

# 基于多道奇异谱分析的三维地震数据规则化方法

魏小强\* 雷秀丽 马庆珍

(国家超级计算天津中心,天津 300457)

魏小强,雷秀丽,马庆珍. 基于多道奇异谱分析的三维地震数据规则化方法. 石油地球物理勘探,2014,49(5): 846-851.

**摘要** 针对野外采集地震数据的非规则性,本文基于多道奇异谱分析(MSSA),推导了三维地震数据规则化方法相关公式,实现了对非规则地震数据缺失道的重建及对三维地震数据进行道加密处理。对模型数据和实际地震资料的处理结果表明:基于MSSA的三维地震数据规则化方法能有效地对三维模型数据及实际资料进行规则化处理,并具有较好的适用性和稳定性。

**关键词** 地震数据规则化 多道奇异谱分析 随机奇异值分解 Hankel 矩阵 降秩 频率域

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

在石油地震勘探中,由于工区地表地形、建筑物及地下设施等的影响,使得野外采集施工难以达到完全的规则化采集,所采集的地震数据呈现出非规则性。而现有地震数据处理方法和技术基本是基于规则数据假设的,为了满足地震数据处理对数据规则性的要求,就必须对非规则数据进行规则化处理。地震数据规则化处理是常规地震数据处理中重要的环节,它能够改善面元属性、炮检距分组、提高地震数据的信噪比及最终偏移成像质量。

针对实际非规则地震资料的规则化方法,根据处理原理及思路的不同可分为三类。第一类是把数据转换到不同的数据域进行规则化处理,如频率域<sup>[1]</sup>、Radon域<sup>[2]</sup>和Curvelet域<sup>[3]</sup>等。此类方法的特点是基于数学变换理论和信号分析原理,不需要地质或地球物理假设,对输入数据要求少,它既可处理规则采样数据又可处理不规则采样数据,甚至是随机采样数据;不足之处是未引入抗假频机制。

第二类是基于预测滤波的插值重建法,如 $f-x$ 域预测滤波插值、 $f-x$ 域投影滤波插值和 $f-k$ 域地震道插值等<sup>[4~9]</sup>。该类方法的理论基础是利用线性同相轴在 $f-x$ 域具有可预测性的特征,从地震道已知的低频信息中提取高频成分的预测滤波算子,进而恢复待重建的高频成分。其优点是能对地震道数据进行抗假频重建;不足之处是要求输入的地震道是等间距采样。第三类是基于波动方程的重建方法,如DMO和反DMO交替进行的规则化方法、Ronen<sup>[10]</sup>、Chemingui等<sup>[11]</sup>提出的方位角时差变换法等。该类方法的优点是能最大程度地利用地下信息,但当地下信息未知或精度较低时会影响重建结果。此外,这类方法计算量大,在一定程度上影响其应用范围。

在经历了函数变换重建、预测滤波重建和波动方程重建之后,近年又推出了更新颖的地震数据降秩重建法。这类方法中较有代表性的有Trickett等<sup>[12]</sup>的Cadzow滤波法、Oropeza等<sup>[13]</sup>的多道奇异谱分析(MSSA)降秩重建法、Kreimer等<sup>[14]</sup>的高阶奇异值分解(HO-SVD)张量补全重建法。Cadzow

\* 天津市滨海新区国家超级计算天津中心,300457。Email:weixq@nsc-tj.gov.cn

本文于2013年4月26日收到,最终修改稿于2014年7月31日收到。

本研究受国家973项目(2011CB202402)、国家自然科学基金项目(41104069,41274124)、山东省自然科学基金项目(ZR2011DQ016)和国家超级计算天津中心联合资助。

滤波法和 MSSA 重建法的基本原理为对每一频率切片数据构建 Hankel 矩阵或块 Hankel 矩阵,然后借助于截断 SVD 实施降秩处理,对降秩后矩阵沿反对角线取平均,得到滤波后重建数据。对高维数据重建而言,上述降秩法需要构建大型分块 Hankel 矩阵,传统的截断 SVD 算法由于计算量大而难以实现降秩处理。

