

文章编号: 1001-1749(2023)01-0036-10

海上拖缆双源随机激发地震混合采集及波场分离

张振波, 罗伟, 杨超群

(中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 深圳 518000)

摘要: 海上拖缆多震源混合采集技术因其能提高采集密度和覆盖次数而在国外得到发展和应用,但在国内尚处于研究和试验阶段。这里结合国内实施的海上拖缆双源随机激发地震混合采集试验的数据结果,阐述了多震源激发延迟时间的设置、多震源波场分离关键技术。首先基于多震源分离准则优选了拖缆双源随机激发延迟时间,并在南海进行了双源随机激发拖缆三维采集试验,获得了混合震源地震数据;然后利用混叠噪声在非炮域离散不相关的特点,在共偏移距域采用迭代多方向矢量中值滤波去噪,实现了混合数据的波场分离,得到了单炮记录。为了与常规采集效果对比,使用跟常规地震资料同样的处理流程和参数,进行了各种噪声压制及叠前时间偏移处理。与常规采集的资料处理结果对比表明,拖缆双源随机激发地震资料信噪比得到了提高,成像得到了改善,尤其是断面、断层阴影区、古近系地层和洼陷内幕结构成像改善较大。

关键词: 随机激发; 混合震源采集; 多方向矢量中值滤波; 混合波场分离

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.05

0 引言

1979 年 Silverman^[1] 提出同时激发相关信号采集理论,但 20 年后才针对该理论进行了首次海上试验^[2]。2008 年 Berhout^[3] 提出了不相关震源(混合震源)采集理论,经过 10 年的发展,在陆地得到了较好的应用^[4],与陆地采集不同的是,海上拖缆采集时水听器与炮点一起移动,传统的适用于陆地上的多震源波场分离技术不适用于海上资料的处理,针对海上混合震源采集处理的技术发展缓慢。2008 年和 2012 年先后在墨西哥湾 Green Canyon 地区和 Petronius 油田、澳大利亚某海上油田试验了双源延时激发采集,2012 年和 2013 年分别在西澳大利亚某海域和西非某海域进行了前后双船混合震源采集试验,2014 年在印尼相关海域 CGG 公司进行了混

合震源激发加斜缆接收的采集试验,这些试验取得了混叠地震数据,但性价比不高,没有得到推广^[5-9]。2015 年在设得兰群岛相关海域 TGS 公司采用双源和三源激发,进行了 2D 拖缆采集试验,对数据进行分离处理,效果不错^[10]。

海上拖缆多震源随机激发地震混合采集技术能提高采集密度和覆盖次数的优势,促使国内也进行了海上混合震源采集技术试验,中海石油(中国)有限公司深圳分公司于 2013 年在渤海首次实施了双源随机激发拖缆二维地震采集试验,成功地获得了双源随机激发地震混合采集数据。经过对采集设备和技术的改进之后,于 2014 年在南海实施了双源随机激发拖缆三维采集试验,证实了采集和处理技术的可靠性。

随着海上多震源采集技术的发展,相应的地震资料处理技术也发展起来。主要针对多震源波场进

行分离,技术路线有多种:①将数据变换到不同的域进行运算^[11-13];②通过设定阈值进行迭代相减^[14-17];③通过稀疏变换域反演算法实现多源分离^[18-23];④采用并联或串联多种分离方法实现多源分离^[24-26]。

海上拖缆多震源混合采集技术需要合理的设置多震源激发延迟时间,需要根据震源的设置采用合适的多震源波场分离方法。这里结合 2014 年在南海珠江口盆地番禺 4 洼实施的海上拖缆多震源采集试验,阐述了双源随机激发延迟时间的设置、多震源波场分离技术,提出了最优激发延迟时间设置方法,并利用混叠噪声在非炮域离散不相关的特点,在共偏移距域采用迭代多方向矢量中值滤波去噪,实现了混合数据的波场分离,获得了单炮记录。为了与常规采集进行对比,处理采用了与常规海上地震资料处理相同的流程和参数,得到了偏移叠加剖面。对比使用相同处理流程的双源随即激发采集和常规采集地震数据表明,拖缆双源随机激发地震资料信噪比得到了提高,成像得到了改善,尤其是断面、断层阴影区、古近系地层和洼陷内幕结构成像改善较大,进一步验证了该技术有助于深层复杂构造综合解释和洼陷深部烃源岩研究,实用性强,值得推广。

1 随机激发最优时间的设置

本次研究的目标区位于南海东部珠江口盆地番禺 4 洼,主要目的层是古近系的恩平组和文昌组,埋藏深,达到 4 000 m,地震资料信噪比低。勘探目标存在断层阴影,地震成像差。洼陷内幕结构和基底成像不清楚,限制了烃源岩研究。因此,本次地震采集的目的是通过增加地震采集覆盖次数,提高中深层地震资料信噪比,从而改善地震成像质量。

2014 年在该区实施了单船拖缆双源常规和随机激发两种三维地震采集。单船拖缆双源常规采集是左源激发后,在等待该炮记录接收完后,也即等待记录长度时间后,右源再激发,在等待记录长度时间后,左源再激发采集,这样交替激发,每炮记录上没有其他震源激发的波的干扰,也即船行使炮间隔距离时间大于记录长度(图 1(a))。单船拖缆双源随机激发地震采集是在不改变常规拖缆三维地震采集拖带方式的情况下,通过增加炮密度,达到提高覆盖次数的目的。同时两个震源的激发顺序不再是常规的左右交替激发,而是在规定的距离范围内随机但不同时激发(图 1(b))。由于随机激发的时间间隔

小于记录长度,导致前一个震源激发后还没有记录完规定的记录长度的地震波时,后一个震源又开始激发,所以记录仪器中会接收到两个震源激发的地震波,造成波的叠加。后续处理时就需要进行波场分离。

