

• 综述 •

# 高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择

## ——YA 高精度三维勘探实例

屠世杰\*

(中国石化江苏油田分公司物探技术研究院, 江苏南京 210046)

屠世杰. 高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择——YA 高精度三维勘探实例. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 926~ 935

**摘要** 与常规地震采集参数, 如覆盖次数和面元大小等相比, 在高密度三维地震采集设计中, 讨论炮密度和道密度参数对叠前成像的影响显得更为重要。在导出炮密度、道密度与面元、覆盖次数的关系的基础上, 通过对 YA 高精度三维观测系统及其五种退化方案叠前偏移效果、信噪比和采集成本的对比分析, 本文认为: ①由于地震数据的频带是有限的, 叠前偏移效果与炮密度、道密度关系曲线存在一个门槛值, 在门槛值内信噪比随炮密度或道密度的增加而明显增大, 超过该门槛值, 再增加炮密度或道密度时信噪比仅有微弱改善; ②不同地区、不同深度的目标体炮密度或道密度门槛值是不一样的, 构造简单地区的门槛值小, 构造复杂地区的门槛值大, 目的层浅的门槛值大, 目的层深的门槛值小。因此, 高精度三维勘探的炮密度和道密度的选择必须与构造复杂程度、地震勘探频带相适应, 且应优先确定; 面元和覆盖次数的选取只需满足炮密度和道密度的要求即可; 减小组合基距或采用单点接收和高分辨率处理能拓宽频带, 这两者会使炮密度和道密度相应提高; 不应过分强调小面元、高覆盖次数, 这样就使采集参数有更大的优选空间, 真正体现基于叠前成像的观测系统设计的理念。

**关键词** 高精度三维 高密度三维 炮密度 道密度 观测系统设计 面元尺寸 覆盖次数

## 1 问题的提出

近年来, 以较高的炮密度、道密度(小面元、高覆盖)、小组合基距为特征的高精度三维地震勘探技术在我国东、西部地区已进入了规模生产阶段。更高的空间采样密度、单检波点接收为特征的高密度三维地震技术也处于探索试验中。合理应用高精度或高密度三维地震技术可提高地震资料的分辨率和信噪比, 对油气的勘探开发极为有利。但笔者也关注到: 一些从事高精度三维地震资料解释研究的人认为, 高密度三维地震的勘探效果与其高昂的成本相比并不相称; 也有人认为目前的炮密度和道密度还不够高, 还要继续提高甚至采用连续采样方式。无论如何, 高密度地震已经受到人们广泛的关注<sup>[1~6]</sup>。因此, 选取合适的炮密度和道密度使得成像效果满足地质任务需求或者说取得最佳性价比, 即是本文主旨。

关于面元尺寸和覆盖次数的选择前人已做过较多研究<sup>[7]</sup>, 得到的主要结论是: 覆盖次数越高则叠加剖面信噪比越高, 面元越小则成像精度越高。但应该看到, 覆盖次数存在一个门槛值, 超过该门槛值后再增加覆盖次数, 其效果就不明显了。对于某个特定面元, 该门槛值近年来可随着高精度三维的开展大致确定下来, 如 YA 地区面元为  $20\text{m} \times 40\text{m}$  时, 其覆盖次数门槛值约为 240 次。

面元大小是否也有相应规律? 是否存在与覆盖次数类似的门槛值? 这个问题很难从实际资料测试结果中得出明确答案。虽然一些高精度三维采用可变面元技术, 但不同面元的覆盖次数是不一样的, 其成像效果没有可比性。有人用同一数据按不同面元进行叠前偏移处理, 然后根据叠前偏移效果来说明面元大小对叠前偏移处理效果的影响, 这样做显然不合适。因为用同一数据按不同面元进行叠前偏移处理, 其输入数据的空间采样密度和均匀性一致, 故用同一速度场和同一偏移方法, 不同面元叠前偏移

\* 江苏省南京市 4608 信箱, 210046

本文于 2009 年 11 月 2 日收到, 第一次修改稿于 2010 年 3 月 28 日收到, 第二次修改稿于 2010 年 8 月 30 日收到。

效果差异不大(图 1)。即便有些差异,其原因可能是叠前偏移的规则化预处理即炮检距重组,若采用同一种炮检距重组方案,则面元越大意味着更多的炮检距被合并,即在叠前人为降低道密度,从而影响叠前偏移效果。笔者认为:采用可变面元技术的高

精度三维资料只要做好一种面元叠前偏移处理即可;而按不同面元进行叠前偏移处理不过是无谓地增加处理工作量,完全没有必要;至于面元的选择,要兼顾考虑偏移前保持较高空间采样密度和炮检距规则化两个因素。

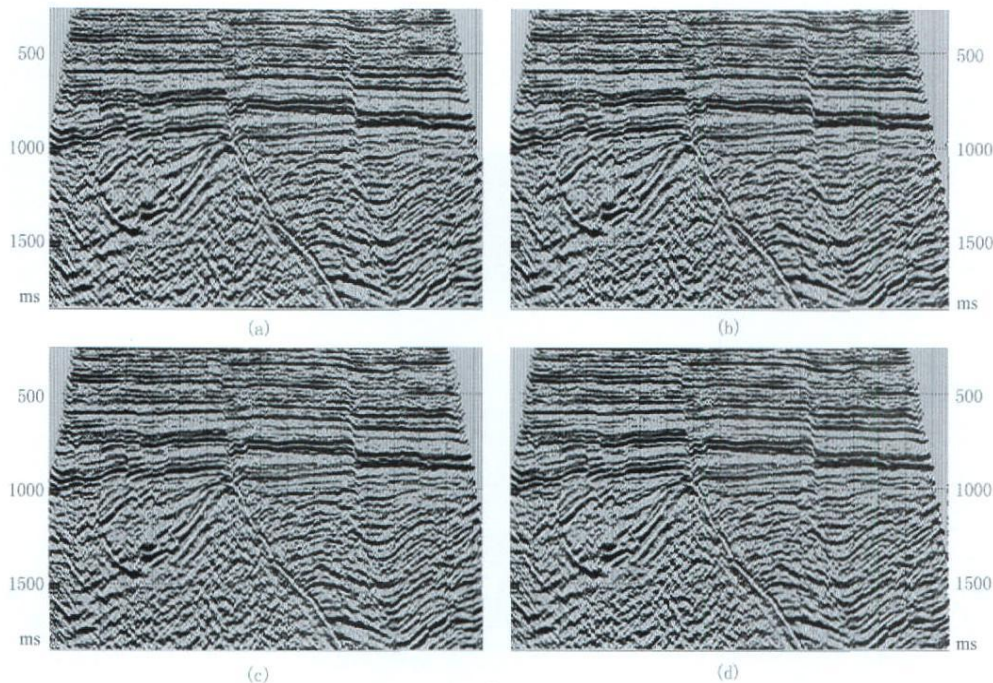


图 1 同一数据体不同面元叠前时间偏移效果剖面对比

(a)  $10\text{m} \times 10\text{m}$ ; (b)  $10\text{m} \times 20\text{m}$ ; (c)  $20\text{m} \times 20\text{m}$ ; (d)  $20\text{m} \times 40\text{m}$

从面元和覆盖次数入手进行采集参数论证基本上是基于叠后偏移设计思想,这给当前的高精度三维地震采集方法设计带来了困扰。要提高成像精度,需采用小面元;因成本限制,若采用小面元则其覆盖次数就不能太高;而覆盖次数不高,就会担心信噪比偏低,特别是在低信噪比地区。若强调信噪比,则宜采用较高覆盖次数,而受成本限制只能增大面元,这样成像精度就会受到影响。

