

基于盲源分离的ICA去噪技术在裂缝预测中的应用

王有涛^{1,2,3} 桂志先^{1,3}

(1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 武汉, 430100; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 东营, 257000; 3. 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉, 430100)

摘要: 地震记录中不可避免地包含随机干扰信号, 直接利用原始的地震资料开展裂缝发育带预测, 对裂缝预测中采用的边缘检测算法影响很大, 降低了预测结果的准确性。因此, 有必要对地震资料进行去除噪声的处理, 提高原始地震资料的品质。本文基于盲源分离的独立分量分析方法(Independent component analysis, ICA)去噪技术, 将地震资料分解为不同级次的背景与储层目标反射响应, 实现有效信号与随机噪声的区分, 去噪效果优于常规去噪算法的效果, 保证了去噪后有效信息基本不受损失, 处理后地震资料横向波形特征的稳定性得到了较好改善。实际工区应用效果表明, 利用去噪处理后的地震资料开展边缘检测裂缝预测, 裂缝发育区分布规律与区域断裂发育特征具有较好的一致性, 且与钻井揭示的裂缝发育特征吻合性较好, 从而提高了火成岩裂缝发育区预测的可靠性。

关键词: 盲源分离; 独立分量分析; 去噪; 裂缝预测; 边缘检测

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A

Application of ICA Denoising Based on Blind Source Separation in Fracture Prediction

Wang Youtao^{1,2,3}, Gui Zhixian^{1,3}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Wuhan, 430100, China; 2. Research Institute of Exploration & Development of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, 257000, China; 3. Institute of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan, 430100, China)

Abstract: The random interfering noise contained in seismic record, if not removed properly, will inevitably pose a threat on the fracture development zone prediction accuracy because of greatly disturbing the key edge detection algorithm used in predicting step. Therefore, it is necessary to remove noise from seismic data and improve the quality of original seismic data. In this study, the independent component analysis (ICA) denoising technique, a blind source separation method, is used to decompose the seismic data into different levels of background and target reflection response of reservoir, and effectively make a distinction between effective signal and the random noise, which makes the processing result better than the conventional denoising algorithm. The processing ensures that the signal information basically does not suffer any losses and proffers a better lateral consistency in waveform characteristics. The field results show that, by applying the denoising method to the seismic data before edge detection, a robust fracture prediction result of fracture development zone distribution is achieved corresponding to the regional characteristics of fracture

development, and it is in accordance with the drilling results of fracture development characteristics. This study improves the reliability of the fracture prediction of igneous rock zones.

Key words: blind sourceseparation; independent component analysis; denoising; fracture prediction; edge detection

引言

近年来,盲源信号分离在理论研究和算法研发方面都取得了长足的进步,在一些实际生产领域得到了很好的应用^[1-4]。但是对盲源信号分离技术的研究尚不成熟,有关理论研究和实际应用需要进一步研究。独立分量分析方法(Independent component analysis, ICA)^[5-7]是在盲源信号分离原理的基础上发展而来的多维信号处理方法,简单来说就是通过一定原则建立目标函数,利用优化算法将观测信号分解成许多个相互独立的成分。

地震记录在采集过程中,有效信号和干扰信号均被接收到,因此地震信号处理中去噪过程是重要环节。由于地震记录中有效信号和干扰信号满足独立分量分析技术的非高斯分布,而且统计上保持独立,可以对地震信号利用独立分量分析技术开展噪声消除。许多学者在这方面也开展了相关的研究应用,刘喜武等^[8-9]将盲信号分离在地震信号去噪和反褶积中的应用可行性进行了分析;贾瑞生等^[10]利用独立分量分析方法对微震信号进行降噪处理,提取微震有效信号;杨宝骏等^[11]论述了基于独立分量分析的多次波消减技术;吕文彪等^[12]提出了基于独立分量分析的叠前地震资料单频噪声压制的方法,有效保护相同频段范围的有效波,提高资料信噪比。