为了确保多震源激发接收到的混合波场能够有效分析,必须要求多震源空间间隔较大或者空间随机分布,或者要求多震源激发的延迟时间是随机分布。这里所涉及的是双源间隔较小,但双源激发的延迟时间要求随机分布。假设震源 S1 和 S2 各激发 n 次,S1 的延迟激发时间序列为 $A(i)$, ($1 \leq i \leq n$), S2 的延迟激发时间序列为 $B(i)$, ($1 \leq i \leq n$), 单位为 ms, 则为了满足多震源波场分离要求,双震源的随机延迟激发时间序列必须满足如下条件:

1) $A(i) \in [0, d_{\max}]$, $B(i) \in [0, d_{\max}]$, $d_{\max} > 0.5$ s, d_{\max} 称为最大延迟时间。

2) S1 和 S2 的延迟时差序列 $C(i) = A(i) - B(i)$ 尽量满足某个区间 $[-d_{\max}, d_{\max}]$ 上的均匀分布。

3) 令相邻的炮点延迟时差为 $\Delta C(i) = C(i) - C(i-1)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 且其最小值必须大于半个子波周期(T), 即 $\min_{1 \leq i \leq n} \Delta C(i) > T/2$, 避免相邻炮集延迟时间过短,混合炮场在共偏移距或共检波点道集同一反射界面上的波不会近似重叠,从而有利于波场分离。

4) 由于波场分离时通常都是多道处理,因此,相邻的炮点延迟时差还必须满足如下条件:

$$\begin{cases} |C(i) - C(i+1)| > T/2 \\ |C(i) - C(i-1)| > T/2 \\ |C(i) - C(i+2)| > T/2 \\ |C(i) - C(i-2)| > T/2 \end{cases} \quad i = 3, 4, \dots, n-2 \quad (1)$$

基于上述条件,采用如图 2 所示的双震源随机激发延迟时间优选流程,优选出双震源延迟激发时间序列(图 3)。

由于使用了不同物探船,双源随机激发与常规采集的主要参数稍有不同(表 1)。炮间距由 18.75 m 交替激发改为 25 m 随机激发,震源容量由 4 040 in³ 改为 3 680 in³。其他参数保持相同:震源间距为 50 m,压力为 2 000 psi,沉放深度为 7 m;电缆间距为 100 m,长度为 6 000 m,沉放深度为 7 m;道间距为 12.5 m,采样率为 1 ms,记录长度为 8 192 ms。两种资料的采集面元都是 6.25 m × 25 m,覆盖次数分别为 80 次和 120 次。同时注意到,两个震源之间的距离相对排列长度而言很小,这将对后续多震源

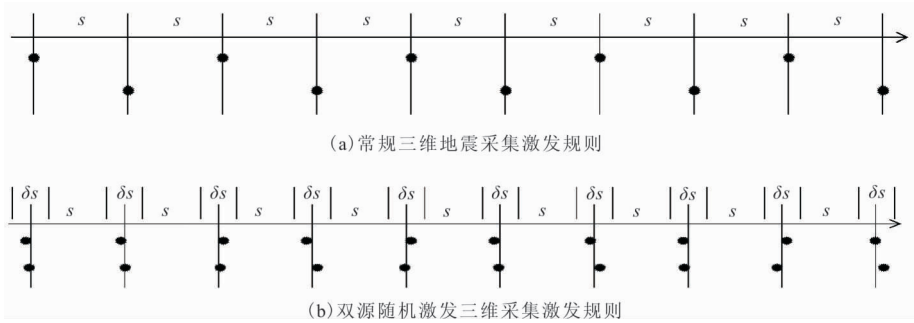


图 1 拖缆三维双源交替激发和双源随机激发示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of three-dimensional dual-source alternating excitation and dual-source random excitation of towed cable

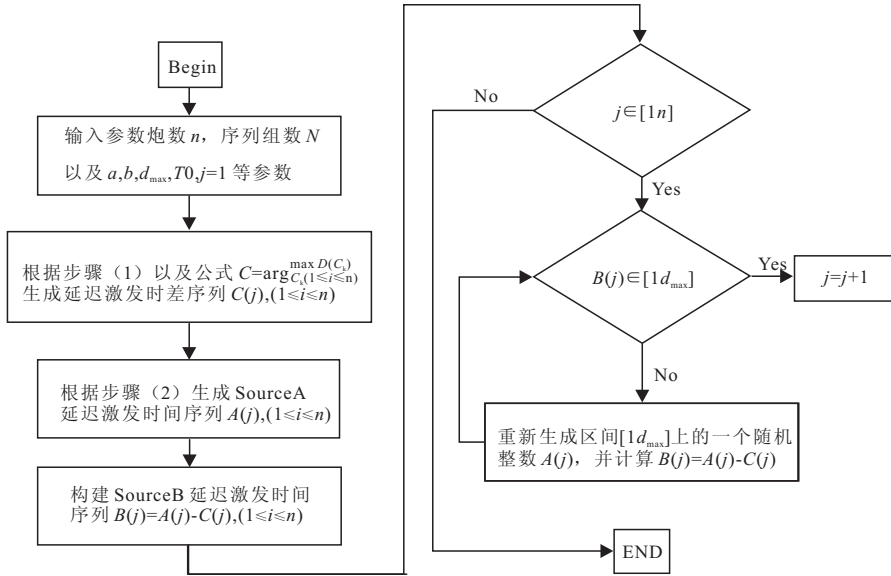


图 2 双震源随机激发延迟时间优选流程

Fig. 2 The optimal selection process of delay time of dual-source random excitation

