

油气地球物理技术 新进展

—— 第 82 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油物探技术研究院 编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

油气地球物理技术新进展

——第 82 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油物探技术研究院 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据 2012 年美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 第 82 届年会论文详细摘要分专题编写而成。内容包括:地震数据采集新技术、地震偏移成像技术、地震速度估计、静校正及数据规则化与噪声衰减、地震噪声衰减及多次波消除技术、地震解释技术、储层预测和油藏描述技术、全波形反演 (FWI) 技术、地震反演技术、AVO 反演技术、多波多分量地震勘探技术、井中地球物理技术、VSP 技术、时延地震技术、地震理论与各向异性、岩石物理技术、波场正演模拟技术等。本书基本反映了近年来勘探地球物理技术,特别是地震技术的最新发展。

本书可供从事地球物理勘探技术研究和应用的专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气地球物理技术新进展——第 82 届 SEG 年会论文概要/
中国石化石油物探技术研究院编.
—北京:石油工业出版社,2013.9
ISBN 978-7-5021-9729-2

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 (2013) 第 197472 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

编辑部: (010) 64523533 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.25

字数: 390 千字 印数: 1—1000 册

定价: 98.00 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 82 届 SEG 年会论文概要》
编 委 会

主 任：张永刚

副主任：曲寿利

编 委：管路平 赵改善 杨勤勇 胡中平 曹 辉
关 达 魏 嘉 吕公河 王咸彬 高 林

目 录

地震数据采集新技术	丁 伟	刘 斌	(1)
地震偏移成像技术	郭书娟	方伍宝	(13)
地震速度估计	潘宏勋	孙开峰	(23)
静校正及数据规则化与噪声衰减		孙晶梅	(36)
地震噪声衰减及多次波消除技术		隋俊杰	(49)
地震解释技术	李红敬	吴 伟	(61)
储层预测和油藏描述技术		黎 娜	(72)
全波形反演 (FWI) 综述	索重辉	吴 伟	(85)
地震反演技术	孙振涛	刘庆文	毛 凌 (100)
AVO 反演技术	刘卫华	李 洋	陈 泽 (119)
多波多分量地震勘探技术	唐建明	吴 波	王 荐 (137)
井中地球物理技术	李 霞	张荣忠	(149)
VSP 技术	张荣忠	李 霞	(163)
时延地震技术		陈 伟	(177)
地震理论与各向异性		高 林	(189)
岩石物理技术		马中高	(198)
波场正演模拟技术	肖云飞	余德平	(222)

地震数据采集新技术

丁 伟 刘 斌

(中国石化地球物理公司胜利分公司)

一、引言

第 82 届 SEG (美国勘探地球物理学家学会) 年会于 2012 年 11 月 4 日至 9 日在美国内华达州拉斯维加斯隆重举行。SEG 是一个权威的全球性勘探地球物理专业学会, 每年举办一次的学术年会暨展览会吸引了全球不同国家和地区、不同文化背景的数以千计的地球物理学家、相关行业的研究人员和厂商参加。

本届年会学术报告共分采集方法设计、多分量地震、近地表、地震建模、偏移、多次波、噪声衰减、地震速度估算、延时、VSP 等 26 个专题, 对当前涉及的地震勘探难点和热点问题进行了探讨, 并提出了许多好的方法。本文将从复杂地表地震采集技术、目标成像设计技术、基于可控震源的超多道数陆上采集技术、可控震源激发技术、低频采集技术, 以及海洋地震采集技术等 6 个方面介绍目前油气地球物理数据采集技术的新进展。

二、复杂地表地震采集技术

1. 节点系统解决复杂地形多模式地震采集

2011 年 3 月至 4 月, Apache 公司在阿拉斯加州东南部的 Cook Inlet 近海地区成功地完成了 2D 地震采集试验项目。Cook Inlet 是世界上潮差第二高的地区, 有的地方平均潮差高达 9m。该试验是为了调研节点式采集设备的可行性和四季施工的可能性, Apache 公司针对实际情况进行了不同仪器记录系统、检波器组合、井深药量、大偏移距接收和高潮时采用深井大药量激发记录潮水噪声试验。试验线选在 Cook Inlet 西岸的 Redoubt 海湾内, 长约 29km, 涵盖了山地、沿海平原、潮间过渡带 (TZ) 和海洋四种地形 (图 1)。

整条试验线采用两种仪器记录, 即电缆遥测系统和节点系统。为了与陆上检波器进行线性组合对比, 除了在海上布设节点外还在陆上常规检波器旁布设了 1.6km 的节点设备。除检波器对比试验段采用 25m 道距外, 其他地方道距都是 50m。遥测系统中陆上采用检波器串, 每串 6 个检波器, 过渡带和浅水区采用二分量检波器 (速度和压电检波器)。海上节点由压电和三分量检波器组成, 该设备可以在水深 700m 以下施工。陆上采用炸药激发, 海上采用气枪激发。

在对比所有的试验数据的基础上选择了一种最优的适合于陆上和远岸 3D 勘探的震源参数。试验线中不同采集环境下的地下地质构造都得到了很好的成像 (图 2)。这些激发接收参数为后续海陆过渡带三维采集提供了参考依据。

