

第一章 问题的提出

提高地震数据空间采样的密度,对提高地震勘探的能力和精度,有重要的实际意义。当今把这顶技术的推广应用,提到重要的议事日程上,主要基于以下原因:

(1)随着勘探程度的提高,油气地质勘探的目标越来越复杂,精度要求越来越高,迫切要求通过提高空间的采样率,来提高地震勘探的能力和精度。

(2)当前,地震数据采集的纵、横向采样率是不匹配的。纵向时间采样间隔通常为 2ms 和 1ms,甚至可达 0.5ms,而横向空间采样间隔一般为 50m,这种采样率不匹配的现象,影响到地震数据处理中分辨率、信噪比和保真度的提高效果,制约了地震信号成像的精度。

(3)伴随着单点检波器接收技术、可控震源的交替扫描技术、数字检波器的应用以及万道地震仪的出现,形成了小空间采样、单点接收、高覆盖次数的提高数据品质的采集、处理技术系列;同时也为推广应用高密度空间采样技术创造了条件,打下了坚实的基础。

(4)国外发展了以 Q-Land 技术为代表的十分有效的油气勘探技术,各大地球物理公司均有自己相应的品牌技术。为了提高市场的竞争力,我们必须发展适应我国实际情况的和有效的具有竞争力的实用技术——高密度空间采样技术。

当前,地震数据采集技术发展的主要趋势是:

(1)数字检波器、数以万道的地震仪的研制与开发,一方面标志着要进入全数字化、信息化的时代,另一方面促进了信号采集的宽频带、高保真和环保、现代可控震源等技术的发展;

(2)在有条件的地区,大力推广应用三维宽方位高密度观测,提高地震信号成像能力;

(3)采用高密度空间采样,提高地震成像精度;

(4)推广应用多波多分量矢量观测技术,提高地震储层描述的能力;

(5)消除表层不均匀和吸收衰减的影响等。

由此可见,发展和推广应用高密度空间采样技术,是适应当前采集技术



发展的需求,其目的是提高地震勘探技术的精度。当前,地震勘探技术的精度,主要指地震信号三维成像(特别是三维叠前成像)的精度,也就是地震信号成像在信噪比、分辨率、保真度等三个方面所能达到的指标。为了达到预期的精度目标,从采集、处理、解释三个环节上去分析,就会发现对数据采样密度均有相应的要求,如果空间采样密度不够,后续工作即使加倍努力,也很难实现其目标,因此,足够的空间采样密度,是提高地震勘探技术能力和精度的重要基础。



第二章 高密度空间采样技术 的地球物理含义

地震数据采样密度一直以时间方向和空间方向来分别衡量,时间方向上称为采样间隔,空间方向上为道距(2D)和面元大小(3D)。采样间隔大小应按采样定律来确定。即一个连续信号经离散采样以后,可根据离散采样以后的数值来恢复连续信号的信息,波形不致失真。这就要求在每个频率的周期范围内,至少有两个采样点。在时间方向上称为奈奎斯特采样定律。

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2-1)$$

式中, Δt 为采样间隔,ms; $f_{\max}$ 为信号中最高频率成分,又称为奈奎斯特采样频率,Hz。

当根据式(2-1)采用等号的方式确定了采样间隔 Δt 的大小,进行采样,如果原信号中包含有高于 $f_{\max}$ 的频率成分,会发生什么情况呢? 大于 $f_{\max}$ 的频率成分将以 $f_{\max}$ 为基点折叠到 $0 \sim f_{\max}$ 的区间范围内,叠合在相对应的频率上,这种频率成分称为假频,这个现象称为混叠。假频一旦产生,是无法通过处理把它去掉的,也就是说它是一种无法消除的干扰。因此在离散采样之前,要进行去假频滤波,即滤掉高于由于采样间隔确定的奈奎斯特频率的频率成分。

把奈奎斯特采样定律用到空间方向上,那就是最少要保障地震信号在每个频率成分的波长范围内至少有 2 个以上的采样,即

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{2} = \frac{v_{\text{int}}}{2f_{\max}} = \frac{1}{2k} \quad (2-2)$$

式中, Δx 为道距; $f_{\max}$ 为信号中的最高频率成分; λ 为其相应的地震信号的波长; v_{int} 为目的层的层速度; k 为波传播方向的波数。在三维观测时,对平面空间两个方向(x, y)均应有上述要求, Δy 的选择也要按式(2-2)来确定。

按连续信号离散采样定理,来确定采样密度,是高密度空间采样技术的最低标准;也就是说,按采样定理确定的采样间隔,可以保障连续模拟信号

离散采样以后,能恢复出连续信号特征,是常规地震勘探方法确定采样间隔的一般准则。由于高密度空间采样技术所要达到的目标,超越了常规地震勘探技术所要达到的目标,因此这个标准还不适应高密度空间采样技术的要求,还需要从其他方面加以论证,但符合采样定理的要求,是所有其他分析的基础。

