

油气地球物理技术 新进展

—— 第 75 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油勘探开发研究院
南京石油物探研究所 编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

油气地球物理技术新进展

——第 75 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国勘探地球物理学家 (SEG) 第 75 届年会论文摘要, 内容包括地震采集技术、偏移成像技术、地震解释技术、实例研究、各向异性、AVO、多波多分量技术、井中及井间地球物理技术、岩石物理、时延地震、近地表地球物理、非地震等专题, 基本上反映了近年来石油物探技术, 尤其是地震勘探技术的最新发展。

本书可供从事地球物理勘探技术研究的专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气地球物理技术新进展: 第 75 届 SEG 年会论文概要/
中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所编.

北京: 石油工业出版社, 2007. 4

ISBN 978-7-5021-6002-9

I. 油…

II. 中…

III. 油气勘探: 地球物理勘探-学术会议-文集

IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 038232 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 21.25

字数: 550 千字 印数: 1—1000 册

定价: 88.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《油气地球物理技术新进展
——第 75 届 SEG 年会论文概要》
编 委 会

主 任：张永刚

副主任：管路平

编 委：赵改善 杨勤勇 曹 辉 朱成宏 严建文
朱海龙 陈 伟 朱文杰 任 鹏

目 录

地震采集技术	蔡 瑞	胡中平	(1)
地震解释技术	郑四连	刘百红	(19)
各向异性研究的新进展	朱成宏		(27)
地震岩石物理研究进展	马中高		(47)
储层描述中的多分量地震技术	黄中玉		(87)
波场正演模拟技术	余德平	李 佩	(97)
地震偏移成像技术研究新进展	潘宏勋	方伍宝	(106)
AVO 技术	薛 冈		(131)
地震反演技术	孙晶梅		(146)
储层特征描述技术进展	严建文	蔡 俩	姜小涛 (166)
地震层析成像新进展综述	张国宝	陈国金	(186)
时延地震新进展	陈 伟	任 鹏	顾石庆 (199)
VSP 技术	陈 林		(218)
实例研究	朱海龙	顾石庆	邵 瑛 (243)
地震速度分析与孔隙压力预测	潘宏勋	叶 勇	孙开峰 (255)
井中地球物理技术	张松扬	刘百红	黄国骞 (275)
井间地球物理技术	张松扬	黄国骞	刘百红 (299)
非地震勘探技术		李智宏	(314)
近地表和环境地球物理研究	朱文杰	葛和旺	(324)

地震采集技术

蔡 瑞 胡中平

一、引言

本届 SEG 年会地震采集技术共设 3 个专题, 其中海洋勘探 2 个专题, 陆地勘探 1 个专题。可控震源技术占陆地专题文章的一半。海上勘探涉及的内容比较广, 包括与采集有关的减少噪声的设备与方法的研制和试验、激发技术、高分辨率地质调查、加密测线采集方法、优化采集设计方法、4D 地震可重复性采集、采集观测系统分析的一体化方法及成本核算等多方面。鉴于海洋地震勘探采集方法对陆地地震勘探也有借鉴作用, 本文从改善资料品质的采集技术、改进的采集设计方法、激发技术与设备研究和优化采集设计评估方法等方面介绍地震采集技术的新进展。

二、改善资料品质的采集技术

1. 高保真可控震源技术

HFVS (高保真可控震源地震) 技术研究已开展多年。1988 年 Allen 等提出了可控震源到地震信号恢复的方法。1998 年 Sallas 等人介绍了 HFVS 采集系统的基本构成和震源分离理论。2000 年 Moldoveanu 等人将 HFVS 方法应用于美国 Delaware 盆地的 VSP 勘探中。

Thomas 等将 HFVS 技术成功地应用于 9 分量 3D 矢量地震勘探中。HFVS 方法是在采集期间同时采集 P , S_1 , S_2 震源分量的可控震源数据, 在处理时进行分离。一个可控震源信号可以成功地分离出 9 个分量记录, 图 1 显示了其中 P 波记录的 HFVS 震源分离图。数据分离质量必须非常高才能满足分量旋转和资料处理的需要。数据分离质量与从同时记录的地震数据中提取的震源分量数据的保真度有关。实例说明, 即使叠加次数很低, 经过初步处理, 也能够恢复 P 和“TT”(转换震源—转换检波器) 波的主要同相轴 (图 2)。该项技术可提高采集效率 3 倍, 节省了时间和经费, 为技术的进一步研究提供保证。

HFVS 技术震源分离的保真度与可控震源相位编码方案的设计有关。好的相位编码设计方案会产生较好的震源分离结果, 继而产生较好的数据质量。Chiu 等讨论了 HFVS 最佳相位编码选择问题, 提出了从一系列模型中确定最佳相位编码方案的一个简单而有效的方法。HFVS 需同时扫描多个可控震源, 才能产生多个可控震源道集。在可控震源排列中, 每一个可控震源在扫描中, 都有惟一的相位旋转编码。在相同震源位置的多次扫描中重复这个过程, 多个可控震源的多次扫描, 产生多个可供选择的相位编码方案。确定最佳相位编码方案的步骤是: 相位编码的合成模拟, 将分开的多个可控震源道集转换成单震源道集, 根据可控震源扫描矩阵的奇异值分析, 从一系列模型中确定最佳相位编码方案 (图 3 和图 4), 将合成模型的相位解码方案应用于实际资料的检验 (图 5) 等。

