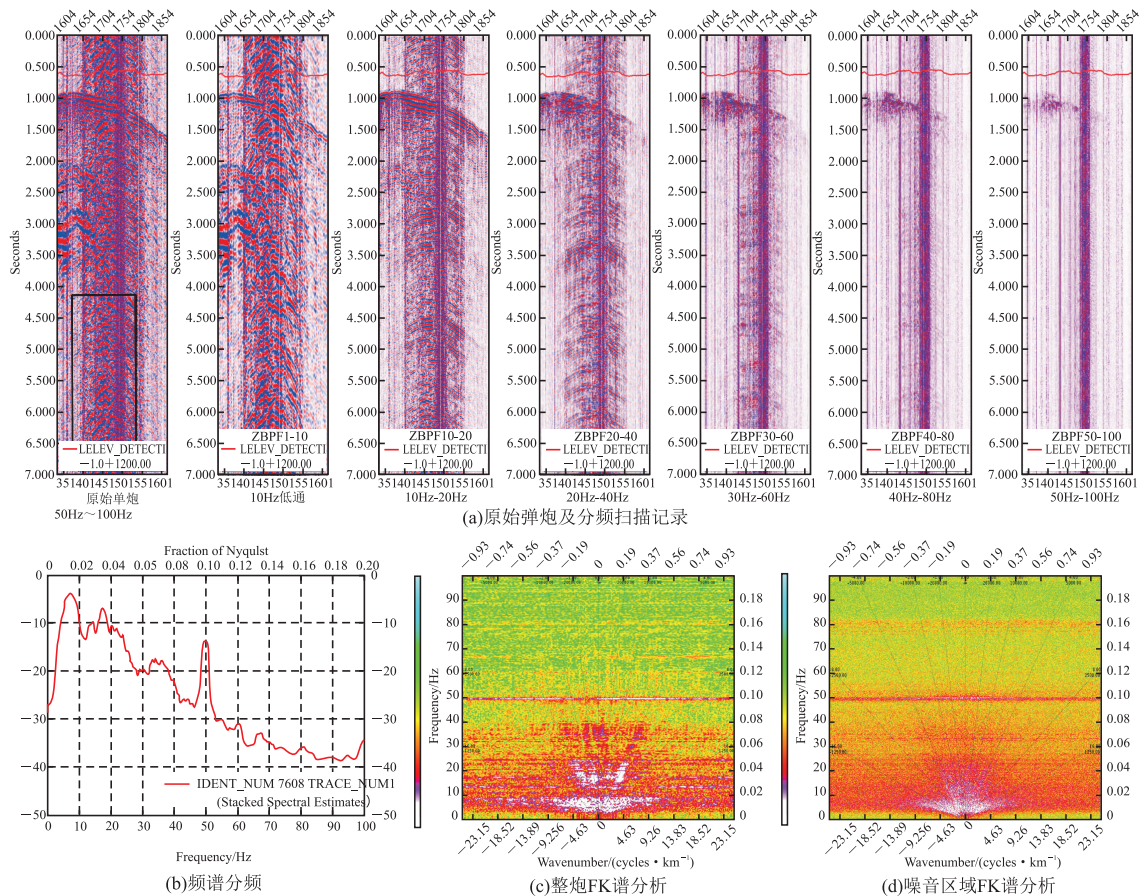


图 1 干扰波特征分析
Fig. 1 Interference characteristics analysis

由上述噪音特征分析可知,重型机械干扰频带和速度范围均与有效波高度重合,类似双曲线反射形态也与有效波高度相似,常规基于有效波和噪声频率、速度、相干性差异的 FK 滤波、相干滤波等方法难以适应。

根据重型机械干扰与有效信号能量级差异大的

特点,利用异常振幅压制技术对重型机械干扰进行去噪,仅对单频异常振幅成分压制效果好,对于表现为类似双曲线反射特征的成分去噪效果不佳。虽然可以将数据进一步分选到共检波点域和 CMP 域进行异常振幅组合压噪,但是仍然难以完全去除,并且容易损伤弱反射有效信号(图 5)。

