

· 处理技术 ·

# 单点高密度地震数据处理分析与初步评价

张永刚\*<sup>①</sup> 王 赟<sup>②</sup> 尹军杰<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>中国石油化工股份公司科技开发部,北京 100728;<sup>②</sup>中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;<sup>③</sup>中联煤层气国家工程研究中心,北京 100011)

张永刚,王赟,尹军杰.单点高密度地震数据处理分析与初步评价.石油地球物理勘探,2010,45(2):201~207

**摘要** 文中结合数值模拟和实测数据,从分辨率、信噪比和数据处理的角度剖析了单点高密度地震数据与常规地震数据的区别,通过剖析数据处理流程各阶段的特点,对单点高密度地震数据的处理特点进行了总结,阐述了单点高密度地震数据的计算效率。认为对于单点高密度地震资料处理,需要根据小空间采样间隔、高保真、低/无假频、宽频带、低信噪比等特点选择合适的处理模块,并得出以下认识:①单点高密度采集有利于实现全波场的无假频采样,提高频带宽度,为实现无假频去噪和有效信号的高保真处理奠定基础,有利于提高复杂构造、大倾角构造和小尺度勘探目标的成像精度;②野外或室内组合法都可以有效压制面波和随机噪声,但室内组合优于野外组合,能保持更宽的频带,且使用灵活;③单点高密度数据使得现有处理软件去噪模块的去噪效果更好。

**关键词** 单点 高密度 组合 偏移 数据处理 计算效率

## 1 引言

单点高密度地震数据采集在工程勘探、金属矿勘探、海上油气勘探、多分量数据采集中广泛采用<sup>[1~7]</sup>。相对而言,油气地震勘探的线道距较大,加之中国陆上油气勘探多采用检波器组合的方式,因此对于油气地震勘探而言,单点高密度地震数据采集是一种新模式。随着主要勘探、开发目标由大型构造油气藏转向岩性与缝洞型油气藏,提高地震分辨率是进行精细储层描述的关键。单点高密度地震数据采集技术在加密采集空间样点的同时,由于不采用野外检波器组合就可以有效地保持地震信号的频带宽度,从而使得该技术备受关注。但是在单点高密度地震数据采集过程中,由于噪声未得到有效压制而使得单点地震数据的信噪比较低,对高密度地震数据进行室内组合是否可以有效地提高信噪比呢?国外的高密度地震数据采集由 Ongkiehnog 在 1987 年提出<sup>[8~11]</sup>,由 1988 年的 96 道增加到 2880 道,现阶段已发展到了 7000~10000 道以上的生产

能力。PGS 公司于 1993 年使用 5 缆地震采集船,2001 年发展到 16 缆,目前能达到 20 缆进行地震作业;面元普遍使用小尺度 6.25m×25m,有的甚至达到 6.25m×12.50m、3.125m×12.50m。对陆地单点高密度地震采集技术的研究和试验工作投入较多的是 Western Geco 公司,并开发了“Q-Land”技术(以野外单检波器接收、室内进行数字组合处理)。从近几年 SEG 年会收录的论文看,每年都有一定数量的文章涉及单点密集式地震采集及其相关的处理、解释技术<sup>[12~19]</sup>,并且国外的研究主要集中于单点高密度数据成像结果与常规三维地震成像结果的对比,并用于解释和监测油气开发。国内的研究主要集中于单点高密度数据采集方式的变化所引起的地震数据的特征变化及其与分辨率的关系,并从处理方法的角度进行分析对比和剖析。近年来,中石油和中石化等公司分别试验了单检波器、小道距地震采集技术,获得了一些野外数据,并从高分辨率地震勘探的角度,对这种数据的特点有了一定认识<sup>[20~35]</sup>,如 2006 年东方地球物理公司在淮南煤矿某区块进行了三维单点高密度地震数据采集,道距

\*北京市中国石油化工股份公司科技开发部,100728

本文于 2009 年 6 月 2 日收到,修改稿于 2010 年 2 月 2 日收到。

该研究得到国家自然科学基金委员会“多分量转换波地震勘探中的面波法静校正研究”(编号:40574055)项目和科技部 973“深部煤炭资源赋存规律、开采地质条件与精细探测基础研究”项目课题七——“深部煤岩多相地质体的地球物理响应”(编号:2006CB202207)与国家重大专项“大型油气田与煤层气开发”(编号:2008ZX05035-001-003、2008ZX05035-003-006HZ,2008ZX05008-006-004)专题资助。

