

张永刚 主编

油气地球物理技术 新进展

—— 第73届SEG年会论文概要



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

油气地球物理技术新进展

——第 73 届 SEG 年会论文概要

张永刚 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国勘探地球物理学家协会 (SEG) 第 73 届年会论文概要。内容包括地震资料采集设计优化、地震数据处理技术、AVO 技术、多分量技术、各向异性技术、井中地球物理技术、地震解释技术、油藏描述技术等 17 个专题, 基本反映了一年来物理技术, 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 73 届 SEG 年会论文
概要/张永刚主编. —北京: 石油工业出版社, 2004. 9
ISBN 7-5021-4800-0

I. 油…

II. 张…

III. 油气勘探: 地球物理勘探-国际学术会议-文集

IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 099584 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

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14.25

字数: 370 千字 印数: 1—1000 册

定价: 50.00 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

目 录

优化采集设计, 提高资料品质	胡中平 (1)
常规地震资料处理	谈大龙 张林松 (11)
地震速度分析技术进展	孙开峰 苗 耀 (29)
偏移成像技术新进展	潘宏勋 方伍宝 (37)
AVO 技术进展	郭全仕 周 巍 (55)
多分量勘探新技术	黄中玉 (64)
地震各向异性研究的新进展	朱成宏 (79)
地震属性技术	高 林 吴玉桂 (93)
波场数值模拟技术研究进展	余德平 (104)
地震反演技术新进展	高志凌 陈国金 (112)
解释的回归——由注重解释方法到注重解释思路	张卫华 (124)
时延地震技术	杨勤勇 马全天 邱辉丽 (132)
岩石特性研究	马中高 (139)
井中地震技术的新进展	陈 林 (161)
井中声波测量技术及应用	张松扬 黄国骞 (183)
墨西哥湾油气地球物理勘探开发技术进展	严建文 潘申平 任 鹏 刘起弘 (199)
近地表地球物理技术新进展	朱海龙 崔远红 (217)

优化采集设计，提高资料品质

胡中平

一、引言

在回顾近几年采集技术发展的基础上，这里着重从激发接收因素对地震资料品质的影响，特殊地质条件下的地震采集技术，以及采集处理一体化地震技术等三个方面对 2003 年 SEG 年会采集论文进行归纳总结。本届年会在采集方面的论文更加关注通过优化设计提高地震资料品质，而通过采集处理解释一体化技术和思路来优化采集设计已成为人们的共识。

采集是地震勘探的基础。在计算机及地震处理技术迅速发展的时代，采集对地震技术发展的影响尤其重要。纵观最近几届 SEG 年会有关采集技术方面的论文，我们发现，关注的问题正逐步发生转变。在第 67 届 SEG 年会上，三维观测设计是采集方面的主要议题之一。第 68 届 SEG 年会有一半采集方面的论文涉及三维观测，尤其关注优化三维采集设计和降低三维采集成本。第 69 届 SEG 年会采集方面的论文涉及采集设计、采集方法、项目管理及设备制造等。在后续几届 SEG 年会中，与采集有关的论文逐渐较多地关注针对复杂地质条件下的观测方式和采集方法。第 73 届 SEG 年会采集方面的论文关注的是地震资料品质和针对复杂地质条件优化采集设计。综上所述，我们认为，三维观测设计技术从方法研究、技术研发到现在的生产应用，均已进入一个相对成熟的阶段。随着油藏描述对地震资料品质的要求越来越高，加强采集方式对地震资料品质影响的研究已经成为采集技术的热点研究方向。从采集着手加强对地震资料品质、分辨率以及照射等特征的研究，有利于从源头发现问题并揭示其本质，从而避免弯路。此外，随着勘探要求的提高以及我们所面临的地质体更加复杂，针对特殊地质体，如盐丘、古潜山、高速屏蔽层、天然气水合物等的特观设计已经引起勘探地球物理学家的极大兴趣。需要特别指出的是，随着采集、处理、解释一体化技术的发展，采集和处理、解释等其它地震技术已经没有明显的界限。如照明分析和静校正等处理技术已经成功地应用于野外观测设计。采集需要借鉴前期的处理和解释成果，在后期的处理和解释中也要对采集设计进行分析。

2003 年 SEG 年会以及近年来的采集论文主要是针对复杂地区复杂地质条件以及复杂环境下如何获得高品质的地震数据。如为提高地震资料品质而进行的采集方法试验，针对特殊的地质条件而采用的观测方式，震源因素分析以及静校正和表层因素对地震资料品质的影响等。而激发接收因素和地震品质的关系以及特殊地质条件下的地震采集技术是本次年会采集技术的亮点。以下分三个方面作重点归纳。

二、激发接收因素对地震品质的影响

1. 不规则因素对地震组合的影响

在地震采集中通过对检波器和震源进行组合可以提高地震资料信噪比并减少地震数据

量。然而，有许多因素，如坐标误差、检波器高程差、检波器间匹配差异以及局部的不均匀性等都会影响组合效果。上述影响通过计算可得到量化结果。可以在 $f-k$ 域里观测上述误差对合成地震记录的影响。当有误差时会引起假频现象。检波器组合方式及与近地表或土壤的相互作用方式的变化都会引起振幅的变化。在组合范围内速度变化及坐标误差也会引起相位的变化。这里分析这两种变化类型的影响。

首先考虑振幅变化问题。当我们对组合距内各检波器分配不同的加权系数，如相差 10%，则振幅（相位）谱也会由这种误差而受影响。振幅和相位谱的绝对误差分别为：振幅谱误差 0.013，相位谱误差值 0.128。

当误差值增大时，它在 k_x 响应上的影响也将增大（见图 1）。分析结果表明相位谱对这些误差更加敏感，其响应几乎为振幅谱响应的 8 倍。可以通过对不同的检波器给不同的加权系数来分析其效果，并计算由此所引起的误差。

