

张庆淮, 王明星, 吴安楚, 等. 海上宽方位高效采集试验——模拟与信号分离[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 93-100.

ZHANG Qinghuai, WANG Mingxing, WU Anchun, et al. Marine wide-azimuth high efficient acquisition experiment: modelling and de-blending[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 93-100.

# 海上宽方位高效采集试验

## ——模拟与信号分离

张庆淮<sup>1</sup>, 王明星<sup>1\*</sup>, 吴安楚<sup>1</sup>, 朱立彬<sup>2</sup>, 陈吴金<sup>3</sup>

(1 中石化石油工程地球物理公司国际业务发展中心, 北京 100020; 2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;

3 中石化石油工程地球物理公司科技研发中心, 南京 211000)

**摘要:** 海洋地震勘探中, 多震源同时激发的高效采集方法越来越受到油公司的青睐, 该采集技术可提高施工效率, 极大降低勘探成本, 通过增加炮点密度提高地震勘探采集效果。但是, 这种采集方式也面临着震源高效激发混合采集带来混叠噪声的挑战。作为实际采集试验的有效替代, 采用波动方程模拟海上宽方位采集地震数据, 仿真多船 4 震源高效激发的宽方位高效采集模拟记录, 探索提出有效分离高效采集混叠记录的方法和流程。通过对模拟数据的处理, 有效分离了高效激发混合采集带来的多震源能量的干涉, 为海上高效采集生产推广指明了方向。

**关键词:** 宽方位角; 高效采集; 正演模拟; 信号分离; 矢量中值滤波

中图分类号: P736.4+1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.091

## 0 引言

为了适应高精度地震勘探的需求, 陆地和海洋高效地震采集技术不断发展。目前, 陆地可控震源地震采集中以滑动扫描、ISS(独立同步扫描)、DSSS(距离分开同步扫描)及 DSSS 结合滑动扫描的 DS4 等高效施工方式为代表<sup>[1-2]</sup>。随着高效采集技术的发展, 可控震源高效采集混叠数据的分离也得到越来越多的关注, 成为高效地震勘探的研究热点<sup>[3-4]</sup>。在传统的海上地震勘探中, 为了避免相邻震源的相互干扰, 采用单个或者多个气枪震源之间间隔较大时间进行交替激发的采集方式。随着油气勘探对采样密度增大求及油公司降本增效需求的不断提高, 海上地震勘探采集海量数据将越来越普

遍, 如果仍采用传统的气枪震源交替激发方式, 地震采集施工周期将会大大延长, 施工成本也会增加。因此, 提高野外气枪激发效率、实现海上高效采集是海上地震勘探的大势所趋。海上地震勘探采用气枪震源施工, 虽然不存在可控震源的扫描问题, 但是仍然可以采用时间分割或者距离分割的多震源高效激发技术<sup>[5]</sup>。

近 20 年来, 海上宽方位勘探作为一种可以改善地震勘探效果、更加精确地描述地下介质的采集技术, 得到了认可并有了很大的发展。但是, 海上宽方位地震采集的效率也受到施工因素的制约, 例如, 震源数量、震源船速度、炮点密度等。这个问题可以采用高效采集施工技术来解决: 采用多船多缆的宽方位接收系统, 加上分布于排列两端的 4 个甚至更多震源船激发系统, 每个震源船之间以随机的时间间隔激发, 记录仪连续接收。采用高效激发方式的地震采集比前一炮地震数据记录完毕后再进行下一组气枪激发的常规采集方式可以极大地提高采集效率。海上宽方位高效采集是海上地震勘探的一个重要发展趋势, 一些地球物理服务公司采用多震源同时激发方式在多个地区进行了海洋地震资料采集。DUEY<sup>[6]</sup>曾提到 WesternGeco 的多船

收稿日期: 2022-04-01

资助项目: 中石化地球物理公司基础性技术攻关课题“OBC/OBN 地震数据波场特征分析与鬼波压制”(SGC202207)

作者简介: 张庆淮(1965—), 男, 高级工程师, 长期从事地球物理勘探方法方面的研究工作. E-mail: zhangqinghuai1@outlook.com

\* 通讯作者: 王明星(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事地震数据处理方面的研究工作. E-mail: wangmx.sips@sinopec.com

多缆、多震源高效激发的海上宽方位角地震采集,探讨了允许气枪震源同时激发,并对混叠信号进行分离利用。BP公司在墨西哥湾和印度尼西亚水域进行了海上高效采集,推动了海底节点高效采集的发展;中海油在实际生产中应用了三维拖缆双船4源高效混采;中石油东方地球物理公司最近在阿联酋的滩浅海采集中,使用OBC、OBN和拖缆综合施工,大量采用高效混采,极大地提高了采集效率<sup>[7]</sup>。