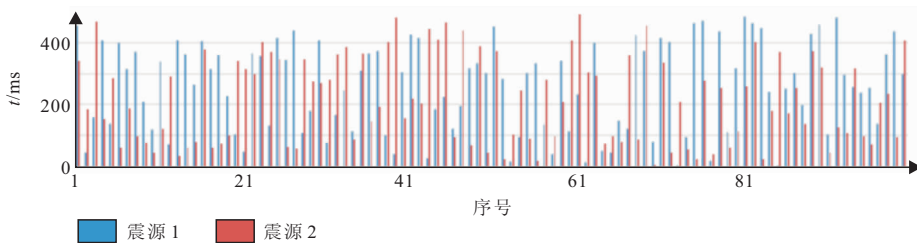


图 3 优选出的双震源延迟激发时间序列

Fig. 3 The optimized dual-source delayed excitation time series

表 1 番禺 4 洼常规与双源随机激发地震采集参数表

Tab. 1 Parameter table of conventional and dual-source random excitation seismic acquisition in Panyu 4 sag

采集系统	激发方式	源容量 /in ³	源压力 /psi	源间距 /m	炮间距 /m	枪深 /m	缆间距 /m	缆长 /m	缆深 /m	道间距 /m	采样率 /ms	记录长度 /ms
常规采集	左右源交替	4040	2000	50	18.75	7	100	6000	7	12.5	1	8192
随机激发	左右源随机	3680	2000	50	25	7	100	6000	7	12.5	1	8192

波场分离带来困难。

从表 1 可以看到,由于常规地震采集的覆盖次数受炮间距和记录长度等因素限制,覆盖次数为 80 次,而随机激发地震采集可以突破了这种限制,覆盖次数达 120 次,相比常规采集的覆盖次数 80 次而言增加了 50%。

2 多震源波场分离处理

多震源地震波场的分离原则或者基于多震源空间位置的随机分布实际上也可视为一种去噪处理,即消除其他震源波场对目标震源波场的影响。其他震源波场看做噪音时称其为多震源的交叉噪音,多震源地震波场的分离就是要去除交叉噪音。这其中的交叉噪音是相互的,波场中任意一个震源波场对其他震源波场都是噪音。由于地震波场满足线性叠加原理,交叉噪音在其原本的观测道集中显现不出来,但在其他的人工分选道集中就能轻易显现出来,因为地震波场在人工分选道集中不满足线性叠加原理。海上拖缆采集的多震源地震波场,震源的不同延迟激发方式产生不同交叉噪音,同时激发方式产生的交叉噪音常表现为相干噪音,随机延迟激发方式产生的交叉噪音变为随机噪音。

中值滤波在所有去噪方法中是一种原理比较简单而且实现起来较方便的方法,它在消除脉冲噪声等方面得到了广泛地应用,而多方向矢量中值滤波可以沿着地震反射同相轴的视倾角进行,因此该方法近年来在地震勘探去噪中得到了较好地应用。由于多震源激发是采用随机延迟时间激发的,波场分离处理的关键在于去除随机混叠噪声,而这种噪声的频带范围处于有效波频带范围内,所以常规去噪的方法效果不佳,为此笔者采用了迭代多方向矢量中值滤波策略在共偏移距域进行混叠噪声压制,实现多震源波场分离。

2.1 多方向矢量中值滤波原理

沿着一个时间窗口滑动截取的地震数据称为矢量元素,矢量中值滤波就是将滤波方法应用在地震数据中的一些相邻地震道上,输出结果就为该组矢量元素滤波后的输出,只有当地震数据的同相轴为水平时滤波效果最佳,但是在 CMP 域即使使用了 NMO 处理后的相当平的地震数据也很难达到好的滤波效果。因此,笔者采用了一种沿着不同倾角方向进行矢量中值滤波的方法,称为多方向矢量中值滤波(MD-VMF: Multidirectional Vector Median Filter),该方法可以用下式表示:

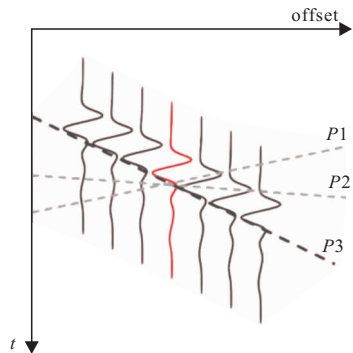


图 4 多方向矢量中值滤波示意图

Fig. 4 The schematic of multi-direction vector median filter

$$D(\mathbf{X}_j(p)) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{X}_j(p) - \mathbf{X}_i(p)\|_i \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_j(p) \in \{\mathbf{X}_i(p) \mid i = 1, \dots, N\} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_m(p) = \operatorname{argmin} D(\mathbf{X}_m(p)) \quad (4)$$

其中: p 代表一个方向, $\mathbf{X}_j(p)$ 为沿着 p 方向的截取得到的一个矢量,矢量间的距离是空间道数 j 和方向 p 的函数,最小距离就是期望的矢量中值。图 4 为多方向矢量中值滤波示意图,从图 4 可以看出,多个地震道被当作沿着某个时间窗口截取的一组矢量。对于每一个方向 p ,将会求得一个矢量中值,所有方向 p 中最小距离的向量就是最终的多方向矢量中值滤波结果。

对于矢量的长度可通过测试选择,一般情况下,矢量长度应该大于半个子波长。向量长度为“1”时,多方向矢量中值滤波就变为多方向标量中值滤波,这种滤波方法的矢量中值求取结果来自于原始数据的选择,不会凭空生成不存在的数据,因此多方向矢量中值滤波能够用于压制噪声。

2.2 海上多震源波场分离算法步骤

尽管多方向矢量中值滤波是一种自适应结构,具有保护信号细节部分的能力。但是根据前面多方向矢量中值滤波的原理来看,这种自适应还是具有一定的局限,其只能保留有限个方向上的细节,尤其是当中值滤波窗口变大时,这种滤波方法会丢失更多方向上的细节。因此采用了基于迭代多方向矢量中值滤波压制随机混叠噪声的策略,一开始选择步长大的中值滤波进行迭代,然后逐渐减小步长来获得更多细节部分的信息。

基于迭代多方向矢量中值滤波的多震源激发数据分离算法步骤如下:

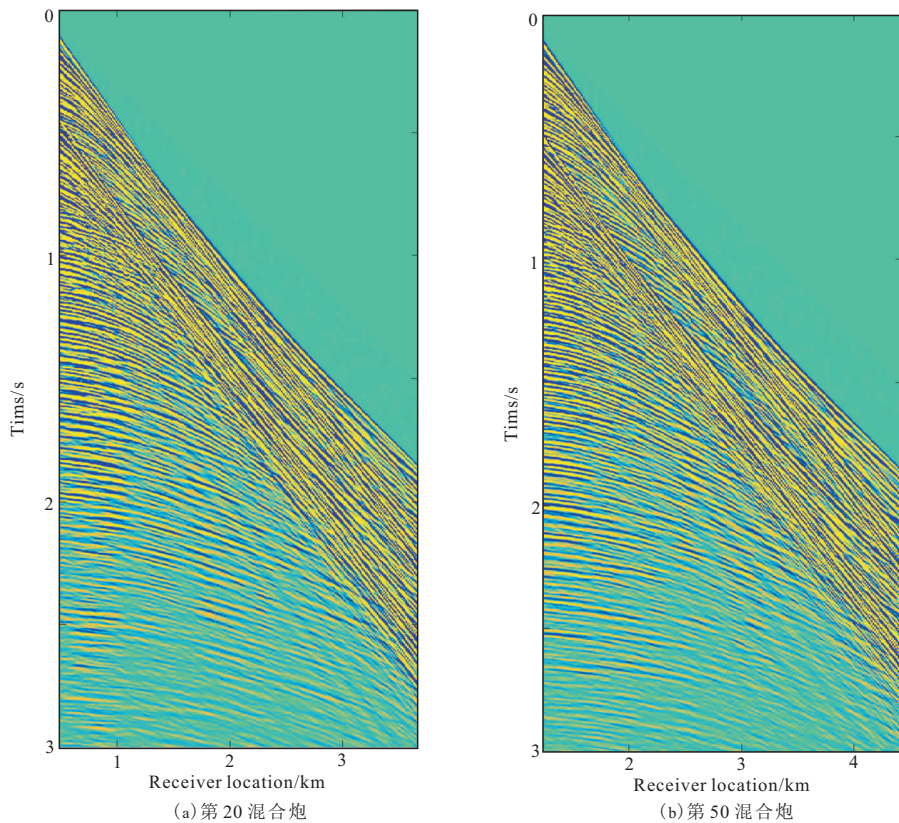


图5 原始混合炮地震记录

Fig. 5 Seismic record of original mixed gun

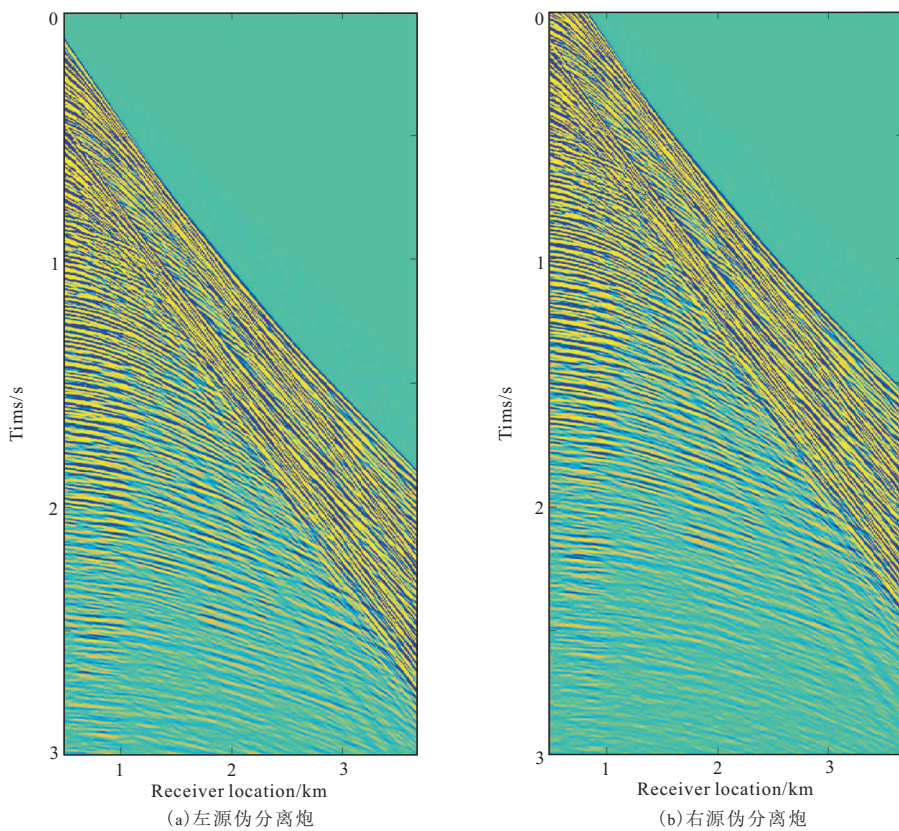


图6 第20原始炮集伪分离结果

Fig. 6 The pseudo separation results of 20th primitive gun set

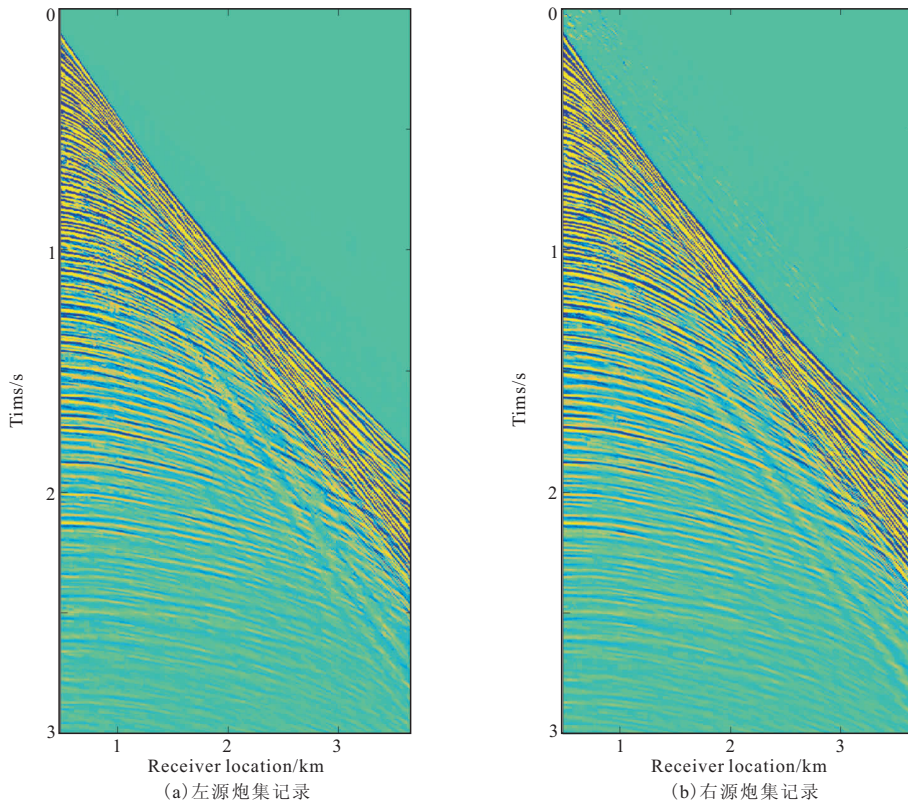


图 7 第 50 原始炮经迭代多方向矢量中值滤波法分离后的左右源炮集记录