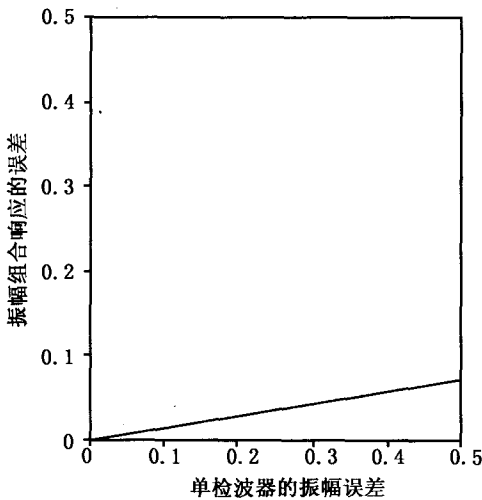


图 1a 振幅差异引起组合振幅误差

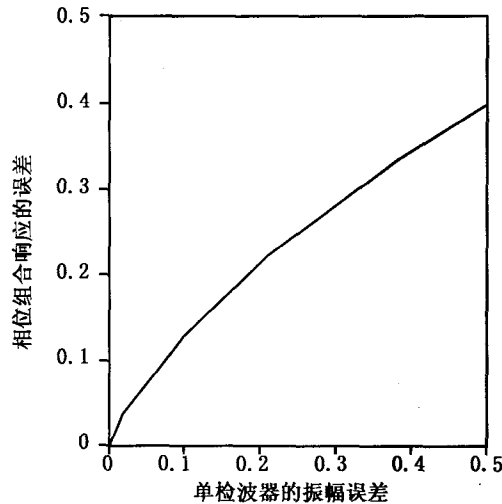


图 1b 振幅差异引起组合相位误差

现在分析一下在 k_x 响应中坐标误差的影响。在检波器坐标中引入 10% 的误差， k_x 域的响应会随坐标的变化而变化。当检波器坐标误差增加时，我们得到了振幅谱和组合响应的线性变化情况；也可以观察到针对相位谱的非线性变化。针对上述分析我们注意到，当存在误差时，相位谱更加敏感（图 2）。

当数据采集区域的高程变化较大时（如山区等），这种误差是十分明显的。因此，我们可以假设同一组合范围内的所有检波器坐标有误差。采集所设计的组合空间是规则的，但由于种种原因，它的分布范围由规则达到最大的 10% 误差。认识这些误差，有利于克服不利因素，从而获取高精度地震资料。

用合成数据分析组内因素变化引起的组合效应也是十分方便和有效的。这里用理论数据分析组合和相位变化的影响。在理论数据记录上有线性和双曲线相位，它们分别代表面波和反射信号。每 5 道计算一个平均值，这相当于 5 道组合。组合效果可分别在 (t, x) 和 (f, k_x) 域中观察到。由组合因素引起的反射振幅增强见图 3b。

由此可知，不同类型的因素都会降低地震资料的品质。为了分析它们对组合的影响，可通过正演来模拟这一现象。通过分析计算我们注意到，相对于振幅谱而言，各种扰动对相位谱的影响更大。

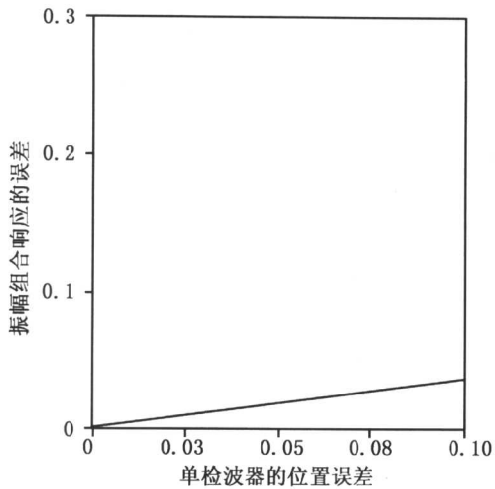


图 2a k_x -域中振幅误差和检波器误差的关系

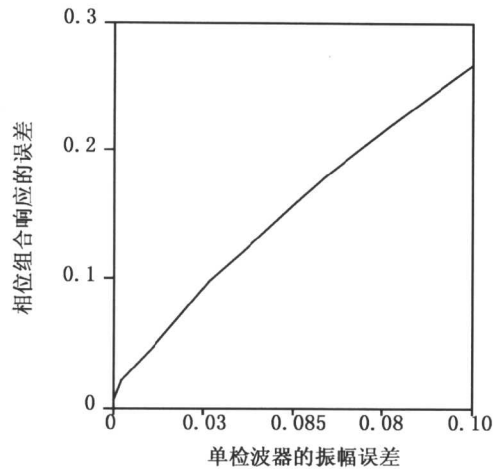


图 2b 相位误差和检波器误差的关系图

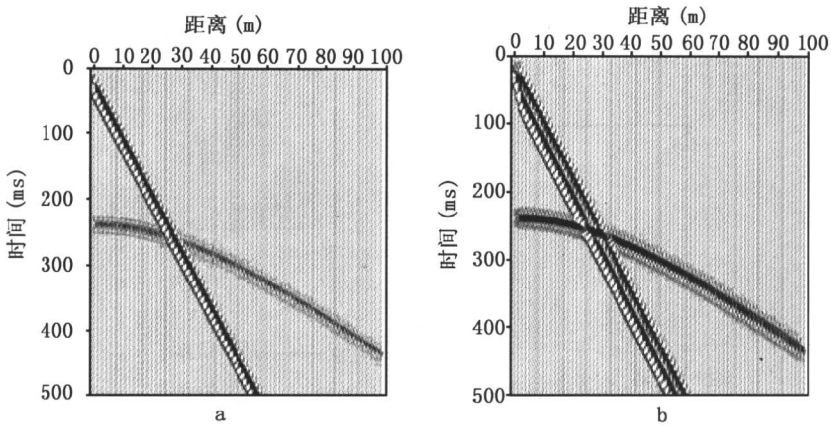


图 3 组合前 (a), 组合后 (b) 单炮理论记录

2. 用有偏 VSP 地震数据进行组合分析

用有偏 VSP 地震数据可以分析随组合方式变化所引起的数据质量的差异。为此, 用实际数据针对宽方位的数据组合, 提出了一种新的定量分析手段。本文分析的有偏 VSP 地震的采集方式为, 506 道检波器埋置在 130×130 的网格中, 可控震源激发, 偏移距的分布范围为 $70 \sim 3300\text{m}$ 。分析表明, 反射能量在 $0 \sim 60\text{Hz}$ 处是最相关的, 相关性可达到 $0.4 \sim 0.6$, 其峰值通常在 25Hz 左右。