采用正演模拟对地震采集、处理技术进行研究是一种实际采集试验的有效替代方案。李培明等<sup>[8]</sup>利用实际无混叠地震数据和理论数据模拟了海上高效采集记录,并用这些模拟记录进行采集参数的优化论证。本文采用正演模拟对海上宽方位角地震采集与信号分离方法进行了试验。试验中,从简单的二维射线追踪入手,直至宽方位三维波动方程正演,研究多震源高效激发海上施工的观测系统、模拟海上多震源同时激发地震记录,同时进行了高效激发混采记录的信号分离和成像处理,均取得了较好的试验效果,论证了海上宽方位角高效采集的可行性。

### 1 海上宽方位采集高效激发正演模拟

RAMESH等<sup>[9]</sup>讨论了海上宽方位角观测系统多震源同时激发的正演模拟问题,聚焦模拟效率,提出了2种可以生成稀疏格林函数的建模方式。本文通过波动方程正演模拟产生无混叠海上拖缆地震采集记录,然后模拟随机时间间隔的其它震源激发的混叠记录,并将正点激发模拟记录与混叠记

录合并,生成海上宽方位多震源同时激发地震记录。

#### 1.1 海上宽方位高效采集观测系统

海上宽方位高效采集试验采用一个两船20缆接收,2个震源船在拖缆前面,2个震源船拖缆后面的观测系统,接收缆距100m/200m,道距12.5m,每条缆777道接收,总接收道数15540,震源横向间隔1000m,纵向激发点距37.5m,覆盖次数480次。观测系统如图1所示。

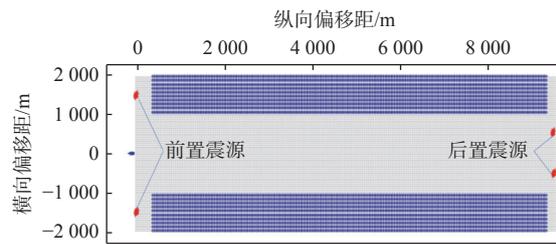


图1 高效采集模拟观测系统

Fig.1 Geometry of high efficient acquisition

均匀的方位角分布是面元周围宽角度信息参与叠加,提高成像精度的保障。对比常规4个气枪震源位于排列前面的观测系统的方位角玫瑰图(图2a)和本次试验采用的2个震源在前面、2个震源在后面的观测系统的方位角玫瑰图(图2b),可以看出,二者的方位角分布类似,可以满足宽方位采集和高效采集震源距离分开的需求。