2. 有线和无线相结合解决陆上障碍区采集设计问题

在人口稠密地区, 采集系统往往不能按照设计点位进行布设, 导致设计差别较大, 采集

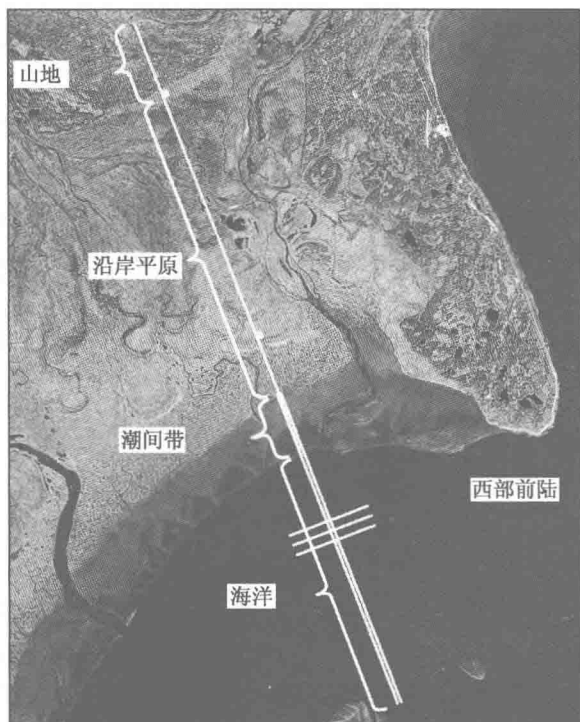


图1 试验线的具体位置^①

的资料质量较差，严重影响勘探效果。在意大利北部一个人口密集的小镇采用有线和无线设备同步进行数据接收，解决了障碍区的设计问题。该次试验在面积 22.5km² 范围内放置了 4707 个无线接收点，完成了 2707 炮。

试验采用 960 道接收，8 个排列，线距 300m，道距 30m，炮点 60m，炮排 180m，40 次覆盖。采用炸药激发，井深 9m 或 12m，药量 1kg 或 2kg。物理点布设见图 3。

无线优点：(1) 提供更高的覆盖次数；(2) 人员可以减少三分之一；(3) 克服了工区内河流多、桥梁少的困难，施工时间可以节省一半；(4) 在采集数据上，与有线没有差异（图 4）；(5) 减少有线施工存在潜在的 HSE 风险等。采集时，无线设备和有线设备移动距离相比平均每道分别为 30m 和 65m，

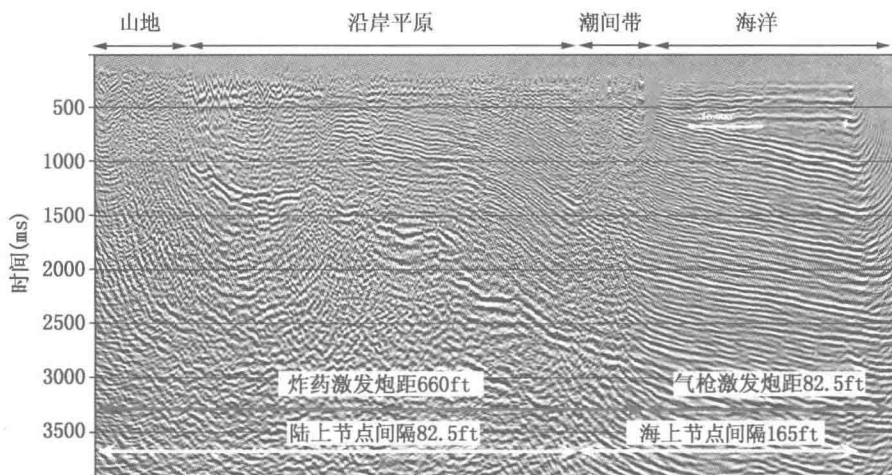


图2 2D 试验线偏移剖面

横向最大偏移距离分别为 206m 和 139m。在设备重量上，由于单点无线设备需要单独电瓶提供电源，这样系统的重量反而比有线设备重，采集前他们对电瓶重量（容量）单独做了试验。通过对 7Ah，9Ah，15Ah 和 18Ah 容量的电瓶进行对比试验，认为 7Ah 和 9Ah 可以维持 5~7 天施工，适合施工效率高和人力成本低的项目，而 15Ah 和 18Ah 类型的电瓶重，适合排列滚动少、施工效率低和人力成本高的项目。

① 本书图件源自 SEG 第 82 届年会论文摘要，对彩色说明感兴趣的读者请查阅相关论文。

三、目标成像设计技术

1. 利用环形全方位观测和模拟叠前局部成像技术进行浅层气下目标成像

研究靶区位于马来西亚，目标构造成像受上覆含有浅层气的高屏蔽、高衰减地层所影响。构造位置与南中国海大裂谷相连接。研究目标是预测怎样减小屏蔽层影响，提高成像效果。为此，Schlumberger 的 Mike Branston 博士提出利用地质模型进行照明分析，且将模型的照明分析应用三维射线追踪方式在地质模型上进行模拟。

