



董金伟 张宏 黄凯 等. 2021. 无线节点采集技术在东部复杂地表区地震勘探中的应用及效果. 地球物理学进展, 36(5) : 1948-1955 ,doi: 10.6038/pg2021EE0384.

DONG JinWei , ZHANG Hong , HUANG Kai , et al. 2021. Application and effect of wireless node acquisition technology in seismic exploration in the eastern complex surface area. *Progress in Geophysics* ( in Chinese ) , 36( 5 ) : 1948-1955 ,doi: 10.6038/pg2021EE0384.

## 无线节点采集技术在东部复杂地表区地震勘探中的应用及效果 Application and effect of wireless node acquisition technology in seismic exploration in the eastern complex surface area

董金伟 张宏 黄凯 张群英\* 姚奇

DONG JinWei , ZHANG Hong , HUANG Kai , ZHANG QunYing\* , YAO Qi

中国石油东方地球物理公司辽河物探处 盘锦 124010

Liaohe Geophysical Exploration Company Branch of BGP CNPC , Panjin 124010 , China

**摘要** 随着东部老油田油气勘探程度的不断提升,后续复杂地质目标的勘探对地震资料的分辨率和成像精度提出了更高要求,导致地震采集方案日趋强化,野外采集作业投入的设备数量急剧增加,地震勘探面临巨大的成本压力。面对东部老油区人口稠密、地表障碍密集的特点,无线节点具有放样不受地物制约、自主连续接收、采集排列可室内灵活定义的优势;与可控震源高效激发技术相配套,可实现复杂地表区三维地震采集的高效作业,从而缩短地震采集工期,缓解地震勘探成本的压力。2020年东方地球物理公司辽河物探处在辽河拗陷 SJP 地区的三维勘探表明,无线节点采集技术在复杂地表区适用可行,可以有效提高复杂地质目标的成像精度,是东部老油区地震勘探技术经济一体化的发展方向。

**关键词** 无线节点; 数据切分; 可控震源; 自组网激发; 质量控制

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2021EE0384

**Abstract** With the continuous improvement of oil and gas exploration in the old oilfield in the east, the subsequent exploration of complex geological targets puts forward higher requirements for the resolution and imaging accuracy of seismic data, which leads to the strengthening of seismic acquisition schemes, the sharp increase of the number of equipment invested in field acquisition operations, and the huge cost pressure of seismic exploration. Facing the characteristics of dense population and dense surface obstacles in the old oil region in the east, wireless nodes have the advantages of not being restricted by ground objects, autonomous and continuous reception, and arrangement can be flexibly defined indoors, combined with vibroseis excitation technology, it can realize the efficient operation of 3D seismic acquisition in complex surface areas, thereby shortening the seismic acquisition period and alleviating the pressure of seismic exploration costs. In 2020, the 3D exploration in SJP area of Liaohe Depression by the Liaohe Geophysical Department shows that the wireless node acquisition technology is feasible in the complex areas, and improves the imaging accuracy of complex geological targets effectively, which is the development direction of the integration of seismic exploration technology and economy in the old oil in eastern regions.

**Keywords** Wireless node; Data segmentation; Vibroseis; Independent shooting; Quality control

### 0 引言

东部老油区的油气勘探始于 20 世纪 70 年代,经过近 50 年的持续勘探,油区勘探程度不断提高,当前勘探重点已从构造油气藏转向岩性、基岩潜山等复杂油气藏;复杂目标的精细勘探对地震资料的信噪比和分辨率提出了更高的要求,导致地震采集方案日趋强化,采集作业成本的不断增加与有限的勘探投资矛盾愈发凸显。近年来,地球物理行业加大“两宽一高”地震技术(汪恩华等,2013;王学军等,2015;张丽艳

等,2018;宁宏晓等,2019)的攻关应用,通过可控震源高效采集缩短作业工期(张丽艳等,2017;肖虎等,2019),在一定程度上缓解了地震勘探工程的成本压力。但在东部老油区,由于人口稠密、村镇遍布、密集工农设施的制约,传统的可控震源激发、有线地震采集系统接收的勘探方式,野外难以实现连续采集作业,采集效率提升空间有限。现阶段,迫切需要寻求一种基本不受地表条件约束的地震采集方法,最大程度提高采集效率,支撑强化技术方案的规模应用,实现东部复杂地表区地震勘探的技术经济一体化。

