

局部平面波模型约束下的 迭代加权最小二乘反演三维地震数据规则化

刘玉金* 李振春

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555)

刘玉金,李振春. 局部平面波模型约束下的迭代加权最小二乘反演三维地震数据规则化. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 418~424

摘要 数据规则化是地震数据处理中一项十分重要的内容,本文提出一种基于迭代加权最小二乘反演的数据规则化方法。该方法的思路是:在 Cauchy 模意义下引入与模型有关的加权算子对数据拟合剩余量进行加权,可有效避免野值对插值结果的影响;采用平面波解构滤波器估计的局部倾角信息作为约束条件,不仅可保证反演过程稳定,而且能对假频数据有效插值;通过预条件共轭梯度法迭代求解,提高收敛速度;采用分时间切片并行化处理,可进一步提高三维地震数据规则化处理的效率。理论模型和实际地震数据的插值试验结果验证,本文提出的地震数据规则化处理方法速度快,效果好,具有较高实用价值和广泛应用前景。

关键词 三维数据规则化 最小二乘反演 迭代加权 预条件化 Cauchy 模 平面波解构滤波器 B-样条插值
中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

因受环境和其他条件制约,在三维地震勘探中采集到的数据往往出现采样不规则、缺道、坏道等现象。这些不规则地震数据对偏移成像^[1~3]、多次波压制^[4,5]和四维地震监测^[6,7]等处理效果产生严重影响。

现今常用的数据规则化方法可分为三类:

第一类是基于积分延拓算子的地震数据规则化方法,如炮检距延拓算子^[8]、炮点延拓算子^[9]、方位角延拓算子^[10]等。这类方法利用不同炮检距、炮点或者方位角数据之间的内在联系,将已知数据映射到待插值位置,达到数据规则化的目的,但这类方法不仅受积分孔径的限制,而且算子本身也受数据不规则性的影响。Cheningui^[11]提出并应用共炮检距反演方法消除了不规则性产生的映射噪声,但其计算成本太高。

第二类是基于 Radon 变换或者不规则离散傅

里叶变换的方法。Radon 变换插值方法通过在模型空间引入稀疏约束条件,使已知数据和缺失数据之间振幅平滑变化,可对缺失数据进行有效插值^[12,13]。不规则傅里叶变换法是将插值问题看成一个从采样不足数据恢复地震波场频谱的反演问题,通过加入不同的模型先验信息进行迭代求解,如稀疏频谱正则化^[14]和最小加权模频谱法^[15]等。这类方法计算效率较高,可较好地处理假频问题,应用也较广泛,但当数据信噪比较低且存在交叉同相轴时,很难进行准确插值。

第三类是基于褶积算子的迭代最优化方法。对于局部线性同相轴,通常的做法是与预测误差滤波器(PEF: Prediction Error Filter)进行褶积^[16,17],这类方法的计算效率较高,具有较好应用效果,但难以对大块缺失数据实施恢复,且无法兼顾数据的非稳态性。虽然非稳态滤波器可以解决第二个问题,但其计算成本太高,而且需设置的参数太多,人为因素影响较大^[18,19]。

Fomel^[20,21]从局部平面波模型出发,将局部倾

* 山东省青岛市中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266555。Email: einsteinliu@126.com

本文于2011年4月19日收到,最终修改稿于2012年4月4日收到。

本研究受国家自然科学基金项目(40974073)、国家863课题项目(2009AA06Z206)及中国石油大学(华东)自主创新科研计划前沿交叉基础项目(12CX04008A)联合资助。

角估计看成是一个非线性反演问题,通过牛顿法迭代求解得到地震数据的局部倾角信息,该方法不仅考虑了局部倾角随时间和空间变化的特点,还兼顾了同一位置同时存在多个局部倾角的情形。利用估计的局部倾角场可构造相应的平面波解构滤波器(PWD:Plane-wave Destructor),将其作为正则化算子,再结合精度较高的 B-样条正演插值算子,即可进行预条件共轭梯度法反演插值。该方法只需设置少量参数即能对非稳态数据进行精确的规则化,具有较好的应用效果,但该方法忽略了野值对插值结果的影响。