本文通过多道奇异谱分析(MSSA)对非规则地震数据进行规则化处理,阐释了多道奇异谱分析数据规则化方法的基本原理。在方法实现的过程中进行了三方面改进:采用 Hankel 矩阵降秩方式实现对非规则地震数据的插值处理;结合凸集投影法(POCS)<sup>[15]</sup>增强处理效果;引入随机奇异值分解法(R-SVD)<sup>[16~20]</sup>替代传统奇异值分解,大幅度提高了计算效率。通过模型试算和实际资料处理,验证了本文提出的基于 MSSA 的三维数据规则化方法的有效性、适用性和稳定性。

## 2 方法原理及算法实现

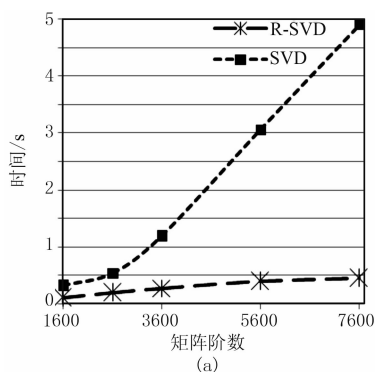
### 2.1 方法原理

考虑三维地震数据体,对缺失道或需要加密处置零,将待处理数据变换至频率域

$$S(x, y, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(x, y, t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

对于每一个频率分量都构成如下矩阵

$$\mathbf{S}_\omega = \begin{pmatrix} S(1,1) & S(1,2) & \cdots & S(1,N_y) \\ S(2,1) & S(2,2) & \cdots & S(2,N_y) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(N_x,1) & S(N_x,2) & \cdots & S(N_x,N_y) \end{pmatrix} \quad (2)$$



对矩阵  $\mathbf{S}_\omega$  中每列进行 Hankel 矩阵化

$$\mathbf{A}_j = \begin{pmatrix} S(1,j) & S(2,j) & \cdots & S(K_x,j) \\ S(2,j) & S(3,j) & \cdots & S(K_x+1,j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(L_x,j) & S(L_x+1,j) & \cdots & S(N_x,j) \end{pmatrix} \quad (3)$$

再对  $\mathbf{A}_j (1 \leq j \leq N_y)$  进行 Hankel 矩阵化,得到分块 Hankel 矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{A}_{K_y} \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 & \cdots & \mathbf{A}_{K_y+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{L_y} & \mathbf{A}_{L_y+1} & \cdots & \mathbf{A}_{N_y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

对分块 Hankel 矩阵  $\mathbf{A}$  进行奇异值分解

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \sum \mathbf{V}^H \quad (5)$$

经过降秩操作,得到

$$\mathbf{A}_K = \mathbf{U}_K \sum_K \mathbf{V}_K^H \quad (6)$$

最后经过逆过程便可得到规则化后的地震数据体。

为了提高计算效率,本文采用随机奇异值分解(R-SVD)代替常规奇异值分解(SVD)。由于奇异谱分析规则化的原理是基于降秩理论,即对矩阵进行降秩近似,R-SVD 算法正好满足这种要求,因此 R-SVD 算法在满足降秩要求的情况下能大幅度提高计算效率(图 1)。R-SVD 的目的是对于给定的  $m \times n$  阶矩阵  $\mathbf{A}$ ,计算其秩为  $k$  的近似矩阵,即

$$\mathbf{A} \approx \mathbf{A}_k = \mathbf{U} \sum \mathbf{V}^* \quad (7)$$

此  $k$  值越小,则效率越高。

### 2.2 算法实现

基于 MSSA 的三维地震数据规则化算法实现流程(图 2)如下:

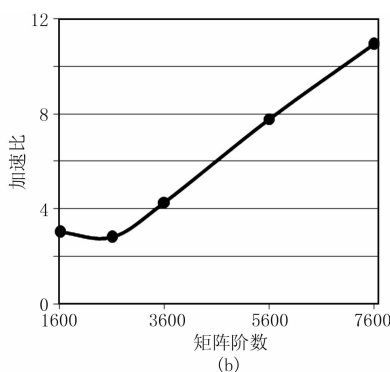


图 1 R-SVD 与 SVD 的效率(a)和相对加速比(b)

- (1) 将波场变换至频率域;
- (2) 对每个频率波场分别构建相应的分块 Hankel 矩阵;
- (3) 对每个频率分量的分块 Hankel 矩阵进行 SVD;
- (4) 降秩得到每个频率分量对应分块 Hankel 矩阵的近似矩阵;

- (5) 从降秩近似矩阵反对角线平均值获取频率域序列(图 3);
  - (6) 重复步骤(2)~(5)进行迭代,直至前后两次能量差满足预设要求或达到预设迭代次数;
  - (7) 将频率域数据变换回时间域。
- 通过以上步骤便可实现基于 MSSA 的三维地震数据规则化处理。

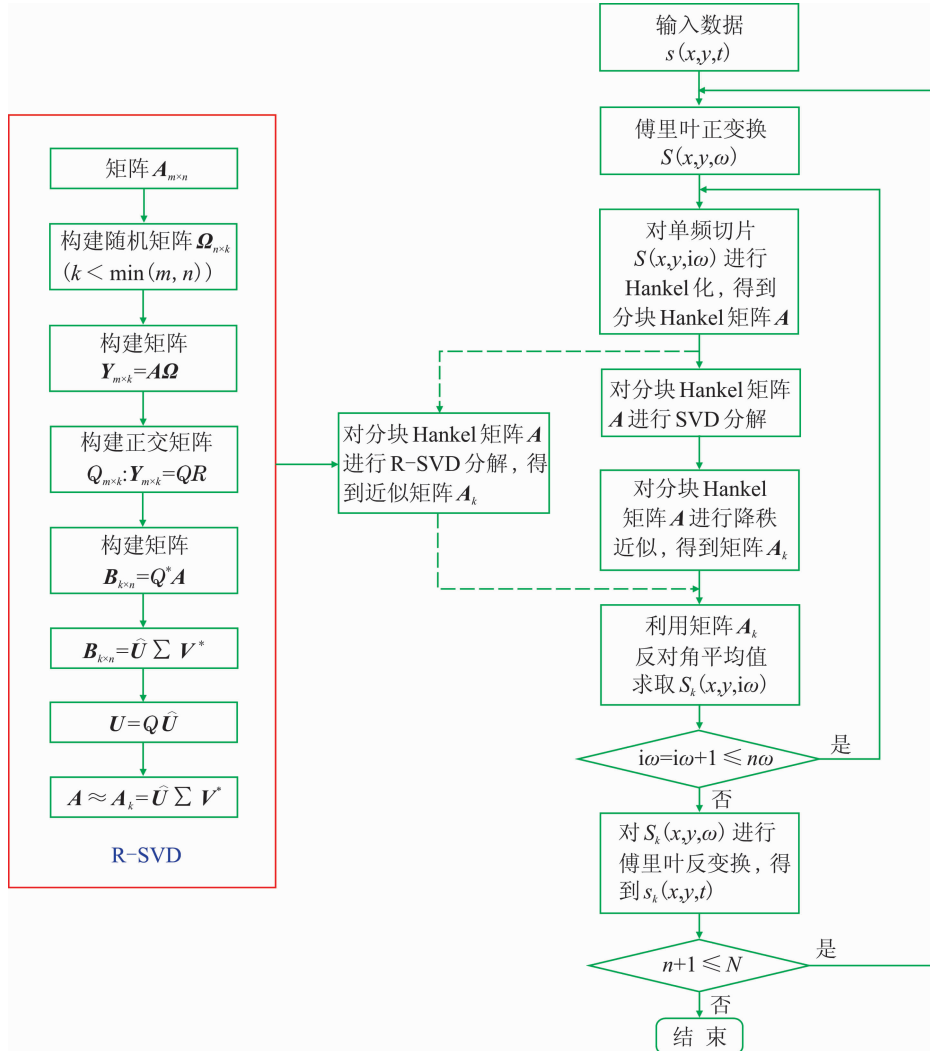


