

doi: 10.11720/wtyht.2018.0053

许璐.地震数据炮域规则化方法研究及应用[J].物探与化探,2018,42(6):1245-1252.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0053

Xu L. Research on the regularization method for seismic data in shot domain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1245-1252. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0053

地震数据炮域规则化方法研究及应用

许 璐

(中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 叠前深度逆时偏移成像技术是目前处理复杂高陡构造成像的有效方法之一,作为一种高精度的炮域波动方程偏移方法,需要规则采集的高质量炮集数据作为输入。受复杂地质条件的限制,实际采集到的地震数据在空间方向往往是稀疏不规则采样的,存在严重的空间假频和噪声干扰,不满足炮域偏移算法对数据的要求。为了提高逆时偏移成像精度,笔者开展了叠前地震数据炮域规则化方法研究,依据偏移距和方位角将炮集数据分选为 OVT (offset vector tile) 道集,在 OVT 域进行地震数据全波数带的迭代加权反假频插值,再基于几何观测系统中炮检点坐标映射关系,从 OVT 域插值结果中提取规则化后的炮集数据并应用于逆时偏移成像。实际资料的应用结果表明对地震数据进行叠前炮域规则化处理可以有效提高逆时偏移的成像精度。

关键词: OVT 域;规则化;反频谱泄漏;反假频;逆时偏移

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)06-1245-08

0 引言

实际野外地震数据采集过程中受采集成本以及复杂地表条件的限制,地震数据在空间方向往往是稀疏不规则采样的,不规则采集数据会造成地下响应信息的缺失从而影响偏移成像的质量。针对地震数据的规则化问题,国内外学者开展了深入研究如 Spitz 等^[1]研究了 $f-x$ 域单步预测滤波插值算法,利用数据的低频部分实现对高频的去假频插值; Jakubowicz 等^[2]利用 \sin 函数进行地震道插值与数据重建;Kao 等^[3]讨论了含假频的非均匀采样地震数据插值方法;Gulunay 等^[4]提出了广义 $f-k$ 域地震数据插值方法;Duijndam 等^[5]研究了基于非均匀傅里叶变换的不规则地震数据重建方法,能适应于任意不规则采集数据;Liu 等^[6]提出的 MWNI (minimum weighted norm interpolation) 方法假设地震数据采样是随机的并从反问题出发来对带限地震信号进行规则化处理;Xu 等^[7]针对不规则采集存在的频谱泄漏问题,提出了反泄漏傅里叶变换 (antileakage

Fourier transform, ALFT) 规则化算法;Abma 等^[8]将反假频凸集投影 (projection onto convex sets, POCS) 方法从图像处理领域引入到地震数据规则化处理,该方法是一种基于傅里叶变换的迭代阈值插值方法;在国内,许多学者也进行了针对性研究,推动了稀疏不规则采集地震数据重建技术的发展^[9-15]。

目前,逆时偏移是复杂构造高精度成像中最精确的方法之一,通过直接求解双程波波动方程,精确地描述了波场的传播特征,理论上可以利用全波场的信息对地下构造进行精确成像,并且突破了倾角对成像的限制,适用于高陡构造以及纵、横向速度变化较为剧烈情况下的偏移成像问题^[16-20],在实际生产中得到广泛应用。逆时偏移作为一种炮域波动方程偏移,其算法要求输入数据是规则采集、照明均匀的炮集数据。现有常规地震数据规则化方法由于缺少炮检点的坐标信息,不能实现规则化后炮集数据的有效提取,限制了常规地震数据规则化技术在逆时偏移等炮域偏移方法中的应用。陈可洋等^[21]分析了稀疏炮集对逆时偏移成像质量的影响,并对频率—空间域三维插值前后逆时偏移结果进行了效果

收稿日期: 2018-01-29;修回日期: 2018-07-03

基金项目: 国家科技重大专项(2017YFB0202904)

作者简介: 许璐(1985-),男,硕士,2012年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地震波传播与偏移成像相关研究工作。Email: xulu.swty@sinope.com

分析,并指出目前针对炮域规则化及其在逆时偏移中的应用研究较少。文中构建了一种适用于叠前地震数据炮域规则化方法的技术流程,首先基于偏移距和方位角将地震数据分选为 OVT 道集,由于 OVT 道集具有相同的偏移距和方位角,相对于常规道集其具有更高的相似性,能提高数据插值的精度和可靠性;然后在 OVT 域进行地震数据全波数带迭代加权的反假频插值处理;最后基于几何观测系统中炮检点坐标映射关系,从 OVT 域插值结果中提取规则化后的炮集数据并应用于逆时偏移成像,该方法具有反频谱泄漏、反假频、抗噪声的优势。实际资料应用结果表明该方法可以有效提高逆时偏移的成像精度。