#### 1.2 宽方位高效采集记录模拟

为了得到宽方位高效采集地震数据,首先用某海上速度模型进行波动方程正演,采用前后置震源

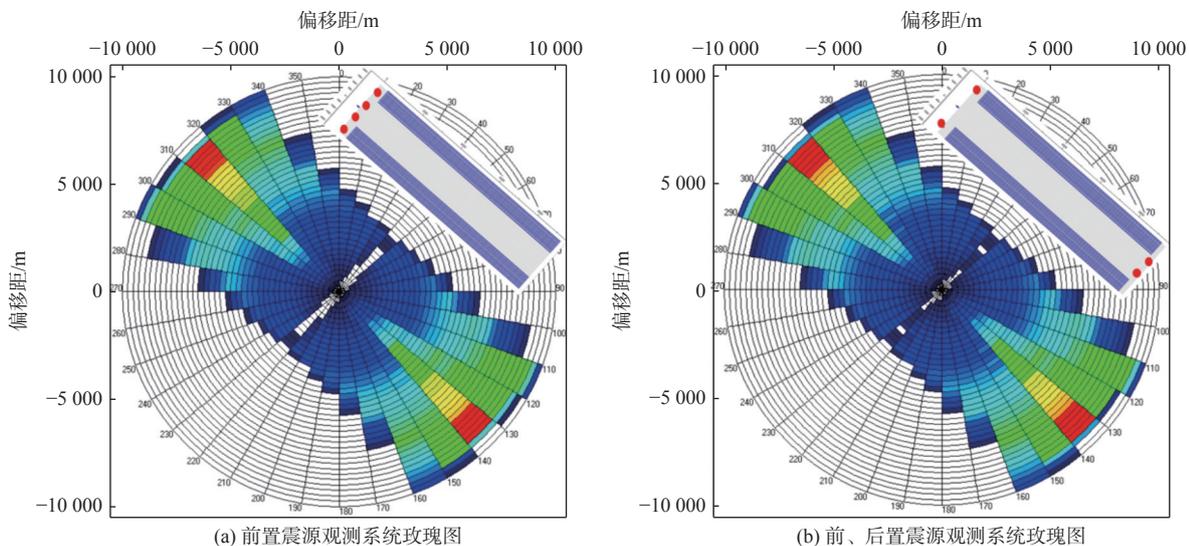


图2 2种观测系统的玫瑰图

Fig.2 Rose plots of two observation systems on azimuth

观测系统, 模拟产生单点激发的地震记录。图 3 显示了前置小号气枪单点激发的无混叠记录。

试验中, 在速度模型范围内模拟激发了 37 000 个无混叠宽方位地震记录。为了得到随机时间间隔的混采模拟数据, 首先为每一个无混叠记录在 -200~800 ms 范围内产生完全随机的激发时差(图 4)。然后, 以随机时差对无混叠记录进行时差校正, 模拟与正点激发记录存在不同激发时间间隔的模拟记录, 最后把其中未加时间校正的一炮和其

它经过随机时间校正的三炮叠加, 就可以得到包含了时间、距离分开的 4 个气枪震源能量的同时激发记录(图 5)。图 5a 为正点记录, 图 5b-d 为经过时间校正的其它 3 个激发点的记录, 用于跟图 5a 叠加, 合成最终的多震源同时激发记录图 5e。

## 2 高效采集记录信号分离

试验中, 正演模拟了 37 000 炮混采数据, 用来

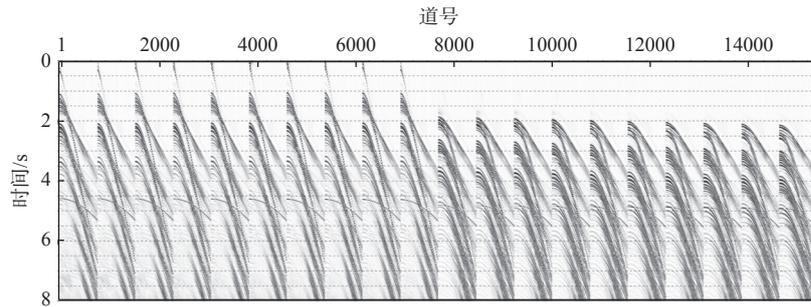


图 3 无混叠宽方位记录

Fig.3 Unblended WAZ shot gather

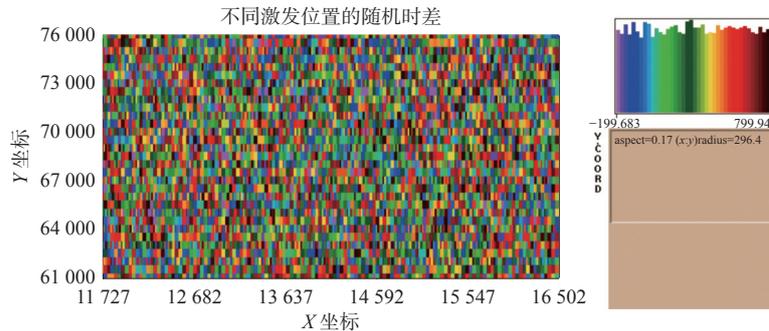
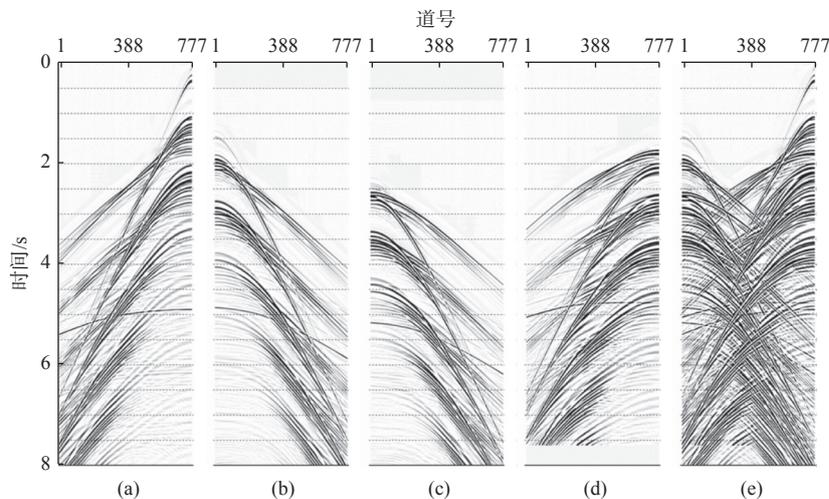


