

doi: 10.11720/wtyht.2017.3.18

刁瑞, 吴国忱, 尚新民, 等. 地面阵列式微地震数据盲源分离去噪方法[J]. 物探与化探, 2017, 41(3): 521–526. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.18>

Diao R, Wu G C, Shang X M, et al. The blind separation denoising method for surface array micro-seismic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 521–526. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.18>

地面阵列式微地震数据盲源分离去噪方法

刁瑞^{1,2}, 吴国忱¹, 尚新民², 芮拥军², 崔庆辉²

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 由于地面噪声干扰多, 原始微地震监测数据的信噪比相对较低, 而数据品质决定了微地震事件的定位精度, 因此, 提高监测数据信噪比是微地震处理的关键环节。充分利用地面阵列式微地震数据监测台站数量多、间距近和分布广的优点, 采用基于互相关的盲源分离去噪方法, 进行随机噪声的压制。基于互相关盲源分离的阵列式微地震数据去噪方法, 采用负熵作为目标函数, 以粒子群优化方法进行高效求解, 并通过互相关系数有效解决了盲源分离的不确定性问题, 实现了地面阵列式微地震事件分量与噪声干扰分量的有效分离。通过正演模拟数据和实际微地震监测数据的去噪效果分析, 证实了该方法的有效性和实用性。

关键词: 水力压裂; 微地震事件; 信噪比; 独立分量分析; 互相关系数

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2017)03-0521-06

0 引言

全世界页岩气、页岩油和煤层气等非常规油气储层具有低孔隙度和低渗透率的物性特征, 决定了其较大的开采难度, 储层的压裂改造成为提高油气采收率的主要手段^[1-2]。水力压裂是通过改善井筒与地层裂隙间的裂缝系统, 从而增加油气渗流通道, 提高油气产能, 是非常规油气资源开发的有效技术, 而微地震监测是最有效、最经济和最及时的水力压裂监测技术^[3-6]。由于水力压裂产生的震源能量相对较弱, 而且地面噪声干扰非常多, 微地震数据中的有效信号就淹没在噪声中, 使得地面微地震数据的信噪比相对较低, 严重影响微地震事件的定位精度。微地震数据的去噪方法主要有: 带通滤波、预测滤波、卡尔曼滤波、时频域滤波、拉东变换、曲波变换、K-L 变换、奇异值分解、变模态分解和互相关函数法等压噪技术^[7-13]。

在地面微地震数据信噪比相对较低的情况下, 十分有必要针对噪声干扰源特征, 结合微地震观测系统特点, 采取针对性的噪声压制手段, 有效提高地面微地震数据的信噪比, 从而实现微地震震源点的精确定位。常规去噪方法通常适用于井中微地震数据, 相对于井中微地震而言, 地面微地震数据具有噪声干扰严重、信噪比低、事件识别难度大的特点, 而针对地面阵列式微地震数据的去噪技术相对较少, 无法充分发挥地面阵列式观测系统的优势。因此, 采用盲源分离去噪方法进行噪声压制, 充分发挥地面阵列式数据监测台站数量多、间距近和分布广的优势。基于微地震事件分量和噪声干扰分量相互统计独立的假设条件, 利用基于互相关法的盲源分离方法压制随机噪声干扰, 实现地面阵列式微地震数据信噪比的有效提高。基于盲源分离的地面阵列式微地震数据去噪方法, 采用负熵作为目标函数, 以粒子群最优化方法快速高效地实现方程的精确求解, 并通过互相关系数有效解决了盲源分离后分量的不

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2017-01-08

基金项目: 国家重大专项“致密油藏储层地震预测方法及地应力研究”(2017ZX05072001)、“地震与井筒精细勘探关键技术”(2016ZX05006002); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“陆上非一致性时延地震、微地震油藏监测方法研究”(2011AA060303)

作者简介: 刁瑞(1985-), 男, 中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业博士在读, 主要从事地震资料处理和油气地球物理方法研究工作。
E-mail: diaorui1985@163.com