1 方法原理

1.1 地震数据的不规则采样

随着“两宽一高”地震采集技术的发展使得地震数据量陡增,一方面密集采样的数据有利于更准确地获得地下结构信息,另一方面受复杂地表条件的限制,造成地震数据在空间方向的稀疏不规则采样,不满足地震数据处理和成像方法对地震数据空间规则性的要求。实际采集到的地震数据可以认为是完整采样数据的稀疏表达:

$$\mathbf{d}^{\text{obs}} = \mathbf{R}\mathbf{d}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{d}^{obs} 为实际采集地震数据, \mathbf{d} 为理想的完整数据, \mathbf{R} 为稀疏矩阵,地震数据的重建就是由稀疏不规则采集数据 \mathbf{d}^{obs} 恢复 \mathbf{d} 的过程。

由奈奎斯特采样定理可知,若式(1)表达的是规则采样的带限信号,则 sinc 函数的基函数满足正交条件,可以利用 sinc 函数实现信号的精准重建^[12]。而不规则采样数据破坏了 Fourier 基函数的正交性,使得某个频率成分的 Fourier 系数泄漏到其他频率成分上,造成理想频谱中零值处出现了非零值,影响了数据精确谱的估计,这种由于空间不规则采样产生的现象称之为频谱泄漏现象。同时,不规则地震数据还会引起空间假频,并且随着缺失道比例的增加,数据中的噪声干扰也会越来越严重。针对不规则采样数据中存在的问题,为了提高常规逆时偏移成像精度,需要对不规则地震数据进行炮域的规则化处理。

1.2 OVT 域迭代加权反假频插值方法

OVT 的概念最早由 Vermeer 等^[22]提出,在十字排列观测系统中炮线和检波线划分得到 OVT 单元,所有具有相同偏移距和方位角的 OVT 单元构成

OVT 道集,每个 OVT 道集理论上为覆盖整个工区的单次覆盖数据体。由于 OVT 道集中每道具有近似相等的偏移距和方位角,因此 OVT 道集具有很好的相似性,利用这种相似性能有效提高数据重建的精度和可靠性。Abma 等^[13]将 POCS 方法从图像处理领域引入到地震数据的插值处理中取得了良好的应用效果。笔者基于常规 POCS 算法实现了地震数据 OVT 域的全波数带迭代加权反假频插值方法,由于保留了每个频率波数成分的有效信号,保护了数据中弱信号不受损失;再通过几何观测系统中炮检点坐标映射关系,将 OVT 域插值结果输出为规则化后的炮集数据并应用于逆时偏移成像。

式(1)是一个欠定方程,可以利用阈值逐渐减小的迭代方式进行求解,设傅里叶变换为 \mathbf{F} ,则其迭代格式为:

$$\mathbf{d}^{i+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{R}^T\mathbf{R})\mathbf{F}^T\tau_i\mathbf{F}\mathbf{d}^i + \mathbf{d}^0, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{d}^0 = \mathbf{R}^T\mathbf{d}^{\text{obs}}$ 为迭代初始值。为了避免频谱泄漏以得到精确的频谱估计,Xu 等^[12]提出了反频谱泄漏的傅里叶变换算法(ALFT),地震数据非规则采样单频率成分 k 的傅里叶正、反变换为:

$$\begin{cases} \hat{f}(k) = \frac{1}{\Delta X} \sum_{l \in N} \Delta x_l f(x_l) e^{-2\pi i k x_l}, \\ f^k(x_l) = \hat{f}(k) e^{2\pi i k x_l}. \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Delta X = \sum \Delta x_l$, $\hat{f}(k)$ 为频率成分 k 的傅里叶变换系数, $f^k(x_l)$ 为频率成分 k 的傅里叶变换系数对时间采样点 x_l 的贡献。为了在迭代求解过程中压制频谱泄漏现象,需要对频谱能量依次从大到小进行处理来消除频谱泄漏对精确谱估计造成的影响,实现 Fourier 基函数的重正交。其迭代过程为:利用式(3)对原始数据进行傅里叶变换得到 $f-k$ 域数据 $d(f,k)$;设定当前迭代条件下的阈值 τ_i ,将频谱振幅小于阈值的成分置零,对重置后的频谱进行空间方向的傅里叶反变换得到频率域重建后数据 $d^{\text{rec}}(f,x)$,将 $d^{\text{rec}}(f,x)$ 中已采样数据用原始数据 $d(f,x)$ 替换,则原始采样处数据保持不变而未采样处数据则被重建,得到更新数据体 $d^i(f,x)$;降低阈值,对所有频率成分重复以上步骤进行多次迭代,直至满足迭代次数或误差终止条件。

常规 POCS 规则化算法计算量巨大,不能满足实际大规模生产需求,为了减少计算量,常规方法只在一定频带范围内进行数据重建,忽略了弱反射信息能量,不利于复杂断裂构造成像的精细刻画。为了充分利用地震数据中所有信息进行数据重建,笔者在全频带波数范围内对振幅积分能量进行分析从