图 4 随机间隔时间的分布

Fig.4 Distribution of random time shift



(a)正点记录; (b-d)经过时间校正的其它 3 个激发点的记录; (e)正点记录(a)与 (b-d)合成的单缆数据

图 5 高效激发记录模拟

Fig.5 High efficient acquisition data modeling

进行混采信号分离试验,并以无混叠记录作为对比,对信号分离效果进行评价。从上面的讨论可知,高效采集的宽方位混采数据实际上是常规单震源激发无混叠数据的叠加,叠加算子就是多震源随机激发的混叠算子,混采地震记录可以用下式表示,

$$d = \Gamma m \quad (1)$$

式中:  $d$  为混采地震数据;

$m$  为单独激发的无混叠地震记录;

$\Gamma$  为混叠算子,包含了震源的激发时间和位置信息。

在地震数据处理中,利用这些先验信息进行稀疏反演分离混采数据取得了很好的效果<sup>[10-11]</sup>。

高效混采数据信号分离的另一种途径是采用噪声压制的方法来分离混叠数据。LYNN等<sup>[12]</sup>早在1987年就提到同一个海上工区2个或2个以上震源干涉的数据,只要不是完全一致的时间,就可以被变化到一个噪音能量随机分布的域内。进行数据多域重构、信号分离方法的相关研究最近几年得到很大发展。童思友<sup>[13]</sup>提出基于卷积神经网络的海洋地震勘探拖缆混采数据分离,通过对混采数据样本训练,获得混采数据分离模型。徐雷良<sup>[14]</sup>提出了基于广义同步曲波变换和最小二乘匹配滤波迭代进行井炮混叠数据分离的方法来压制井炮同时激发的混叠噪声。霍守东<sup>[15]</sup>提出一种多向矢量中值滤波的同时激发记录的信号分离方法。该方法将常规的加权中值滤波扩展为矢量中值滤波,并且在设定的各个方向进行矢量中值滤波,并从中选择最佳的中值矢量,在实际应用中取得了不错的效果。

本文设计的处理流程,主要采用切除、速度滤波和参考文献[15]中介绍的多向矢量中值滤波来进行海上宽方位高效采集记录的信号分离。

## 2.1 炮域信号分离

考虑到拖缆采集的模拟数据都是端点激发,并且混叠干扰能量也是端点激发,设计在炮集记录上进行信号分离,通过切除和速度滤波压制一部分混叠噪声。在炮集记录上,有效信号和干扰信号均为相干信号,在确定压制范围时要充分考虑保护有效信号,设计温和的切除和速度滤波参数。另外,以每个记录中的单缆作为输入数据进行滤波处理可以有效避免整体炮集输入信号分离时两缆之间的信号相互干扰,产生混波效应。从炮域压制混叠噪声的实例可以看出(图6),通过炮域混采数据信号分离,相当一部分另一端震源产生的混叠噪声得到了压制。

## 2.2 COV(共偏移距矢量)道集信号分离

炮域压制混叠噪声后,还存在大量剩余外源信号,且与正点记录位于一端的干扰炮能量的同相轴无法在炮集记录上进行分离。正如LYNN<sup>[12]</sup>所提到的,2个以上震源干涉的数据,只要不是完全一致的时间和位置,就可以被变化到一个噪音能量随机分布的域内。这些混叠噪声随机分布的域包括共偏移距域、CDP域、共接收点域和十字排列等等。随机的噪声可以通过  $f-x$  预测、中值滤波等方法进行压制。试验中,炮集记录上压制部分混叠噪声后,把地震数据继续变换到共偏移距道集进行多向矢