如今,叠前偏移特别是叠前时间偏移已成常规处理方法。叠前偏移处理输出道密度或面元可以任意大小。当然,在实际数据处理中,考虑到规则化,往往选择采集设计中的基础面元。众所周知,地震采集的空间采样密度和炮检点分布的均匀性对叠前偏移效果影响很大<sup>[2]</sup>。因此,与常规采集设计参数(覆盖次数和面元大小)相比,在高精度三维采集参数设计中,讨论炮密度和道密度参数对叠前成像效果的影响显得更为关键!通常在同一地区不会为测试不同的炮密度和道密度影响而开展多次不同形式

的三维地震采集,但通过对高精度三维地震原始数据做一些模拟不同道密度和炮密度采集的处理却是可能的。如对原始地震数据等间距地删去一些炮点,就可模拟一项炮密度较低的采集;同理,等间距地删除一些地震道,就可模拟一项道密度较低的采集。

本文基于 YA 高精度三维实际资料,以更稀疏的炮点/检波点进行采样,即退化;然后根据不同退化数据的叠前偏移效果,探寻炮密度和道密度与成像质量、信噪比及成本的关系。当然,这样抽出的数据的炮检距和方位角属性不是最好,但是采用同样的道密度或炮密度采集,其观测系统属性完全可设计得更好一些。笔者认为,通过这种方式进行对比后所得结论是有价值的。

需要指出的是影响叠前偏移效果的因素很多(包括叠前预处理等)。但就叠前偏移本身而言,主要看两点:①归位是否准确;②成像是否清晰,即偏移噪声是否足够小。前者主要与速度场的精度和所

用偏移方法的假设条件与地下介质符合程度有关,后者则更多与采集方法相关联。笔者在对 YA 高精度三维不同的退化数据进行叠前偏移处理时所用的速度场和偏移方法是一样的,因此本文主要从信噪比来考察不同的道密度和炮密度对叠前偏移效果的影响。

## 2 炮密度、道密度与面元大小、覆盖次数的关系

在介绍 YA 高精度三维不同的退化数据叠前偏移效果之前,首先给出炮密度和道密度的定义,然后根据定义导出炮密度、道密度与常见基本三维采集参数面元大小、覆盖次数的关系。

根据文献[2]的定义,对三维地震勘探而言,道密度  $D_R$  就是单位面积内的道数(即每平方米的道数,以下量纲统一),炮密度  $D_S$  则是单位面积内的炮数,即

$$D_R = \frac{1}{R_I R_{LI}} \quad (1)$$

$$D_S = \frac{1}{S_I S_{LI}} \quad (2)$$

式中:  $R_I$  为接收道间距;  $R_{LI}$  为接收线间距;  $S_I$  为炮点距;  $S_{LI}$  为炮线距。

关于道密度的定义,业界常用下式<sup>[3]</sup>

$$D_T = \frac{S_S}{S_{LI} R_{LI} S_I R_I} \quad (3)$$

其中  $S_S$  为排列片的有效面积。式(1)的道密度是指接收道;式(3)的道密度是指地震道,每个地震道即是一个炮点—接收点对,两者意义是不同的。为区分计,本文将前者称作接收道密度,后者称为地震道密度。将式(1)和式(2)代入式(3),得到地震道密度与接收道密度、炮密度的关系式

$$D_T = S_S D_R D_S \quad (4)$$

从该式可看到,对相同地震道密度,可以有不同的接收道密度和炮密度的组合。

在常规三维地震观测系统设计中,规定三维面元的大小由半接收道间距和半炮点距决定,即

$$a = \frac{R_I}{2} \quad (5)$$

$$b = \frac{S_I}{2} \quad (6)$$

在单边放炮时,纵向覆盖次数  $f_l$  和横向覆盖次数  $f_x$

分别定义为

$$f_l = \frac{N_R R_I}{2 S_{LI}} \quad (7)$$

$$f_x = \frac{N_{RL}}{2} \quad (8)$$

式中:  $N_R$  为排列接收道数;  $N_{RL}$  为接收线数。总面元覆盖次数定义为纵、横向覆盖次数的乘积,即

$$f_l = f_l \times f_x = \frac{N_R R_I N_{RL}}{4 S_{LI}} \quad (9)$$

将该式中的分子和分母同时乘以接收线间距  $R_{LI}$  和面元的大小,得到

$$f_l = (N_R R_I N_{RL} R_{LI}) (a \times b) \times \frac{1}{S_I S_{LI}} \times \frac{1}{R_I R_{LI}} \quad (10)$$

如果定义  $N_R R_I$  为排列的长(比实际排列长  $R_I$ )、 $N_{RL} R_{LI}$  为排列的宽(比实际排列宽  $R_{LI}$ ),那么式(10)中  $(N_R R_I N_{RL} R_{LI})$  即为排列片的有效面积  $S_S$ 。又因  $a \times b$  为面元的面积  $S_B$ ,则有

$$f_l = S_S S_B D_R D_S \quad (11)$$

把式(4)代入上式,得到

$$f_l = S_B D_T \quad (12)$$

则业界定义的地震道密度  $D_T$  为单位面积内的地震道数,即为面元的总覆盖次数与面元面积之比

$$D_T = \frac{f_l}{S_B} \quad (13)$$

从式(13)可看出,对于采用可变面元技术设计的三维勘探项目,无论采用何种面元,其地震道密度是不变的。在高密度三维地震勘探采集参数设计中,不妨先选定采用何种地震道密度,然后再确定面元和覆盖次数,这样即可避免前面提到的困扰。

从下文展示的图片中可发现同一地震道密度、不同接收道密度和炮密度组合,其叠前偏移效果存在差异。因此,在以下讨论中,笔者还是从接收道密度和炮密度两方面进行(以下提到的道密度均为接收道密度)。

## 3 YA 高精度三维观测系统及退化方案

YA 高精度三维工区位于 HL 断裂带上(图2),区内断层发育且有火成岩串层侵入,构造非常复杂,油气勘探潜力大,但以往地震资料的品质一直难以满足精细解释及综合研究的需求。



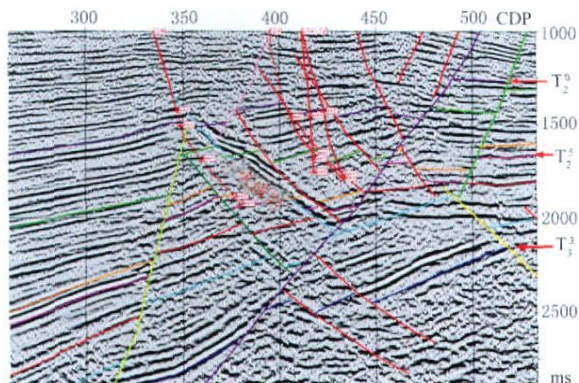


图 2 YA 高精度三维典型地震剖面

该三维项目于 2007 年底开展野外数据采集, 设计观测系统如图 3a 所示: 24 线—20 炮—210 道—细分面元; 最小面元尺寸为  $10\text{m} \times 10\text{m}$ , 覆盖次数为 60 次, 也可采用可变面元 ( $10\text{m} \times 20\text{m}$ 、 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 、 $20\text{m} \times 40\text{m}$ ); 道距为 40m, 接收线距为 100m, 炮点距为 60m, 炮线距为 140m, 束线距为 600m; 道密度为 250 道/ $\text{km}^2$ , 炮密度为 119 炮/ $\text{km}^2$ , 地震道密度为 60 万道/ $\text{km}^2$ 。