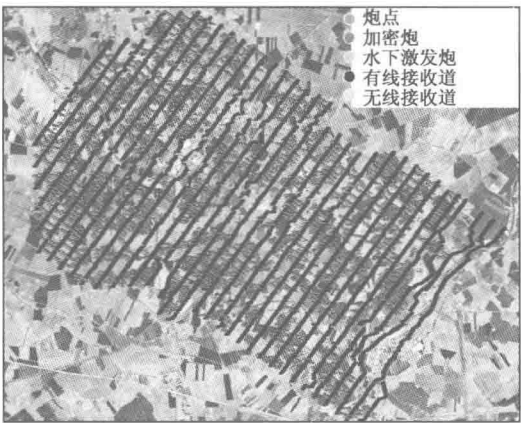


图3 工区炮点和检波点布设图
参见 ACQ2.7, Figure 1

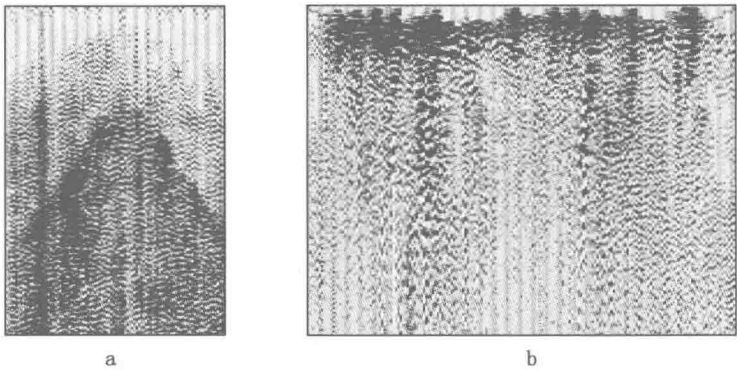


图4 有线和无线采集资料
a—原始单炮；b—最终偏移叠加

措施：(1) 采用环形观测系统（即在测线是曲线甚至是圆的情况下采集全方位三维地震数据）而不是常规正交观测系统，增加方位角采样，提高覆盖次数，提高倾角成像精度；通过建立地球衰减系数模型和地质模型，对不同的观测系统进行射线追踪、地质照明对比分析。(2) 模拟叠前局部成像技术，该技术是利用合成模型与照明分析获得目标地层的其他信息（如倾角、合成图像等）。他们通过对3个不同构造位置的宽方位观测系统进行倾角分析，研究反射信息与方位角、倾角的关系，最终得出：环形宽方位观测系统能采集到目标地层更大范围、更多方位的反射信息，增加了目标地层上的反射范围。通过增大方位角与覆盖次数，目标地层上的反射振幅可以被显著地提高（图5）。

2. 深水盐下目标成像设计

这是墨西哥湾深水海域盐下成像设计的一个例子，论述了一个先进的野外采集设计的工作流程。研究人员通过一系列试验步骤，说明该工作流程对于降低勘探风险与获得更好的野外地震数据具有指导意义。主要步骤有：(1) 3D 可视化分析；(2) 2D 建模与逆时偏移成像 (RTM)；(3) 全 3D 建模与 RTM；(4) 临界照明分析。

通过最终成像结果（见图6）可以看出最大炮检距达到14km，箭头所示的地层接触关系得到准确落实。盐下目的层反射成像较弱部分原因是采集处理中限制最大炮检距（4~

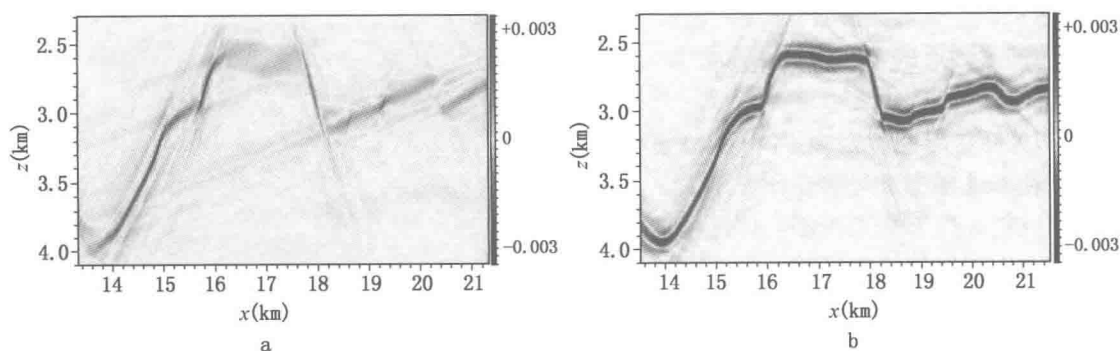


图5 常规正交采集与环形全方位采集资料的成像效果对比
a—常规窄方位采集；b—环形全方位采集

7km) 造成的, 可以在采集中增加电缆的长度来改善成像效果。然而, 当岩体表面的临界角反射成为影响成像的主要原因时, 不管用多长的电缆都无济于事。研究结果表明, 该地区由于膏盐底面和基性岩地层的临界反射角度超过了临界角, 因而无论如何盐下位置也无法获得成像。因此, 在海上作业时, 无需使用过长的电缆进行采集。

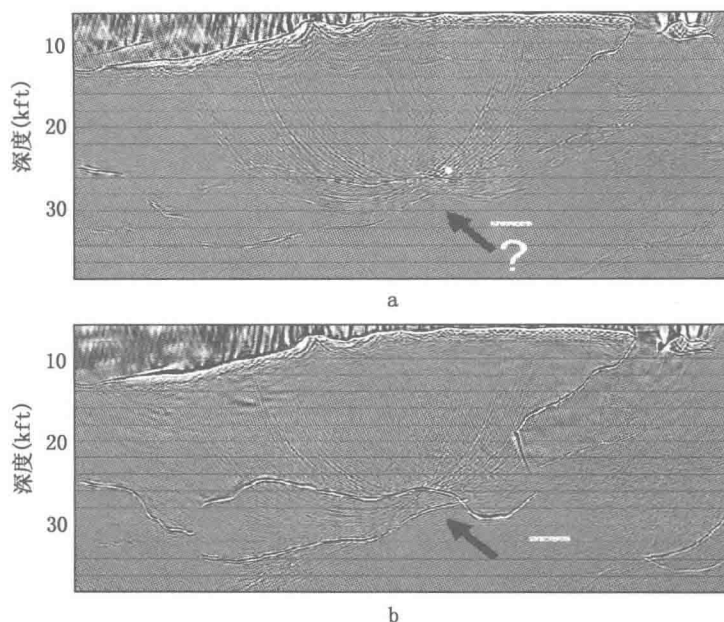


图6 盐下地层的RTM成像结果
a—最大偏移距为4km；b—最大偏移距为14km

四、基于可控震源的超多道陆上采集技术

2010年, 沙特阿美以2480000lb可控震源激发、100000道接收的方式开展了宽频带全方位陆地采集。可控震源低频率扫描设计, 生产效率每天超过8000炮, 每天6TB以上高质量地震数据采集, 有效增加了地震数据的价值(图7)。为了保护全方位信号振幅, 精心选择了真振幅处理的参数。