陆地反射地震数据品质受面波影响较大, 检波器组合主要是衰减面波和增强有效信息, 检波器组合也有助于衰减随机噪音。就评价噪声和测试检波器组合方式而言, 有偏 VSP 方法十分经济。Rigdon 和 Hoover (1987) 用有偏 VSP 数据对垂直于测线方向各种组合方式的信噪比进行评价。Rigdon (1997) 通过一系列组合滤波计算了实际地震数据的信噪比, 通过衰减噪声观测有效反射的变化。

为有效地对组合方式进行分析, 施工中利用小点距接收地震数据。在后续的处理中, 基于这种主网格可以形成若干种不同的组合类型。对于某一炮而言, 组内各道可以通过各种组

合形成实际的地震道集。506 个检波器放置在 130~130m 方形网格内，网格内接收点间距为 6m，每个接收点均包含一串点组合检波器，形成一道数据。

这里分析几种组合类型的特性。图 4 和图 5 分别为线性和环形组合及频率响应。灰度标强度为组合响应曲线，黑色组合响应最大，白色组合响应为零。

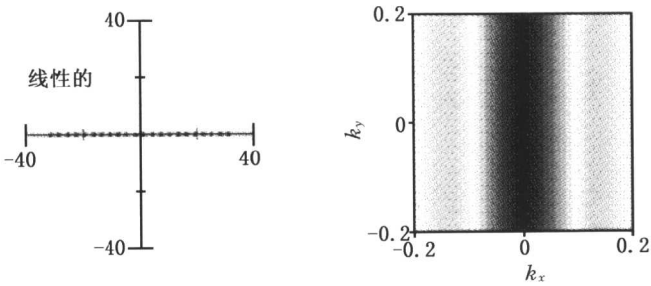


图 4 组合图形及其频率响应

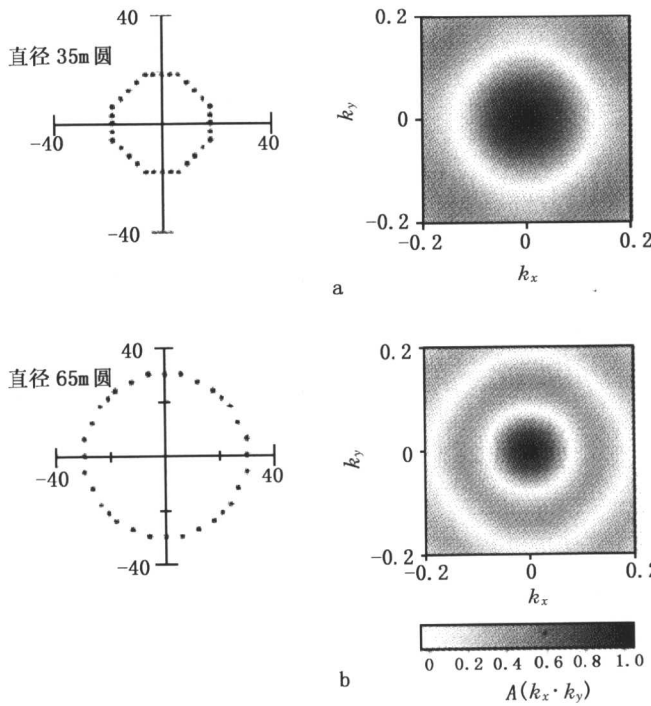


图 5 组合图形及其频率响应

a. 直径 35m 圆组合；b. 直径 65m 圆组合

三、特殊地质条件下的地震采集技术

1. 盐丘

盐丘是十分重要的油气储集体。采集中应注重加强近地表技术和静校正方法研究，在精

细研究的基础上完成采集设计,可以改善地震剖面品质,提高深层的成像质量。

低速带的速度和厚度在纵向和横向上变化都很大,山区低速带的结构不清楚,其厚度往往达到 100m。所有这些元素都使得近地表勘探和精细静校正变得十分困难。图 6 为复杂地表、复杂地质条件下原始及各种静校正处理图,比较后可以发现,层析成像处理效果较好。

在山区地震波的吸收和衰减十分严重,在近地表发育巨厚的低速层,伴有大量的裂缝和溶洞。因此,地震波的衰减十分严重,影响盐丘及盐下构造的反射信息。盐层埋藏深度在 4000~5500m,石油和天然气藏的深度为 5000~6000m。盐丘的主体部分正好在山区发育带。由于挤压及张力作用,盐丘上的覆盖层断裂发育,由此进一步增加了对地震波的吸收,因此盐丘及盐下地震数据的信噪比更低。

1) 采集技术及对策

这次采集的目标是要获取深层盐丘构造的地震反射信息。考虑到本区勘探的难度,我们首先通过精细的近地表勘探来解决静校正问题,在建立精确近地表模型的基础上,完成高精度静校正;其次,优化采集设计,以获得深部盐丘和近地表的高信噪比地震资料;最后增加激发能量,在山区激发层非常厚,要钻深井以确保在高速层中激发。因此地震资料质量有了较大的改善。