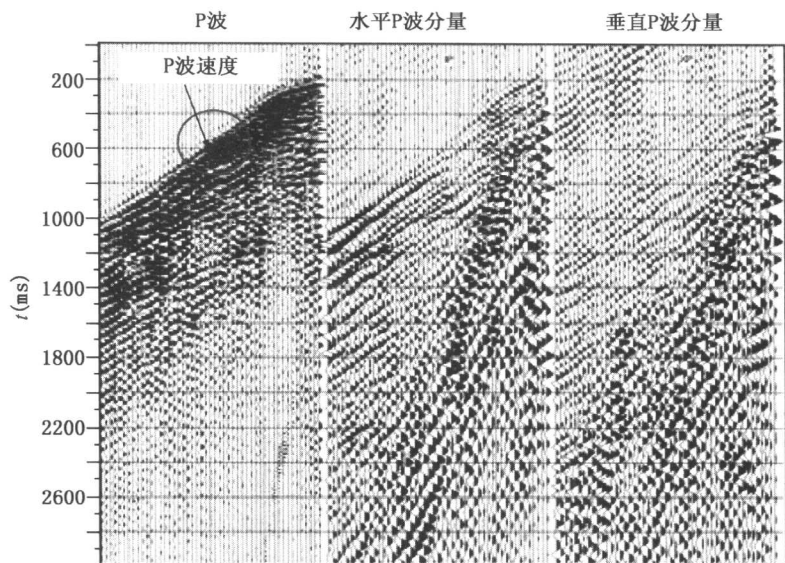


图1 P波检波器 HFVS 震源分离图

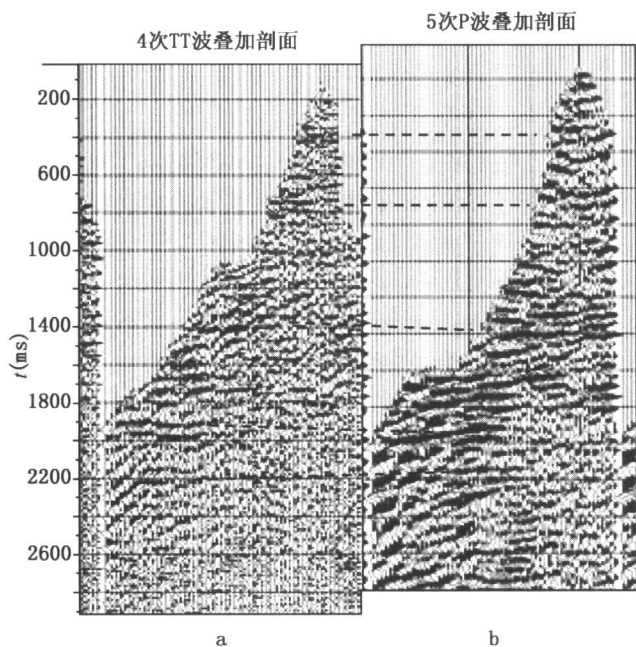


图2 TT波(a)与P波(b)叠加剖面比较

图3和图4显示了2个合成模拟结果。二者比较,模型2的相位编码方案好于模型1。模型1的震源分离有重复的奇异值,如第二和第三个奇异值有相同的大小(图3d)。奇异值的重复就暗示着可控震源中的2个有很强相关性。在这种情况下没有惟一的震源分离,这2个可控震源的解是它们线性组合的最小平方估计。在此条件下,数据噪声在矩阵求逆中会引起相当大的变化。与此相反,模型2有4个截然不同的奇异值和较低的条件数(图4d),因而有更稳定的解,对所有的4个震源能产生惟一的震源分离结果。

图5b的信噪比和主要同相轴的连续性要好于图5a。4个截然不同的奇异值和较低的条件数(图5d)证实,应用模型2的相位编码方案有最

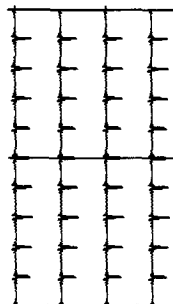
稳定的震源分离结果。合成模拟的可控震源扫描矩阵奇异值图(图3d和图4d)与从可控震源野外记录得到的奇异值图(图5c和图5d)有非常好的相关性。

最终的研究结果表明,震源分离的奇异值分析和转换的应用,在用一系列模型确定最佳相位编码方案中是非常有效的。有限的野外数据也支持合成模拟得出的最佳相位编码方案,

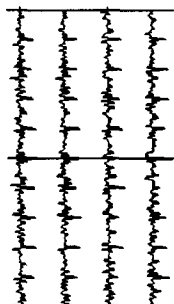
模型1

扫描	可控震源1	可控震源2	可控震源3	可控震源4
1	90	0	0	0
2	180	90	180	180
3	180	0	90	180
4	180	0	0	90

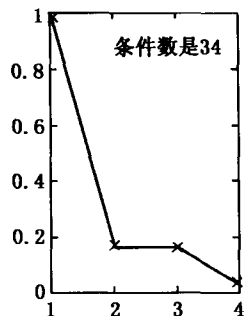
a



b



c



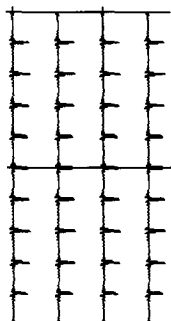
d

图3 合成模型1的相位编码方案(a);模拟结果(b);
信噪比为1:2的转换结果(c);可控震源扫描矩阵的奇异值图(d)

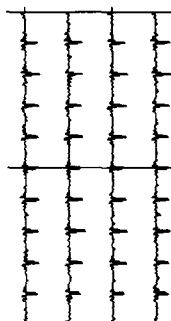
模型2

扫描	可控震源1	可控震源2	可控震源3	可控震源4
1	90	64	167	283
2	64	90	283	167
3	167	283	90	64
4	283	167	64	90

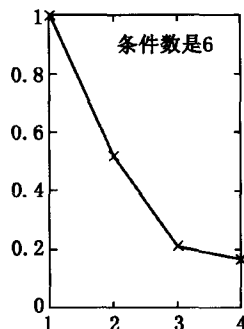
a



b



c



d

图4 合成模型2的相位编码方案(a);模拟结果(b);
信噪比为1:2的转换结果(c);可控震源扫描矩阵的奇异值图(d)

并产生总质量最好的数据。建议相位编码方案的合成模拟应作为采集设计的组成部分。

2. 3D 高分辨率采集

Ramsden 等介绍了 2004 年泰国海滨 3D 高分辨率勘探的实例。满足 2D 均衡采样原理,小间隔震源排列、浅震源和海洋地震拖缆的 3D 高密度采集可以得到高分辨率 3D 数据体。新 3D 数据体与以前的 2D 高分辨率采集数据相比,有较好的空间连续性。3D 高分辨率数据体为高分辨率处理流程的确定提供了最佳平台,建立了井数据和地震数据之间的纽带,反映了单个堆积砂体和复杂的梯形断层构造。