本文基于盲源分离技术,将地震资料分解为不同级次的背景与储层目标反射响应,进而将能够反映储层裂缝特征的有效信息提取出来,可以较为直观地进行裂缝发育带描述和预测。

1 基于盲源分离理论的ICA去噪技术

盲源信号分离^[13]是指从观测的多道混合信号分离并恢复出每个独立源信号的过程。盲源分离技术是对信源和信道毫无任何先验知识或者知道很少的情况下,仅仅通过观测到的信号提取需要的特征信号或者是恢复出观测信号各个相对独立的成分,这也是盲信号处理得到更多关注应用的亮点。在实际情况下获取先验信息是非常困难或者过程耗费大量资源,同时,实际工程中的信号满足盲源分离中要求的源信号最多有一个高斯分布,其余均为非高斯分布的要求。独立分量分析^[7,14]是近年来逐步发展起来的信号处理新算法。其过程是将信号分解成许多个独立的成分,实现信号的增强和分析。假设某个信号是由一些独立的信号源混合而成,要将这些信号源分离,单一通道的观察无法做到分解。独立分量分析技术通过多导信号处理的方法,利用信号源混合成的多道同步观察可以做到较好的分离。独立分量分析和盲源分离具有相似的算法,只不过盲源分离研究的范围更广,独立分量分析是盲源分离的核心技术。

独立分量分析是对 n 个相对独立的未知源信号 $\mathbf{S}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$, 经过未知信道的传输,在 m 个传感器上获取观测数据向量 $\mathbf{X}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 。在此假定传输是瞬时的(即为ICA瞬时模型),也就是说不同的信号到达每个传感器的时间差别可以忽略不计,并且传感器接收到的是各个原始信号的线性组合,即认为第 i 个传感器的输出为

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} s_j(t) \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为混合系数, $s_j(t)$ 为第 i 个原始信号。式(1)可用矩阵表示为

$$X(t) = AS(t) \quad (2)$$

式中: A 为 $n \times m$ 维的矩阵, 第 i 行、第 j 列的元素为 a_{ij} , 称为混合矩阵。则 ICA 问题就表述为在混合矩阵 A 和源信号 S 均未知的情况下, 只是利用传感器接收到的信号 X , 尽量真实地分离出源信号 S , 即可以通过建立一个分离矩阵 $W = (w_{ij})_{n \times m}$, 使 W 对混合信号 $X(t)$ 作线性变换 $Y(t) = WX(t)$, 得到源信号 $S(t)$ 的一个可靠估计, 那么, ICA 问题的求解就可表示为

$$Y(t) = WX(t) = WAS(t) = GS(t) \quad (3)$$

式中: G 为全局系统矩阵。假设经过学习使 $G = I$ (I 为 $n \times n$ 单位矩阵), 则 $Y(t) = S(t)$, 从而实现了源信号的分离(恢复或估计)。

通过以上建立模型的过程可以发现, 盲源信号分离存在多解的问题, 即针对一组观测信号 $X(t)$ 有可能存在多个不同的混合矩阵 A 与源信号 $S(t)$ 。为使得 ICA 问题有确定的解, 需要做一些符合实际工程应用的假设和约束条件。在本文研究中, 为了达到去除噪声的目的, 将非高斯随机噪声也看作源信号的一部分, 对它与其他“真实的”源信号的混合信号进行盲分离处理, 实现分离噪声和有效信号的目的, 且这样的算法适用范围更广、稳健性更强。

随机变量采用 ICA 分离后, 能够使得各个分量间最大限度地接近统计独立, 即认为各个分量具有最强的非高斯性。根据极大似然估计的原理, 满足非高斯分布的含噪随机变量, 在噪声方差较小的情况下, 其非高斯性越强则估计越准确。所以先对含噪的资料进行 ICA 分离, 能够有效地增强信号的非高斯性, 这样再通过极大似然估计就能达到减少估计误差的目的。基于这些特性, 将 ICA 技术与稀疏编码(Sparse coding, SC)算法结合, 简称 ICA-SC 算法。