为5m,获得的三维地震数据主频高达80~90Hz,频带宽度在200 Hz以上。

2006~2008年,笔者基于单点多分量地震技术,结合数值模拟和实测数据,从理论分析与处理方法的角度,对单点高密度地震数据进行了相对系统的分析与测试。为便于客观、全面地认识单点高密度地震数据,本文从分辨率、信噪比和数据处理的角

## 2 单点高密度地震数据的理论分析与处理方法

单点高密度地震数据主要有以下特点:

(1)无野外检波器组合的单检波器接收模式保持了无叠加损失的频带宽度,使单点地震数据表现为较宽的频带,但造成地震数据的面波等噪声能量很强,数据信噪比低。

(2)高密度采集使道、线间距缩小,加密了地震信号的空间采样。在满足空间采样定理的前提下,使得有效波与干扰波均得以更完整的采样,有利于

室内对信号的恢复和各种数字处理。

由于笔者未能搜集到同一地区完整的常规地震与单点高密度地震对比数据,只能从分辨率、信噪比、处理流程及其优化的角度,围绕单点高密度地震数据的上述特点,零散地应用数值模拟数据和各个不同地区的单点高密度地震数据进行论述。

### 2.1 单点高密度地震数据的室内组合分析

野外检波器组合具有压制随机噪声的作用。为验证室内组合压制随机噪声的效果,构建了一个单层介质模型进行地震波场模拟,模拟方法采用射线追踪法。图1为模拟的单炮记录,图2为不同道数组组合频谱对比。由图2可见,随着组合道数的增加,随机噪声的能量逐渐下降,低频信号能量也有所压制,有效波能量得以突出。

野外检波器组合主要用于压制面波等线性干扰。由于工业电等线性干扰波难以从理论上进行数值模拟,为此,只能从数值模拟的角度说明单点高密度地震数据经过室内组合压制面波干扰的效果。假设浅层有两层低速带,利用瑞利面波的频散方程模拟面波波场。表1为近地表层状地质模型参数,模拟中震源函数为主频20 Hz雷克子波。图3为高

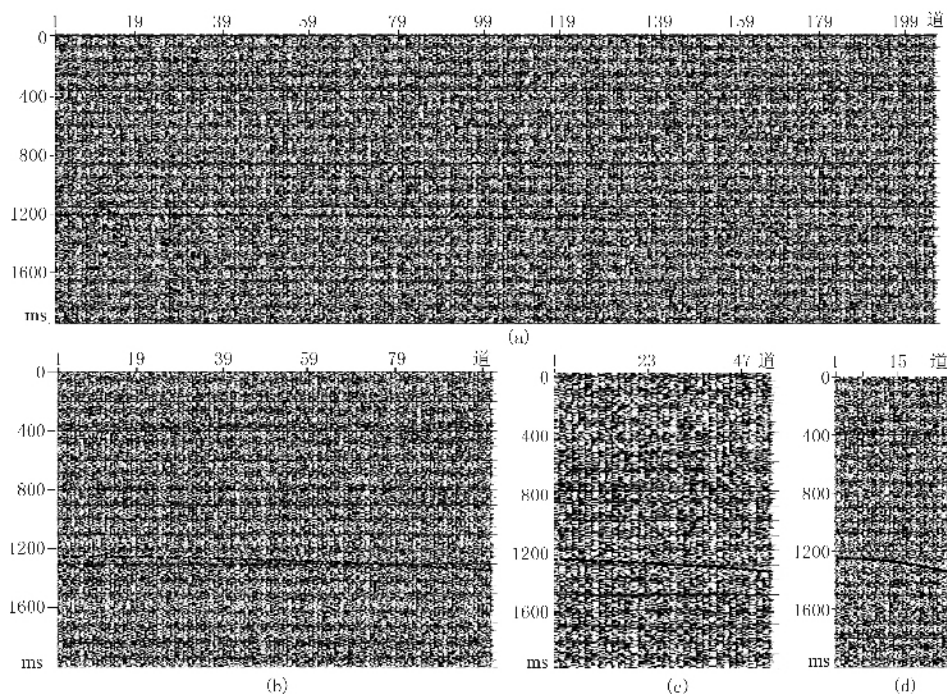


图1 模拟的单炮记录

(a)不组合(道间距为10m);(b)2道组合;(c)4道组合;(d)8道组合

排列类型为左端单边放炮,测线长度为2000m,采样率为1ms,每道2001个样点数;道间距分别为10,20,40,80m,最小炮检距为0,最大炮检距为2000m,每炮道数分别为2001,1001,501,26,炮间距、最小炮点距、最大炮点距均为0,炮数为1;震源函数为主频20Hz雷克子波,并加入了300%的随机噪声,数据体格式为IBM浮点型(4字节)