收稿日期 2020-11-25; 修回日期 2021-05-31. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”(2017E-1602)资助。

第一作者简介 董金伟,男,1984年生,工程师,主要从事地震资料采集工作。E-mail: 272366077@qq.com

\* 通讯作者 张群英,女,1981年生,工程师,主要从事地震资料采集工作。E-mail: 515592662@qq.com

得益于电子信息技术、存储技术和锂电池技术的发展,近年来无线节点采集系统性能逐步趋于成熟.相对传统的有线仪器,无线节点取消了检波器之间的连接电缆;每个节点都配备GPS模块(任彦宗等,2021),各单元之间彼此独立,单个故障点不会影响到其他单元以及整个系统的正常工作.这种采用并行、分布记录地震数据的采集方式,摆脱了传统线缆的束缚,极大地简化了采集系统的结构,增加了地震采集有效作业时间;此外,由于无线节点单体重量轻,可大幅降低野外放样劳动强度,提高采集效率,在高密度地震勘探中成本优势明显.

目前地球物理行业应用的无线节点,分为分离式和集成式2种(王伟等,2018);前者采集站与检波器、电源分别连接,形成一个独立工作的接收单元,如GeoSpace公司的GSR节点、INOVA公司的Hawk节点等;后者将采集站、检波器与电源整合到同一个节点设备中,操作更为便捷,如Fairfield Nodal公司的Zland节点、INOVA公司的Quantum节点、东方地球物理公司的eSeis II节点等.受节点设备性能和技术成熟度的影响,无线节点采集技术从2005年开始在国外地震采集中规模应用并逐步被业界接收,其在国内的生产应用进程晚于国外.2013年,鄂尔多斯盆地较早地开展分离式节点的攻关采集,经过近4年的应用形成了一套相对成熟的采集技术和作业方法(胡峥等,2018);2017年,甘志强等(2017)通过试验对比验证了分离式节点与有线仪器联合采集的有效性,提出了两类仪器联合采集的具体方法并在华北探区应用获得成功.2018—2019年,东方地球物理公司辽河物探处先后在辽河探区进行了集成式节点Quantum、Smartsolo与有线仪器的对比采集试验,验证了东部探区采用全无线节点进行地震采集的有效性;2020年,在辽河拗陷SJP地区首次实现全无线节点三维地震采集,实现地震采集和作业方式的转型升级,为东部复杂地表区地震勘探提供了有效借鉴.

### 1 无线节点采集技术特点

相对传统的有线地震采集系统,应用无线节点开展地震采集具有以下优势:①没有数据传输带宽的限制,理论上采集道数可无限扩展,为超高密度地震采集奠定了基础,提高了地震勘探解决复杂地质问题的能力;②消除村庄、工农业场所等复杂地表条件对接收排列的制约,可实现接收点的准确放样(聂明涛等,2016;史子乐等,2019;路交通等,2020);③在野外放样完成后,即刻开始自主不间断接收地震数据,不存在排列不通的问题,可实现24h连续接收;④接收的地震数据存贮在各个节点终端,采集完成后回收至室内的连续记录(母记录),可在室内灵活定义切分单炮使用的接收排列,根据地震资料处理的需要增加采集实际覆盖次数,改善地震资料品质.

东部复杂地表区无线节点采集,核心在于发挥无线节点连续记录的优势,通过与可控震源高效激发技术相配套,将无线节点连续记录的优势转化为连续采集时间;通过增加地震采集有效时间,提高复杂地表区采集效率.该技术主要由复杂地表区物理点布设、无线节点单点接收、可控震源高效激发和地震采集数据质控等四项支撑技术构成.复杂地表区物理点布设通过室内、现场多轮次的点位调整,实现激发点、接收点的全区寻优化布设,本文对此不作赘述.无线节点单点接收通过配套埋置工艺和点位检核方法的应用,实现地震数据的高质量、连续接收;可控震源高效激发通过滑动扫描、自组网激发等技术的联合应用,实现可控震源高效激发;针对无线节点“盲采”和可控震源高效激发的特点,应用地震采集数据质控实现可控震源和无线节点工作状态的有效监控,确保地震采集数据质量;无线节点采集技术的实施流程图见图1.

