

文章编号: 1001-1749(2024)03-0251-11

基于变分模态分解的谱蓝化方法 在叠前地震资料高分辨处理中的研究及应用

肖裕锋, 曹俊兴, 付京城, 师少晨, 向 韬

(成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

摘要: 叠前地震资料的分辨率会影响叠前反演的精度以及 AVO 分析的结果, 所以提高叠前道集的分辨率就显得尤为重要。谱蓝化高分辨方法结合了测井信息, 使处理后的地震资料更加接近实际情况。但其在计算过程中, 使用各道叠加的平均振幅谱计算谱蓝化算子, 导致部分频谱信息未参与计算。因此笔者提出基于 VMD(变分模态分解方法)的谱蓝化方法, 通过 VMD 将地震数据分解为多个 IMF(本征模态分量), 计算其谱蓝化算子, 以提高各 IMF 的分辨率, 并重构得到高分辨地震数据结果。在合成道集和实际地震道集数据处理中运用该方法, 结果表明: 基于 VMD 的谱蓝化方法进一步提高频谱信息以及叠前道集分辨率, 与实际测井资料正演道集相吻合。

关键词: 叠前反演; 谱蓝化; 高分辨率; 变分模态分解

中图分类号: P631.443

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.01

0 引言

随着勘探开发工作不断深入, 特别是在含油气开发阶段对地层识别、划分、开采的要求越来越高。高分辨率地震资料可以有效地提高对薄层、断裂等地质细节的识别能力, 从而提高地震资料解释精度^[1]。由于地震波在传播过程中不同频率成分的波衰减程度不同。因此, 对地震数据分频带进行处理, 以便更好地恢复信号特征。VMD 拥有较好的分解能力, 可以有效地将地震信号分解开。Dragonmiretskiy 等^[2-3]提出 VMD, 弥补了经验模态分解方法的不足, 并且在分解过程中避免了模态混叠现象, 并实现了二维图像的分解。温志平^[4]和李琳琳^[5]使用二维 VMD 实现了地震数据的噪声压制, 恢复弱地震信号。计子琦等^[6]将 VMD 与谱白化方法相结合, 实现了均衡信号不同频率成分的目的。谱白

化方法需要假设地层反射系数是“白色”^[7-8], 因此常常对地震振幅谱进行“白化”处理。然而在实际地震资料中, 地层反射系数序列往往呈现出“蓝色”特征, 即振幅的变化与频率的变化趋于一致, 两者之间呈正相关的关系^[9-10], 因此提出了与测井数据相结合的谱蓝化高分辨处理方法。

Lancaster 和 Blanch-Faster 等^[11-12]将谱蓝化方法应用于叠后地震资料中, 取得了较好的拓频效果。张华等^[13]通过对反褶积后的反射系数进行“蓝色”补偿, 使得地层层间信息更丰富, 与测井匹配性更好。刘丽媛和刘建伟等^[14-15]将谱蓝化用于识别薄储层, 精细地刻画了薄储层信息。Kazemeini 等^[16-17]将设计的谱蓝化算子应用于叠前地震资料中。通过与叠后谱蓝化方法对比发现, 叠前谱蓝化方法在提高分辨率的同时还降低了振铃伪影现象。Villamizar 等^[18]对叠前与叠后地震资料进行谱蓝

收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030812)

第一作者: 肖裕锋(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为地震资料高分辨处理, E-mail: 1271848358@qq.com。

化,通过对比发现,叠前谱蓝化地震资料反演的孔隙度比叠后地震资料反演效果更好,准确度更高。李贤兵等^[19]将叠前谱蓝化方法应用于油田,在储层预测中取得了显著的效果。懂政等^[20]通过谱蓝化方法进行反复迭代矫正,不断补偿高频成分,在灰岩储层“甜点”预测取得了较好效果。从以上文献中可以看出,谱蓝化方法能够有效的提高薄互储层识别能力。然而,在对川西海相地震资料处理中,传统谱蓝化方法处理结果仍不满足需求。因此笔者将VMD与谱蓝化方法相结合,通过对不同模态分量进行谱蓝化处理,提取不同频带范围内的谱蓝化算子,从而提高拓频效果。

1 方法原理

这里将VMD与谱蓝化方法相结合,方法流程如图1所示。首先使用VMD将地震信号分解为1到9个本征模态分量,计算不同模态分量个数的瞬时频率均值并绘制成曲线,根据其变化规律确定分解个数。从而将地震数据分解为 k 个模态分量。接着选取测井的密度曲线以及速度曲线,计算出该井的反射系数,并得到反射系数频谱。再计算出各个模态分量的平均振幅谱,将其逼近测井反射系数振幅谱,使两者差异最小化,从而得到谱蓝化算子,实现各个模态分量的谱蓝化处理。之后将谱蓝化处理后的本征模态分量进行叠加重构,得到分辨率较高的地震数据。技术流程如下图所示:

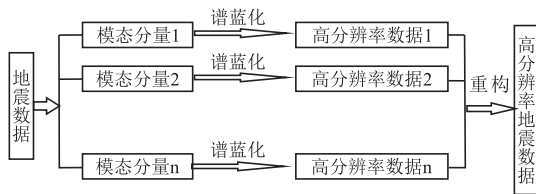


图1 方法流程图

Fig. 1 Technical route flow chart

1.1 变分模态分解(VMD)

VMD是一个非递归的、完全自适应的变分方法,将信号分解为多个具有有限带宽的IMF,实现并行提取。估计模态带宽的步骤:①获取信号频谱;对每个IMF进行希尔伯特变换;②计算调谐信号:将各个IMF的中心频率与相应的调谐指数相乘;③估计模态带宽:对调谐信号梯度的 L_2 范数

平方来计算^[4]。将二维解析信号在频域上定义为:

$$\hat{u}_{\Delta,k}(\omega) = \begin{cases} 2\hat{u}_k(\omega), & \text{if } \langle \omega, \omega_k \rangle > 0 \\ \hat{u}_k(\omega), & \text{if } \langle \omega, \omega_k \rangle = 0 \\ 0, & \text{if } \langle \omega, \omega_k \rangle < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$= (1 + \text{sgn}(\langle \omega, \omega_k \rangle)) \hat{u}_k(\omega)$$