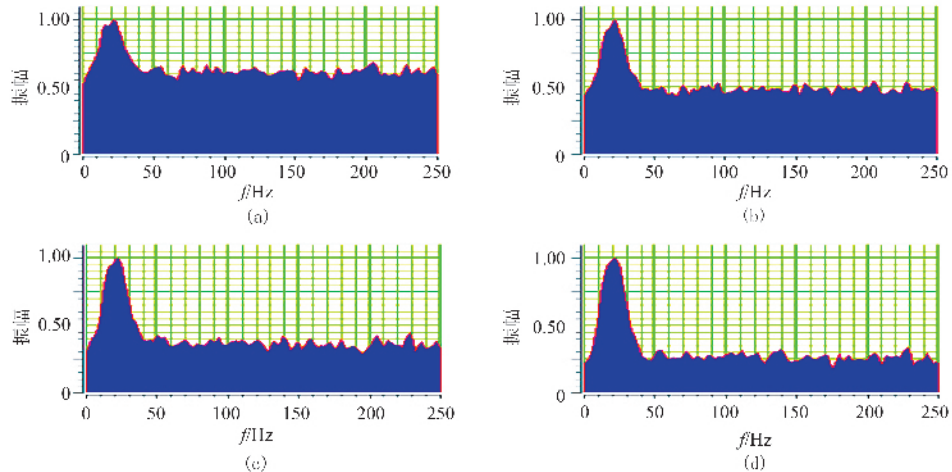


图 2 不同道数组合频谱对比(时窗:1200~1400ms)

(a)不组合(道间距为10m);(b)2道组合;(c)4道组合;(d)8道组合

表 1 近地表层状地质模型参数

层位	底界面埋深 m	纵波速度 m/s	横波速度 m/s	密度 g/cm <sup>3</sup>	备注
表层黏土 1	1	100	40	1.5	近地表模型产生面波
表层黏土 2	4	200	200	2	
表层黏土 3	300	300	120	2.1	
反射层位 1	2500	4000	2200	2.3	深层模型产生反射波
反射层位 2	5000	5000	2500	2.4	

密度地震数据模拟记录及其频谱对比,由图 3 可见:  
①2m 道间距、单个检波器的模拟记录(图 3a 上)的低频信号能量较强,主频不突出;②将道间距为 2m 的模拟记录分别组合成道间距为 4,8m 的模拟记录(图 3b 上、图 3c 上),组合后面波能量相对于有效波变弱;③从三种道间距模拟记录中面波与反射波重叠部分的频谱分析结果看,组合后低频信号能量得以压制,主频信号得以突出。由此可见,室内道组合可以相对压制面波。