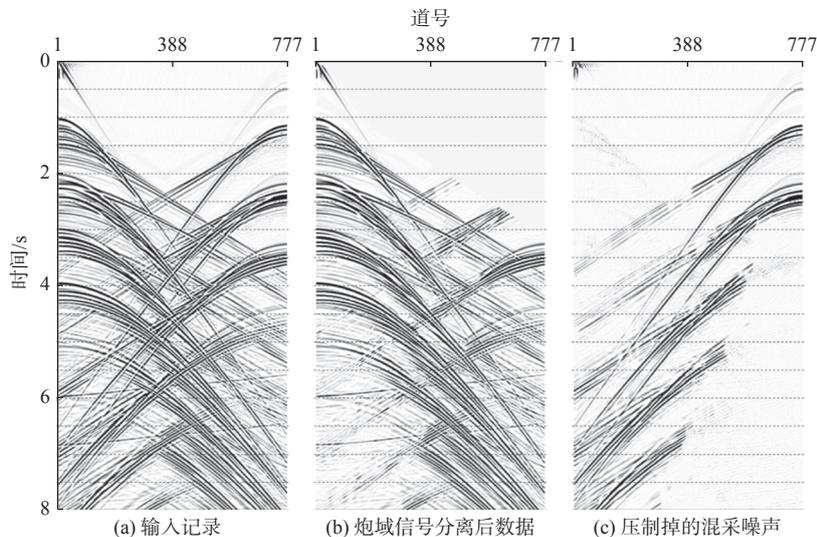


图6 炮集记录上压制部分它源干扰

Fig.6 Deblending of shot gather

量中值滤波。COV 道集构造每条炮排上每条接收线的共偏移距子集, 实际上是二维共偏移距道集在三维数据上的延伸, 子集内地震道具有相同的偏移距和方位角, 可以避开横向构造和偏移距分布不均匀对相关信号的影响, 这对于共偏移距域内的信号

分离十分关键。

对比 COV 域信号分离效果(图 7), 可以看出, 原来炮集记录上的相关的外源混叠噪声变换到 COV 域变成了随机噪声, 经过中值滤波, 这部分噪声得到压制。

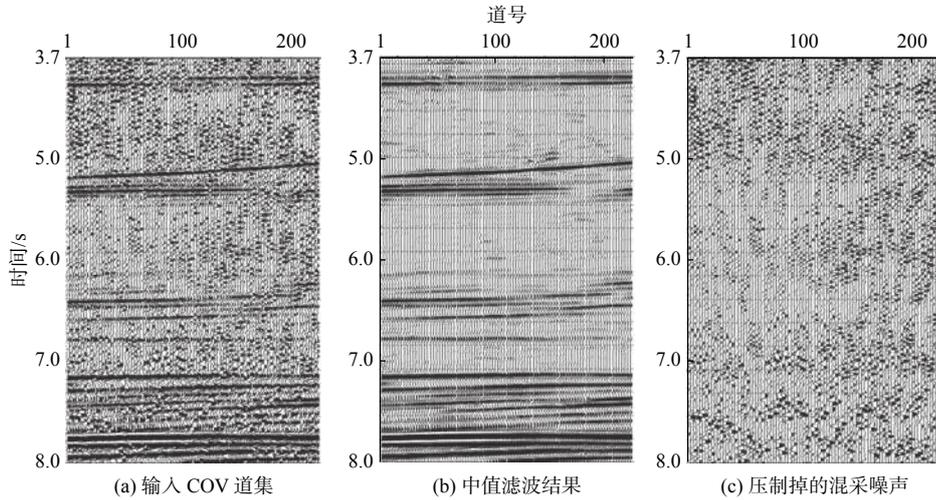


图 7 COV 域信号分离

Fig.7 Deblending in COV domain

### 2.3 CDP 域信号分离

COV 距域内, 混叠噪声随机分布, 一方面使得信号分离非常方便, 另一方面使得压噪后的地震数据不可避免的存在“蚯蚓化”了的残余噪音, 这些噪音变换到 CDP 域, 将被再次“随机化”, 可以利用多向矢量中值滤波进一步分离混叠噪声。从 CDP 域信号分离的效果可以看出, 在 COV 域信号分离

后的残余混叠噪声得到了进一步的压制(图 8)。

### 3 高效采集模拟与信号分离效果分析

在试验中, 我们模拟了大量高效采集记录和与之对应的常规采集记录, 对高效采集地震数据做了信号分离, 并对分离后的高效采集模拟数据和常规采集模拟数据进行了多次波压制、叠加和叠前偏移