而确定优势频带,同时依据迭代次数对全波数带进行分组,以此来确定每次迭代的衰减阈值 τ_i ,避免了常规算法中由于阈值确定不当造成的弱有效信号的损失,这对于提高复杂探区微幅构造和小断裂成像质量具有重要意义。按照振幅能量积分从大到小设定线性衰减阈值,其表达式为:

$$\tau_{i_{ter}}(f, k) = \tau_{\max}(f, k) - \frac{\tau_{\max}(f, k) - \tau_{\min}(f, k)}{n_{ter} - 1} i_{ter}, \quad (4)$$

其中: $\tau_{\max}(f, k)$ 、 $\tau_{\min}(f, k)$ 为依据振幅能量积分确定的最大和最小阈值, $\tau_{i_{ter}}(f, k)$ 为当前频率第 i_{ter} 次迭代的波数域阈值, n_{ter} 为总迭代次数。另外,为了压制假频对波数谱的干扰,对波数域进行加权以提高算法的反假频能力,加权后的反变换公式为:

$$d^{rec}(f, x) = \frac{1}{NK} \sum_{i=0}^{n_{ter}} \sum_{m=0}^m \varphi(f, k_m) \tau_i(f, k_m) d(f, k) e^{2\pi i k_m} dk, \quad (5)$$

$$\varphi(f, k_m) = A(f_0, k_0) G(f - f_0, k_m - k_0). \quad (6)$$

$\varphi(f, k_m)$ 为频率波数域加权算子, $G(f - f_0, k_m - k_0)$ 为

滑动高斯窗函数。对所有频率成分迭代结果利用式 (5) 进行反变换,得到最终频率空间域的插值结果,然后在时间方向进行反傅里叶变换得到插值后的 OVT 道集。由于几何观测系统中包含了所有炮检点的坐标信息,基于炮检点几何坐标映射关系,将所有插值后的 OVT 道集中来自同一炮集的数据依据偏移距大小进行分选,得到规则化后的炮数据,并作为逆时偏移的输入数据。叠前数据炮域规则化处理流程与算法流程分别如图 1、图 2 所示。

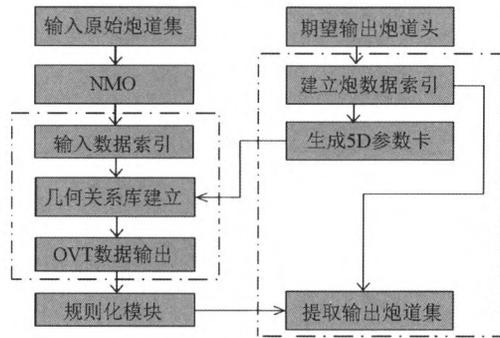


图 1 处理流程

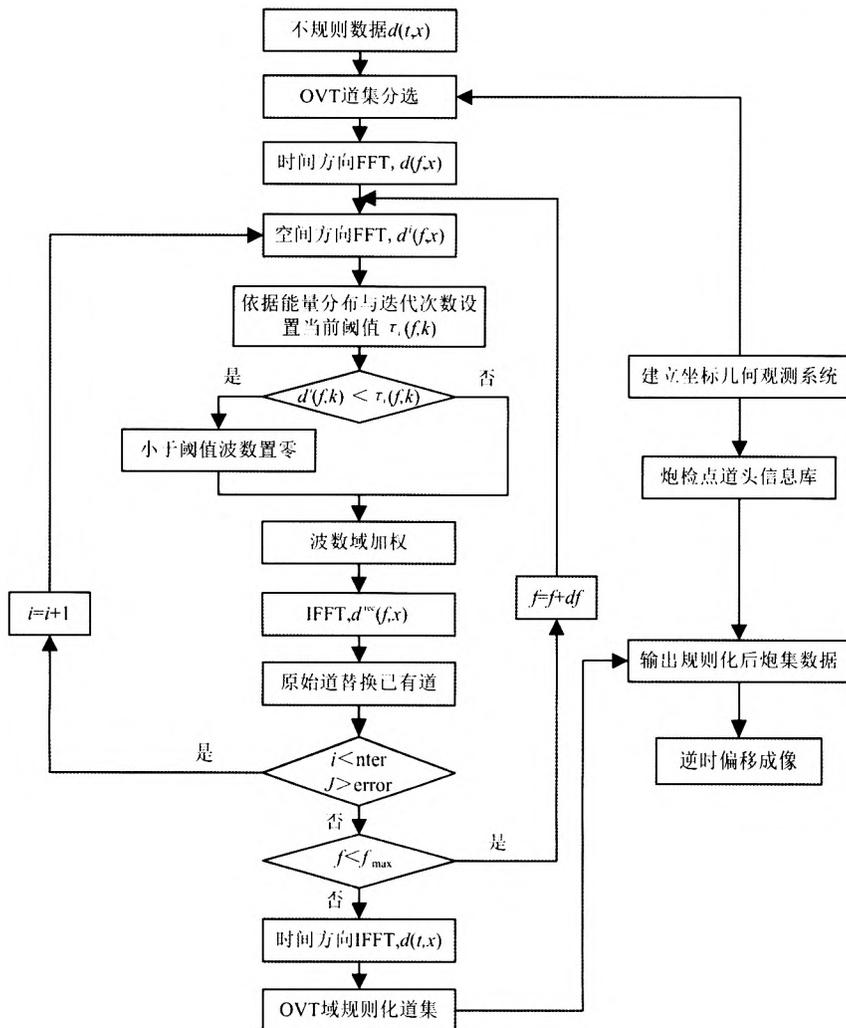
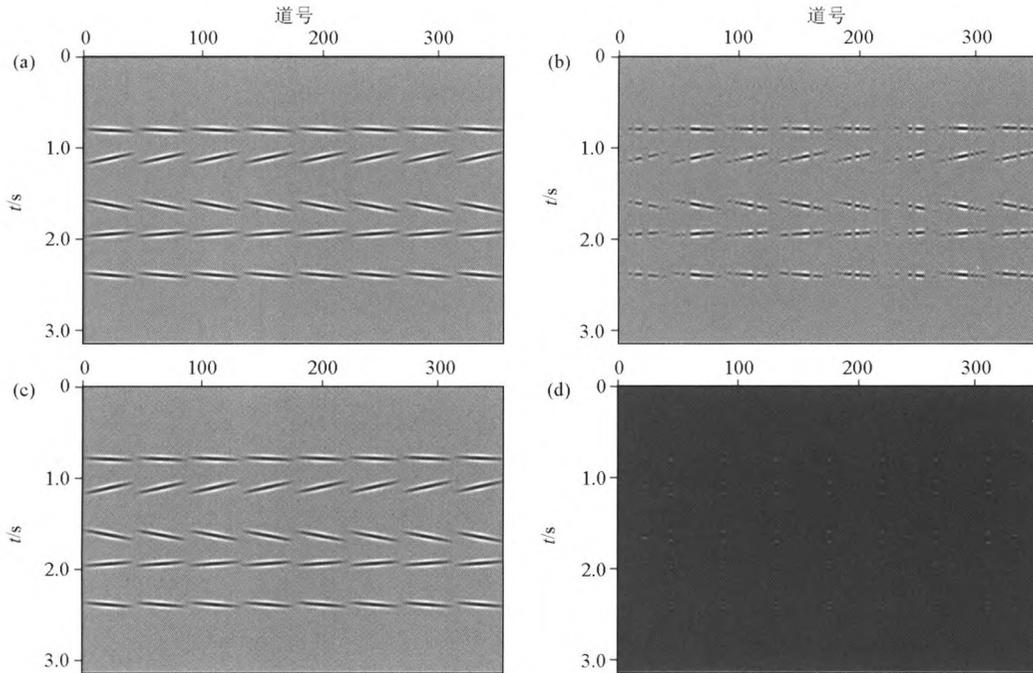


