

油气地球物理技术 新进展

—— 第 85 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 85 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 2015 年美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 第 85 届年会论文详细摘要分专题编写而成。内容包括: 陆上地震数据采集技术、地震数值模拟技术、多次波衰减与成像技术、地震数据插值与规则化技术、地震波偏移成像、速度估计与建模、全波形反演方法、地震反演和储层预测技术、各向异性研究、地震解释技术、储层表征与油藏描述技术、地震属性技术、储层描述与 AVO、岩石物理数值建模与特性分析、非常规岩石物理技术、时延地震技术、井中地球物理技术、多分量地震技术、油气藏非地震勘探技术进展等。本书基本反映了近年来油气地球物理技术的最新发展。

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 85 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, 2016. 12

ISBN 978-7-5183-1637-3

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 (2016) 第 291413 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

编辑部: (010) 64523533

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18.25

字数: 470 千字 印数: 1—1000 册

定价: 98.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《油气地球物理技术新进展
——第 85 届 SEG 年会论文概要》
编 委 会

主 任：曲寿利

副 主 任：杨勤勇

编 委：赵改善 胡中平 吕公河 曹 辉 关 达
方伍宝 王世星 魏 嘉 高 林 张卫华
陈 伟 黎 娜

目 录

陆上地震数据采集技术	李 霞 (1)
地震数值模拟技术	周 辉 (16)
多次波衰减与成像技术	黎 娜 (28)
地震数据插值与规则化技术	刘 伟 (43)
地震波偏移成像 I	吴成梁 王华忠 (65)
地震波偏移成像 II	王华忠 (84)
速度估计与建模	罗 飞 王华忠 (95)
全波形反演方法	胡光辉 王 杰 (110)
地震反演和储层预测技术	印兴耀 (125)
各向异性研究	周 阳 王华忠 (147)
地震解释技术	滕 龙 胡华锋 (164)
储层表征与油藏描述技术	周小慧 (174)
地震属性技术	李红敬 (187)
储层描述与 AVO	文晓涛 (196)
岩石物理数值建模与特性分析	陈兴华 (205)
非常规岩石物理技术	李呈呈 (218)
时延地震技术	陈 伟 (233)
井中地球物理技术	陈占国 张 洁 程磊磊 陈 林 (247)
多分量地震技术	王 贇 (263)
油气藏非地震勘探技术进展	陈进超 (272)

陆上地震数据采集技术

李霞

中国石化石油物探技术研究院

一、引言

第85届SEG年会在陆上地震数据采集技术方面共收录了4个专题的31篇论文。内容主要涉及可控震源和检波器的研制、宽频（尤其是低频）采集技术、观测系统设计优化技术，以及一些新思想和理念等。本文将从地震数据采集最关键的因素，低频可控震源，宽方位、宽频带、高密度采集技术，观测系统设计优化技术，实时现场地震成像5个方面介绍目前油气地球物理陆上地震数据采集技术新进展。

二、地震数据采集最关键的因素

地震数据采集和地震成像技术由模拟信号单次覆盖发展到二维地震、三维地震，到当今的高密度、宽方位勘探，期间，震源和检波器的发展异常迅速。BP公司Amine Ourabah等认为：采集观测系统及其带来的地震道密度不断增加的影响远大于震源、检波器进步的影响，地震采集数据质量的飞跃总是发生在采集覆盖范围内每个单位面积测量总量出现飞跃之际（图1）。

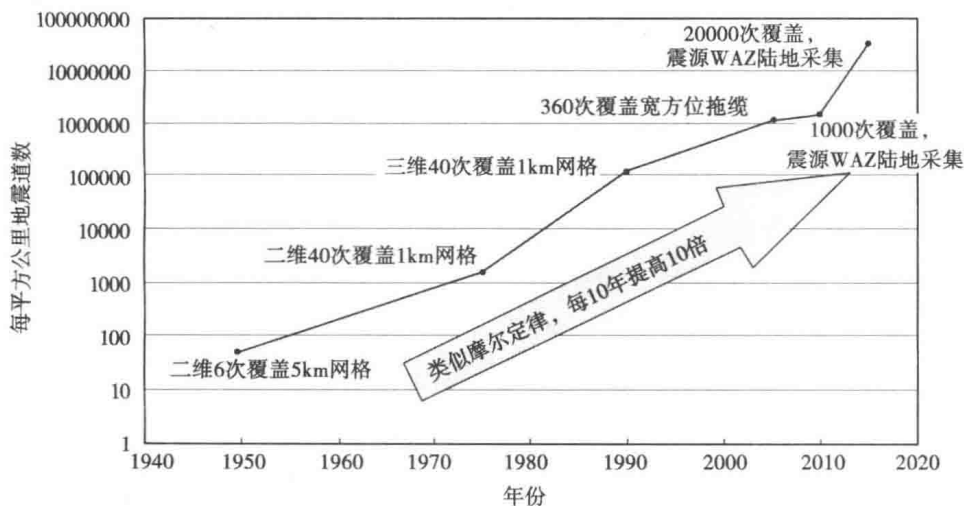


图1 采集道密度发展（每10年提高10倍）^①

^① 本书图件源自SEG第85届年会论文摘要。对彩色图件和相关参数说明感兴趣的读者请登录SEG网站查阅相关原文。

他们利用慢度分析了道密度对地震勘探各种属性的影响，从 20 种不同采集观测系统同一层位提取了 9 种不同属性的影响因素（图 2）。图 2 中半径按顺时针指示每平方米道密度增大，指出高道密度采集是提高成像质量的必由之路。它不仅提高了信噪比，而且对成像质量的改善更明显，对于裂缝储层和非常规“甜点”的预测也都是非常有利的。