第一节 分辨率与采样密度

地震勘探的分辨率,通常也是从时间方向上和空间方向上来考虑,前者常称为垂向(纵向)分辨率,后者称为横向分辨率,或者水平方向上的分辨率,以示与空间分辨率之区别。

垂向分辨率通常定义为四分之一主波长,这是由两个相同信号叠加时是否能分开而得出来的,具体的表达式可写为

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4} = \frac{v_{\text{int}}}{4f_{\text{dom}}} \quad (2-3)$$

式中, Δh 为可分辨的地层厚度; v_{int} 为相应地层的层速度; f_{dom} 为地震信号的主频; λ 为相应的波长。

横向分辨率通常定义为第一菲涅尔带的宽度,采用下式表达:

$$R = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t_0}{f_{\text{dom}}}} \quad (2-4)$$

式中, R 为第一菲涅尔带的半径; v 为平均速度; t_0 为双程垂直反射时间; f_{dom} 为目的层反射信号主频。

在式(2-3)和式(2-4)中,没有直接展示分辨率与采样密度之间的关系,也就是说在这两个式子中没有包含 Δt 和 Δx 之类的参数,但是都展示出与频率的直接关系,频率越高,分辨率越高。为了保护高频成分能有效接收到,必须有一定的采样密度作保障,这在式(2-1)和式(2-2)中得到展示。

从数学上讲,分辨率是有量纲的,应追求最高的分辨率或最大的分辨率(存在最大值)。但在勘探家的眼光里,分辨率是没有量纲的,如能分辨几米的薄层,这实际上是一种分辨能力,或称“分辨力”,追求的是最小值,而不是最大值。

第二节 成像精度与采样密度

提高地震勘探的能力与精度,最终都归结到地震偏移成像的精度。图2-1展示出地震采样密度与偏移成像精度之间的关系,即使采样均匀,但由于密度不够,也会生成较强的背景,即偏移噪声(钱荣钧,2007)。

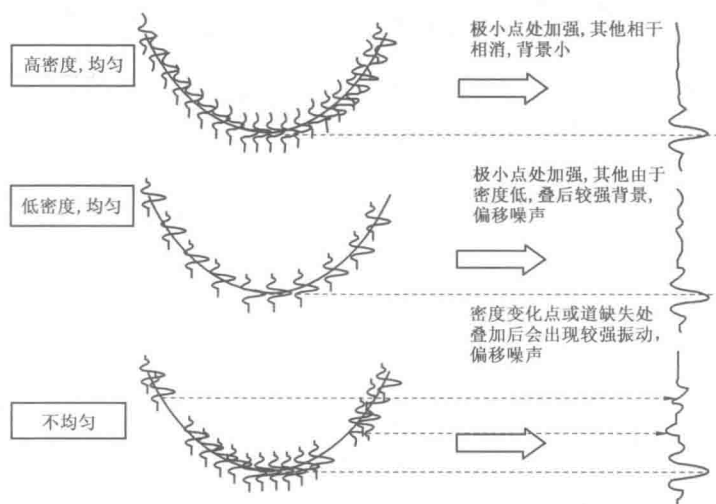


图2-1 道密度和均匀性与偏移成像效果分析示意图(据钱荣钧,2007)

图2-2展示的是不同道距(采样密度不同)理论合成数据的偏移效果,随着道距的增大,绕射收敛和断面波归位不好,偏移噪声加重。图2-3展示的是不同炮线距的偏移效果,可得到与图2-2相同的分析结论。由此可见,偏移成像效果与采样密度有着紧密的关系。

第三节 信噪比与采样密度

当前,压制噪声提高信噪比的处理效果,除了叠加就应属多道处理方法。只要是多道处理模型,大多都会有道间距这一参数,而且一般规则是,道间距越小,噪声压制效果越好。图2-4展示的是不同道距(5m, 10m, 20m, 40m)的炮记录,同一类型的干扰波在不同道距上表现形式有差异。图2-5是与图2-4相对应的 $f-k$ 谱,随着道距的增大,低速干扰折叠现象严重,对压制其低速干扰十分不利。