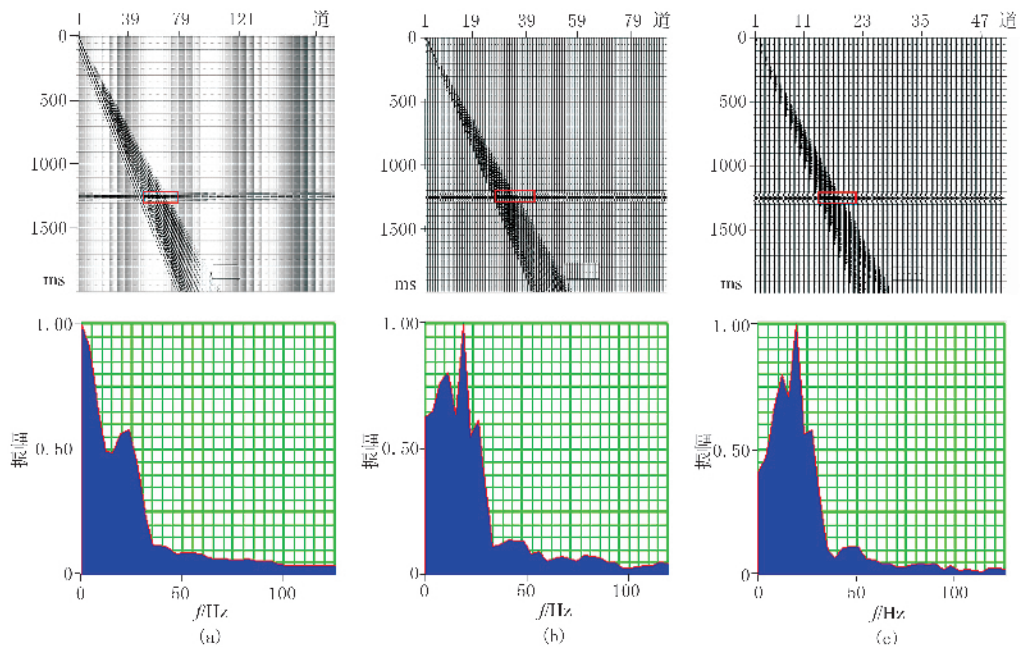


图 3 高密度地震数据模拟记录(上)及其频谱(下)对比

(a)不组合(2m 道间距);(b)2道组合(4m 道间距);(c)4道组合(8m 道间距)

红色方框为面波与反射波重叠部分



## 2.2 单点高密度地震数据中的面波压制

虽然组合可以相对地压制面波,但作为一种能量很强的线性干扰,在室内处理阶段还需要应用其他方法再进行面波的压制。尤其对于单点采集的地震数据,在原始数据信噪比低、面波较发育的情况下,面波的压制显得尤为重要。压制面波的处理方法很多,常用的有扇形滤波、高通滤波、 $f-k$ 变换滤波和 $\tau-p$ 变换滤波等。研究发现:对于常规纵波地震数据,上述方法或各方法的组合均有效,小道间距方法更有利于面波的压制。由于常规纵波勘

探的道间距较大,面波采样一般均具有假频,使得 $f-k$ 谱上高频部分的面波出现折叠而难以消除。图4为工程勘探中的一张面波数据记录及频率—波数谱图,由图可见,当把24道原始记录(道间距为2m,最大波数 $k_{\max}=0.5\text{m}^{-1}$ ) (图4a)抽取为12道记录(道间距变为4m,最大波数 $k_{\max}=0.25\text{m}^{-1}$ ) (图4b)后,则波数大于 $0.25\text{m}^{-1}$ 的面波组分的谱能量在频谱转换中折叠到波数轴的左端,向右延伸成为虚假的低波数能量轴,即由于道间距过大造成了假频现象。

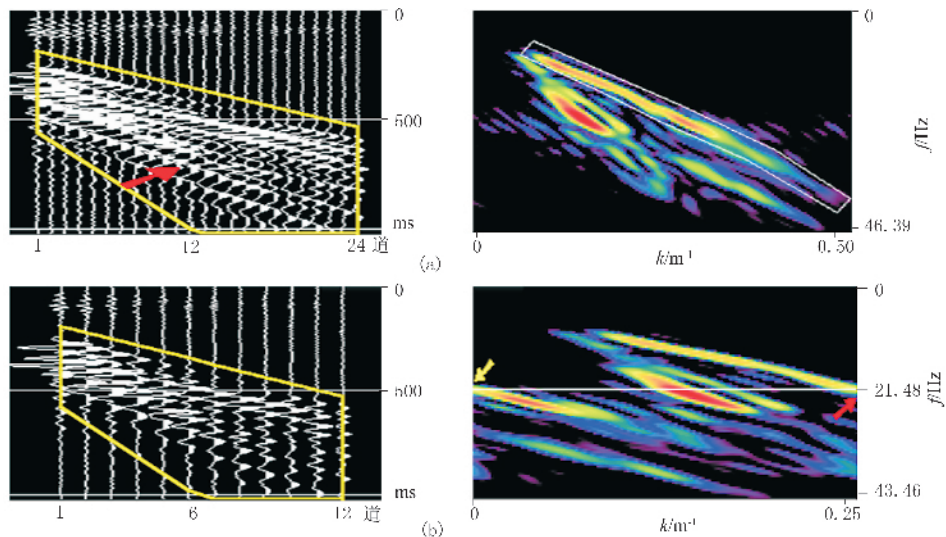


图4 工程勘探中的面波数据记录(左)与频率—波数谱图(右)  
(a)道间距2m(24道);(b)道间距4m(12道)

