doi: 10.11720/wtyht.2018.1179

胡瑞卿,王彦春,岳占伟,等.小波域特征提取在浅层地震资料面波压制中的应用[J].物探与化探,2018,42(6):1228-1236.http://doi.org/10. 11720/wtyht.2018.1179

Hu R Q, Wang Y C, Yun Z W, et al. Feature extraction in wavelet domain and its application in shallow seismic data surface-wave suppressing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1228-1236. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1179

# 小波域特征提取在浅层地震资料面波 压制中的应用

# 胡瑞卿<sup>1,2</sup>,王彦春<sup>1,2</sup>,岳占伟<sup>1,2</sup>,王奇<sup>1,2</sup>

(1.地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室,北京 100083;2.中国地质大学(北京)地球物理 与信息技术学院,北京 100083)

摘要: 浅层地震资料信噪比较低,面波能量非常强,对有效成分造成掩盖。常规的面波压制方法无法有效消除叠 前地震记录中的面波成分,残余面波能量及其干扰会对后续速度拾取等处理造成影响,降低叠后成像质量。笔者 采用小波域内的主成分分析对叠前资料进行特征提取,再对有效特征进行加权重构,对面波成分进行有效的压制。 基于本文设计的自适应 Morlet 小波基,可提高特征拾取时对有效成分的敏感性,实际数据的应用效果分析验证了 该方法在浅层地震资料处理中的可行性与有效性。本方法在极低信噪比条件下的浅层资料面波压制中具有较高 的理论与应用价值。

关键词: 面波压制;自适应 Morlet 小波基;特征提取;浅层地震资料处理

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2018)06-1228-09

## 0 引言

低频信息是地震资料中最重要的地震特征参数<sup>[1]</sup>。而叠前数据常受到各种噪声干扰,其中面波 是叠前资料中主要的低频干扰成分,对数据的信噪 比造成严重影响。特别是在偏移距普遍较小的浅层 地震资料中,面波能量非常高,对有效信号形成掩 盖。因此,面波压制处理是地震资料处理中的关键 一步,也是造成浅层地震资料质量不佳的重要原因 与难点之一。面波和有效信号在频域上有一定程度 的重叠,是在面波压制处理时对处理方法的主要限 制因素。如何既不损伤有效信号,又能尽量将面波 成分进行剔除是处理方法所面临的主要难点。对于 浅层地震资料而言,面波能量极高,覆盖区域较大, 对处理方法提出了更高的要求。

对于常规地震资料中的面波压制,处理手段最 主要为通过变换域实现面波分离(高通滤波、F-K 滤

波<sup>[2]</sup>、小波变换<sup>[3-5]</sup>、Curvelet 变换<sup>[6-7]</sup>、S 变换<sup>[8-11]</sup>, Radon 变换<sup>[12]</sup>等),如基于 Curvelet 变换的面波压制 方法<sup>[6]</sup>,将地震数据分为多个尺度和方向,根据有 效波和面波在不同尺度方向特征上的差异,设计了 多级曲波变换压制面波的流程;基于小波变换[13-14] 的处理方法,通常在低频部分进行面波压制<sup>[3]</sup>,对 面波区域小波系数进行滤波处理并估计出有效信 号[15],以及采用同步挤压小波变换,在高分辨率的 时频域进行面波切除。也有基于 EMD 的频率 f-x 域面波压制[16],根据面波主要分布在低频高波数域 的特征,在f-x 域沿空间方向提取低频段数据进行 EMD, 舍弃 IMF 第一分量, 达到面波压制的目的。 利用时频域极化滤波[17],在广义S变换时频分析基 础上,构建时频域自适应协方差矩阵,通过特征分析 计算时频域瞬时极化参数,实现多分量地震面波压 制;在 Ridgelet 域进行处理<sup>[18]</sup>,利用面波与有效信 号在视速度、时间和尺度特征域特征差别,实现有效 信号与面波的分离。以外,还有诸如自适应加权超