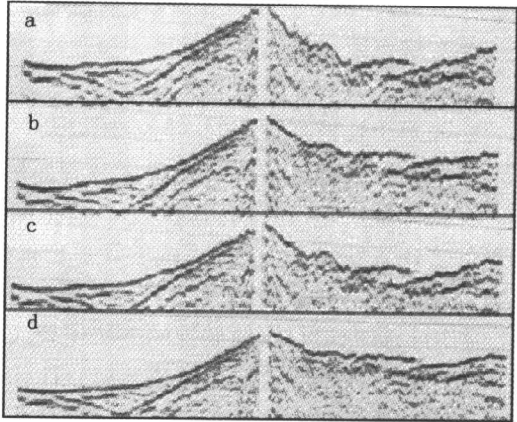


图 6 CMP 道集静校正

a. 原始记录; b. 初至折射静校;
c. 基于模型法; d. 层析成像方法

2) 讨论

本次野外采集是各项技术的综合运用,如精细近地表勘探、静校正、针对中深层的野外采集方式、单炮深井高速层激发、严格的野外实时监控和现场管理等。这些都是野外采集得以顺利进行的可靠保证,使地震剖面质量得到明显的改善。

图 7 为试验线和相邻测线叠加剖面对比图。相邻测线地震剖面在浅、中、深部信噪比都很低,盐丘和盐下构造的轮廓不清楚。在新剖面上,地震资料的品质获得了明显的改善,盐丘和盐下地层的反射十分清楚,盐下的背斜构造十分明显,来自盐丘顶部和盐丘覆盖层的反射十分清楚,信噪比高,构造特征可信。

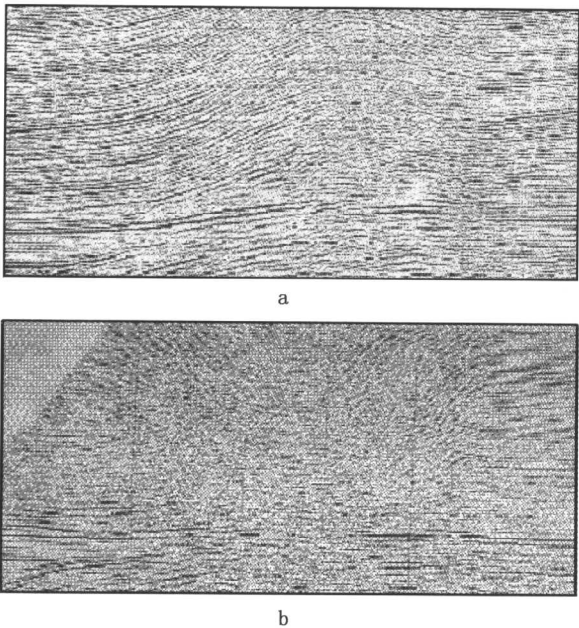


图 7 试验线 (a) 和相邻测线 (b) 叠加剖面对比图

针对上述问题,主要抓静校正、采

集参数论证以及观测系统设计。要确保新的采集方法的实施并取得效果,需要有精细的调查,先进的设备以及严格的质量监控措施。

2. 逆冲断裂带长排列地震采集可行性研究

逆冲断裂带的长排列采集可以用一种新方法来定义最佳采集参数。主要用射线追踪、层析成像、FD 声波模拟以及 PSDM 来确定最大排列长度,以便有效进行成像和建模。采集参数主要有炮点距、最大排列长度、覆盖次数以及可用于目标地质体成像的最佳排列范围。

近年来,分别在陆地和海洋进行了许多长排列地震勘探,主要是关注浅部的高波阻抗体。然而对于长排列数据的实际应用以及选择最佳的采集参数仍然有许多值得研究的问题。

事实上在大部分情况下,由于种种原因,如动校拉伸等,远排列地震信号(折射,反射,转换波能量)常常被切除。另外一个问题是现在的方法大都针对常规排列,其排列长度和深度之比大致为 1,缺少系统的针对长排列的商业软件。已有许多地球物理学家积极开展这方面的研究,并成功地应用于火成岩下、逆冲构造等复杂地质体的成像。

利用长排列进行深部勘探的方法比较成熟,一些类似的技术也应用于油气勘探。但用长排列方法勘探浅部高波阻抗地质体时,往往缺乏经验。本文探讨针对特殊的速度模型和地质体,在逆冲带长排列采集中,如何确定最佳采集参数。

1) 地质模型

靶区上覆地层地质构造复杂,中间为厚的高速层(相对于泥灰岩而言),深部是由页岩和砂岩组成的低速体,图 8 为靶区地质模型。

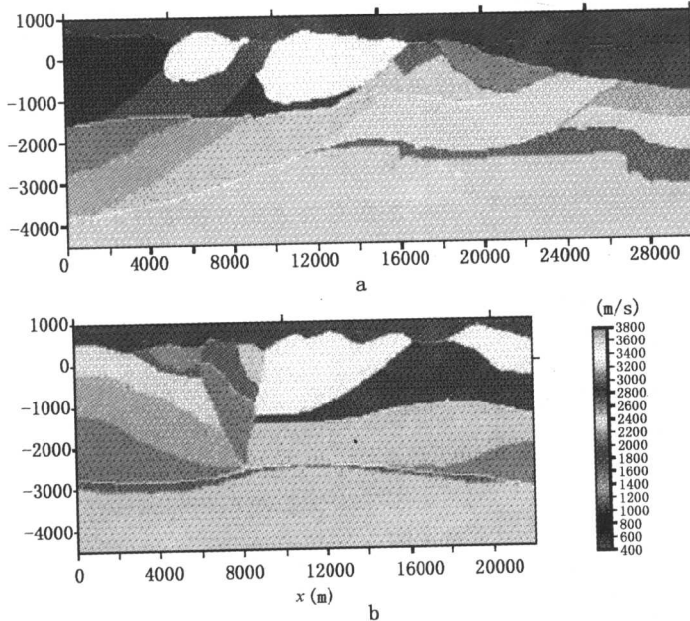


图 8 倾向测线速度模型 (a) 走向测线速度模型 (b)

