

自适应滤波和曲波变换联合衰减面波

李江

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710077)

摘要: 为了去除地震勘探资料中的低频面波干扰,提出了自适应去噪和曲波域滤波联合的分频渐进面波衰减方法。通过时频分析统计面波的频率、速度等特征参数并进行面波模拟,利用最小二乘自适应相减法压制面波的中、低频成分;之后进行曲波变换,在曲波域将残余高频段面波与有效波分离进而压制面波。自适应与曲波域去噪联合的面波压制方法,分步、分频地消除了面波的高、低频成分,原始数据的低频信息得到较好的保留。该方法相对保幅保真,实际资料的去噪效果表明了本文方法的有效性和实用性。

关键词: 地震勘探; 自适应滤波; 曲波变换; 面波; 时频分析

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)22-0329-05

面波是陆地地震勘探中常见的强能量干扰波,在原始地震数据中与反射波相互交织,严重降低了地震资料的信噪比^[1]。针对面波干扰已经发展了多种去噪方法,如频率域滤波、 $F-K$ 滤波、小波变换、自适应滤波等^[2-4]。曲波变换的基函数具有良好的方向指示能力,通过曲波变换将地震数据在频率、波数域划分为不同的尺度,为面波和反射波分离提供了条件^[5-6],薛诗贵^[7]对曲波变换在地震数据随机噪声衰减中的应用进行了探索,但在频带窄、主频低的数据中,目的层反射波低频部分与面波频带相混叠,此时仍然无法将面波和反射波进行有效的分离^[8-9]。基于曲波变换对地震数据的稀疏表示,王常波等^[10]提出基于地震子波支撑和曲波域稀疏约束的面波去噪方法,以恢复波场混叠去噪时对有效信号的损失。自适应滤波技术是相对保真的去噪技术,孙陨松等^[11]提出随炮检距变化及频散谱分析的方法进行面波重构,通过面波模型匹配相减的自适应面波衰减技术。但自适应去噪方法只对预测的面波进行压制,其效果也取决于预测的面波模型,通常为了保护低频有效信号,往往存在面波高频部分压制不足的缺点^[12-14]。由于面波复杂的时频分布特征,通常单一滤波方法无法有效地去除面波,多方法联合去噪成为面波衰减的发展方向,李继伟等^[15]提出了多方法组合的联合的面波去噪技术,唐杰等^[16]发展了基于去噪卷积神经网络学习的自适应面波去噪技术。本文结合自适应滤波的保真保幅

特性和曲波变换的多方向特性,提出一种组合面波压制技术,对面波分频段分步骤的渐进压制,实际资料处理效果表明该组合技术在提高地震资料信噪比的同时,可以做到相对保幅保真的处理效果。

1 基本原理

1.1 时频分析理论

时频分析使用时间和频率的联合函数来表示信号,它同时描述了信号在不同时间和频率的能量密度和强度。其中,Fourier 变换是最常用也是最主要的时频分析工具,其基本形式如下^[17]:

$$Z(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $z(t)$ 为时间域信号; $Z(\omega)$ 为通过 Fourier 变换之后的频率域信号; t 为采样时间; i 为虚数单位; ω 为频率。它建立了信号时域与频域之间转换的关系,为面波特征参数估算及各种频域去噪方法奠定了基础。

1.2 自适应面波衰减技术

自适应面波衰减技术利用时频分析方法对面波特性进行分析,以确定面波的速度和频率分布范围,然后以此进行面波模拟,最后从地震数据中减去预测的面波。假设地震勘探野外采集获取的地震数 $z(t)$ 可表示为有效波 $x(t)$ 与噪声(这里主要指面波) $w(t)$ 之和,即

$$z(t) = x(t) + w(t) \quad (2)$$

式中: t 为采样时间,通过 Fourier 变换,其频域形式如下:

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-236)