二维解析信号:

$$u_{\Delta,k}(x) = u_k(x) * \left[\delta(\langle x, \omega_k \rangle) + \frac{j}{\pi \langle x, \omega_k \rangle} \right] \delta(\langle x, \omega_{k\perp} \rangle) \quad (2)$$

式中 x 为地震信号,正交向量 $\omega_{k\perp}$ 与 ω_k , $u_{\Delta,k}(x)$ 的计算沿参考方向 ω_k 进行。

根据二维解析信号构建2D-VMD约束方程如下:

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \alpha_k \|\nabla [u_{\Delta,k}(x) \mathbf{e}^{-j\langle \omega_k, \omega \rangle}] \|^2 \right\} \quad (3)$$

$$s. t. \sum_k u_k(x) = f(x)$$

为了使问题不受约束,提高约束保真度,加入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子 λ :

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha_k \sum_k \|\nabla [u_{\Delta,k}(x) \mathbf{e}^{-j\omega_k t}] \|^2 + \|f(x) - \sum_k u_k(x)\|^2 + \langle \lambda(x), f(x) - \sum_k u_k(x) \rangle \quad (4)$$

使用ADMM(交替方向乘法)求解上式,鞍点可通过迭代 $u_k^{n+1}, \omega_k^{n+1}, \lambda_k^{n+1}$ 求得,将 u_k^{n+1} 变成频域:

$$u_k^{n+1}(\vec{\omega}) = \left[\hat{f}(\vec{\omega}) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\vec{\omega}) + \frac{\hat{\lambda}(\vec{\omega})}{2} \right] \frac{1}{1 + 2\alpha |\vec{\omega} - \vec{\omega}_k|^2} \quad (5)$$

可得频域更新公式:

$$\vec{\omega}_k^{n+1} = \frac{\int_{\Omega_k} |\hat{u}_k(\vec{\omega})|^2 d\vec{\omega}}{\int_{\Omega_k} |\hat{u}_k(\vec{\omega})|^2 d\vec{\omega}} \quad (6)$$

$$\forall \vec{\omega} \in \Omega_k : \Omega_k = \{ \vec{\omega} | \vec{\omega} \cdot \vec{\omega}_k \geq 0 \}$$

式中 ω_k^{n+1} 是IMF的中心频率。

2D-VMD分解具体过程总结如下^[21]:

- 1) 初始化 $\{u_k^0\}, \{\omega_k^0\}, \{\lambda_k^0\}$ 和 n ;
- 2) 根据式(5)、式(6)迭代更新 u_k 和 ω_k ;
- 3) 根据 $\lambda^{n+1}(\omega) = \lambda^n(\omega) + \tau(f(\omega) - \sum_k u_k^{n+1}(\omega))$

更新 λ ;

- 4) 给定误差 $\epsilon > 0$,直到 $\sum_k \frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \epsilon$ 时

停止更新,否则返回2)继续进行。

1.2 VMD分解个数的选择

进行VMD分解时,笔者根据不同分解个数的瞬时频率均值^[22-23]变化情况确定 k 值。瞬时频率均值可以表示为:

$$f_N = \frac{1}{N} \sum_i^N f_{Ni} \quad (7)$$

式中 N 表示采样点数量, f_{Ni} 表示为第 i 点的瞬时频率。

随着分解个数增多,信号高频部分会出现断断续续的情况。尽管瞬时频率增高,但瞬时频率均值曲线会降低,曲线整体出现下降的趋势。当分解个数较少时,瞬时频率均值曲线的斜率较大,说明信号分解中缺少中间频段部分。当分解个数达到一定值时,瞬时频率均值曲线的斜率变化就不明显,说明此时已达到最优分解个数。因此,笔者选择瞬时频率均值曲线的斜率变化不明显时的值作为最优分解个数。

1.3 谱蓝化

谱蓝化方法实现流程是先通过反褶积技术得到地层反射系数,再利用平均地震振幅谱与测井反射系数振幅谱计算出谱蓝化算子,最后将谱蓝化算子与反射系数进行褶积^[24]。

叠前谱蓝化技术流程如图2所示:

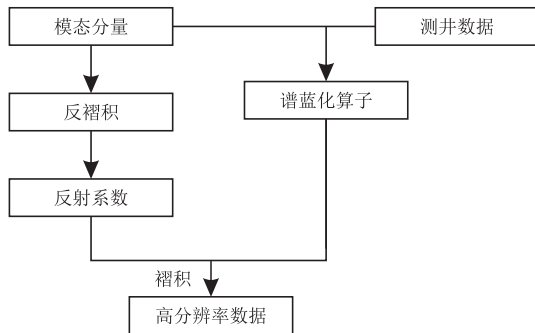


图2 谱蓝化高分辨流程图

Fig. 2 High resolution flow chart of spectral bluing

谱蓝化算子是该方法的核心部分,通过使地震平均振幅谱逼近测井反射系数振幅谱,从而可以计算出谱蓝化算子。具体实现步骤如下:

1)计算地震资料平均振幅谱。需要在频域中进行,先得到频域数据:

$$u_k(\omega) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} u_k(n\Delta t) e^{-i2\pi n\Delta f_n \Delta t} \quad (8)$$

然后根据公式(5)得到地震资料的实部 $Res_k(m\Delta f)$ 与虚部 $Ims_k(m\Delta f)$:

$$Res_k(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} u_k(n\Delta t) \cos 2\pi m \Delta f_n \Delta t \quad (9)$$

$$Ims_k(m\Delta f) = -\Delta t \sum_{n=0}^{M-1} u_k(n\Delta t) \sin 2\pi m \Delta f_n \Delta t \quad (10)$$

从而计算出地震信号的振幅谱:

$$|u_k(\Delta f)| = \sqrt{[Res_k(m\Delta f)]^2 + [Ims_k(m\Delta f)]^2} \quad (11)$$

由此对振幅谱进行各道叠加求取平均振幅谱并进行相应平滑得到最后的平均振幅谱:

$$\overline{u_k(f)} = \sum_0^N u_{kn}(f) / N \quad (12)$$

2)计算测井反射系数振幅谱。通过测井数据的密度与速度曲线计算出各井道的波阻抗 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = \rho_i * v_i \quad (13)$$