本文在 Fomel 方法的基础上,通过最小化数据拟合剩余量的 Cauchy 模,引入与模型有关的加权算子,采用迭代加权最小二乘反演做数据规则化处理,不仅可去除地震数据中的野值(振幅异常高或异常低的值),而且能消除野值对插值结果的影响。由于三维地震数据体各个时间切片相对独立,可采用分时间切片并行化处理,从而提高三维数据规则化处理的效率。本文在详细介绍这套方法基本原理的基础上,通过理论模型和实际资料的数据规则化处理,论证了本文方法的有效性。

2 方法原理

2.1 数据规则化的基本原理

数据规则化可表述为:给定不规则网格点上的数据 d ,在保留输入数据重要特征的前提下生成规则分布的输出数据 m 。该问题可看作在某些先验信息约束下使得观测数据与正演插值之后数据间误差能量达到最小的最优化反演问题,其数学表达式为

$$\mathbf{L}m - d \approx 0 \quad (1)$$

$$\mu \mathbf{D}m \approx 0 \quad (2)$$

式(1)称为数据拟合剩余量,式(2)称为模型剩余量。式中: \mathbf{L} 为正演插值算子; \mathbf{D} 为正则化算子; μ 为权衡两个剩余量权重的参数。在 L_2 模意义下最小化目标函数为

$$J = \|\mathbf{L}m - d\|_2 + \mu \|\mathbf{D}m\|_2 \quad (3)$$

式中 $\|r\|_2$ 表示向量 r 的 L_2 模。上式可通过共轭梯度法求解 m 。为了避免野值对数据规则化产生影响,本文采用 Cauchy 模估计数据拟合剩余量的能量,将式(3)目标函数变为

$$J = \|\mathbf{L}m - d\|_{\text{cauchy}} + \mu \|\mathbf{D}m\|_2 \quad (4)$$

式中 $\|r\|_{\text{cauchy}}$ 表示向量 r 的 Cauchy 模,其数学表达式为

$$\|r\|_{\text{cauchy}} = \sum_i \ln\left(1 + \frac{r_i^2}{\bar{r}^2}\right) \quad (5)$$

最优化目标函数(式(4))相当于对数据拟合剩余量引入与模型有关的加权函数,即式(1)变为

$$\mathbf{W}(\mathbf{L}m - d) \approx 0 \quad (6)$$

式中加权算子 \mathbf{W} 可看作是对角矩阵,对角线上各元素的值为

$$\mathbf{W} = \text{diag}\left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_i^2}{\bar{r}^2}}}\right] \quad (7)$$

\bar{r} 一般选择剩余量 r 的中值或者其他百分位。为了加快收敛速度,引入预条件算子 $\mathbf{P} = \mathbf{D}^{-1}$,并定义一个新的变量 p ,满足以下关系

$$m = \mathbf{P}p \quad (8)$$

最优化问题式(6)和式(2)变为

$$\mathbf{W}(\mathbf{L}\mathbf{P}p - d) \approx 0 \quad (9)$$

$$\mu p \approx 0 \quad (10)$$

同样,利用共轭梯度法求取 p ,代入式(8)即得到规则化后的数据 m 。

已知正则化算子 \mathbf{D} 可通过谱分解^[22]将其转化为最小相位,然后通过螺旋变换进行高维递归反褶积,实现预条件算子 \mathbf{P} ^[23, 24]。从前面的讨论可看出,数据规则化的关键在于选择合适的正演插值算子 \mathbf{L} 和正则化算子 \mathbf{D} (或预条件算子 \mathbf{P})。本文拟采用 B-样条插值算子作为正演算子 \mathbf{L} 、平面波解构滤波器作为正则化算子 \mathbf{D} 。下面分述这两个算子的基本原理和实现过程。

