

文章编号: 1671-8585(2009)06-0404-05

高密度地震数据采集参数选取方法探讨

王梅生, 胡永贵, 王秋成, 李培明, 赵会欣, 王彦娟

(中国石油集团东方地球物理公司采集技术支持部, 河北涿州 072751)

摘要: 随着石油与天然气的持续勘探开发, 地球物理勘探所面临的地质问题越来越复杂, 为了提高地震勘探的分辨率与保真度, 需要加密地震数据采集的空间采样密度, 减小野外激发和接收组合。介绍了高密度空间采样的面元尺寸设计、观测系统设计及接收参数选取的方法和思路, 展示了三维高密度空间采样地震勘探技术在我国东部地区应用的初步效果。

关键词: 高密度地震; 最大有效频率; 数据采集; 参数选取

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

高密度地震勘探技术来源于 1988 年沙特石油公司提出的“高密度采集”方法, 是一种“未授权采集”的思想。即野外采集不再受制于处理、解释对野外空间采集密度的要求, 而是采用高密度方式进行, 处理、解释根据需要选择空间采样密度。20 世纪末至 21 世纪初, 多家地球物理服务公司相继推出针对高密度空间采样的地震勘探新技术, 虽然各自的技术表述有所不同, 但有一个共同点, 就是加密空间采样密度。

理想的高密度空间采样地震勘探方法在野外采用单点激发、单点接收, 避免了野外组合时差对高频的影响, 因此有利于提高分辨率; 同时, 由于对面波等线性干扰能够充分采样, 因此有利于在室内对线性干扰进行压制; 高密度空间采样还避免了组合产生的接收各向异性问题, 所获得的地震资料更有利于检测地下岩性的各向异性。因此, 高密度空间采样技术是油田开发中重要的地震勘探技术。

近几年东方地球物理公司在多个地区进行了二维和三维高密度空间采样的试验与研究, 并在中国东部某地区的三维高密度空间采样地震勘探中见到了较好的勘探效果。本文对高密度数据采集中的几个参数选取方法进行探讨。

1 方法设计与参数选取的思路

1.1 影响最大有效频率的因素分析

高密度空间采样地震勘探的主要目的是提高分辨率和保真度。影响分辨率的因素包括地震与地质两个方面。地震因素包括激发、接收条件以及后续资料处理与解释的各个环节, 并最终通过地震子波和地震记录噪声体现出来。地质因素对地震分辨率的影响主要表现为地震波在地层内传播过

程中子波的变化, 包括地层的吸收衰减、表层影响、层间反射以及传播路径的影响等。

水平和垂向分辨率可以用下面公式来计算^[2]:

$$R_y = \frac{0.715v_{rms}}{2f_{max} \sin \theta_{max} \cos i} \quad R_z = \frac{0.715v_{rms}}{2f_{max} \cos i}$$

式中: θ_{max} 对应于最大可得到偏移孔径处的角度; R_y 为水平分辨率; R_z 为垂直分辨率。

可见, 提高地震分辨率最直接的方法就是要提高所获得有效信号的频率和频带。而野外可获得有效信号最大频率的能力受几何扩散、透射和反射损失、非弹性衰减因子, 以及仪器记录的动态范围、前放增益、检波器畸变的影响, 同时还受到所选择的采集参数的影响。地质因素的影响显然是难以改变的, 因此我们只有通过装备的改进、方法的改变以及参数的合理选取来确保可获得有效信号的最大频率。

在分析可获得最大频率的计算中, 由于考虑仪器本身的噪声一般需要占用 24 位中的 5 位, 因此, 如果一个高频信号的振幅衰减了大约 110 dB 或更多, 就可以认为其已消失(这是因为 24 位 A/D 仪器的最大动态范围是 138 dB)。同时, 我们还必须考虑另外一个非常重要的因素——检波器的限制^[1]。目前在地震数据采集中, 检波器的动态范围一般小于仪器的动态范围。常规模拟检波器的动态范围只有 70~80 dB 左右, 而数字检波器动态范围是 105 dB 左右。如果一个高频有效信号衰减到低于所用检波器的动态范围, 则可认为该信号不可探测。