作者简介: 李江(1985—),男,陕西商洛人,博士,副研究员,研究方向为地震勘探。

$$Z(f) = X(f) + W(f) \quad (3)$$

式中: f 为频率。面波预测, 与反射波正演模拟类似, 面波模型表示如下^[18-19]:

$$W(f) = \exp \left[i \left(\frac{f_0}{v_p} + \frac{f - f_0}{v_g} \right) x \right] V(f) \quad (4)$$

式中: $W(f)$ 为正演模拟的频率域面波; f_0 为面波主频; f 反射波主频; v_p 为相速度; v_g 为群速度; x 为偏移距; V 为地震子波。分析式(4)可知, 分母上的群速度和相速度对面波预测影响相对较小, 而分子上的反射波、面波频率对面波预测模型影响较大。面波模拟中当给定的面波频率值较低时, 则无法模拟出面波中的高频成分; 当选取的面波频率值较大时, 则会剔除原始数据中有效波的低频成分, 因此对面波频带范围的预测精度要求相对较高, 对面波速度的估算精度可适当降低。

将预测的面波从地震数据中减去即可得到面波压制后的有效波。

$$X(f) = Z(f) - W(f) \quad (5)$$

通过以上分析可知, 自适应面波衰减方法的关键是构建面波模型, 其中面波主频、速度值要尽量趋近于实际, 否则预测的面波模型将会不精确。

1.3 曲波域面波衰减技术

对地震数据进行曲波变换, 得到具有一定尺度、方向、位置的曲波系数^[20]:

$$C(j, l, k) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\varphi}_{jkl}(t, k_1) \quad (6)$$

式中: $C(j, l, k)$ 为经过变换后曲波域中尺度 j 、方向 l 、位置 k 处的曲波系数; $\varphi_{jkl}(t)$ 为曲波基函数; $\bar{\varphi}$ 为 φ 的共轭函数; $x(t)$ 为地震数据。离散曲波变换的尺度角度分割如图1所示, 在曲波域中地震数据按照频率高低从外向内进行多层次多尺度划分, 其中最外层为最佳尺度, 包含高频、高波数信息; 中间层为精细尺度, 主要用于信号分析; 最内层为粗尺度, 包含低频、低波数信息。曲波域的方向特性是沿顺时针方向划分的, 这样每一个方向都包含由粗到细多种尺度的曲波系数, 可见曲波变换具有很强的方向敏感性^[21]。地震数据中面波与反射波在速度和频率上有差异, 通过曲波变换这种差异则表现在分布尺度和方向上, 即在曲波域中, 面波和反射波将分布于不同的区域。其中, 面波具有低频低波数特征, 因此主要分布在图1中横轴附近的, 即这些区域的曲波系数主要反映了面波。利用曲波变换去除面波, 主要是通过曲波分解将面波与有效波在曲波域中分开, 然后设置阈值对反应面波的曲波系数进

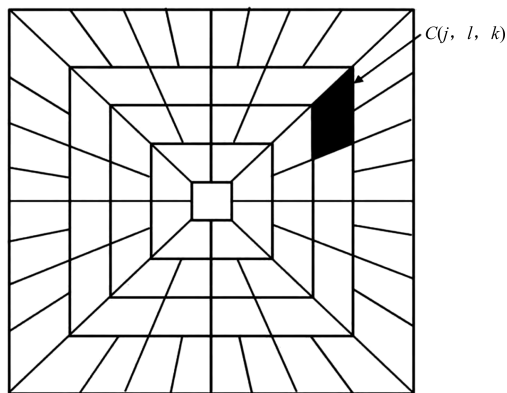


图1 曲波变换的尺度角度分割

行压制, 最后利用处理后的曲波系数进行地震数据重构, 实现曲波域去噪。但是, 从图1的曲波系数分布显而易见, 对于低频低波数的面波而言, 其处于曲波域的最内层粗尺度区域, 曲波基函数的分辨率相对较低, 因此, 这给区分包含面波低频成分的曲波系数带来困难。