含噪 ICA 模型为 $X = AS + N$, 其中 N 表示噪声且通常假设其为高斯噪声。通过极大似然估计的方法做正交 ICA 分解, 可得到估计的分离矩阵 W , 可将式 $X = AS + N$ 转换为

$$WX = WAS + WN \quad (4)$$

式中: W 为正交矩阵, 即通过 ICA 估计混合矩阵 A 的最佳正交逆矩阵; 而干扰项 WN 仍然满足高斯分布且白化。通过 ICA 变换能够使得各个分量满足非高斯, 故 ICA 技术与 SC 理论的交点就在于通过 ICA 变换使得目标数据满足稀疏分布的要求。值得一提的是拉普拉斯分布就是典型的稀疏分布, 这恰恰即为 ICA 变换的优势所在。

假设目标数据 x 满足单位方差, 则典型的拉普拉斯的概率分布为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2}s} e^{-\sqrt{2}\frac{|x|}{s}} \quad (5)$$

式中: s 为尺度函数, 记为 $s = E\{x^2\}$ 。

根据目标数据(稀疏分量)的概率分布, 求解稀疏惩罚函数的一阶导数, 再代入极大似然估计公式得到对应的收缩函数, 求解如下

$$l(x) = -\ln p(x) \quad (6)$$

$$l'(x) = \frac{\partial(-\ln p(x))}{\partial x} \quad (7)$$

式中 $l(x)$ 为稀疏惩罚函数。极大似然估计表达式为

$$M(x) = \text{sign}(x) \max(0, |x| - \sigma^2 |l'(x)|) \quad (8)$$

将式(5,7)代入式(8), 可以得到拉普拉斯密度模型对应的收缩函数

$$M_{\text{lap}}(x) = \text{sign}(x) \max(0, |x| - \sqrt{2}\sigma^2) \quad (9)$$

式中 σ^2 表示目标数据中噪声的方差。

通过式(9)可知,稀疏编码理论去噪的原理是根据有效信号的非高斯性(该模型为拉普拉斯分布)及噪声信号的高斯性中假设了噪声信号满足高斯分布,通过收缩函数达到压制噪声的目的。

ICA-SC算法的计算机实现步骤如下:

(1)采用ICA方法估计一个正交矩阵 W ,对目标数据 x 左乘 W ,使得ICA变换后的数据 $\hat{x} = Wx$ 满足稀疏分布;

(2)使用收缩函数计算目标数据 \hat{x} 的各个稀疏分量 $\hat{x}'_i = M_{\text{lap}}(\hat{x})$;

(3)对正交矩阵 W 求逆,得到 $e = W^{-1}\hat{x}'$ 。

2 ICA 技术在地震资料去噪中的应用

地震资料信噪比是决定数据有效性的基础,而随机噪声是影响资料信噪比的重要因素。真正意义的高斯信号具有良好的性质,一般多用于理论研究,而实际资料中,很少有绝对满足高斯分布的信号。地震资料中有效信号反映地下地质体的信息并具有一定的连续性,而随机噪声则无固定频率与视速度,因此可以认为两者彼此统计独立。根据以上论述,现假设实际地震记录中的有效信号和随机噪声均为源信号,并且两者都有统计独立与非高斯分布的特征。这样就可以通过ICA技术对地震记录中的有效信号与噪声进行分离。