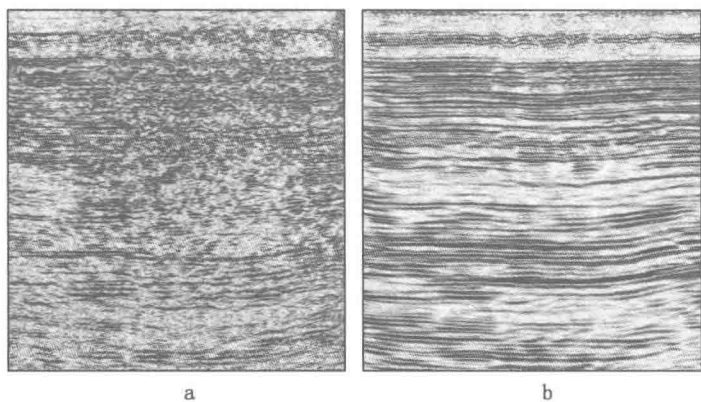


图7 叠加剖面
a—2D 试验结果；b—3D 全方位角成像

在观测系统方面：选择了一个正交、全方位、对称推拉式观测系统，炮点重复一次，48线接收，每条线 1680 道，炮线距和接收线距 125m，炮间距和道间距 12.5m，最大偏移距 6000m，面元 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ ，覆盖次数 9216 次，检波点密度 $640/\text{km}^2$ ，炮点密度 $1280/\text{km}^2$ 。震源施工采用无桩号施工，共 8 组，每组 2 台，采用最大位移扫描方式，12s 扫描长度，扫描频率 3.5~90Hz，基本出力 56000lb。在保证生产效率和采集质量方面，用单点加速度检波器替换组合接收，减少了野外工作量，每个组合增加两个可控震源车，接收排列使用实时 QC 监测器。

这个采集实例验证了宽频带信号可以从低信噪比原始数据得以恢复，并且增加 2~8Hz 低频信息，确保了叠后反演效果，并减少低频数据的限制（图 8）。通过这种高分辨率阻抗值阶跃变化的解释，可以更精细地分辨地质体，更准确地提取地质体的岩性信息，进行更精确的油藏数值模拟。

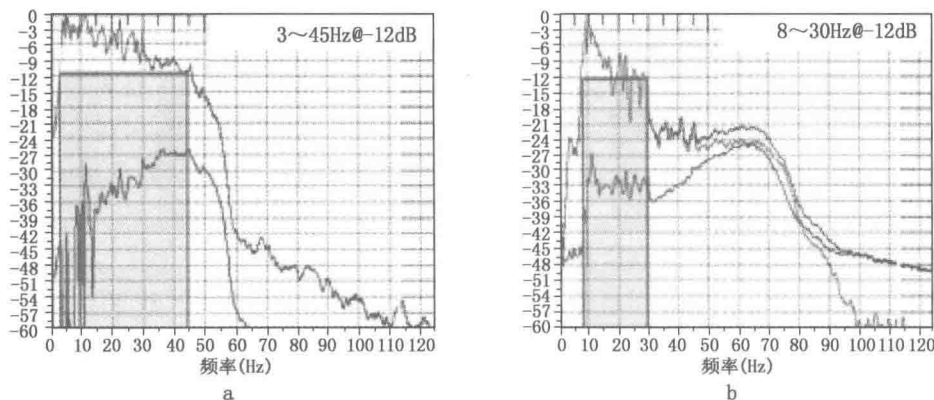


图8 偏移叠加后的频谱分析
a—恢复后；b—恢复前

五、可控震源激发技术

1. 低震次高覆盖对比试验

区块位于得克萨斯州二叠纪盆地、美联得克萨斯州西北的 14mile 处。Dawson 地球物理

公司、Devon 能源公司与 Fasken 石油公司利用可控震源作为脉冲震源进行三维野外试验，并用不同方法对 5 个类似的三维工区（面积为 6.25km^2 ）进行了数据采集和处理，测试的目的是直接比较不同的采集方法得到的数据的特点和质量。

试验使用的采集参数：炮点距和检波点距都是 220ft，观测系统为 16 条固定排列，每个排列 60 道，接收线距为 880ft，最大覆盖次数为 660 次，扫描频带为 $4\sim96\text{Hz}$ 。

通过多次不同的试验，采用单次扫描、低能量、高覆盖与常规的多次扫描进行对比，结果（图 9）表明，采用常规的方法采集到的资料在叠加后得到的数据最差，采用少震次高覆盖的资料最好。并进一步证明，少震次多覆盖叠加效果好于多震次少覆盖的效果。