确定性问题,实现了微地震事件分量与噪声干扰分量的高效分离,并有效压制了噪声干扰分量,提高了地面阵列式微地震数据的信噪比,为后续微地震事件精确定位奠定了基础。

1 盲源分离去噪方法原理

1.1 基本原理

盲源分离是指从传感器接收到的混合信号中恢复出统计独立的源信号的过程^[14]。在地面阵列式微地震数据的采集过程中,微地震事件分量和噪声干扰分量同时被记录下来,微地震原始数据是事件分量和噪声干扰分量的混和。在后续的去噪过程中,只有原始监测数据是已知的,微地震事件分量和噪声干扰分量都是未知的,阵列式微地震数据去噪处理在本质上就是一个盲源分离问题。

假设地面阵列式微地震数据中包含的事件分量和噪声干扰分量是相互统计独立,并且服从非 Gauss 分布,依照盲源分离理论,取一道微地震数据的两次观测值或者相邻较近的两道微地震数据,经过盲源分离处理后,即可分离出原始数据中包含的事件分量和噪声干扰分量,从而达到微地震数据信噪比提高的目的。

盲源分离方法的基本原理可用混合数学方程式

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (1)$$

表述。其中: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$,由 M 个可观测向量 $x_i (i=1, 2, \dots, M)$ 构成,即在地面采用 M 个站点进行监测得到的阵列式微地震数据; $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$,由 N 个未知信号源 $s_i (i=1, 2, \dots, N)$ 构成,包括微地震事件分量和噪声干扰分量等; $\mathbf{A}$ 为 $M \times N$ 阶混合矩阵,表示微地震事件分量和噪声干扰分量的混合关系。

盲源分离去噪方法的主要思路是,在混合矩阵 $\mathbf{A}$ 和未知信号源 $s_i (i=1, 2, \dots, N)$ 均未知的情况下,构建 $N \times M$ 阶盲源分离矩阵 $\mathbf{B}$,使 M 个观测向量 $x_i (i=1, 2, \dots, M)$ 经分离矩阵 $\mathbf{B}$ 变换之后,尽可能恢复出微地震事件分量 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 和噪声干扰分量 $\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$,其数学表达式为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

1.2 目标函数和优化算法

基于盲源分离的阵列式微地震数据去噪算法是一个最优化问题,盲源分离核心算法可概括为两个方面:一个方面是采用何种目标函数作为判断准则,从而使得微地震事件分量和噪声干扰分量满足相互独立的假设条件,另一方面是选用何种最优化算法,

从而构建分离矩阵,实现方程快速高效的最优求解。

利用盲源分离方法对地面阵列式微地震数据进行去噪处理,其假设条件是微地震事件分量和噪声干扰分量是相互统计独立,并且服从非 Gauss 分布。因此,确定目标函数的关键是如何评价各个分量的非 Gauss 性,当非 Gauss 性度量达到最大时,表明微地震事件分量和噪声干扰分量之间是相互统计独立的,在此采用负熵作为判断准则。而盲源分离算法的收敛性、稳定性和有效性则取决于所选择的最优化算法,在此采用粒子群优化算法进行求解,解决了方程求解效率较低的问题。

负熵可以看作是分量非 Gauss 性的度量^[15],分量的非 Gauss 性越强,代表微地震事件分量和噪声干扰分量之间越独立,负熵的数学表达式为:

$$J(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y}_{\text{Gauss}}) - H(\mathbf{Y}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Y}$ 是零均值、单位方差的 Gauss 变量; $\mathbf{Y}_{\text{Gauss}}$ 是与 $\mathbf{Y}$ 具有相同协方差的 Gauss 随机向量; $H(\mathbf{Y})$ 是信号 $\mathbf{Y}$ 的熵。通常采用负熵的近似函数,可得到:

$$J(\mathbf{Y}) \propto [E\{G(\mathbf{Y})\} - E\{G(\mathbf{Y}_{\text{Gauss}})\}]^2 \quad (4)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 是数学期望; $G(\cdot)$ 是非二次函数。考虑盲源分离算法的数学模型 $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X}$,负熵可近似表示为:

$$J_G(\mathbf{B}) \propto [E\{G(\mathbf{B}\mathbf{X})\} - E\{G(\mathbf{Y}_{\text{Gauss}})\}]^2 \quad (5)$$

