

文章编号: 1001-1749(2024)01-0067-06

复杂黄土山地区井震联合高效采集技术及应用

张雨, 张群英, 董金伟, 任丽莹, 黄凯

(中国石油东方地球物理公司辽河物探处, 盘锦 124010)

摘要: 随着“两宽一高”地震采集技术的不断发展, 鄂尔多斯盆地已成功开展多个井震联合地震采集项目, 项目中可控震源发挥出巨大优势, 但如何实现井炮与可控震源的高度融合、高效采集仍面临诸多挑战, 主要表现在点位布设均匀性差、障碍区实施率低、采集效率提升难等问题。通过对近年来复杂黄土山地区三维地震勘探项目的技术研究与分析, 总结出井震联合高精度预案设计、VPM+SSC 井震联合双源激发等先进技术, 以上技术在 2022 年度鄂尔多斯盆地 NXX 三维项目中成功应用并取得了显著效果, 开创了复杂黄土山地区井震联合高效采集的新局面。

关键词: 高精度预案; 动态调整; 双源激发; VPM 激发系统; SSC 控制器

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.01.07

0 引言

近年来, 随着油气勘探目标越来越精细, 地震勘探方法不断强化, 炮道密度随之大幅提升, 地震勘探成本压力日益增大^[1]。面对复杂的地表条件、精细的地质任务、繁杂的协调环境以及超额的劳动强度, 在保证资料品质的前提条件下, 如何实现地震项目提质增效是施工方一直以来研究的一项重要课题。

鄂尔多斯盆地黄土山地区地震地质条件复杂多变, 表层有黄土层覆盖, 沟壑纵横, 海拔高程变化较大, 激发、接收条件受到很大的影响, 导致地震资料干扰波发育、静校正问题突出、资料分辨率及信噪比极低^[2-3]。常规井炮激发方法是多组合、深井和大药量来强化单炮品质^[4]。另外, 在低信噪比区通过提高野外采集的覆盖次数, 可以有效地提高剖面的品质^[5]。增加点位布设密度是提高覆盖次数的主要方式之一, 黄土山地区激发点布设主要分为沟壑区与塬台区点位布设, 沟壑区在

避开断崖、陡坡等危险地形的情况下, 可做到点位分布均匀; 但在塬台区布设点位时, 受房屋、坟地、高压线等各类障碍物的影响, 激发点只能布设在障碍物安全距离以外的区域, 遇到大型村镇时, 点位的均匀性将受到较大影响, 进而造成浅层资料缺失。生产效率方面, 传统井炮的放炮模式主要通过仪器与爆炸机联机, 联机后爆炸机到点后确认井口信息, 之后充电排队并向仪器发送 RESDY 信号, 仪器接到信号后发出放炮指令, 爆炸机根据排队顺序依次进行采集^[6]。受电台限制, 一台仪器只能带 14 组爆炸机, 多台仪器采集时, 仪器间需来回切换, 每次切换时间不少于 3 分钟, 严重影响采集效率。

近年来, 随着“两宽一高”技术的不断发展, 可控震源已逐步走进黄土塬, 井震联合激发对比以往纯井炮采集, 生产效率也有了一定提升^[7]。但当前激发系统只能同时控制一种激发源, 即井炮采集时, 无法实施可控震源采集, 可控震源采集时, 同样无法实施井炮采集, 且两种采集模式的切换过程耗时较长, 井震联合采集未实现高度融合。