将采集数据隔线抽取, 变成一束 12 线, 每线 210 道, 20 炮。隔线抽取后, 道密度是原始地震数据道密度的一半, 接收线距为 200m。然后对这两种道

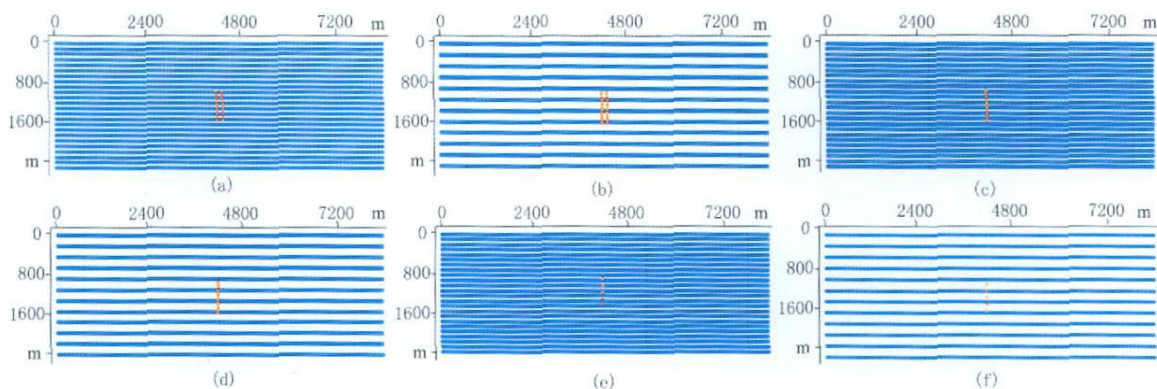


图 3 YA 高精度三维及其退化方案观测系统模板

(a) 24 线 20 炮, 覆盖次数为 480 次; (b) 12 线 20 炮, 覆盖次数为 240 次; (c) 24 线 10 炮, 覆盖次数为 240 次; (d) 12 线 10 炮, 覆盖次数为 120 次; (e) 24 线 5 炮, 覆盖次数为 120 次; (f) 12 线 5 炮, 覆盖次数为 60 次

密度的地震数据分别隔炮点、炮线抽取, 使得新数据集的炮密度是原始地震数据炮密度的二分之一 (炮点距为 120m)、四分之一 (炮点距为 120m, 炮线距为 280m)。由此形成五种退化的观测系统: 24 线 10 炮、24 线 5 炮、12 线 20 炮、12 线 10 炮、12 线 5 炮 (图 3)。这五种退化的观测系统和原始观测系统 (24 线 20 炮) 在最大面元 ( $20\text{m} \times 40\text{m}$ ) 时, 覆盖次数都是均匀的。因此, 以  $20\text{m} \times 40\text{m}$  为基准面元, 对这些不同的道密度、炮密度数据按同一处理流程、相同速度场进行叠前时间偏移处理。

#### 4 成像效果分析及信噪比与道密度、炮密度关系

图 4 是同一位置不同道密度、炮密度数据的叠前时间偏移剖面, 通过对比分析可看出, 12 线 20 炮和 24 线 20 炮叠前时间偏移剖面的差异肉眼难以察觉, 24 线 10 炮剖面同相轴的连续性比 12 线 20 炮

和 24 线 20 炮稍差一些; 随着道密度和炮密度的降低, 成像质量越来越差。为了进一步量化成像质量随道密度和炮密度的变化关系, 笔者采用 Western Geco 公司 Omega 系统的 3DSNR 模块分别沿主要目的层  $T_1^0$ 、 $T_2^5$  和  $T_3^3$  (图 2, 计算时窗为 200ms) 计算信噪比, 加权求取平均值, 形成图 5 所示的信噪比—炮密度关系曲线。图中: a 点, 24 线 20 炮; b 点, 12 线 20 炮; c 点, 24 线 10 炮; d 点, 12 线 10 炮; e 点, 24 线 5 炮; f 点, 12 线 5 炮。曲线 ace 道密度为 250 道/ $\text{km}^2$ , 曲线 bdf 道密度为 125 道/ $\text{km}^2$ 。细致分析和观察图 5, 不难得如下结论:

(1) 如果固定炮密度, 增加道密度, 地震资料信噪比得到提高。同样, 如果固定道密度, 增加炮密度, 地震资料信噪比也有提高。地震数据采集成本主要由两部分构成: 一是炮井、钻井及炸药成本; 二是放线人工的成本。因此, 选择什么样的炮密度和道密度, 要兼顾这两者。当前者成本大于后者, 如在城镇或地表有坚硬岩石等激发较困难地区, 可通过

增加排列提高道密度来改善资料品质; 当后者成本大于前者, 如在深水等接收条件受限时, 可通过增大炮密度提高资料信噪比。

(2) 同样的覆盖次数如图 5 中 b, c 两点都是 240 次, b 点道密度减半, c 点炮密度减半; d, e 两点覆盖次数都是 120 次, d 点道密度和炮密度均减半, e 点道密度不变, 炮密度是原炮密度的四分之一。由图 5 可见, b 点的信噪比比 c 点高, d 点的信噪比比 e 点高, 即同样的覆盖次数炮密度高的信噪比高于道密度高的剖面。可见炮密度对成像质量的影响比道密度大。笔者比较了 12 线 20 炮和 24 线 10 炮观测系统属性, 两者差异不大, 之所以出现这种现

象, 可从照明分析角度来解释, 炮密度高的采集方法使地下阴影区缩小、亮度增高。

(3) 图 5 中的曲线 ace 中 ac 段曲线比 ce 段平缓, 曲线 bdf 中 bd 段曲线比 df 段平缓, 这意味着随炮密度增加信噪比提高的幅度趋缓。

图 5 中的  $T_2^0$ ,  $T_2^5$  和  $T_3^3$  三层信噪比与炮密度关系曲线相比, 不难发现同样的炮密度和道密度, 深层的信噪比值比浅层低。  $T_3^3$  的曲线比浅层平缓, 意味着随炮密度增加深层信噪比的改善远没有浅层那样明显。深层的信噪比与炮密度关系曲线已开始出现类似覆盖次数那样的拐点, 超过拐点继续增加炮密度或道密度换来的仅是信噪比的微弱改善。另外,

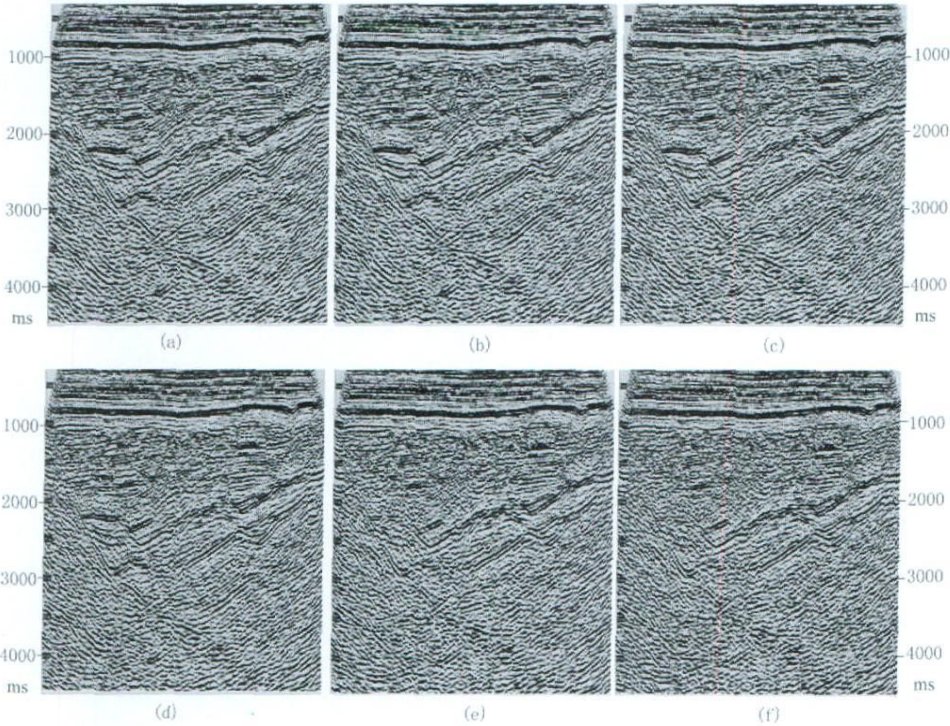


图 4 不同道密度、炮密度数据叠前时间偏移剖面对比

(a) 24 线 20 炮, 覆盖次数为 480 次; (b) 12 线 20 炮, 覆盖次数为 240 次; (c) 24 线 10 炮, 覆盖次数为 240 次; (d) 12 线 10 炮, 覆盖次数为 120 次; (e) 24 线 5 炮, 覆盖次数为 120 次; (f) 12 线 5 炮, 覆盖次数为 60 次