2.2 正演插值算子

数学插值理论考虑的问题是:假定存在一个 Hilbert 空间下的函数 f ,给定规则网格空间 N 上的函数值 $f(n)$,如何得到包含 N 的连续区间中任何点的函数值 $f(x)$ 。如果只考虑线性情况,该问题的解具有下面的形式

$$f(x) = \sum_{n \in N} W(x, n) f(n) \quad (11)$$

选择褶积型基函数^[25],使得函数 $f(x)$ 可表示为

$$f(x) = \sum_{k \in K} c_k \beta(x - k) \quad (12)$$

那么,各个网格点 n 上的函数值为

$$f(n) = \sum_{k \in K} c_k \beta(n - k) \quad (13)$$

零阶和一阶 B-样条分别对应于最邻近插值算

子和线性插值算子, n 阶 B-样条 $\beta^n(x)$ 可通过对零阶 B-样条 $\beta^0(x)$ (箱状函数) 的 $n+1$ 次褶积得到, 其显式表达式为

$$\beta^n(x) = \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^{n+1} C_k^{n+1} (-1)^k \left(x + \frac{n+1}{2} - k\right)_+^n \quad (14)$$

其中 C_k^{n+1} 为多项式系数, 函数 x_+ 定义为

$$x_+ = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

正演插值的实现流程是: ①根据离散点上的函数值 $f(n)$, 通过式(13)进行反褶积得到系数 c_k ; ②根据式(12)进行褶积得到所求点的函数值 $f(x)$; ③求得连续区间上的函数值 $f(x)$ 后, 通过采样即可得到各个离散点上的函数值 $f(n)$ 。在计算成本相同的情况下, 相对于其他插值方法, B-样条插值具有更高的计算精度。

2.3 三维平面波解构滤波器

实际上, 数据规则化最关键的问题不是选取正演算子 L , 而是选取正则化算子 D (或预条件算子 P)^[20]。最理想的正则化算子应该具有与模型数据互逆的谱, 这样模型经过正则化算子滤波后的输出为白噪, 剩余部分的能量达到最小。由于模型和正则化算子都是未知待求的, 该问题便归结为一个非线性反演问题。为了避免非线性问题的不稳定性, 采用两步法解决: 首先利用已知数据估计理想的正则化算子; 然后再利用估计的正则化算子恢复缺失数据。这样恢复数据就具有与已知数据相同的谱, 从而得到更合理的插值结果。常用的正则化算子是 PEF 滤波器。

本文采用的 PWD 滤波器是一种特殊的 PEF 滤波器, 它考虑的是地震数据的局部倾角信息, 通过 PWD 估算地震同相轴的局部倾角, 将时间方向 (一般采样充分) 和空间方向 (通常采样不足) 联系起来, 对模型数据进行约束以达到对空间假频数据插值的目的。

三维平面波解构滤波器可用以下偏微分方程组描述^[20,21]

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \sigma_x \frac{\partial}{\partial t}\right)P(t, x, y) = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial y} + \sigma_y \frac{\partial}{\partial t}\right)P(t, x, y) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P(t, x, y)$ 为三维地震数据体; σ_x 和 σ_y 分别为

同相轴在 $t-x$ 平面和 $t-y$ 平面的斜率, 该方程组可离散为两个二维有限差分滤波器与地震数据褶积, 即

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} m = 0 \quad (17)$$

式中 C_x 和 C_y 分别表示 $t-x$ 平面和 $t-y$ 平面作用于模型向量 m 的褶积算子, 也即两个二维的平面波解构滤波器, 可通过非线性反演得到。

为了便于模型的预条件化, 采用谱分解方法得到一个最小相位的三维滤波器 C 以替代前面两个褶积算子 C_x 和 C_y , 然后即可在螺旋坐标系^[24]下进行高效递归反褶积

$$C^T C = \begin{bmatrix} C_x^T & C_y^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} = C_x^T C_x + C_y^T C_y \quad (18)$$