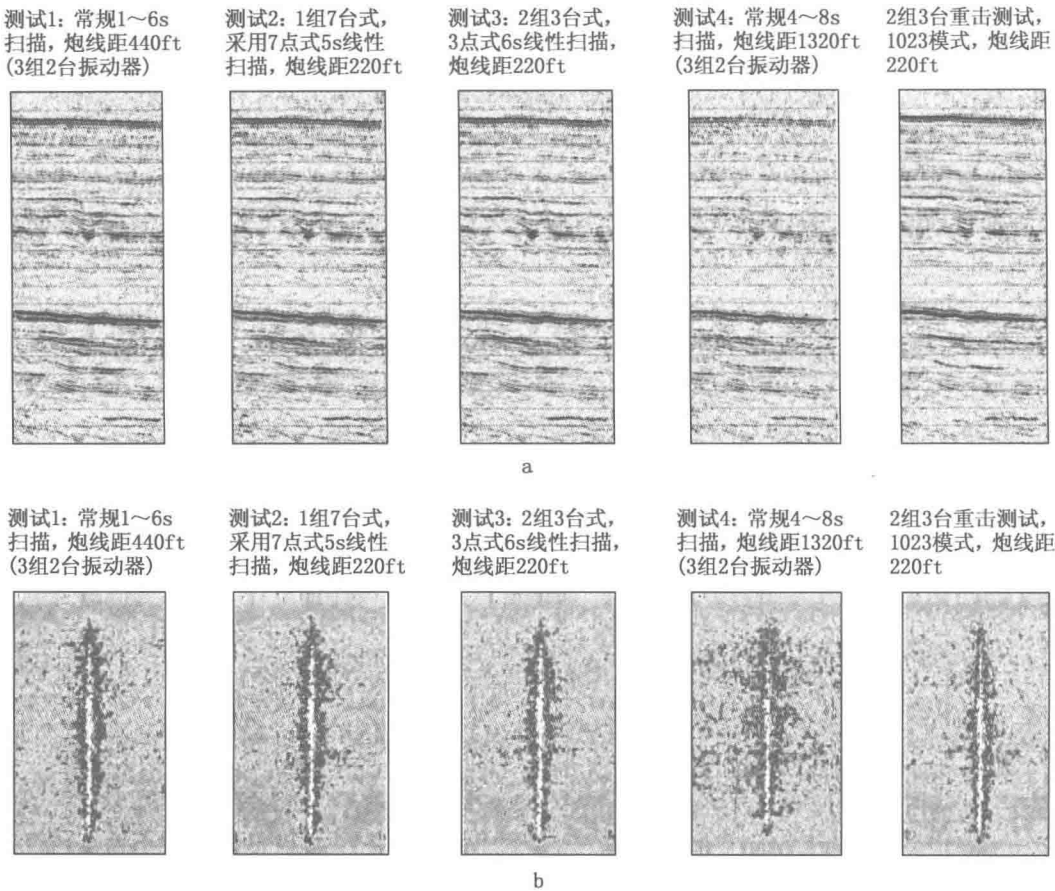


图 9 不同震源测试结果对比
a—叠加剖面对比；b—偏移数据 0.5~1.5s 时窗 $f-k$ 分析对比

2. 通过采集、处理和反演联合扩展可控震源低频技术

陆地勘探中，可控震源激发、接收技术，以及低频地震技术的进步促使阿曼石油公司引入了一个新的标准：扫描长度 9s、自定义频率 $1.5\sim86\text{Hz}$ 的可控震源激发技术。经过广泛的野外试验，弄清了许多因素如位移作用、最大泵流速率、活塞冲程等对震源激发效果的制约。

除了正常处理流程外，增加了地震数据处理流程，用来修正和恢复低频信号，首先用相位滤波校正电子设备对低频的影响；其次用检波器校正补偿 10Hz 检波器的数据。

在标准的地震生产中，采用可控震源激发、10Hz 检波器接收，得到低频 1.5Hz 的信号是可能的，如果扫描长度小于 9s 将无法得到足够的能量输入和生产能力。与可控震源能够较好地修正相位差异一样，常规的处理技术有能力保存检波器的低频部分，初步结果显示深层目标连续性较好，低频的存在和大炮检距有利于全波形反演（FWI）。通过全波形反演能够将低频信息与深层地质目标紧密联系起来。随着处理技术的提高，将会从低频信息中获得更多益处（图 10）。

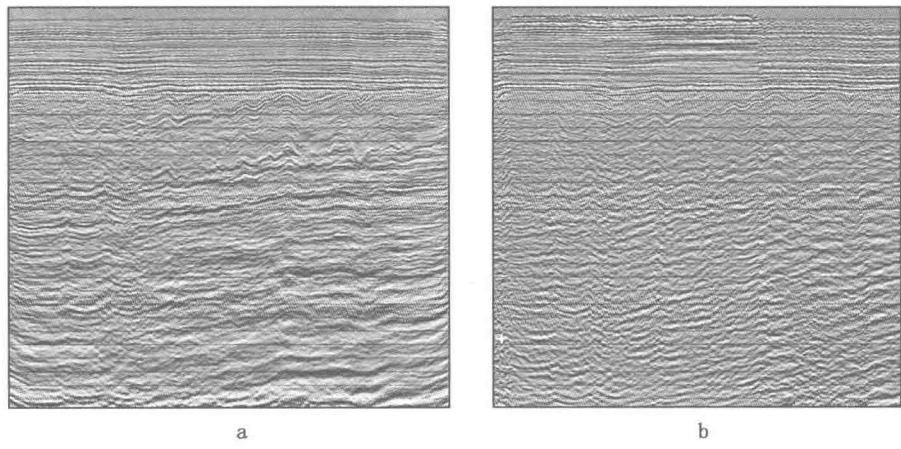


图 10 阿曼南部剖面
a—新剖面；b—老剖面

六、低频采集技术

1. 用 2Hz 和 10Hz 检波器联合采集低频数据的可行性和价值

2012 年 Stephen K. Chiu 等采用改进的低频率可控震源激发，用 2Hz 和 10Hz 的地震检波器同时接收进行了低频三维地震采集试验。野外研究的目标是：（1）用低频可控震源和 2Hz 低频检波器记录低频信号的可能性；（2）与 10Hz 检波器相比，2Hz 检波器对低频信号提高的程度；（3）通过两种检波器接收效果对比，为 10Hz 检波器采集低频信号提供新的思路。

试验过程：（1）用低频可控震源激发。震源参数为线性扫描时间 24s，扫描频率 2～88Hz，驱动幅度 90%，每个点重复扫描 4 次；（2）用 2Hz 和 10Hz 的地震检波器联合接收地震信号。

试验结论：使用一种改进的低频可控震源和 2Hz 地震检波器采集取得了可喜的成果（见图 11）。正如预期的那样，2Hz 的地震检波器比 10Hz 检波器记录的低频信息更丰富，2Hz 叠加剖面低频信号可到 2Hz，通过反褶积可拓宽到 1Hz。两种检波器的匹配滤波数据集提高了 10Hz 检波器的低频信号。

2. 常规地震检波器接收低频信号能力试验

2011 年 9 月上旬，加拿大卡尔加里大学的 CREWES 团队联合 Husky Energy 和美国 INOVA 公司在 Hussar Alberta 地区（图 12）开展了一次独特的先导性试验，目的是用现代的激发和接收装备，在不削弱高频成分的情况下尽可能地扩展地震频带的低频范围。旨在测