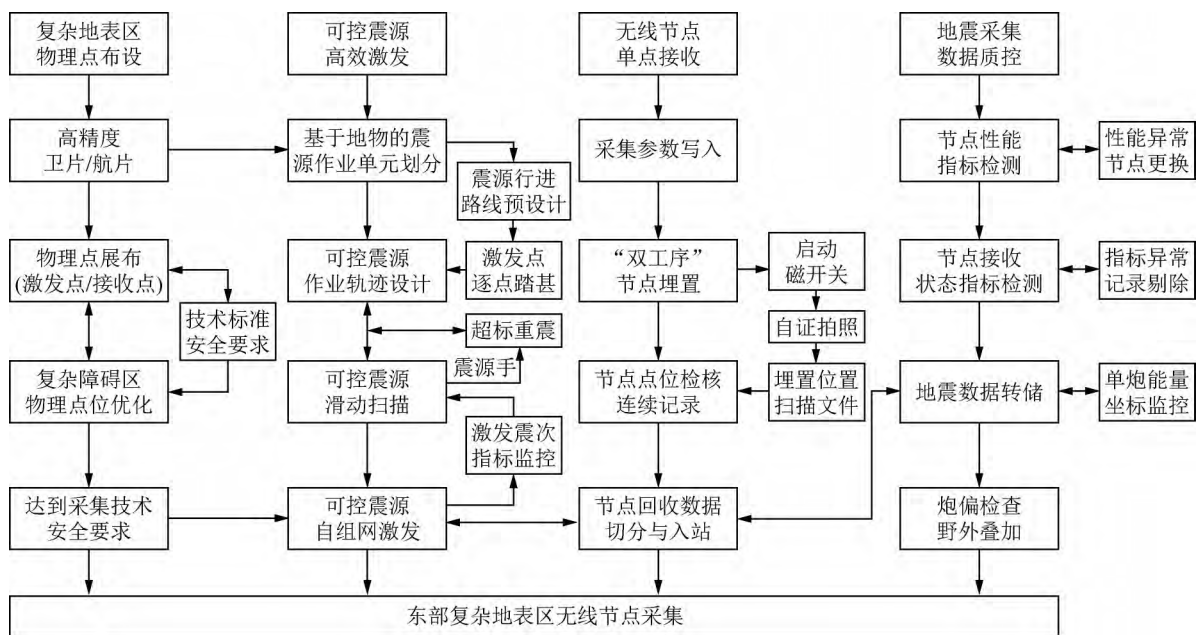


图1 东部复杂地表区无线采集技术流程图

Fig. 1 Wireless node acquisition technology diagram in the eastern complex surface area

## 2 无线节点单点接收技术

野外采集过程中,无线节点不间断地接收地震数据,集数据接收与存储于一体.无线节点通过GPS授时系统获得精准的采集时间,实现全部节点之间、节点与激发系统之间的时间同步;同时,按照设定的时间间隔在连续接收的地震数据(即母记录)上设置时间戳,为接收数据的后续的分切提供时间标识.应用无线节点进行地震数据接收,包括地震采集参数写入,“双工序”埋置,点位检核,数据切分与入站等步骤.

### 2.1 “双工序”节点埋置

受农业生产季节的限制,东部探区地震勘探主要集中在冬季实施,寒冷气温导致地表至0.5 m深度处形成一层坚硬的冻土层,无线节点尾锥很难插入地表或不能垂直插入地表,影响节点与地表的耦合效果.为保证冻土地表无线节点的埋置质量,将无线节点埋置细分为两个环节,创新“双工序”埋置工艺:①打孔组使用机械化打孔器,按照节点外壳尺寸及尾锥长度,配备专用钻头,提前逐点打孔,提高打孔速度;②埋置组将无线节点放置到已打好的节点孔中,使节点尾锥全部插入地表,见图2.通过“打孔+埋置”流水线作业,在提高节点埋置速度的同时,实现无线节点与地表的良好耦合.