1.4 联合面波压制技术

为了既能发挥不同去噪方法的优势, 同时弥补单一去噪方法的不足, 本文充分利用自适应相减滤波和曲波变换的特性, 进行联合渐进压制面波, 以此来改进面波衰减效果, 其去噪过程如下。

(1) 面波预测。基于时频分析确定面波的频率、速度和分布范围等特征参数, 进行面波模型预测, 为了防止有效信号的损失, 该面波模型主要包含面波的全部低频成分和部分高频成分。

(2) 自适应相减压制大部分面波。将原始记录与面波模型进行最小二乘自适应相减, 得到大部分面波去除后的地震数据, 残余面波主要为面波的高频成分。

(3) 曲波变换压制残余面波。对自适应去噪后的数据进行时频分析, 进一步确定残余面波的分布区域, 对步骤(2)的输出数据进行曲波分解, 对包含面波高频成分的曲波系数进行处理, 得到面波衰减后的数据。

2 应用实例

以山西襄垣王村区域的煤层气三维地震勘探数据为例, 该区表浅层为黄土覆盖, 典型原始单炮记录如图2(a)所示, 可以看出该区地震数据中的面波较为发育。对于面波衰减, 首先通过时频分析获得面波的频率和速度等特征参数。图2(b)~图2(f)为原始数据低截频滤波后的数据, 图3是图2中各数据对应的频谱, 随着低截频率的升高, 面波能量逐渐减弱, 当低截频率在18 Hz时, 仍能见部分面波,

