

# 匹配追踪煤层强反射分离方法

李海山\*<sup>①</sup> 杨午阳<sup>①</sup> 田军<sup>②</sup> 吴国忱<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730020; <sup>②</sup>中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555)

李海山,杨午阳,田军,吴国忱. 匹配追踪煤层强反射分离方法. 石油地球物理勘探,2014,49(5):866-870.

**摘要** 地下存在煤系地层时地震剖面上会出现强能量反射同相轴,使煤层之上或之下的含气目的层反射信息淹没于强反射之中,加大了储层预测难度。依据稀疏表示理论,提出匹配追踪煤层强反射分离方法。匹配追踪去煤层强反射的关键是稀疏字典的选取,通过地震数据在不同的一维字典中的稀疏性分析,并考虑强反射信息的低频特征,选取由低频原子构成的一维非抽样离散小波变换(UDWT1D)字典来稀疏表示强反射信息。采用Blumensath等给出的迭代算法进行匹配追踪分解,该算法虽是一种贪婪算法,但由于对每个地震道只需进行一次匹配分解,计算效率较高。模型数据测试和实际资料处理结果证明了该方法的有效性。

**关键词** 匹配追踪 煤层强反射 稀疏表示 过完备字典 储层预测 流体检测

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

利用地震资料进行储层预测和流体识别一直是油气勘探的热点研究领域之一<sup>[1~3]</sup>。尽管在许多地区有大量成功应用的实例,但并不是所有的地震资料都可用于储层预测及流体识别,如工区存在煤系地层,特别是目的层处于煤层之上或者煤层之下时,煤层与砂体呈上下叠置关系,由于煤层与非煤层之间阻抗差异较大,因此在地震剖面上产生较强的反射同相轴,这会使有效信息淹没于煤层强反射之中,导致煤层强反射区域的储层流体预测难以有效进行<sup>[4]</sup>。因此避免煤层强反射影响是煤系地层储层预测亟待解决的问题。

近年来稀疏表示理论研究日趋深入<sup>[5]</sup>,并被广泛应用于地震数据去噪<sup>[5~7]</sup>、反褶积<sup>[8,9]</sup>、时频分析<sup>[10,11]</sup>、数据重建<sup>[12~14]</sup>等地震信号处理领域。Mallat等<sup>[15]</sup>在1993年首次提出了匹配追踪(matching pursuit,MP)算法,通过该算法可得到信号在过完备字典上的有效稀疏表示。借鉴匹配追踪算法思想,若能找到最优稀疏表示字典,将地震信号中的煤层强反射信息匹配出来,就可消除煤层强反射对

目的层有效反射信息的屏蔽作用。本文从该思路出发,提出了匹配追踪煤层强反射分离方法,并通过模型数据测试和实际地震资料处理证明了该方法的有效性。

## 2 稀疏表示与匹配追踪

### 2.1 信号的稀疏表示

对于信号  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ , 如果只有  $n(n \ll N)$  个样点为非零值,则称该信号为稀疏信号<sup>[16]</sup>。由于自然界中大部分信号(如地震信号)通常并不是稀疏的,但需要对其进行稀疏表示。稀疏表示就是通过字典中很少量元素的线性组合形式表示信号,如信号  $\mathbf{x}$  可用  $K$  个基本信号原子  $\boldsymbol{\varphi}_k$  的叠加表示<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \boldsymbol{\varphi}_k = \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} \quad (1)$$

式中  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \dots, \alpha_K]$ , 称为  $\mathbf{x}$  在字典  $\mathbf{D} = [\boldsymbol{\varphi}_1, \dots, \boldsymbol{\varphi}_K]$  中的稀疏表示系数。在离散时间、有限长度信号处理中,字典可被视为一个维数为  $N \times K$  的矩阵,它是以原子  $\boldsymbol{\varphi}_k$  为列向量构成的,当字典的列数大于行数(即  $K > N$ )时,该字典称为过完备字典<sup>[16]</sup>。