式中: ρ_i 为测井中的密度, v_i 为测井中的速度。由此可以计算出测井曲线的波阻抗频谱:

$$Z_i(j\omega) = Z_i(\omega) e^{-j\Omega(\omega)} \quad (14)$$

式中: $Z_i(j\omega)$ 为振幅谱, $\Omega_i(\omega)$ 为相位谱,由此可以得到反射系数 R_i :

$$R_i = (Z_{i+1} - Z_i) / (Z_{i+1} + Z_i) \quad (15)$$

可求出反射系数振幅谱 $C(\omega)$ 。

3)谱蓝化算子的计算。将步骤1)与步骤2)得到的地震振幅谱与测井反射系数振幅谱进行匹配。利用求解最优化问题的思想,使得地震资料的振幅谱尽可能地逼近测井反射系数振幅谱,让两者的差异最小化:

$$\min ||T(\omega)[B_k(\omega) \overline{u_k(\omega)} - C(\omega)]||^2 + R[B(\omega)] \quad (16)$$

式中 $T(\omega)$ 为锥形函数, $B_k(\omega)$ 为谱蓝化算子, $\overline{u_k(\omega)}$ 为平均地震振幅谱, $C(\omega)$ 为测井反射系数振幅谱, $R[B(\omega)]$ 为谱蓝化算子的正则化函数。

之后将谱蓝化算子与各模态的反射系数褶积:

$$S_k = B_k(\omega) * r_k \quad (17)$$

式中 S_k 为第 k 个本征模态分量的高分辨率数据, r_k 为第 k 个本征模态分量的反射系数。

最后将谱蓝化处理后的各个模态分量进行重构,从而得到最终的高分辨率数据,即:

$$\overline{S} = \sum_{k=1}^K S_k \quad (18)$$

2 实验结果与分析

2.1 模拟数据

为了分析基于VMD的谱蓝化方法的高分辨率处理能力,首先从模拟数据上验证其可行性。笔者建立了一个正演模型,如图3所示。

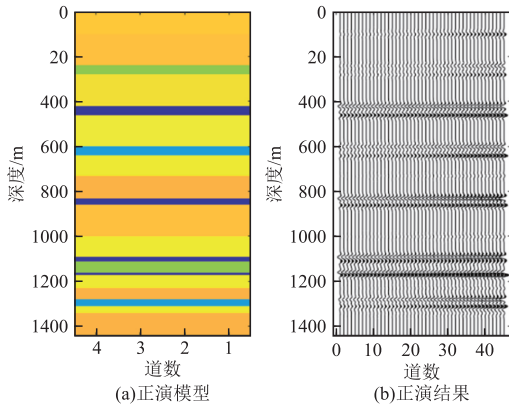


图3 正演模型及正演结果

Fig. 3 Forward model and result

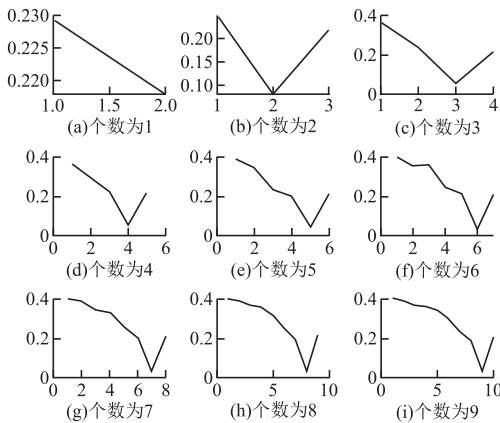


图4 不同本征模态分量个数的瞬时频率均值

Fig. 4 Mean instantaneous frequencies of different number of IMFs

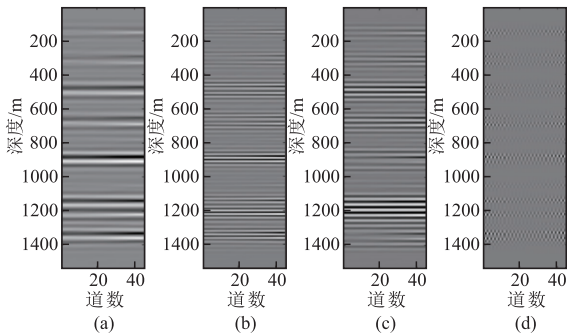


图5 本征模态分量

Fig. 5 Intrinsic mode function

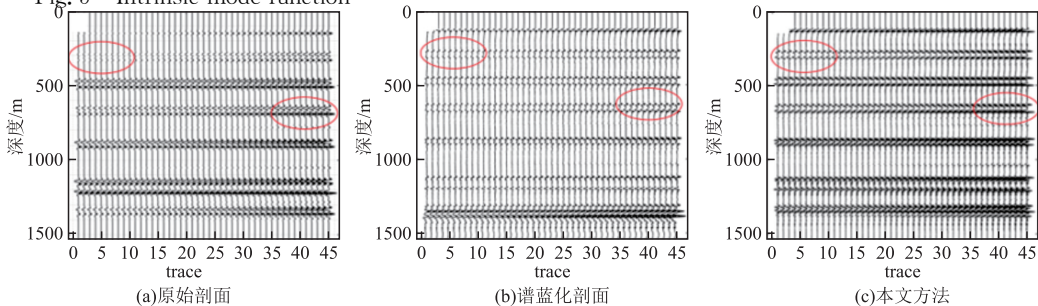


图6 正演数据高分辨处理结果

Fig. 6 High resolution processing of forward data

图4为不同本征模态分量个数的瞬时频率均值曲线。从该图可知,随着分解个数的增大,曲线整体呈下降趋势。当分解个数为1和2时,变化速度较快,说明分解个数过少,分解不充分,导致中间频率部分没有表示出来;当分解个数为3和4时,其瞬时频率均值的斜率变化规律基本一致;选择大于4的分解个数时对分解效果影响不大,只会增加计算量,因此最优分解个数为4。

通过对正演叠前道集进行VMD分解,得到的结果如图5所示。使用谱蓝化方法对各本征模态分量进行处理并重构后的数据(图6(c)),与原始数据(图6(a))和传统谱蓝化处理后的数据(图6(b))相比较,本方法提高了同相轴的连续性,使其更加清晰。