2 方法原理

2.1 稀疏反演

重型外源机械干扰单炮可以视为正常炮点与外源震源同步震源采集的混叠数据,将混叠数据作为观测数据,将有效信号作为模型变量,将重型外源干扰分离作为反问题,利用基于稀疏反演的多震源地震数据分离技术对重型噪声进行压制。混叠数据在共炮点域记录中主震源和副震源信号能量都具有相干性,将混叠数据变换到不同的域中(如共检波点域、共偏移距域、共中心点域),则只有主震源的信号是连续的,而副震源信号(混叠干涉炮)是不连续的,具有随机性,可以在这些域中选择去噪类方法压制混叠噪音,因此震源分离过程也可以被视作去噪过程^[12]。

稀疏反演是地震资料去噪手段之一,将地震数据从 T-X 域变换到稀疏域,提取包括振幅、时频谱、相位、子波波形等特征,根据噪音和信号的特征差异进行信噪分离,最后反变换回到原域,其核心算法在于稀疏变换和同步压缩变化两个步骤。

广义曲波变换是一种高效自适应的典型稀疏变换,其基本思想是通过引入方位信息的曲波变换将地震信号转换到曲波域,对地震数据的频率、方向以及空间位置信息进行多方向、多尺度精细分解,在曲波域中利用反映频率、方向、位置信息的曲波系数能够有效区分主震源有效信号和副震源干扰噪音。同步压缩变换利用重排算法把曲波系数进行重排,将地震数据在时频平面任一点处的曲波系数分布移到能量的重心位置,集中增强瞬时频率的能量,减小瞬时频率曲线的畸变程度,消除曲波变换所产生的拖尾效应,达到重新分配反映方向差异的局部波矢量能量的目的,以更高的分辨率和保真度分离噪声和有效信号^[13]。由于曲波域中有效信号对应较大的曲波系数,随机噪音由于其随机性决定了对应了较为分散的曲波系数^[14],可以通过设定阈值参数来初步分离机械干扰噪声,然后进一步结合聚类方法对其精准压制。通过曲波逆变换重构恢复时空域有效信号,最终实现保护有效信号的同时压制干扰噪声。关键实现步骤阐述如下:

在分析地震数据处理时,如果平面波函数为:

$$u(x) = \alpha e^{2\pi i N_\beta \cdot x} \quad (1)$$

其中 α 、 N_β 代表振幅和相位。

则 $u(x)$ 对应的时空域广义曲波变换为:

$$W_u(a, \theta, b) = \int_{R^2} \alpha e^{2\pi i N_\beta \cdot r} a^{\frac{t+s}{2}} e^{-2\pi i a(r-b) \cdot e_\theta} \cdot \omega [A_a R_\theta^{-1}(r-b)] dr = a^{-\frac{s+t}{2}} \alpha e^{2\pi i N_\beta \cdot b} \widehat{\omega} [A_a^{-1} R_\theta^{-1}(a \cdot e_\theta - N_\beta)] \quad (2)$$

其中 a 表示曲波变换的尺度; θ 表示方位; b 表示位置; t 为径向尺度参数; s 为旋转角尺度参数; ω 为角频率; r 为时空域变量。

曲波系数 $W_u(a, \theta, b)$ 包括了信号 $u(x)$ 的不同方位和尺度信息,满足条件 $|A_a R_\theta^{-1}(a \cdot e_\theta - N_\beta)| \leq 1$, 其偏导数为:

$$\nabla_b W_u(a, \theta, b) = 2\pi i N_\beta a^{-\frac{s+t}{2}} \alpha e^{2\pi i N_\beta \cdot b} \widehat{\omega} [A_a^{-1} R_\theta^{-1}(a \cdot e_\theta - N_\beta)] = [2\pi i W_u(a, \theta, b)] N_\beta \quad (3)$$