图 2 算法流程

为了验证本文算法的有效性,进行了数值模型试算。如图 3a 所示为原始完整模型数据,对其进行随机抽稀,得到空间不规则采样数据如图 3b 所示。将图 3b 道集视为一个 OVT 道集利用本文方法进行插值处理,重建得到的数据结果如图 3c 所示,与图

3a 对比可知缺失道被很好地重建,数据同相轴连续性变好。原始数据与重建数据间的误差如图 3d 所示,其误差值为原始数据的 1% 左右。模型试算结果表明本文方法对不规则数据具有较好的重建效果和计算精度。



a—原始数据;b—不规则数据;c—重建数据;d—重建数据误差

图 3 模型数据算法测试

2 应用实例

为了验证该方法对实际数据的应用效果,对某三维工区实际数据进行了应用处理。如图 4 左所示,由于地表采集条件的限制,炮点在空间呈不规则分布,地震数据为不规则采集炮数据,不规则数据将

严重影响地震数据预处理以及偏移成像的处理效果。利用本文方法对该三维实际数据进行叠前数据炮域规则化处理,规则化后炮点观测系统呈规则分布如图 4 右所示,实现了数据的插值重建。图 5 为处理前后覆盖次数属性分布图,规则化后覆盖次数的均匀性得到改善,提高了数据对偏移成像算法的适应性。