收稿日期: 2009-09-13; 改回日期: 2009-10-10。

第一作者简介: 王梅生(1962—), 男, 高级工程师, 长期从事地震采集方法与技术应用研究工作。

1.2 面元选取方法分析

Mike Galbraith 对面元选取有很好的叙述:首先分析可获得的最大有效频率^[3]。对于有倾角的地层或经偏移处理过的剖面,最大偏移无假频频率将受到面元尺寸的影响,因此面元大小应以不影响可获得的最大有效频率为准。面元过小,费用将浪费在试图记录因衰减而根本得不到的高频上;相反,面元过大,来自倾斜界面的高频信号将出现假频,影响分辨率的提高。另外,高密度勘探由于减小了野外组合,原始资料的信噪比降低,因此面元选取还应考虑室内去噪的需要。选择面元尺寸的方法是:

1) 根据地质因素、仪器和检波器的动态范围,计算可能获得有效信号的最高频率。

2) 根据最小地质目标体、倾斜地层不产生空间假频、横向分辨率以及绕射波收敛等需求,计算

获得最高频率有效波所需要的面元尺寸。

1.3 道距的选择

根据工区干扰波调查结果,分析工区内线性噪声的主频和频带范围。理想的高密度采集是能够对线性噪声也能够充分采样。但是在实际采集中,由于地滚波等一些线性噪声速度低、波长短,要对其充分采样仍有一定的难度。从室内三维去噪和节约成本两方面考虑,道距的选择不是追求对线性噪声的充分采样,而是追求无污染采样。图 1a 是道距为 10 m 的 F-K 谱,可以看出其地滚波和折射波都出现折叠,也就是地滚波和折射波都存在采样不足的问题,但是没有污染有效信号;图 1b 是道距为 20 m 的 F-K 谱,可以看出地滚波和折射波采样不足,且对有效信号有一定的污染。为了在处理中能很好地去掉线性噪声,要求对线性噪声的主频能充分采样,线性噪声的优势频带不污染有效信号。

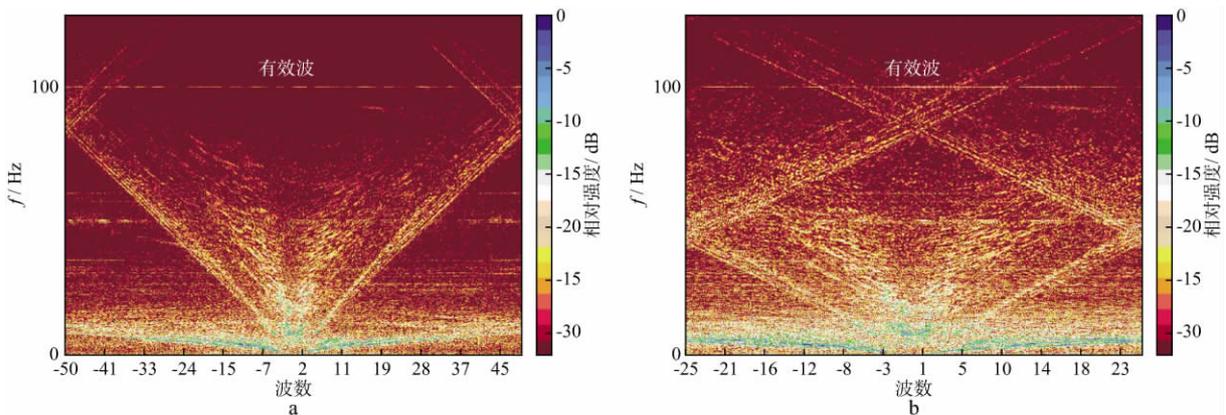


图1 某地区道距 10 m(a)和 20 m(b)的 F-K 谱

1.4 观测系统设计与优化

从观测系统设计角度,高密度空间采样地震勘探需要考虑两个问题:一是所建立的观测系统要能正确地处理信号,即获得足够的分辨率和振幅保真度;二是要能压制各种可能会出现的噪声,也就是要求以最佳的方式记录信号和尽可能压制噪声。观测系统设计与优化包括 3 个方面:

1) 基本消除观测系统产生的采集脚印。只有消除了非地下地质条件引起的采集脚印,振幅、相位、速度等地球物理参数的变化才能真实地反映出地下地质信息,也就提高了保真度。

2) 要利于室内去噪。因为高密度地震数据采集在野外要求不组合或小组合,尽可能采用点源激发、单点接收,尽量保真地记录有效信号与噪声。因此,设计的观测系统必须有利于室内处理对各种噪声的压制,如线性震源噪声、反向散射噪声、多次波与环境噪声等。为了能形成三维去噪所需的最

小数据集,要求所设计的观测系统具有较宽的方位角,以达到三维去噪的目的。

3) 强调对称采样与连续性采样的理念。采集数据具有对称性与连续性将非常有利于后续处理手段的实施,也有利于叠加与偏移对噪声的压制。

1.5 接收参数分析

高密度空间采样地震勘探技术力求在野外不组合,实现单点接收。若野外噪声较小,采用单个数字检波器进行接收是一个理想的选择。但是由于较强噪声存在以及道数和投入资金的限制,有时还不得不进行合理的折中,一方面要增加野外采样密度,另一方面要进行适当的组合。

1) 数字检波器与模拟检波器的比较与选择。与模拟检波器相比,数字检波器具有振幅和相位响应好、动态范围大、低畸变和抗电磁干扰等优点^[4]。表面上看,使用数字检波器相对常规模拟检波器组合有许多施工和地球物理方面的优势。然而,这些

优势只有在信号不被噪声干扰的理想情况下成立。在环境噪声较为发育的情况下,常规模拟检波器可以实现组合,与单个检波器相比,不管是串联还是并联,都使环境噪声降低了 $N^{1/2}$ 倍,相当于使模拟检波器的动态范围提高了 $10 \times \lg N$ dB。此时常规模拟检波器因其便于野外组合而优于数字检波器。因此,检波器类型的选择应根据工区资料信噪比的情况而定。

2) 如果对于可获得的最大有效频率没有影响,也可以采取适当的方式组合。数字检波器可以通过在野外采集中使用子线^[5,6],在室内处理中进行去噪、动静校正来进行组合。这种组合十分灵活,也最大限度地减小了组合的副作用,但是需要投入的地震道数成倍增加。采用模拟检波器组合方式,只要组内距大于高频噪声的相关半径,最浅目的层最大炮检距处的道内组合时差小于可获得最高频率的 $1/4$ 周期,对地震分辨率的影响不大。单个检波器接收的另一个优点是有益于研究各向异性,因此采用组合方式要尽可能地保持这个优点。组合的方向特性主要与组合图形有关,因此设计的组合图形要尽可能地减小方向变化。线性组

合、矩形组合、正方形组合和圆形组合相比,线性组合方向特性最大,正方形和圆形组合方向组合特性最小。因此,在高密度空间采样地震勘探中,若需要对各向异性开展研究,应尽可能地采用单点接收,正方形或圆形组合。

2 实例分析

我国东部某地区 1999 年曾进行过面元 $15 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 、覆盖次数为 56 次的二次三维地震勘探,先后进行了多次处理,但仍不能满足油田开发的需要,最后,油田公司决定在该区进行高密度空间采样地震勘探。按照上述设计思路,对该区进行了参数设计与选取工作。