\* 甘肃省兰州市城关区雁儿湾路 535 号中国石油勘探开发研究院西北分院,730020。Email:gulangl@s@petrochina.com.cn

本文于2013年6月8日收到,最终修改稿于2014年8月5日收到。

本研究受国家重大科技专项课题“大型油气田与煤层气开发”(2011ZX05007-006)资助。

### 2.2 匹配追踪算法原理

传统的信号表示是将信号分解在诸如傅里叶字典、Gabor 字典、小波字典等一组完备的正交基上,这种表示的共同点是信号的表示形式为唯一,一旦信号特征与字典不完全匹配,就不能对信号进行有效的稀疏表示<sup>[17]</sup>。为了解决这一问题, Mallat 等<sup>[15]</sup>引入具有自适应选择合适的基函数进行信号稀疏分解的匹配追踪算法,该算法的实质是求解如下稀疏约束最优化问题<sup>[18]</sup>

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha} \|x - D\alpha\|_2^2 \quad \text{满足} \quad \|\alpha\|_0 \leq K \quad (2)$$

当求得稀疏表示系数  $\hat{\alpha}$  后,信号可表示为  $\hat{x} = D\hat{\alpha}$ 。

匹配追踪算法是一个迭代稀疏分解过程,在每一次迭代中,从稀疏字典  $D$  中选择最能匹配信号结构的一个信号原子构建稀疏逼近。第 1 次迭代分解后,即为

$$x = \varphi_1 \alpha_1 + \sum_{k=2}^K \varphi_k \alpha_k = \varphi_1 \alpha_1 + R_1 \quad (3)$$

式中:  $\varphi_1 \alpha_1$  为匹配出的最佳信号分量;  $R_1$  为残差信号。要求匹配出的  $\varphi_1 \alpha_1$  使  $\|R_1\|_2^2$  最小。第 2 次迭代将残差信号  $R_1$  分解为

$$R_1 = \varphi_2 \alpha_2 + \sum_{k=3}^K \varphi_k \alpha_k = \varphi_2 \alpha_2 + R_2 \quad (4)$$

不断重复上述过程,直至达到事先设定的迭代次数或残差信号能量小于事先设定的阈值。此时信号可表示为

$$x = \sum_{k=1}^K \varphi_k \alpha_k + R_K \quad (5)$$

尽管匹配追踪算法的思想简单,但它是一种贪婪算法,学者们针对提高计算效率及构建稀疏字典两个方面提出了大量的改进算法<sup>[19~22]</sup>。

### 3 煤层强反射分离算法

对于煤层强反射而言,由于其能量较强,第一次匹配追踪分解后,匹配出的强能量信号  $\varphi_1 \alpha_1$  即为煤层强反射,残差信号  $R_1$  即为去煤层强反射结果,分离原理如图 1 所示。由于处理时对于每个地震道只需要进行一次匹配追踪分解,因此本文采用 Blumensath 等<sup>[18]</sup>给出的贪婪匹配追踪算法。

结合贪婪匹配追踪算法,完整的匹配追踪煤层强反射分离算法包括如下流程:

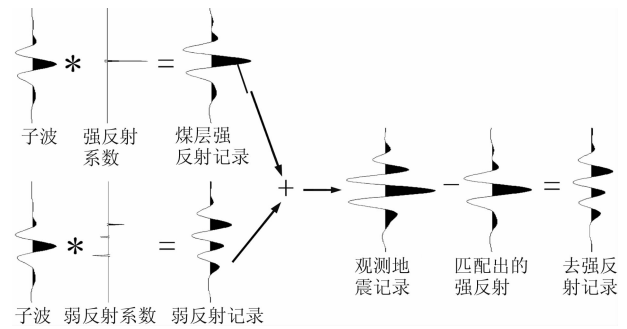


图 1 匹配追踪去煤层强反射示意图

- (1)根据地震数据确定稀疏字典  $D = [\varphi_1, \dots, \varphi_K]$ , 其中每个原子  $\varphi_k$  的采样点数为  $N$ ;
- (2)设置地震道数  $n_i = 1$ , 总道数为  $N_t$ ;
- (3)读取第  $n_i$  道地震记录  $x$ , 道采样点数为  $N$ ;
- (4)初始化稀疏表示系数  $\alpha_1 = \dots = \alpha_K = 0$ ;
- (5)  $\alpha_k = \frac{\langle x, \varphi_k \rangle}{\|\varphi_k\|_2^2}$ ,  $k_{\max} = \arg_k \max |\alpha_k|$ ;
- (6)去除煤层强反射  $x = x - \varphi_{k_{\max}} \alpha_{k_{\max}}$ ;
- (7)设置地震道数  $n_i = n_i + 1$ ;
- (8)若  $n_i > N_t$ , 停止计算; 否则, 转到第(3)步。