则平面波函数 $u(x)$ 在 (a, θ, b) 的局部波矢量估算,即瞬时相位为:

$$k_u(a, \theta, b) = \frac{\nabla_b W_u(a, \theta, b)}{2\pi i W_u(a, \theta, b)} \quad (4)$$

利用聚类分析对局部波矢量的曲波系数求和:

$$T_u(k, b) = \int |W_u(a, \theta, b)|^2 \delta[\Re_{k_u(a, \theta, b)} - k] a da d\theta \quad (5)$$

$\Re_{k_u(a, \theta, b)}$ 为 k_u 的实部。

通过公式(5)将具有相同值的局部波矢量的曲波系数重新分配到新的时间-频率平面,即称为同步压缩。同步压缩主要用来锐化时频表示和减少拖尾现象,提高局部波向量精度。将获取的同步压缩能量分布 $T_u(k, b)$ 结合聚类方法识别集合 $\{(k, b): T_u(k, b) \geq \delta\}$, δ 是曲波变换的阈值参数。在曲波域中,有效信号对应较大的曲波系数,但对于随机噪音来说,其随机性决定了对应了均匀分布的曲波系数,合理的阈值参数选择能够取得较好的去噪效果。

将信号分解成相同的分量 u_1, u_2, \dots, u_l , 每一个信号可以通过每个成分进行重构:

$$u_i(x, t) = \int_{R_{k_u} \in v_i} W_{u_i}(a, \theta, b) \varphi_{a\theta b} da d\theta db \quad (6)$$

式中 $\varphi_{a\theta b}$ 为曲波基函数。

将曲波系数 $W_u(a, \theta, b)$ 的定义域限制在集合 $\{(a, \theta, b): \Re_{k_u(a, \theta, b)} \in v_i\}$, v_i 指 $\Re_{k_u(a, \theta, b)}$ 的一个有界集合,即 $\Re_{k_u(a, \theta, b)}$ 存在的可分离的一个信号。

对于上述向量,将公式(5)的能量 $T_u(k, b)$ 划成分量 u_1, u_2, \dots, u_l , 最后对这些分量进行重构,即逆曲波变换,最终实现保护有效信号的同时压制干扰噪声。

上述处理方式的关键在于确定信号的局部波矢量,其中引入同步压缩方法重新分配了在局部波矢量周围的曲波系数。合理设置阈值参数,同时结合聚类方法等信号处理方法,可以准确获取相应的信号分量。信噪分离设计及基本流程如图 2 所示:

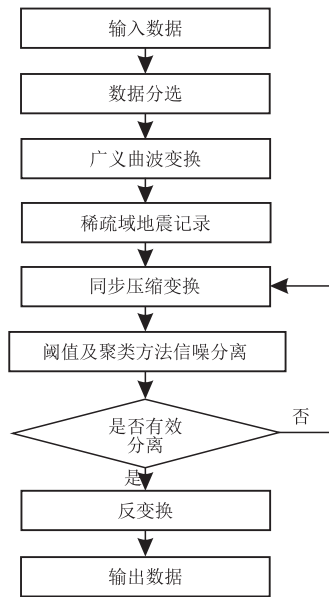


图 2 信噪分离处理流程图

Fig. 2 Signal and noise separation processing flow

2.2 数值模拟

设计一个二维层状介质模型,模型范围(5 000 m,5 000 m),采用观测系统 825—5—(10)—5—825 中间放炮两边对称接收,最小炮检距为 5 m,最大炮检距为 825 m,道距为 10 m。如下图 3 所示,用褶积方法模拟构建不同位置、不同能量的两个震源单炮分量 1 和分量 2,模型位置分别位于 $x=2\ 400\text{ m}$ 和 $x=3\ 200\text{ m}$ 处。将分量 1 单炮做为震源激发位置的主炮,分量 2 单炮做为邻近排列接收到的机械干扰,并通过直接叠加的方式合成混叠单炮记录。该混叠单炮记录较好地模拟了典型野外重型机械干扰单炮特点,即重叠范围广、频率与速度范围与有效波重合、形态接近,利用本方法对其进行不同单炮数据分离,分离效果如图 4 所示。