2.1 仿真实验 1

图1(a)为随机产生、满足非高斯分布的300个样点,视为反射系数序列。子波设为主频为40 Hz的Ricker子波,子波的长度为81。

通过将反射系数序列与Ricker子波褶积,得到长度为300个样点的模拟地震记录,如图1(b)所示。

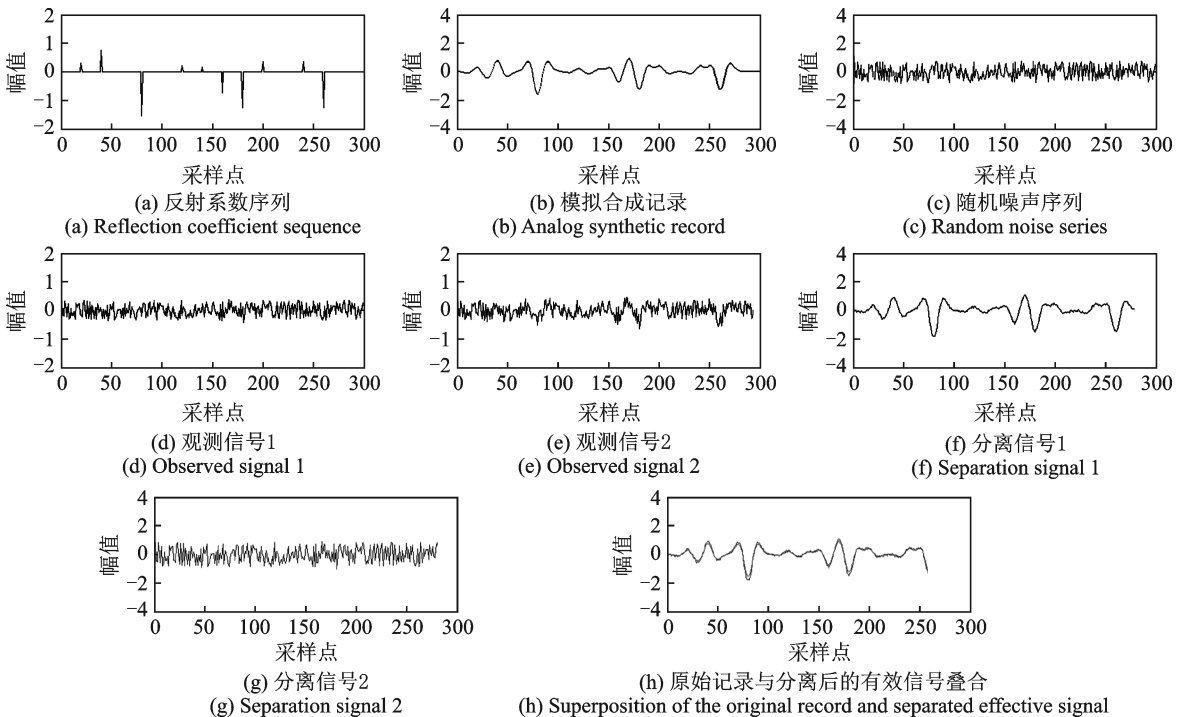


图1 一维仿真信号的ICA去噪效果分析

Fig.1 Analysis of ICA denoising effect of one-dimensional simulation signal

图1(c)为随机产生、服从非高斯分布的序列,含有300个样本值,将该序列作为随机噪声。将随机噪声序列与模拟的合成记录按随机生成的矩阵 $A = \begin{pmatrix} 0.073 & 3 & 0.466 & 2 \\ 0.266 & 3 & 0.440 & 5 \end{pmatrix}$ 进行混合后作为实际记录到的观测信号如图1(d)和图1(e)所示。

采用ICA技术对观测到的两个信号进行信噪分离,结果如图1(f)和图1(g)所示,进一步将分离后的有效信号与模拟生成的原始记录叠合在一起显示,如图1(h)所示。由此可以看出经过分离后的信号较好地保持了原始信号的波形特征,一致性较好。在被噪声淹没的观测信号中实现了信噪分离的目标。根据地震信号的模拟实验结果,表明ICA技术可应用于去除地震资料中的随机噪声。

2.2 仿真实验2

为更好地说明ICA技术的分离性能,使用含噪多道模型来验证,模拟水平层状介质和楔形体褶积模型如图2(a)所示。

对加噪后(SNR=2 dB)的地震记录图2(b)采用ICA技术进行信噪分离,具体处理的过程是:取宽度为5的时窗,对时窗内的5道记录做加权平均,并把加权平均后的结果作为标准道与时窗内的第1道做ICA分离。分离后的结果采用与单道模型相同的操作,与标准道求相似系数,相似系数绝对值大的记为有效信号,并根据结果的正负来判断是否发生极性变化。

将分离出的有效信号作为第1道,以步长为1滑动时窗,重复上述操作,分离的有效信号作为第2道,依此类推,分离出的有效信号和噪声结果分别如图2(c,d)所示。通过对比图2(c,d)不难看出,ICA技术能够有效地分离噪声与有效信号,提高了剖面的信噪比。将该方法的去噪结果与常规去噪方法的效果也进行了对比分析。图2(e,f)分别是利用f-x域去噪技术和小波软阈值去噪技术去噪后的结果。从去噪效果可以看出,图2(c)的去噪效果明显优于图2(e,f)效果,这3种方法去噪后的信噪比分别为6.5,3.5,4.6,说明了该方法的有效性。