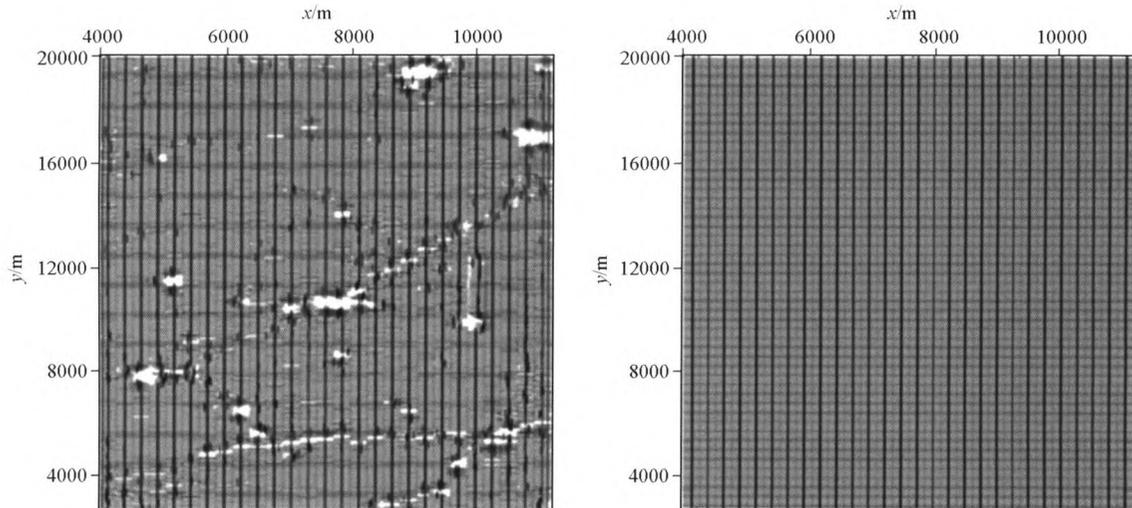


图 4 规则化处理前(左)后(右)炮点分布

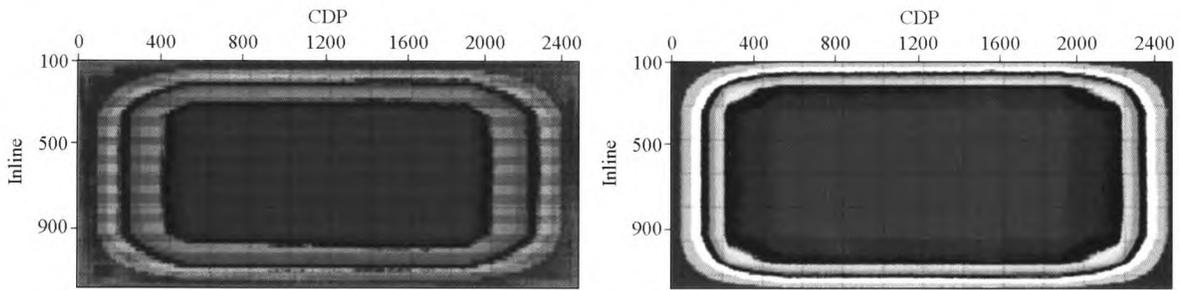


图 5 规则化处理前(左)后(右)覆盖次数

对原始数据进行偏移距和方位角的分选得到 OVT 道集如图 6 左所示,由于原始实际数据中方位角和偏移距的限制,插值前 OVT 道集并非为理想的覆盖整个工区的单次覆盖数据体,面元中存在不规则的缺边现象,造成工区覆盖次数不均匀。利用本文方法对 OVT 道集进行数据插值后如图 6 右所示,缺失的地震数据得到重建,原始数据中同相轴得到保持且连续性变好。图 7、8 分别为规则化前后炮集与动校正后的共中心点道集,重建数据中近、远端偏移距信息更丰富,信噪比也得到提升,有利于提高不同构造形态的成像质量。图 9 为规则化处理前后叠

加剖面对比,如图 9 右所示浅层有效信号信噪比得到提高,在 CDP 为 2 100,时间 5 s 左右,原始叠加剖面中存在的倾斜线性干扰也得到压制。对规则化前后炮集分别进行逆时偏移成像,偏移结果对比如图 10~11 所示。由于利用了数据的全波数频带进行规则化处理,保护了数据中的微弱信号,如图 10 所示规则化后 CDP 为 1 300,深度 3.0~3.5 km 范围内的小断裂成像更清晰;图 11 中偏移剖面信噪比和连续性都得到明显改善。实际数据应用结果表明本文方法为逆时偏移提供了覆盖次数和照明更均匀的炮集数据,对提高逆时偏移成像精度具有实用意义。