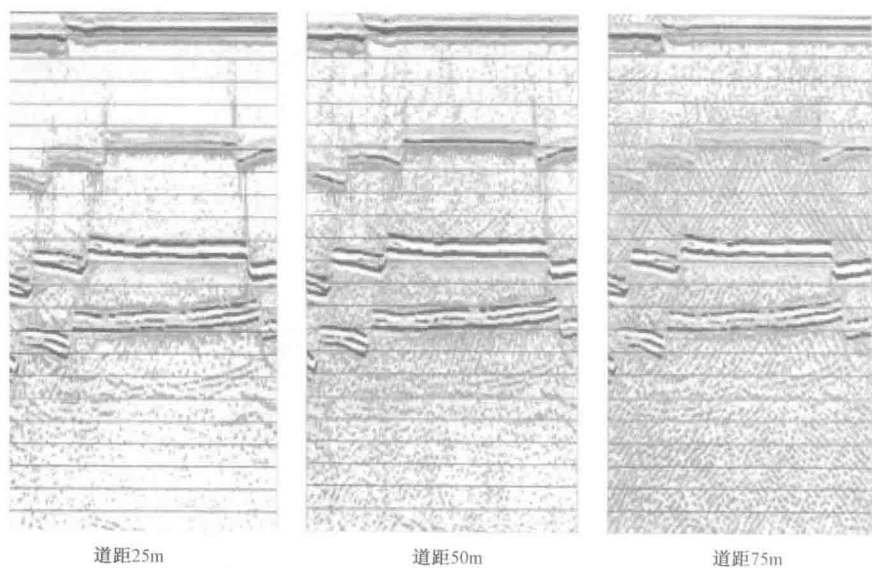


图 2-2 不同道距偏移剖面对比

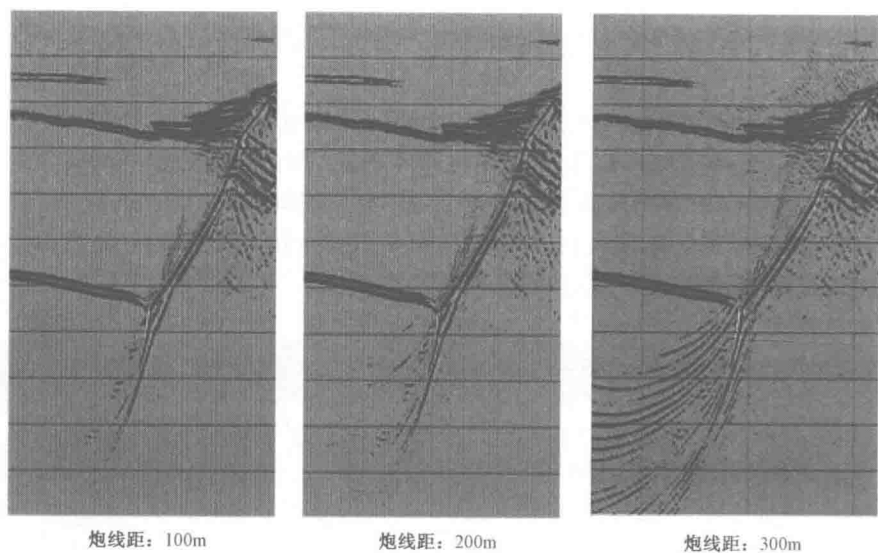


图 2-3 不同炮线距偏移剖面对比

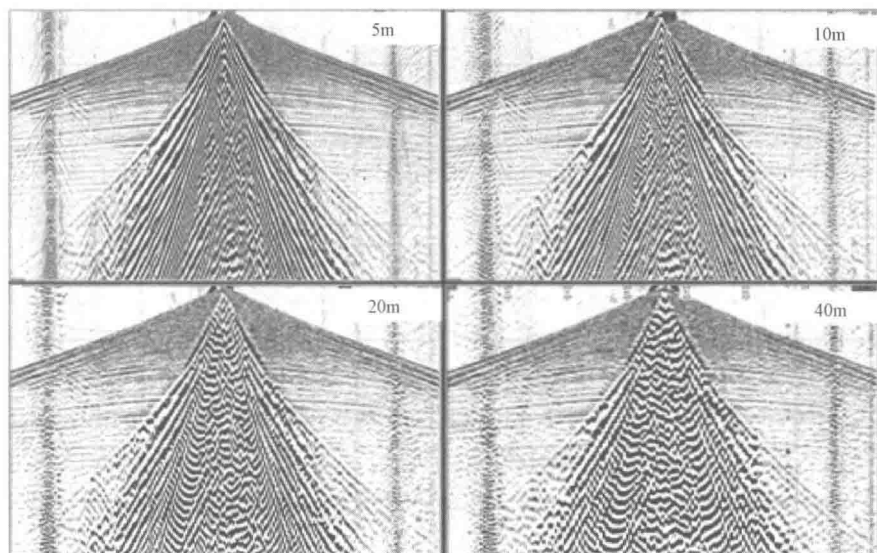


图 2-4 不同道距的炮记录(干扰波表现形式有差异)