图 2 R-SVD 及基于 MSSA 的三维地震数据规则化流程图

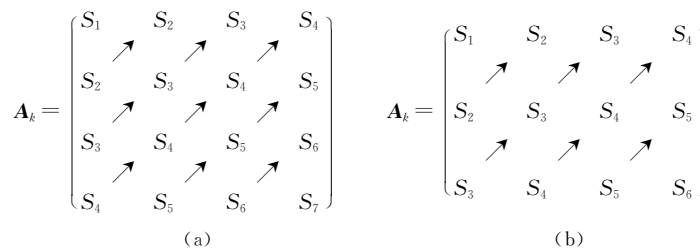


图 3 从降秩近似矩阵反对角线平均值获取频率域序列示意图  
(a) 方阵; (b) 非方阵

### 3 模型及实际资料测试

#### 3.1 模型数据

测试选用的模型参数为:Inline 和 Crossline 方向各有 25 条测线,时间采样点数为 64。基于 MSSA 的三维地震数据规则化模型测试效果如图 4 所示。其中图 4a 和图 4b 分别为原始数据及其抽稀数据,

在 Inline 和 Crossline 方向每隔两道抽出一道数据,即抽稀道集是原来道集的 1/9;图 4c 为 MSSA 规则化后数据;图 4d 为原始数据与规则化后数据之差,从该差值剖面可看出规则化后数据与原始数据的差别极小,证实本文方法较好地恢复了缺失道地震数据。