### 2.2 节点点位检核

无线节点采用“盲采”工作模式,其在野外布设完成后,即刻开始自主接收地震数据;野外通过无线节点物理序列号、标签二维码与接收桩号的匹配进行节点的布设管理.首先,测量人员完成每个接收点的坐标实测,在完成的接收点上设置桩号标志旗,并将接收点坐标文件上传至无线节点布设监控平台;其次,技术人员向野外放线人员分配无线节点埋置任务,放线人员在手机APP上接收到需要放样的接收点桩号文件,在野外每完成一个节点的埋置,即在手机APP中确认完成布设的节点接收桩号,并扫描节点顶壳上的二维码,即完成该无线节点与接收点桩号、点位坐标的匹配.每扫描一个节点顶壳上的二维码,就会生成一个完成布设节点的位置文件,并通过手机APP及时传输至室内布设监控平台,平台中对应接收点从“未布设”转变为“接收中”状态,技术人员基于该平台总体展示情况,实现对野外无线节点的布设进度的实时监控.根据三维地震采集使用的观测系统,可确定放炮采集需要使用的排列范围、可以回收的排列范围、生产滚动需要铺设的排列范围,实现无线节点接收排列的有序滚动.

对野外回收的一定范围内的无线节点,将其数量与节点布设阶段产生的位置文件数量进行对比;若前者少于后者,则表明存在未被回收的无线节点.对已回收的无线节点,在下载地震数据时同时读取节点的物理序列号;由于该序列号与节点的标签二维码为映射关系,通过检索标签二维码就可以确定该节点的接收点桩号和点位坐标;通过比对回收的全部节点序列号对应的接收桩号与该范围内全部布设文件接收桩号的差异,就可准确确定未被回收的无线节点桩号.将

这些桩号反馈给野外放线人员,精确找回被遗漏的节点,避免节点设备和采集数据的丢失.通过以上方法的应用,2020年辽河拗陷SJP三维全区节点丢失率控制在0.78‰,有效保证采集数据的完整性.

### 2.3 数据切分与入站

无线节点采集生成单炮数据的方式与有线仪器采集直接形成炮集数据不同,在采集过程中,无线节点记录的是单个接收点的连续数据.每天将野外回收的节点数据以检波点道集数据的形式进行下载和存储,当下载的检波点道数达到三维观测系统约定的道数后,在SPS、布设文件和放炮时间文件的约束下,进行道集数据的分选与切分,形成完整的单炮数据,见图3.

2020年辽河拗陷SJP三维采集,充分利用无线节点全排列接收、室内使用SPS设定接收道进行数据切分形成单炮的特点,在原设计的44 L×7 S×408 T观测系统的基础上,采用44 L×7 S×552 T观测系统进行数据分选与切分,通过在设计的接收段外增加额外的接收道,灵活提高地震采集覆盖次数,使采集实际覆盖次数从设计的748次增加到1012次,为后期资料处理进一步提高剖面信噪比奠定了基础.

对完成切分的单炮数据,保存在无线节点数据下载管理系统的磁盘阵列中,要进行单炮数据的检查与质控,需要将单炮数据从磁盘阵列传输到地震资料处理工作站中.为了提高单炮数据传输速度,采用光纤直连方式,分别在无线节点数据下载管理系统的磁盘阵列和处理工作站配置万兆网卡,两个网卡之间通过光纤连接,使单炮数据实际传输速度达到250 MB/s,每日将6 TB数据进站时间从传统采用移动硬盘拷贝耗费的18 h减少到7 h,实现节点采集海量单炮数据的快速入站与质控.

## 3 可控震源高效激发技术

相对井炮激发方式,可控震源激发具有环保、高效、安全的特点,更利于在东部人口稠密区进行采集作业.在三维地震采集中,应用多组可控震源滑动扫描,通过缩短可控震源两次扫描之间的空闲时间来提高可控震源的激发效率;创新应用可控震源自组网激发,在东部探区首次实现无仪器车的地震采集模式,在营地直接进行生产和采集管控,消除传统采集仪器车频繁搬点导致的停工时间,增加有效采集时间.通过以上技术的联合应用,提高复杂地表区激发效率,将无线节点连续记录的优势转化为地震连续采集时间.

### 3.1 可控震源滑动扫描技术

目前,可控震源高效扫描方式有交替扫描、滑动扫描、动态扫描、超高效混叠采集等多种方式(张慕刚等,2021).受东部复杂地表区地表条件、地震勘探工程面积、设备性能的限制,滑动扫描是比较适合的高效扫描方式.滑动扫描采用多组可控震源扫描,各震源扫描信号的起止频率、扫描方式、驱动幅度和扫描时间完全相同,相邻振次的扫描时间可以部分重叠,下组震源不必等待上一组震源完成激发即可开始扫描,从而大大缩短了两次扫描的间隔时间(魏国伟等,2008;倪宇东等,2011).实现可控震源的高效激发.