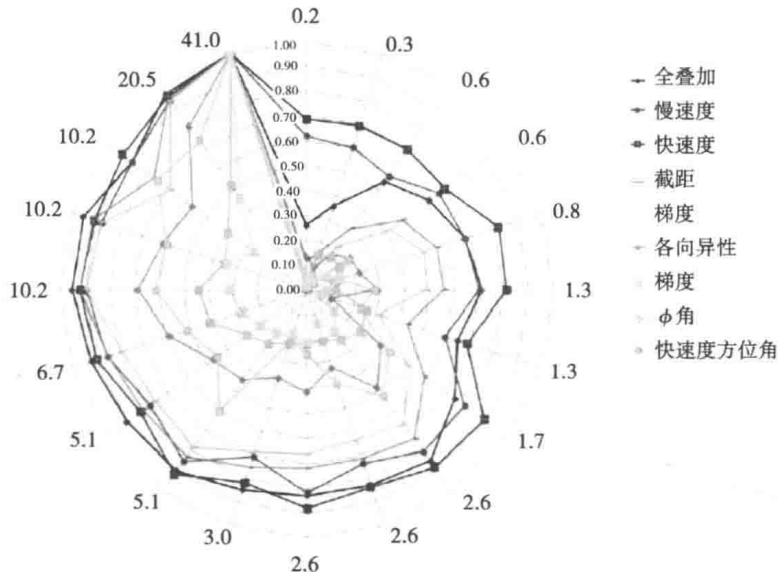


图 2 9 种属性的质量影响因素（半径按顺时针指示每平方米道密度增大）

但是如何用一种高效、低成本和环境友好的方式实现呢？在沙漠区，采用高道数地震队和同时震源方法，已经实现了高效采集，每平方公里 1 千万道的密度已经成为现实。对于地形复杂的陆地探区，则需要应用小型、轻便和便宜的震源、检波器设备进行高效采集，获得密集或超密集的数据。同时，高密度测量需要全新的地震采集和处理视角。检波器要更轻便、更小型和更便宜；震源要更小型和更易于部署；野外后勤保障和运输要与地形复杂区成千上万的检波器快速部署有效匹配；制定新的 QC 条例；在处理中心，要配备处理巨量数据的硬件和软件；研发部门则需要更多地思考如何利用这些巨大的信息冗余更快地获得想要的最终结果。计算机工业受到“大数据”的挑战，也要准备好如何应对超高密度地震采集带来的一系列新问题。

三、低频可控震源

可控震源是陆上地震勘探的优选震源，利用可控震源采集宽频地震数据已逐渐成为常规作业。本届年会，在可控震源发展方面的文章主要集中于拓宽频带、增强低频方面。低频数据（小于 5 Hz）对于陆上地震勘探非常重要，而传统震源由于机械和液压系统方面的物理限制，制约了低频地面力的充分输出，导致低频扫描时间长，生产效率低。要将频带向 5Hz 以下拓展，必须显著增加震源的输出力。地震装备下一步的发展方向是极低频可控震源，因为极低频可以增加倍频程，对更深层目标照明，弥补全波形反演面临的低频缺失问题。

1. 超重宽频可控震源

2015 年，SERCEL 成功研制出的 Nomad 90 Neo 超重宽频可控震源（图 3），具有大重

量、高液压等特点，非常适用于高品质、低频率的扫描。其峰值出力最高达到 90000lbf，扫描频带范围更宽，地球物理性能更好，可改善高频信号的保真度。除了宽频特性，与常规可控震源相比，Nomad 90 Neo 还具有超低全驱动初始频率（4.4Hz，62000lbf；5Hz，80000lbf）。该性能直接影响可控震源总的扫描长度，并最终提高采集效率。Nomad 90 Neo 的重心更低、尺寸更小，提高了灵活性和可使用性，其多数部件可与 Nomad 65 Neo 的部件互相兼容。

Nomad 90 Neo 装备了智能电源管理系统（IPM），可降低 15% 的燃料消耗并且将噪声和废气排放量降至最低。该震源已被部署于中东地区的高产项目，因其高能量的输出、卓越的扫描质量、各种地形的通用性得到了用户的肯定。



图 3 Nomad 90 Neo 重型可控震源车

2. 新一代低频可控震源

为了提高震源的低频输出能力，必须显著增加震源的输出力，这就需要对震源机械和液压系统的设计进行改进。INOVA 公司提出了一种新型低频可控震源设计，图 4 为这种新型低频震源，包括重锤和底座系统，最大峰值出力 80000lbf。为验证这种新型低频震源的性能，在得克萨斯南部的一口井中进行了试验。结果表明，该震源在低频端的地面力输出显著增加，可以产生 0.5 Hz 的低频，在 7500ft（2288m）深处能观测到该新型震源产生的 0.5~131Hz（约 8 个倍频程）频带的信号。对比新一代震源和传统的 AHV-IV364 震源最大低频输出能力（图 5），可以看出，在 3 Hz 时，新型震源的输出能力比传统的 AHV-IV364 震源强一倍以上，低频输出能力显著增强。因此，这种新型低频震源可促进高效滑动扫描生产效率的提高。目前，该低频震源还没有正式在市场上推广，未来非常值得关注。

3. 小型宽频带可控震源

在非常复杂的地表作业时，重的可控震源难以进入复杂探区施工。在 2014 年 SEG 年会上，Mahrooqi 等介绍了在 Umm As Samim 盐滩勘探中，应用轻型可控震源（26000lbf 出力，UniVib）进行低频勘探。但是，轻型可控震源所产生的能量，特别是在低频时，根本无法和