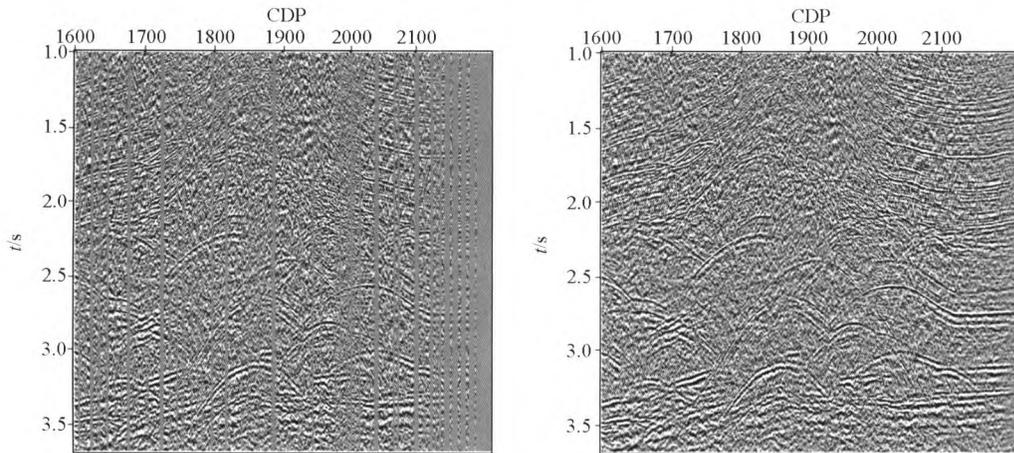


图 6 规则化处理前(左)后(右)OVT 道集

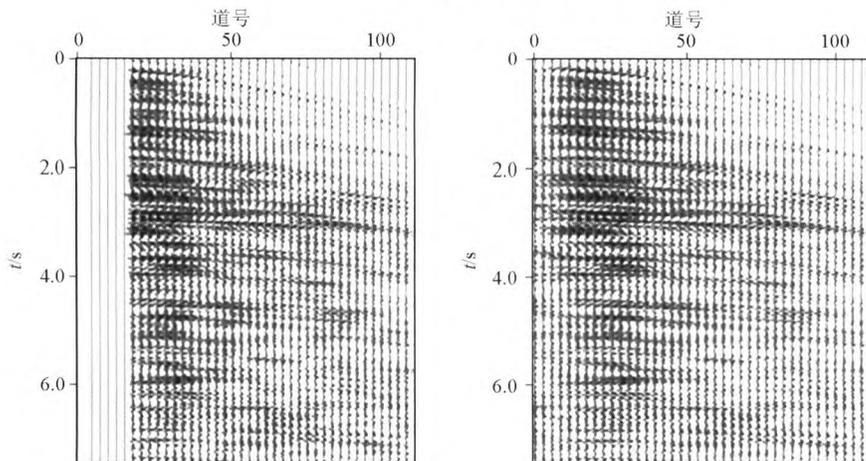


图 7 规则化处理前(左)后(右)炮集

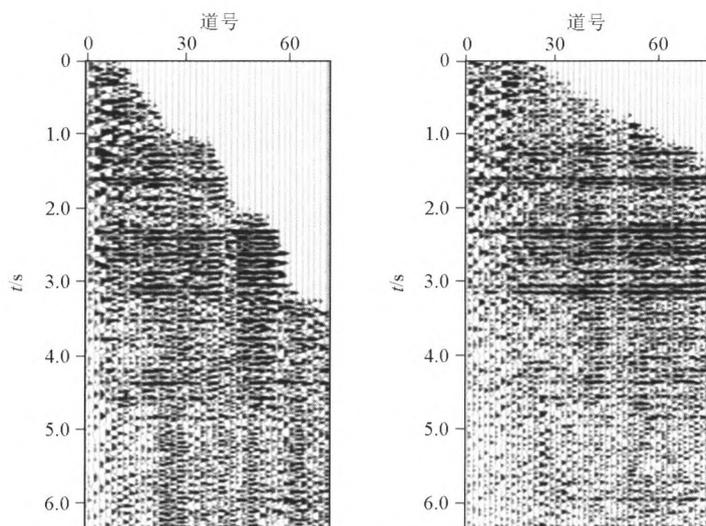


图 8 规则化处理前(左)后(右)共中心点道集

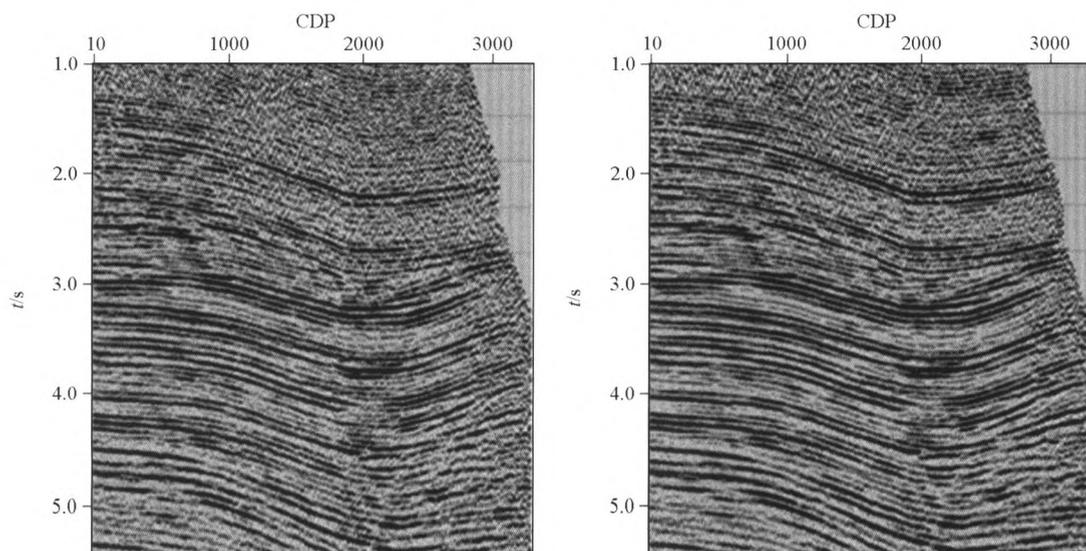