 Fig. 7 The left and right source shot set records of the 50th original gun separated by iterative multi-directional vector median filtering method

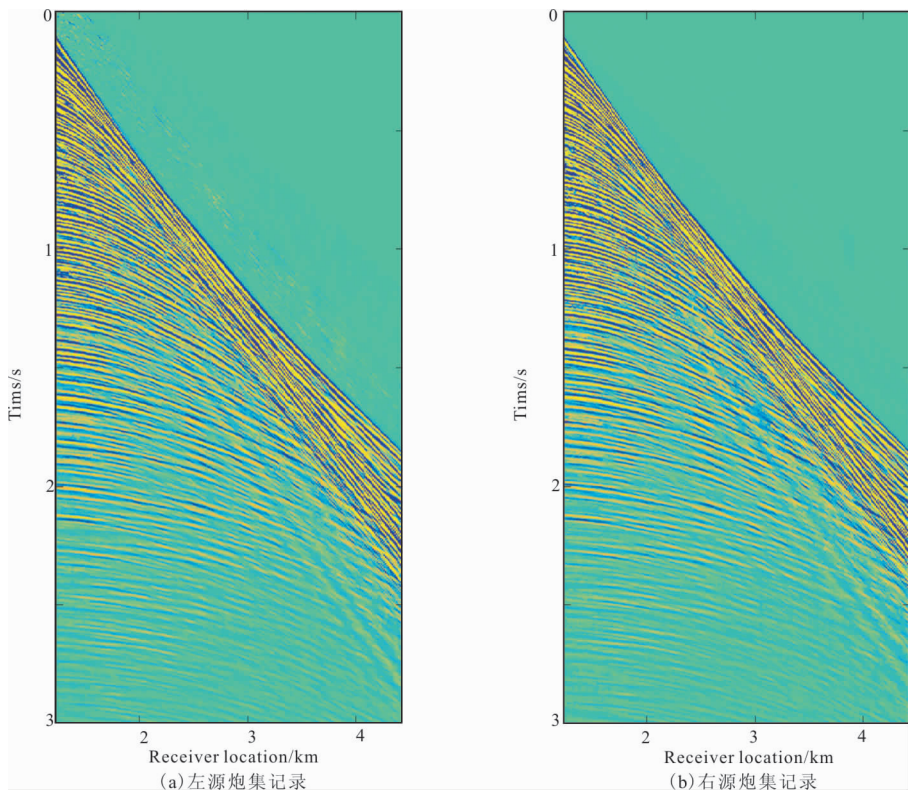


图 8 第 20 原始炮经迭代多方向矢量中值滤波法分离后的左右源炮集记录
 Fig. 8 The left and right source shot set records of the 20th original gun separated by iterative multi-directional vector median filtering method