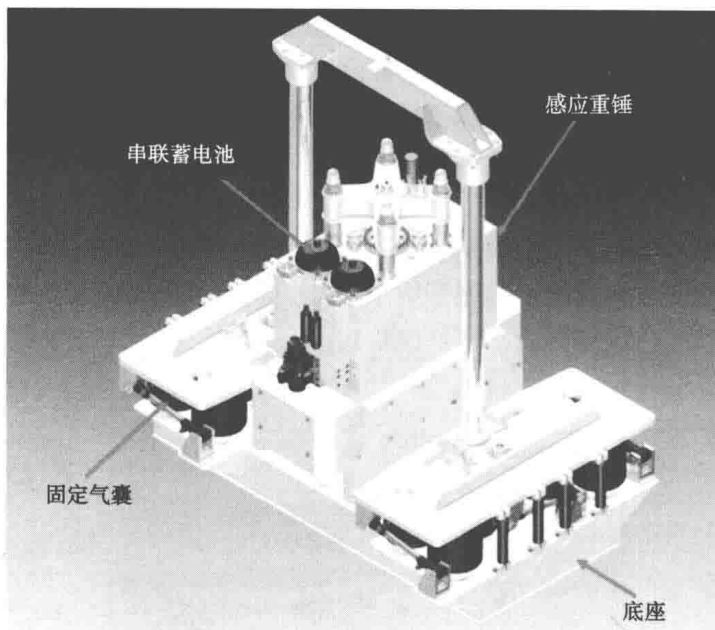


图4 新一代低频可控震源

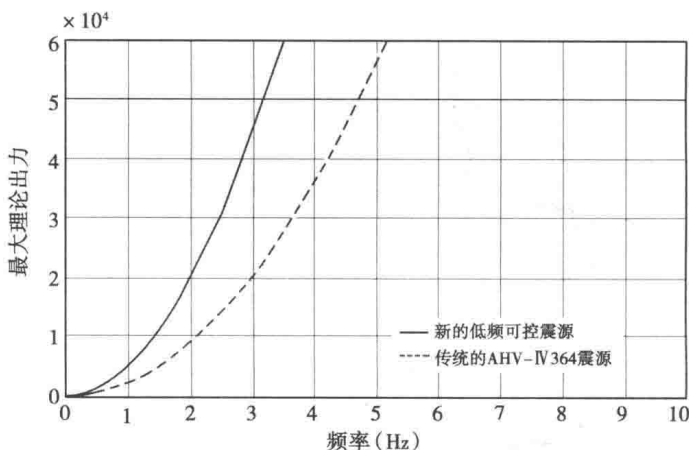


图5 两种震源最大低频输出能力比较

重型可控震源相比。设计能产生宽频带信号的轻型可控震源面临挑战。

在2015年SEG年会上，可控震源生产商INOVA公司推出第二代小型宽频带可控震源UniVib2，相对上一代UniVib (12t)，Univib 2可产生高达34000lbf (16t)的峰值出力，显著提高了宽频率范围内的输出能量。同时，它的宽频扫描进一步提高，可实现1~400Hz扫描。现场测试表明，低频时可控震源的地面出力显著提高，高频时的稳定性也得到增强。Univib 2体积较为小巧，能在拥挤地形之间和环境敏感区域轻松转移，且把对环境影响降到最低。从地球物理公司在墨西哥、国内南方地区的生产使用看，将来这一震源具有良好的应用前景。

4. 极低频 (VLF) 可控震源

美国MERTZ公司研发了一种实用的极低频可控震源 (图6)，采用动态控制的双反向旋转偏振重锤设计。两个水力汽缸装在每个重锤内，控制其偏振，线性位置测试仪实时反馈信

息。通过调整偏振，两个反向旋转重锤的离心率可以连续变化，得到数个倍频程的带宽。该震源的最低频率可低至 0.5Hz，2Hz 出力可达最大出力的近 45%。3Hz 达到最大出力，为 60000lbf。该极低频可控震源在各频率上的出力参数如表 1 所示。3Hz 以上，偏振减小，防止出力过度。采用该震源，可以在极低频率时产生很大出力，而噪声和谐波畸变更小。该极低频可控震源为地球物理解释人员提供了更高的分辨率、远偏移距的有效信号，提高全波形反演的质量。

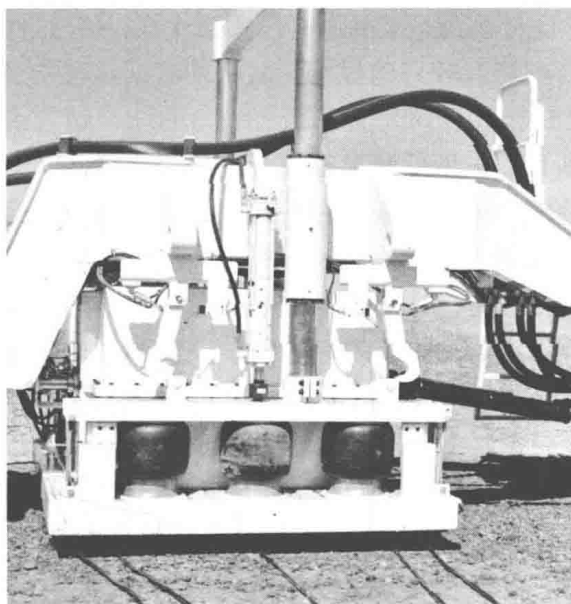


图 6 MERTZ 公司极低频可控震源

表 1 频率与出力

频率 (Hz)	力 (lbf)
0.5	1680
1.0	6700
1.5	13000
2.0	26900
2.5	42000
3.0	60000
4	60000
8	60000
16	60000

四、宽方位、宽频带、高密度采集技术

从本届 SEG 年会发表的文章来看，宽方位、宽频带、高密度、大道数采集技术依然是采集的主流。这方面主要以法国 CGG 公司、Schlumberger 公司、西班牙 Repsol 公司和 BGP