三维数据规则化的处理流程是: ①根据已知数据估计数据体的局部倾角场; ②根据估算的局部倾角构造平面波解构滤波器, 作为正则化算子; ③在各个时间切片上, 结合 B-样条插值算子采用迭代加权最小二乘预条件共轭梯度法进行反演插值, 得到最终插值结果。

3 模型试算

3.1 一维数据规则化

采用一个正弦信号进行一维数据规则化测试。图 1a 为原始正弦信号, 共有 200 个采样点, 选取由密到疏不规则分布的 81 个点进行信号恢复 (图 1b)。采用线性插值算子作为正演算子 L , 三点预测误差滤波器^[24]作为正则化算子 D 。图 1d 为采用式(1)、式(2)进行正则化迭代反演的结果, 图 1e 为采用式(9)、式(10)进行预条件共轭梯度法迭代反演的结果, 两种迭代方法每步的计算量大致相同。从其对比可看出: 随着迭代次数的增加, 正则化迭代的解从复杂到简单; 预条件共轭梯度法迭代的解从简单到复杂, 更加符合常理, 而且迭代收敛速度要快得多。

对原始输入的 81 个采样点加入随机突发噪声 (图 1c), 分别进行常规最小二乘预条件反演插值 (图 1f) 和加权最小二乘预条件反演插值 (图 1g), 从插值结果对比图可看出: 因突发噪声影响, 常规最小二乘反演无法得到正确的插值结果 (图 1f), 而迭代加权最小二乘反演规则化不仅能够去除突发噪声, 且可取得较好插值结果 (图 1g)。

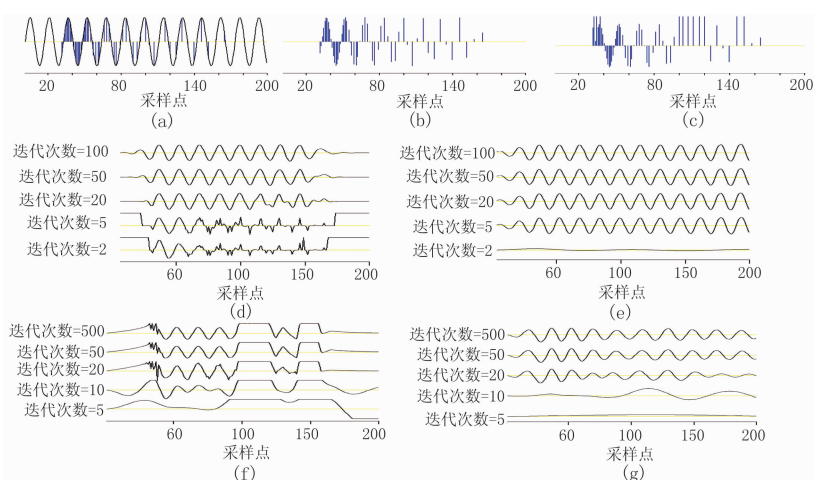


图 1 一维数据规则化测试

(a)原始正弦信号;(b)不规则分布的输入信号;(c)对(b)加入随机分布的突发噪声;(d)对(b)最小二乘正则化反演的插值结果;(e)对(b)最小二乘预条件反演的插值结果;(f)对(c)最小二乘预条件反演的插值结果;(g)对(c)迭代加权最小二乘预条件反演的插值结果

3.2 三维模型数据规则化

采用 Claerbout 正演的 qdome 叠后模型数据进行测试。该模型含有一个背斜,背斜内部存在一个正断层(图 2a)。对该模型加入随机突发噪声,然后随机移除 50% 的地震道,得到输入数据(图 2b)。采用三阶 B-样条函数构造正演插值算子,以平面波

解构滤波器作为正则化算子,得到常规最小二乘反演插值结果(图 2c),可见插值结果受突发噪声影响严重,从中很难看出原始模型的基本构造。而从迭代加权最小二乘反演插值结果(图 2d)可看出,不仅去除了突发噪声,还精确地恢复了平层和弯曲同相轴。