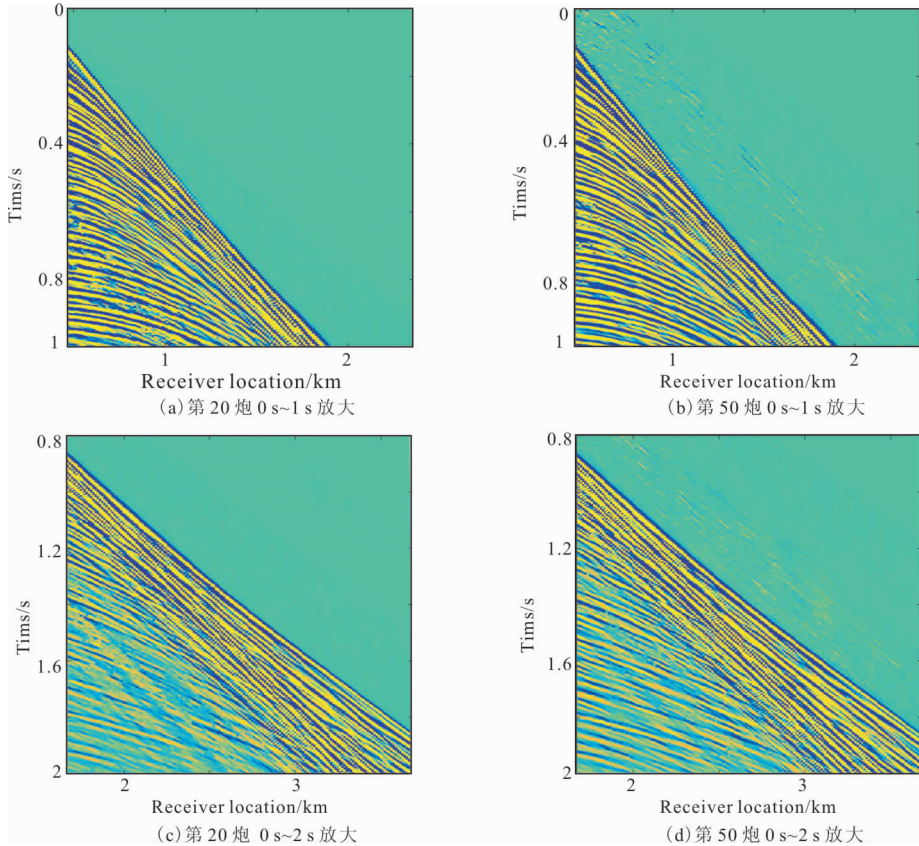


图 9 第 20 炮和第 50 炮分离后的左源炮集记录(局部放大)

Fig. 9 The separated left-source shot set record of the 20th gun(left) and 50th gun(right) (local amplification)

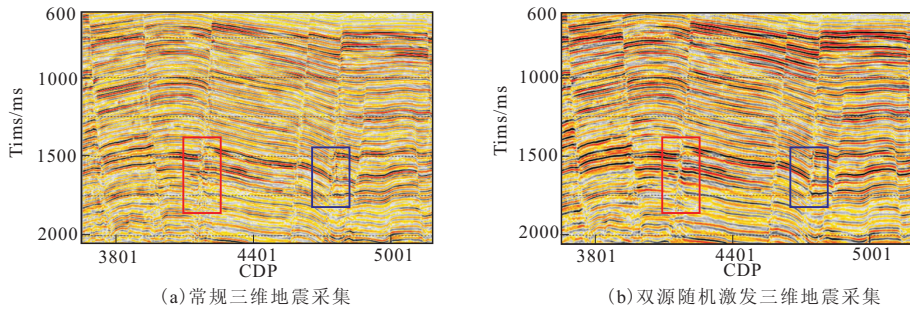


图 10 番禺 4 洼浅层偏移叠加剖面

Fig. 10 Shallow migration superimposed section of Panyu 4 sag

1) 伪解混原始多震源混合数据, 得到伪分离炮集记录:

$$P' = P_{kl} \mathbf{\Gamma}^H \quad (5)$$

式中: P_{kl} 为多震源记录; $\mathbf{\Gamma}$ 为随机激发时间组成的混叠算子矩阵, 其元素为 $e^{-j\omega \delta t_{kil}}$; δt_{kil} 为第 k 个混合炮中第 i 个多震源与第 l 个多震源之间的激发延迟时间; ω 为角频率, 符号 H 为复共轭转置。

根据实际地震资料的情况设定中值滤波初始窗口大小和迭代步长, 同时给出迭代终止时的期望信噪比值。令 $i=0$, 初始分离结果 $P_i=0$ 。

2) $i=i+1$ 。按照多震源激发的随机时间将分离结果进行混合, 再进行伪解混, 得到第 i 次伪分离炮集记录, 并与真实伪分离记录相减, 得到剩余混叠噪声:

$$R_i = P' - P_{i-1} \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Gamma}^H \quad (6)$$

3) 将剩余混叠噪声炮集分选至共偏移距道集(或共检波点道集), 再进行多方向矢量中值滤波, 衰减随机混叠噪声, 得到有效信号 R' , 并重新分选至炮集。

4) 将有效信号炮集与第 i 次伪分离炮集记录相

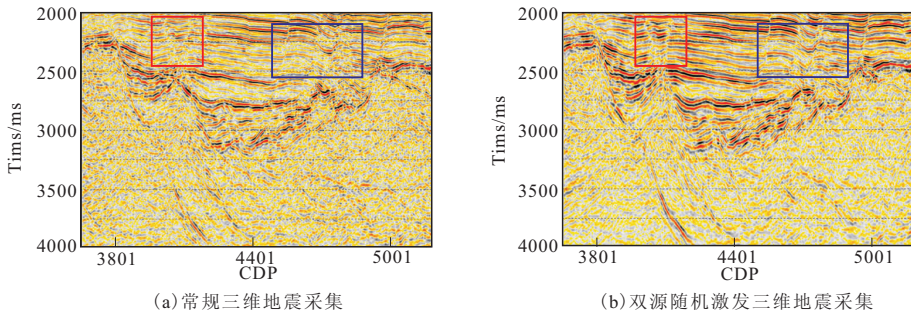


图 11 番禺 4 洼深层偏移叠加剖面

Fig. 11 Deep migration superimposed section of Panyu 4 sag

加,得到第 $i+1$ 次伪分离炮集记录:

$$P_{i+1} = P_i + R_i' \quad (7)$$

5)按照多震源激发的随机时间,将伪分离炮集记录进行混合,再进行伪分离 \mathbf{IT}^H ,然后与原始混合数据的伪分离炮集记录 P' 进行对比,计算信噪比。若信噪比达到期望值,则停止迭代,输出最终分离结果。否则,缩小中值滤波窗口,并至第二步进行迭代。

信噪比的计算的公式为式(8)。

$$S/N = 20 \log_{10} \frac{(P')_{\text{rms}}}{(P\mathbf{IT}^H - P')_{\text{rms}}} \quad (8)$$

2.3 拖缆多震源混合波场试算

实际混合炮集数据分离之前,必须先进行预处理,去除涌浪噪声和其他线性噪声,并切除初至之前的噪声干扰,图 5 为预处理后的两个混合炮地震记录,其中图 5(a)为第 20 混合炮地震记录,图 5(b)为第 50 混合炮地震记录,注意到切除了初至之前的噪声干扰。从图 5 可知,地震记录底部有大量弱同相轴,说明地震记录中直达波的能量较强,另外两个震源位于接收排列的同一侧,再加上震源间激发间隔时间短,导致两个混合波场间存在很强的混叠干扰。图 6 为第 20 混合炮伪解混后的炮集记录,图 6(a)、图 6(b)分别为第 20 混合炮中对第一震源和第二震源进行伪解混后得到的炮集记录。