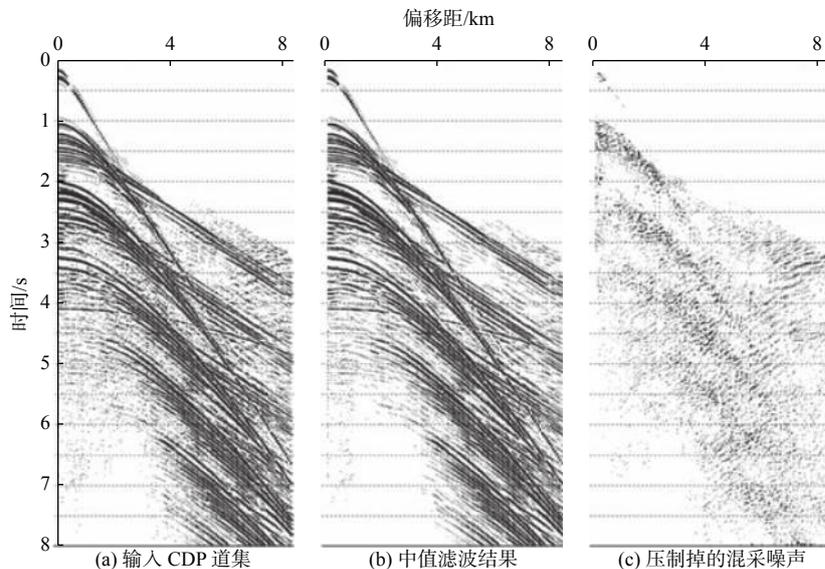


图 8 CDP 域信号分离

Fig.8 Deblending in CDP domain

处理。

图9是高效采集信号分离前后 CDP 道集的对  
比。信号分离前, CDP 道集内存在大量随机分布的  
混叠噪声。经过在炮域、COV 域和 CDP 域采用一

个“小瀑布”式的信号分离处理后, CDP 道集上的混  
叠噪声得到很好的压制。从分离出的混叠噪声看,  
试验中采取的信号分离流程很好地压制混叠噪声  
的同时,较好地保护了正点激发数据中的有效信号。

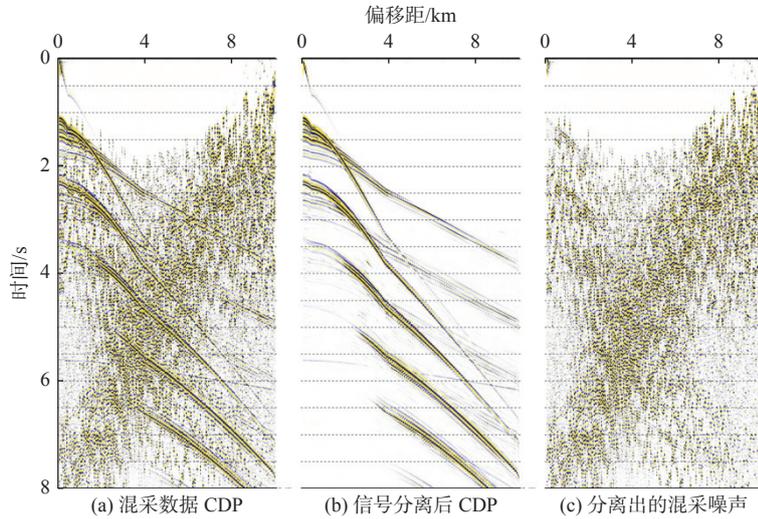


图9 高效采集数据信号分离 CDP 道集对比

Fig.9 The comparison of CDP gathers

图10显示了海上宽方位采集多震源同时激发  
记录炮集单缆数据信号分离效果。在信号分离之  
前, 4个同时激发的震源的能量混叠在一起。通过  
本文提出的信号分离流程处理之后, 相同方向的1  
个干扰震源和相反方向的2个干扰震源的混叠噪  
声都得到很好的压制, 并且有效信号得到很好的  
保护。这一点从叠加剖面 and 叠前偏移成像结果上  
也得到了印证。

混叠噪音对叠加剖面的信噪比有一定影响, 但是  
采用合适的处理方法进行信号分离, 压制混叠噪  
音后的叠加剖面上, 几乎看不到外源混叠噪声, 信  
噪比几乎和非高效采集的常规数据叠加剖面相当  
(图11)。

对比叠加剖面效果可以看出, 同时激发产生的

图12a是海上宽方位同时激发数据未经信号  
分离和多次波压制的叠前时间偏移剖面, 可以看  
出, 利用同时激发记录直接做叠前时间偏移, 经  
过多次覆盖, 外源混叠噪声得到一定的压制, 能  
够比较清