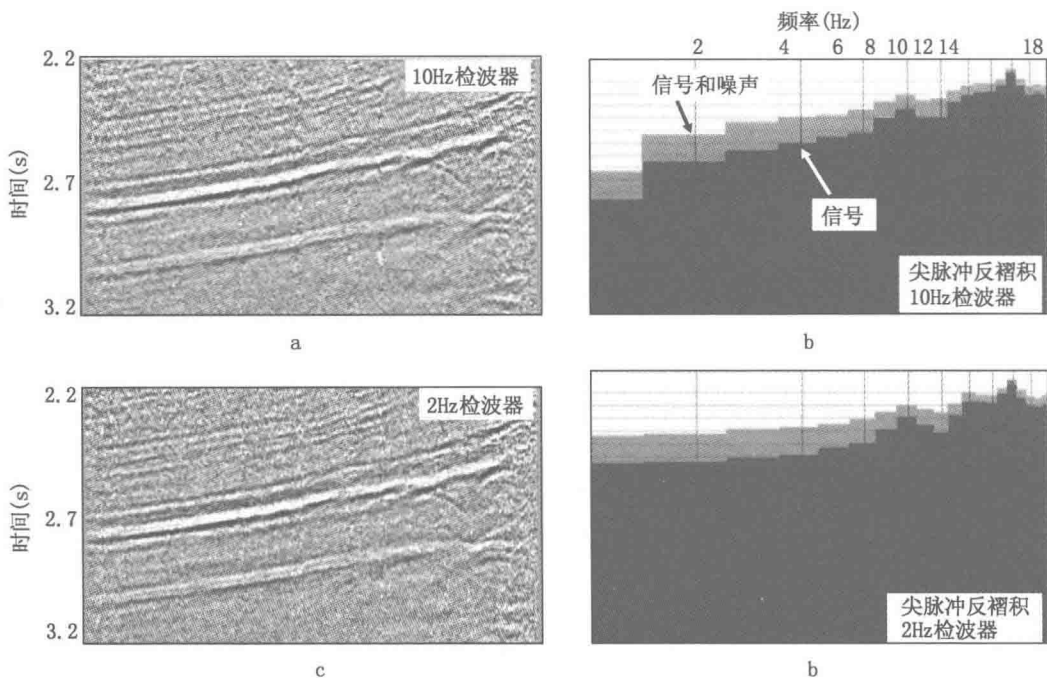


图 11 反褶积后的 CDP 叠加和选定窗口的振幅频谱

a—10Hz 检波器叠加剖面；b—10Hz 叠加剖面频谱分析；c—2Hz 检波器叠加；d—2Hz 叠加剖面频谱分析

试常规震源和检波器在低频域的性能。采用了炸药震源和可控震源两种激发方式。检波器测试包括矢量数字检波器 (MEMS)、4.5Hz 和 10Hz 的检波器。炸药震源可产生最强的低频信号，而可控震源能够通过低频扫描有效降低到 2Hz 扫描。两种检波器通过响应校正可恢复低到 1~2Hz 的低频信号，矢量检波器可产生频率非常低的强信号，但是随之也带来了噪声增强的问题。

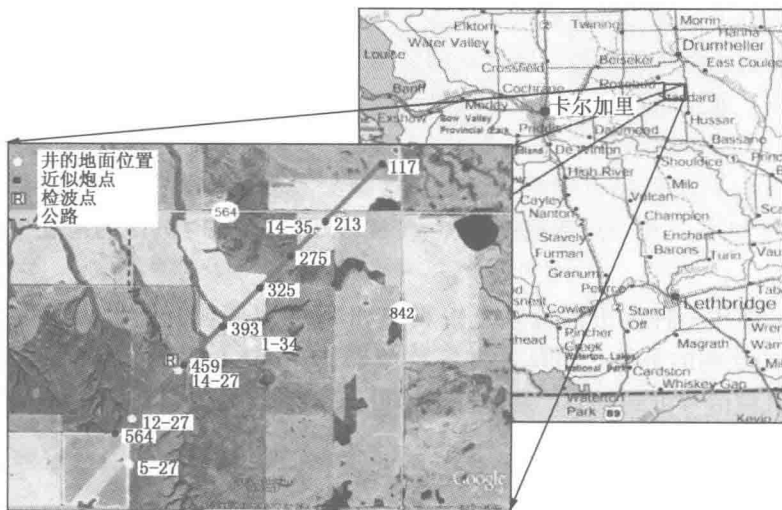


图 12 Hussar 测线与加拿大卡尔加里的位置关系

通过测试，我们发现与可控震源相比，炸药是一种更好的低频震源（图 13），但是定制的可控震源可以产生低到 2Hz 的低频信号，常规检波器也能较好地接收到低频信号，为了得到更好的结果有必要校正常规检波器。Vectorseis 数字检波器能较好地接收到 2Hz 以下的信号，但记录里噪声变得较明显。现代数据采集的常见做法是，假设反褶积能够纠正检波器在低频域的固有反应。然而，采用数字检波器接收却增加了干扰，目前这一问题的解决方法还在进一步的研究中。