收稿日期: 2022-06-07

第一作者: 张雨(1988-), 男, 本科, 工程师, 主要从事地震采集技术工作, E-mail: zy7544303@163.com。

基于以上分析,优化点位布设、提高井震激发融度是实现黄土山地区地震采集提质增效的关键。

1 井震联合高精度预案设计技术

1.1 井震联合预案设计原则

可控震源为车载装置,具有便捷、灵活的特点,且对地表破坏性小,可在障碍物密集区进行点位布设,因此,可控震源是一种安全、环保的激发源^[8]。井震联合预案设计可有效提高项目整体点位均匀性,避免障碍区浅层资料缺失。具体设计原则如下:①沟壑区以井炮为主,盘山路、川道可控震源为辅的方式布设。井炮偏移按照“先纵后横”的方式,优先沿测线方向整道距偏移,合理规划断崖、陡坡、窑洞等风险区域;若沿测线方向无法避开障碍区,则按照整接收线距垂直测线方面偏移,保证偏移后覆盖次数分布均匀。可控震源点按照 1/2 炮点距的密度沿盘山路、川道布设,用来弥补沟壑区覆盖次数不足的问题。②塬台区以可控震源为主,农田、果园井炮为辅的方式布设。可控震源点按照 1/2 炮点距的密度沿道路、农田布设,避开危房、养殖、坟地等敏感障碍物;井炮采用“见缝插针”的方式在果园、农田等可控震源无法通行的区域进行补充,保证障碍区点位布设均匀。

1.2 关键区可控震源强化设计

借助可控震源点位布设灵活、效率高、成本低等特点,在关键区进行可控震源点位强化,提高资料品质。

1) 噪音发育区可控震源点位强化。噪音干扰是影响单炮品质的主要原因之一,在无法降低噪音干扰的情况下,通过增加覆盖次数,提高资料信噪比的方式,可达到提升资料品质的目的。设计原则是在村庄周边、高速公路两侧等人员活动频繁的区域将可控震源点布设密度提升一倍。

2) 特殊地形小型震源点位强化。EV56、BV620 等常规可控震源宽度为 3.5 m,可满足在一般村庄道路的通行作业,遇到道路狭窄的大棚区、树林区时,常规可控震源因车身过宽无法实施作业。为此,东方地球物理公司专门研发了 BV330 小型震源,该震源车长 8.05 m,车宽 2.3 m,可满足大部分狭小地形的通行作业。小型震源点的增设,可进一步提高了预案点位的均匀性、合理性。

1.3 井震动态预案调整设计

项目采集过程中,偶尔会遇到因恶劣天气、百姓阻挠等不确定因素影响采集进度,应用井震动态预案调整技术可有效降低影响程度,保证采集资料完整。为了实现井震动态预案调整,要精细前期预案核实工作,详细落实可控震源通行道路、敏感障碍物分布、协调困难区等关键信息,针对落实到的特殊障碍区、复杂农田地表要提前设计两套方案,便于随时调整。方案一,在障碍区无法实施井炮采集时,及时调用可控震源方案,通过在障碍区周边增加可控震源点位来弥补井炮缺失的影响;方案二,因农田区下雨导致可控震源无法进行作业时,及时调用井炮方案,由井炮代替可控震源,在确保最小破坏程度的情况下,进行点位优选布设,补全资料缺失。

2 VPM+SSC 井震联合双源激发技术

2.1 VPM 可控震源生产管理系统

可控震源生产管理系统英文译为 Vibroseis Production Management System,简称 VPM,该系统是基于激发控制软件与数字电台、4G 网络、自组网电台等多种通讯实施方案实现可控震源滑动扫描、动态扫描的高效生产组织管理系统^[9]。其主要功能是与可控震源导航系统高度融合,配合节点仪器实现可控震源高效采集。该系统与传统仪器采集系统之间的差别主要有以下几点:①通讯方式:传统仪器只支持数传电台;VPM 系统支持数传电台、公用网络及自主网电台。②激发控制方法:传统仪器为轮询一答复模式;VPM 系统为多路直接应答模式。③质控数据量:传统仪器只能提供 PSS 报告;VPM 系统不仅可提供 PSS 报告,还具有 COG 无桩号施工的质控、可控震源指标参数实时监控、无线任务分发、轨迹更新等功能。④高效采集:传统仪器不支持动态滑扫(包括滑动扫描、DS3、DS4 等,该技术是通过设计时间与空间的叠合关系,将交替、滑动和距离同步滑动三种扫描方式结合在一起,突破了以往只考虑时间域或空间域的局限,滑动时间不再固定,滑动时间随距离变化而变化);VPM 系统支持动态滑扫,不仅既提高了效率,又最小化了噪声的影响。图 1 为动态扫描示意图。