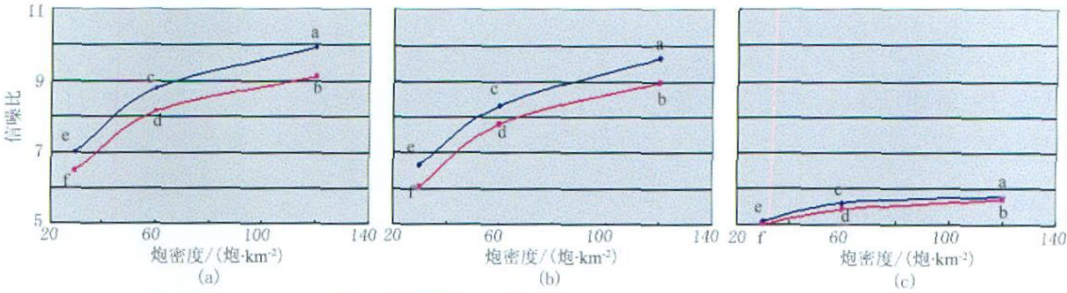


图 5 不同层位信噪比与炮密度关系曲线

(a)  $T_2^0$ ; (b)  $T_2^5$ ; (c)  $T_3^3$  曲线 ace 道密度为 250 道/ $\text{km}^2$ , 曲线 bdf 道密度为 125 道/ $\text{km}^2$



还可看到  $T_2^5$  层虽然比  $T_2^0$  层深, 但其信噪比与炮密度关系曲线的斜率比  $T_2^0$  层大, 原因是  $T_2^5$  层构造形态比  $T_2^0$  层复杂, 如图 2 所示断层多, 还有火成岩侵入。因此,  $T_2^5$  层的拐点值比  $T_2^0$  层大。

产生偏移噪声的原因<sup>[2]</sup>主要有两方面: 一是道密度较小时出现空间假频, 对假频信号的偏移并未准确归位, 而是以偏移噪声的形式出现; 二是现行偏移做法实际上是把反射波按绕射波时距曲线进行校正、叠加后放到绕射极小点, 因此除极小点处叠加增强外, 其余部分本应相干抵消, 但空间采样并非连续, 于是便形成一定的背景噪声, 道密度越小或分布越不均匀, 其噪声越大。

在一个波长范围内有两个以上的道, 就不会产生空间假频。故面元的上限值  $b^*$  为

$$b^* = \frac{\lambda^*}{2} = \frac{v_{\text{int}}}{2f_{\text{max}}} \quad (13)$$

式中:  $v_{\text{int}}$  为层速度;  $f_{\text{max}}$  为最高频率。该式也为理想状态下偏移剖面上的横向分辨率, 如果面元尺寸大于该上限值, 就会产生空间假频。考虑到倾角因素, 当地层倾角大于  $30^\circ$  时, 面元尺寸的上限值为

$$b^* = \frac{v_{\text{int}}}{4f_{\text{max}} \sin \theta} \quad (14)$$

其中  $\theta$  为地层倾角。一旦确定了面元大小  $b$ , 则其最高无混叠频率为

$$F_{\text{max}} = \frac{v_{\text{int}}}{2b} \quad (15)$$

当地层倾角大于  $30^\circ$  时, 其最高无混叠频率变为

$$F_{\text{max}} = \frac{v_{\text{int}}}{4b \sin \theta} \quad (16)$$

由此可见: 面元越小, 其最高无混叠频率越高; 地层越陡, 其最高无混叠频率越小。

地面地震勘探地震波频带是有限的, 高频成分衰减严重。随着炮道密度的增加, 大于最高无混叠频率的频率成分越来越少, 偏移噪声自然越来越小, 因此会出现如图 4 所示的随炮密度增加信噪比提高的幅度趋缓。

同样的炮密度和道密度情况下, 浅层比深层主频高、频带宽, 大于最高无混叠频率的频率成分比深层多, 所以随炮密度增加浅层信噪比的改善比深层明显(图 4)。

综上所述, 炮密度、道密度的选择首先必须与地震勘探频率相适应, 如果不能提高地震波频率, 片面提高炮密度和道密度, 则复杂构造的成像精度和信

噪比提高的幅度可能会不如所愿。

关于勘探目标的大小, 归根到底是横向分辨率的问题。分辨率得不到提高, 目标体上道再多也没意义, 如同为了提高垂向分辨率而采用极小的时间采样间隔也不能增加薄层识别能力一样, 增加再高的道密度并不能提高对小目标体的识别。时间域如此, 空间域也如此。

至于绕射波收敛问题, 从本质上与反射波归位问题是一样的。因为绕射波在反射波和绕射波切点两侧各有正负半支时距曲线, 当按绕射波时距曲线进行校正、叠加时, 正负半支相互抵消; 如果空间采样不对称、均匀, 绕射波收敛就不好。

高密度采样虽有利于提高地表模型的反演精度, 但笔者以为目前解决得不太好的是大、中尺度(长、中波长)分量静校正问题。解决该问题的关键是初至走时的拾取, 高密度采样对此无能为力。高密度采样虽然有利于压制干扰<sup>[4]</sup>, 干扰波不会出现空间假频(仅在单点接收时)。这里干扰波主要指低速干扰波如面波, 这类干扰波与一次反射在速度、能量等方面差异大, 用成熟的处理方法很容易去除。成本高昂的高密度或高精度三维地震中的炮密度和道密度的选择只需确保采集到的来自地下地质体的反射波所有有效频率成分不出现空间假频, 而不应考虑如何得好、得全最终还要去除的干扰波。

## 5 信噪比与采集成本

图 6a 是上文所述五种退化观测系统和原始观测系统(24 线 20 炮)的估算信噪比与估算采集成本的关系曲线, 图 6b 是相应的信噪比与地震道密度的关系曲线。从图中可看出, 从 f 点到 b 点的线段具有很高的正斜率, 这意味着地震道密度从 7.5 万道/ $\text{km}^2$  到 30 万道/ $\text{km}^2$  的成本变化会导致显著的信噪比变化。从 b 点到 a 点线段(地震道密度从 30 万道/ $\text{km}^2$  到 60 万道/ $\text{km}^2$ )具有较低的斜率, 意味着大幅度增加采集成本换来的仅是信噪比的微弱改善。高陡度意味着选择更昂贵的采集方案是合理的, 因为少量追加的成本可换来数据质量的明显改善; 而低陡度意味着选择更廉价的采集方案是合理的, 因为额外追加的成本不能换来数据质量的明显改善。

图 6 中 b 点(12 线 20 炮)与 a 点(24 线 20 炮)相比, 信噪比降低幅度很小(从图 7 对应的叠前偏移

剖面上用肉眼也很难观察到其间差异)。图 8 和图 9 分别是两种采集方法叠前偏移成果数据体的 500, 1500, 2500, 3500ms 水平切片和相干体水平切片, 这两组图中上面一排对应 24 线 20 炮, 下面一排对应