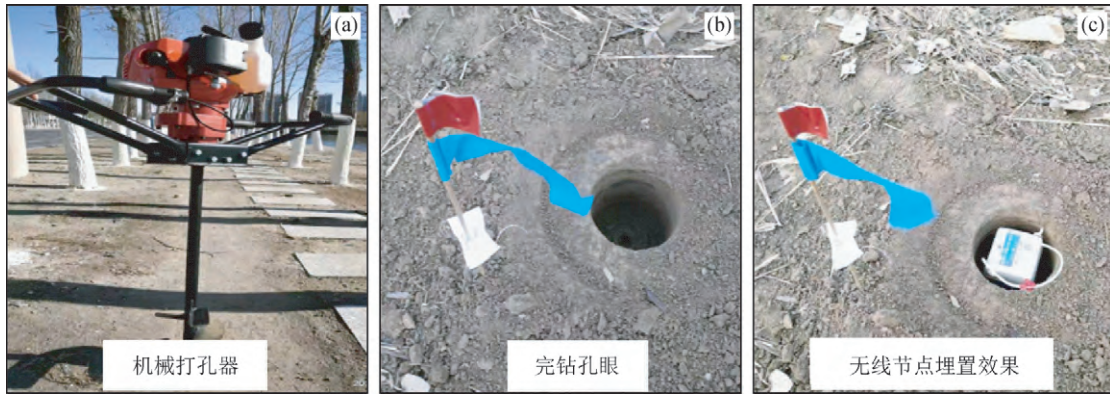


图2 无线节点“双工序”埋置效果图

Fig.2 “Dual process” embedded effect of wireless node

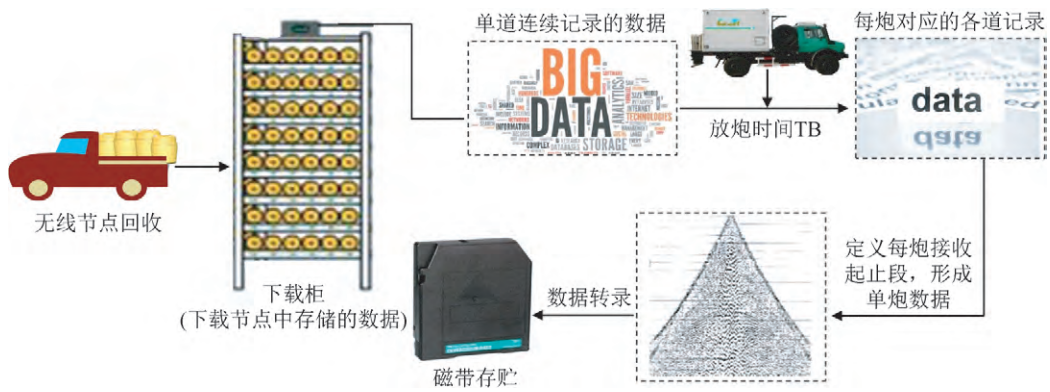


图3 无线节点数据下载管理流程图

Fig.3 Wireless node data download management process

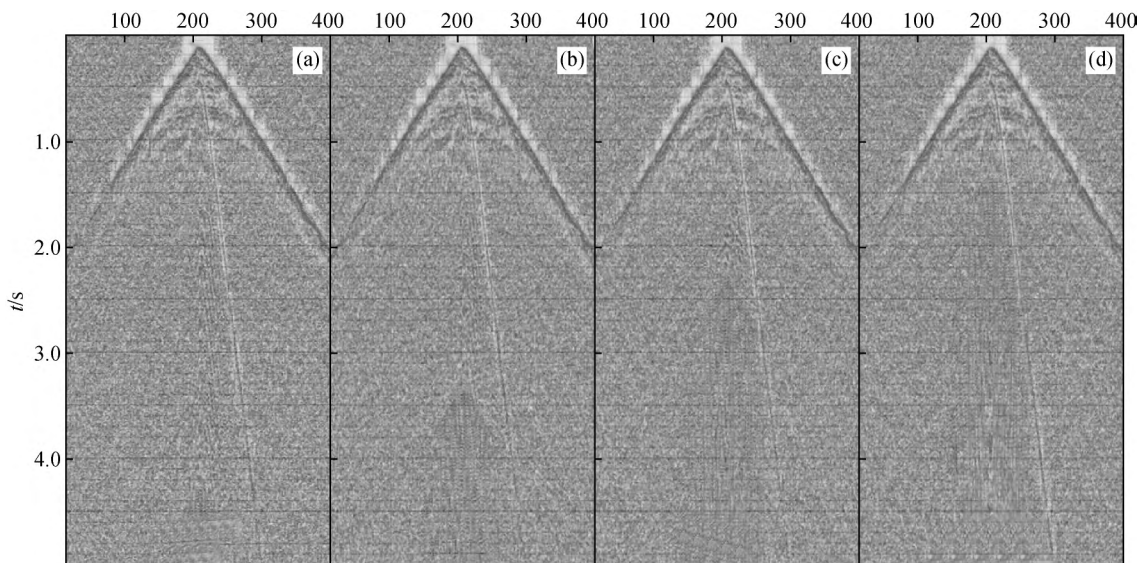


图4 不同滑动时间采集单炮对比(70 ~ 140 Hz 带通滤波)

(a) 滑动时间 12 s; (b) 滑动时间 11 s; (c) 滑动时间 10 s; (d) 滑动时间 9 s.

Fig.4 Acquisition shots comparison of different slip times (70 ~ 140 Hz band-pass filtering)

(a) Slip time 12 s; (b) Slip time 11 s; (c) Slip time 10 s; (d) Slip time 9 s.