2.2 SSC 井炮分布式激发系统

分布式激发控制器英文译为 Separated Source Controller,简称 SSC,该系统是基于高精度时钟和授时技术,控制井炮源按照主机下发的指令在指定

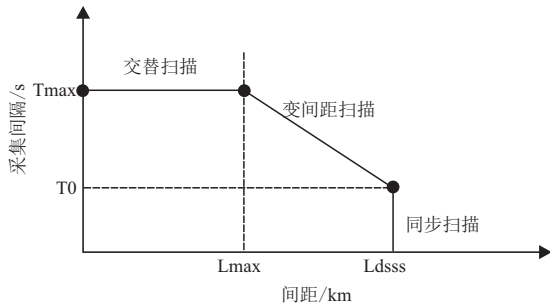


图 1 动态扫描示意图

Fig. 1 Dynamic scanning diagram

时刻精准起爆炮点,并自动生成包括激发位置、激发时间等信息文件的控制系统^[6]。该系统主要用于井炮高效采集,其工作原理为爆炸机到点采集 GPS 坐标,再将采集 GPS 坐标及爆炸机 ID 号的 READY 信号发送给编码器,编码器接收并传发信息给 SSC 系统,系统判断 GPS 位置坐标及炮排表对应的炮点坐标是否一致,如果判断一致,向编码器发出点火信息和 F0 信号,编码器收到点火命令后向爆炸机发出起爆指令。爆炸机起爆后将线号、点号、GPS 位置、爆炸机 ID 及井口时间发送给系统。整个工作过程不需要人工干预,减少了操作人员人工点炮的时间。

2.3 VPM+SSC 井震联合双源激发系统

VPM+SSC 井震联合双源激发是在可控震源生产管理(VPM)的基础上结合井炮分布式激发控制器(SSC)开发的一种施工方法。该系统集成了可控震源和井炮双源激发控制,并支持源驱动、动态扫描等高效采集方式。在井震双源激发系统下,可为井炮设置时间-距离规则,实现井炮变间隔时间激发、远距离同步激发,大幅度提高井炮采集效率。该系统的工作模式为由一台 VPM 主机控制所有可控震源及 SSC 控制器,SSC 控制器向下控制各爆炸机,形成可控震源与井炮两套激发系统。可控震源自带 GPS 卫星定位系统,可将自身坐标信息实时回传至 VPM 主机上;井炮激发方面,为爆炸机配坐标收集器,可将采集到的 GPS 信息发送至 SSC 控制器,SSC 控制器再将坐标信息通过自主网回传至 VPM 主机,因此,在 VPM 管理系统界面上可同时显示可控震源及爆炸机的位置信息及采集进度,便于生产指挥。操作人员可根据野外生产进度及现场实际情况,随时切换井炮与可控震源两种激发系统,切换无需等待时间。另外,系统默认同一时间只能激活一种激发系统,即可控震源进行滑动扫描的时候,井炮无法采集;井炮排队采集

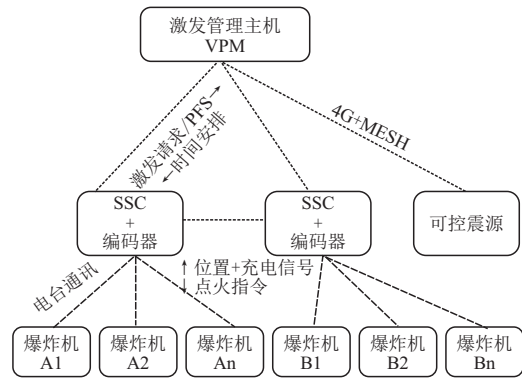


图 2 VPM+SSC 井震联合双源激发系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of VPM+SSC explosive-vibroseis combined dual source excitation system