目前石油与煤田地震勘探的道间距一般较大,在波数域都存在一定的面波假频。对于频率范围为 $2\sim 50\text{Hz}$ 、速度范围为 $300\sim 2000\text{m/s}$ 的面波,在 $f-k$ 滤波过程中要求采样间隔必须足够小才能保证无假频采样,即面波频率越高或速度越低,要求的道间距则越小,才能保证面波在波数域保真,并达到有效去除的目的。因此小道距有利于面波的真假频采样,保证了在无假频干扰的条件下进行面波压制。数值模拟结果表明,即使进行了道内插,大道间距产生的假频也无法完全消除。

另外需要注意的是,在处理单点采集的三分量地震数据时,对于径向分量与切向分量的面波压制需要特别注意。由于面波空间走时特征及频谱特征与转换波存在一定的重叠空间,不能使用常规空间域、频率域滤波方法进行面波压制,要应用基于偏振分析的面波压制方法<sup>[36]</sup>,也可以应用 $f-k$ 变换滤波

和 $\tau-p$ 变换滤波法。

## 2.3 道间距与偏移效果的关系

经过大量理论模型数值模拟和实际地震数据的偏移处理分析(包括叠前偏移、叠后偏移、时间偏移、深度偏移)发现,道间距的变化对地震数据的偏移效果是有影响的,采用近似差分算子或条件稳定差分格式的有限差分偏移算法对道间距有一定要求<sup>[37]</sup>,否则迭代计算过程将不收敛,从而产生频散现象。而对于其他格式的差分法偏移和积分法偏移,道间距越小,越有利于成像效果的提高<sup>[38]</sup>。图5为简化盐丘模型,为论证道间距对偏移效果的影响,分别对图5模型进行了道间距为5,10,20,40m的深度偏移实验,图6为傅里叶有限差分法叠前深度偏移剖面。由图6可见:当道间距为5,10m时(图6a、图6b),道间距 $\Delta x$ 满足傅里叶有限差分格式的稳定性条件( $4.5\leq\Delta x\leq 10.48$ ),偏移效果较好,且5m