收稿日期: 2018-05-07;修回日期: 2018-08-15

基金项目:国家科技重大专项"前陆冲断带及复杂构造区地震成像关键技术与构造圈闭刻画"(2016ZX05003-003)

作者简介:胡瑞卿(1989-),男,博士,就读于中国地质大学(北京),目前从事地震资料处理与深度学习相关研究工作。

60

虚干涉法<sup>[19]</sup>,采用数据驱动的超虚干波法预测面 波,可直接得到炮检点间的面波,不要求检波点附近 存在真实炮点用于实现面波的自适应相减;预测自 适应面波压制方法<sup>[20]</sup>利用干涉度量分析理论,通过 数据互相关预测面波模型,在复曲波域设计和求解 最优化问题,从而对预测的面波模型进行振幅与相 位校正。或者基于稀疏信号理论,利用有效反射波 与面波形态特征不同,将含面波记录单道化,采用形 态分量分析方法分离面波<sup>[21]</sup>。

上述方法在常规地震资料上,均取得了一定效 果,但在浅层地震资料的处理中,由于资料自身品质 较低,有效信号被掩盖于面波之中,现有的面波压制 方法难以取得较好的效果。笔者设计自适应 Morlet 小波基,通过参数筛选使小波基波型与提取的子 波<sup>[22]</sup>相匹配,以提高小波分解对有效成分的敏感 性。并且创新性地在小波域内对相邻道进行主成分 分析,提取主成分特征,达到对低信噪比微震资料中 有效波初至拾取的目的。通过对实际浅层地震资料 的处理,并与方法处理结果对比,证实该方法具有很 强的抗噪能力,适用于有效信号被噪声掩盖的低信 噪比浅层地震资料。

1 方法原理

#### 1.1 自适应 Morlet 小波基的建立

在实际信号处理中,创建子波字典时使用的子 波与目标信号越相似,小波分解对该目标信号成分 越敏感。由于 Morlet 小波与地震信号具有较好的相 似性,故常被用于地震信号的小波分解。针对实际 信号,可对常规 Morlet 小波函数进行改进,引入指数 参数 K,调整小波基波形,使目标函数取得最小值, 即与根据实际资料提取的子波形态更加匹配,提高



小波分解时对有效成分的敏感性。

$$Morlet = e^{-t/2} \cdot \cos(5t) \quad (1)$$

自适应 Morlet 小波基函数:  
Morlet = 
$$e^{-t^{K/2}} \cdot \cos(5t)$$
。 (2)

在式(1)、(2)中,Morlet 为设计的小波基,*t* 为时间, *K* 为引入的自适应因子,用于控制小波基波形。*K* 值的选取根据以下目标函数:

 $F = \sum_{comp=1}^{3} \sum_{K} Morlet \cdot Wavelet(comp) → min, (3)$ 其中, *K* 为小波自适应指数, Morlet 为 *K* 值控制下的 自适应小波基, Wavelet(comp) 为三分量数据中各个 分量(comp) 中提取的子波, 由式(3) 计算得到似然 函数 *F*, 选取 *F* 取得最大值时对应的 Morlet 即可。 由实际叠前记录中提取子波, 通过对 *K* 值进行扫 描, 最终确定使 Morlet 小波与子波波形最接近的 *K* 值, 以该 Morlet 小波为母小波对当前数据进行小波 分解。子波提取方法<sup>[23-25]</sup> 在国内外已有较多成熟 方法, 相关文献中的测试效果也较为理想。本文方 法对子波提取的要求并不严格, 可用于区分有效成 分与面波成分, 尽量提高自适应 Morlet 小波基对有 效成分的敏感性。