图 5 是从三维数据体中抽取的 M 测线的 MSSA 规则化处理效果。其中图 5a 和图 5b 分别是对应

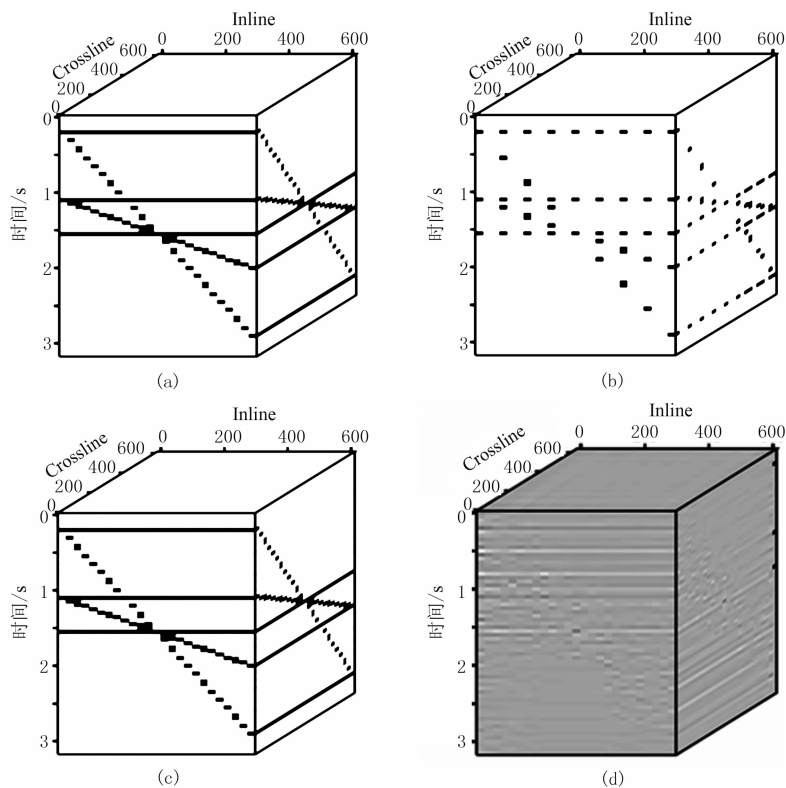


图 4 基于 MSSA 的三维数据体规则化处理效果

(a)原始数据;(b)抽稀数据;(c)MSSA 重构数据;(d)重构数据与原始数据之差

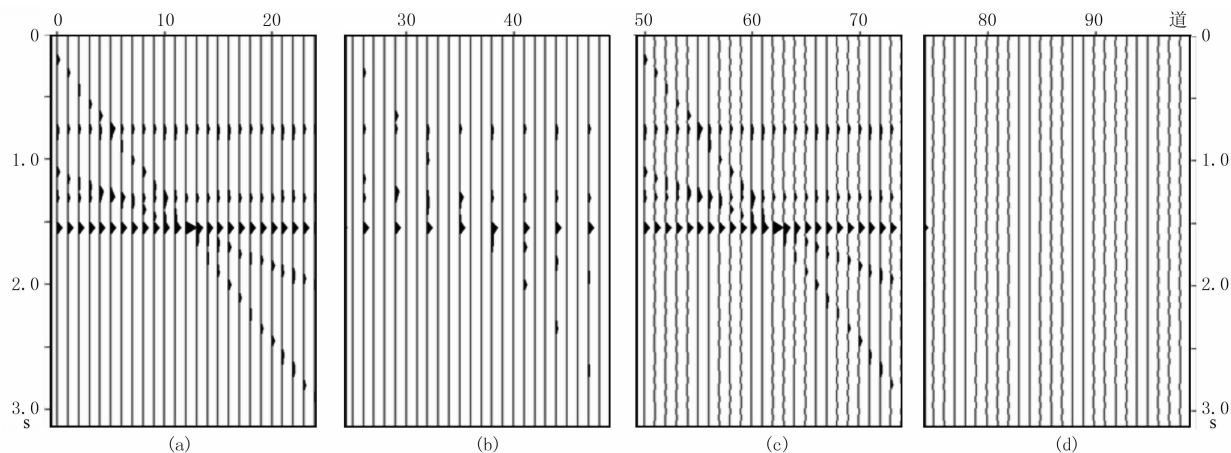


图 5 M 测线 MSSA 规则化处理效果

(a)原始数据;(b)抽稀数据;(c)MSSA 重构数据;(d)重构数据与原始数据之差

的原始数据及其抽稀后非规则数据,图 5c 和图 5d 分别是其 MSSA 规则化重建结果及其与原始数据的差值。该图更直观地展示了 MSSA 规则化前、后地震数据的吻合程度。

### 3.2 实际资料

在验证了 MSSA 数据规则化方法对于模型数据的良好处理效果的基础上,本文选用 A 探区实际资料对其进行测试处理。实际三维数据体参数如下:Inline 和 Crossline 方向各有 100 条测线,时间

采样点为 201 个。采用本文 MSSA 数据规则化方法对该实际资料的处理效果如图 6 所示。其中图 6a 为原始数据,该实际数据体缺失了近 50% 的道集;图 6b 为 MSSA 规则化后数据。图 7 是从该三维数据体中抽取的一条二维测线的处理成果剖面,它更直观地展示了规则化处理的明显效果。从图 6 和图 7 的规则化处理结果可知:基于 MSSA 的三维数据规则化方法能有效恢复缺失道,较完美地实现(含缺失道)地震数据的规则化处理。