为代表，在世界各地做了相关的工作。

1. 宽方位、宽频带、高密度三维地震数据采集技术

BGP 介绍了其在里海盆地进行宽方位、宽频带、高密度地震数据采集的实例。哈萨克斯坦滨里海盆地东缘主要发育碳酸盐岩礁滩相，受盐丘和强非均质影响，常规震源、观测系统和处理方法难以对盐前目标层和地层圈闭进行很好的成像。由于巨大的工作量和精细勘探目标要求，采用了滑动扫描、两宽一高、低频可控震源及数字化作业系统等高新技术，日最高放炮量 5563 炮，大幅提升了生产效率，实现了真正意义上的绿色环保勘探。高密度采集炮集记录波场效果明显，宽频震源记录品质有较大的改善。从频带扫描看，高密度宽频带采集得到的记录从低频到高频都有较好的显示。从叠前时间偏移剖面看，新资料成像效果更佳。该项目是 CNPC-AMG 公司针对特鲁瓦西斜坡碳酸盐岩油气藏部署的第一块“两宽一高”二次三维地震勘探项目，采用低频可控震源高效采集模式，完成了全球陆上首块使用低频可控震源的工业化勘探。此项目的成功将有力促进该项技术在其他区块的推广应用。

2. 准噶尔盆地南缘三维高密度地震高效采集

由于三维高密度采集花费高、时间长，如何提高效率、降低费用是业界永远要考虑的问题。对于山区的高密度地震采集，影响采集效率的主要因素有钻震源井、定位及测线的重定位。中国石油准噶尔盆地南缘三维高密度地震采集实例显示，通过应用浅井小药量震源和单点接收技术，显著提高了三维高密度采集的效率：每天平均采集 1818 炮，是常规二维采集（每天 275 炮）和三维采集（每天 516 炮）的 3~6 倍。新采集的地震数据对复杂构造和小断层的成像质量明显高于老资料，图 7 对比了三维高密度剖面 and 老三维地震剖面的频谱和信噪比，在 0~100Hz 特别是 0~10Hz 范围，三维高密度剖面的信噪比比老三维地震剖面高。老剖面信号谱看上去不错，但大于 50Hz 以上的噪声能量比信号能量强，而三维高密度剖面的信号能量比噪声能量强。这可以部分地解释为什么老剖面的分辨率看上去高，但对构造细节的描述不如高密度剖面精确（图 8）。

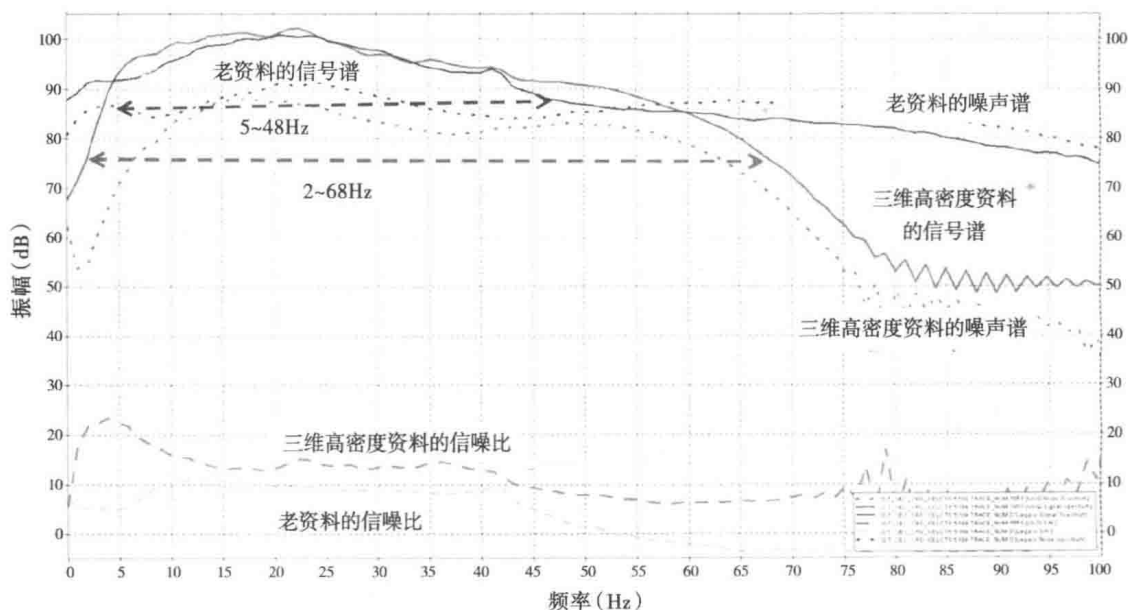


图 7 三维高密度剖面 and 老三维地震剖面的频谱和信噪比对比

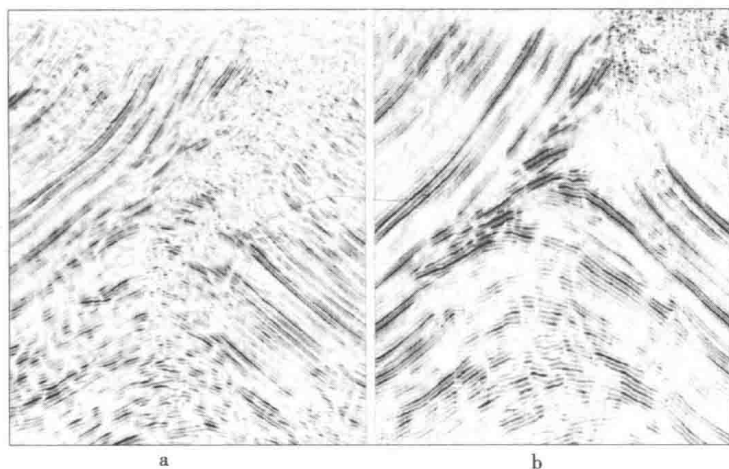


图8 老三维资料 (a) 和新的三维高密度资料 (b) 地震剖面比较

3. 准噶尔盆地沙漠区屏蔽层下低频采集

BGP 采用低频可控震源、高密度和宽方位技术，在准噶尔盆地沙漠区的屏蔽层下获得了较好的地震资料。图9是炸药震源和低频可控震源0~6Hz 低频叠加剖面对比，可见采用新方法效果有明显的改善。图10是新得剖面的对比，新三维地震剖面信噪比和分辨率及强屏蔽层下的成像都取得了较大的改进。