对于有效信号,由于 Morlet 小波基具有与雷克 子波较为相似的波形(图1),并且随着阶数的变化, 该波形形态保持稳定。而一些常用的小波基,如 sym 与 db 小波,波形随阶数变化较大,或者如 haar 小波基,与地震子波的形态相差较大,如图 2 所示。



a—sym 小波基;b—db 小波基;c—haar 小波基;d—morlet 小波基

图 2 不同阶数常见小波基波形对比分析



图 3 自适应 Morlet 小波基波形随 K 值变化趋势

通过式(3)引入自适应 Morlet 小波基,其波形随 K 值的变化如图 3 所示。相较于标准 Morlet 小波基 (K=2),波形的主峰位置并未改变,仅在旁瓣的振 幅及衰减速度上发生变化。因此,我们选用自适应 Morlet 小波基进行小波分解,以提高分解时对有效 成分的敏感性。

#### 1.2 主成分分析与特征提取

在浅层资料的面波覆盖区域中,我们以相邻多 道地震记录为分析目标。相较于面波成分,反射波 在横向连续性上要强于面波,且反射波同相轴变化 平缓而连续。特别是在浅层地震资料中,由于面波 能量远高于有效反射波。但在浅层,反射波同相轴 远比面波同相轴平缓。在一定数量的相邻道之间, 反射波的道间相似度远高于面波成分。这种横向连 续性上的区别,为我们利用主成分分析对有效成分 进行提取,从而压制面波成分提供了可行条件。我 们以相邻三道为例,构建三分量小波系数矩阵。对 于实际资料,可根据单炮记录中面波成分覆盖宽度, 调整用于构建小波系数矩阵的道数。

$$M(i) = \begin{bmatrix} D_{j}(i) , D_{j+1}(i) , D_{j+2}(i) \end{bmatrix}'$$
  
= 
$$\begin{bmatrix} D_{j}(1) & D_{j}(2) & \cdots & D_{j}(i) & \cdots & D_{j}(n) \\ D_{j+1}(1) & D_{j+1}(2) & \cdots & D_{j+1}(i) & \cdots & D_{j+1}(n) \\ D_{j+2}(1) & D_{j+2}(2) & \cdots & D_{j+2}(i) & \cdots & D_{j+2}(n) \end{bmatrix}$$
(4)

式中,D(i)为第 i 级小波系数。我们对 j,j+1,j+2 三 列数据进行 n=9 级小波分解。对于每一级,我们得 第三列数据对应的该级小波系数,即可构成上式中 的小波系数矩阵 M(i)。由于邻近道之间,有效波相 似性远高于高能量的面波成分,因此有效波成分主 要落于主成分中,而面波成分则分散于第二、第三等 成分中。

如图 4 中所示,基于各级小波系数的主成分分 析的统计结果,通过对相邻 9 道数据进行统计分析, 可见 4、5、6 级小波系数的第一主成分具有明显的能 量优势,这说明有效成分能量主要落于该三级系数 的第一主成分中,而其他各级小波系数中,前三项主 成分能量差异不大,主要由面波能量构成。



图 4 小波系数矩阵主成分分析

#### 1.3 小波系数主成分加权重构

由于各级小波系数反映了信号自身的不同频率 成分,如图 5 中所示的对实测信号 s 的 9 级小波分 解。信号的整体变化趋势由 d7~d9 与 a9 体现。信 号的高频成分由 d1~d3 体现。对于低信噪比信号 而言,高频成分主要由高能背景噪音构成。而信号 s中的有效成分由 d4~d6 体现。经过主成分分析 后,保留的主成分通过小波重构得到处理后的时域 波形。重构时,我们将低频与高频对应的小波系数 赋以较低的权重系数。



图 5 自适应 Morlet 小波基 9 级分解

对于重构时,各级主成分系数权重系数的选取, 笔者提供以下权值选取思路作参考:

 1)归一化处理:将各级主成分系数单独重构回 时域波形,对时域波形进行振幅归一化处理;

 2) 计算各级时域波形与原始信号所提取的子 波间的相关系数;