粒子群算法是一种非线性全局优化算法,能够实现复杂空间中最优解的搜索^[16]。在 s 维搜索空间内,共有 m 个粒子组成,第 i 个粒子的位置为 $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{is}) (i=1, 2, \dots, m)$,其飞行速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is})$,目前搜索的最优位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is})$,整个粒子群目前搜索的最优位置为 $p_a = (p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{as})$,则对第 i 个粒子的速度和位置进行更新的数学公式为:

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= \omega \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 [p_{id}(t) - z_{id}(t)] + \\ &\quad c_2 \cdot r_2 [p_{id}(t) - z_{id}(t)], \\ z_{id}(t+1) &= z_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $i=1, 2, \dots, m; d=1, 2, \dots, s; \omega$ 是惯性因子,用来描述上一代速度对当前速度的影响; c_1 和 c_2 是加速系数; r_1 和 r_2 是 0~1 范围内均匀分布的随机数。目标函数 $f(z)$ 的最佳粒子位置为:

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & f[z_i(t+1)] < f[p_i(t)] \\ z_i(t+1) & f[z_i(t+1)] \geq f[p_i(t)] \end{cases} \quad (7)$$

1.3 预处理

在进行盲源分离去噪时,首先需要进行预处理,

预处理具有两方面作用:①为了适应盲源分离的数学模型,在分离之前要进行去均值处理;②为了实现微地震事件分量和噪声干扰分量是二阶统计独立的,在分离之前要进行白化处理。

地面阵列式微地震数据表达式为:

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

由于原始地面阵列式微地震数据的均值不为零,对 $x(t)$ 进行去均值处理,数学表达式为:

$$\bar{x}(t) = x(t) - E\{x(t)\} \quad (9)$$

式中: $E\{x(t)\}$ 是 $x(t)$ 的数学期望。在实际去均值处理中,通常用算术平均来代替数学期望,数学表达式为:

$$\bar{x}_i(t) = x_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

对地面阵列式微地震数据进行去均值处理是为了简化计算流程,并不影响对混合矩阵 A 的估计。

白化处理就是对向量 X 进行线性变换,通过白化矩阵 V ,求得协方差矩阵 $\tilde{X} = VX$,使其满足单位矩阵的条件,其数学表达式为:

$$E\{\tilde{X}\tilde{X}^T\} = I \quad (11)$$

白化处理实际上是消除各分量之间的相关性,白化处理后微地震事件分量和噪声干扰分量是二阶统计独立的。考虑盲源分离的数学模型 $X=AS$,可得:

$$\tilde{x} = VAS \quad (12)$$

由于微地震事件分量和噪声分量是相互统计独立,并且 $E\{SS^T\} = I$,则令 $U=VA$,则有:

$$E\{\tilde{X}\tilde{X}^T\} = E\{(US)(US)^T\} = UE\{SS^T\}U^T = UU^T = I \quad (13)$$

由上式可以看出,白化处理并不能使微地震事件分量和噪声干扰分量恢复统计独立,但可以有效简化算法,进一步提升运算效率。

1.4 不确定性问题

盲源分离处理后得到的分离分量具有振幅值和相位不确定的问题,必须采用实用高效的方法,解决分离后微地震事件分量和噪声干扰分量的不确定性问题,实现分离分量的自动排序。根据微地震事件分量和噪声干扰分量的不同特点,引入互相关系数,采用互相关分析法来解决分离分量的不确定性问题。

互相关系数 γ 作为不同分量与初始微地震数据之间互相关性的衡量准则,可以反映微地震事件分量和噪声干扰分量与初始微地震数据之间关系的密切程度。假设初始微地震数据为 x ,盲源分离后得到的微地震事件分量为 y ,则微地震事件分量与初