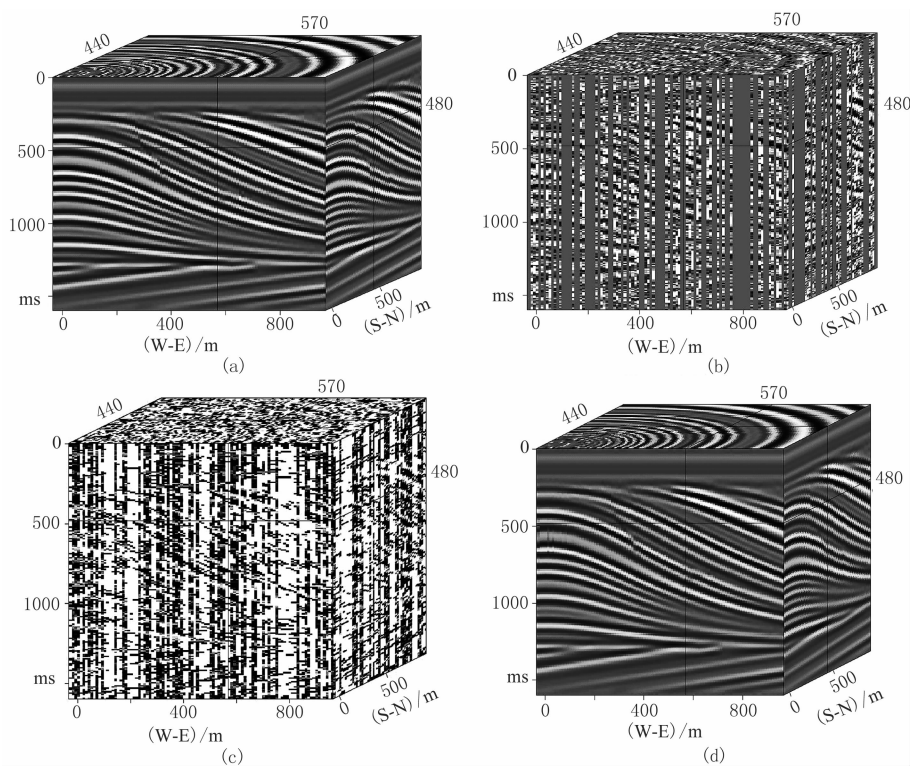


图 2 三维 qdome 模型数据规则化测试

(a)原始模型;(b)含噪输入数据;(c)常规最小二乘反演插值结果;(d)迭代加权最小二乘反演插值结果

3.3 三维实际资料数据规则化

对 M 探区三维实际资料进行共方位角校正后,抽取一个共炮检距道集进行数据规则化测试。

图 3a 为该共炮检距道集的 CMP 分布图;图 3b 为进行面元归一化后各个 CMP 面元的覆盖次数图,可看出其中存在一些空白面元,且数据分布不规

则。图 4a 为面元归一化后的三维数据体;图 4b 为三维平面波解构滤波器估计的局部倾角场。采用三阶 B-样条函数构建插值算子,以平面波解构滤波器作为正则化算子,分时间切片进行并行反演规则化。图 5a 为常规最小二乘反演插值结果;图 5b 为迭代加权最小二乘反演插值结果。对比两图可看出,