2.2 实际数据分析

研究区为四川盆地西部的川西拗陷,西邻龙门山推覆冲断构造带,东侧为川中隆起区。勘探的主要目的层为川西海相深层雷口坡储层。该储层非均质性强,埋藏较深,高频吸收严重,原始资料分辨率较低,有效波频带较窄,主频较低。因此,需要提高地震数据的分辨率,突出层间反射特征。笔者从研究区内选取一口典型井及其井旁道集数据进行处理,并与传统谱蓝化方法以及谱白化方法的处理结果进行了对比分析。最后将得到的谱蓝化算子应用于研究区,对其它测井进行井震标定。

图7给出了井旁道集数据及其与测井合成道集的标定结果。从图中可以看出,原始井旁道集波组特征相对清晰,但其存在连续性较差,部分同相轴不清晰的问题。

通过对叠前道集(图7)进行VMD分解,得到不同本征模态分量个数的瞬时频率均值曲线(图8)。当分解个数在1至2时,瞬时频率均值变化较快,说明分解个数不够,导致中间频率部分没有表示出来;当分量个数为3时,瞬时频率均值从0.4降至0.2左右,再由0.2降至0.1,由此可以说明分解的

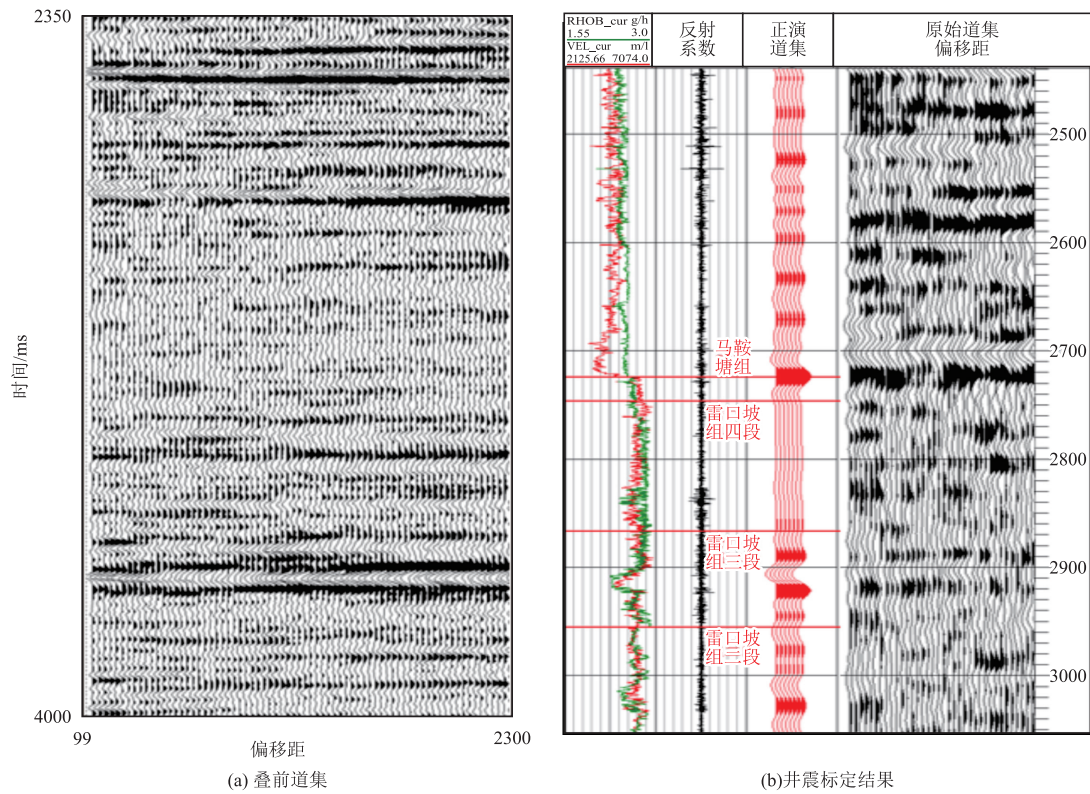


图7 叠前道集及井震标定结果

Fig. 7 Pre-stack path set and Calibration results

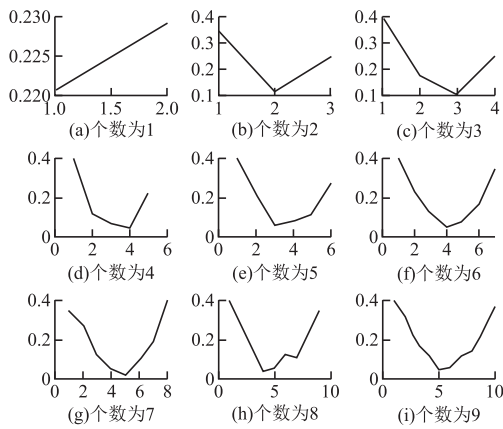


图8 不同本征模态分量个数的瞬时频率均值
Fig. 8 Mean instantaneous frequencies of different number of IMFs

不同分量特征得到体现;当分量个数为4时,曲线继续呈现下降趋势,但瞬时频率均值的斜率变化规律总体与分解个数为3时相似,且没有出现更多的斜率

变化,因此笔者选择其最优分解个数为4。

图9为地震数据经过VMD分解得到的不同本征模态分量,其中IMF4能量很弱,且无任何同相轴信息,因此我们认为IMF4为噪声。之后通过对IMF1、IMF2、IMF3进行谱蓝化处理并重构,得到高分辨叠前道集数据(图10(c))。图10为不同高分辨方法处理得到叠前道集,对2620 ms至2920 ms的区域进行放大对比,如图11所示。通过对原始数据以及谱白化方法和传统谱蓝化方法处理后的叠前道集相比,本方法得到的同相轴更清晰,连续性更强。图12为不同方法处理后得到的频谱,本方法处理后的频谱(图12(d))主频从23 Hz提高到了42 Hz,相较于传统谱蓝化方法与谱白化方法,再次补充了高频信息,提高了频带范围。