油气圈闭埋藏在中新统河道砂和泥岩层序地层中。研究区的断层模式是典型的走滑正断层,主断层的轨迹上有很多密集的梯形正断层。小背斜构成基本的油气圈闭,两旁由正断层封堵。由于减少了震源的方向性,2004 年采集的新 3D 地震资料有较高的分辨率,目的层的频率高达 150Hz (图 6),断层及每一个砂体顶和底的横向延伸成像都非常清晰(图 7)。相同位置不同时期 3 个工区的剖面比较见图 8。为了便于比较,列出了 3 个工区采集参数(表 1)。图 8 中用黄线表示的层位是在 2004 年采集的资料上解释的,然后投影到其他 2 个工区。图中有 5 个主要断层和几个次要断层。图 9 为图 8 中左下角和右下角小红方框圈出的特别区

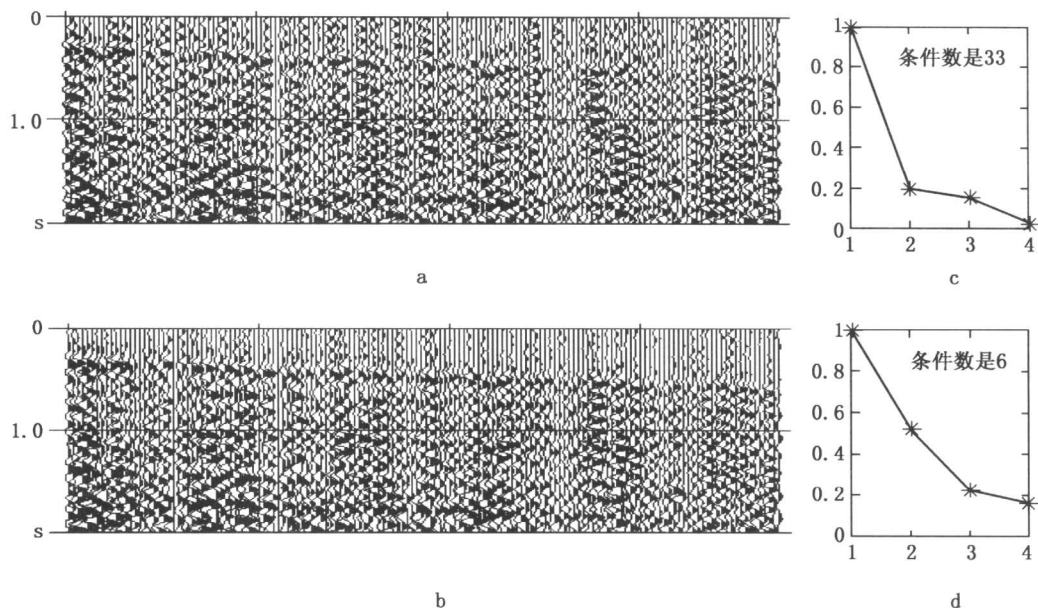


图5 野外3D地震中偏移距震源道集的一部分

a—在震源试验1中使用合成模型1的相位解码方案；b—在震源试验2中使用合成模型2的相位解码方案；
c—从震源试验1得到的可控震源扫描矩阵的奇异值图；d—从震源试验2得到的可控震源扫描矩阵的奇异值图

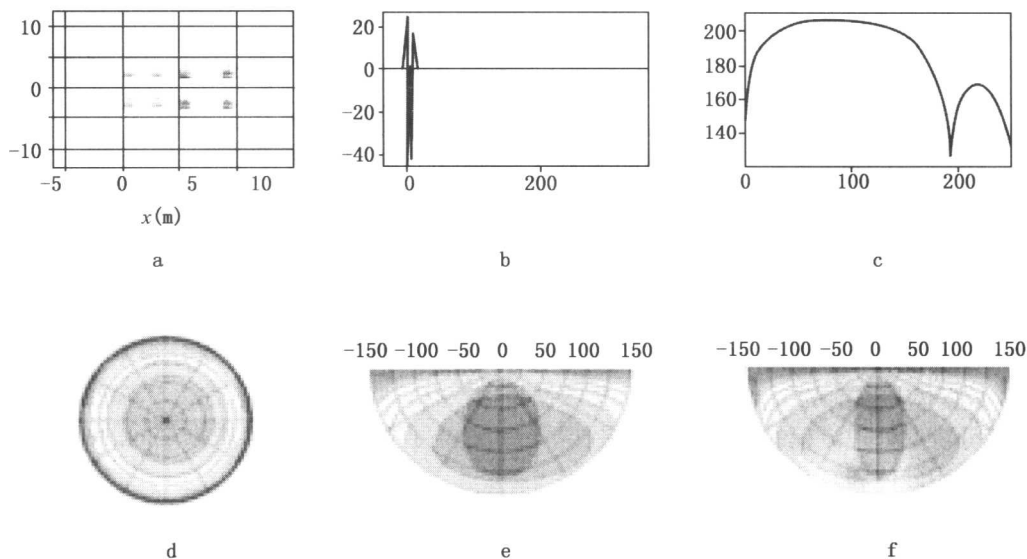


图6 1400in³ 排列图 (a)；远波场的信号 (b)；振幅谱 (c)；150Hz 的方位角方向性 (d)；
纵测线与频率有关的震源方向性 (e)；横测线与频率有关的震源方向性 (f)
放射状线是常量发射角 (从垂直方向开始测量)，半圆形的弧线是等频率线。在与频率有关的方向性
图上的阴影多边形显示“标准”长排列的6dB方向性等值线。它受方向性的影响非常大

域放大图。3 个工区的差别非常明显，2004 年高密度、高分辨率 3D 数据最好，砂岩的分辨率较好，增加了构造和断层模式上的置信度。因此，参照此次结果对 Jasmine 油田的前期图件做了许多修改。

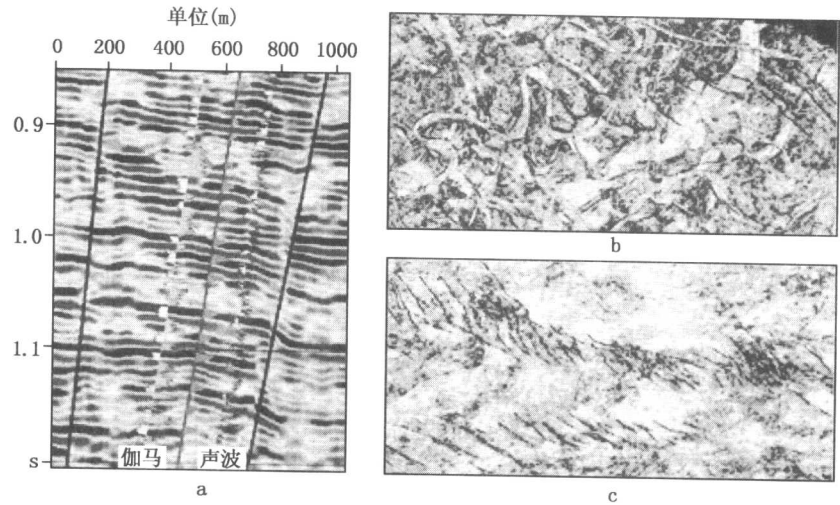


图 7 2004 年勘探的过斜井的剖面，地震资料和合成记录吻合很好，伽马射线和声测井曲线可以识别单个砂体的顶和底 (a)；494ms 的时间切片 (b) 和 958ms 时间切片 (c) 证明了对复杂的水道模式和梯形断层有较高的分辨率