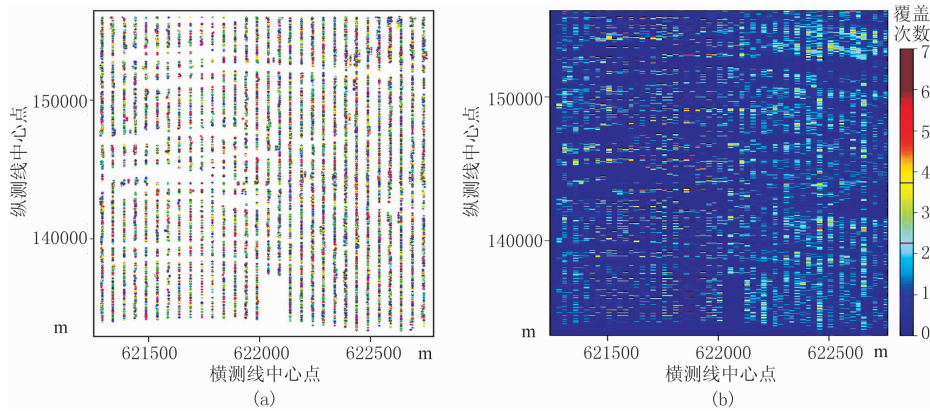


图 3 CMP 面元分布及覆盖次数图
(a)CMP 面元分布图; (b)CMP 面元覆盖次数图

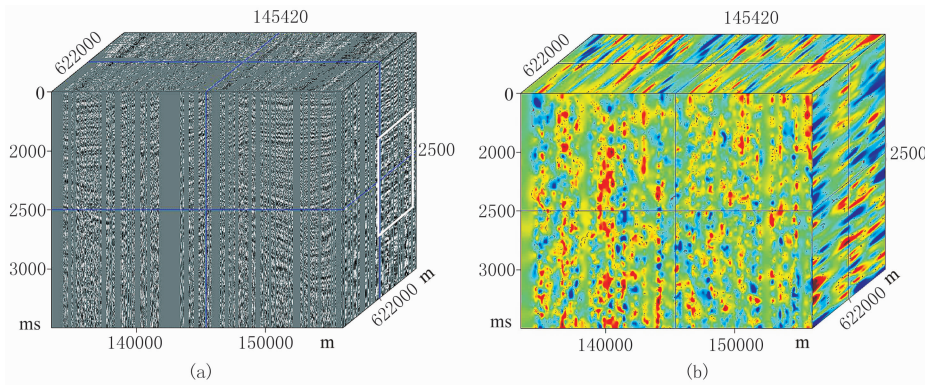


图 4 面元化后的数据体及估计出来的局部倾角
(a)面元化后的共炮检距道集数据体; (b)三维 PWD 估计的局部倾角

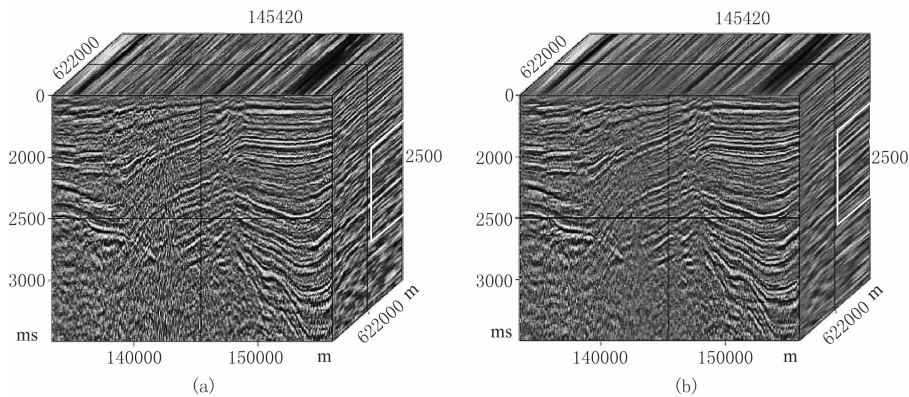


图 5 数据规则化后的结果
(a)常规的最小二乘反演插值结果; (b)迭代加权最小二乘反演插值结果

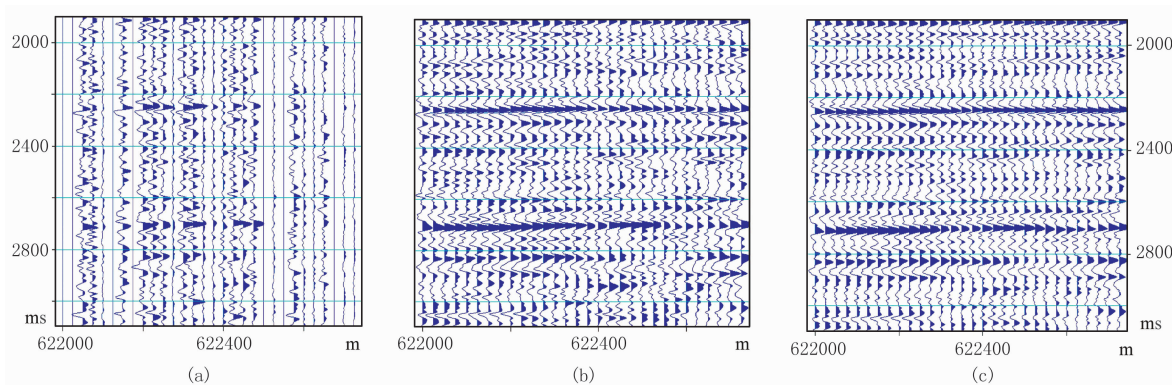


图 6 局部放大后的结果

(a)图 4a 白框的放大图; (b)图 5a 中白框的放大图; (c)图 5b 中白框的放大图

插值后同相轴变化连续,基本看不出原始数据和插值数据之间的区别。图 6 中各图分别为图 4a、图 5a、图 5b 中白框对应部分的放大显示,对比可看出,迭代加权反演数据规则化插值结果(图 6c)上同相轴变化更加自然,信噪比更高,从而验证了本文方法的有效性。

4 结论

地震数据规则化可看作是在某些先验信息约束下使观测数据与正演插值后数据间误差能量达到最小的最优化反演问题。本文在常规最小二乘反演基础上,采用 Cauchy 模估算数据拟合剩余量的能量,并引入局部平面波模型作为约束条件,通过迭代加权最小二乘反演对三维数据体进行了数据规则化处理。从理论模型和实际资料处理结果,可以得到以下认识和结论:

(1)地震数据中存在的野值会影响数据规则化方法的收敛速度和插值效果,采用 Cauchy 模估算数据拟合剩余量的能量,相当于反演过程中引入与模型有关的加权函数,可有效地消除野值对插值的影响,使插值后的地震波同相轴更加自然,信噪比更高;

(2)采用平面波解构滤波器作为正则化算子,不仅可保证反演过程稳定,而且能对假频数据进行合理的插值;

(3)对加权最小二乘反演问题进行求解时,与正则化最小二乘反演方法相比,采用预条件共轭梯度法具有迭代次数少、收敛迅速等诸多优点;

(4)在三维数据规则化处理中,因各个时间切片

反演过程相互独立,故可采用分时间切片进行计算机并行化处理,从而进一步提高三维数据规则化处理的效率。

因此,本文提出的地震数据规则化处理方法具有较高应用价值和广泛应用前景。

感谢 CGG Veritas 公司给予的软件支持。

参考文献

- [1] Gardner G H F, Canning A. Effects of irregular sampling on 3-D prestack migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1994, 13: 1553~1556
- [2] Biondi B and Palacharla G. 3-D prestack migration of common-azimuth data. *Geophysics*, 1996, 61(6): 1822~1832
- [3] Biondi B. *3-D Seismic Imaging*. Stanford Exploration Project, 2004
- [4] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596~1611
- [5] van Dedem E J, Verschuur D J. 3-D surface-related multiple elimination and interpolation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 17: 1321~1324
- [6] Legott R J, Williams R G, Skinner M. Co-location of 4D seismic data in the presence of navigational and timing errors. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1999, 18: 1699~1702
- [7] Morice S, Ronen S, Canter P et al. The impact of positioning differences on 4D repeatability. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19: 1611~1614
- [8] Fomel S and Bleistein N. *Amplitude Preservation for Offset Continuation; Confirmation for Kirchhoff Data*. 1996, SEP-92: 219~227
- [9] Bagaini C and Spagnolini U. 2-D continuation operators and their applications. *Geophysics*, 1996, 61(6):