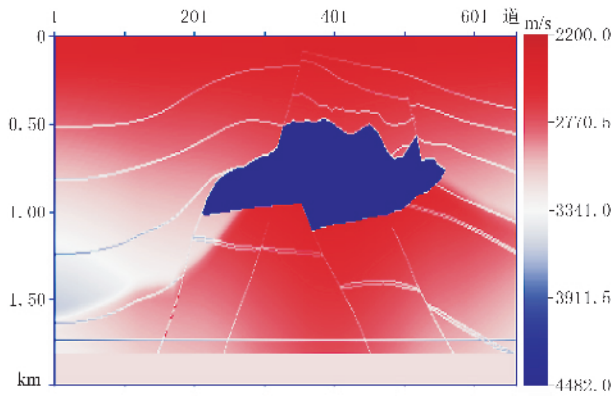


图 5 简化盐丘模型

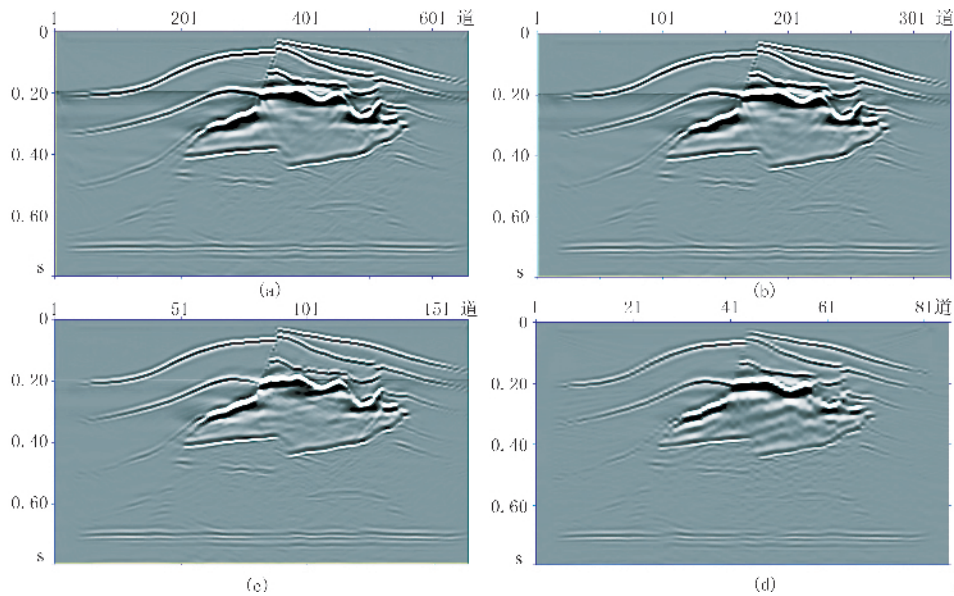


图 6 图 5 模型的傅里叶有限差分法叠前深度偏移剖面

(a)道间距 5m; (b)道间距 10m; (c)道间距 20m; (d)道间距 40m

采用固定排列接收地震波场(即排列不动),震源为主频 30Hz 的雷克子波,频带为 1~60Hz。时间采样间隔为 0.5ms,纵、横向的网格均为 5m,炮点起始 CDP 为 5,炮间距为 20m,总炮数为 164 炮,输出的正演记录时间长度为 1.5s

## 2.4 单点高密度地震数据处理的特点分析

针对单点高密度地震数据,文中对处理流程各阶段的不同模块进行了细致的分析、测试,根据各模块处理效果与道间距的关系,将模块分为三类,并总结了单点高密度地震数据的处理流程特点。

(1)有利模块 指空间采样间隔缩小对处理效果有好的影响的模块。主要有:初至折射波静校正、层析静校正、多域统计剩余静校正、 $f-k$  及与之相关的滤波方法、 $\tau-p$  域处理、中值滤波、拉冬变换、三维速度分析、倾角时差校正(DMO)、叠加、积分法偏移(如基尔霍夫积分法叠后/叠前偏移、基尔霍夫积分法时间/深度偏移)、波动方程  $f-k$  法偏移模块。

道间距的偏移效果与 10m 道间距相当;当道间距大于 10m 时(图 6c、图 6d),偏移发生数值频散(箭头处标识),盐丘的边缘成像不清晰。图 6 说明,在满足空间采样定律的前提下,小道距有利于改善叠前深度偏移效果,主要原因为:①相同孔径内,小道距使得参与成像的道数增多,这一点对小尺度或大倾角勘探目标尤为重要;②小道距有利于准确的速度建模,特别是可求准浅层速度,能避免上层速度误差下传;③小道距有利于提高横向分辨率。此外,高密度地震采集对偏移效果产生的影响主要体现在信噪比和视觉分辨率的提高上。

(2)无关模块 指空间采样间隔的变化对处理效果无影响或没有数学计算上的直接相关性的模块。主要有:数据解编、定义观测系统、球面扩散补偿、抽道集、野外(一次)静校正、一维滤波(如高通、低通、带通滤波、陷波)、小波变换、地表一致性反褶积、预测反褶积、脉冲反褶积、谱白化、反 Q 滤波、动校正、二维速度分析、 $f-x$  域随机去噪、多项式拟合等模块。

(3)条件使用模块 指需要结合不同算法,有条件地判断空间采样间隔变化带来的影响的模块。主要有:切除、剔道、组合法去噪、有限差分法偏移(叠前/叠后偏移、时间/深度偏移)模块。

对于单点高密度地震资料处理,需要根据小空间采样间隔、高保真、低/无假频、宽频带、低信噪比等特点选择合适的处理模块,以下几个关键环节应加以注意。

(1)静校正处理 在地表高差较大及浅层低速带等复杂的地区,应用层析静校正处理技术,以利于取得较精确的校正效果;

(2)面波及相干噪声压制 建议不采用室内道组合压制面波,以利于保护有效信号的低频成分;尽量选用自适应相干等有利于信号保真的方法压制噪声;

(3)振幅补偿 建议采用地表一致性振幅补偿,消除因激发、接收条件不同而造成的振幅畸变,有利于有效信号的保真,从而更好地满足岩性反演的需要;

(4)反褶积 建议采用地表一致性反褶积,校正因地表因素不一致造成的地震子波之间的差异,有利于有效信号的保真和频带的拓宽;