的时候,可控震源同样无法介入,这样避免了井震重炮的问题。

VPM+SSC 井震联合双源激发系统最大的优势在于实现了井炮与可控震源采集的高度融合,无论在何种激发模式下,都可以实现井震瞬时切换,不仅将激发间隔智能优化至最小,还提高了野外有效作业时间,真正做到了野外连续采集不间断。图 2 为 VPM+SSC 井震联合双源激发系统的工作原理图。

3 实际应用效果

2022 年鄂尔多斯盆地 NXX 三维项目应用井震联合高精度预案设计、VPM+SSC 井震联合双源激发等先进技术取得了较好的应用效果。

3.1 采集效率大幅提升

项目前期采用井炮源驱动系统加可控震源 VPM 激发系统实施采集,井炮单组的采集时效为 180 炮/时,井炮的采集时间由早上 7 点开始,至下午 4 点完成当日井炮采集任务,时长约 10 h;可控震源从下午 5 点开始采集,由于采集时间较晚,采集过程中受阻事件频发,至晚上 9 点采集工作被迫停止,全天采集日效约 2 200 炮/d。项目中期,应用 VPM+SSC 井震联合双源激发技术,为井炮设置了 T-D 规则,提高了空间与时间的转换利用率,井炮采集时效由以往的 180 炮/h 提升至 240 炮/h,采集效率提升 33%,井炮采集时间由以往的下午 4 点结束降至下午 1 点结束,总采集时长缩短 3 h。另外,井炮采集过程中,遇到受阻或搬点影响连续作业时,通过切换至可控震源采集系统,避免了采集时间的浪费。井炮的高效采集为可控震源争取了更多的作业时间,不仅降低了可控震源夜间在村庄内施工的几率,

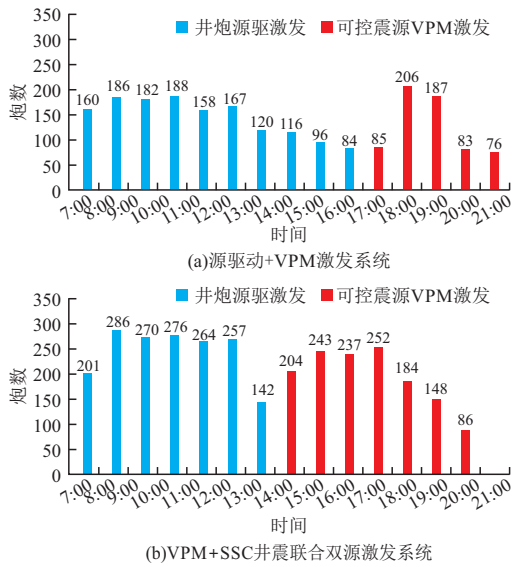


图3 不同激发系统的采集日效对比图
Fig. 3 Comparison of acquisition daily efficiency of different excitation systems

同时也保证了障碍区的可控震源实施率。项目应用VPM+SSC井震双源激发技术后,采集日效提升至3 000炮/d,较以往提升36%。图3为2022年度鄂尔多斯盆地NXX三维应用源驱动+VPM激发系统与VPM+SSC井震联合双源激发系统下的采集日效对比图。

3.2 资料品质得到有效保障

项目加大了可控震源点位的布设,不仅提升了障碍区点位均匀性,还缓解了以往井炮实施难大的问题。对于一些存在不确定因素的区域设计了井、震两套实施方案,便于随时调整方案。精细的前期预案点位设计、动态的现场预案调整,保证了项目预案高实施率,最终项目预案实施率达到了97.88%。通过不同偏移距覆盖次数分析,浅层资料无缺失,中深层覆盖次数分布均匀,全偏移距覆盖次数达到设计满覆盖的95%以上。图4为2022年度鄂尔多斯盆地NXX三维采集点位分布图,图5为全偏移距下覆盖次数分析图。