### 4 稀疏字典的选取

匹配追踪去煤层强反射成功的关键之一是稀疏字典的选择,若字典选取不当,则不能对强反射信息进行有效的稀疏表示,因此要通过分析各种字典对地震数据的稀疏表示能力来确定选用哪种稀疏字典。稀疏程度可由相对重构误差度量。对于给定的最大系数百分比,相对重构误差越小,则序列越稀疏<sup>[23]</sup>。相对重构误差定义如下

$$E_r(p) = \frac{\|\bar{x} - x_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2} \quad (6)$$

式中:  $p = \frac{k}{K} \times 100\%$ , 表示前  $k$  个最大系数占总系数  $K$  的百分比;  $\bar{x}$  表示由  $k$  个最大系数重构的  $x_0$  的近似。

图 2 为西部 M 工区部分小角度叠后地震记录。该区太原组的含气储层(图 2 中井轨迹上粉色线段所示位置)位于太原组主煤层(图 2 中约 1.52s 处的黑色同相轴)的上面,由于煤层与非煤层间阻抗差异较大,因此在地震剖面上产生较强反射同相轴,使太原组砂体发育区及含气有利区的有效反射信息淹没于煤层强反射之中。

图 3 是图 2 所示地震数据及其分别在一维傅里

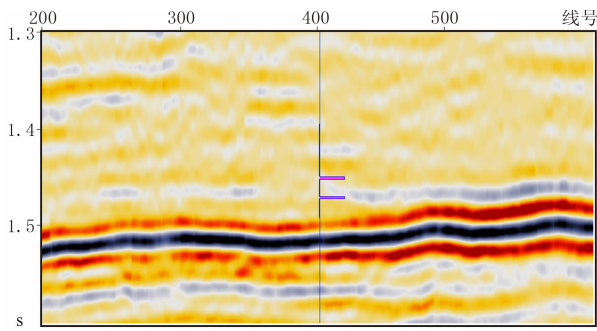


图2 含煤层强反射小角度叠后地震记录

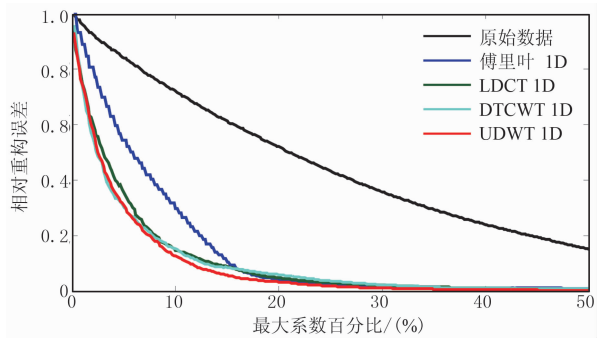


图3 图2数据及其在四种一维字典中的稀疏性对比  
 叶变换 (Fourier1D) 字典、一维离散余弦变换 (LDCT1D)字典、一维双树复小波变换(DTCWT1D)

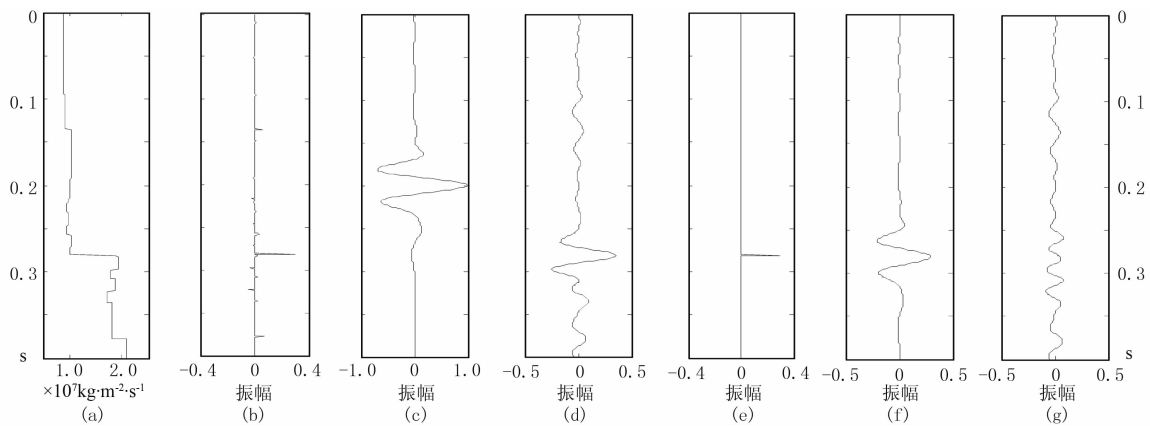


图4 模型数据及去煤层强反射结果

(a)含煤层波阻抗模型;(b)反射系数序列;(c)混合相位子波;(d)合成地震记录;  
 (e)匹配出的强反射系数;(f)匹配出的煤层强反射;(g)去除煤层强反射后的结果