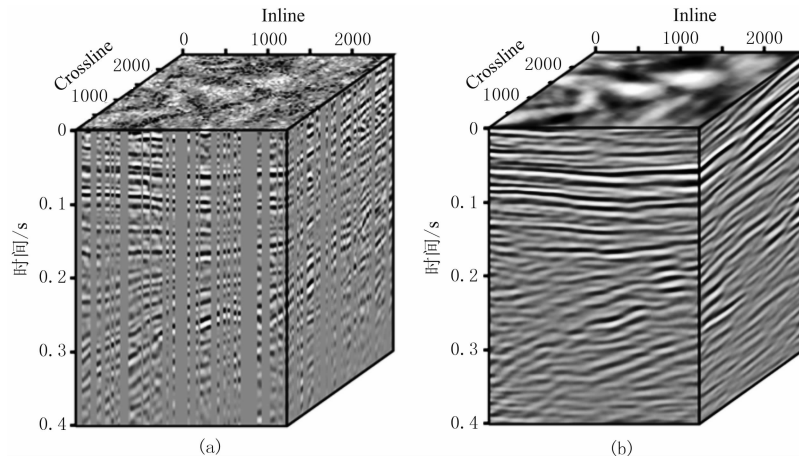


图 6 实际原始地震数据(a)与 MSSA 规则化后数据(b)的对比

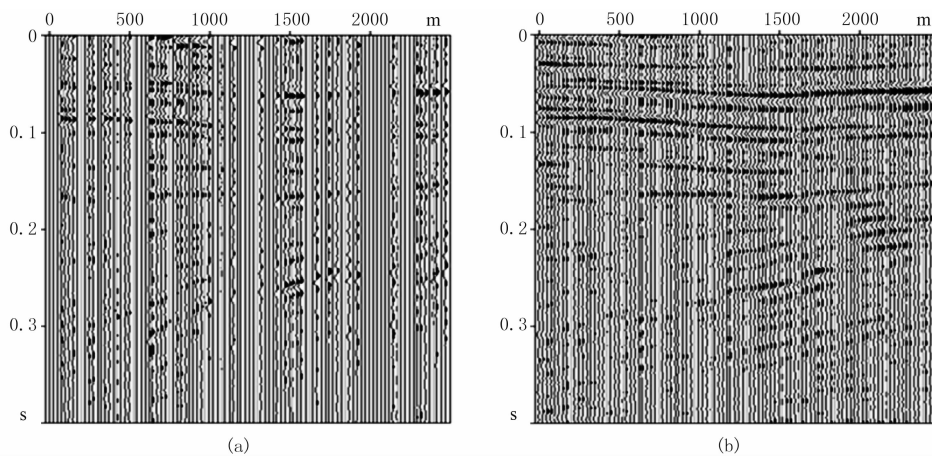


图 7 M 测线原始地震剖面(a)与 MSSA 规则化地震剖面(b)的对比

## 4 结论与讨论

本文通过对基于 MSSA 的三维数据规则化方法的推导及程序实现,并将其应用于模型数据和实际地震资料处理中,取得了令人满意的处理效果,且得到如下认识和结论:

(1)引入 R-SVD 算法提高了 MSSA 规则化方

法的计算效率;

(2)本文提供的 MSSA 数据规则化方法能较好地恢复存在缺失道的地震数据,故该方法适应性强;

(3)本文方法主要特点是根据信号能量强弱及奇异谱分布区分不同信号,把缺失道当作噪声处理,每次迭代都压制一部分噪声,即恢复一部分有效波振幅,迭代若干次后便能恢复缺失道数据。

在后续研究中,我们拟将 MSSA 方法应用于地

震数据处理中多次波、棱柱波、直达波、Rayleigh 面波等的去除或分离。此外,借助于国家超级计算天津中心具有先进硬件及信息通讯等方面的优势,进一步将基于 R-SVD 的 MSSA 算法扩展为 GPU 算法,以提高其在实际地震数据处理中的效率。