靶区的常规地震数据信噪比较低。用各种方法对原始地震资料进行处理均不能得到好的成像结果。基于上述研究成果,我们设计了新的采集方案,利用长排列地震数据研究推覆体地质构造。

2) 方法

已知一个地质构造,对于倾向和走向线,可行性研究如下:

利用弯曲射线追踪(最短时间)进行照射分析。基于射线追踪的 CDP 静校正。层析层像技术。FD 声波模拟。利用不同的偏移距进行 Kirchhoff 叠前深度偏移试验。

弯曲射线追踪(最短时间)

主要是针对由复杂构造和复杂速度场引起的阴影成像区。透射层析成像重建技术主要是证实重建复杂冲积构造的能力。已知观测系统的所有炮点都应用 FD 声波模拟,并借此探讨用于速度分析和成像的最佳排列长度。最后对不同排列长度的地震数据都进行 Kirchhoff 叠前深度偏移,以检查长排列对地震成像的影响。

3) 结果

表 1 为倾向和走向测线的采集参数。

表 1 可行性研究试验采集参数

	测 线	最大偏移距	炮 点 增 量	检波器增量
1	倾向	12km	75m	25m
2	倾向	12km	100m	25m
3	倾向	16km	100m	25m
4	走向	12km	75m	25m
5	走向	12km	100m	25m
6	走向	16km	100m	25m

图 9 为倾向测线全排列 (a) 和部分排列 (b) 叠前深度偏移剖面。全排列测线成像质量要高, 特别在低覆盖次数区, 地震分辨率明显提高。

四、其它方法技术

1. 测井数据在地面地震采集设计中的应用

法国 TotalFinaElf 公司的 P. Breton 强调, 针对任何地表条件的采集, 为了确定新的采集参数, 利用实验手段进行设计十分必要。要获得精确的成像、高分辨率地震数据以及地质体的振幅信息, 开展最佳的采集参数论证非常必要。首先要确定采集目标, 针对概查、详查、构造成像、储层描述等不同方面, 设计不同的采集参数及采集方法。

针对特殊的目标地质体, 在采集设计的基础上选择最佳的观测方式。我们注意到,

即使是在相同的区域, 上覆地层的油气地球物理特征也会明显地影响地震响应。例如, 针对三维高分辨率地震采集, 即使采集参数是最优的, 也很难保证地震资料有很高的分辨率。因此, 在采集设计方面要尽可能地利用各种实际数据。利用测井地震数据对模拟结果进行约束, 是确保模拟结果的一种有效方法。

在人们对表层地震数据精度要求越来越高的情况下, 如果一开始就大范围地进行地质调查, 要获得高精度地震数据和开展储层描述是非常困难的。因此, 地震采集设计必须要针对目标地质体, 相关的试验工作要在采集前完成。

1) 地震可行性研究的目标

了解针对目标地质体勘探的性质如, 概查、详查、地震成像或储层描述。

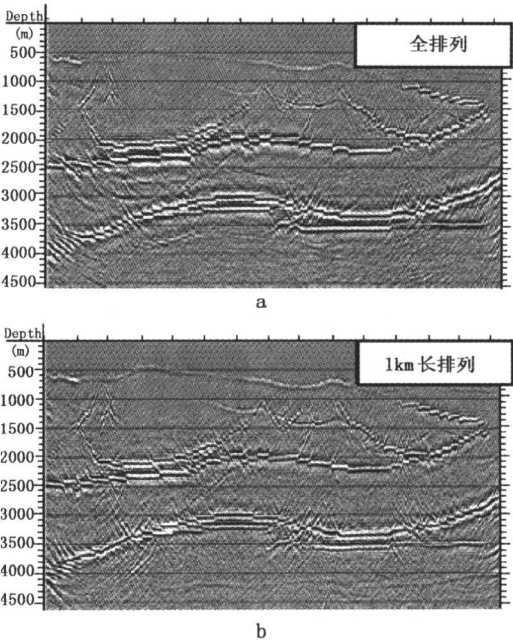


图 9 倾向测线全排列 (a) 和 1km 排列 (b) 叠前深度偏移剖面

针对地球物理特性和 HSE 质量控制,以提高地震数据质量和降低勘探成本为目的,设计采集参数和采集方法。

地震采集的可行性分析必须是包含各种信息的一个完整的工作。这样,对于每个问题需要精确模拟新采集方式的地震响应。

在条件许可的情况下,这项研究的关键是很好地利用井中数据。这可使我们尽可能定量地评价地质因素对地震的响应,以便规划采集设计。如基于井中数据(v_p , v_s , Rh_0),并结合 VSP、变偏 VSP 等数据,则地震模拟会更加真实。这些模拟可以解决地震问题,并对新的采集方式进行判别。其结果是基于测井数据的模拟可以优化相关的采集参数。

2) 地震品质分析实例

(1) 分析是否有足够的信号传到目的层。用 VSP 地震数据可以精确计算衰减参数。分析储层的有效频带和地震波衰减因子的影响。用这种方法从井中获得的 Q 质因子可以用于其它地震模拟。

(2) 计算目的层的分辨率。在考虑衰减因素后,可由测井数据完成 1D 地震模拟,并由此计算目的层带宽。这可以使我们分析在不同的地质条件下地震品质响应。

(3) 地震震源优化。按照几种震源合成地震 CMP 道集,针对高分辨率可行性研究,尽可能地增加目的层的高频成分而无需损失低频分量。

(4) 检测岩性和流体变化。结合测井数据计算含各向异性因素的 AVO-AVA 模拟,对近、远以及超长排列叠加地震数据用于储层描述的效果进行评价,并结合实际电缆的长度确定排列长度。

(5) 结合 AVO 分析结果提出最佳采集方式。最大排列长度的确定对有效分析 AVO 十分必要,而要做好 AVO 分析,首先必须计算排列长度和入射角度的关系。角度和排列长度之间的关系可以借助测井数据用射线追踪完成,如可能可以用有偏 VSP 地震数据精确计算角度和排列长度的关系。