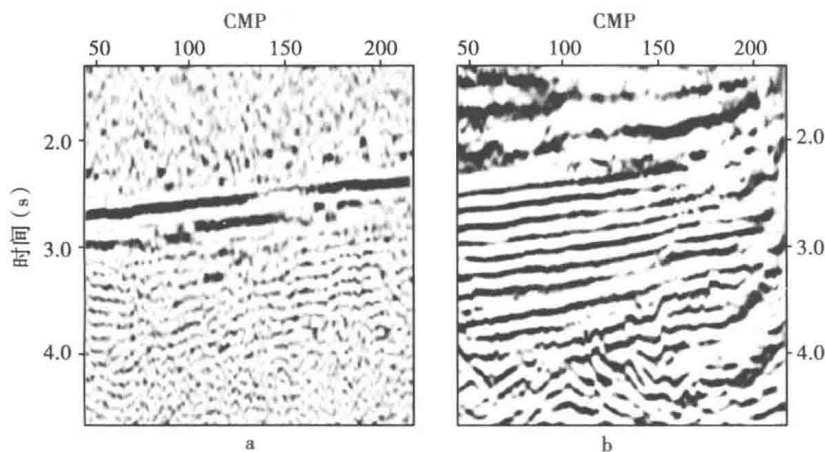


图9 相同位置0~6Hz 低频叠加剖面对比
a—炸药震源；b—低频可控震源

4. 安第斯山前陆盆地复杂地表高密度节点采集

在安第斯山前陆盆地，由于受起伏地形和交通条件（只能借助直升机进入）的限制，要提高复杂构造的地震分辨率和成像质量，必须采取灵活的地震采集方案。2014年，西班牙 Repsol 公司首次采用 GSX 高道数节点地震记录系统进行了 Huacaya 三维项目（543km²）和 Sagari 三维项目（210km²）的两块节点采集施工作业。

该区传统地震采用40m或60m道距、4000~8000道进行采集，而节点系统可以将道距密度提高至20m或15m，每个排列片包含16000道。相比传统线缆系统采用6个检波器组合采集，本次节点系统采用单道采集，通过减小设备重量，降低了采集费用，提高了采集效

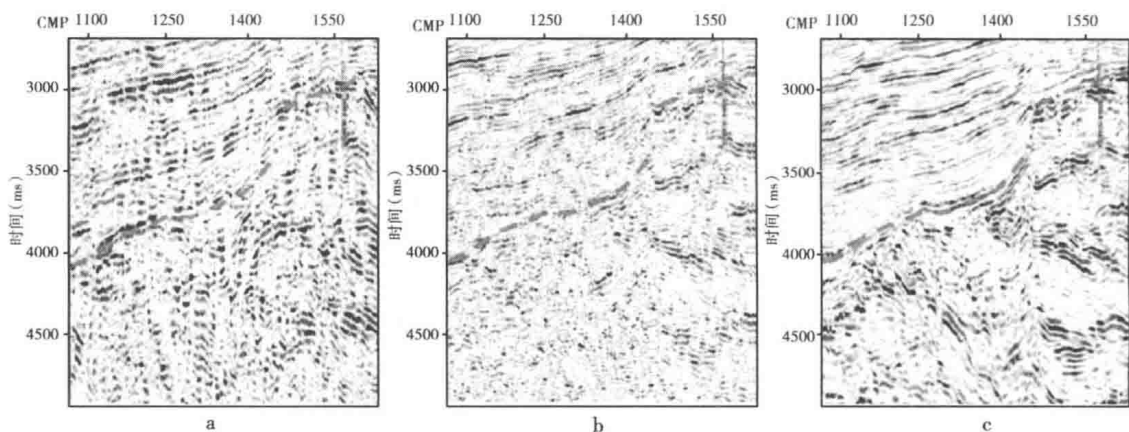


图 10 相同位置老二维 (a)、三维 (b) 和新三维 (c) 资料叠前偏移剖面对比

率。图 11 是安第斯山采集的节点位置分布图，得到的地震剖面如图 12 所示，分别是现场的叠加和叠后偏移剖面，得到了一定的反射信息。这不但提高了深层（目的层）的地震成像效果，也改善了近地表数据质量。但整个剖面信噪比较低。