3 应用效果

YC 工区位于川西龙门山前带中段,地表条件复杂,激发接收条件差,地质结构复杂,灰岩出露区原始单炮信噪比低。野外采集过程中,受大型水泥厂影响,有效信号淹没在重型外源机械干扰之中,单

炮品质进一步变差。

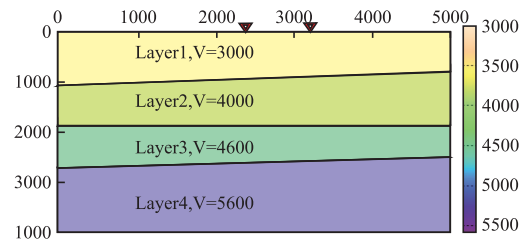


图 3 二维层状介质模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional layered medium model

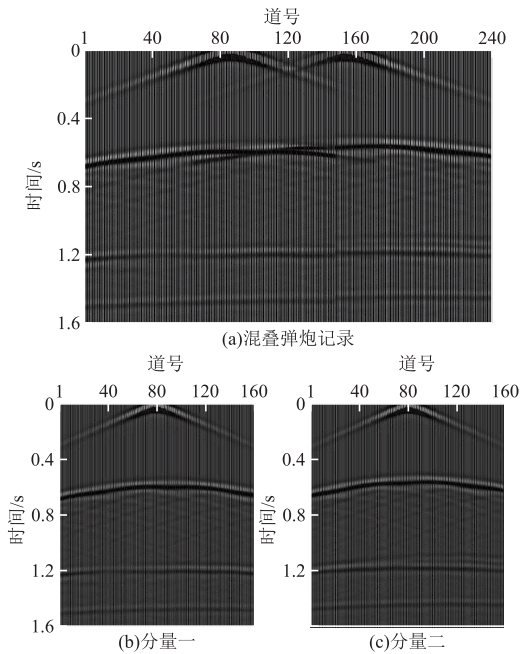


图 4 合成数据模型信噪分离效果

Fig. 4 Signal and noise separation effect of synthetic data model

为了提高去噪效果,首先对原始单炮进行静校正预处理,通过近地表时差校正恢复有效信号双曲线反射特征,有效信号数据曲率越小曲波变换后的曲波系数能量越集中、稀疏性越强,且与机械干扰的曲波系数差异更加明显^[15]。再将共炮点域数据分选到共中心点域、共检波点域或共偏移距域,此时主炮仍是连续的相干信号,而重型机械干扰则表现为随机噪声,采用上述稀疏反演信噪分离方法对重型机械干扰进行分离。

图 5 和图 6 分别是利用商业软件和稀疏反演方法的去噪效果对比图。商业软件主要采用组合域异常振幅压噪和线性噪音压制联合去噪方法对重型机械干扰进行压制。从图 5 去噪前后单炮及噪声残差记录来看,商业软件联合压噪方法去噪力度不足,噪

声里包含部分有效弱反射信号(红框所示)。从图 6 可以看出,这里的稀疏反演信噪分离方法对重型机械干扰压制的更彻底,且残差噪声记录中不含有效信号。

图 7 是利用克浪软件对去噪前后单炮记录进行信

噪比分析,单炮信噪比从 1.35 提高到 3.79 左右,信噪比提升明显。图 8 是去噪前后纯波叠加剖面对比,可以看出 YC 地区严重的外源机械干扰得到了较好地压制,分离前后记录相减残差中未见明显有效信号。