为了验证本方法的可靠性,对本方法处理后的叠前道集与测井正演道集进行了标定以及简单的AVO分析。

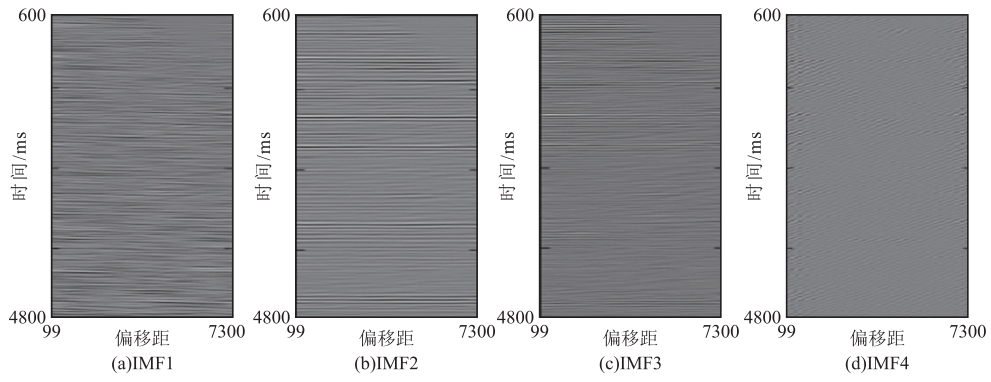


图 9 本征模态分量

Fig. 9 Intrinsic mode function

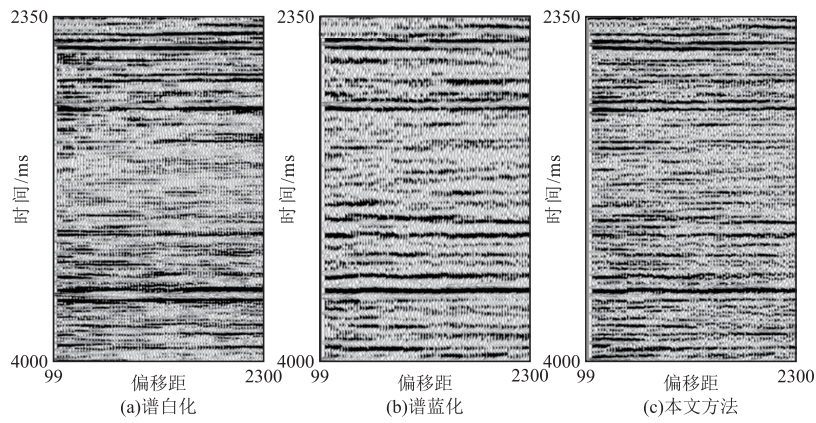


图 10 不同高分辨处理结果

Fig. 10 Different high resolution processing results

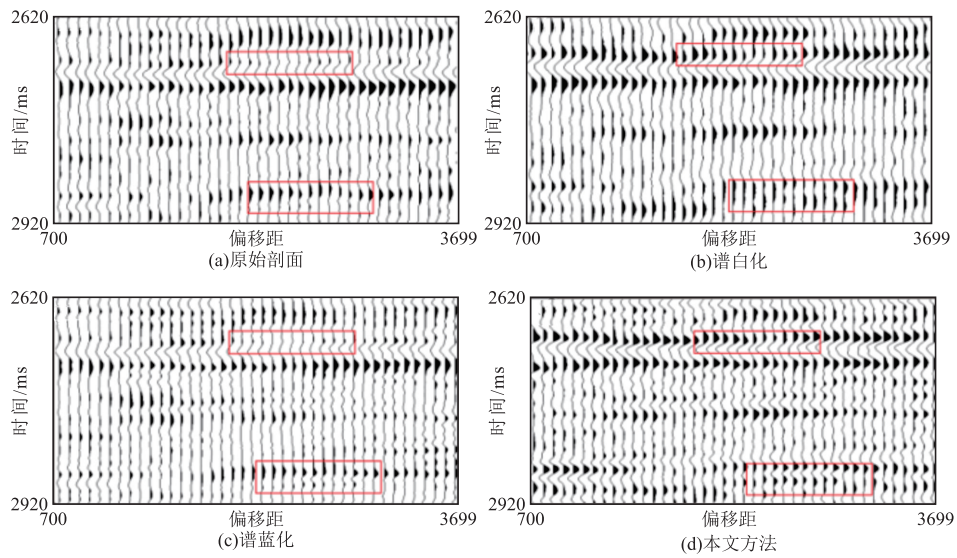


图 11 不同方法高分辨结果对比

Fig. 11 Comparison of high resolution results of different methods

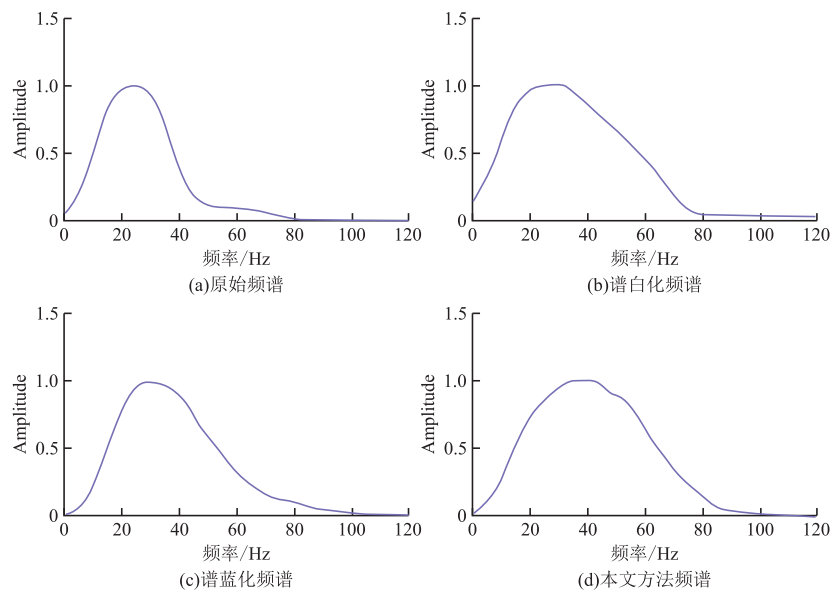


图 12 不同方法得到的频谱

Fig. 12 Spectrum obtained by each method

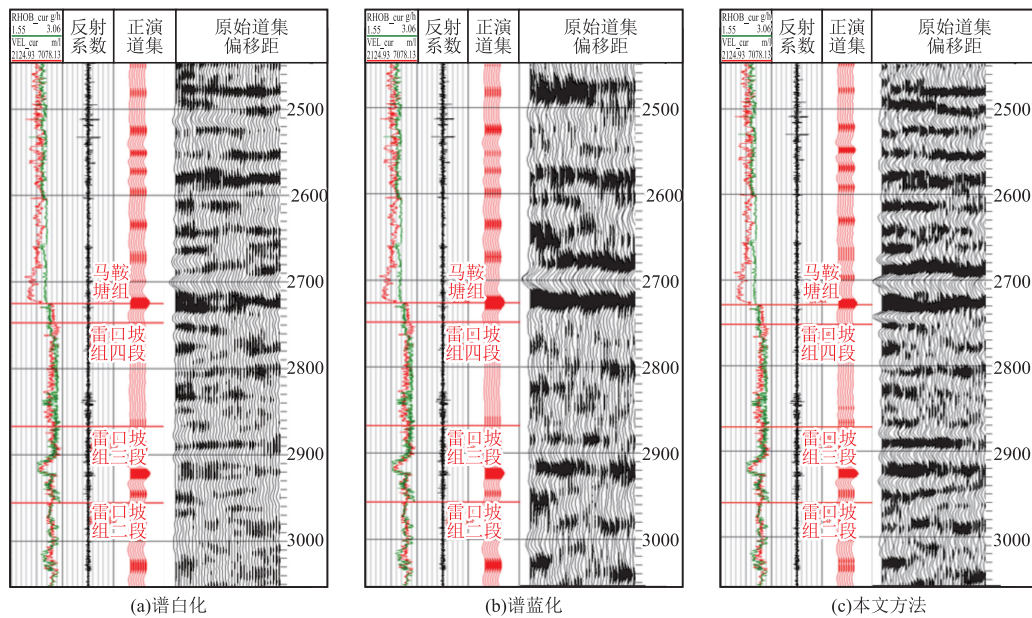


图 13 标定结果

Fig. 13 Calibration results

图 13 为不同方法处理得到的叠前道集与测井正演道集的标定结果。图 13(c)为本方法处理后的标定结果,可以分析出,经过本方法处理后的叠前道集(黑色)可以较好的与测井正演道集(红色)相匹配,两者一致性较好。原始标定较好的部分处理后依然能够有效地保持;原始数据受分辨率影响标定不好的界