始微地震数据之间的互相关系数表达式为:

$$\gamma = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

微地震事件分量与初始微地震数据之间的互相关系数 γ 值在 $-1 \sim 1$ 范围内,噪声干扰分量与初始微地震数据的互相关系数求取与之类似。不同的 γ 值代表不同的含义:①当 $0 < |\gamma| < 1$ 时,微地震事件分量与初始微地震数据在某种程度上是线性相关的, $|\gamma|$ 越逼近 1,关系越密切, $|\gamma|$ 越逼近 0,则反之;②当 $\gamma > 0$ 时,微地震事件分量与初始微地震数据是正相关,当 $\gamma < 0$ 时,微地震事件分量与初始微地震数据是负相关;③当 $\gamma = 1$ 时,微地震事件分量与初始微地震数据是完全线性相关,当 $\gamma = 0$ 时,微地震事件分量与初始微地震数据无线性相关关系。

通过比较 $|\gamma|$ 值的大小可以自动识别微地震事件分量和噪声干扰分量,当 $|\gamma|$ 值较大时,即为微地震事件分量;当 $|\gamma|$ 值较小时,即为噪声干扰分量。对于微地震事件分量的相位问题,当 $\gamma > 0$ 时,则分离得到的分量相位不变;当 $\gamma < 0$ 时,则分离得到的分量相位取反。通过互相关分析法实现了分离分量的自动排序,有效解决了盲源分离的不确定性问题。

2 模型试算分析

根据监测井的声波测井速度曲线,建立层状速度模型,利用射线追踪方法进行微地震数据正演模拟,射线追踪方法就是根据地震波的传播规律来确定地震波在地层中的传播射线路径^[17-18]。试射法射线追踪适应于水平层状介质模型,具有很快的收敛速度,且计算精度高,能够满足水平层状介质模型正演的计算精度要求。在地面布设检波器阵列,共 4 条排列,每条排列共 100 个检波器,检波器道距为 25 m,微地震震源深度为 2 960 m,震源点坐标为 (630 182, 4 141 264),如图 1a 所示,正演模拟微地震数据如图 1b 所示,由于震源点到检波器的距离不同,传播路径差异形成了明显的地震波走时差。

利用正演模拟数据验证微地震数据去噪方法的正确性和可行性。图 2a 为其中 1 个排列的微地震数据;图 2b 为添加随机噪声后的微地震数据,信噪比大幅降低,有效信号淹没在噪声当中;图 2c 为盲源分离去噪处理后的微地震数据;图 2d 为添加随机噪声微地震数据与去噪后微地震数据的差值,即为去除的随机噪声。对比处理前后的正演模拟微地震数据,随机噪声得到了较好的压制,信噪比大幅提