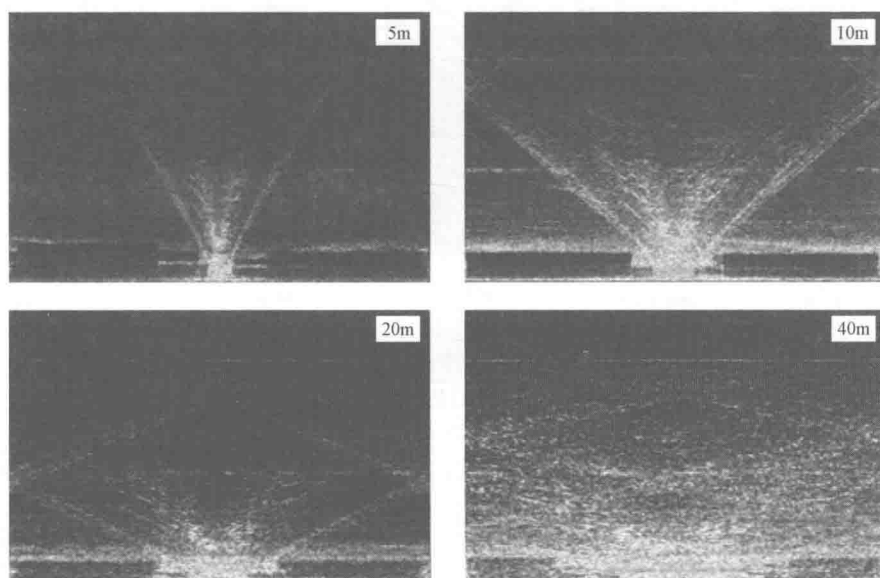


图 2-5 相应的 $f-k$ 谱(随道距增大,低速干扰折叠严重,对压噪不利)



第四节 信号保真与采样密度

信号的保真,涉及信号的振幅、频率、相位特性的保持。理论上讲,如果不能实现三维空间完全充分采样,对于地下一个三维体的成像是很难实现完全保真的,这个问题涉及的面很广,在这里就不进行深入的探讨了。分两步讨论,首先是采集原始数据时是否保真;然后在数据处理时是否能做到保真。很容易发现,无论哪一步都与采样密度相关。其结论是:原始信号采集的保真与数据处理阶段中的信号保真,均以一定的采样密度来作保证;或者说是相对于某种采样密度而言的。图2-6展示的是,不同道距采集时,不同类型的波出现假频的情况,随着道距增加,首先是声波,然后是面波,最后是初至波出现假频。假频的出现,不仅生成了干扰,而且信号失真。干扰波是这样,有效波也是这样。

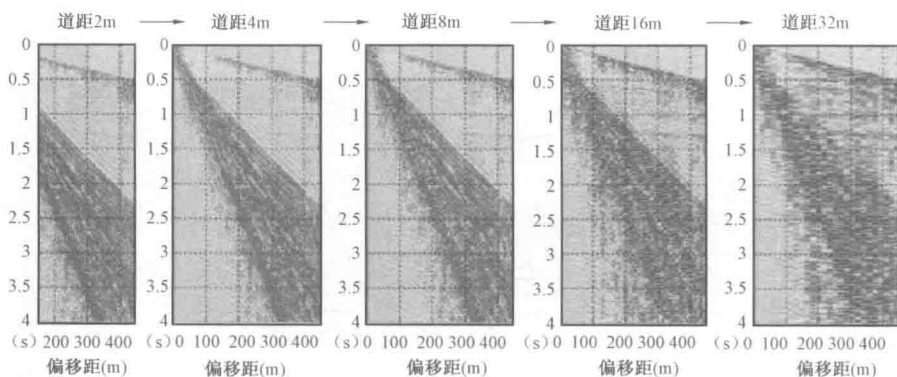


图2-6 道距与原始信号采集时的保真

道距增加时,首先是声波,然后是面波,最后是初至波出现假频

第三章 高密度空间采样对密度的理解与认识

提高采样率,是提高分辨率的重要手段。同时,它也为提高信噪比和信号保真度打下了良好的基础。当前这一技术发展很快,并形成了技术系列。其主要特点是:

(1)减小面元尺度,采用正方形面元,保证空间采样有足够的密度和面元属性的均匀;

(2)仪器接收道数猛增,这为实现高密度空间采样提供了保障,同时也为提高施工效率和减小成本创造了条件。

有代表性的技术系列是:

(1)以 Petroleum Geo - Services 公司(以下简称“PGS 公司”)为代表的海上多方位拖缆和单检拖缆以及 OBC 采集技术;

(2)以 WesterGeco 公司为代表的陆上野外单个检波器高密度接收、室内进行组合分析处理技术,即 Q - Land 技术;

(3)在野外常规多个检波器组合接收技术的基础上,国内采用以缩小面元尺寸、增加覆盖次数为特征的高密度空间采样技术。

当前,这项技术正在大力推广应用、逐渐完善和迅速发展之中,取得了十分明显的勘探效果,有着良好的发展前景。

第一节 高密度是一个相对的概念

任何一项技术的推广价值,都应以其所获得的勘探效果来衡量。由此可以得出,高密度是一个相对的概念,对于同一空间采样密度,评价阶段可能不够,在勘探阶段有可能完全满足其要求;对某一种复杂地质体成像可能不够,对另一种地质体的成像可能就足够了。通常勘探阶段中的高密度,对于油田开发阶段就不是高密度了。图 3 - 1 展示出三个阶段对剖面品质不同程度的需求,反映了对采样密度的不同需求。