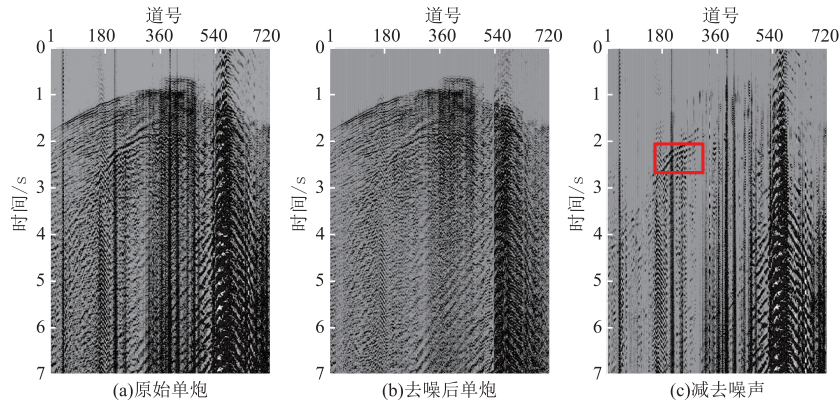


图 5 商业软件去噪效果

Fig. 5 Commercial software denoise effect

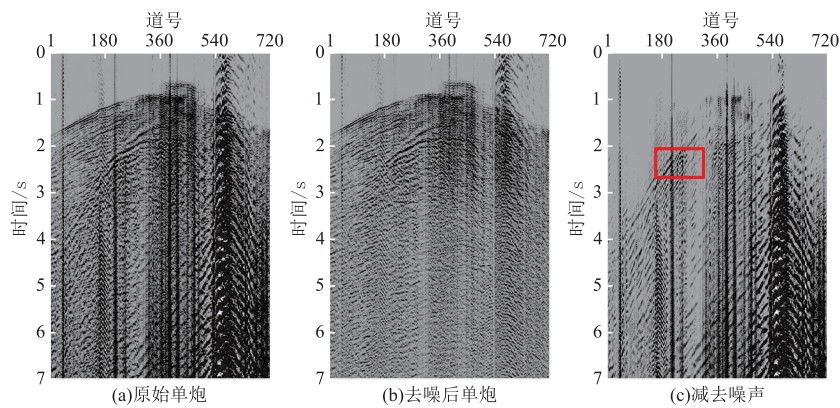


图 6 稀疏反演方法去噪效果

Fig. 6 Sparse inversion method denoise effect

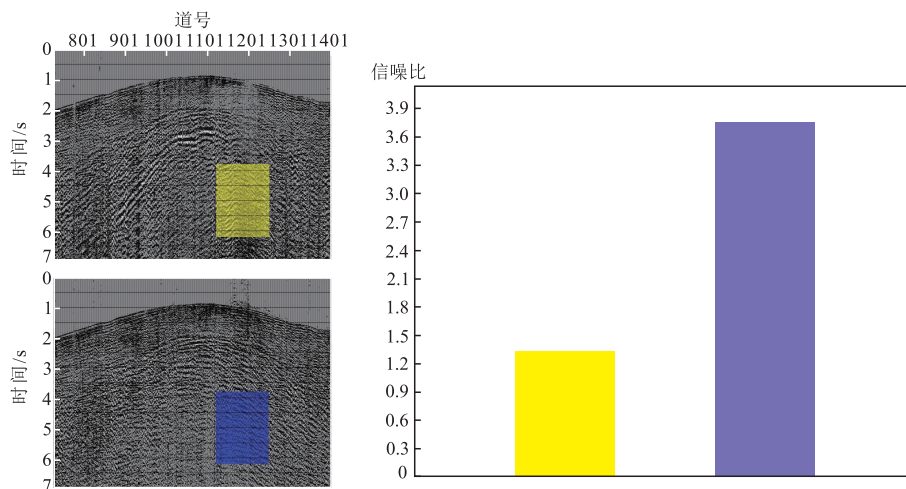


图 7 去噪前后信噪比对比

Fig. 7 Signal-noise ratio comparison

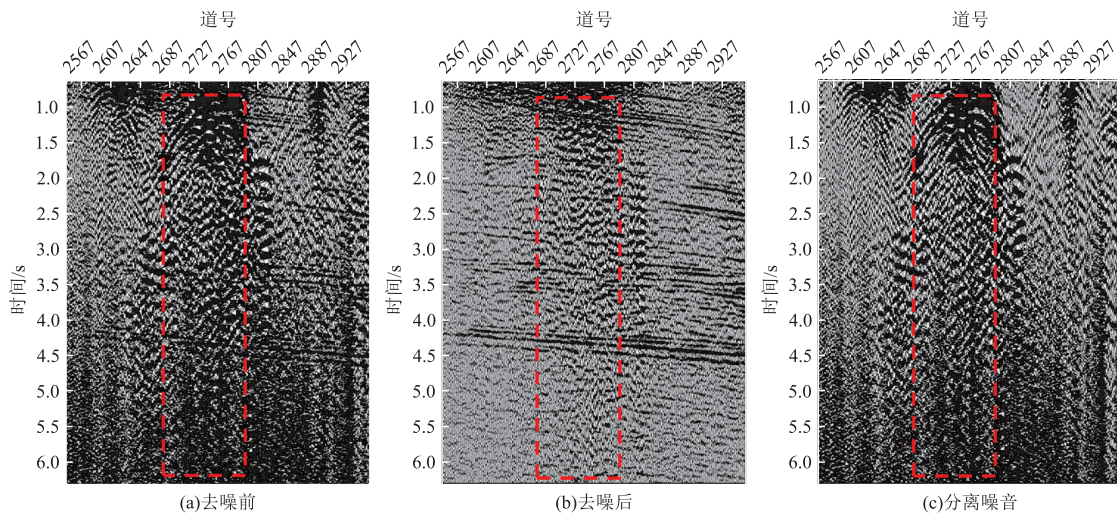


图8 纯波叠加剖面去噪效果

Fig. 8 Pure wave stack data denoising effect

4 结论

重型外源机械干扰严重降低了原始采集单炮信噪比,不利于后续处理及偏移成像。频率域滤波、异常能量压制等基于去噪思路的常规手段要么去噪力度不足,要么容易伤害有效信号。将重型外源机械干扰去噪视作正常单炮为主震源和机械干扰为副震源的混叠数据分离问题,利用广义曲波变换对数据进行多尺度、多方向的分解,利用同步压缩技术重新分配局部波矢量的能量,在相同同步压缩能量的条件下利用聚类方法精准分离有效信号和混叠噪声,最后通过曲波逆变换重构恢复有效信号实现去噪的目的。该方法能够在室内处理环节针对重型外源机械干扰进行有效去噪,更加满足叠前保真保幅去噪要求,同时,在保证资料品质的前提下,能够一定程度上提高野外施工效率,节省协停成本。

参考文献:

- [1] 陆基孟,王永刚. 地震勘探原理[M]. 东营:中国石油大学出版社,2009. 2
LU J M, WANG Y G. The principle of seismic exploration[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009. 2. (In Chinese)
- [2] 熊翥. 复杂地区地震数据处理思路[M]. 北京:石油工业出版社,2002. 5
XIONG Z. The idea of seismic data processing in complex areas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. 5. (In Chinese)

- [3] 王立歆,韩文功,吕小伟,等. 地震资料中的大钻干扰波分析及压制方法[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(5): 526—534.