3) 对相关系数进行归一化处理,作为各级主成 分系数的权值:

Weight<sub>i</sub>  $\propto$  corr(wavelet, coef<sub>i</sub>), (5) 其中:Weight<sub>i</sub> 为第 *i* 级系数的重构权系数, wavelet 为当前数据中提取的子波, coef<sub>i</sub> 为第 *i* 级系数, corr (•,•)为互相关系数。

1.4 处理流程

针对低信噪比条件下的浅层地震信号进行处理。首先,通过对标准 Morlet 小波基进行自适应地

调整波形,通过选取合适的参数 K,使其尽可能与子 波相似,以提高在分解时对有效信号的敏感度;随 后,基于相邻道间的有效成分相关性,在小波域内从 高能面波中提取出有效成分特征,并剔除其余成分; 最后,将剩余的主成分小波系数加权重构,得到体现 有效信号特征的时域波形。总体处理流程如下:

1) 对浅层地震资料进行子波提取;

 2) 对目标信号选取合适的参数 K<sub>i</sub>,确定小波基 函数;

3)对各相邻道数据进行分解,得到各级小波系数;

4)对各级小波系数下的小波系数矩阵进行主成分分析,设计门槛值并剔除次要成分;

5) 按不同权值进行主成分小波系数进行重构, 得到主成分的时域波形。

#### 2 应用效果

笔者对两套实际资料进行测试。测试 I 为常规 资料中的面波压制处理。将本文方法与常规 Radon 变换面波压制方法的处理效果进行对比。对比效果 说明,本文方法基于转换域内的特征提取,对有效波 成分有一定保护,并且对区分有效成分与面波成分 更为敏感,处理效果更优。测试 II 针对浅层地震资 料进行处理。由于资料的特殊性,有效波成分在叠 前记录是完全不可见。因此,通过将本文方法与常 规 Radon 变换方法相结合,将常规 Radon 变换方法 处理结果中的残留面波成分作进一步压制。处理后 的叠前记录十分理想,后续的速度拾取及初叠剖面

#### 质量均有显著提升。

#### 2.1 实际资料测试 I

测试 I 采用常规地震资料,对方法可行性进行 测试。图 6a 所示为常规地震资料叠前单炮记录,图 中可见强能量的面波成分。通过传统 Radon 变换对 面波进行压制,由图中可见由于截断效应与假频现 象的干扰,常造成面波压制不足(图 6b),残留部分 面波能量,或采用多种方法组合进行面波压制时,损 失有效波信息(图 6c)。而采用本文提出的方法,可 以不损伤有效成分的同时,尽可能剔除面波能量,处 理结果如图 6d 所示。当然,也可将该方法用于其他 方法的处理结果上,对面波压制不足的叠前资料作 进一步精细处理,可有效提高叠前资料的面波压制 效果。



a—原始单炮记录;b—传统 Radon 变换方法对面波的压制效果(面波能量残留);c—传统 Radon 变换方法对面波的压制效果(有效反射损伤);d—本文方法对面波的压制效果

图 6 常规资料处理效果对比

#### 2.2 实际资料测试 II

测试 II 采用某工区内浅层勘探地震资料,资料 采样间隔为1ms,观测系统采用12线4炮中间激发 方式,最高覆盖次数60次。对于该套浅层地震资料 而言,目标层段较浅,主要为100~500ms之间。图 7a 原始单炮记录中可见强能量的面波与折射波,反 射波完全不可见。去除折射波后,针对资料中的高 能面波成分,采用常规 Radon 变换方法对面波进行 压制后,结果如图7b所示。图中面波覆盖区域仍存 在残留面波成分,对后续的速度拾取及叠加处理造 成严重影响。对该处理结果,进一步通过本文方法 进行处理,得到如图 7c 所示的结果,可见对于低品 质浅层地震资料,本文所提方法可与其他方法组合 使用,以提高面波压制效果,使资料整体信噪比更 高。图 8 所示为面波去除前后整体时间段内单炮记 录对比。