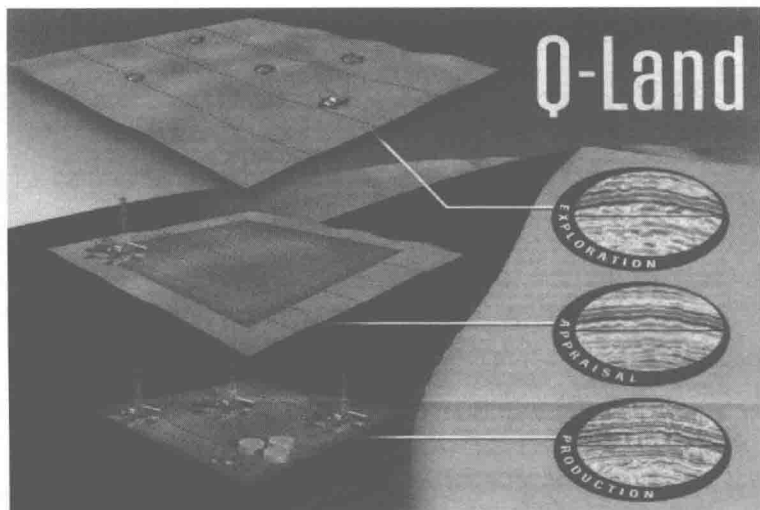


图 3-1 不同阶段对密度有不同的要求

高密度采样的效果应该是肯定的,无需花精力去讨论,更不需要通过高投入的采集来论证是否有效果。当前由于多种因素,存在时空采样不匹配的问题,这无疑对分辨率、信噪比和成像精度产生影响。单点数字检波器接收,国内目前实施还有一定的困难,因此强调的是高密度空间采样,缩小道距和面元的尺度。

第二节 密度应以道密度来衡量

检波点和炮点是平时所说的物理点,在采集设计考虑工作量和施工效率等问题时,可对它进行分开处理,并对其讨论其密度,这是可以进行的。但如果从地震信号叠前偏移成像精度出发,来讨论其观测密度时,就应以一个地震道作为基本单元来计算。一个地震记录道,涉及一个炮点和一个接收点,因此道密度与物理点的密度有着不同的含义,也有其不同的计算方法。高密度空间采样,其密度主要应以道密度来衡量。

道密度应当是每平方千米的记录道数,通常按观测系统以地面作为参考面进行计算,计算公式如下(胡永贵,2007):

$$T_D = \frac{\text{排列片有效面积}(\text{km}^2) \times 10^6}{\text{SL} \times \text{RL} \times \text{SI} \times \text{RI}} \quad (3-1)$$



式中, T_D 为道密度; SL 为炮线距, m; RL 为接收线距, m; SI 为炮点距, m; RI 为接收道距, m。如果在地面上估算, 排列片有效面积就是排列片在地面上覆盖的面积。当前十分强调针对目的层的采集方法设计, 因此排列片的有效面积应考虑大炮检距的切除参数, 减去切掉的炮检距道所对应的面积。由此可见, 对于同一个观测系统, 即同一个排列片, 不同深度目的层的道密度是不相同的, 浅层道密度低, 随着目的层埋藏深度的增加, 道密度逐渐加大, 直到对应最大切除量的深度为止。在这个深度以下, 道密度就是常数, 不再变化。以上是针对切除参数对排列片有效面积的解释, 由于初至破碎带的切除和动校正拉伸畸变带的切除, 用于成像处理的道数减少。

另外一种考虑是从偏移成像的最大炮检距出发来进行计算(胡永贵, 2007)。假设观测系统采用中间放炮对称排列, 炮点位于排列片的中心位置上。以偏移成像最大炮检距为半径画一个圆, 圆与排列片重合的范围内的道数, 为可用于目标体成像的道数, 这个重合的面积就是排列片的有效面积。图 3-2 展示出可能发生的四种情况以及相应的排列片有效面积的计算方法(胡永贵, 2007):