表 1 泰国 B5/27 区块采用的 2D 和 3D 采集参数

采集参数	1984 年 3D, 1999 年处理	2000 年高分辨率 2D 勘探	2004 年高分辨率 3D 勘探
拖缆长 (m)	1 × 3000	1500	6 × 2400
拖缆深 (m)	10	2.5	4
道间距 (m)	25	12.5	12.5
面元大小 (m ²)	12.5 × 50.0	6.25	6.25 × 12.5
震源大小 (in ³)	3772	160	1400
震源深度 (m)	7	1.5	4
炮间距 (m)	25	12.5	12.5 (双震源)
记录长度 (m)	6	2	3.5
采样间隔 (m)	2	1	1
滤波参数 (Hz/dB 每倍频程)	6/18~128/72	8/18~411/130	3/6~250/72

注：2004 年的 3D 数据使用 6 条海洋地震拖缆采集。

该高分辨率 3D 勘探实例说明，在采集的设计和实施中需要考虑的因素如下：

- (1) 震源排列设计。高密度、浅深度、适当调谐都将使震源的方向性对高频的影响降到最小。
- (2) 浅的海洋地震拖缆与浅震源排列结合，将使伴随波的频带移到感兴趣的最高频率之外。
- (3) 坚持 2D 均衡采样标准，使处理噪声最小化，提高资料信噪比。
- (4) 小间隔 3D 空间采样率和高密度 3D 采集能够得到宽频带、高质量、高分辨率的成像。

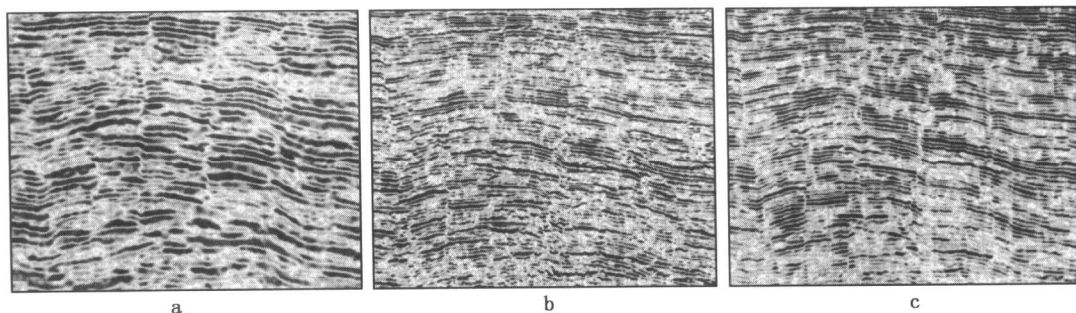


图8 1984年3D地震(a); 2000年高分辨率2D地震(b)及2004年高密度、高分辨率3D地震(c)相同位置剖面比较^①

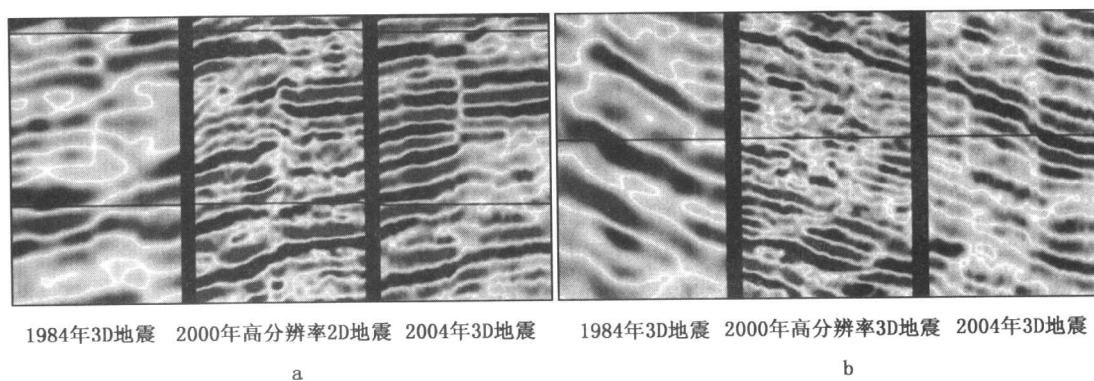
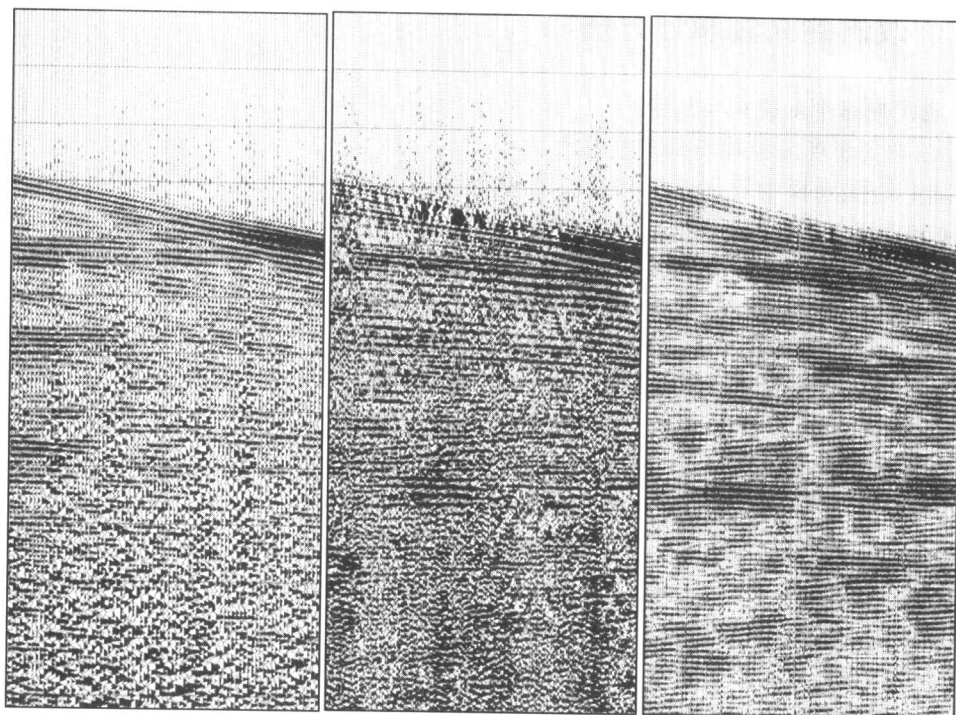