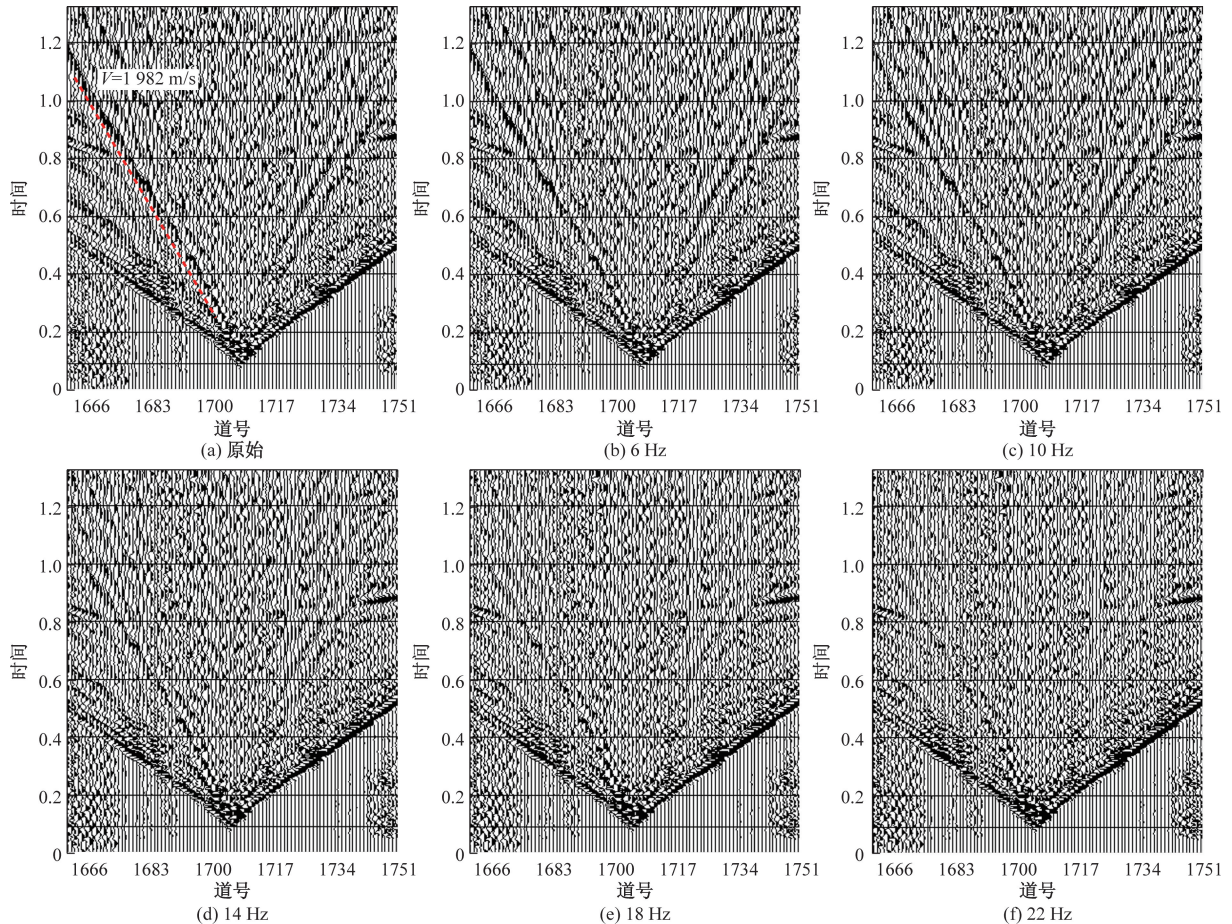


图2 原始记录与不同低截分频扫描记录

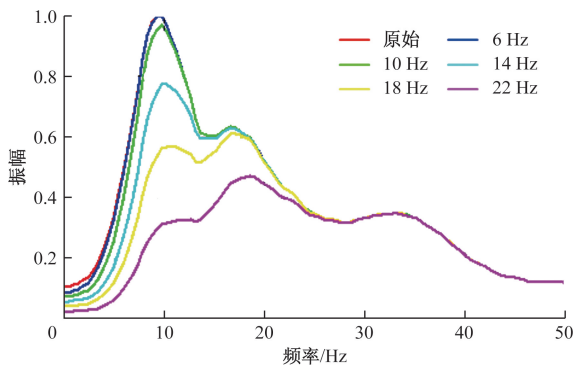


图3 上图各数据的频谱对比

主要表现为高频、高速和线性特征,当低截频率到达 22 Hz 时,面波基本消失。由此可以判断研究区面波的优势频带范围在 20 Hz 以内。面波的速度通过线性速度测量获得,如图 2(a)中红色虚线所示,可得面波的速度在 2 000 m/s 以内。通过对原始资料的分析,获得面波的速度和频率区间,为自适应面波衰减中的面波模型预测提供参数。

基于面波速度和频率分布区间进行面波模型预测,再与原始数据进行最小二乘自适应相减,实

现自适应面波衰减,处理结果如图 4 所示。通过自适应去噪,原始记录中的大部分面波被衰减,之前面波干扰区域的反射波也可以识别出来,且地震数据未见明显的缺失,表明有效信号得到较好的保护,相对保真保幅处理效果良好。但是,面波通过自适应衰减之后在其分布边界的三角区域仍存在部分残留,主要特征表现为线性相关、能量强、频率高等。针对这些残留的面波可依据曲波变换多方向、多尺度的高分辨特性进行处理,将自适应去噪后的数据在曲波域进一步压制面波,效果如图 4(c)所示,可见自适应衰减后残余的线性高频面波及相关干扰波被有效去除,近偏移距低信噪比区域内的反射波连续性增强。图 5 是分步面波压制前后单炮记录的 $F-K$ 谱,可见经过两次面波衰减后,原始数据中的面波得到较好的压制,反射波能量增强,资料信噪比提高,且具有较高的保真度。面波衰减前、后的叠加剖面如图 6 所示,原始剖面存在较多的面波,表现为线性斜干扰,低频背景噪声等。通过联合去噪后面波得到有效衰减,反射波同相轴的连续性增强,剖面信噪比、分辨率均得到提高。