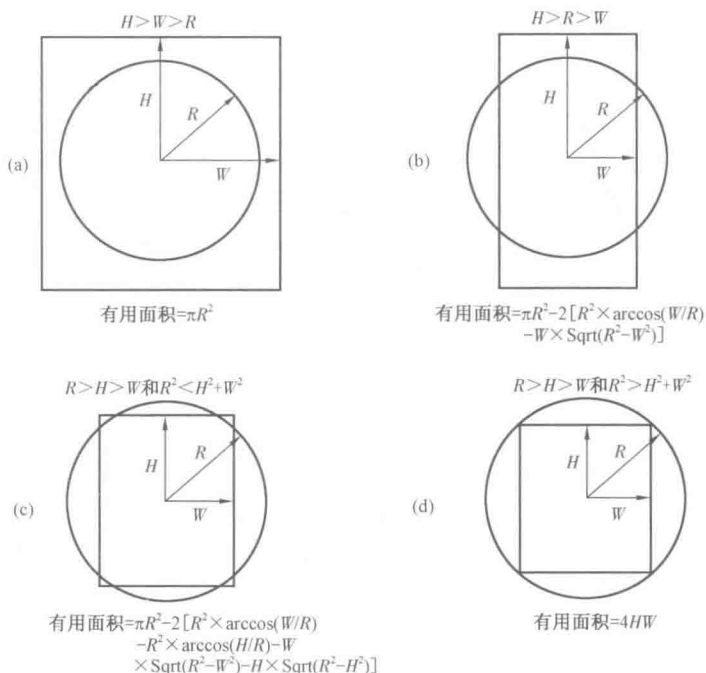


图 3-2 排列片有效面积的计算(据胡永贵, 2007)



(1) 排列片在两个方向都大于最大炮检距,有效面积为圆的面积;

(2) 排列片 inline 方向大于偏移中的有效最大炮检距,有效面积为二者重叠部分;

(3) 排列片 inline 方向最大炮检距略小于偏移时的有效最大炮检距,有效面积为二者重叠部分;

(4) 排列片两个方向都小于偏移时的最大炮检距,有效面积就是排列片面积。

第三节 道密度设计原则

当前,道密度总的设计原则应当是满足叠前偏移成像的需求;综合考虑信号特征分析、噪声压制、信号高频保护以及地震波场的连续性等因素;同时还要兼顾勘探成本以及资源(装备)的合理使用。其次,道密度设计还应考虑勘探目标的复杂程度以及工区地表和地下的地震条件。Norm Cooper (2004)通过理论研究与实际资料的统计分析,认为在三维观测时道密度设计应遵循以下原则:

小于 6000 道/ km^2 ,一般不能采用;

6000 ~ 18000 道/ km^2 ,构造简单、信噪比较高的地区采用;

18000 ~ 25000 道/ km^2 ,岩性解释、信噪比较高的地区采用;

25000 ~ 100000 道/ km^2 ,低 S/N(信噪比)区,随 S/N 降低而增加;

25000 ~ 100000 道/ km^2 ,构造复杂区,随复杂程度增加而增加。

当前,在推广高密度空间采样技术时,对于复杂地区道密度至少应在 10 万道以上,对于地表和地下均非常复杂的地区至少在 20 万道以上。对于油田开发,道密度至少应在现有的基础上增加 4 倍以上(胡永贵,2007)。表 3-1 列举了我国各盆地最近几年实际使用的道密度情况,从所列数据来看,离高密度空间采样还有一段较长的距离。

表 3-1 不同盆地地震勘探道密度统计(道/ km^2)(据胡永贵,2007)

年度	塔里木盆地库车坳陷	塔里木盆地库北隆起	准噶尔盆地东部	准噶尔盆地腹地	准噶尔盆地北缘	吐哈盆地	柴达木盆地	南堡凹陷	黄骅坳陷
2000	93333	35000	40000	10000	40000	110000	40500	68055	47600
2001	65626	33600	10000	13500	24000	32000	69635	93300	134400
2002	70000	67200	42000	28000	32000	65625	65620	93300	84000

续表

年度	塔里木盆地库车坳陷	塔里木盆地库北隆起	准噶尔盆地东部	准噶尔盆地腹地	准噶尔盆地北缘	吐哈盆地	柴达木盆地	南堡凹陷	黄骅坳陷
2003		70000	76000	48000		290000	159285	106900	156800
2004	88800	90000	586000	528000		176000	215925	116600	190400
2005	206250	123750	28800	61600	52800	123200	139611	116600	246400
2006			120000	612600	54000	200000	186180		176000
2007			176800		96000		155000		176000

第四节 提高道密度所生产的效果

前面已经提到,提高道密度有利于信号与噪声特征分析、噪声压制、高频保护和波场采样的连续性。这些都为叠前偏移高精度成像提供了良好的条件。另一方面,提高道密度,可直接对偏移产生效果,减弱偏移噪声,提高成像数据的信噪比与分辨率。图3-3和图3-4采用提高道密度的方法,在我国东部地区取得了明显的勘探效果,构造形态及断层更加清晰,构造细节清楚可靠,浅(时窗0.2~0.9s)、中(时窗1~1.6s)、深(时窗1.7~2.3s)主要目的层向高频端分别提升了25Hz、20Hz和15Hz,分辨率有明显的提高。