## 6 实际资料处理

图5是利用本文算法对图2所示小角度叠后地震记录处理后得到的煤层强反射记录,可见由于煤层的存在而产生的强反射同相轴被有效地分离出来了。尽管如此,从图5可看出,匹配出的强反射同相轴在空间上存在不连续问题,直接将其从原始记录

字典及一维非抽样离散小波变换(UDWT1D)字典中的稀疏性对比,可见UDWT1D字典(红色曲线)的稀疏表示能力最强,同时考虑到非抽样离散小波变换具有平移不变性质,能很好地保持奇异性出现的时刻和相位<sup>[24,25]</sup>,因此首选UDWT1D字典。此外,从图2中可见煤层强反射信息呈低频特征,故仅保留UDWT1D字典中的低频原子。

## 5 模型数据测试

为了验证匹配追踪煤层强反射分离方法,设计了如图4a所示的含煤层纵波阻抗模型并进行煤层强反射分离处理。图4b为由图4a得到的反射系数序列,其中因煤层产生的强反射系数出现在281ms位置;图4d为图4b反射系数序列与图4c所示混合相位子波褶积得到的合成记录;图4e为利用本文算法匹配出的强反射系数 $\alpha_{k_{\max}}$ ;图4f为匹配出的煤层强反射 $\varphi_{k_{\max}} \alpha_{k_{\max}}$ ;图4g为从合成地震记录中减去匹配出的煤层强反射之后的结果。比较图4b反射系数序列中的最大反射系数与图4e匹配出的强反射系数,可知煤层强反射被成功地匹配出来了。

中减去可能会造成处理脚印,在此之前需进行空间平滑处理,得到空间上稳定连续的强反射平滑模型(图6),从原始记录中减去该平滑模型就可得到期望的去除煤层强反射后的结果(图7)。

从图7可看出被煤层强反射屏蔽的弱反射能量凸显出来,有利于气藏识别。为了避免破坏AVO效应,分别在小角度、中角度、大角度叠后记录中同时减去图6所示的平滑模型,再进行叠前反演。利

用印兴耀等<sup>[26]</sup>提出的基于 Russell 近似的弹性阻抗反演方法,分别利用去除煤层强反射前后的角度叠加数据开展反演,进而直接提取反映流体类型的流体项  $f$ 。图 8a 是利用未去煤层强反射角度叠加数据进行反演得到的流体项,可看到由于煤层强反射的屏蔽作用,在气藏位置无异常显示;图 8b 是利用去除煤层强反射后的角度叠加数据进行反演得到的流体项,可见气藏位置流体项呈明显低值(深蓝色),反演结果与测井结果显示的两个薄气层吻合较好。

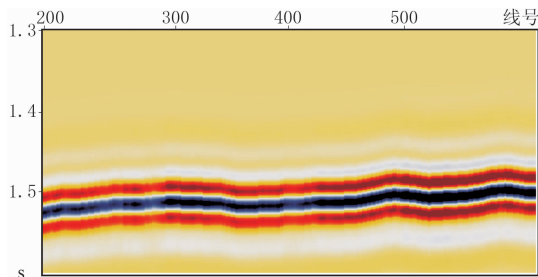
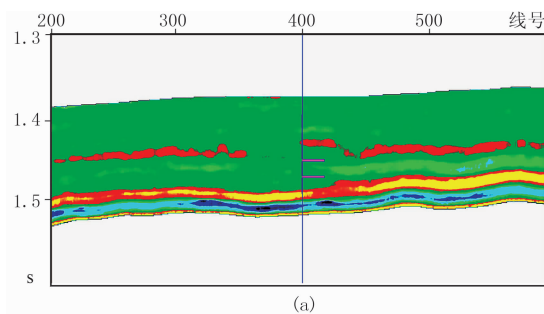
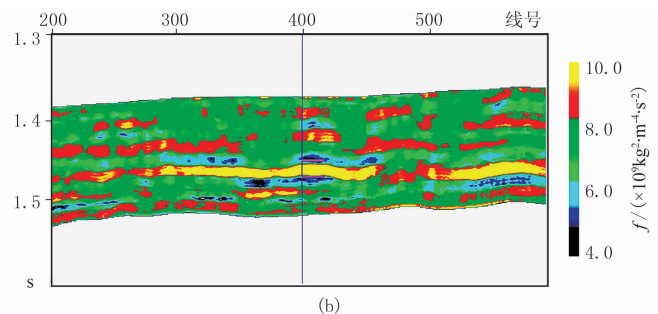