图9 图8左下角小窗口放大图(a)和图8右下角小窗口放大图(b)

3. 改善深海盐成像的低频信息采集

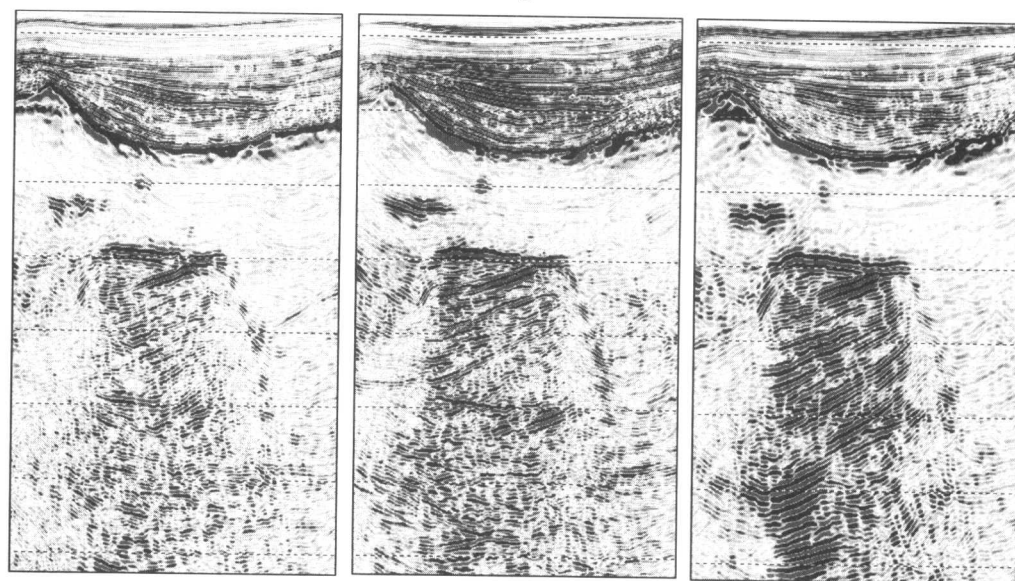
人们认为深海盐成像品质差的原因是, 盖层速度模型准确性不高和照明不够。为此, 有的野外试验采用宽方位角观测系统, 甚至加长排列到 12000m。至于速度问题, Christof Stork (2005) 论述了在将正确的速度场用于偏移时, WEM 算法就有可能在最终成像的复杂盐体下部保持频率成分。但在偏移速度场被平滑后, 最终成像中的频率成分在盐体的外部, 而不是盐下, 被保持得相当好, 说明高频被损失掉了。要使盐下有适当的带宽和保持成像, 在产生偏移速度场的时候, 就必须进行盐顶边界的精确解释, 但这很难做到。Western Geco 公司的 Egan 等人尝试改进采集设计, 获得可靠的低频成分。一种方法是增加气枪排列的总体积, 增加振幅量级, 尽管增加的振幅幅度不大, 但对于品质很差的资料来说, 也有很大的改善, 能获得更多的低频能量。较大的排列不仅增加了信号, 也增加了震源产生的噪声。试验数据显示, 在低频的主要噪声不是由震源产生, 而是由拖缆膨胀波和海浪产生的, 它们是常量, 与震源强度无关。因此用较高量级的震源振幅就可与之区别, 再通过自适应倾角滤波消除该噪声, 提高信噪比。加密采样间隔, 可避免假频。另一种方法是将需要的能量大多数漏入频谱低端, 称为“气泡调谐”(详见 2004 年 Christie 等人的文章)。总之, 利用低频带来的更多必需的信号可以改善深海盐成像(图 10)。

① 因黑白印刷, 本书彩色图件信息部分丢失, 请读者参见第 75 届 SEG 年会相关论文。



显示部分炮记录

a



老资料再处理(峰调谐)

峰调谐:单传感器试验

气泡调谐:单传感器试验

b

图 10 显示部分炮记录 (0~12Hz 滤波)(a); 显示叠前深度成像的叠加剖面 (0~20Hz 滤波)(b)

左图为老资料再处理 (峰调谐), 中图为峰调谐单传感器试验, 右图为气泡调谐单传感器试验。峰调谐单传感器质量较老资料有改善, 气泡调谐单传感器效果最好

三、改进的采集设计方法

1. 地震勘探中加密采集技术

1) 陆地高密度可控震源法采集技术

在陆上地震勘探中增加震源和检波器密度很有必要。在 2004 年 9 月的 EAGE 研讨会上, Manin 列举了接收点域和炮点域 (被他称为 $3D^2$) 内均质波场采样的优点: 全目标照明、3D 地表多次波衰减、波动方程成像、3D 地表离散噪声衰减等。所谓的 $3D^2$ 是在炮点域和接收点域内进行 40000 接收点和 40000 炮点/ km^2 均匀采样。目前一般的陆上采集接收道在 1200 和 2400 之间, 1km^2 有 50~400 个震源和检波器站, 站间隔在 25~50m 之间, 线间隔在 100~400m。要实现 $3D^2$ 还差得很远。最新一代地震记录器可单独操纵几万个通道, 是使 $3D^2$ 成为可能的一个好的开端, 但勘探成本是主要障碍。法国的 MEUNIER 等提出了利用可控震源的可能的解决办法, 震源和检波器密度的增加必须与排列大小的减少相结合 (图 11)。在具体实现上, 检波器密度的增加需要增加额外的投资和劳动力, 但不影响生产力, 而震源密度的增加将影响生产力。从技术观点上看, 有目的地增加震源密度必须与排列大小的减少均衡。他们利用滑动扫描技术, 使生产力达到最优化, 并将增加震源密度的成本控制合理的范围内。炮点密度增加与排列大小的减少有许多优点。离散噪声衰减是这些优点之一, 但是成本太高。可控震源法的多震源采集技术能提高生产力, 降低成本。研究显示, 调谐噪声减少的细分可以使它获得滑动扫描技术的所有可能的优点 (图 12)。该技术使单一可控震源炮点的密度网格比常规的可控震源排列更经济。