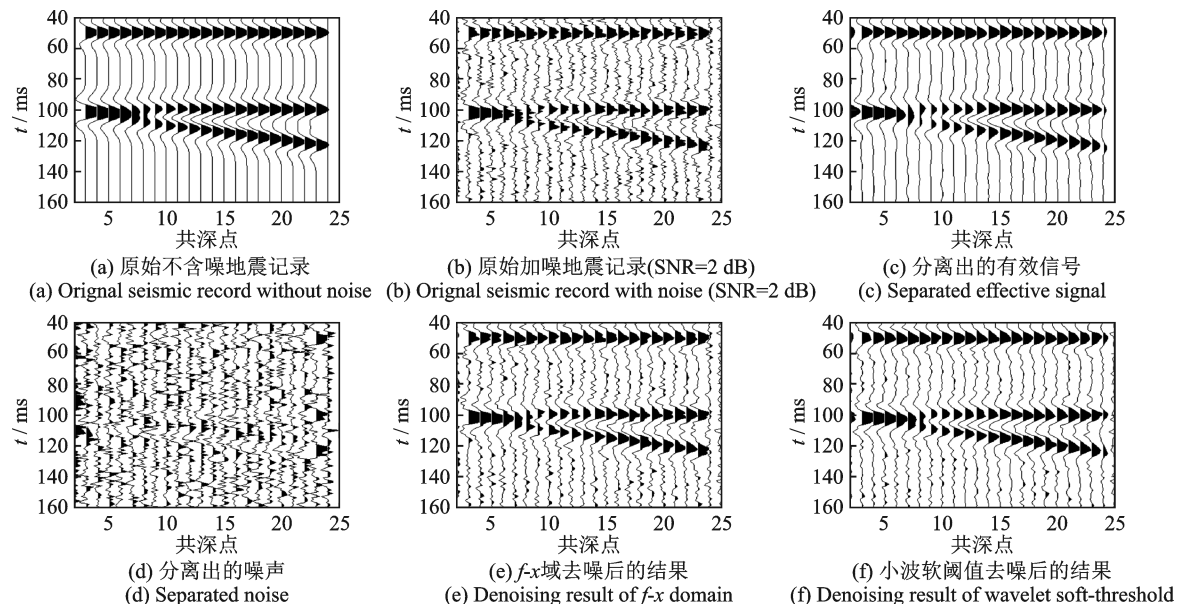


图2 二维仿真信号的ICA去噪效果分析

Fig.2 Analysis of ICA denoising effect of two-dimensional simulation signal

3 ICA 去噪技术在车排子地区应用效果分析

近年来,准噶尔盆地车排子地区石炭系勘探取得了较好的勘探成果,展示了该区石炭系火成岩储层的勘探潜力,裂缝预测是描述火成岩储层的关键环节。本次研究利用该区三维地震数据体进行了基于盲源分离的ICA去噪处理,并在此基础上开展裂缝预测应用。

图3展示了过P615井测线盲源分离技术的去噪效果。对比图3(a—c)可以看出,随着盲源分离技术多级分离得到的有效信号信噪比明显增强,地震资料反射同相轴变得连续,横向波形特征的稳定性得到提高。对比地震资料的频谱特征图3(e,f)看出,二级盲源分离处理后的地震资料相对于原始地震资料的资料品质得到了较好的提高,增强了地震资料对地质信息的刻画能力。图3(d)为分离出来的随机噪声,基本不含有效信号,从而有效保证了去噪后有效信息基本不受损失。