- 1846~1858
- [10] Biondi B, Fomel S and Chemingui N. Azimuth move-out for 3-D prestack imaging. *Geophysics*, 1998, 63(2):574~588
- [11] Chemingui N. *Imaging Irregularly Sampled 3D Prestacked Data*[D], Stanford University, 1999
- [12] Sacchi M and Ulrych T. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, 1995, 60(4):1169~1177
- [13] Trad D, Ulrych T, Sacchi M. Latest views of the sparse Radon transform. *Geophysics*, 2003, 68(1):386~399
- [14] Sacchi M and Ulrych T. Estimation of the discrete Fourier transform, a linear inversion approach. *Geophysics*, 1996, 61(4):1128~1136
- [15] Liu B, Sacchi M. Minimum weighted norm interpolation of seismic records. *Geophysics*, 2004, 69(4):1560~1568
- [16] Spitz S. Seismic trace interpolation in the $f-x$ domain. *Geophysics*, 1991, 56(6):785~794
- [17] 国九英, 周兴元, 俞寿朋. $F-X$ 域等道距内插. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1):28~34
Guo Jiuying, Zhou Xingyuan, Yu Shoupeng. Iso-interval trace interpolation in $F-X$ domain. *OGP*, 1996, 31(1):28~34
- [18] Sean Crawley. *Interpolation with Smoothly Non-stationary Prediction-error Filters* [D], Stanford University, 1999
- [19] William Curry. *Interpolation with Prediction-error Filters and Training Data* [D], Stanford University, 2008
- [20] Sergey Fomel. *Three Dimension Seismic Data Regularization* [D], Stanford University, 2001
- [21] Sergey Fomel. Applications of plane-wave destruction filters. *Geophysics*, 2002, 67(6):1946~1960
- [22] Paul Sava, Sergey Fomel. *Spectral Factorization Revisited*. Stanford Exploration Project, 1999, SEP100, 227~235
- [23] Claerbout J F. *Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion*. Blackwell Scientific Publications, 2004
- [24] Claerbout J F. *Geophysical Estimation by Example: Geophysical Soundings Image Construction and Multidimensional Auto-regression*. Stanford Exploration Project, 2009
- [25] Unser M, Aldroubi A, Eden M. B-spline signal processing: Part I - Theory. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(1):821~832

(本文编辑:朱汉东)

• 消息 •

《石油地球物理勘探》2012年协办会在江西景德镇举行

2012年《石油地球物理勘探》协办工作会于4月12~14日在江西省景德镇市举行,各协办单位均派代表出席了会议。

本刊主编、东方地球物理公司原总工程师钱荣钧对出席本次会议的代表和专家致以热烈欢迎,感谢各协办单位及专家对《石油地球物理勘探》杂志多年来的支持与帮助,希望各位代表在会上对编辑部过去一年的工作多提批评意见,指出存在的不足,以促进编辑部在今后的工作中有针对性地加以改进。

本刊常务副主编冯小球就编辑部过去一年的工作向与会代表进行了认真汇报,主要包括期刊全年的出版情况、稿件的来源、期刊的发行与传播以及编辑部工作制度的建设等。

与会代表对编辑部的工作报告进行了认真讨论,就编辑部的审稿选稿、栏目设置提出了许多具体的建议,并表示将一如既往地支持编辑部的工作,与主办单位共同努力将《石油地球物理勘探》这本属于全体物探人的杂志办好。

最后,钱荣钧主编对整个会议进行了总结。他首先对各位代表在讨论过程中积极提出宝贵意见和建议表示感谢,要求编辑部会后进行认真整理、分析,在今后的工作中加以落实和改进。综合与会代表的意见,对编辑部工作提出以下几点具体要求:

- (1)加强与科研管理部门及科研人员的沟通,使选稿工作更有针对性和前瞻性;
- (2)加强审稿工作,增进与审稿专家的交流,努力缩短稿件的报道周期;
- (3)在充分调研的基础上,跟踪行业的热点,主动约请专家撰写指导性、综述性的论文,引领技术发展方向;
- (4)适时组织专题讨论,努力营造活跃的学术交流氛围。

《石油地球物理勘探》编辑部