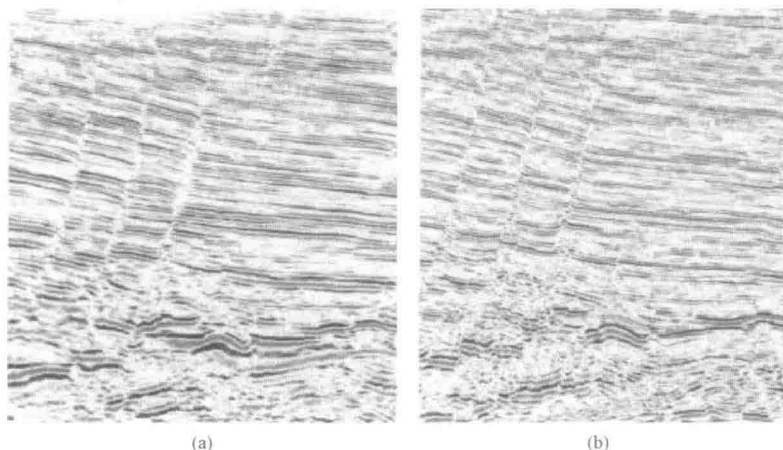


图3-3 常规采集(a)和提高道密度采集(b)效果对比(引自胡永贵,2007)

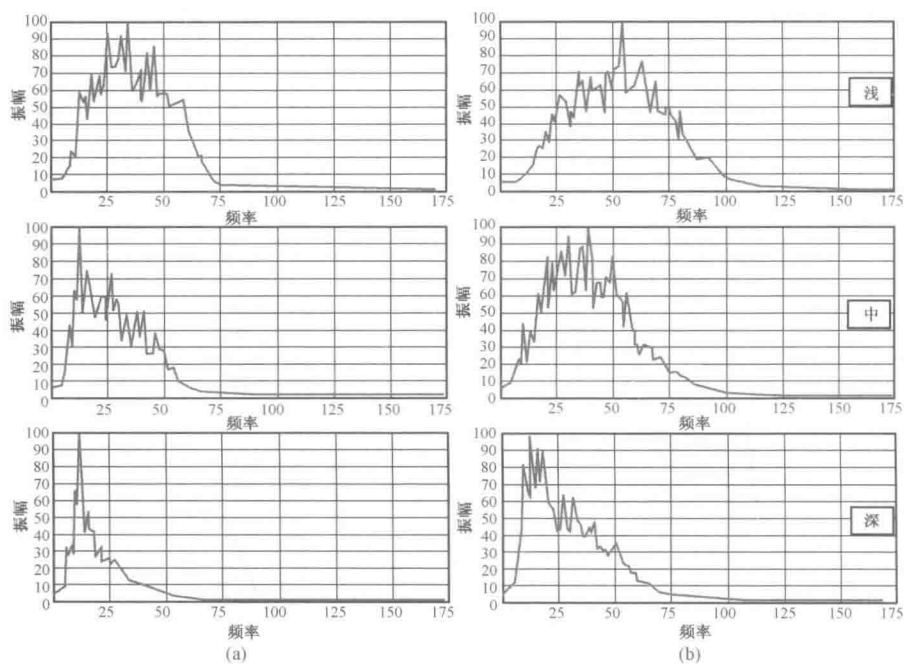


图 3-4 常规采集(a)和提高道密度采集(b)浅中深层频谱对比(引自胡永贵,2007)

第四章 基于叠前偏移成像的 高密度空间采样的 三维观测系统设计

高密度空间采样地震勘探方法的目的是提高三维地震勘探的精度,得到一个高信噪比、高分辨率、高保真的成像数据体。为了实现这一目的,必须从三维观测系统设计开始,提出一些与常规三维观测系统设计有别的基本原则,其最大区别是设计理念要从基于叠加成像和叠后处理,转移到基于叠前偏移成像和叠前处理上来。为此,应遵循以下几项原则(夏建军等,2008)。

第一节 反数据假频

数据假频是由于采样不足产生的。按照奈奎斯特采样定律,高于奈奎斯特频率以上的频率或波数,将折叠在由零到奈奎斯特频率段上,形成干扰,而且无法消除。为此在采集时必须减小道距和炮点距,提高空间的采样密度,从而防止数据假频的产生对数据造成污染。

为了防止有效信号产生空间假频(假波数),至少在一个视波长范围内有两个接收道,道距应满足如下关系:

$$\Delta x \leq \frac{v_{\min}}{2f_{\max}} \quad (4-1)$$

式中, Δx 为道距; $v_{\min}$ 为信号的最小视速度; $f_{\max}$ 为信号的最大视频率。它与前面给出的式(2-2)是完全对应的。

为了防止低速干扰信号产生假频,形成对有效信号的干扰无法消除,按照式(4-1),必须采用很小的道距,其成本必将成倍地增加,使之无法接受。这时,不得不采用小组内距的检波器组合方式,来压制其低速干扰,这时组内距 Δx_p 必须满足下式:

$$\Delta x_p \leq \frac{v_{\min}}{2f_{\max}} \quad (4-2)$$

$$N > \frac{\Delta x}{\Delta x_p}$$

式中, $v_{\min}$ 为干扰波的最小视速度; $f_{\max}$ 为干扰波的最大视频率; N 为检波器组合个数, 不希望组合基距大于道距, 小面积的检波器组合还有压制随机噪声的功能。这也许是当前高密度空间采样技术中, 除了经济投入和装备条件以外, 野外采用小面积组合, 室内进行 DGF 系列处理的重要原因。在我国, 当前还不具备单个检波器单点接收的条件。