(5)偏移 建议采用利于保幅、保真的波动方程叠前(时间/深度)偏移成像方法,有利于叠前反演、属性分析、岩性识别等。

### 3 计算效率分析

单点高密度地震数据的采集不仅对野外采集设备(仪器)提出了超高要求,所形成的海量数据的处理、解释对计算和存储设备也提出了挑战。由于目前我们还没有进行这种海量数据的处理,因此无法给出量化、直观的计算效率对比,但以下两个例子可以使读者了解单点高密度地震数据处理的计算效率。表2列出了图6中不同道间距的偏移时间,由表2可见,随着道间距变大,偏移时间变小,如当选择10m道间距偏移时,整个偏移时间将比5m道间距缩短近一倍,即在只考虑CPU计算时间情况下,空间采样间隔的缩小将造成计算时间的快速增大。在实际地震数据处理过程中,除考虑CPU计算时间外,数据输入/输出等的时间也不可忽略。以淮南A煤矿同一区块2004年与2006年采集的数据为例(表3),对单个的反褶积处理试验而言,2006年采集数据的处理用时是2004年采集数据用时的1.5倍,整个作业流程合计用时增加更多(达2.67倍),显然网络的倍数与作业用时并非简单的线性关系。

表2 图6中不同道间距的偏移时间

道间距/m	偏移时间/s
5	7625.5
10	3590.8
20	1772.6
40	453.8

表3 作业流程的用时对比

采集年分	检波器类型	数据类型	CDP网格 m×m	作业用时 h	备注
2004	模拟	组合常规	10×10	3	近似值
2006	数字	单点密集	5×2.5	8	近似值

## 4 结束语

文中基于单点多分量地震技术,结合数值模拟和实测数据,从理论分析与处理方法的角度,对单点高密度地震数据进行了相对系统的分析与测试,从分辨率、信噪比和数据处理的角度剖析了单点高密度地震数据与常规地震数据的区别,认为在满足空间采样定律的条件下,更小的道间距有利于弱反射信号的识别,尤其对于实际野外数据采集的低信噪比数据,高密度空间采样对弱信号拾取更有意义。可以推断,单点高密度采样有利于P波方位各向异性研究。综上所述,主要得出以下认识:

(1)单点高密度采集有利于实现全波场的无假频采样,提高频带宽度,为实现无假频去噪和有效信号的高保真处理奠定基础。高采样密度有利于提高复杂构造、大倾角构造和小尺度勘探目标的成像精度。

(2)室内组合优于野外组合,室内组合能保持更宽的频带,且使用灵活,可以有效压制面波和随机噪声。

(3)单点高密度数据使得现有处理软件去噪模块的去噪效果更好,对于单点高密度地震资料处理,需要根据小空间采样间隔、高保真、低/无假频、宽频带、低信噪比等特点选择合适的处理模块。

尚需指出,单点高密度数据对采集设备要求很高,要求仪器道数一般要达到万道以上,检波器性能要好(最好是高性能的数字检波器),此外海量数据的存储和处理对室内和野外现场处理设备和技术提出了更高要求。