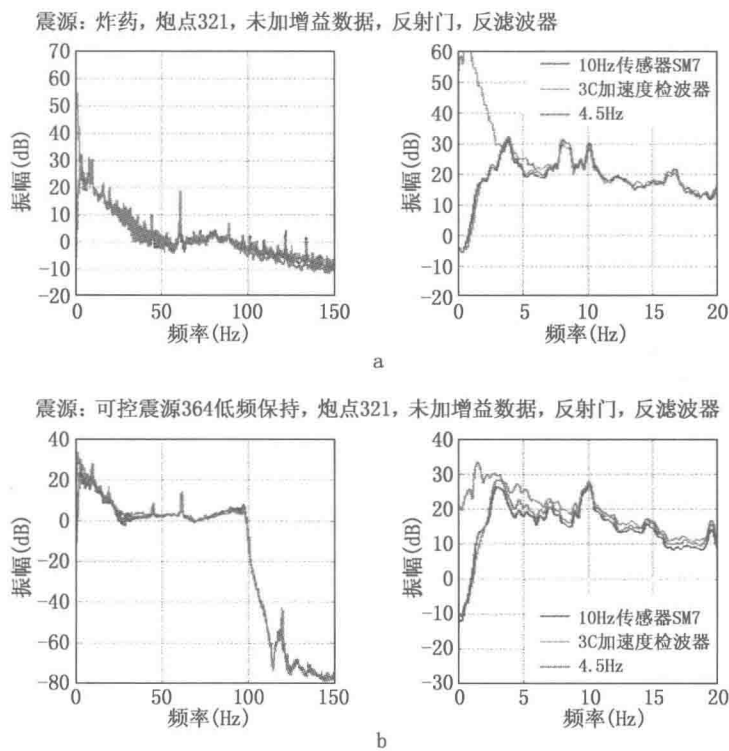


图 13 三种不同检波器的频谱性能
检波器均已做了响应校正，其中每个图中右侧是左侧低频部分的放大。
a—炸药震源激发；b—364 可控震源激发

七、海洋地震采集技术

1. 多船环环观测方式

多船环绕激发是一种拖缆采集方法，能提供全方位、长偏移距的地震数据，这种技术从 2010 年起用于墨西哥湾盐下勘探。这种技术以往的典型组合形式包括两个拖缆船和两个震源船，每个船是单个震源组合。由于有两个接收船和 4 个震源，称之为 2×4 结构。每个船单独行驶一圈，一圈内的激发间隔为 150m。图 14 显示的是一个环绕圈的激发分布。新的多船环绕激发设计有 8 个震源组合，其中 4 个同时激发。这种方式不需要增加部署双震源组合的船数，称之为 2×8 结构。拖缆船上震源组合的间距是拖缆船间距的一半，是震源船上震源组合的 4~6 倍（图 14）。

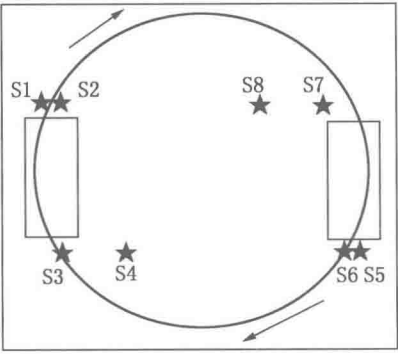
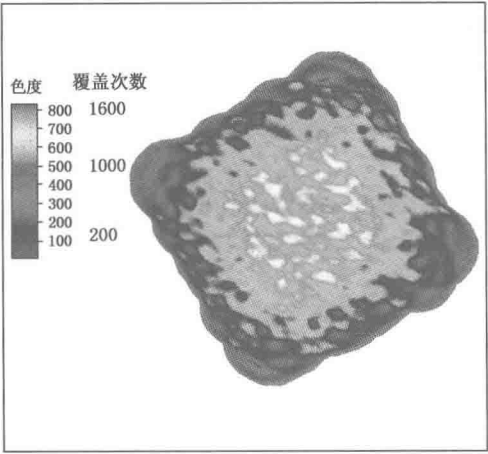


图 14 八震源组合的多船环绕激发示意图

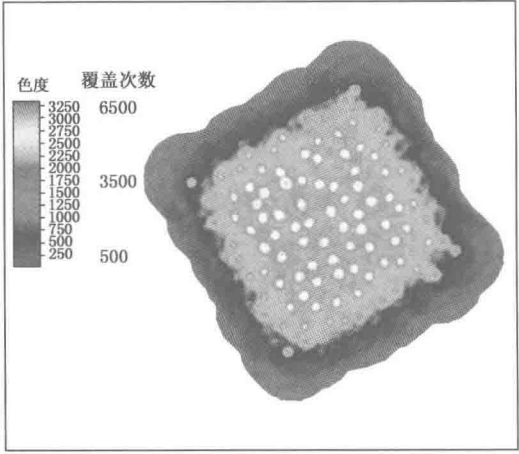
设计方法的最大优势在于改进了震源采样：激发次数增加了 4 倍。图 15 是传统设计方法和新设计方法的覆盖次数对比图。2×8 方法的多船环绕同步源激发在地球物理方面的主要优点是提高了信噪比，原因是改善了震源采样和增加了震源密度。这种方法在储层复杂地区或激发能量弱的地区尤其适用。这种新的设计可以允许通过增加 dx 、 dy 参数提高接收效率。

2. 海上独立同步震源现场试验

独立同步震源方法（ISSTM）不同于其他海洋同步源方法，独立同步源方法的震源之间彼此独立，彼此之间的空间位置很小。陆地独立同步震源调查依靠震



a



b

图 15 覆盖次数分析

a—传统的 2×4 设计方法；b—新设计方法 2×8 模式。参见 ACQ1. 6, Figure 3

源起始时间的自然随机性，取决于激发点与响应点之间的振子移动。海洋震源有一个规律必须引起警惕，即，当我们在一个位置上激发的时候，一般来说应存在足够的随机性，允许实现良好的信号分离，但是在某些特殊的情况下，光考虑自然随机变量显然是不够的。为了避免我们所不期望的特殊现象，我们必须对震源启动时间加入一个额外的随机性变量。

英国 BP 石油公司对同步震源所做的努力的最终目的是希望比传统采集方法获得更好的地震资料，并且花费更低的成本和提高采集效率。这项工作在陆地上已经获得了成功，低成本、高效地获得了高质量的地震数据。在过去的几年中，他们将其应用到海洋环境。2000 年，英国石油公司在墨西哥湾的绿色峡谷区进行了第一个海上同步震源试验，目的是评估海上同步震源采集。