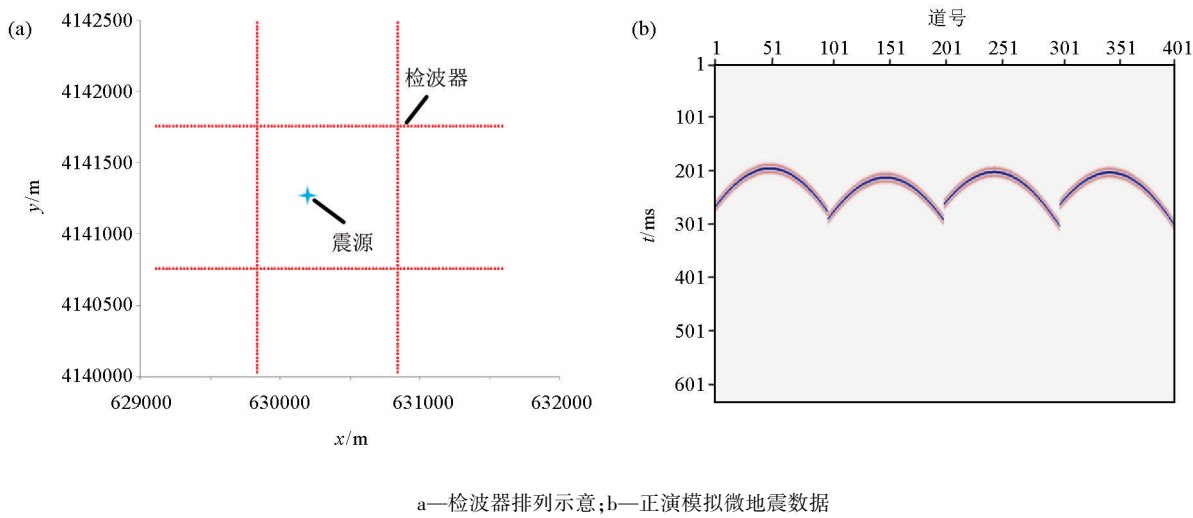
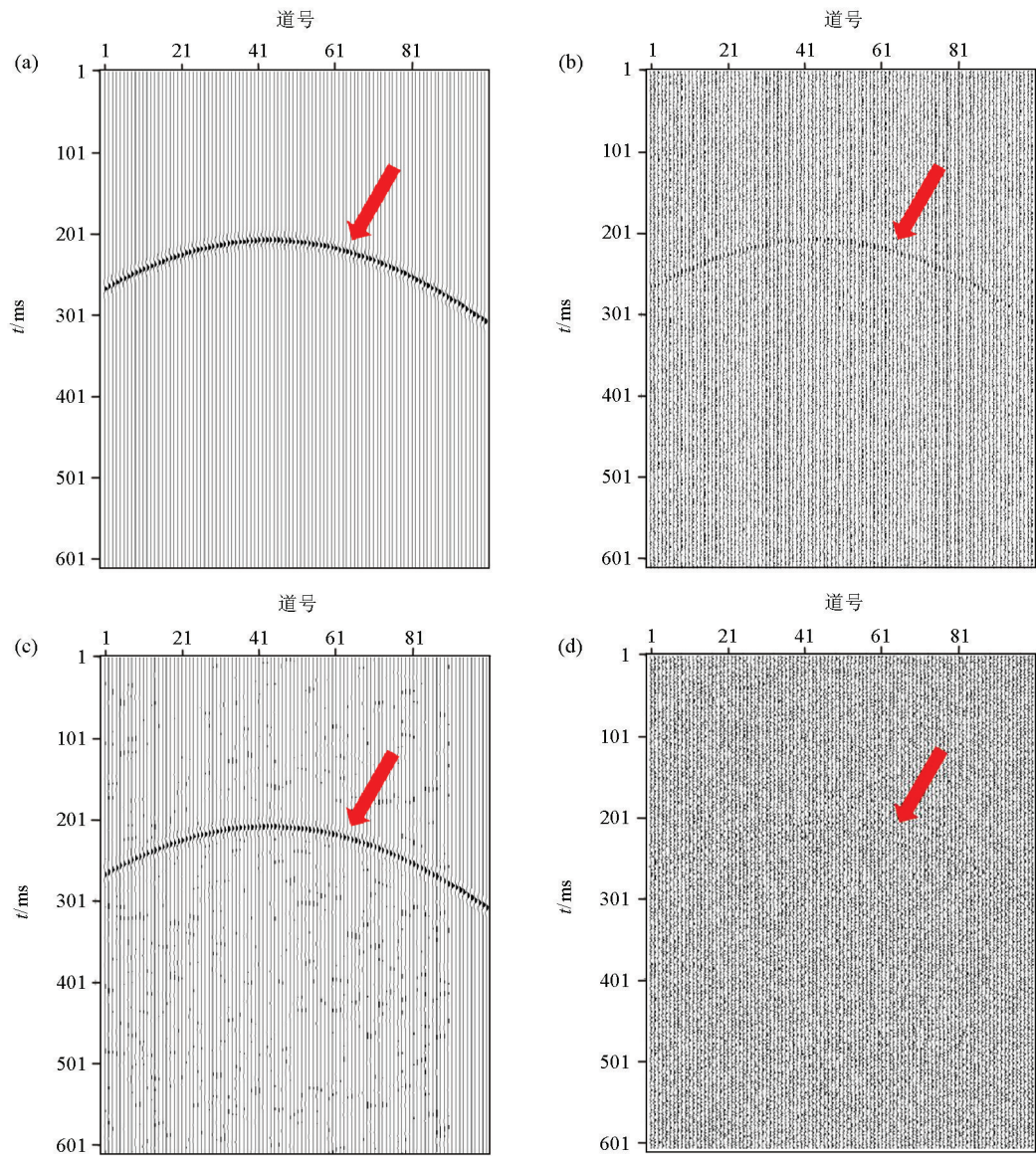