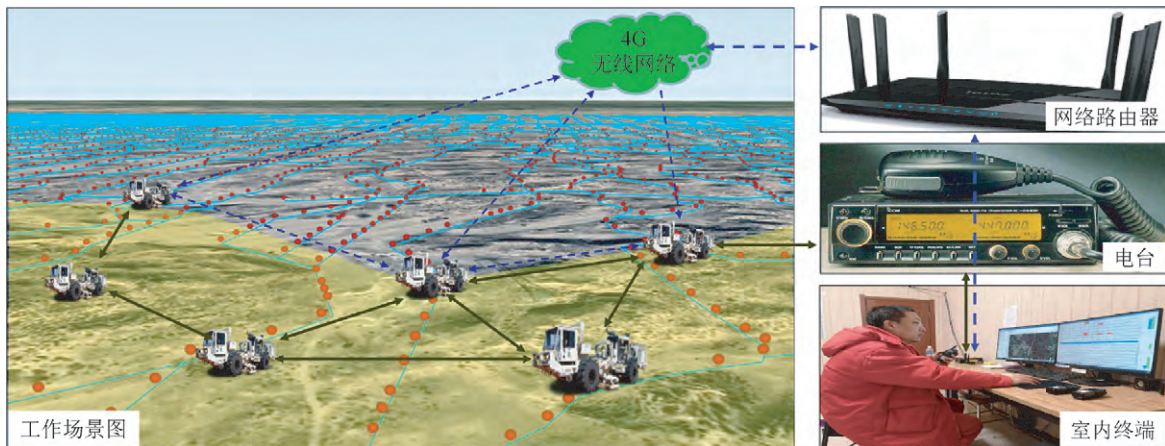


图5 可控震源自组网激发示意图

Fig. 5 Vibroseis independent shooting diagram

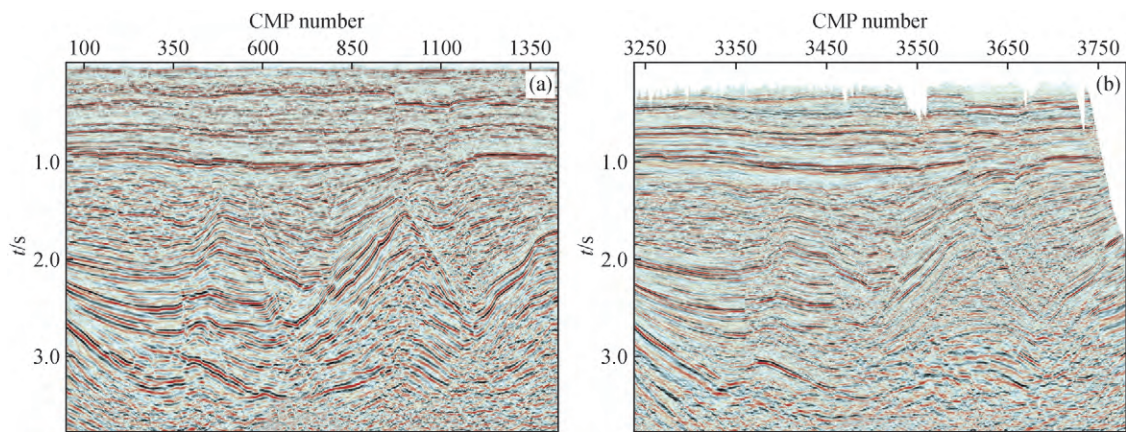


图6 SJP地区新三维地震剖面(a)与以往老三维地震剖面(b)对比

Fig. 6 Comparison of new 3D seismic profile (a) and old 3D seismic profile (b) in SJP

采用滑动扫描采集,每个无线节点记录一系列连续振次激发的母记录,通过每个振次对应的 $T_0$ 时进行限定,用相应的扫描信号与母记录相关就可以得到各振次的单道记录,然后按照SPS约定的采集关系进行数据切片即形成单炮数据.通过相关方法从母记录中提取单炮,扫描信号与母记录相关形成的高阶谐波出现在本振次的 $T_0$ 时之前,会对上一炮记录形成谐波干扰(曹务祥和张慕刚,2005;田新琦等,2011;蓝益军等,2013;林娟等,2014).为避免高阶谐波对单炮中有效信号的影响,需要设定一个大于单炮记录长度的时间间隔作为可控震源连续激发的最小时间间隔(即滑动时间).因此,可控震源滑动扫描采集,滑动时间的选取尤为重要;选取的值过小,会导致有效信号被高阶谐波干扰,影响采集单炮质量;选取的值过大,会导致可控震源激发效率降低,造成采集时间浪费.

在SJP三维,通过试验确定滑动时间的合适值.采用两组可控震源,将滑动时间分别设定为9 s、10 s、11 s和12 s进行激发,对每组试验单炮,选取激发时序在前的单炮记录进