WANG L X, HAN W G, LV X W, et al. Analysis and suppression method of large drill interference waves in seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42 (5): 526—534. (In Chinese)
- [4] 徐宏斌,孙朋朋. 频率波数域外源干扰压制方法探讨[J]. 化工管理,2015(10): 89.
XU H B, SUN P P. Discussion on suppression methods of exogenous interference in frequency wave number domain[J]. Chemical Engineering Management, 2015(10): 89. (In Chinese)
- [5] 古兰军,刘玉文,舒少平. 利用外部噪声拾取法压制大钻干扰波[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(S1): 86—89+239+250.
GU L J, LIU Y W, SHU S P. Suppression of large drill interference waves using external noise pickup method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45 (S1): 86—89+239+250. (In Chinese)
- [6] 魏燕,贾筱蓉,吕洪杨. 油区地震采集机械干扰的压制[J]. 复杂油气藏,2013,6(4): 29—33.
WEI Y, JIA X R, LV H Y. Suppression of mechanical interference in seismic acquisition of oil area[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(4): 29—33. (In Chinese)
- [7] 王世青,孟小红,于春玲,等. 地震异常振幅自适应压制[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(5): 112—115.
WANG S Q, MENG X H, YU C L, et al. Seismic anomaly amplitude adaptive suppression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25 (5): 112—115. (In Chinese)