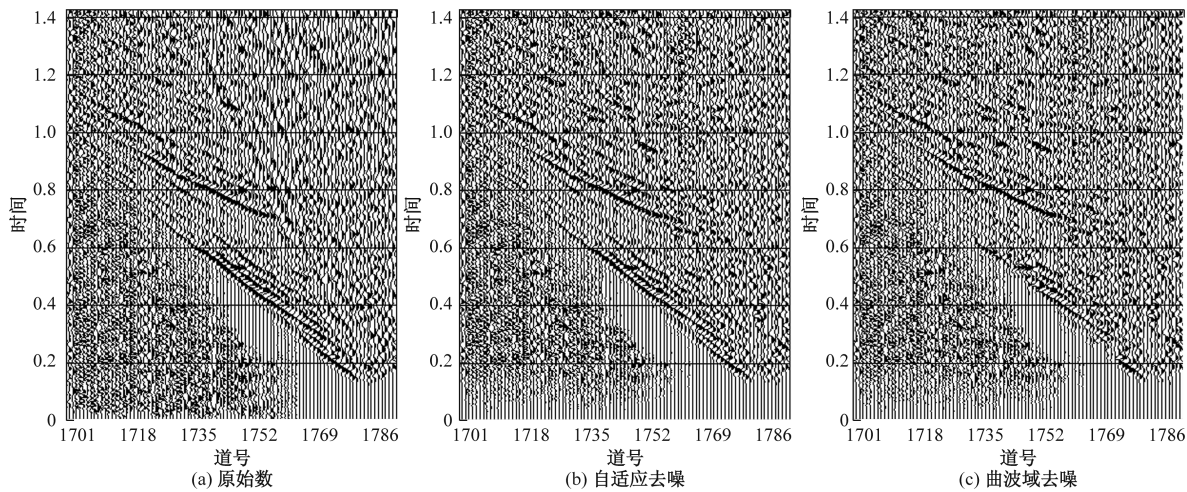


图 4 面波衰减效果

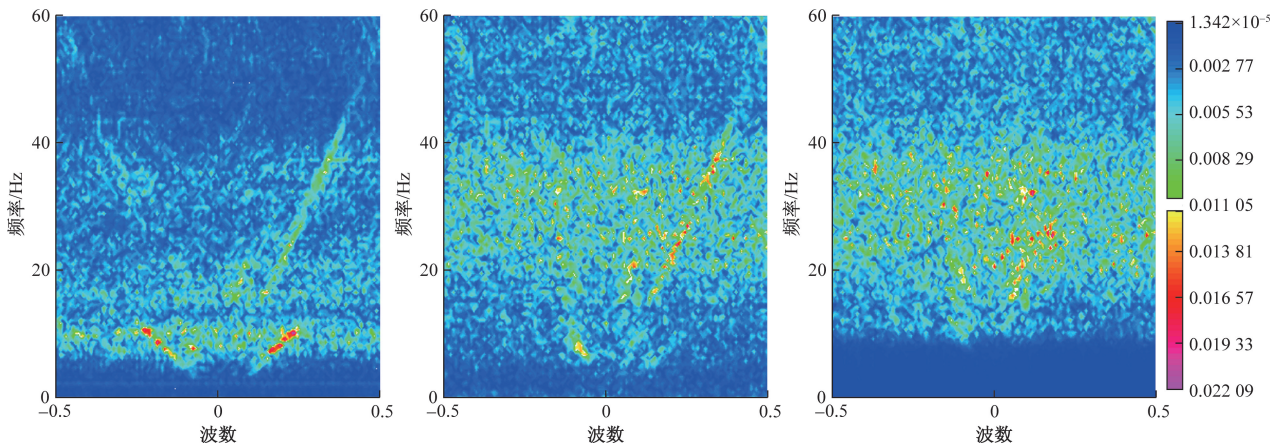


图 5 面波衰减前后的频率-波数谱

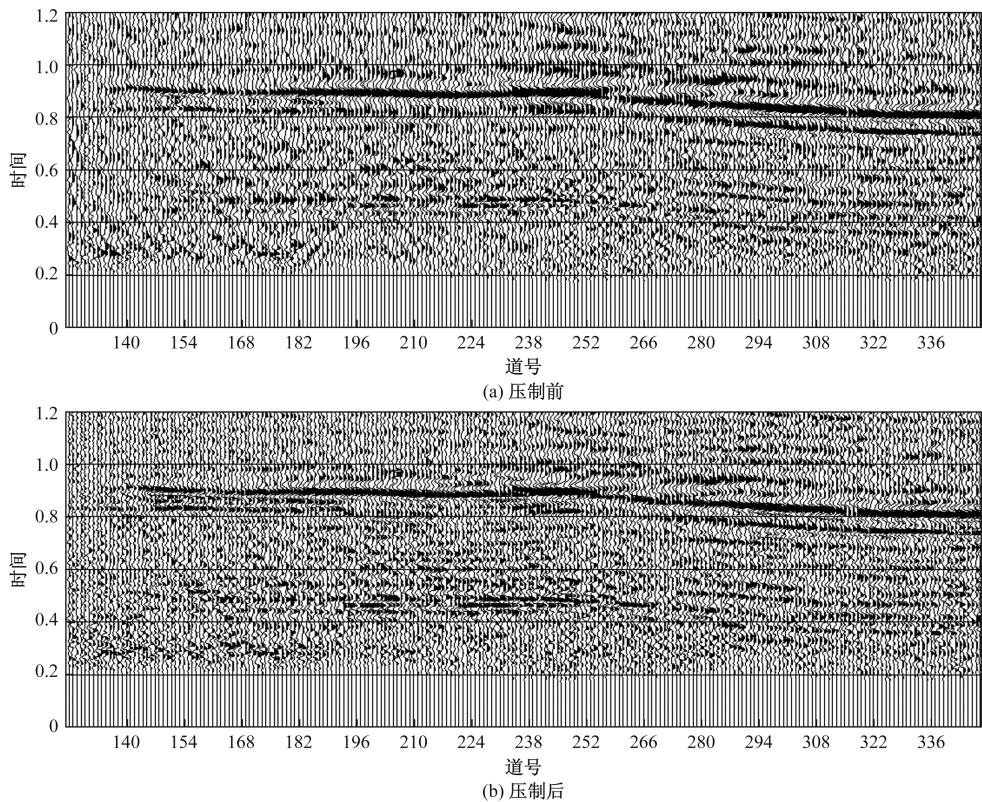


图 6 面波压制前后的叠加剖面

3 结语

(1)自适应滤波方法理论上只压制面波干扰,较好地保持原始数据的其它特征,但是用于面波预测的频率、速度等面波特征参数往往与实际值存在一定的误差,同时为了减少有效信号的损失,一般会降低自适应滤波的去噪强度,这样会造成面波高频部分残余。