图 1 地面阵列式检波器排列及正演模拟微地震数据



a—原始微地震数据;b—含噪微地震数据;c—处理后微地震数据;d—去除的随机噪声

图 2 正演模拟地面阵列式微地震数据及去噪效果对比

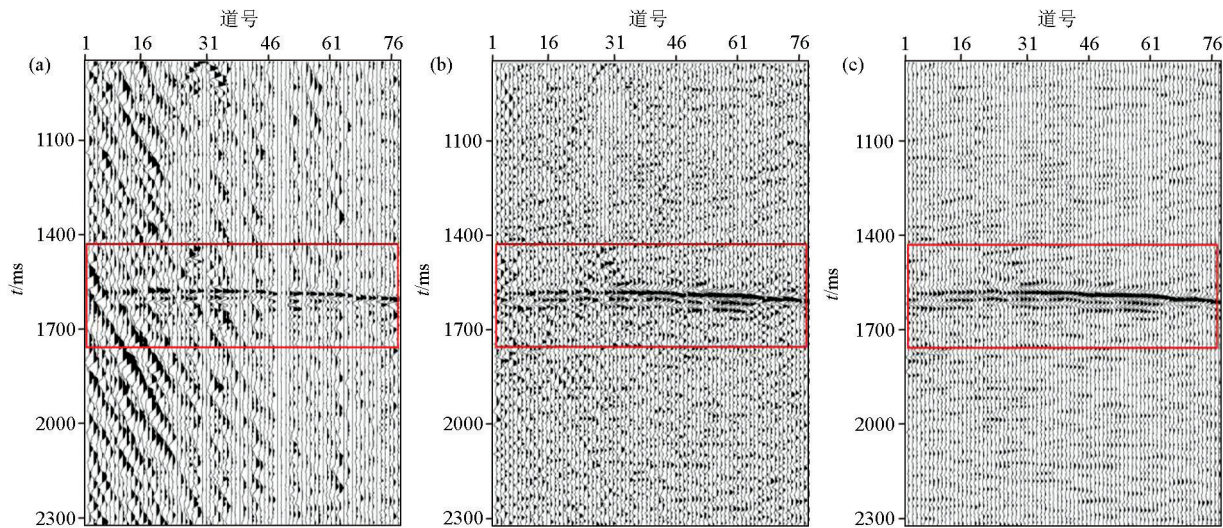
升,去噪处理后微地震数据保持了原始数据的波形特征,去除的随机噪声中不包含有效信号,该方法具有较好的保幅性。

3 实际数据应用

Y-3HF 井是砂砾岩体油藏,位于东营凹陷北部陡坡带东段,盐 18 古冲沟西侧翼,主力含油层系为沙四段砂砾岩体,是常温常压稀油低孔特低渗油藏。对砂砾岩体致密油藏进行储层压裂改造,Y-3HF 井

共有 13 段压裂,在地面开展阵列式微地震监测,共布设约 1 000 个监测站点。

选取实际监测微地震数据进行试处理分析,并与常规去噪方法进行对比。图 3a 是去噪前微地震数据;图 3b 是常规去噪方法噪声压制后的微地震数据;图 3c 是盲源分离去噪方法噪声压制后的微地震数据。对比处理前、后的微地震数据,并与常规去噪效果进行对比,盲源分离去噪方法可以有效压制随机噪声,同时不损失有效信号,该技术能够较好地提高微地震数据的信噪比。