- [8] H. Ren, C. Li, X. Wen, et al. Suppressing well-pump noise from seismic data based on multilayer generator network[J]. In IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022,19:1-5.
- [9] 王剑,毛哲巍,李涛,等.塔北油区地震采集干扰分析[J].非常规油气,2017,4(6):34-39.
WANG J,MAO Z W,LI T,et al. Analysis of seismic acquisition interference in the Tabei oil area[J]. Unconventional Oil & Gas,2017,4(6):34-39. (In Chinese)
- [10] 朱立华.基于稀疏反演的多震源地震混合采集数据分离技术[J].石油物探,2018,57(2):208-212.
ZHU L H. Deblending simultaneous-source seismic data using sparse inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57 (2): 208-212. (In Chinese)
- [11] 陈鹰鹏,张红军,刘勇,等.海底节点高效混采海量数据分离技术[J].石油地球物理勘探,2021,56(1):86-91.
CHEN Y P,ZHANG H J,LIU Y,et al. Deblending massive OBN data acquired by efficient and blended shooting method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021,56(1):86-91. (In Chinese)
- [12] 宋家文,李培明,王文闯,等.基于稀疏反演的高效混采数据分离方法[J].石油地球物理勘探,2019,54(2):268-273.
SONG J W,LI P M,WANG W C,et al. High-productivity blended acquired data separation by sparse inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting,2019,54(2):268-273. (In Chinese)
- [13] 徐雷良,邸志欣,石太昆,等.井炮同时震源混叠数据分离技术[J].石油物探,2023,62(2):281-296.
XU L L,DI Z X,SHI T K,et al. Separation of seismic blending data for borehole explosive source simultaneous shooting[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2023,62(2):281-296. (In Chinese)
- [14] 姚振岸,孙成禹,石小磊,等.基于曲波变换和各向异性扩散滤波的联合去噪技术[J].石油学报,2016,37(4):490-498+507.
YAO Z A,SUN C Y,SHI X L,et al. A combined denoising method based on curvelet transform and anisotropic diffusion filtering[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(4):490-498+507. (In Chinese)
- [15] 陈红灵.基于稀疏反演的多震源地震数据分离方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
CHEN H L. Research on the separation of simultaneous sources data based on sparse inversion method [D]. Beijing:China University of Petroleum(Beijing), 2018. (In Chinese)

Heavy external mechanical interference noise separation technique and application

XIAO Ying, TU Yuangen, WANG Bin, ZHONG Jiajun, ZENG Tao, LI Huake

(Exploration and Development Research Institute of Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Chengdu 610041, china)

Abstract: In recent years, the seismic exploration field acquisition area has covered more and more various large plants and factories, which brings serious exogenous mechanical interference to the field acquisition seismic records and significantly reduces the signal-to-noise ratio of the original data. Conventional denoising methods either tend to harm the effective signal or have insufficient denoising strength to cope with heavy exogenous mechanical interference. In this paper, the heavy machinery interference is regarded as the aliasing single shot of normal single shot. The source aliasing data separation technique based on sparse inversion is used to effectively separate signal and noise by sparse transform and synchronous compression transform. Numerical simulations and the application of actual data from the YC work area in front of Longmen Mountain show that the method can effectively suppress heavy mechanical interference, and improve the signal-to-noise ratio for better imaging quality.

Keywords: mechanical interference; exogenous interference; noise separation; sparse inversion; signal-to-noise ratio