1) 根据已有的地震资料和测井资料估算了该区可能获得的有效信号的最高频率,见表 1。

本区采用 12 个模拟检波器组合接收,分析认为动态范围在 80 dB 左右。因此确定针对目的层 T1、T2、T3、T4 要保护的最高频率为 90 Hz、75 Hz、70 Hz、60 Hz。按最高无混叠频率、横向分辨率和 30° 绕射收敛要求计算的面元如表 2 所示。

表 1 主要目的层吸收衰减分析

目的层	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz	110 Hz	120 Hz
T1	-42	-49	-56	-63	-69	-76	-83	-90	-97	-103
T2	-50	-58	-65	-73	-80	-87	-95	-102	-110	-117
T3	-54	-62	-71	-79	-87	-91	-103	-111	-120	-128
T4	-59	-67	-67	-83	-91	-95	-107	-115	-122	-130

表 2 按不同要求计算的面元尺寸

目的层	层速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	地层倾角 $\alpha/(\circ)$	无混叠频率	横向分辨率	30° 绕射收敛
T1	2 234	8	44.5 m	18.7 m	12.4 m
T2	2 655	10	50.9 m	26.0 m	17.7 m
T3	2 710	12	46.6 m	28.4 m	19.3 m
T4	2 900	15	46.6 m	35.5 m	24.1 m

从保护最高频率有效波考虑,面元尺寸选择为 12.5 m,道距为 25 m,较为合理。

2) 通过干扰波调查,该区面波速度为 300 m/s 左右,频率在 8~12 Hz。波长为 25~37.5 m。设计中考虑让频率为 10 Hz 以下的面波充分采样,而 12 Hz 的面波出现折叠,但不污染有效信号。设计的道距为 15 m。

3) 在观测系统设计中,炮点距等于接收点距,炮线距等于接收线距,注重了对称采样;采用较宽的方位角,以保证正确建立便于三维去噪的最小数据集;线滚滚动距离为一条接收线距,以减小采集脚印。

4) 根据计算,T1 层最大炮检距的有效波的最小视波长约为 48 m,因此,从保护有效波角度出发,设计组合基距应不大于 12 m。实际采用的组合方式是基距 10 m 的正方形组合,主要目的是压制随机干扰。

根据分析论证结果,该区部署了面元为 $7.5 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ 、覆盖次数为 60 次的高密度地震勘探,高密度三维地震数据目前正在采集中,现已对采集完的几束线进行了初步处理。图 2 为新老剖面对比图,可以看出,新剖面的信噪比和分辨率都得到明显提高。图 3 和图 4 是对新老三维中浅层资料频谱分析的结果,可