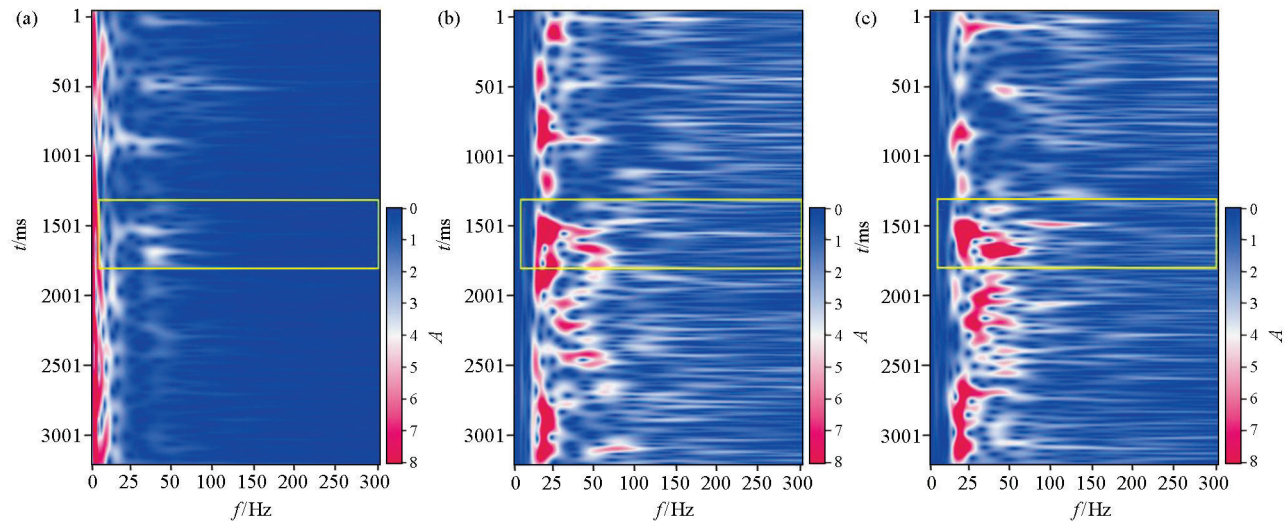


a—去噪前微地震数据;b—常规去噪方法;c—盲源分离去噪方法

图 3 实际微地震数据去噪效果对比

对微地震数据进行二维时频分析,并与常规去噪方法进行对比,验证该方法的有效性。图 4a 是去噪前微地震数据的时频谱;图 4b 是常规去噪方法的时频谱;图 4c 是盲源分离去噪方法的时频谱。与常

规去噪方法相比,盲源分离去噪方法压制随机噪声的效果相对较好,有效提高了微地震数据的信噪比,在二维时频谱中更易识别微地震事件,能够有效保证较高的微地震事件初至拾取精度和定位准确度。



a—去噪前微地震数据时频谱;b—常规去噪方法时频谱;c—盲源分离去噪方法时频谱

图 4 实际微地震数据去噪效果时频谱对比

4 总结

地面阵列式微地震监测技术具有监测范围广、数据采集量大、定位精度高等特点,但地面微地震监测数据具有噪声干扰严重、信噪比低的缺点,盲源分离去噪方法能够充分利用地面阵列式微地震监测的特点,实现微地震数据信噪比的有效提高,是一项实用有效的去噪技术。

基于微地震事件分量和噪声干扰分量相互统计独立的假设条件,采用负熵作为目标函数,在去均值和白化预处理的基础上,采用粒子群优化算法有效解决了方程求解效率较低的问题。通过互相关分析法实现了分离分量的自动排序,有效解决了盲源分离的不确定性问题。通过正演模拟数据和实际微地震数据的去噪效果对比,验证了盲源分离去噪方法的有效性和实用性。

致谢:在地面阵列式微地震监测和方法研究过程中,得到了中国石化胜利油田物探研究院微地震项目组的大力帮助和鼎力支持,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 刁瑞,吴国忱,尚新民,等.地面阵列式微地震监测关键技术研究[J].岩性油气藏,2017,29(1):104-109.
- [2] 芮拥军.地面微地震水力压裂监测可行性分析[J].物探与化探,2015,39(2):341-345.
- [3] Maxwell S C, Rutledge J, Jones R, et al. Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring[J]. Geophysics, 2010, 75(5): A129-A137.