(6) 减少采集痕迹 (footprint) 以便获得用于储层描述的真振幅信息。如果没有实际地震资料,可以用井资料来合成地震数据以便对三维地震采集方式进行认真的分析,在此基础上选择最佳的三维观测系统以确保地震振幅的精度。这种最优化过程将有利于地震解释,并获得更真实的储层描述结果。

(7) 预期分析可能出现的一些处理问题。利用测井数据所完成的全波形 1D 地震模拟可以评价影响地震资料品质的噪声,模拟地滚波、鬼波、多次波、转换波等,并分析它们对地震信号的影响。

上述分析表明,利用靶区测井数据可以就地震问题进行模拟和分析。通过分析还可以提高地震资料的品质和精度,并在此基础上寻求地震资料精度与采集成本等方面的平衡。

2. 基于波动方程的三维地震照射分析

在复杂介质和复杂构造情况下,地震勘探的最终效果,即对地下地质情况的真切把握,很大程度上取决于野外地震数据的采集。因为,如果目的层根本没有被地震波照明,接收不到来自目的层的反射,后续地震数据处理及成像技术再好,也不能得到该目的层的图像。另一个问题是照明是否最佳,主要体现在照明是否均匀。在变速介质情况下,地下反射界面的照明状况对地震波成像结果有重要的影响,主要有:(1) 成像噪音增大;(2) 振幅关系畸变;(3) 速度分析困难,精度降低。

基于波动方程的方法可以用于地震照射分析。在此基础上所形成的方法技术可提供复杂

地质条件下的地震照射技术。为了进一步论述该方法技术,这里以 SEG/EAGE 盐丘模型为例进行理论分析计算。

地震技术,尤其是叠前深度偏移技术的发展,使复杂构造成像精度显著改善。然而,我们仍然需要更好地了解影响成像的各种因素,而地震照明分析技术可使我们从采集开始对这些因素进行分析。长期以来,我们给出的地质构造比较简单,总是假定地下介质是或接近水平层状,照明分析技术是基于射线追踪原理。此时 CMP 道集就是共反射点道集。均匀且高次覆盖的观测系统相对较优,但实际情况要复杂得多。

原则上,在变速介质情况下,地下反射界面的照明状况应该用有效的共反射点覆盖次数来定义。遗憾的是,在此情况下,我们很难设计出一个观测系统,使得地下每一个弯曲反射界面上每一个点都有相同或近似相同的覆盖次数。

基于共反射点的单向波传播结果对观测系统设计很有指导意义。利用互易原理,通过分析地下界面的二次震源传播到地表的波场分布,可以得到波的最大能量在地表和地下界面的分布情况,根据能量在地表的分布可以指导检波器的布设;在地下界面上能量的分布情况可以指导炮点的布设。

全波有限差分法广泛地应用于地震波传播模拟。而就照明分析而言,它通常只提供总体照明,没有地震波传播的定向信息。为了完成定向分析,Wu 和 Chen (2002) 利用子波变换理论将地震波场分解成束状,使之集中在局部的空间和某个方向上,而后成功地进行照明分析。近年来,有关定向照明的方法技术已基本成熟。总的来讲,就是对目标体中地震能量的归类,获得总体和定向照明。

图 10 为定向照明图。通过定向照明,可以直观地分析复杂地质体在不同方向的地震波照射情况,从而有针对性地提出采集技术设计。

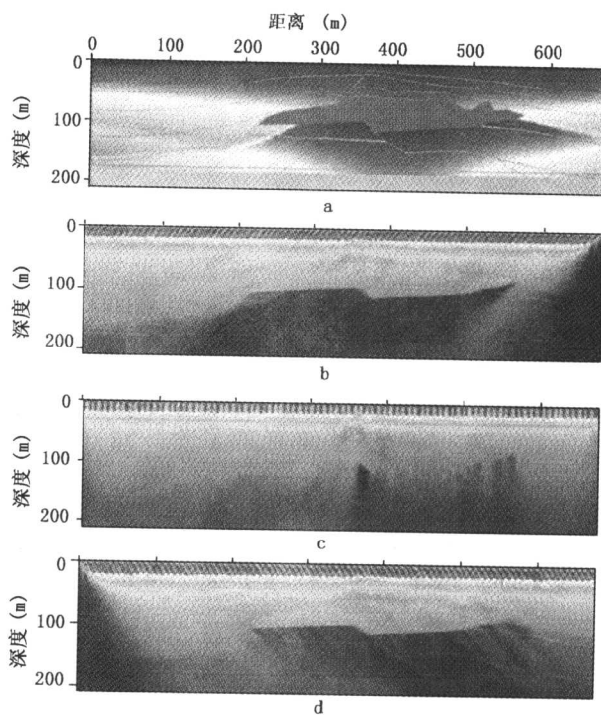


图 10 定向照明图

- a. 速度模型; b. 定向照明角度为向左 45° ;
c. 垂直照射; d. 定向照明角度为向右 45°

五、结束语

通过对近几年地震采集技术回顾以及本届年会采集成果总结,我们发现,常规地震采集设计已经趋于成熟,人们已将目光更多地投向复杂地质条件下的特观设计。在进行特观设计过程中,品质因素分析、采集处理解释一体化以及定向照明技术等备受关注。方法技术的更新以及计算机的发展给采集设计提供了广阔的发展空间。

目前,复杂地表条件主要为沙漠、高大沙丘、山地、水网等;复杂地质条件下的采集技

术主要针对的目标为盐丘、高陡构造、逆掩断层、溶洞、高波阻抗屏蔽、天然气水合物、各向异性等复杂地质体。针对上述问题采取的主要方法技术有采集技术设计、数模、物模、定向照明分析、各向异性条件下物理模拟等。上述方法技术经过多年的发展已经从理论探索，正演分析发展到实用阶段。结合油区的具体地质情况，目前急需解决的问题有：（1）如何利用和进一步发展目前已有的理论；（2）通过综合利用采集设计技术指导复杂地表和复杂构造区块地震采集工作；（3）让理论指导采集，并通过采集技术推动理论发展。