12 线 20 炮。通过对切片效果的对比分析, 可见切片总体变化趋势是一致的, 但 12 线 20 炮的偏移噪声的确比 24 线 20 炮的大, 图像清晰度也比 24 线 20 炮稍低。特别在浅层更加明显, 如图 8 中(  $b_1$  ),

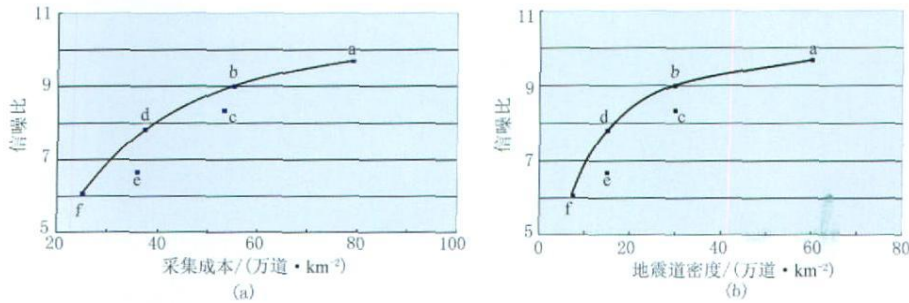


图 6 信噪比与采集成本(a)、地震道密度(b)的关系曲线

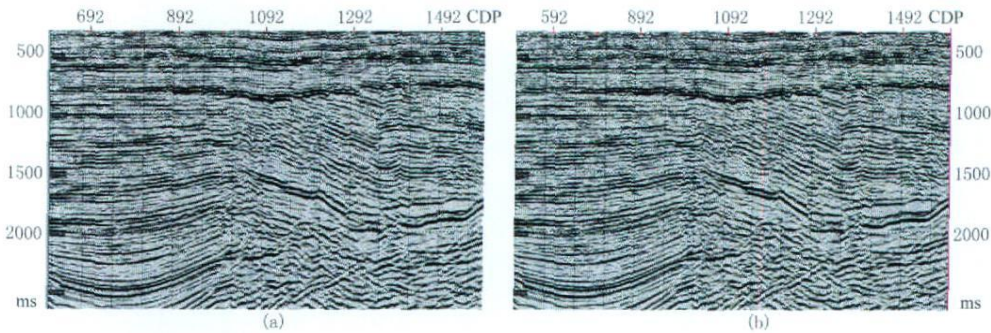


图 7 24 线 20 炮(左)和 12 线 20 炮(右)叠前偏移剖面

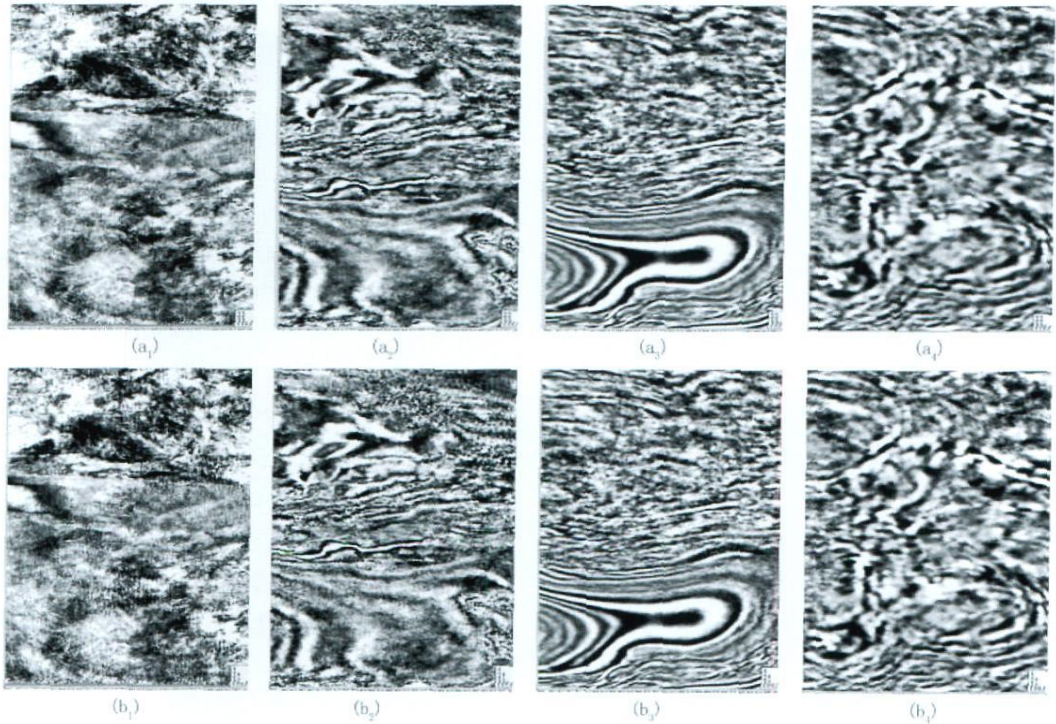


图 8 24 线 20 炮(上)和 12 线 20 炮(下)两种采集方法的叠前偏移剖面水平切片

( $a_1$ )~( $a_4$ )和( $b_1$ )~( $b_4$ )数据体依次为 500, 1500, 2500, 3500ms



(b<sub>2</sub>) 右上方噪声显然比 (a<sub>1</sub>), (a<sub>2</sub>) 强, 图 9 中 (a<sub>1</sub>), (a<sub>2</sub>) 箭头所指小断层在 (b<sub>1</sub>), (b<sub>2</sub>) 中较模糊。

基于该区高精度三维地震勘探成果, 在 T<sub>2</sub><sup>5</sup> 局部构造图 (图 10a) 上红星处部署了一口探井, 该井钻遇近 100m 厚的油层。对这一重大发现起关键作用的是图 10a 上箭头指示的小断层的成功识别。该小断层在 12 线 20 炮 (图 10c) 和 24 线 20 炮 (图 10d) 的叠前偏移剖面上一样清楚, 即使采用 12 线 20 炮的叠前偏移剖面进行高精度三维解释研究, 也不会影响该圈闭的发现, 但采集单价却减少 20 多万元。因此就该圈闭的发现而言, YA 高精度三维采用 12 线路 20 炮的道密度和炮密度似乎较合算。

12 线路 20 炮的地震道密度为 30 万道/km<sup>2</sup>, 如面元为 20m × 20m, 则覆盖次数为 120 次, 如面元为 20m × 40m, 则覆盖次数为 240 次。

当然, 也应看到不同地区乃至同一块三维中不同构造单元所需的道密度和炮密度是不一样的。图 11a 是 24 线 20 炮的叠前偏移剖面, 图 11b 是同一位置处 24 线 20 炮与 12 线 20 炮两种采集方法的互相关剖面, 图 11c 是这两种采集方法的叠前偏移数据信噪比差值剖面。从图 11 可以看出, 构造相对简单地区, 两种方法的相关程度很高, 差异较小; 浅层、构造较复杂地区差异较大。因此, 构造复杂区需较高的空间采样密度, 构造相对简单地区空间采样