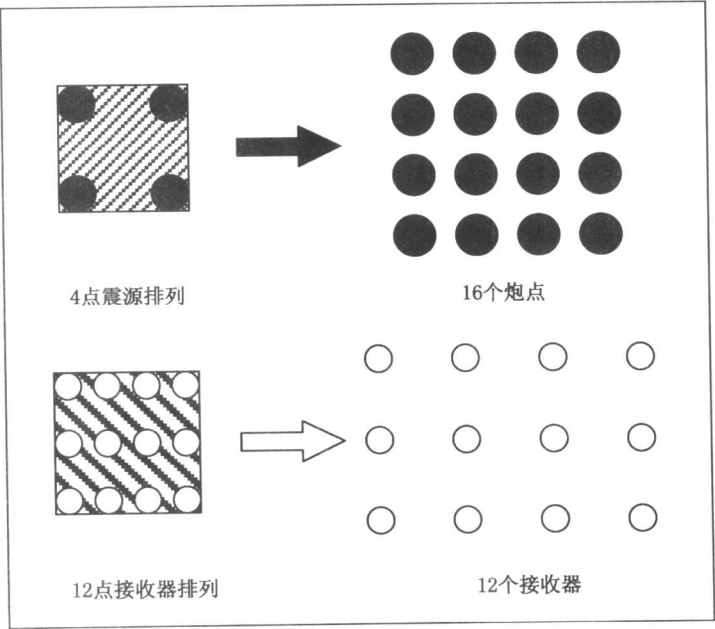


图 11 排列和信噪比守恒: n 点震源排列对应 n^2 单炮点。
 m 点检波器排列对应 m 单检波器

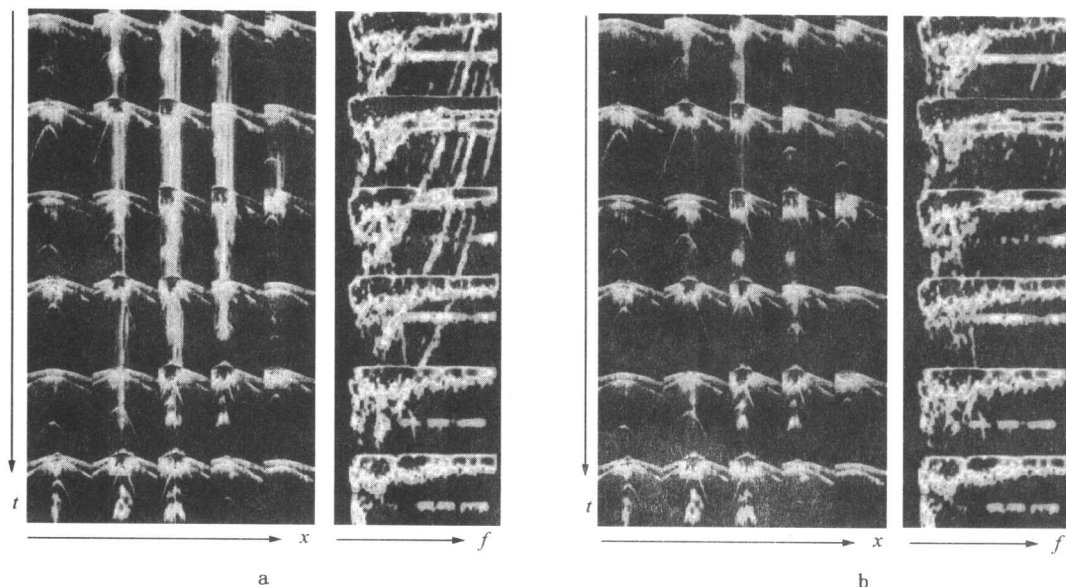


图 12 调谐噪声衰减前后的滑动扫描数据对比图

- a—调谐噪声衰减前（左原始记录，右时间频率图）基本能量是水平的，但是有谐波畸变；
b—调谐噪声衰减后（左原始记录，右时间频率图）调谐噪声级别已经被减少到环境噪声的级别

2) 加密地震拖缆数据的海底地震采集技术

深海勘探的热点地区正逐渐被开采设施塞满，采用通常的水面地震拖缆方法进行实时监控的 4D 地震几乎无法实施。海底地震技术作为地震拖缆数据采集的一种补充，可以得到目标区域的全景图，也为得到加密时移数据提供了一种解决办法。Granger 等人在深海需加密地震拖缆数据的地区，进行了独立 4C 节点（Nodes）应用研究。在安哥拉 Girassol 油田的海底测站（OBS），进行了新研制的 4C 记录设备的性能试验，5 个 ARMSS 节点（自主油藏监控地震系统）被布置在该区水深 1300m 处。该试验的目的除了要确定这个新型 4C 记录设备操作顺序和性能外，还要对在如此恶劣的环境中获得的加密地震拖缆采集的记录数据进行测试，对所记录的 4 分量数据的潜在价值进行评估。论文在对记录系统和采集观测系统的简短介绍后，将处理结果与相同区域以前地震拖缆采集数据进行了比较，结果证实独立节点的稀疏分布可以获得高质量的数据。尽管 5 个节点提供的覆盖区域很少，但水中检波器和垂直地震检波器的加密偏移体的目的层质量，优于以前的 3D HR 地震拖缆结果（图 13）。最终研究成果说明要加密障碍区域为 4km^2 的水面地震拖缆的采集结果，用 50 个节点的组合就很容易实现。在未来拥挤区域的时移勘探中，使用该节点技术有美好的前景。