以看出,在-20 dB处,频带宽度由7~63 Hz拓展为10~92 Hz。考虑新剖面只是在几束线上处

理的,预计在数据采集完成后,最终剖面质量应该还能得到进一步提高。

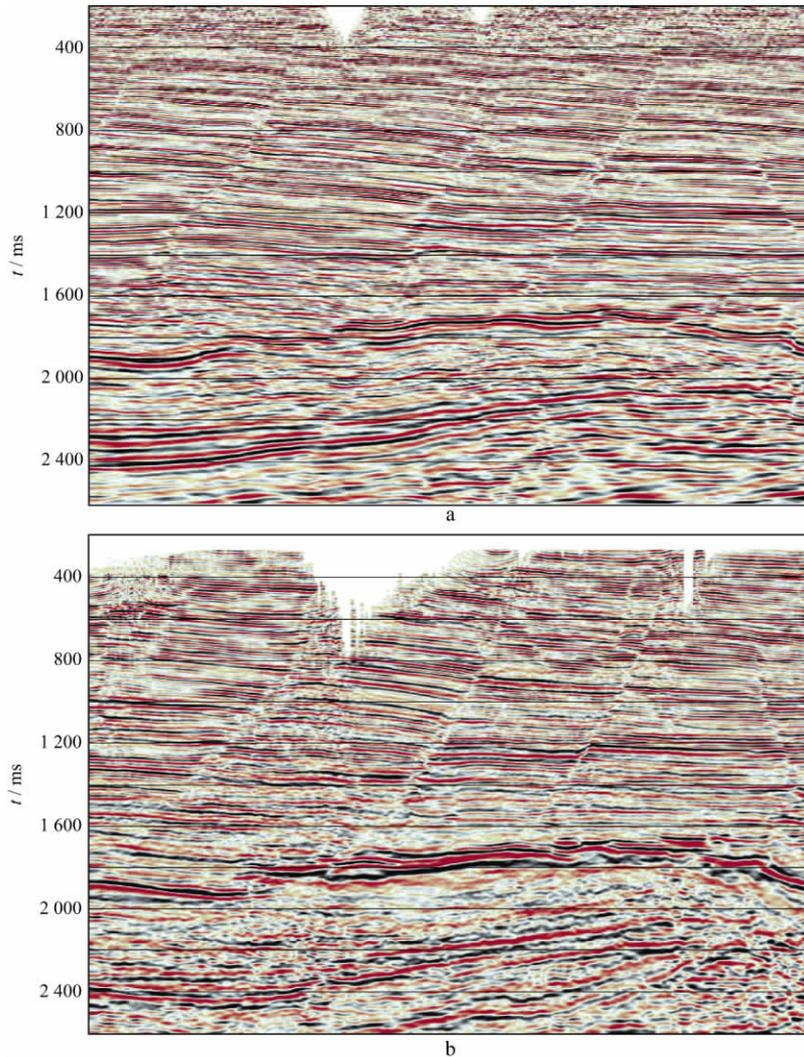


图 2 新(a)老(b)三维地震剖面对比

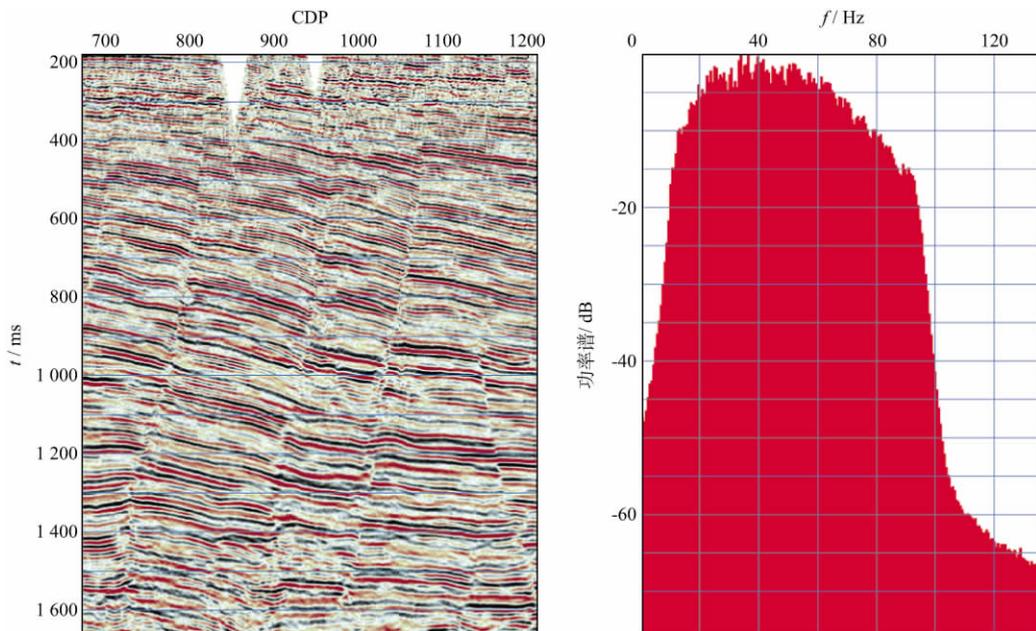


图 3 新三维地震剖面中浅层频谱分析

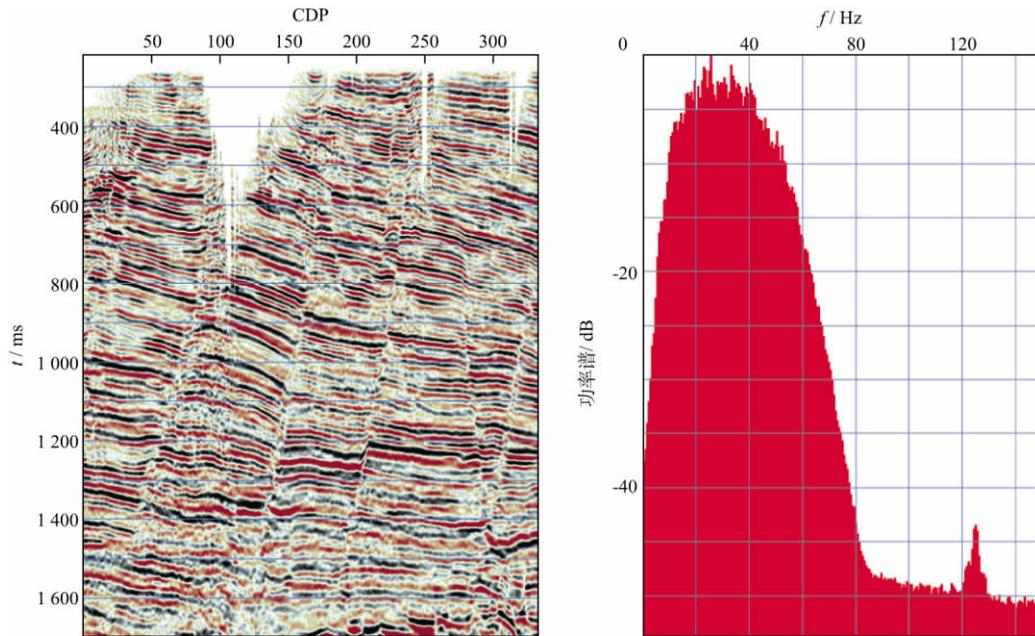


图 4 老三维地震剖面中浅层频谱分析

3 结论

1) 高密度空间采样能够提高地震勘探精度,但是由于可以获得的有效波最高频率主要受到地质因素的影响,因此加密空间采样提高分辨率的能力有限。

2) 高密度观测系统设计应充分考虑减小采集脚印、提高保真度,并要有利于三维去噪的最小数据集的构建。面元尺寸的选择应该在对可获得的有效波最高频率和线性干扰优势频带充分分析的基础上进行设计。

3) 数字检波器由于振幅和相位呈线性响应、动态范围大、低畸变、抗电磁干扰等优点,因此适合于进行高密度勘探。但是,在噪声较为发育的地区,由于数字检波器野外单点接收需要采用更密集的空间采样和更高的覆盖次数,因此,在确保野外组合不损害可获得有效波最高频率的前提下,采用

模拟检波器小基距组合也是可以选择的方法。

参 考 文 献

- 1 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 45~60
- 2 Vermeer G J O. 3-D Seismic Survey Design[M]. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists Tulsa, 2002. 75~79
- 3 Galbraith M. A new methodology for 3D survey design [J]. Expanded Abstracts of 74th Annual International SEG Meeting, 2004, 83~86
- 4 Jon T, Bruce R, Jim M, et al. MEMS for geophysicists [J]. Expanded Abstracts of 71st Annual International SEG Meeting, 2001, 21~24
- 5 Mougnot D. MEMS-based 3C accelerometers for land seismic acquisition; Is it time[J]. The Leading Edge, 2004, 23(2): 246~250
- 6 Mougnot D. How digital sensors compare to geophones [J]. Expanded Abstracts of 74th Annual International SEG Meeting, 2004, 5~8

(编辑:戴春秋)