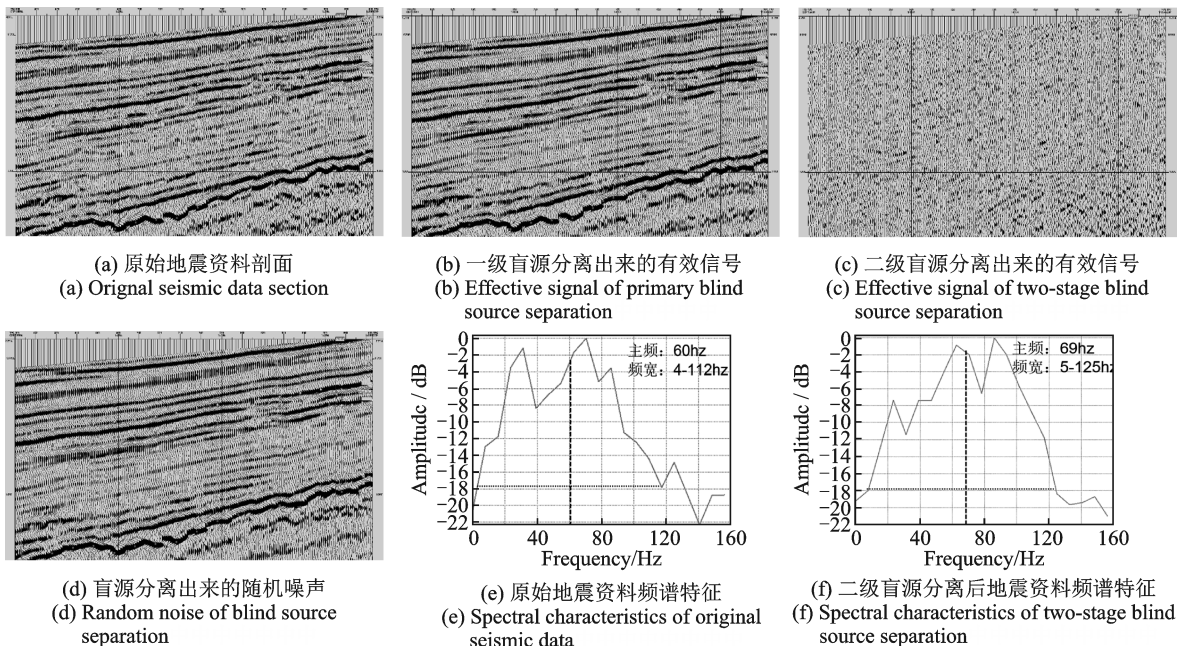


图3 过P615井测线地震资料去噪效果

Fig.3 Seismic data denoising effect of crossing well P615

利用去噪后的地震数据体,采用结构导向梯度属性边缘检测方法开展P6井区裂缝发育带的检测,图4,5分别是去噪前后沿石炭系顶面进行边缘检测结果的对比图。结合地质构造分析,研究区内发育近南北向P61断层和北西向P68断层,断裂附近裂缝相对较为发育,其中P637井钻遇安山岩和凝灰岩荧光显示44.1 m,岩心观察见较多微细裂缝,未被充填;P614井钻遇大套凝灰岩,二级荧光显示24.8 m,岩心观察见较多微细裂缝,少量被方解石充填;P621井钻遇致密凝灰岩,有较多微细裂缝发育,少量方解石充填;在两条断裂附近的P610井钻遇凝灰岩和凝灰质泥岩,受断裂影响,凝灰质泥岩亦发育少量微细裂缝。应用效果表明,在ICA去噪的基础上进行边缘检测的效果优于原始地震数据的检测结果^[15-16],裂缝发育特征特别是具有一定规模的断层,横向定位更加准确,与断裂发育特征一致性较好,在横向展布上连续性更好。

在ICA去噪的基础上,采用基于倾角扫描的曲率属性^[17-18],对P69井区石炭系顶面裂缝发育带进行了预测,提高了裂缝发育带预测的可靠性。图6是P69井区石炭系顶面裂缝发育带预测结果,其中图

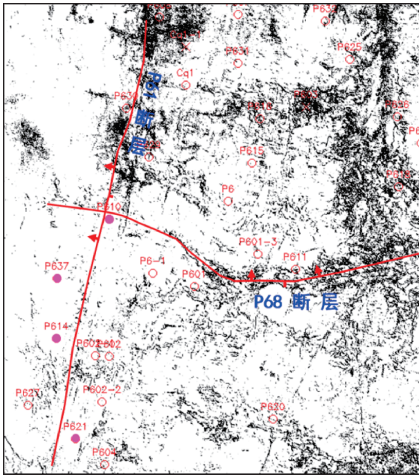


图4 原始地震数据体沿石炭系顶部裂缝检测结果

Fig.4 Detection results of the fracture along the top of the carboniferous system by the original seismic data