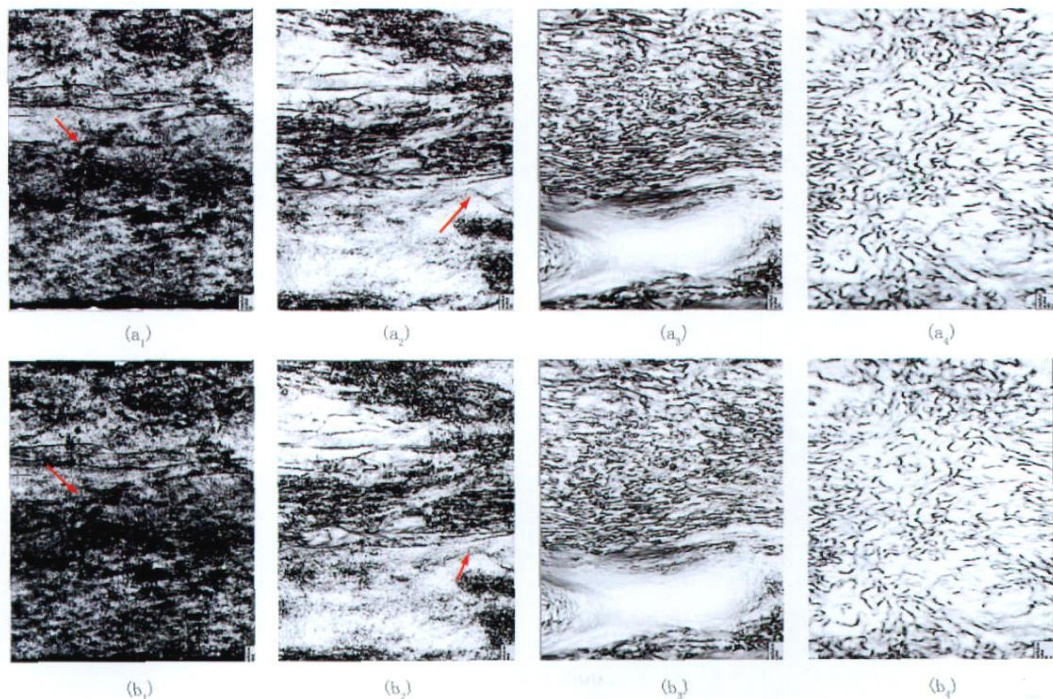


图 9 24 线 20 炮 (上) 和 12 线 20 炮 (下) 两种采集方法的叠前偏移相干体水平切片

(a<sub>1</sub>) ~ (a<sub>4</sub>) 和 (b<sub>1</sub>) ~ (b<sub>4</sub>) 数据体依次为 500, 1500, 2500, 3500ms

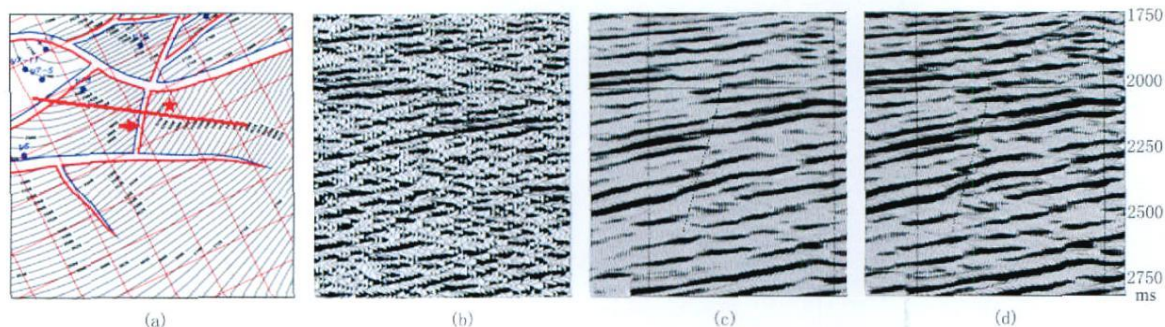


图 10 T<sub>2</sub><sup>5</sup> 局部构造图 (a) 和常规三维 (b)、高精度三维 12 线 20 炮 (c) 及 24 线 20 炮 (d) 的叠前偏移剖面

红线为测线位置



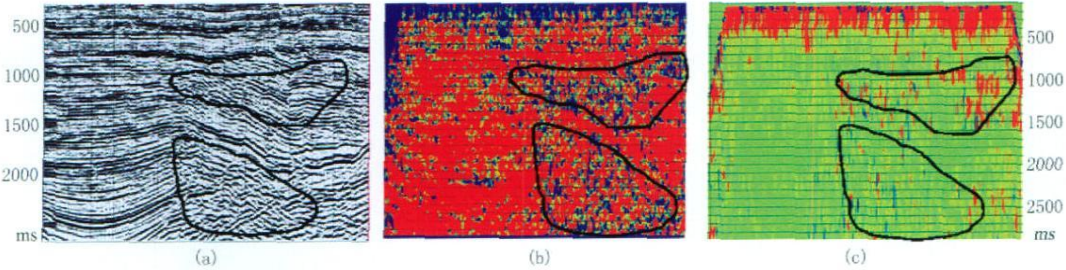


图 11 24 线 20 炮叠前偏移剖面 (a)、两种采集方法的互相关剖面 (b) 及信噪比差值剖面 (c)

密度则可低一些。

6 组合和高分辨率处理对道密度和炮密度的影响

如前所述, 提高地震波频率对于提高复杂地区的成像精度至关重要。在采集方面, 当前提高地震波频率的一项措施就是减小组合基距或者干脆采用单点接收。因为检波器和激发点的组合在压制干扰波的同时也损害了有效波, 尤其是对有效反射波的高频成分损害较大, 这对提高地震资料分辨率极为不利。图 12 是 Y A 地区原始常规三维(组合基距为

40m) 和高精度三维(组合基距为 10m) 同一位置处的地震记录的频谱, 从这两种组合基距的频谱对比中可清楚看到, 小组合基距高精度三维的频带比大组合基距常规三维宽得多。因此, 减小组合基距或者采用单点接收能较大幅度拓宽地震资料频带, 特别是中、浅层效果更明显。其原因一是来自深层的反射波基本上垂直出射地表, 二是大地的吸收导致深层反射波高频成分的严重衰减。应当看到, 检波器不组合或少组合, 一方面会拓宽地震波频带, 另一方面也会使原始地震资料信噪比变得很低(图 13), 这两方面的因素都使得我们必须增加道密度。笔者认为, 在我国东部老区, 处理技术的进步和高覆盖次

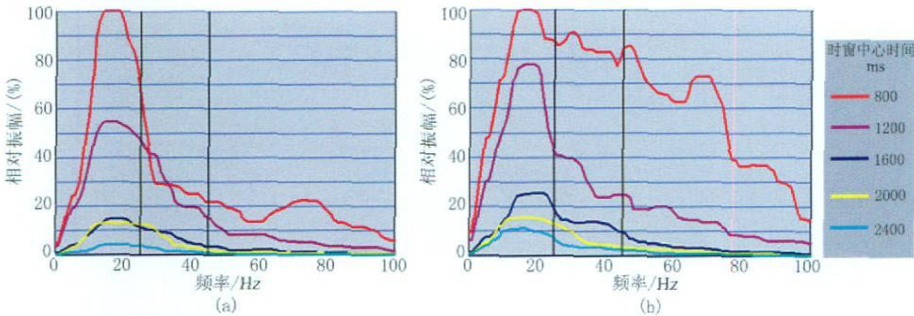


图 12 组合基距分别为 40m(a)和 10m(b)的地震记录频谱对比

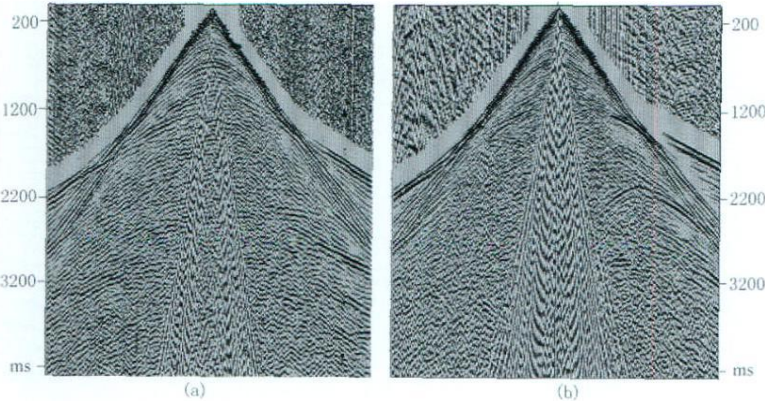


图 13 不同组合基距的原始地震记录对比

(a)40m; (b)10m

数对付随机干扰及视速度低的干扰波远比提高地震资料分辨率容易得多, 因此检波器还是尽量少组合或不组合。

文献[5]指出: 高精度地震采集资料在高频端的信噪比随覆盖次数的增大而提高, 即在高频端随着覆盖次数的增大有效频带得到拓宽。因此, 笔者认为提高分辨率导致信噪比降低可采用高覆盖次数进行补偿。图 14a 为仅采用地表一致性反褶积方法处