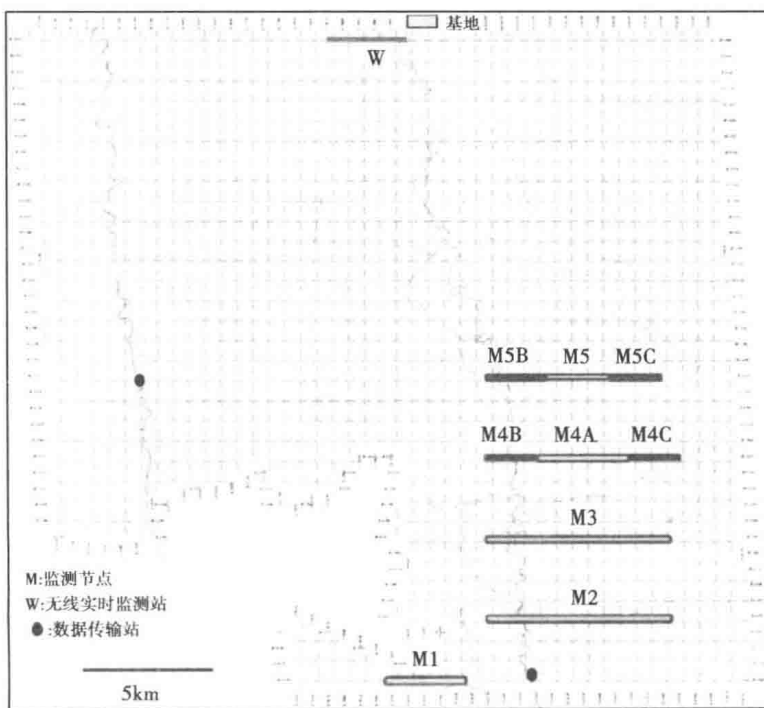


图 11 节点监测系统

黑点—数据传输站；M—5 条节点监测段；W—160 个无线实时监测站

五、观测系统设计优化技术

在地震勘探中，观测系统是影响速度模型精度、成像质量和地震解释可靠性的关键因素。从本届年会发表的采集文章来看，很多学者对观测系统设计、观测系统优化等提出了一

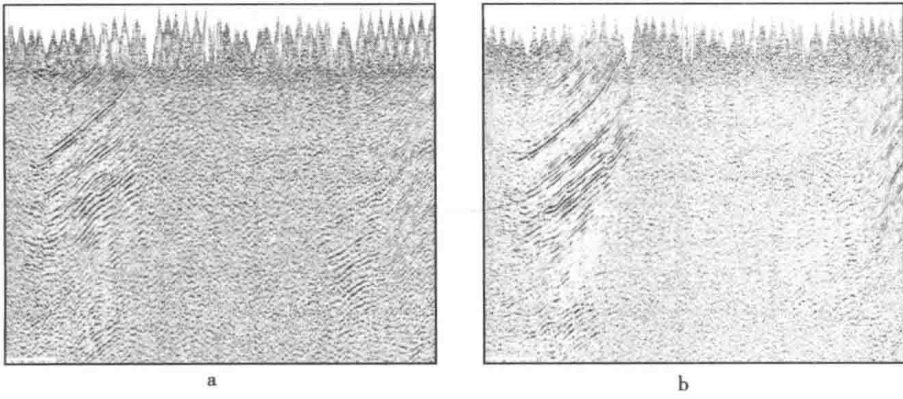


图 12 现场处理结果
a—叠加剖面；b—叠后偏移剖面

些新的思路，并通过实例分析进行了展示。

CNPC 长庆钻探公司提出了一种方法，将地震可视化分析应用于基于目标的二维观测系统设计，获得最佳的采集参数。中国石油 BGP 的学者提出了一个伪随机三维地震观测系统生成方法，基本上能够实现全方位意义上的均匀分布，并且在现实中可实现。其他公司的学者也提出了一些方法，例如西班牙 REPSOL 公司的年会报告就是关于该公司如何在安第斯前陆盆地使用节点系统施工进行观测施工设计和进行数据采集的。下面就几种关注的方法分别介绍。

1. 稀疏观测系统设计

Alberta 大学的 Mafijul Bhuiyan 和 Mauricio Sacchi 两人通过压缩感知连接野外采集设计和数据重构。当在炮检域满足地球物理和操作约束时，通过 5 维空间可以将数据从炮检域转换到 CMP 偏移距域。这是一个复杂的非线性问题，是利用模拟退火的方法实现的。

图 13 是全采样炮点—检波点分布图，是按照奈奎斯特采样理论设计的。图 14 是通过稀疏采样炮点—检波点分布图，这样可以减少费用，且数据重构后也能达到密集采集的效果。图 15 是初始和最终互相干性的对比图。