常规地震资料处理

谈大龙 张林松

一、引言

本届 SEG 年会有关地震资料常规处理的文章计 39 篇，大致可分为六类。包括多次波衰减（15 篇），噪声压制（7 篇），静校正（7 篇），插值与规则化（4 篇），动校正（3 篇）以及其他（3 篇，其中子波提取、地质统计和属性提取各一篇）。笔者主要介绍那些在实际资料处理中取得明显效果（通过图例）的方法与技术。重点关注它们的研究背景和处理实例，以便对处理及相关人员有所启发和帮助。

二、多次波衰减

多次波压制是地震数据处理中长期存在的复杂难题。有些技术如拉冬变换和 $f-k$ 方法已经用于压制多次波。然而，对叠前数据中的切除带和近偏移距道，其压制效果不很理想。尤其是不能估算复杂地质区域的三维地震数据中出现的目标多次波。FeiHong 等开发了一项新的三维波束形成技术，以压制三维地震数据中目标多次波。由于三维空间属性的复杂性，在三维波束形成设计中提出两个关键思想。首先，沿方位角剖面进行三维地震数据选排，以简化从三维到二维的传播时间与偏移距之间的关系，避免出现高成本与不稳定的结果；其次，引入动态面元划分方案，避免在一些方位角剖面上可能出现的覆盖次数不足，以便保持结果的稳定和最佳的分辨率。图 1 是在 NMO 校正后 CMP 道集基础上，应用三维波束形成压制目标多次波的实例（资料来自中国大庆油田）。图中，三维波束形成不仅较好地压制了 1~1.2s, 1.3~1.6s 及 1.8~2s 的目标多次波，而且还增强了 1.15s, 1.45s, 1.75s 及 1.95s 的一次反射波。图 2 显示的是对叠加数据用和不用三维波束形成技术的效果比较。一些反射特征不清楚的水平同相轴，是目标多次波的残余，而一次波的反射特征较易识别，剖面的信噪比和分辨率均得到改善。