均匀、有效的覆盖次数使得最终资料品质得到明显改善,资料有效频宽得到拓展,层间信息明显丰富,复杂构造的刻画更加清晰,断裂成像改善明显。图6为2022年度鄂尔多斯盆地NXX三维叠前时间偏移剖面,资料目的层反射形态清晰,层间信息丰富,延长组和石盒子组、太原组等地层可连续追踪对比;深层成像效果好,地层间不整合接触关系和构造特征比较清晰。

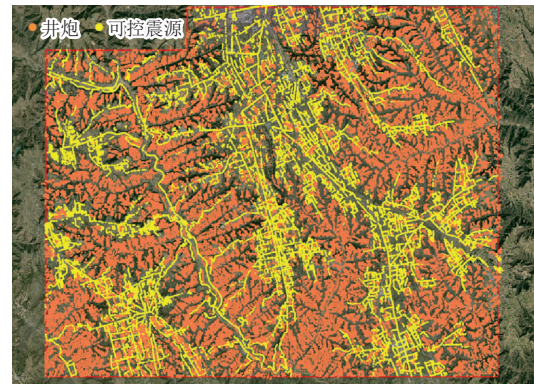


图4 NXX三维激发点位分布图
Fig. 4 Distribution of NXX 3D shots

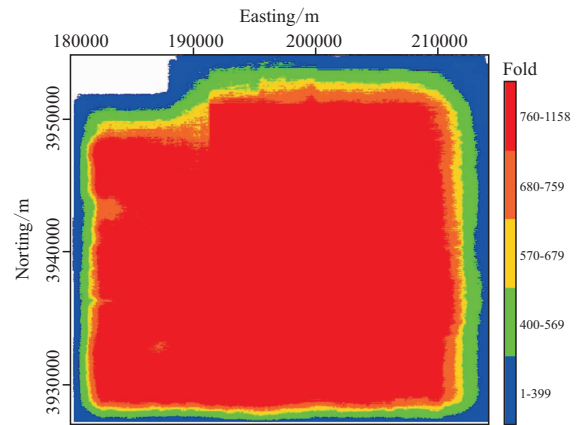


图5 NXX三维覆盖次数分析图
Fig. 5 Analysis diagram of NXX 3D folds

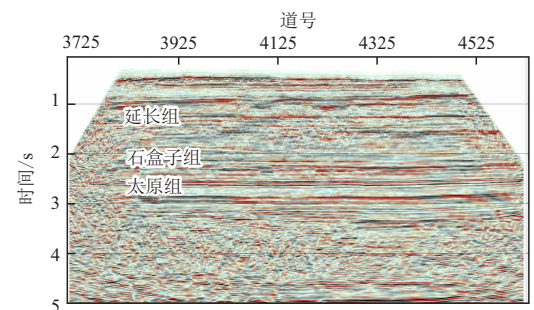


图6 NXX三维叠前时间偏移剖面
Fig. 6 NXX 3D prestack time migration profile

4 结论

通过本项目的研究与实施,对复杂黄土山地区井震联合高效采集技术的应用及发展方向,形成以下认识:

- 1)在复杂黄土山地区应用井震联合预案设计技

术可以大幅度提升点位均匀性,实施过程中,通过井震动态调整,可有效保证预案实施率。

2)应用 VPM+SSC 井震联合双源激发技术可实现井震高度融合、瞬时切换,通过设置 T-D 规则,可实现井炮与可控震源变间隔时间采集,有效提升采集效率。

3)相对于井炮激发方式,可控震源激发具有环保、安全、高效等优势,在复杂黄土山地区加大可控震源的实施比例是项目提质增效重要措施。

参考文献:

- [1] 胡峰,李彪,陈江力,等.三维地震采集施工模板优化布设方法的探讨[J].物探化探计算技术,2020,42(5):596-602.
HU F,LI B,CHEN J L,et al. Discussion on the method of optimization layout on 3D seismic acquisition operation template[J]. Computing Techniques for Geophysical and GEOChemical Exploration,2020,42(5):596-602. (In Chinese)
- [2] 秦婕,李辉峰,王宏伟,等.叠前去噪技术在鄂尔多斯黄土塬区地震资料的应用[J].物探化探计算技术,2015,37(5):644-650.
QIN J,LI H F,WANG H W,et al. The application of pre-stack noise attenuation technology for seismic data of Soil Yuan area in Ordos basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2015,37(5):644-650. (In Chinese)
- [3] 付锁堂,王大兴,姚宗惠.鄂尔多斯盆地黄土塬三维地震技术突破及勘探开发效果[J].中国石油勘探,2020,25(1):67-77.
FU S T,WANG D X,YAO Z H. Progress of 3D seismic exploration technologies and gas exploration and development performance in the loess tableland area of the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration,2020,25(1):67-77. (In Chinese)
- [4] 胡育波,吕震川,普宗源,等.黄土山地区高密度地震勘探激发方法分析[J].延安大学学报,2014,33(3):83-87.
HU Y B,LY Z C,PU Z Y,et al. Analysis of high-density seismic exploration technology in loess mountain [J]. Journal of University,2014,33(3):83-87. (In Chinese)
- [5] 王正良,程顺有,罗军锁,等.鄂尔多斯盆地苏里格南黄土山地地震采集技术[J].地球物理学进展,2013,28(1):354-364.
WANG Z L,CHENG S Y,LUO J S,et al. Seismic acquisition techniques and their application for loess hills in southern Sulige of Ordos Basin[J]. Progress in Geophysics,2013,28(1):354-364. (In Chinese)
- [6] 翟一兵,何琦,陈亚民,等.SSC+VPM激发井炮的原理与应用[J].物探装备,2021,31(3):161-164.
ZHAI Y B,HE Q,CHEN Y M,et al. The application and precautions of SSC+VPM shooting [J]. EGP,2021,31(3):161-164. (In Chinese)
- [7] 和海雷,史庆阳,伊鸿斌,等.黄土山地可控震源与井炮联合激发配套技术研究[C].//中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集,2021:188-191.
HE H L,SHI Q Y,YI H B,et al. Research on matching technology of vibroseis and explosive combined excitation in loess mountain[C].//Proceedings of Geophysical Technology Symposium 2021 of China Petroleum Society,2021:188-191. (In Chinese)
- [8] 史炳程,张建磊,谭永贵,等.黄土塬区可控震源激发试验分析[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(1):128-130.
SHI B C,ZHANG J L,TAN Y G,et al. Excitation test analysis of vibroseis in loess tableland[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality,2018,38(1):128-130. (In Chinese)
- [9] 王楠,刘小峰,王世鹏,等.可控震源激发生产管理系统概述与应用[J].物探装备,2021,31(6):373-375.
WANG N,LIU X F,WANG S P,et al. Overview and application of vibroseis excitation production management [J]. Equipment for Geophysical Prospecting,2021,31(6):373-375. (In Chinese)

Application of explosive-vibroseis combined efficient acquisition technology in complex loess mountain area

ZHANG Yu, ZHANG Qunying, DONG Jinwei, REN Liying, HUANG Kai
(Liaohu Geophysical Exploration Company Branch of BGP CNPC, Panjin 124010, China)

Abstract: With the continuous development of seismic acquisition technology of "2W1H", several explosive-vibroseis combined seismic acquisition projects have been successfully carried out in Ordos Basin, where vibroseis has played a great advan-

tage. However, there are still many challenges on achieving the high integration and efficient acquisition of explosives and vibroseis. It is mainly manifested in the poor uniformity of point layout, low application rate of obstacle area, and difficulty in improving acquisition efficiency. Through the technical research and analysis of 3D seismic exploration projects in complex loess mountain areas in recent years, advanced technologies such as explosive-vibroseis combined high-precision pre-plan design and VPM+SSC explosive-vibroseis combined dual-source excitation are summarized. The above technologies have been successfully applied in the 2022 NXX 3D project in the Ordos Basin and have achieved remarkable results. It creates a new situation of explosive vibroseis combined with an efficient acquisition in loess mountain area.

Keywords: high precision preplan; dynamic adjustment; dual-source excitation; VPM excitation system; SSC controller