理的成果剖面, 其主要频低、频带窄; 图 14b 为综合采用了反 Q 滤波与地表一致性反褶积处理的剖面, 频带得到了拓宽, 成像精度明显提高。因此, 高精度或高密度三维资料处理应以提高分辨率为主旋律, 即进行高频补偿, 尽力拓宽频带。值得注意的是, 我们在选择道密度、炮密度时, 有效频带高频端频率不应来自老资料, 而应关注高精度或高密度三维资料处理究竟能把频带拓宽多少。

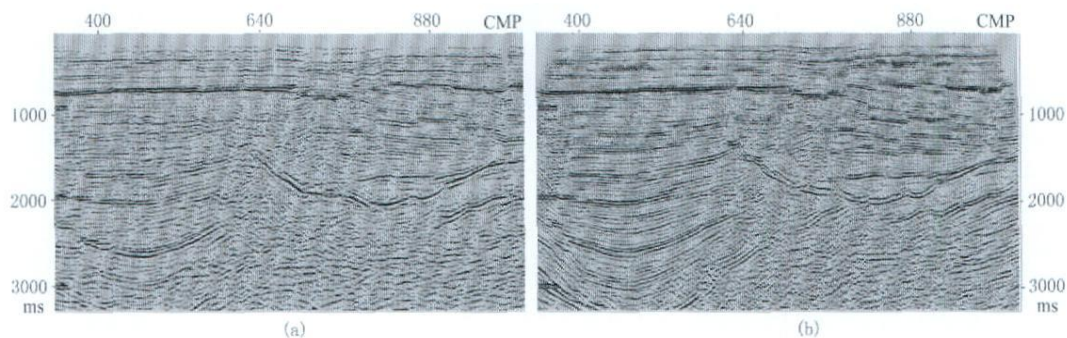


图 14 频带拓宽对偏移成像的影响

(a) 未做拓频处理; (b) 做过拓频处理

## 7 结论

高精度或高密度三维地震勘探技术无疑是解决当前油气勘探所面临的复杂问题的重要的技术对策之一<sup>[6]</sup>, 如勘探开发目标越来越小、越来越复杂, 对地震勘探的精度要求越来越高。通过对 Y A 高精度三维地震勘探实例的应用和研究, 得到以下认识:

(1) 不能靠片面增大炮密度和道密度来提高复杂区地震资料的成像精度, 炮密度和道密度的选择必须同地震频率相匹配; 成像精度和信噪比与炮密度、道密度关系曲线存在一个门槛值, 门槛值内信噪比随炮密度或道密度的增大明显提高, 超过该门槛值, 再增大炮密度或道密度时信噪比仅有微弱改善。

建议做观测系统设计时首先参照邻区高精度或高密度三维评估分析结果初步确定炮密度和道密度, 面元和覆盖次数的选取只需满足炮密度和道密度的要求即可。不要过分强调小面元、高覆盖次数, 这样观测系统设计就有更大的优化空间, 真正体现基于叠前成像的观测系统设计的理念。

(2) 不同地区、不同深度目标区的炮密度和道密度的门槛值是不一样的, 构造相对简单地区的门槛值较小, 构造复杂地区的门槛值较大; 目标层浅门槛

值较大, 目标层深门槛值较小。因此, 有必要分区块选择炮密度或道密度; 为保证施工效率, 宜优先分区块选取炮密度。

(3) 减小组合基距或采用单点接收和高分辨率处理可拓宽有效波频带, 但会弱化压制干扰波的能力; 这两方面因素促使炮密度和道密度应相应提高。

最后, 向为本文提供部分分析图件的庞全康高级工程师、曾强工程师等同事表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 曲寿利. 高密度三维地震技术——老油区二次勘探的关键技术之一. 石油物探, 2006, 45(6): 557~562
- [2] 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
- [3] 熊翥. 高精度三维地震(1): 数据采集. 勘探地球物理进展, 2009, 32(1): 1~11
- [4] 张永刚等. 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
- [5] 王海等. 观测系统对高密度地震采集资料的影响. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 131~135
- [6] 赵殿栋. 高精度地震勘探技术发展回顾与展望. 石油物探, 2009, 48(5): 425~435
- [7] Schroeder F W 等著; 高林译. 覆盖次数和面元尺寸怎样影响数据可解释性. 石油物探译丛, 1999, (1): 19~32

(本文编辑: 朱汉东)



## 作者介绍

倪宇东 高级工程师, 1970 年生; 1992 年本科毕业于中国地质大学(武汉)应用地球物理专业, 1998 年获得中国地质大学(北京)煤田及构造地质专业硕士学位; 先后从事石油地质研究及地震采集方法研究工作; 现任东方地球物理公司采集技术支持部总工程师, 同时为中国地质大学(武汉)地球科学与空间信息学院固体地球物理专业博士研究生。

李卫忠 教授级高级工程师, 1966 年生; 1990 年本科毕业于石油大学(华东)地球物理勘查专业, 1998 年毕业于同济大学应用地球物理专业, 获硕士学位, 现在同济大学攻读博士学位。长期从事石油天然气勘探方法研究与海外勘探项目管理等工作。

潘树林 讲师, 1979 年生; 2008 年毕业于成都理工大学, 获得地球探测与信息技术专业博士学位。主要从事多波静校正和去噪方法的研究工作, 已公开发表论文 20 余篇。目前在西南石油大学资源与环境学院从事与地震勘探相关的教学和科研工作。

裴正林 副研究员, 博士, 1962 年生; 1984 年毕业于西安地质学院物探专业, 2000 年获中国地质大学(北京)应用地球物理专业博士学位, 2000~2003 年在中国石油大学(北京)从事博士后研究, 现主要从事地震波传播及数值模拟、油藏地球物理与储层流体识别、地震反演与井间地震层析成像、基于波动方程照明的地震采集参数优化论证、小波及非线性反演的理论与方法研究及其应用软件研发等领域的研究工作。曾获省部级一等奖 1 项、二等奖 1 项、三等奖 2 项, 合著 1 部专著, 发表论文 60 余篇(其中被 SCI、EI 收录 16 篇)。

韩令贺 1987 年生; 2008 年获中国海洋大学工学学士学位, 目前在中国海洋大学攻读地球探测与信息技术专业硕士学位, 主要从事地震数值模拟及偏移成像方法研究。

狄帮让 中国石油大学(北京)教授, 博士, 1961 年生; 现任中国石油天然气集团公司物探重点实验室常务副主任, 主要从事地震采集、地震物理模型和地球物理仪器的研究工作, 承担完成国家、中国天然气集团公司基础性研究项目、中国石油天然气集团国际合作项目多项, 获国家科技进步二等奖 2 项, 省部级科技进步一等奖 4 项、二等奖 2 项, 授权发明专利 5 项, 发表论文 40 余篇。

杨宁 博士研究生, 1981 年生; 2002 年毕业于上海金融学院; 2008 年毕业于成都理工大学, 获硕士学位; 现在成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室从事地震正、反演方法以及各项异性研究。

邵广周 讲师, 1977 年生; 2003 年获长安大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 现为在职博士研究生。主要从事面波地震勘探与地球物理信号处理方面的研究。