图 5 匹配出的煤层强反射



(a)



(b)

图 8 煤层强反射分离前(a)、后(b)反演得到的流体项

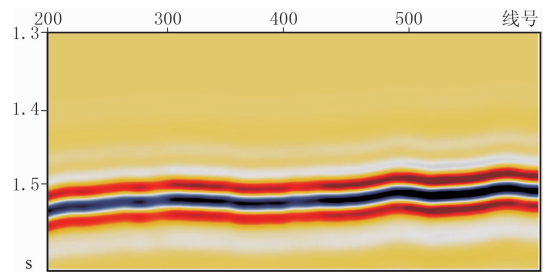


图 6 空间平滑处理后的煤层强反射

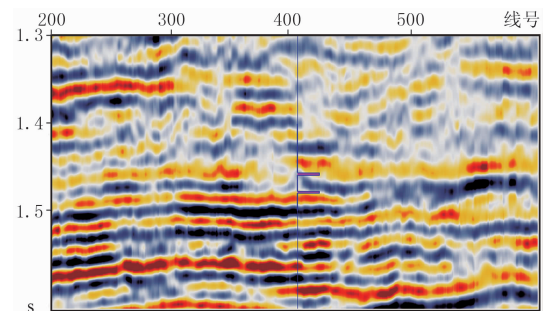


图 7 去除煤层强反射后的小角度叠后地震记录

## 7 结论

为揭示煤层强反射之下的含气层的有效反射信息,本文提出了匹配追踪煤层强反射分离方法。匹配追踪分解时采用 Blumensath 等给出的迭代算法,尽管该算法是一种贪婪算法,但由于对每个地震道只需要进行一次匹配分解,因此其计算效率较高。模型数据和实际资料处理结果均证明了本文方法的有效性。

匹配追踪去煤层强反射方法的关键是稀疏字典的选择,若选择不当,则不能对煤层强反射信息进行有效的稀疏表示。通过对地震数据在不同的一维字典中的稀疏性的对比、分析,并顾及强反射信息的低频特征,选取由低频原子构成的 UDWT1D 字典稀疏表示强反射信息,取得令人满意的处理效果。

## 参考文献

- [1] 印兴耀,张繁昌,孙成禹. 叠前地震反演. 山东东营: 中国石油大学出版社,2010,1-3.
- [2] 张世鑫,印兴耀,张繁昌. 基于三变量柯西分布先验约束的叠前三参数反演方法. 石油地球物理勘探, 2011,46(5):737-743.  
Zhang Shixin, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Prestack three term inversion method based on Trivariate Cauchy distribution prior constraint. OGP, 2011, 46(5):737-743.
- [3] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J et al. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective. Geophysics, 2003,68(1):29-39.
- [4] Guo Jian, Wang Yanghua. Recovery of a target reflection underneath coal seams. Journal of Geophysics and Engineering, 2004,1(1):46~50.
- [5] Elad M. Sparse and Redundant Representations: From Theory to Applications in Signal and Image Processing. Springer, 2010.
- [6] 李海山,吴国忱,印兴耀. 形态分量分析在去除地震