中国科学院地质与地球物理研究所的张金海博士、芦俊博士、杨春颖硕士为本文准备了有关图件,在此表示衷心感谢。

### 参考文献

- [1] 苗庆库,李玮,朱旭东.高密度地震法在工程勘察中的应用.物探装备,2002,12(2):132~133
- [2] 熊章强,张学强,李修忠等.高密度地震映像勘查方法及应用实例.地震学报,2004,26(3):313~317
- [3] 石战结,田钢,薛建.单点地震技术在浅覆盖区区域地质调查中的应用研究.世界地质,2003,22(1):86~90
- [4] 温建绪.小面元三维地震勘探技术在西山屯矿南五采区的应用.中国煤田地质,2008,20(6):73~75
- [5] 宋长愿,段建华,费明泽等.小面元采集三维地震勘探技术应用初探.中国煤田地质,2007,19(增刊2):120~122
- [6] 张胤彬.三维地震小面元采集技术在晋城矿区的应用.中国煤田地质,2008,20(6):70~72
- [7] 赵锴,武喜尊.高密度采集技术在西部煤炭资源勘探中的应用.中国煤田地质,2008,20(6):11~17
- [8] Malcolm Boardman, Robin Walker. *The road to high-density seismic*. Oilfield, 1995, 52~60
- [9] Ongkiehong L and Huizer W. Dynamic range of the seismic system. *First Break*, 1987, 5(12):435~439
- [10] Ongkiehong L and Askin H J. Towards the universal seismic acquisition technique. *First Break*, 1988, 6(1):40~45
- [11] Ongkiehong L. A changing philosophy in seismic data acquisition. *First Break*, 1988, 6(9):281~284
- [12] Ghassan Rached and Abdulaziz Al-Rares. Single-sensor 3D land seismic acquisition in Kuwait. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2006, 25:61~64
- [13] Jonathan Anderson, Andrew Smart and Ayman Shabrawi. Solving an imaging problem in Kuwait Oil Company's Minagish field using single-sensor acquisition and processing. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, 24:502~505
- [14] Stephen Pickering. Q-Reservoir (Advanced seismic technology for reservoir) solutions. *Oil & Gas North Africa Magazine*, 2003, 26~30
- [15] Pan, Jeff Gee-Shang, Moldoveanu, Nick. Single-sensor towed streamer improves seismic acquisition. *Clearer signal enhances Gulf of Mexico AVO anomalies (Seismic Technology)*, Offshore, 2001
- [16] Abdulbaset T Refae, Sayed Khalil, Bob Vincent et al. Increasing bandwidth for reservoir characterization with single-sensor seismic data. *Petroleum Africa*, 2008, 41~44
- [17] Guido Baeten, Vincent Belougne, Tim Brice. Acquisition and processing of single sensor seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 20
- [18] Andrew S Long. The revolution in seismic resolution: High density 3D spatial sampling developments and results. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23
- [19] Denis Mougénot, Nigel Thorburn. MEMS-based 3D accelerometers for land seismic acquisition. *The Leading Edge*, 2004, 23(3):246~250
- [20] Peng Xiao, Qin Xin and Yang Wanxiang. Application of high density acquisition in Jungar Basin, western China. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2006, 25:90~94
- [21] 孙建国.勘探地球物理技术最新进展——2002年SEG年会综述 I:采集与处理.勘探地球物理进展,2003,26(1):66~78
- [22] 吴长祥,李忠平,丁士平.塔里木盆地卡3区块二维地震采集技术研究.石油物探,2005,44(2):179~182
- [23] 王喜双,谢文导,邓志文.高密度空间采样地震技术发展及展望.中国石油勘探,2007,12(1):49~54
- [24] 钱荣钧.关于地震采集空间采样密度和均匀性分析.石油地球物理勘探,2007,42(2):235~243
- [25] 狄帮让,熊金良,岳英等.面元大小对地震成像分辨率的影响分析.石油地球物理勘探,2006,41(4):363~368
- [26] 熊金良,岳英,杨勇等.面元大小与纵向分辨率关系.石油地球物理勘探,2006,41(4):489~491
- [27] 李庆忠,魏继东.高密度地震采集中组合效应对高频截止频率的影响.石油地球物理勘探,2007,42(4):363~369
- [28] 董世泰,高红霞.单点单检波器地震勘探技术.石油仪器,2005,19(2):66~68
- [29] Cai Xiling, Liu Xuewei and Deng Chunyan et al. Characteristics analysis on high density spatial sampling seismic data. *Applied Geophysics*, 2006, 3(1):48~54
- [30] 倪良健.塔中沙漠区地震勘探采集方法研究[工程硕士学位论文].北京:中国地质大学,2006,70~86
- [31] 赵会欣,晋志刚,张宇生等.高密度空间采样地震采集覆盖次数的选择.天然气工业,2007,27(增刊A):68~69
- [32] 霍浩,张三元,闭金元等.高密度地震数据采集和处理技术在江陵凹陷的应用.江汉石油科技,2008,18(1):1~5
- [33] 夏颖,祝彩霞,孙灵群.地震勘探仪器在高密度采集中的应用.物探装备,2008,18(1):7~10
- [34] 夏洪瑞.道间距对偏移结果影响的讨论.勘探地球物理进展,2007,30(1):33~38
- [35] 曹务祥.单道接收地震资料的室内组合方法.石油地球物理勘探,2006,41(6):615~619
- [36] Lu Jun, Wang Yun, and Yang Chun-Ying. Instantaneous polarization filtering focused on suppression of surface waves. *Applied Geophysics*, 2010, 7(1)
- [37] Zhang Jin Hai, Wang Wei Min, Fu Li Yun and Yao Zhen Xing. 3D Fourier finite-difference migration by alternating-direction-implicit plus interpolation. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(1):95~103
- [38] 侯嵩,王赞,尹军杰.道间距对地震偏移的影响.石油地质与工程,2009(待刊)

(本文编辑:刘勇)