薛花 1985 年生; 2008 年毕业于长江大学, 获学士学位, 现为成都理工大学地球探测与信息技术专业在读硕士研究生, 主要从事波动方程偏移成像方面的研究。

罗国安 教授级高级工程师, 1960 年生; 1982 年毕业于复旦大学物理系物理学专业, 获理学学士学位, 1996 年毕业于中国石油大学勘探地球物理专业, 获工学硕士学位; 现在东方地球物理公司物探技术研究中心从事地震信号分析与处理方法研究、应用软件开发和技术管理工作。

刘小龙 博士, 1983 生; 现为中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业博士研究生, 主要从事地震储层预测与层序地层学研究。

熊定钰 工程师, 1972 生; 1998 年毕业于中国石油大学(华东)物探专业, 获学士学位。目前在东方地球物理公司从事物探技术研究工作。

高少武 高级工程师, 东方地球物理公司科技带头人, 1965 年生; 1986 年毕业于西安地质学院, 获学士学位, 1995 年毕业于成都理

工学院, 获硕士学位。在各种国际、国内会议和杂志上发表论文 20 余篇, 获国家专利局授权发明专利 2 个, 受理发明专利 8 个。现在东方地球物理公司物探技术研究中心从事物探处理方法研究与软件开发工作, 并在成都理工大学攻读博士学位。

李国发 副教授, 博士, 1966 生; 1987 年毕业于长春地质学院应用地球物理系, 1989~2002 年, 在大港油田地球物理勘探公司工作, 曾任油田公司地震勘探首席专家、地球物理勘探公司副总工程师等技术职务, 2003 年~2004 年, 在中国矿业大学(北京)从事博士后阶段研究工作, 2005 年起在中国石油大学(北京)资源与信息学院从事地震勘探教学与科研工作, 研究方向为高分辨率地震资料处理和复杂构造地震成像。

刘兰锋 博士研究生, 1979 年生; 2001 年毕业于中国石油大学(华东)应用地球物理专业, 获学士学位, 2005 年毕业于中国石油勘探开发研究院地球探测与信息技术专业, 获硕士学位, 现为中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为分频 AVO 理论及流体预测。

王健 1985 年生; 2007 年获中国石油大学(华东)资源勘查工程专业学士学位, 现在该校地球资源与信息学院攻读博士学位, 主要从事含油气盆地层序地层学、沉积学及储层地质学研究。

王雷 助理工程师, 1985 年生; 2009 年毕业于吉林大学应用地球物理专业, 获学士学位; 现在东方地球物理公司研究院地质研究中心从事地震资料解释和油气储层预测工作。

陈波 博士, 1971 生; 1993 年毕业于石油大学(华东), 获学士学位; 1996 年毕业于石油大学(北京), 获硕士学位; 2005 年毕业于中国矿业大学(北京), 获博士学位。现主要从事油田地质勘探开发工作。

强敏 助理工程师, 1982 年生; 2005 年毕业于西南石油学院勘查技术与工程专业, 获学士学位; 现在东方地球物理公司研究院长庆分院主要从事 AVO 研究、叠前储层描述、多波地震资料解释及地质综合研究工作。

郑元满 博士研究生, 1979 年生; 2001 年毕业于中国地质大学(北京)电子与信息技术专业, 获工学学士学位, 2004 年毕业于中国地质大学(北京)计算机应用技术专业, 获工学硕士学位, 现为中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业博士研究生, 主要从事重磁数据处理方法研究及其反演软件设计与研发。

胡少华 高级工程师, 东方地球物理公司专家。1989 年毕业于长春地质学院岩石学专业, 获得硕士学位。长期从事复杂构造带的油气勘探工作, 曾获中油集团技术进步二等奖、傅承义青年科技奖、中国优秀工程咨询项目一等奖、东方地球物理公司技术进步一等奖等奖项, 现在东方地球物理公司研究院地研中心从事油气综合评价工作。

曾琴琴 1982 年生; 2006 年毕业于中国地质大学(武汉)应用地球物理学专业, 现为该专业博士研究生, 主要研究方向为位场数据处理及综合解释。

张军华 博士, 教授, 1965 年生; 1987 年本科毕业于华东石油学院物探专业, 1995 年和 2002 年先后获石油大学(华东)应用地球物理专业硕士学位和地球探测与信息技术博士学位; 一直致力于地震资料处理和解释方法研究; 编著《地震数据处理方法》和《地震属性分析技术》等专著, 在专业期刊及会议上发表论文 50 篇; 现在中国石油大学(华东)地球资源与信息学院从事物探专业教研工作。

屠世杰 高级工程师, 1961 年生; 1983 年毕业于华东石油学院物探专业, 1991 年获石油大学(北京)应用地球物理专业硕士学位; 主要从事地震反演、叠前偏移和转换波勘探等领域的技术研究及应用工作; 现在江苏油田物探技术研究院从事地震采集方法和叠前地震反演方面的研究。

has software flexibility, application of this technology could greatly raise the computing speed, (5): Constrained by power consumption and traditional Integrated Circuit Technology, there is significant limitation for single CPU performance improvements, developing new materials and improving computer's package structure become the new ways for raising computer's performance, there should be good future for some developments, such as Avalanche Photoelectric Diode (APD) Silicon photonic devices, memory+ CPU MCP package structure, (6): Cloud Computing is a totally new mode of data-intensive supercomputing mode which is based on distribution computing, parallel computing and grid computing, the technology will have a good application prospect in high performance computing for vast amount of data. (7): The raising of the computing performance depends on integrated development of hardware and software, compared with fast development in hardware, the development and application of software were left behind, as a result greatly developing the software industry is the only way to solve the above problems.

**Key words:** high performance calculation, GPU (Graphic Processing Unit), FPGAs (Field Programmable Gate Arrays), cloud computing, high density exploration, prestack depth migration, full waveform inversion

1. Faculty of Geo-resources and Information, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 266555, China

2. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company of Sinopec, Dongying City, Shandong Province, 257022, China

**Selection of shot density and trace density in high precision 3D seismic exploration - a high precision 3D exploration case in YA area. Tu Shi-jie<sup>1</sup>. *OGP*, 2010, 45(6): 926~ 935**

When comparing acquisition parameters in routine seismic exploration, such as fold, bin size and so on, discussion on the influence of shot den-

sity and trace density to prestack imaging in high density 3D seismic acquisition design seems more important. Base on the derived relationship between shot density/trace density and bin/ folds, and by comparison and analysis of prestack migration effects, signal to noise ratio and acquisition cost between high precision 3D geometry design in YA area and its 5 degradation designs, the following conclusions were obtained in this paper: (1). As the bandwidth of the seismic data is limited, a threshold exists for relationship curve of prestack effect, shot density and trace density, under the threshold the signal to noise ratio increases with the shot density and trace density, however over the threshold, the signal to noise ratio only could improve a little bit if increasing shot density and trace density. (2). For different areas and targets buried in different depth there are different thresholds, the more complicated the areas are, the bigger the thresholds will be, and the shallower the targets are, the bigger the thresholds will be. Therefore selection of the shot density and trace density in high precision 3d needs to match the structural complexity and seismic exploration bandwidth, that should be determined with priority. It will be ok if the selected bin and fold could meet the need of the shot density and trace density. Decreasing interval of geophones or adopting single receiver acquisition and high resolution processing could expand frequency bandwidth, the two measures could raise the shot density and trace density accordingly, no need to pay much attention to the small bin and high fold so that the acquisition parameters could have bigger optimization space, the idea of designing the geometry based on the prestack imaging can be truly reflected.

**Key words:** high precision 3D, high density 3D, shot density, trace density, geometry design, bin size, fold

1. Geophysical Technology Research Institute, Jiangsu Oilfield Branch of Sinopec, Nanjing City, Jiangsu Province, 210046, China