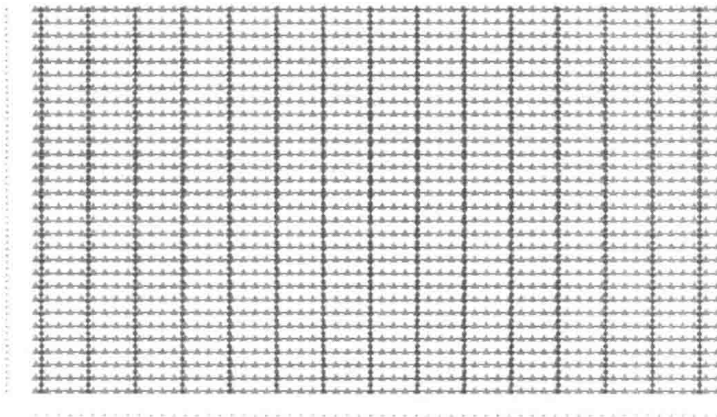


图 13 全采样炮点—检波点分布图

地震资料的采集理念正在历经着变化，以往的“充分、均匀、对称、连续”高保真、高精度采样也可以像基于压缩感知的稀疏采样方法，更加注重实际需求，进行差异

化、个性化定制的采集，比如由注重覆盖次数转向以记录波场为中心。

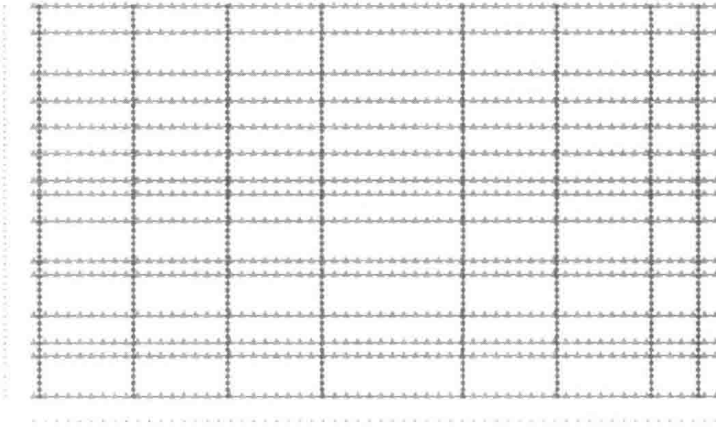


图 14 稀疏采样炮点—检波点分布（抽稀 50%）

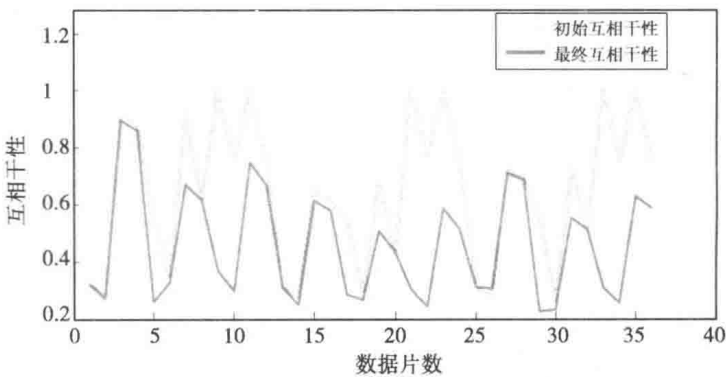


图 15 不同数据片的初始和最终互相关性对比

2. 存在相干噪声时选择密集震源还是密集检波器

在沙漠等陆地勘探中，经常采用可控震源网格加密和稀疏检波器排列的方式。那么问题是：布置震源网格加密和检波器加密哪种方式好呢？噪声类型（如环境噪声）对选择有什么影响？BP 公司 Carl Regone 等应用有限差分（FD）模拟研究了空间采样对陆地三维地震采集相干噪声压制的影响。模拟研究认为：（1）陆地三维勘探中，空间采样对 S/N 级别非常敏感。当信噪比高时，对空间采样的要求不高；当信噪比低时，对空间采样的要求明显提高。（2）网格观测系统是一种非常有效的方式，密集检波点网格优于密集震源网格，特别是当存在强的环境噪声时更是如此。（3）要选择合理的采集观测系统，需要事先了解探区的信噪比情况，可以通过前期的施工试验来了解。

3. 检波器二维环形组合去除陆上资料地面噪声

陆地地震采集，常有严重的地面噪声干扰地震信号，有的达到有效地震信号的 2 倍甚至 20 倍，大大影响了地震资料的应用，特别是转换波和地震属性。ION 地球物理公司 Christof Stork 提出，通过野外观测系统设计降低地面反向散射噪声，更好地在纵、横测线方向对噪声采样，便于在处理中去除。方法主要有两点：（1）在有大量反向散射噪声区，用二维环形组合进行全部采集；（2）在反向散射噪声不严重的探区，采用常规炮检线正交的

观测系统采集，并且用 2~4 个由 50~100 个检波器组成的二维组合进行噪声分析。该分析结果可用于后续的采集、处理和属性分析。

二维环形组合时，中心检波器间距小于外围的间距，组内距由内及外逐渐增大，是间距变化的环形，所以称为环形组合（图 16）。这种可变组合的优点是在较宽的频率、速度范围上对近地表噪声能量进行分析。比如在图 16 中，组合是 580ft，环形组合共有 116 个检波点；如果整个组合都采用 15ft 间距的话，应该是 1600 个检波点。虽然随着外围检波器的减少，会降低组合的保真度，但作者建议应用稀疏性反演恢复部分保真度。从实际资料应用可以看出，应用该方法去噪后，原始资料有明显的改善。

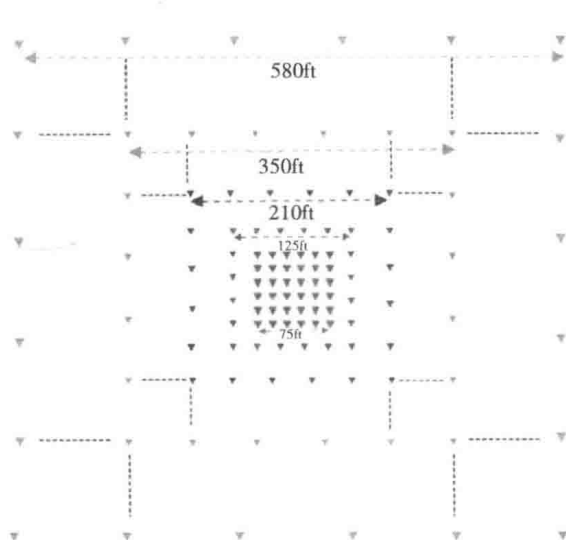


图 16 二维环形组合观测系统

组合总尺寸 580ft，116 个点，中心检波器间距 15ft，外围 116ft

4. 一种降低成本的伪随机三维地震观测系统

随着复杂隐蔽地质目标勘探开发的进一步深入，能实现真正意义上的全方位角偏移距均匀分布的三维观测系统将发挥越来越重要的作用。众所周知，面元在全方位角上均匀分布能采集到更高信噪比和分辨率的地震资料，在油藏预测、油藏表征、裂缝检测和岩性分析方面优势明显。在海上双缆勘探环形观测系统可以实现在全方位角上偏移距在各个方向的均匀分布，但在陆上勘探中要获得如此效果费用太过昂贵，性价比太低。