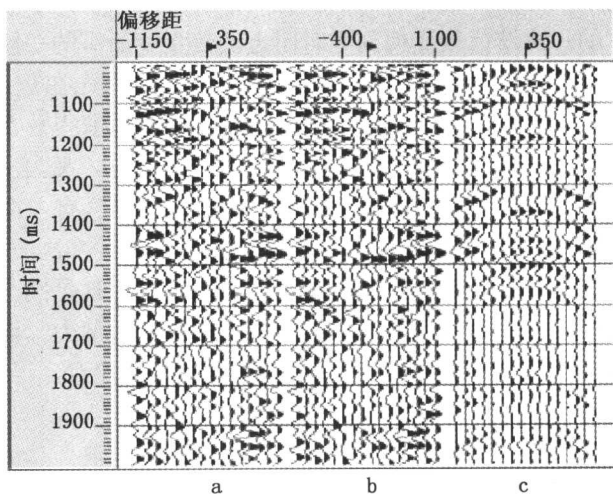


图 1 一个实际的 CMP 道集，数据来自大庆油田

a. 经 NMO 校正后的 CMP 道集；b. 估算的一次反射与随机噪声；c. 衰减后的目标多次

多次波散射的反馈模型显示，基于波动理论的多次波抑制可以通过输入数

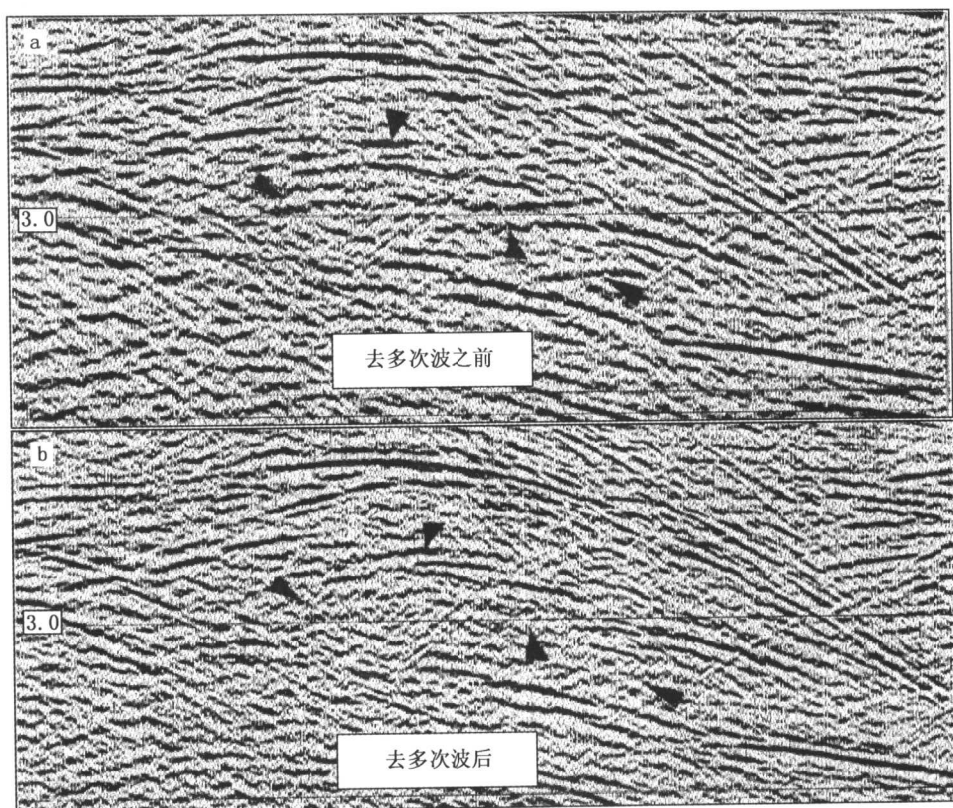


图2 应用三维波束形成技术衰减目标多次前 (a) 后 (b) 叠加效果的比较
数据来自中国华北大岗油田

据加权的褶积处理来完成。该处理要对一次波响应做出估算。A. J. Berkhout 等提出，加权的褶积处理可由一个加权的相关处理来替代。这个相关处理相当于一个‘焦点变换’，将所有的一次波能量变换到零时附近的焦点，所有的一阶多次波变换到一次波，所有的二阶多次波变换到一阶多次波等等。基本步骤为，首先在焦点附近 ($t=0$ 处) 从其它的反射能量中分离出带限能量；接着应用反焦点变换，以获得一次波响应；再变换多次波到一次波。这种替代方程在将多次波变换为一次反射的同时，又为多次波消去提供一个新的契机。图3是一个数字模拟实例。图3a, 3b 和 3c 分别显示含有一次加多次波、仅含一次波和仅含多次波的实例。图3d 是以当前褶积算法为基础提供的多次波消去的实例。图3e 是由相关算法提供的结果。注意，箭头所指处它似乎稍有改善。这是因为褶积算法中的最小平方减去，在多次波变换到一次波过程中总会造成少量的多次波漏失。而在相关模式中这种漏失可以避免。最终结果，图3f 显示多次波到一次波的变换。注意，尽管数据有些稍强的干扰，但所有的一次反射同相轴还是能较好识别。

复杂的水底常产生镜像和非镜像的多次波。总体而言，传统的二维面相关多次波消除技术 (SRME) 对多次波的镜像部分预测较好，而对非镜像部分 (由绕射产生) 常常预测不足。由于取样有限，确定性方法在估计和衰减多次波方面受到限制，而它们完全可能屏蔽储层。为此，Nurul Kabir 等人提出一个统计算法，用于衰减绕射多次波。该方法是对二维 SRME 方法的一种补充。SRME 的输出被分解为相干和非相干两部分。根据 SRME 的多次

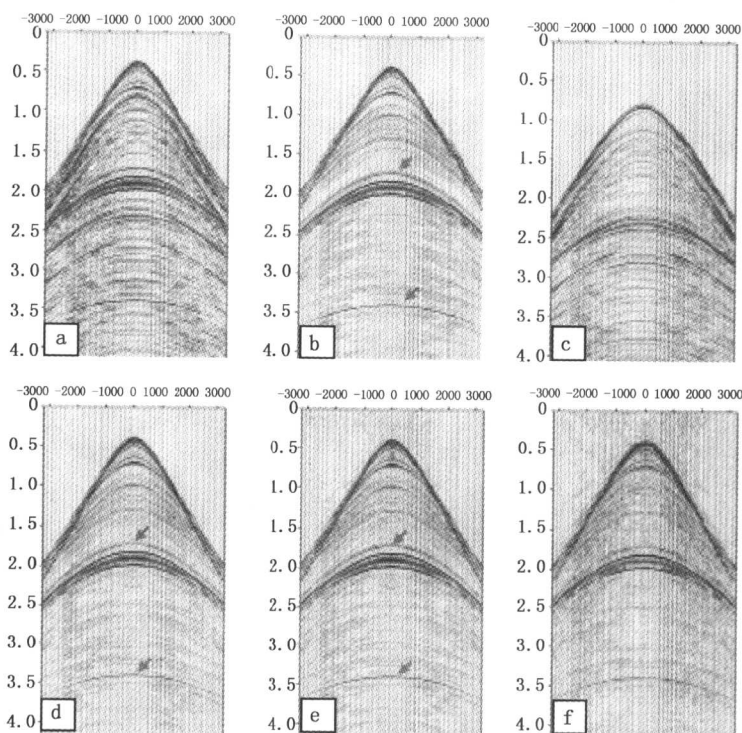


图3 模拟水平层数据的多次波压制效果

- a. 含一次+多次; b. 纯一次波; c. 纯多次波; d. 按褶积模式的 SRME;
e. 按相关模式的 SRME; f. 由多次波变换到一次波

波估算, 计算一个平滑权函数, 并将它应用到非相关部分, 然后将加权后的非相干数据添加到相干数据中, 以生成最终的多次波衰减结果。相应的处理流程见图 4。

人们通常对于海上资料的鸣震较为熟悉, 而在陆地勘探中, 这类噪声常被忽略。这是因为陆上鸣震通常较海上资料弱, 而且其周期随风化层的厚度变化。Zhang Ruijie 等人根据塔克拉玛干沙漠地震资料分析指出, 该区存在很强的沙丘鸣震干扰, 其视周期与地表高程有关, 即沙丘的高程越高, 鸣震的周期越长。而且鸣震的周期同海上勘探一样, 不稳定。因此, 采用常规方法, 如依赖视速度差的 $f-k$ 滤波以及利用固定预测步长的反褶积方法来消除这种

干扰是非常困难的。此外, 鸣震的频率高于深层反射的频率, 因此常规的频率滤波也不能奏效。为此提出一种基于地表一致性可变预测步长的预测反褶积新方法。预测步长由 Δt_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 提供。以便计算地表高程与潜水面之间的厚度, 以及沙层的速度或静校正值。根据下列等式

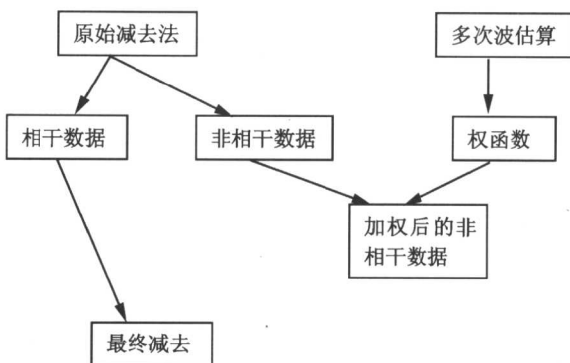


图4 加权减去法的处理流程