若仅采用如图 7b 所示的处理结果制作速度谱, 其结果如图 9a 所示,速度谱受到面波残留成分的影响,能量聚集并不理想,给人工拾取造成极大的困 扰。而若采用图 7c 对应的处理结果,其速度谱如图 9b 中右图所示,100~600 ms 间,能量聚焦性得到明 显改善,可对浅层速度进行有效拾取。



图 7 组合方法对浅层地震资料中面波压制处理效果



a一原始剖面;b一面波成分;c一面波压制后的剖面 图 8 浅层资料面波压制前后对比



a—传统 Radon 方法处理结果速度谱;b—进一步采用本文方法处理结果速度谱 图 9 面波压制后速度谱对比

基于图 9b 所拾速度,对传统 Radon 处理成果与 通过方法作进一步处理的成果资料进行初步叠加, 叠后剖面如图 10 所示。图 10a 为传统 Radon 处理 成果得到的叠后剖面,仅在 200~300 ms 间的可见主 要目标层有明显的同相轴显示,其上方几乎无法识 别有效同相轴,下方模糊可见部分同相轴,能量较弱 且无法明确其分布形态。而经过文方法作进一步处 理,叠后剖面如图 10b 所示。可见在 100~500 ms 范 围内,多条同相轴可清晰识别,且资料整体信噪比得 到明显提高,背景噪音较弱。

经过完整叠前资料处理后,得到如图 11 所示的 最终叠后剖面。通过对该浅层资料进行 500 ms 以 上范围进行成像,可为工区内浅层地质构造解释及 采空区域的探查提供有利的数据支撑。



图 11 本文方法处理得到的最终叠后剖面

### 3 结论

文中针对面波能量较大、有效信号被淹没的浅 层地震数据进行处理,提出改进常规 Morlet 小波,提 高小波分解时对有效成分的敏感度,并创新性地提 出在小波域内进行主成分分析,保留有效成分的特 征,压制高能干扰成分,随后通过加权重构。由于自 适应的 Morlet 小波与地震数据中的子波相似性得到 加强,小波分解过程中对有效波更加敏感,将有效波 作为主要成分进行突显,达到提高小波系数域内信 噪比的目的。

基于相邻多道地震数据中有效波的相似性特征 保持一致,而面波及其他噪声虽然能量较高,但并不 能保持多道内的相似性与同相轴的连续性,故主成 分分析可对小波系数矩阵进行有效信号特征提取。 随后,小波系数加权重构一方面抑制直流成分,另一 方面压制高频时变自然噪声,最终达到面波压制与 提高信噪比的目的,克服了传统方法在处理低信噪 比资料时无法有效压制高能面波,造成面波残留并 且无法准确拾取速度等缺点。实际资料的处理结果 表明:该方法在处理高能面波影响下的浅层地震资 料时具有很强的面波压制能力,也可对已进行一定 程度的面波压制,但残留有剩余能量的资料作进一 步处理,可有效提高资料信噪比,为后续处理提供高 质量的数据支撑。

#### 参考文献:

- Liu Y, Liu C, Wang D A.1D time varying median filter for seismic random spike-like noise elimination [J]. Geophysics, 2009, 74(1): 17-24.
- [2] 万光南.*f-k* 滤波在压制面波噪声中的应用[J].中州煤炭,2014 (2):99-101.
- [3] 曾祥堃,乔宝平,刘依谋,等.基于小波变换的自适应面波压制 方法[J].北京大学学报:自然科学版,2015,51(5):837-842.
- [4] 王超,沈斐敏.小波变换在探地雷达弱信号去噪中的研究[J].物探与化探,2015,39(2):421-424.
- [5] 林丹丹,熊章强,张大洲.基于多模式分离的S变换与小波变换

提取面波频散曲线对比分析[J].物探与化探,2014,38(3): 544-551.