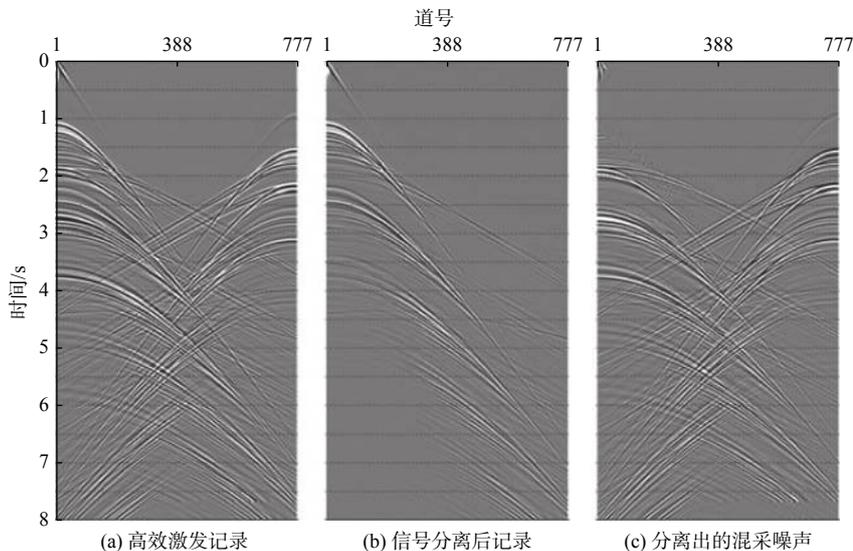


图10 高效采集数据信号分离炮集对比

Fig.10 The comparison of shot gathers

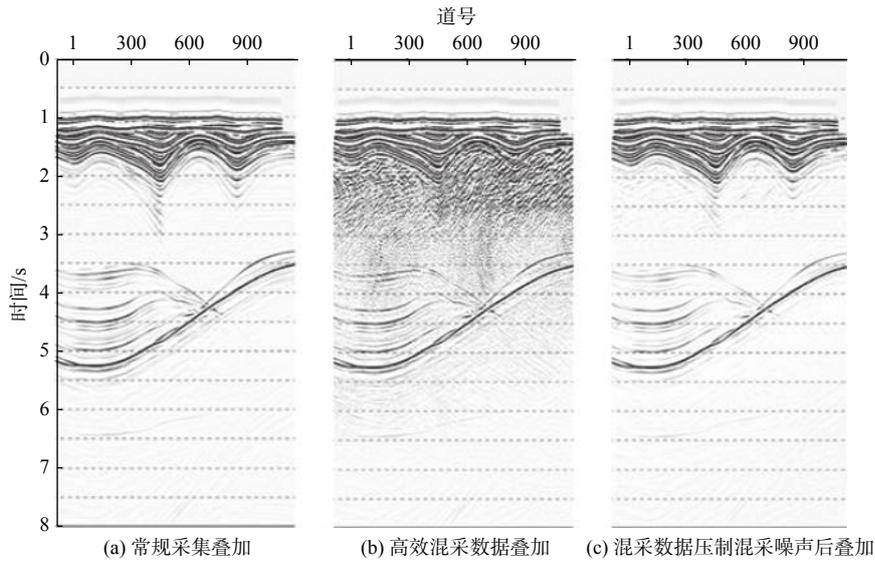


图 11 叠加剖面对比

Fig.11 The comparison of stack

楚地观察到有效信号的成像。图 12b 是经过信号分离, 压制了混叠噪声之后的、包含了一次波和多次波的叠前时间偏移剖面。压制混叠噪声后, 用波场外推方法压制数据中的多次波<sup>[16]</sup>, 进一步改善了

数据的成像效果。图 12c 是经过信号分离和多次波衰减后的剖面, 信号成像清晰, 地层接触关系清楚, 进一步证明了海上高效激发混采数据可以有效分离, 确保高效采集技术的切实可行。