图 7、图 8 分别为第 20、第 50 混合炮经过迭代多方向矢量中值滤波法分离处理后的左右源炮集记录图,可以看出大部分混叠干扰波被得到较好地消除,同相轴清晰可见,底部的一些弱同相轴也得到了保留,次震源产生的强直达波相对得到较好的压制。

同样,为了显示炮集分离结果细节,截取了前 1 s 的地震记录进行显示,图 9 分别显示了第 20 炮和第 50 炮分离的左源炮集记录,由图 9 可知,次震源产生的混叠噪声得到较好地压制,同相轴连续,但也看到,次震源产生的强直达波还有一点残留在主震源反射记录上,其原因是在进行混合震源数据波

场分离时,为了保证不伤害有效信号,限定了迭代次数,分离得到的单炮数据中的残留部分混叠噪声可以在后续处理中得到了有效去除。

通过上述分离结果对比分析表明,多方向矢量中值滤波在分离混合数据和保留有效信号方面具有较大的优势,而且次震源产生的强直达波相对得到更好地压制。

3 应用效果分析

为了与常规采集效果对比,笔者对常规拖缆采集的炮集记录和波场分离后的双源随机激发采集的炮集记录,使用相同的处理流程和参数进行处理,关键处理步骤如下:

1)基于 LIFT 技术的各种噪声压制^[27]。

2)使用 SDM 技术进行浅水多次波衰减^[28],使用 SRME 技术进行海底多次波和基底多次波衰减^[29],并使用高精度拉东变换(radon)技术进行中远道多次波衰减。

3)偏移前采用高精度速度分析技术建立偏移速度场,偏移后采用高密度连续速度分析技术提高叠加速度的精确性。

4)数据规则化后,进行各向异性叠前时间偏移处理。

5)叠后采用地质倾角统计滤波技术进行噪声压制,提高资料信噪比。

采用上述流程,分别对双源随机激发采集和常规采集地震数据进行处理获得偏移叠加数据,图 10(a)和图 10(b)分别显示了两种采集数据处理后的浅层偏移叠加剖面,对比可以看出,双源随机激发地震采集处理剖面反射同相轴能量得到了加强、信噪比得到了提高,断层成像改善明显,断点清晰。图 11(a)和图 11(b)分别显示了两种采集数据处理后的深层偏移叠加剖面,对比可以看出,双源随机激发

地震采集处理剖面反射同相轴能量同样得到明显加强、信噪比明显提高,断面成像改善明显,尤其陡倾角断面成像清晰,洼陷内幕结构和地层接触关系更加清晰,进而更有助于深层地震解释、构造评价和烃源岩研究。

常规地震采集的覆盖次数受炮间距和记录长度等因素限制,随机激发地震采集则在一定程度上突破了这种限制。

4 结论

对双源随机激发炮集数据进行了波场分离处理,并与相同处理流程下的常规数据进行了对比,认为双源随机激发地震采集技术比常规采集技术有优势,可以得出如下结论。

1) 基于海上拖缆双源随机激发最优时间的设置技术,可以优化和控制双源随机激发的延迟时间,有利于混合震源波场的分离,从而提高后续处理的效率,降低处理的难度。

2) 迭代多方向矢量中值滤波策略在共偏移距域进行混叠噪声压制,可以对多震源波场进行较好地分离,这种方法也同样可以用于分离海上多震源采集时震源间隔距离较小时采集的炮集数据。

3) 采用双源随机激发地震数据采集技术和配套的处理技术,使得新采集的地震资料覆盖次数增加了50%,改善了深层古近系地层的成像质量,同时在断面的断点归位、断层阴影区和洼陷内幕等复杂构造成像方面均取得了较好效果。

参考文献:

- [1] SILVERMAN, D. Method of three dimensional seismic prospecting[J]. US Patent, 1979; 4, 159, 463.
- [2] BEASLEY, C J, CHAMBERS, R E, JIANG, Z. A new look at simultaneous sources[C]. The 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1998; 133—135.
- [3] BERKHOUT, A. J. , Changing the mindset in seismic data acquisition[J]. The Leading Edge, 2008(27): 924—938.
- [4] 韩志雄. 可控震源高效混叠采集方法研究[A]. CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集[C]. 石油地球物理勘探编辑部, 2018; 4.
HAN Z X. The research on the blended seismic acquisition technology of vibroseis[A]. 2018 CPS/SEG[C]. OGP editorial office, 2018; 4. (In Chinese)
- [5] HAMPSON, G, STEFANI, J, HERKENHOFF, F. Acquisition using simultaneous sources[C]. The 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2008; 2816—2820.
- [6] MOORE, I, MONK, D, HANSEN, L, et al. Simultaneous sources: The inaugural full—field, marine seismic case history from Australia[C]. 22nd Meeting, ASEG, Expanded Abstracts, 2012; 160.
- [7] BAARDMAN, R, VAN BORSELEN, R. Separating sources in marine simultaneous shooting acquisition — method & applications[C]. 82nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2012; 1—5.
- [8] LONG, A S, VON ABENDORFF, E, PURVES, M, et al. Simultaneous long offset (SLO) towed streamer seismic acquisition[C]. ASEG Extended Abstracts, 2013; 1, 1—4.
- [9] POOLE, G, STEVENS, K, MARASCHINI, M, et al. Blended dual—source acquisition and processing of broadband data[C]. 76th EAGE Meeting, Extended Abstracts, 2014; 1—5.
- [10] LIU Z, WANG B, LANGHAMMER J, et al. A Case study of simultaneous data separation with enhanced adaptive subtraction method: offshore west of shetland[C]. 77th EAGE Conference and Exhibition, 2015; 1—5.
- [11] MOORE I, DRAGOSET B, OMMUNDSEN T, et al. Simultaneous source separation using dithered sources [C]. 78th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2008, 2806—2810.
- [12] HUO S D, LUO Y, KELAMIS P, et al. Simultaneous sources separation via multi—directional vector—median filter[J]. Geophysics, 2012, 77(4): 123—131.
- [13] A. KONTAKIS, D. J. Verschuur, Using a hybrid focal — curvelet transform for deblending[C]. 87th SEG Annual Meeting, 87th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2017, 4903—4906.
- [14] MAHDAD A, DOULGERIS P, BLACQUIERE G. Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of blending interference noise[J]. Geophysics, 2011, 76(3): Q9—Q17.
- [15] CHEN Y. Deblending using a space—varying median filter [J]. Exploration Geophysics, 2015, 46(4): 332—341.
- [16] GAN S, WANG S, CHEN Y, et al. Deblending using a structural—oriented median filter [C]. 85th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2015; 59—64.
- [17] 周丽, 庄众, 成景旺, 等. 利用自适应迭代多级中值滤波法分离海上多震源混合波场[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 434—443.
ZHOU L, ZHUNAG Z, CHENG J W, et al. Multi—source blended wavefield separation for marine seismic based on an adaptive iterative multi—level median filtering[J]. OGP, 2016, 51(3): 434—443. (In Chinese)
- [18] AKERBERG P, HAMPSON G, RICKETT J, et al. Simultaneous source separation by sparse radon transform [C]. 78th Annual International Meeting, SEG