第二节 去偏移假频

在讨论数据采集技术发展方向时, 十分强调实现均匀、对称、连续无假频采样。其中连续无假频采样, 主要是指在偏移处理中也不会产生偏移假频。有的文章中, 把偏移假频明确为偏移算子假频, 简称算子假频(夏建军等, 2008), 是为了讨论问题更加方便起见。

以当前应用较多的 Kirchhoff 积分法为例。容易出现假频的情况是: 陡倾角(大偏移孔径)、大幅值的高频能量和稀疏的空间采样。前者是客观存在的, 只能在后者作文章防止假频的产生。反假频的方法就是要缩小偏移波场中的道间距。Kirchhoff 积分法偏移, 一般在共炮检距域实现, 缩小共炮检距剖面的道间距就是缩小面元, 加密空间采样。道间距面元尺度 Δx 和 Δy 大小决定了波数域可能的取值范围, 因此 Δx 和 Δy 的选择必须满足偏移算子, 在最大偏移孔径位置以最大频率成分偏移时, 至少能取到两个样点值, 即

$$\Delta x \leq \frac{v}{4f_{\max} \sin \theta_{\max}^x} \quad (4-3)$$

$$\Delta y \leq \frac{v}{4f_{\max} \sin \theta_{\max}^y}$$

式中, v 为对应最大传播角的均方根速度(介质速度); $f_{\max}$ 为有效信号的最高频率成分; $\theta_{\max}^x$ 和 $\theta_{\max}^y$ 分别为 x 和 y 方向的最大传播角度, 即偏移算法所能用到的最大偏移孔径。

第三节 提高偏移波场的均匀性

提高偏移波场的均匀性,首先取决于输入数据分布的均匀性。Kirchoff 积分法偏移,输入一般为共炮检距剖面。当观测系统设计不合理时,容易产生共炮检距剖面上道的分布不均匀,即不均匀分布的缺道和不等道数的缺道,并将出现周期性的跳跃式变化,如图 4-1 所示。类似于图 4-1a 这种道分布的不均匀性,是完全可以调整观测系统参数来改变的(图 4-1b)。

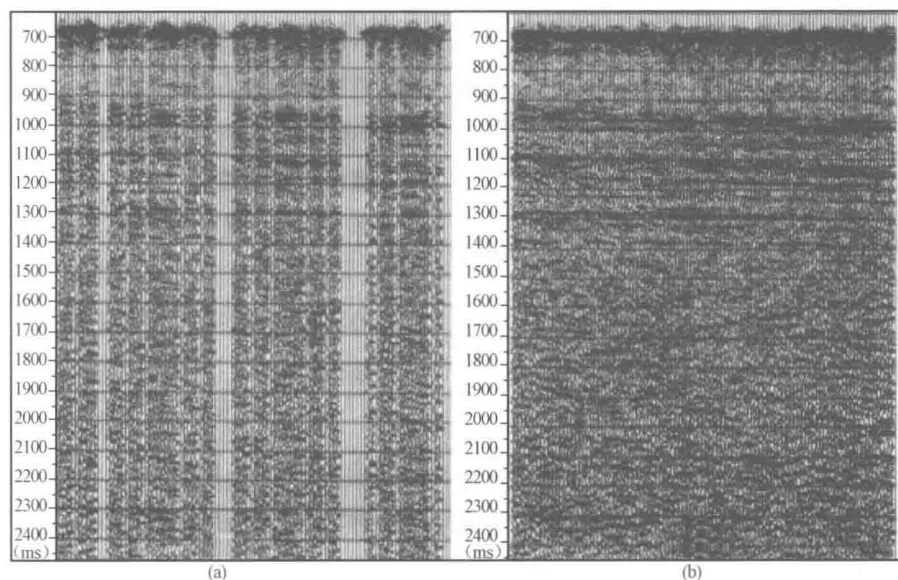


图 4-1 炮线距为 400m(a) 和 200m(b) 的共炮检距剖面(据夏建军等,2008)

改善偏移波场数据均匀性,主要是通过调整接收线距、炮线距以及它们与接收道距和炮线距之间的关系来实现。对于一种确定的观测系统,任意一个面元中的炮检距分布都遵循着某一种规律安置。以正交观测系统为例,其 CMP 面元内的每个地震道的炮检距可用下式表示(夏建军等,2008):

$$x = \sqrt{X_{\min}^2 - 4X_{\min}(mD_s \cos\alpha_0 + nD_r \sin\alpha_0) + 4(m^2 D_s^2 + n^2 D_r^2)} \quad (4-4)$$