2004 年，Stewart 等人介绍了 OBC（海底电缆）比地震拖缆采集能提供更好的结果，垂直传感器的记录能较好地衰减水层多次波，水中垂直检波器组合可以提供宽的频率范围。Boelle 从稀少分布的检波器到高叠加，从窄方位到宽方位照明不同的采集设计模拟得出，高叠加和多方位照明有明显的优势。

3) 加密采集规范

在海上地震采集期间，可能出现覆盖不足的区域。如果这些区域太大，超出规范允许的范围之外，需要考虑“加密”测线。人们期望在勘探前对该加密线的采集制定另外的袖珍采集标准，在设计时，综合考虑影响数据最终质量的其他因素，明确采集允许的间隔，时刻监

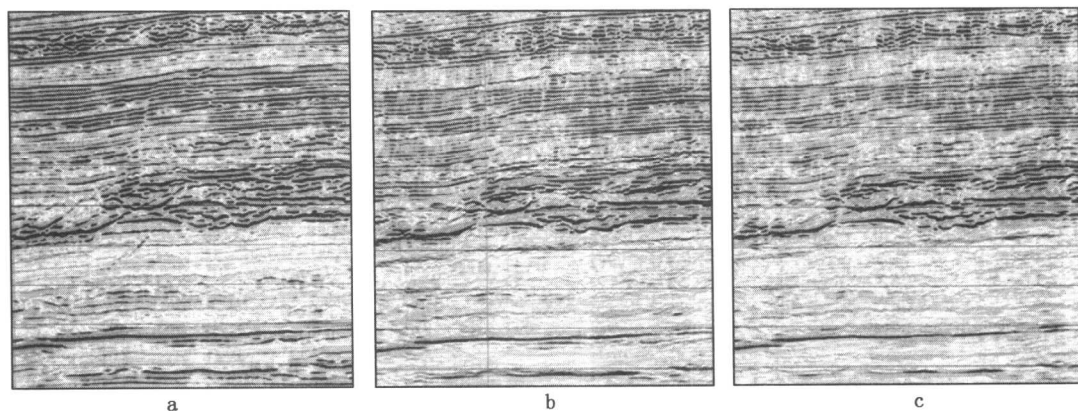


图 13 5 个节点得到的水中检波器、地震检波器和以前的 3D HR 地震拖缆数据 3D 偏移结果的比较
a—3D HR 地震拖缆偏移剖面（叠加次数 52 次）；b—3D 偏移剖面（5 节点，水中检波器）；
c—3D 偏移剖面（5 节点，地震检波器）

控数据质量。Day 等人提供了一种在偏移成像中预测井孔覆盖效果的方法，该方法可用于评估在采集期间是否需要加密炮线。可用叠前时间偏移的模拟量化特殊模型和目的层效果。该结果可在数据允许降低的级别内评估加密线的要求（图 14 和图 15）。该模拟如果在工区测量前进行，可以将加密线考虑进工区规划的预算中。

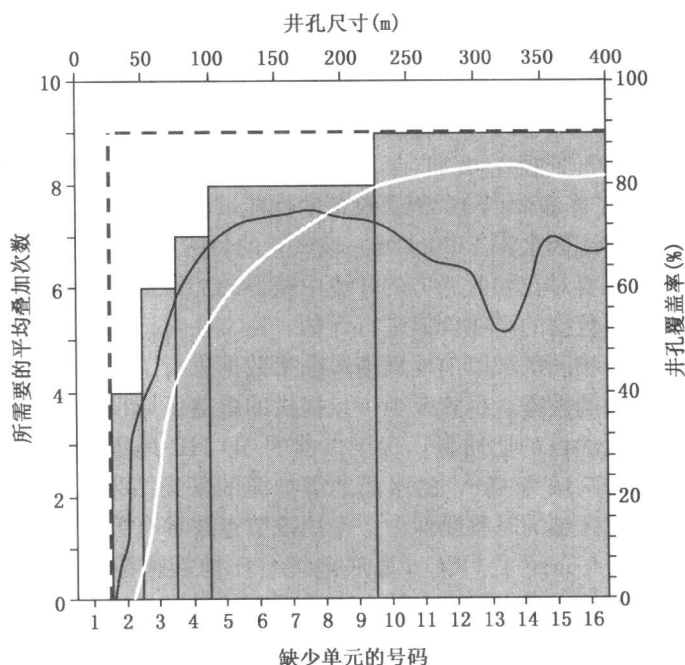


图 14 加密规范的实例

允许振幅损失 2dB 的门槛（白线）和允许旅行时偏移 $1/40$ 波长的界限（黑线）。柱状代表 1 到 16 道之间相邻的横向面元所需要的平均叠加次数。虚线指示这些结果被简化到什么程度需要按照传统的方法制定加密规范。该例子给出了最小必须为 9 次叠加，最大缺少面元为 1

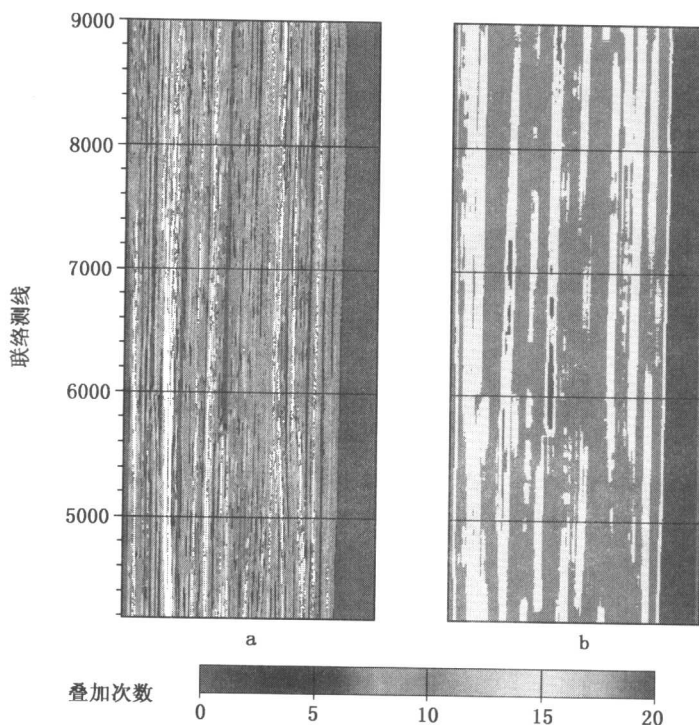


图 15 在有限的偏移距范围内，叠加次数覆盖的例子 (a) 和用红色（不可接受）、黄色（边缘值）和绿色（可以接受）表示可接受标准的例子 (b)。最大叠加次数为 10