- Expanded Abstracts, 2008;2801—2805.
- [19] VISHAL KUMAR, FELIX J. HERRMANN. Incoherent noise suppression with curvelet domain sparsity. 79th Annual International Meeting[J]. SEG Expanded Abstracts, 2009;3356—3360.
- [20] YANGKANG CHEN, SERGEY FOMEL, JINGWEI HU. Iterative deblending of simultaneous—source seismic data using seislet—domain shaping regularization [J]. Geophysics, 2014, 79(5): V179—V189.
- [21] 王大为, 周寒, 李列, 等. Seislet 变换在海上拖缆多震源采集数据分离中的应用[J]. 地质科技情报, 2018, 37(05): 247—253.
- WANG D W, ZHOU H, LI L, et al. Application of seislet transform on the Separation of marine multi—source blended wavefields [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(05): 247—253. (In Chinese)
- [22] 朱立华. 基于稀疏反演的多震源地震混合采集数据分离技术[J]. 石油物探, 2018, 57(02): 208—212.
- ZHU L H. Deblending simultaneous—source seismic data using sparse inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(2): 208—212. (In Chinese)
- [23] JUNHAI CAO, ERIC VERSCHUUR, HANMING GU, et al. Joint deblending and data reconstruction with focal transformation [J]. Geophysics, 2019, 84(3): V219—V231.
- [24] LIU QIANG, HAN LI—GUO, CHEN JING—YI, et al. Separation of inhomogeneous blended seismic data [J]. Applied Geophysics, 2015(03): 327—333+466.
- [25] 韩立国, 谭尘青, 吕庆田, 等. 基于迭代去噪的多源地震混合采集数据分离[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2402—2412.
- HAN L G, TAN C Q, LV Q T, et al. Separation of multi—source blended seismic acquisition data by iterative denoising [J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2013, 56(7): 2402—2412. (In Chinese)
- [26] CHEN Y, JIN Z, GAN S, et al. Iterative deblending using shaping regularization with a combined PNMO—MF—FK coherency filter[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015(122): 18—27.
- [27] 邓志勇, 张治忠, 廖显锋, 等. 深水崎岖海底地震资料问题及处理对策——以南海 L 盆地二维地震重处理为例 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(03): 1410—1417.
- DENG Z Y, ZHANG Z Z, LIAO X F, et al. Challenges and resolution on seismic processing of rugged bathy area——an instance of 2D seismic reprocessing on L basin South China Sea [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(03): 1410—1417. (In Chinese)
- [28] 徐强, 王征, 史增园, 等. 浅水多次波衰减[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 238—242.
- XU Q, WANG Z, SHI Z Y, et al. Shallow water multiple attenuation [J]. OGP, 2015, 50(2): 238—242. (In Chinese)
- [29] VERSCHUUR, D. J., BERKHOUT, A. J., WAPENAAR C P A. Adaptive surface—related multiple elimination [J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1166—1177.

Dual—source with random shooting blended towed streamer seismic acquisition and deblending

ZHANG Zhenbo, LUO Wei, YANG Chaoqun

(CNOOC Ltd—Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The blended seismic acquisition technology of marine streamers has been developed and applied abroad because it can improve the acquisition density and folds, but it is still in the research and testing stage in China. Combined with the data results of the offshore streamer dual source random shooting blended seismic acquisition test carried out in China, the setting of multi—source shooting delay time and the critical technology of multi—source wave field separation are described in this paper. Firstly, the delay time of dual streamer source random shooting is optimized based on the multi—source separation criterion, and the 3D acquisition experiment of dual source random shooting streamers is conducted in the South China Sea for the first time. The seismic data of mixed sources are obtained. Then, the iterative multi—direction vector median filter is used to de—noise in the common offset domain by using the characteristics that the aliasing noise is discrete and uncorrelated in the non—shot domain. The wave field is separated, and the single shot record is obtained. In order to compare with conventional seismic data acquisition, noise suppression and pre—stack time migration are carried out using the same processing flow and parameters as conventional seismic data. Compared with the conventional data processing results, the signal—to—noise ratio (SNR) of the dual streamer source random shooting seismic data has been improved, and the imaging has been improved, especially for the cross—section, fault shadow area, Paleogene strata, and depression interior structure.

Keywords: random shooting; blended seismic acquisition; multi—direction vector median filtering; blended wave field separation