面,经过高分辨处理后有所改善。井震标定相关系数由 0.792 11 提高到了 0.901 07。相较于谱蓝化与谱白化方法,本方法在雷口坡组三段和二段同相轴信息更加明显。之后将该井得到的谱蓝化算子应用于研究区,将其它两口井数据进行井震标定,如图 14 和图 15 所示。相较于原始数据,高分辨处理后的数据在

雷口坡组四段的同相轴信息以及最终的标定结果都得到了有效改善,说明该算子适用于全区。

接着对高分辨处理前后的叠前道集进行 AVO 分析,得到相应的 AVO 曲线(图 16)以及截距和梯度的乘积(PG)剖面(图 17)。对测井正演道集进行 AVO 分析得到理论 AVO 曲线(图 16(a)),该数据具有振幅随偏移距增大而减小的 AVO 特征。从图 16 中可以看出,原始数据的 AVO 曲线中振幅具有相同的变化特征。通过高分辨处理后,叠前道集的

AVO 特征曲线依然保持了该特点,说明本文研究方法保幅性较好。在进行 PG 剖面对比分析时,提取的结果采用相同的色标进行比较。红色范围表示储层含气区,其他颜色表示非储层(水层、非含气层等)。但是在图 17(a)中可以看出,在井的位置含气响应弱,含气性预测准确率较低。不同高分辨处理后的剖面如图 17(b)与图 17(c)所示,图 17(c)在井的位置可以明显看出含气响应特征,与实际测井分析情况更相符。