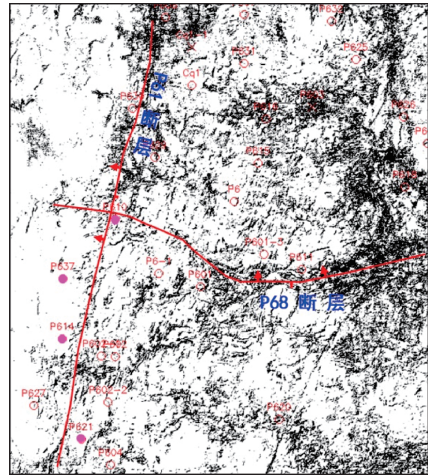
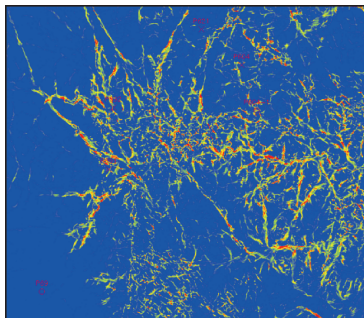
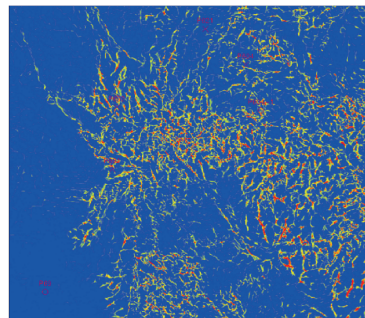


图5 盲源分离去噪后沿石炭系顶部裂缝检测结果

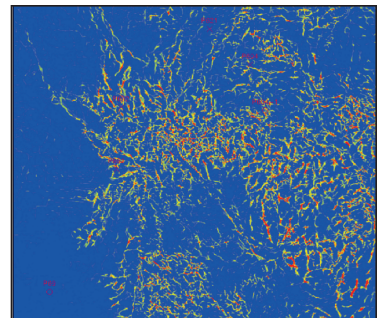
Fig.5 Detection results of the fracture along the top of the carboniferous system by the blind source separation and denoising seismic data



(a) 大尺度曲率
(a) Large scale curvature



(b) 中尺度曲率
(b) Mesoscale curvature



(c) 小尺度曲率
(c) Small curvature

图6 P69井区石炭系顶面裂缝发育带预测

Fig.6 Prediction of fracture zone for the top carboniferous system of P69 well field

6(a—c)分别是基于倾角扫描的大尺度曲率属性(对应的 $\alpha=0.5$)、中尺度曲率属性(对应的 $\alpha=1$)和小尺度曲率属性(对应的 $\alpha=2$)平面分布。对比剖面 and 平面图可以看出,大尺度曲率属性反映了地层的弯曲以及主要的区域断层分布情况,中小尺度曲率属性则反映了断层、构造上的微妙变化,较好地刻画研究区裂缝发育带。

4 结束语

(1) ICA 技术去噪后能够有效地保持原始信号的波形,在被噪声淹没的观测信号中实现了信噪分离的目标。

(2) 随着盲源分离技术多级分离得到的有效信号的信噪比逐步增强,反射波同相轴变得连续,横向波形特征的稳定性得到提高,分离出来的随机噪声,基本不含有效信号,从而有效保证了去噪后有效信息基本不受损失。

(3) 在ICA去噪的基础上进行地震资料边缘检测的效果优于原始地震数据的检测结果,裂缝发育区分布规律与区域断裂发育特征具有较好的一致性,横向定位更加准确,在横向展布上连续性更好,且与钻井揭示的裂缝发育特征吻合性较好,从而提高了火成岩裂缝发育区预测的可靠性。

参考文献:

- [1] Lee T W, Bell A J. Blind source separation of real world signals[C]//IEEE International Conference on Neural Networks'97. [S.l.]: IEEE, 1997: 2129-2134.
- [2] 付卫红,杨小牛,刘乃安,等. 基于概率密度估计盲分离的通信信号盲侦察技术[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 24-27.
Fu Weihong, Yang Xiaoni, Liu Naian, et al. Communication signal blind reconnaissance technology based on probability density estimation blind sources separation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2006, 34(10): 24-27.
- [3] Owis M I, Youssef A B M, Kadah Y M. Characterisation of electrocardiogram signals based on blind source separation[J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2002, 40(5): 557-564.
- [4] 刘喜武,刘洪,李幼铭. 独立分量分析及其在地震信号处理中的应用初探[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 90-96.
Liu Xiwu, Liu Hong, Li Youming. Independent component analysis and its testing application on seismic signal processing[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 90-96.
- [5] 刘云鑫. 盲源信号分离原理与应用研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2013.
Liu Yunxin. Research on the principle and application of blind source separation[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [6] 冯健,付兴龙,刘浩达,等. 非线性盲源分离算法研究[J]. 中国科技论文在线, 2009, 4(1): 5-10.
Feng Jian, Fu Xinglong, Liu Haoda, et al. Algorithms research on nonlinear blind source separation[J]. Sciencepaper Online, 2009, 4(1): 5-10.
- [7] 杨福生,洪波. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 17-25.
- [8] 刘喜武,刘洪,郑天愉. 用独立分量分析算法实现地震转换波与多次反射波分离[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(1): 11-19.
Liu Xiwu, Liu Hong, Zheng Tianyu. Separation of converted-wave from seismic multiples by independent component analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(1): 11-19.
- [9] 刘喜武,刘洪. 地震盲反褶积综述[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 203-209.
Liu Xiwu, Liu Hong. Survey on seismic blind deconvolution[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 203-209.
- [10] 贾瑞生,赵同彬,孙红梅,等. 基于经验模态分解及独立成分分析的微震信号降噪方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 1013-1023.
Jia Ruisheng, Zhao Tongbin, Sun Hongmei, et al. Micro-seismic signal denoising method based on empirical mode decomposition and independent component analysis[J]. Chinese Journal of Geophys, 2015, 58(3): 1013-1023.
- [11] 杨宝骏,李月,刘晓华,等. 改善地震勘探记录的4项技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 856-862.
Yang Baojun, Li Yue, Liu Xiaohua, et al. Four processing techniques for improving the seismic prospecting records[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Editon), 2006, 36(5): 856-862.
- [12] 吕文彪,曹中林,张华. 一种叠前地震资料单频噪声压制新方法[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(3): 65-68.
Lü Wenbiao, Cao Zhonglin, Zhang Hua. A new method of single frequency noise suppression in prestackdata[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(3): 65-68.
- [13] 张发启,张斌,张喜斌. 盲信号处理及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006.
- [14] Yin M. Independent component ordering in ICA time series analysis[J]. Neurocomputing, 2001, 41: 145-152.
- [15] Luo Y, Higgs W G, Kowalik W S. Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1996, 15(1): 324-327.

- [16] 苟量, 彭真明. 小波多尺度边缘检测及其在裂缝预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 309-313.
Gou Liang, Peng Zhenming. Multi-scale edge detection of wavelet and application in fractural prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(3): 309-313.
- [17] 印兴耀, 高京华, 宗兆云. 基于离心窗倾角扫描的曲率属性提取[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3411-3421.
Yin Xingyao, Gao Jinghua, Zong Zhaoyun. Curvature attribute based on dip scan with eccentric window[J]. Chinese Journal of Geophys, 2014, 57(10): 3411-3421.
- [18] 文武, 文晓涛. 曲率在复杂地质体检测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(7): 84-87.
Wen Wu, Wen Xiaotao. Application of curvature in complex geological detection[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(7): 84-87.

作者简介:

王有涛(1982-),男,博士,高级工程师,研究方向:油气地球物理勘探方法研究,E-mail:297660565@qq.com。



桂志先(1964-),男,博士后,教授,博士生导师,研究方向:地震资料处理与解释、地震各向异性、信号与图像处理等。

(编辑:夏道家)