方法：调查排列是一个深水下的海底节点测试。18 个节点被沉放在 1400~2100m 的水中，两条气枪船被用来进行 52 条激发线的激发。激发点线距离均为 50m，有点类似于英国石油公司在利比亚的陆地同步震源采集观测系统，但是，其接收点的距离要比陆地采集稀疏得多（426m）。

试验结论：绿色峡谷同步震源试验和瓦尔霍地区的模拟非常令人鼓舞。这些试验都是受我们先前对同步震源研究经验的指导。这些采集震源观测系统一般与陆上同步震源调查相匹配，海上震源船之间存在一定的距离，这一距离尽最大的可能允许其信号在任意时间进行最佳的运动学分离。我们发现，可以应用独立同步震源的方法获取地震图像，基本上与以往传统的单一震源的地震调查是等同的。这些震源测试坚定了我们在同步震源研究方面的信心，我们可以从一条简单的节点线试验扩展到生产调查。这一方法不仅与传统调查方法一样，能够获得高品质的地震资料，而且还能以更低的花费，更高的效率完成采集。

3. 设计多分量（4C）拖缆获得高保真度记录

根据 Robertsson 等人 2008 年发表的文章可知，一个多分量（4C）拖缆不仅能够测量标量压力波场，而且可以测得 P 波粒子运动的 3 个分量。这些新的测量方法也可以用于实现压力波场的内插和去虚反射，并能够利用压力和压力场的纵测线方向分量来实现拖缆接收点之间任意一点的地震波场重构。要使提出的这些方法能应用于实践，则需要 4C 测量有较高的保真度。研究人员分析了影响信号保真度的一些因素，包括拖缆的机械设计因素、传感器的要求等，并展示了一个 4C 多分量拖缆的实例，表明在这样一个 4C 多分量拖缆中能够记录到高保真度的信号。

方法原理：诺里斯等（2006）将 OBC 的保真度定义为“通过完整的记录系统记录的真实地面运动的精度”。这个定义意味着 3 个向量的粒子运动之间的矢量保真度。将真实的海水运动取代真实的地面运动后该定义可以适用于海底拖缆接收。因此，多分量拖缆不仅应该衡量通过水听器标量的压力场，也应该能够记录包括和地震波传播相关的海水的粒子运动。

通过研究，他们发现 4C 拖缆能够记录高保真度的信号。同时，要获得高的信号保真度，必须具备以下几点：（1）精细的拖缆结构研究；（2）认真选取机械参数；（3）高保真度粒子运动传感器；（4）真实记录；（5）传感器方位校正。

4. 海洋宽频采集技术

PGS 公司的 Stian Hegna 提出采用增加采集系统组分获得宽频带地震数据的方法。比如，在接收方面，采用压力和速度传感器接收信号；在激发方面，采用不同深度的水下震源进行激发，或者是采用不同水下组合方式的震源排列进行激发。这样，可以通过采集因素来校正地震数据的方法获得最优的宽频带地震资料。校正后的地震数据更加接近于地表产生的脉冲响应。

（1）在接收端，通常使用压力传感器进行接收。压力测量不管如何都会受到频带宽度的局限。引起这个问题的主要原因与来自海平面的反射有关，通常被认为与检波点的鬼波有关。对质点速度的测量方法除了压力场之外，还提供了两种补充测量法。通过两种测量方法的结合，有效减弱了振幅谱中的陷波程度，提高了整个频谱的信号水平。

（2）在震源端，根据带宽也会有一些限制作用。主要的限制是和炮点端虚反射、气枪放射的波场以及震源阵列的方向性有关的。为了提高频带宽度，可以使用两个震源相互补充。

通过研究表明，在采集系统中设计增加一些补充因素是可行的（图 16）。这样，可以通过改变采集因素的影响效果来校正地震数据，从而获得最优的宽频带地震资料。校正后的地震数据更加接近于地表响应的尖脉冲。

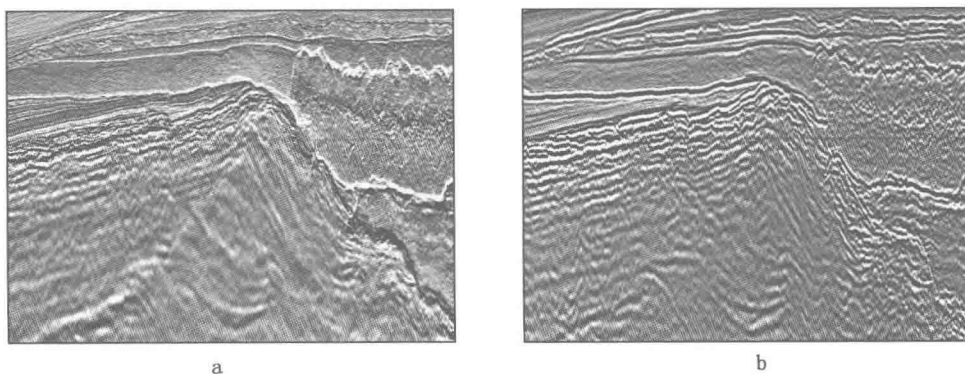


图 16 在挪威海域的摩尔边缘区域采集的实际资料

a—某一区域的常规地震数据；b—同一区域使用补充方案设计的观测系统所采集的数据。

该采集系统由装有双重传感器的拖缆和一个在时间和深度域范围分布的震源组成

八、认识与体会

通过认真的调研、梳理和分析，得出了以下几点认识与体会：

- (1) 采集装备的发展极大地促进了地震采集技术的进步；
- (2) 目标成像设计和超大道数采集技术成为发展趋势；
- (3) 可控震源安全高效激发技术应用越来越广泛；
- (4) 低频地震勘探技术成为关注热点；
- (5) 用同步源和多分量拖缆开展环形采集为目前海洋勘探的主要趋势。