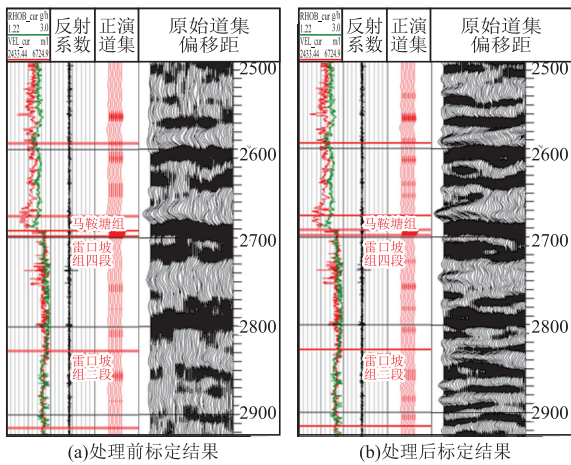


图 14 井 2 高分辨处理前后标定结果

Fig. 14 Calibration results of well 2 before and after high resolution treatment

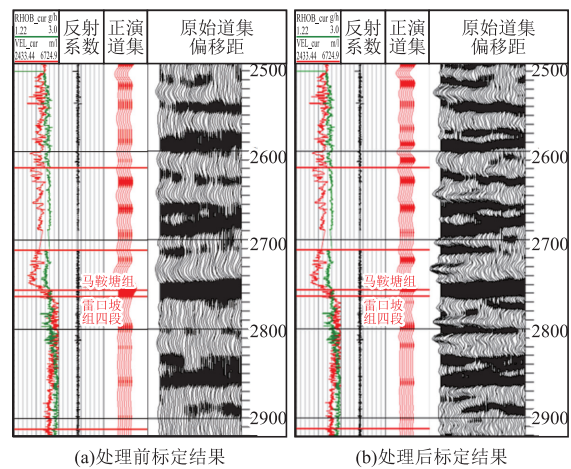


图 15 井 3 高分辨处理前后标定结果

Fig. 15 Calibration results of well 3 before and after high resolution treatment

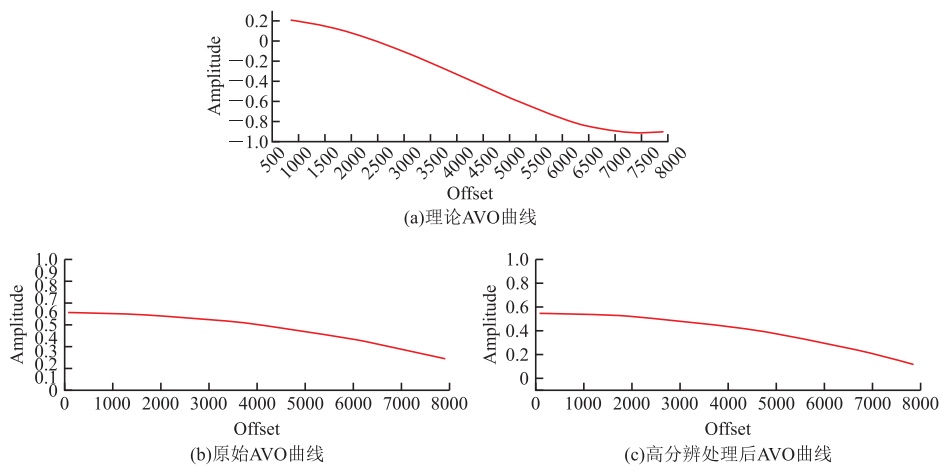


图 16 AVO 曲线

Fig. 16 AVO curve

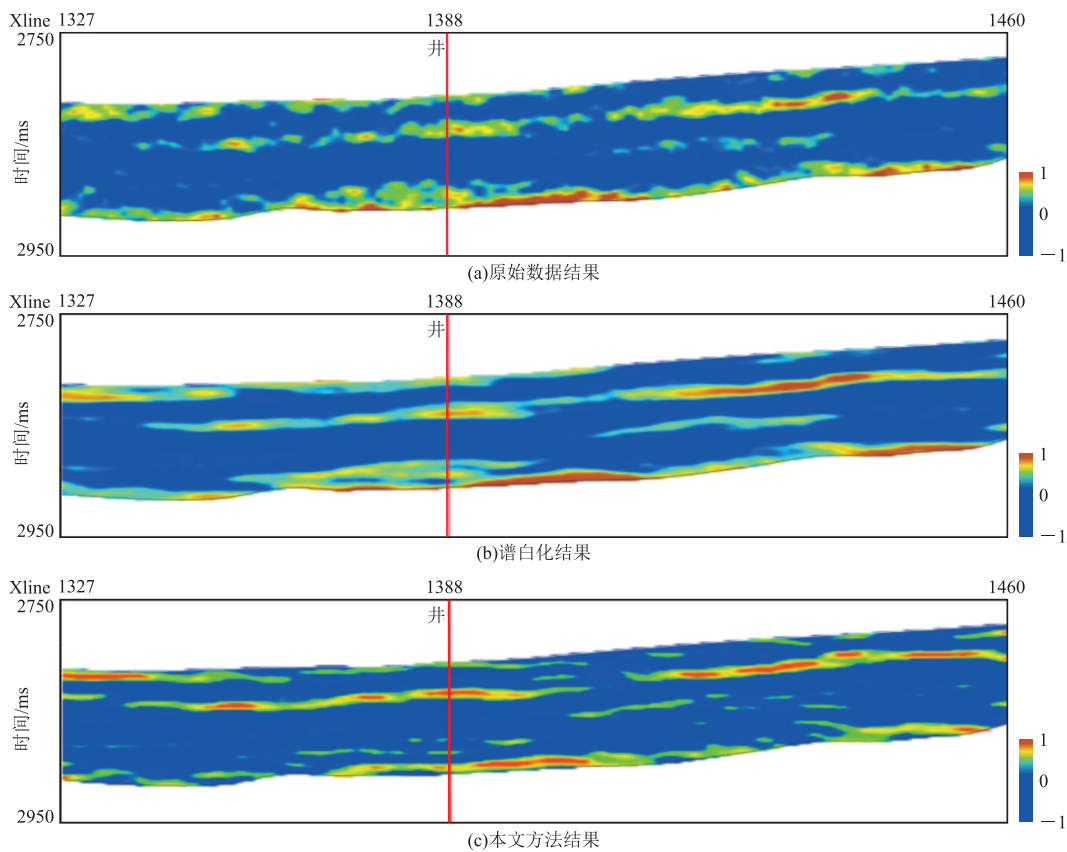


图 17 地震资料 AVO 分析的 PG 剖面

Fig. 17 The AVO analysis of the PG profile of the seismic data

3 结论

1) VMD 与谱蓝化方法相结合,对地震资料进行分模态处理可以较好地传统谱蓝化方法进行优化,进而有效地将整体频带提高,达到更高的分辨率。

2) 使用本方法对川西地区地震资料进行处理,拓宽了频带宽度,将主频从 23 Hz 提高到了 42 Hz,更加符合测井频谱特征。地震资料的同相轴数量增加,连续性增强。谱蓝化方法引入测井信息,加强地震与测井的联系,能够更真实地提高地震实际分辨率,降低假频的出现,并且具有较好的保幅性。

3) 通过将本方法处理后的叠前道集与测井正演道集进行标定,以及对比 AVO 分析的 PG 结果。可以得出,处理后的数据与测井信息相吻合。证实了本文方法的可靠性,为后续提高地震反演精度,以及识别薄互层打下了坚实的基础。

参考文献:

[1] 姜仁旗,吴键,CASTAGNA J,等. 地球物理技术最

新进展:高分辨率地震频率和相位属性分析技术研究与应用效果[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 199—212.

JIANG R Q, WU J, CASTAGNA J, et al. Recent advances in geophysical technology: High-resolution seismic frequency and phase analysis techniques and applications[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 199—212. (In Chinese)

[2] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531—544.

[3] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Two-dimensional variational mode decomposition[C]//international workshop on energy minimization methods in computer vision and pattern recognition. Cham: Springer, 2015: 197—208.

[4] 温志平. 基于模态分解技术的地震信号随机噪声压制[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.