2. 地震勘探中稀疏站点的采集方法

测量一直是 3D 地震采集中的一个重要组成部分。当勘探方法随着技术的进步不断发展时，对桩点做记号的工作比记录工作更重要的做法，会导致测量和记录时间延迟。Wagaman 等提出陆上地震勘探中较少站点 (Stakeless) 的采集方法，改善了常规操作规程，消除了对站点和标记的需要，同时为每一个地震点提供了高精度的准确位置。它是与全球定位系统 (GPS)、地理信息系统 (GIS) 和导航技术结合形成的新的地震采集系统。该方法可在测量时同时进行打桩和记录，不需要站点或者标记，可提供更精确的地震点的定位，提高生产力，不增加勘探成本。但应用这一技术需要对检波器的布置和震源行进方式做一些修正。

3. 照明技术在确定最佳采集设计中的应用

中国中西部受印度洋板块和欧亚板块、扬子板块与华北板块的碰撞挤压，地下构造复杂，逆掩断层广泛分布。许多油藏埋藏在逆掩断层下。逆掩盖层具有复杂的构造和较高的速度，断层面及其下构造很难得到好的成像。Dong Liangguo 等人利用照明技术与叠加次数和能量的分布，综合制定了中国西部玉门油田逆掩断层构造的最佳采集设计方案，指出对于复杂构造地区的采集设计不能简单地模仿该区域平缓构造的采集方法。复杂地区的叠加次数不仅由炮点和检波器排列决定，也可能与地质模型、目的体埋深和上覆地层结构等有关。而共反射点叠加次数和照明能量能决定目的体的地震成像质量 (图 16 和图 17)。叠加次数和地震照明能量的计算应该用共反射点道集代替共中心点道集 (图 18)。应用射线追踪和波动方

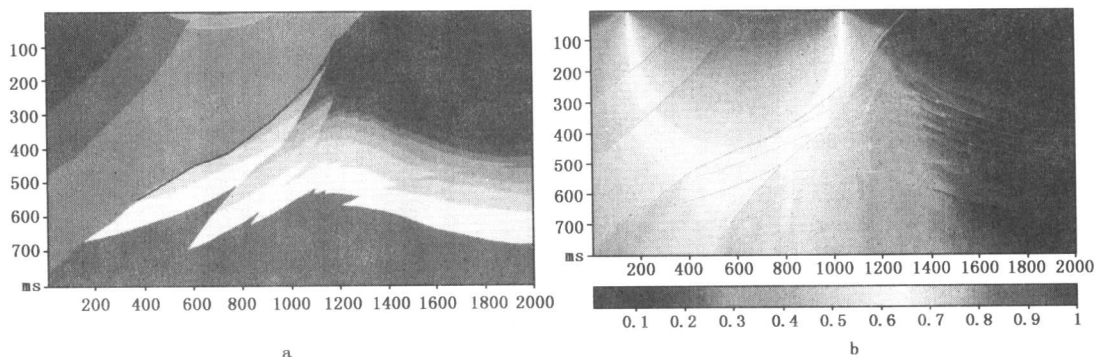


图 16 窟窿山模型 (a) 及逆掩断层面成像好的炮照明 (b)

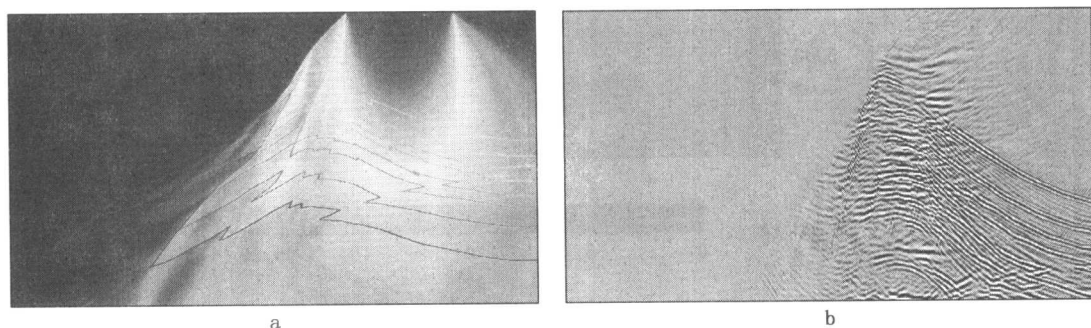


图 17 断层下盘成像好的炮照明, 逆掩断层面照明值较低 (a);
断层下盘照明好的模拟炮数据成像, 逆掩断层面不成像 (b)

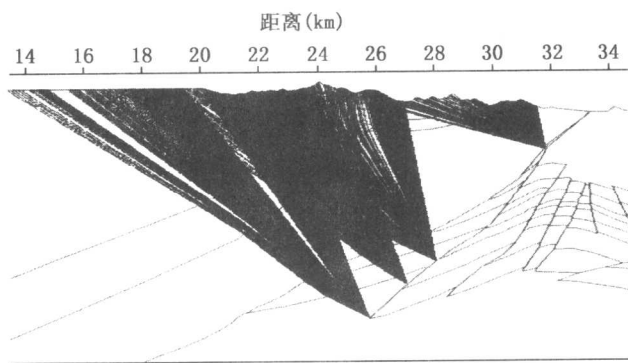


图 18 逆掩断层面上 4 个 CRP 道集的射线分布不均

程模拟计算叠加次数和沿目的体表面的 CRP 道集的能量。按照地震波动方程照明的结果, 以及来自不同偏移距检波器的叠加次数和能量分布, 确定最佳震源和检波器排列。

4. 4D 可重复性采集方法

时移地震是与油藏产量的细微变化有关的一个严格试验。随着作为时移成功的关键要素的最匹配数据采集的出现, 海底地震 (OBS) 系统成为目前可改进的重复性方法

的重点。

Docherty 等人进行了多分量新 OBS 节点系统 (OBS node system) 的数据可重复性试验研究。节点 (详见 Docherty 等, 2005) 是可以 28 天连续记录的自动设备, 呈圆柱状 (直径 22.5ft^①, 高 10ft), 重大约 200lb (主要是电池重量), 每一个节点包含在单元铝容器内部固

① 1ft = 0.3048m, 1lb = 0.4536kg。