(2)曲波变换具有多尺度、多方向特征,但是其基函数在低频低波数区域较大的尺度特征仍然无法将面波完全的分离出来。

(3)将自适应滤波和曲波域滤波技术进行联合,通过自适应滤波去除面波的中、低频成分,在曲波域去除面波的高频成分,通过分频渐进去噪,可以有效提高面波的衰减效果。

参考文献

- [1] 唐文,李江,汪铁望.黄土塬区多道瞬态面波数据采集试验分析[J].物探与化探,2020,44(1):165-170.
- [2] WELFORD J K, ZHANG R F. Ground roll suppression from deep crustal seismic reflection data using a wavelet-based approach: a case study from western Canada[J]. Geophysics, 69(4): 877-884.
- [3] 国脱予,刘财,刘洋.滤波类方法衰减地震数据噪声[J].地球物理学进展,2018,33(5):1890-1896.
- [4] 董烈乾,张慕刚,张翊孟.预测自适应相减面波压制方法[J].石油地球物理勘探,2016,51(6):1089-1093.
- [5] 齐鹏.基于频散曲线的面波模拟压制技术[J].2022,地球物理学进展,37(3):1132-1137.
- [6] TAN Y Y, HE C, WANG Y D, et al. Ground roll attenuation using a time-frequency dependent polarization filter based on the S transform[J]. Applied Geophysics, 2013, 10(3): 279-294.
- [7] 薛诗桂.基于曲波变换的循环平移地震随机噪声衰减[J].地球物理学进展,2015,30(1):372-377.
- [8] DEIGHAN A J, WATTS D R. Ground-roll suppression using the wavelet transform[J]. Geophysics, 1997, 62(6): 1683-2002.
- [9] 王万里,杨午阳,魏新建,等.基于小波分频与径向道变换的联合压制面波方法[J].应用地球物理,2017,14(1):96-104.
- [10] 王常波,田坤,刘立彬,等.基于地震子波支撑和 Curvelet 域稀疏约束的面波衰减方法[J].地球物理学进展,2020,35(1):181-187.
- [11] 孙郢松,李培明,郭振波,等.一种数据驱动的面波预测和自适应衰减方法[J].石油地球物理勘探,2023,58(3):626-631.
- [12] 马振元,杜文凤,卢勇旭,等.基于最小平方滤波的面波压制方法[J].物探与化探,2016,40(3):561-567.
- [13] 王志农,孙成禹,伍敦仕,等.利用区域自适应极化滤波压制多分量面波干扰[J].石油地球物理勘探,2019,54(6):1206-1216.
- [14] 陈文超,高静怀,包乾宗.基于连续小波变换的自适应面波压制方法[J].地球物理学报,2009,52(11):2854-2861.
- [15] 李继伟,臧殿光,刁永波,等.自适应相减和 Curvelet 变换组合压制面波[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1005-1015.
- [16] 唐杰,韩盛元,刘英昌,等.基于去噪卷积神经网络的面波噪声压制方法.石油物探.2022,61(2):245-252.
- [17] WU L Y, TIAN G. High-precision fourier forward modeling of potential fields[J]. Geophysics, 2014, 79(5): 59-68.
- [18] 李江.含煤地层岩浆岩侵入体地震波场模拟[J].地球物理学进展,2021,36(2):746-752.
- [19] 胡富杭,张建智,王平.路基空洞二维面波响应数值模拟[J].科技和产业,2021,21(11):301-306.
- [20] 胡书凡,赵永辉,吴健生,等.横向非均匀介质多道瑞雷波频散曲线正演[J].地球物理学报,2021,64(5):1699-1709.
- [21] 陈一方,陈九辉,郭飏,等.接收函数曲波变换去噪与偏移成像[J].地球物理学报,2019,62(6):2027-2037.

Ground Roll Wave Suppression Based on the Combination of Adaptive and Curvelet Transform

LI Jiang

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: The ground roll wave is one of the serious interference waves in the seismic raw data, and the split frequency progressive method which based on the combination of adaptive and curve let transform was proposed to suppression it. Firstly, the adaptive method was used to suppression the majority of the ground roll wave, the step includes that, statistics the characteristic parameters of ground roll wave by time frequency analysis, simulate the ground roll wave and suppress the medium and low frequency components using the method of least-squares adaptive subtraction. Secondly, the curvelet transform was used to suppression the residual noise, we carried out the transform and separated the residual ground roll wave and the effective wave, and then by processing the curvelet coefficient the high frequency component was further suppressed. The combined method can eliminate the high and low frequency components of the ground roll wave step by step, and better protect the low frequency information of the original data, so it is a relative amplitude preserving method for ground roll wave attenuation. The test effect of the actual data shows the effectiveness and utility of this method.

Keywords: seismic prospecting; adaptive filter; curvelet transform; ground roll wave; time-frequency analysis