WEN Z P. Seismic random noise attenuation based on modal decomposition technique[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2018. (In Chinese)

[5] 李琳琳. 基于二维紧致变分模态分解的沙漠地震信号噪声压制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

- LI L L. Research on desert seismic signal denoising based on 2D compact variational mode decomposition [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (In Chinese)
- [6] 计子琦, 张学强, 张海江, 等. 基于 VMD 的随掘地震超前探测信号谱白化方法研究[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 148—160.
- JI Z Q, ZHANG X Q, ZHANG H J, et al. Research on spectral whitening method of seismic while drilling ahead detection signals based on VMD[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2021, 30(2): 148—160. (In Chinese)
- [7] 姚姚, 刘兴利, 吴俊峰, 等. 基于随机介质的提高地震记录分辨率的扩频方法[J]. 石油物探, 2009, 48(3): 213—220.
- YAO Y, LIU X L, WU J F, et al. Spread spectrum method for improving seismic record resolution based on random medium[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(3): 213—220. (In Chinese)
- [8] 石殿祥, 李岩, 殷福亮, 等. 基于高阶累积量的非最小相位地震子波提取[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 491—499.
- SHI D X, LI Y, YIN F L, et al. Non—minimum phase wavelet obtainment based on high—order accumulated amount [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(5): 491—499. (In Chinese)
- [9] WALDEN A T, HOSKEN J W J. An investigation of the spectral properties of primary reflection Coefficients[J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33(3): 400—435.
- [10] 赵波, 俞寿朋, 贺振华, 等. 蓝色滤波及其应用[J]. 矿物岩石, 1998, 18(增刊 1): 230—233.
- ZHAO B, YU S P, HE Z H, et al. Blue filter and its application[J]. Mineralogy and Petrology, 1998, 18(S1): 230—233. (In Chinese)
- [11] BLACHE—FRASER G, NEEP J. Increasing seismic resolution using spectral blueing and colored inversion; Cannonball field, Trinidad[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004. Society of Exploration Geophysicists, 2004: 1794—1797.
- [12] LANCASTER S J, CONNOLLY P A. Fractal layering as a model for coloured inversion and blueing [C]//69th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007. London, UK, European Association of Geoscientists & Engineers, 2007: cp—27—00205.
- [13] 张华, 李路路, 于强, 等. 一种求取非卷绕相位的高阶“蓝色”反褶积方法[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(6): 42—46.
- ZHANG H, LI L L, YU Q, et al. A high—order “blue” deconvolution method using a non—winding phase[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(6): 42—46. (In Chinese)
- [14] 刘丽媛, 杨宏伟, 李九生, 等. 地层切片技术在油藏开发储层描述中的应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(3): 320—323.
- LIU L Y, YANG H W, LI J S, et al. Application of stratigraphic slice in reservoir exploration and interpretation[J]. Fault—Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 320—323. (In Chinese)
- [15] 刘建伟, 高秋菊, 师涛. 谱蓝化技术在大王庄油田储层预测中的应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(1): 31—34.
- LIU J W, GAO Q J, SHI T. Application of spectral blueing frequency technology in reservoir prediction of Dawangzhuang Area[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(1): 31—34. (In Chinese)
- [16] KAZEMEINI S H, FOMEL S, JUHLIN C. Prestack spectral blueing; A tool for increasing seismic resolution[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Society of Exploration Geophysicists, 2008: 854—858.
- [17] KAZEMEINI S H, YANG C, JUHLIN C, et al. Enhancing seismic data resolution using the prestack blueing technique; An example from the Ketzin CO₂ injection site, Germany[J]. GEOPHYSICS, 2010, 75(6): V101—V110.
- [18] VILLAMIZAR B, LIU H Y, CHENG N F. Increasing the value of seismic data with pre—stack spectral blueing [C]//SEG 2018 Workshop: Reservoir Geophysics, Daqing, China, 5—7 August 2018. Daqing, China. Society of Exploration Geophysicists and the Chinese Geophysical Society, 2018: 24—27.
- [19] 李贤兵, 赵俊杰, 晋剑利, 等. 叠前谱蓝化提频技术在乍得 Baob 油田储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(6): 1343—1348.
- LI X B, ZHAO J J, JIN J L, et al. Pre—stack spectrum blueing frequency increasing technique: A case study on reservoir prediction in Chad Baob Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(6): 1343—1348. (In Chinese)
- [20] 董政, 李黎, 赵伟超, 等. 井控道集谱蓝化技术在高分辨率储层预测中的应用: 以珠江口盆地 R 油田为例[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 201—208.
- DONG Z, LI L, ZHAO W C, et al. Application of well controlled gather spectral blueing technology in high resolution reservoir prediction: Taking R Oilfield

- of Pearl River Mouth Basin as an example[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2022, 27(2): 201–208. (In Chinese)
- [21] 付同强, 胡桥, 刘钰, 等. 基于优化二维变分模态分解与迁移学习的水下目标识别方法[J]. *水下无人系统学报*, 2021, 29(2): 153–163.
- FU T Q, HU Q, LIU Y, et al. Underwater target identification method based on optimized 2D variational mode decomposition and transfer learning[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, 29(2): 153–163. (In Chinese)
- [22] 张军. VMD在信号分解中的K值确定方法[J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2022, 36(4): 75–79.
- ZHANG J. The K value determination method of VMD in signal decomposition[J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences)*, 2022, 36(4): 75–79. (In Chinese)
- [23] 俞燕萍, 罗鹏斌, 杨先明, 等. 基于VMD的相控阵超声信号降噪方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(7): 261–266.
- YU Y P, LUO P B, YANG X M, et al. Research on noise reduction method of phased array ultrasonic signal based on VMD[J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(7): 261–266. (In Chinese)
- [24] 张璐, 汪毓铎. 地震数据分频谱蓝化算子计算方法及应用[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 63–68.
- ZHANG L, WANG Y D. Calculation and application of spectral blue operator of the frequency division seismic data[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2020, 35(1): 63–68. (In Chinese)

Research and application of pre-stack spectral bluing method based on VMD

XIAO Yufeng, CAO Junxing, FU Jingcheng, SHI Shaochen, XIANG Tao

(Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The resolution of pre-stack seismic data will affect the accuracy of pre-stack inversion and the results of AVO analysis, so it is particularly important to improve the resolution of the pre-stack track set. The spectral bluing high-resolution method combines well-logging information to make the seismic data close to the actual situation. However, in the calculation process, the average amplitude spectrum of each channel superposition is used to calculate the spectrum bluing operator, which leads to some spectral information not involved in the calculation. Therefore, this paper proposes a spectral bluing method based on VMD (variational mode decomposition method). The seismic data is decomposed into multiple IMFs (intrinsic mode components) through VMD. The spectral bluing operator is calculated to improve the resolution of each IMF, and the high-resolution seismic data results are obtained through reconstruction. The proposed method has been applied to the processing of synthetic track sets and actual seismic track set data. The results show that the spectral bluing method based on VMD can further improve the spectral information and the resolution of the pre-stack track set, and it is consistent with the forward track set of actual logging data

Keywords: pre-stack inversion; spectral blue; high resolution; variational mode decomposition