- [4] 刁瑞,冯玉苹.利用储层的频谱吸收特性识别油气藏[J].石油地球物理勘探,2012,47(5):766-772.
- [5] 张永华,陈祥,杨道庆,等.微地震监测技术在水平井压裂中的应用[J].物探与化探,2013,37(6):1080-1084.
- [6] 刁瑞,吴国忱,尚新民,等.三维地震与地面微地震联合校正方法[J].地球物理学报,2017,60(1):283-292
- [7] Shawn C, Maxwell S C, Theodore I U. The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field [J]. The Leading Edge, 2001, 20(6): 636-639.
- [8] 吕文彪,尹成,张白林,等.利用独立分量分析法去除地震噪声[J].石油地球物理勘探,2007,42(2):132-136.
- [9] 刁瑞,尚新民,芮拥军,等.时频域谱模拟反褶积方法研究[J].岩性油气藏,2013,25(1):116-121.
- [10] 薛亚茹,杨静,钱步仁.基于高阶稀疏 Radon 变换的预测多次波自适应相减方法[J].中国石油大学:自然科学版,2015,39(1):43-49.
- [11] 何柯,周丽萍,于宝利,等.基于补偿阈值的曲波变换地面微地震弱信号检测方法[J].物探与化探,2016,40(1):55-60.
- [12] 刘玉海,尹成,潘树林,等.基于互相关函数法的地面微地震信号检测研究[J].石油物探,2012,51(6):633-637.
- [13] 刁瑞,单联瑜,尚新民,等.微地震监测数据时频域去噪方法[J].物探与化探,2015,39(1):112-117.
- [14] Hyvarinen A, Karhunen J, Erkki O. Independent component analysis[M]. Wiley, New York, 2001.
- [15] 印兴耀,刘杰,杨培杰.一种基于负熵的 Bussgang 地震盲反褶积方法[J].石油地球物理勘探,2007,42(5):499-505.
- [16] 戴永寿,牛慧,彭星,等.基于自回归滑动平均模型和粒子群算法的地震子波提取[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(3):47-50.
- [17] 刁瑞,胡晓婷,崔庆辉,等.微地震监测中等效速度定位精度分析及应用[J].油气藏评价与开发,2015,5(1):49-53.
- [18] 张唤兰,朱光明,王云宏.基于时窗能量比和 AIC 的两步法微震初至自动拾取[J].物探与化探,2013,37(2):269-273.

The blind separation denoising method for surface array micro-seismic data

DIAO Rui^{1,2}, WU Guo-Chen¹, SHANG Xin-Min², RUI Yong-Jun², CUI Qing-Hui²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China; 2. Geophysical Research Institute of Shengli Oil Field Branch, SINOPEC, Dongying 257022, China)

Abstract: Due to the ground noise interference, the signal-to-noise ratio (S/N) of original micro seismic monitoring data is relatively low, and the data quality determines the positioning accuracy of micro seismic events. Therefore, it is very important to improve the S/N of monitoring data in the processing of micro-seismic event. Based on the advantages of more monitoring sites, short intervals and wide distribution in ground array, the method of blind source separation based on cross-correlation method can denoise random noise. Blind source separation method is based on cross-correlation method, which uses negentropy as the objective function, with particle swarm optimization method for high efficiency solving. Through the cross correlation coefficient to solve the uncertainty problem of blind source separation, the method can realize effective separation of the ground array micro seismic events components and noise interference components. Through the forward simulation signal and the actual ground array micro-seismic data processing, the method was effectively applied to enhancing S/N of the ground array micro seismic data, which confirms that the method is feasible and effective.

Key words: hydraulic fracture; micro-seismic event; signal to noise ratio; independent component analysis; cross correlation factor