图 9 规则化处理前(左)后(右)叠加剖面效果对比

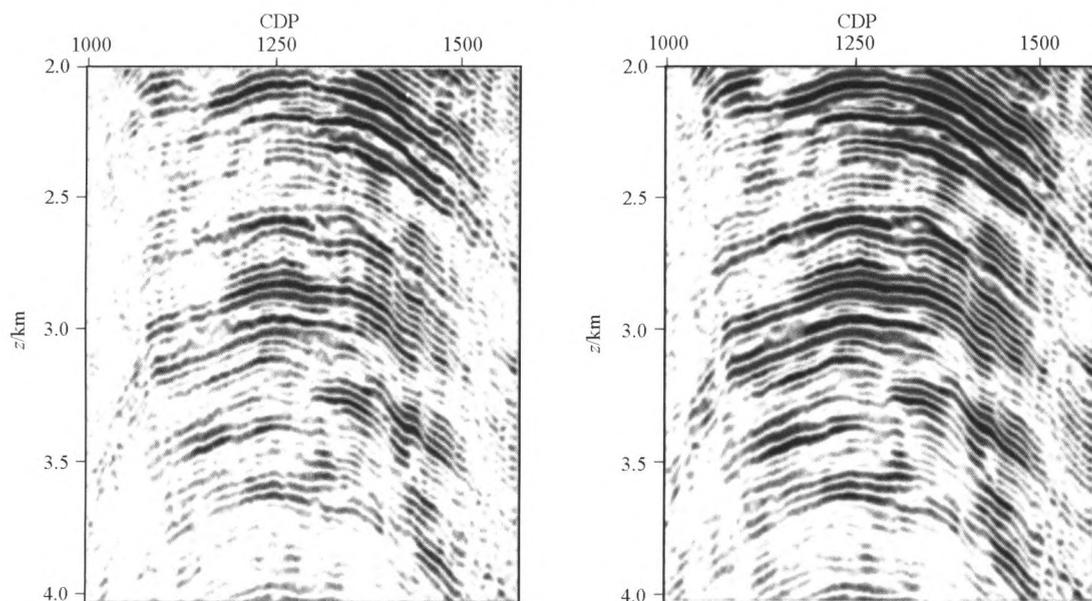


图 10 规则化处理前(左)后(右)偏移结果 1 对比

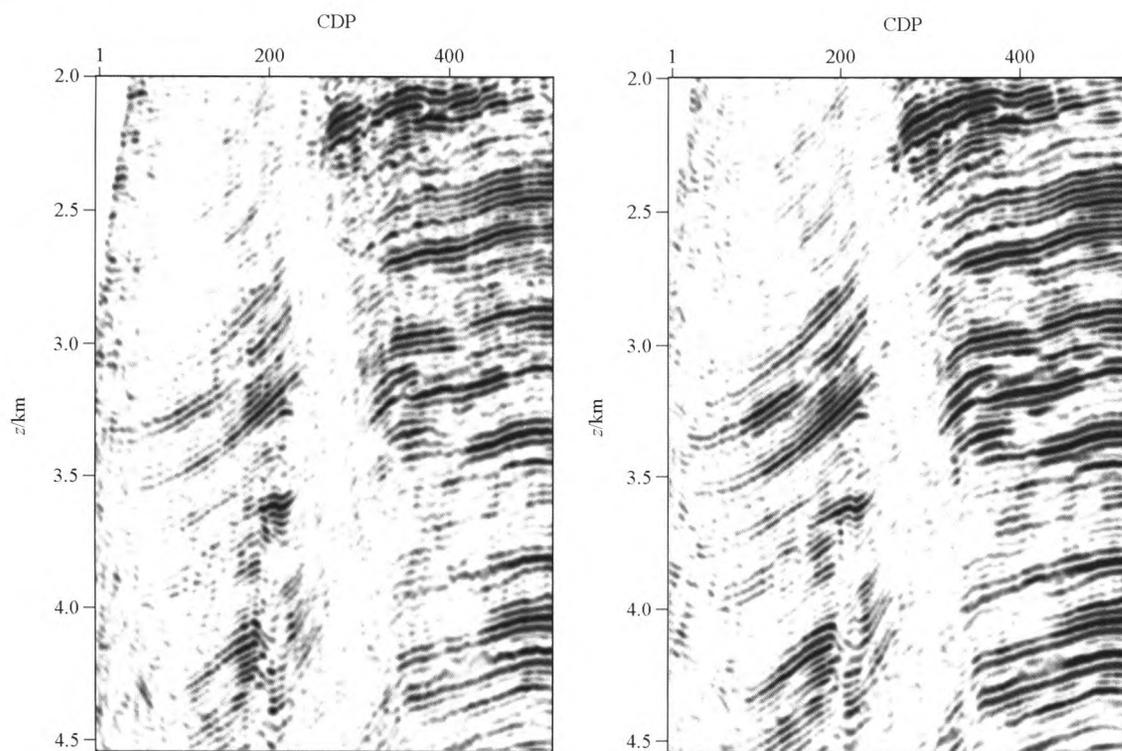


图 11 规则化前(左)后(右)偏移结果 2 对比

3 结论

笔者通过地震数据炮域规则化处理,为逆时偏移提供了规则采集的偏移数据,实际数据应用结果表明本方法具有较好的应用效果和实用性,并取得了以下认识和结论:

1) 在 OVT 域进行数据规则化处理,提高了地震数据的相关性,缺失地震数据得到重建的同时原始数据中同相轴得到保持,表明 OVT 处理提高了数据重建的精度和可靠性;

2) 利用地震数据的全波数带进行数据重建,避免了波数阈值选取不当对有效信号的损伤,保护了地震数据中的弱信号,对于提高小断裂构造成像质量具有重要意义;

3) 基于炮检点几何坐标映射关系实现规则炮集的提取,满足了逆时偏移算法对输入数据的要求。规则化处理后,偏移剖面中同相轴的连续性和信噪比都得到明显改善。

参考文献:

[1] Spitz S. Seismic trace interpolation in the f-x domain[J]. Geophysics, 1991, 56: 785 - 794.
 [2] Jakubowicz H. Wavefield reconstruction[C]//Expanded Abstracts

of the 64th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 1994: 1557 - 1560.

- [3] Kao C. A trace interpolation method for spatially aliased and irregularly spaced seismic data[C]//Expanded Abstracts of the 67th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 1997: 1108 - 1110.
 [4] Gulunay N, Chambers R E. Generalized f-k domain trace interpolation[C]//Expanded Abstracts of the 67th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 1997: 1100 - 1103.
 [5] Duijndam A J W, Schonewille M A, Hindriks C O H. Reconstruction of band-limited signals, irregularly sampled along one spatial direction[J]. Geophysics, 1999, 64(2): 524 - 538.
 [6] Liu B, Sacchi M D. Minimum weighted norm interpolation of seismic records[J]. Geophysics, 2004, 69(6): 1560 - 1568.
 [7] Xu S, Zhang Y, Pham D, et al. Antileakage Fourier transform for seismic data regularization[J]. Geophysics, 2005, 70(4): 87 - 95.
 [8] Abma R, Kabir N. 3D interpolation of irregular data with a POCS algorithm[J]. Geophysics, 2006, 71(6): E91 - E97.
 [9] 国九英, 周兴元, 俞寿朋. F-X 域等道距道内插[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1): 28 - 34.
 [10] 周兴元. F-X 域地震道内插理论及实现[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(2): 154 - 162.
 [11] 李学聪, 刘伊克, 常旭, 等. 基于 F-K 偏移和反偏移的地震道插值方法研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 2020 - 2029.
 [12] 曹静杰, 王彦飞, 杨长春. 地震数据压缩重构的正则化与零范数稀疏最优方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 596 - 607.
 [13] 耿瑜, 吴如山, 高静怀. 基于 Dreamlet 变换的地震数据压缩理论与方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2705 - 2715.
 [14] 张华, 陈小宏. 基于 jitter 采样和曲波变换的三维地震数据重建[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1637 - 1649.

- [15] 刘喜武,刘洪,刘彬.反假频非均匀地震数据重建方法研究[J].地球物理学报,2004,47(2):299-305.
- [16] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration [J]. Geophysics, 1983, 48: 1514-1524.
- [17] Whitmore N D. Iterative depth imaging by backward time propagation [C]//Expanded Abstracts of the 53rd Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 1983: 382-385.
- [18] Levin S A. Principles of reverse time migration [J]. Geophysics, 1984, 49(5): 581-583.
- [19] Claerbout J F. Imaging the earth's interior [M]. Blackwell Scientific Publications, Inc, 1985.
- [20] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration [J]. Geophysics, 1983, 48: 1514-1524.
- [21] 陈可洋,范兴才,吴清岭,等.提高逆时偏移成像精度的叠前插值处理研究与应用[J].石油物探,2013,52(4):409-416.
- [22] Vermeer G J O. Creating image gathers in the absence of proper common-offset gather [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(4): 636-642.

Research on the regularization method for seismic data in shot domain

XU Lu

(SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Reverse time migration based on two-way wave equation is an effective method to deal with steeply dipping structures and complicated velocity models. As a method of wave equation migration, the data required to be input are regularly sampled shot gathers. However, the field acquisition is limited by complex geological conditions and the actual seismic data are usually irregularly and sparsely sampled along the spatial direction, and there is a serious spatial aliasing phenomenon, which affects the accuracy of migration. In this paper, the prestack seismic data regularization technique is proposed for reverse time migration, which is based on the correlation of data in the OVT (Offset Vector Tile) domain to realize the iterative anti-aliasing interpolation for the full wave number band of data. It has the advantages of spectral anti-leakage, anti-aliasing and anti-noise. By mapping the coordinates of the shot gathers from the geometric system, the regularized shot gathers are obtained from OVT domain interpolation results, and applied to the reverse time migration. The application results of real data show that the technology can effectively improve the precision of reverse time migration while saving the cost of acquisition.

Key words: OVT domain; regularization; spectral antileakage; anti-aliasing; reverse time migration

(本文编辑:叶佩)