- [6] 董烈乾,李振春,王德营,等.第二代 Curvelet 变换压制面波方 法[J].石油地球物理勘探,2011,46(6):897-904.
- [7] 韩佳君.Curvelet 变换组合法压制地震随机噪声研究[D].长 春:吉林大学,2010.
- [8] 胡昊,童思友,龙江平.基于 GPU 的时间 S 变换对面波的压制
   [J].地球物理学进展,2014,29(6):2649-2656.
- [9] 张大洲,练小聪,杨威,等.基于多模式分离的S变换瑞雷波频 散曲线提取[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(8): 2950-2956.
- [10] 周竹生,刘冰.基于含可变因子S变换的面波压制技术[J].物 探化探计算技术,2013,35(5):555-560.
- [11] 马见青,李庆春,王美丁.广义S变换在地震勘探中的研究进展[J].物探与化探,2011,35(2):265-269.
- [12] 鲁娥,李庆春.混合 Radon 变换地震噪声压制的应用[J].物探 与化探,2013,37(4):706-710.
- [13] Andrew D J, Doyle W R.Ground-roll suppression using the wavelet transform[J].Geophysics, 1997, 62(6): 1896 - 1903.
- [14] Melo P, Porsani M J, Silva M G.Ground-roll attenuation using a 2D time-derivative filter [J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57 (3): 343 - 353.
- [15] 岳龙,刘怀山,尹燕欣,等.基于连续小波变换的面波衰减方法

研究[J].石油物探,2016,55(2):214-222.

- [16] 董烈乾,李振春,杨少春,等.基于经验模态分解的f-x 域面波压 制方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(1);42-48.
- [17] 马见青,李庆春,王卫东,等.多分量地震的时频域瞬时极化分析和滤波[J].地球物理学进展,2015,30(6):2723-2729.
- [18] 包乾宗,高静怀,陈文超.面波压制的 Ridgelet 域方法[J].地球 物理学报,2007,50(4):1210-1215.
- [19] 安圣培,胡天跃.基于自适应加权超虚干涉法的地震面波压制研究[J].中国科学:地球科学,2016,46(10):1371-1380.
- [20] 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.
- [21] 李海山,吴国忱,印兴耀.基于形态分量分析的保幅面波压制方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(3):351-358.
- [22] 张栋,徐雷良,贾静敏,等.微地震测井记录子波提取方法及应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(4):519-523.
- [23] Gunning J, Glinsky M E. Wavelet extractor: A Bayesian well-tie and wavelet extraction program [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32 (5):681-695.
- [24] 李振春,赵义平,徐文才.基于S域谱模拟技术的时变子波提取 方法研究[J].地球物理学进展,2015,30(6):2706-2713.
- [25] 王蓉蓉,戴永寿,李闯,等.时频分析与自适应分段相结合的时 变子波提取方法[J].石油地球物理勘探,2016,51(5):850-862.

# Feature extraction in wavelet domain and its application to shallow seismic data surface-wave suppression

HU Rui-Qing<sup>1,2</sup>, WANG Yan-Chun<sup>1,2</sup>, YUE Zhan-Wei<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences), Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Most of shallow seismic signals have low Signal-to-Noise Ratio (SNR) due to the strong surface wave component, which makes is difficult to establish the velocity field. Conventional methods performed poorly in this situation. To overcome this problem, the authors propose a new method based on the adaptive Morlet wavelet and principal component analysis (PCA) process in wavelet coefficients matrix. The difference of horizontal continuity between effective wave and surface wave makes it possible to extract the features in wavelet coefficients domain. Then the reconstructed signal from weighted features presents a high-quality surface wave suppression. Tests on two sets of real data provide a solid evidence for its feasibility in shallow seismic signal.

Key words: surface-wave suppressing; adaptive Morlet wavelet; feature extraction; shallow seismic data processing

(本文编辑:叶佩)

· 1236 ·