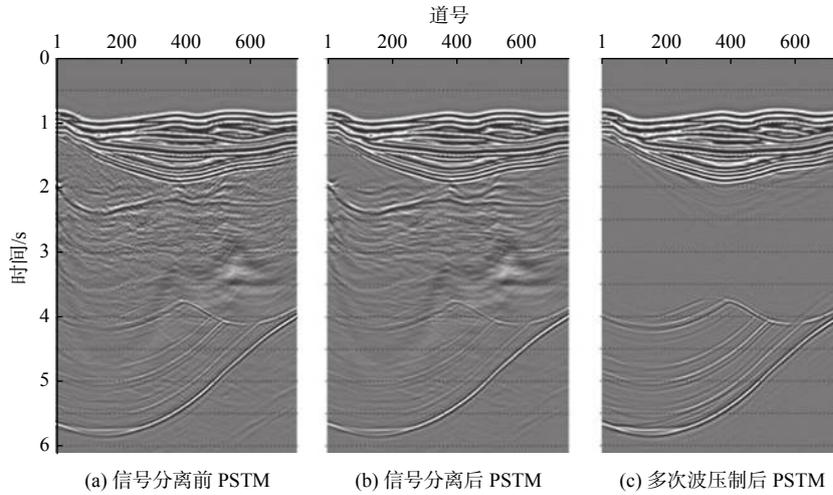


图 12 高效采集模拟数据偏移剖面对比

Fig.12 The comparison of PSTM

### 4 结论

(1) 在相同震源数量的前提下, 采用高效激发技术的宽方位角采集在理论上是常规宽方位角采集效率的 3.2 倍, 使得海上宽方位采集成本大大降低。

(2) 海上高效激发的施工方式首先考虑激发时间和激发位置分开, 才能进行有效的数据分离重构, 区分有效信号和混叠信号的特征, 这是进行高效激

发记录信号分离的基础。

(3) 设计最优化的处理流程, 在多个域内采用高保真信号分离技术, 进行温和的迭代处理, 最大限度分离混叠噪声和保护好有效信号, 是进行同时激发记录信号分离的关键。

#### 参考文献:

[1] BEASLEY C J, CHAMBERS R E, JIANG Z. A new look at simultaneous sources [C]. 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 1998: 133-135.

- [2] BERKHOUT A J, BLACQUIERE G, VERSCHUUR D J. From simultaneous shooting to blended acquisition[C]. 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2008: 2831-2838.
- [3] 曲英, 李振春. 可控震源混叠地震数据分离与成像[J]. *石油物探*, 2020, 59(5): 713-724.
- [4] 王华忠. 客户定制反射子波的可控震源地震勘探方法[J]. *石油物探*, 2020, 59(5): 683-694.
- [5] 吴志强, 闫桂京, 童思友, 等. 海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(6): 3056-3065.
- [6] DUEY R. Let's make some noise[J]. E & P: A Hart Energy Publication, 2010(5): 83.
- [7] 李士涛, 张笑, 于宁, 等. 海上独立同步震源采集技术应用及进展[J]. *工程地球物理学报*, 2022, 18(4): 301-309.
- [8] 李培明, 宋家文, 柳兴刚, 等. 海上高效混叠采集参数优化设计[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(4): 707-715.
- [9] RAMESH N, CHRISTINE E, JERRY R, et al. Efficient seismic forward modelling using simultaneous random sources and sparsity[J]. *Geophysics*, 2010, 75: 15-27.
- [10] 宋家文, 李培明, 王文闯, 等. 基于稀疏反演的高效混叠数据分离方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(2): 268-273.
- [11] 魏亚杰, 张盼, 许卓. 基于稀疏约束反演的三维混叠数据分离[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(10): 4000-4009.
- [12] LYNN W, DOYLE M, LARNER K, et al. Experimental investigation of interference from other seismic crews[J]. *Geophysics*, 1987, 52: 1501-1524.
- [13] 童思友, 王凯, 尹文笋, 等. 基于卷积神经网络的海洋地震勘探拖缆混叠数据分离[J]. *中国海洋大学学报*, 2021, 51(5): 81-87.
- [14] 徐雷良, 邸志新, 石太昆, 等. 井炮同时震源混叠数据分离技术[J]. *石油物探*, 2023, 62(2): 281-296.
- [15] HUO S, LUO Y, KELAMIS P. Simultaneous source separation via multi-directional vector median filter [C]. 79th International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2009: 31-35.
- [16] 李丽君. 改进的波场外推海底多次波压制方法[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(4): 61-64.

## Marine wide-azimuth high efficient acquisition experiment: modelling and de-blending

ZHANG Qinghuai<sup>1</sup>, WANG Mingxing<sup>1\*</sup>, WU Anchu<sup>1</sup>, ZHU Libin<sup>2</sup>, CHEN Wujin<sup>3</sup>

(1 International Department, Sinopec Geophysical Corporation, Beijing 100020, China; 2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3 Research and Development Center, Sinopec Geophysical Corporation, Nanjing 211000, China)

**Abstract:** Marine wide-azimuth high-efficient acquisition using multi-vessel and multi-cable network is increasingly noticed by petroleum companies to reduce costs through higher productivity and to improve seismic data quality through denser source sampling. One major drawback of this method is the crosstalk noise generated by the simultaneous source. It is essential to understand the characteristics of interference from this type of noise and identify proper acquisition techniques and processing workflows to reduce its impact on image quality. First, 3D finite difference modelling was performed at a complex subsurface and then data were blended by combining the synthetic shots to simulate a four-boat wide-azimuth marine seismic survey. At last, a series of processing techniques were applied to optimally de-blend the data. These techniques were tested in several different domains and also in a cascaded manner.

**Key words:** wide azimuth; high efficient acquisition; forward modelling; de-blending; vector median filter