- 资料随机噪声中的应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 554-561.
- Li Haishan, Wu Guochen, Yin Xingyao. Application of morphological component analysis to remove of random noise in seismic data. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 554-561.
- [7] Hennenfent G, Herrmann F J. Seismic denoising with nonuniformly sampled curvelets. Computing in Science and Engineering, 2006, 8(3): 50-59.
- [8] Broadhead M. Sparse seismic deconvolution by method of orthogonal matching pursuit. Annual Conference and Exhibition of EAGE, 2010, 14-17.
- [9] Zhang R. Seismic Reflection Inversion by Basis Pursuit(D). The University of Houston, 2010, 3446892.
- [10] 刘小龙, 刘天佑, 王华等. 基于匹配追踪算法的频谱成像技术及其应用. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 850-855.
- Liu Xiaolong, Liu Tianyou, Wang Hua et al. Spectrum imaging technique and its application based on matching pursuit algorithm. OGP, 2010, 45(6): 850-855.
- [11] 张繁昌, 李传辉, 印兴耀. 三角洲砂岩尖灭线的地震匹配追踪瞬时谱识别方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(1): 82-88.
- Zhang Fanchang, Li Chuanhui, Yin Xingyao. Delta fringe line recognition based on seismic matching pursuit instantaneous spectral characteristics. OGP, 2012, 47(1): 82-88.
- [12] 李海山, 吴国忱, 印兴耀. 形态分量分析在地震数据重建中的应用. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 236-243.
- Li Haishan, Wu Guochen, Yin Xingyao. Morphological component analysis in seismic data reconstruction. OGP, 2012, 47(2): 236-243.
- [13] 马坚伟. 稀疏促进地震勘探. 中国地球物理学会第二十七届学术年会论文集, 湖南长沙, 2011.
- Ma Jianwei. Sparsity-promoting seismic exploration. The 72th Annual Meeting of Chinese Geophysical Society, Changsha, Hunan, 2011.
- [14] Hennenfent G, Fenelon L, Herrmann F J. Nonequispaced curvelet transform for seismic data reconstruction. Geophysics, 2010, 75(6): WB203-WB210.
- [15] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [16] Starck J L, Murtagh F, Fadili M J. Sparse Image and Signal Processing: Wavelets, Curvelets, Morphological Diversity. Cambridge University Press, 2010.
- [17] 程文波, 王华军. 信号稀疏表示的研究及应用. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 148-150.
- Cheng Wenbo, Wang Huajun. The research and application of sparse signal representation. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(5): 148-150.
- [18] Blumensath T, Davies M E. Iterative thresholding for sparse approximations. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2008, 14(5): 629-654.
- [19] Mallat S G, Jaggi S, Karl W. High resolution pursuit for feature extraction. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1998, 5(4): 428-449.
- [20] 李恒建, 张家树, 陈怀新. 一种快速稀疏分解图像去噪新方法. 光子学报, 2009, 38(11): 3009-3014.
- Li Hengjian, Zhang Jiashu, Chen Huaixin. A fast image denoising method based on space decomposition. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 3009-3014.
- [21] Donoho D L, Tsai Y, Drori I et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stage-wise orthogonal matching pursuit. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [22] Herrity K K, Gilbert A C, Tropp J A. Sparse approximation via iterative thresholding. IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006, 624-627.
- [23] 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. 石油地球物理勘探, 2013, 48(3): 351-358.
- Li Haishan, Wu Guochen, Yin Xingyao. Amplitude-preserved ground-roll suppression method based on morphological component analysis. OGP, 2013, 48(3): 351-358.
- [24] Starck J L, Fadili M J and Murtagh F. The undecimated wavelet decomposition and its reconstruction. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 297-309.
- [25] 万书亭, 吕路勇, 何玉灵. 基于提升模式非抽样小波变换的滚动轴承故障诊断方法研究. 振动与冲击, 2009, 28(1): 170-173.
- Wan Shuting, Lü Luyong, He Yuling. Fault diagnosis method of rolling bearing based on undecimated wavelet transformation of lifting scheme. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 170-173.
- [26] 印兴耀, 张世鑫, 张繁昌等. 利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层描述和流体识别. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 373-380.
- Yin Xingyao, Zhang Shixin, Zhang Fanchang et al. Utilizing Russell approximation-based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification. OGP, 2010, 45(3): 373-380.

(本文编辑:朱汉东)

## 作者简介



李海山 工程师, 1984年生; 2007年本科毕业于大庆石油学院地球物理专业, 2010年获东北石油大学固体地球物理学专业硕士学位, 2013年获中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业博士学位; 曾从事基于稀疏表示的地震资料处理解释方法研究, 在专业期刊及学术会议上发表论文数篇; 现在在中国石油勘探开发研究院西北分院从事非均质储层预测方法研究和地学软件开发。