中国石油 BGP 的 Jiang Fuhao 提出了一种伪随机三维地震观测系统生成方法，希望在陆上实现同样的效果。之前的研究显示，随机观测系统在现实中可实现面元在全方位上的均匀分布，但现实中并没有好的应用实例。这里给出的这种观测系统生成新方法，基本能够实现全方位意义上的均匀分布，并且现实中可以实现。因为该方法中炮点和检波点的分布看上去是随机的，因此称之为伪随机三维观测系统。该方法是将炮点和检波点布置在多个圆上，实际应用时炮点和检波点数量太多，需要根据计划的费用和勘探任务，减少炮点和检波点的数量，直到满足费用和数据质量的平衡。图 17 为炮点和检波点的布置图，呈非线性分布。第

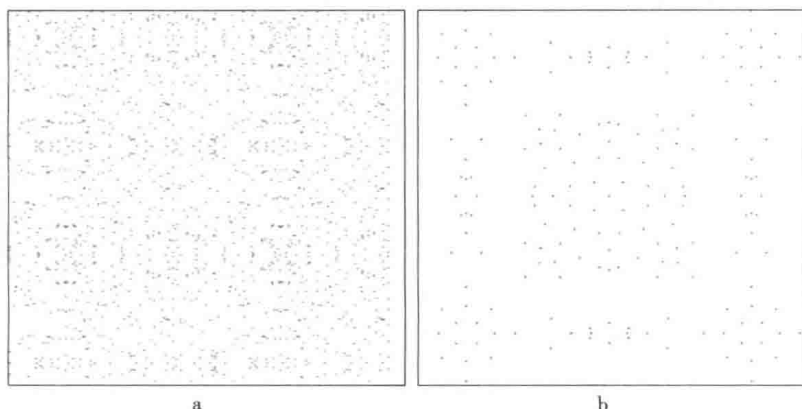


图 17 检波点分布放大图 (a) 及炮点分布放大图 (b)

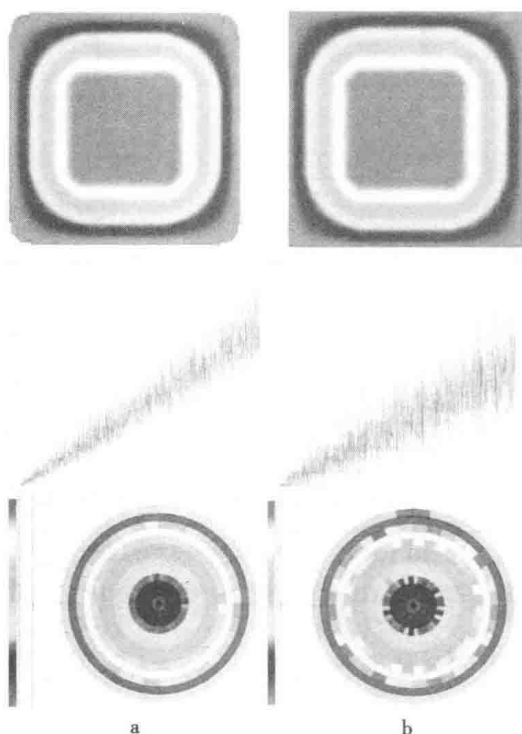


图 18 伪随机观测系统面元属性分析 (a) 及正交三维观测系统面元属性分析 (b)

上图表示覆盖次数；中图为炮检距地震道；下图为玫瑰图

一个圆上的炮点或检波点以最小空间采样间隔移动，并以这个间隔建立地面的正交网格。为了对比伪随机三维观测系统和常规观测系统，在同一探区采用相同数量的炮点和检波点，检波点间距 10m，检波线间距 10m，炮点距 40m，炮线距 40m。然后以相同的方式激发炮点，分析相同面元尺寸的面元属性，结果见图 18。对比发现，尽管炮点和检波点数相同，伪随机三维观测系统的炮检距分布更好、更均匀。伪随机三维观测系统可以提高数据质量，可用于高密度三维地震勘探中。在平衡数据质量和费用方面，伪随机三维观测系统也是一个很好的选择。

5. 基于能见度分析的观测系统优化方法

人们总是混淆地震能见度分析与照明分析。对于给定的勘探和地质模型，照明强度可以定量描述地下成像点、目标同相轴所对应震源—检波器对的功率；地震能见度分析是从不同的角度观察成像，有人将其看作逆照明，对于给定的目标同相

轴，能见度分析可以定量分析不同地面位置反射波场的强度。假设震源在地面激发，向下传播，然后在某个界面产生反射，地面的检波器记录到上行反射波。因此，地震能见度分析就是地面检波器记录反射波场的强度，可以用来优化采集参数。

川庆钻探公司四川物探公司提出一种地震能见度分析法，可应用于面向目标的二维采集设计，帮助优化采集参数，如大炮检距和其他观测系统，提供目标层的定量信息。应用这种优化后的观测系统，完成采集工作，并获得满意的地震资料。图 19 为两种观测系统的叠前偏移剖面，应用新的观测系统后，目标层资料的连续性和构造细节明显提高。

6. 利用多次波进行全波场采集分析

尽管地震采集技术发展迅速，但应用常规采集设计仍难以实现充足的覆盖和分辨率。地下不仅受到一次波所生成震源波场的照明，还受到多次波所生成震源波场的照明，这类多次波包括地表相关多次波和地下的层间多次波。这些多次波可以对一次波不容易照明的构造进行照明，从而可以对单一散射波不能照明的地下部分成像。但是迄今为止，地震采集分析中只应用了一次反射信号，没有利用多次反射信号（即多次波）。

Delft 技术大学 Amarjeet Kumar 等对聚焦线束的概念进行了扩展，应用地表相关多次波和层间多次波进行照明，得到三重照明：直达波、地表相关多次波和层间多次波。该方法通过考虑所有震源端的多次波，重新表示网格点响应，从而使得特定网格点的入射波场变得更为复杂。二维全波场偏移实例研究表明，多次波不仅能拓展照明角度，也能提供更多的地下成像点。