感谢国家超级计算天津中心多位同事对此项研究给予的宝贵意见和建议,感谢中国石油大学(华东)LEON 办公室提供的大力支持。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Liu B and Sacchi M D. Minimum weighted norm interpolation of seismic records. *Geophysics*, 2004, 69(6):1560-1568.
- [ 2 ] Trad D O, Ulrych T J and Sacchi M D. Accurate interpolation with high-resolution time-variant Radon transforms. *Geophysics*, 2002, 67(10):644-656.
- [ 3 ] Herrmann F J and Hennenfent G. Non-parametric seismic data recovery with curvelet frames. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(1):233-248.
- [ 4 ] Spitz S. Seismic trace interpolation in the  $f-x$  domain. *Geophysics*, 1991, 56(6):785-794.
- [ 5 ] 国九英,周兴元,俞寿朋.  $F-X$  域等道距道内插. 石油地球物理勘探, 1996, 31(1):28-34.  
Guo Jiuying, Zhou Xinyuan and Yu Shoupeng. Iso-interval trace interpolation in  $F-X$  domain. *OGP*, 1996, 31(1):28-34.
- [ 6 ] 国九英,周兴元.  $F-K$  域等道距道内插. 石油地球物理勘探, 1996, 31(2):211-218.  
Guo Jiuying, Zhou Xinyuan. Iso-interval trace interpolation in  $F-X$  domain. *OGP*, 1996, 31(2):211-218.
- [ 7 ] 刘喜武,刘洪,刘彬. 反假频非均匀地震数据重建方法研究. 地球物理学报, 2004, 47(2):299-305.  
Liu Xiwu, Liu Hong, Liu Bin. A Study on algorithm for reconstruction of de-alias uneven seismic data. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(2):299-305.
- [ 8 ] Gulunay N. Seismic interpolation in the Fourier transform domain. *Geophysics*, 2003, 68(1):355-369.
- [ 9 ] Mostafa N, Sacchi M D.  $f-x$  adaptive seismic trace interpolation. *Geophysics*, 2009, 74(1):V9-V16.
- [ 10 ] Ronen J. Wave equation trace interpolation. *Geophysics*, 1987, 52(7):973-984.
- [ 11 ] Chemingui N, Biondi B. Seismic data reconstruction by inversion to common offset. *Geophysics*, 2002, 67(5):1575-1588.
- [ 12 ] Trickett S, Burroughs L, Milton A et al. Rank-reduction based trace interpolation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29:1989-1992.
- [ 13 ] Oropeza V and Sacchi M D. Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis. *Geophysics*, 2011, 76(3):V25-V32.
- [ 14 ] Kreimer N, Mauricio D, Sacchi M D et al. A tensor higher-order singular value decomposition for prestack seismic data noise reduction and interpolation. *Geophysics*, 2012, 77(3):113-122.
- [ 15 ] Youla D C and Webb H. Image restoration by the method of convex projections: Part 1, Theory. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1982, 1(2):81-94.
- [ 16 ] Yiou P, Baert E and Loutre M F. Spectral analysis of climate data. *Surveys in Geophysics*, 1996, 17(6):619-663.
- [ 17 ] Al-Bannagi M S, Fang K, Kelamis P G et al. Acquisition footprint suppression via the truncated SVD technique: Case studies from Saudi Arabia. *The Leading Edge*, 2005, 24(8):832-834.
- [ 18 ] Drineas E, Drineas P and Huggins P. A randomized singular value decomposition algorithm for image processing applications. *Proceedings 8th Panhellenic Conference on Informatics (PCI)*, 2001, 279.
- [ 19 ] Halko N, Martinsson P G and Tropp J A. Finding structure with randomness: Stochastic algorithms for constructing approximate matrix decompositions. *ACM Report 2009-05*, 2009.
- [ 20 ] Woolfe F, Liberty E, Rokhlin V et al. A fast randomized algorithm for the approximation of matrices. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 25(3):335-366.

(本文编辑:朱汉东)

#### 作 者 简 介



魏小强 硕士,工程师,1986年生;2009年本科毕业于中国石油大学(华东)地球物理学专业,2012年获该校地球探测与信息技术专业硕士学位;现在国家超级计算天津中心主要从事地震波正演及偏移成像工作。