行70~140 Hz的带通滤波,在单炮记录中具有与单炮初至平行的“倒三角”特征的干扰即为高阶谐波;可以看到,随着滑动时间的增加,高阶谐波在单炮记录中出现的时间随之延后,见图4. SJP地区最深勘探地层时间深度为4 s,按照高阶谐波不影响目的层资料的原则,合适的滑动时间设定为12 s,从而最大程度提高可控震源激发效率.

### 3.2 可控震源自组网激发技术

应用无线节点开展地震采集,由于节点采用自主连续、自行存贮数据的工作模式,因此,无需使用传统的仪器车对节点排列进行管理.在节点排列充足的条件下,只需对激发端的可控震源进行有效管控,就可以实现无仪器车的地震采集模式,直接消除仪器车搬点导致的停工时间.正是基于该设计理念,2020年在辽河拗陷SJP地区创新应用可控震源自组网激发技术,在东部探区首次实现无仪器车的地震采集模式,在营地直接进行可控震源激发生产和采集管控,每日增加有效采集时间3 h.

可控震源自组网激发技术实施过程中,自组网室内终端

集成了可控震源扫描信号设置与推送、可控震源位置实时显示、激发震次指标回收与显示、震点采集进度自动更新等功能,通过4G网络和MESH电台联合组网,形成可控震源控制信号和通讯信号的多链路、高冗余通讯网络,支撑复杂地表区可控震源长距离、高稳定性通讯,见图5。

在4G网络设施完善的城区,自组网激发系统将通讯方式从传统的无线电方式转变为4G网络传输方式,可控震源控制信号和质控信号通过公共通讯网络,经由网络服务器,实现自组网室内终端和各个震源之间的双向传输;在有4G网络的区域就可以实现通讯,通讯质量不受通讯距离和电磁干扰的影响。

MESH电台组网是一种新的无线局域网组网方式,网络中的每个MESH电台都同时作为信号发射机、接收机和中继站,均采用点对点方式通过无线中继链路互联,实现采集区域宽带网络搭建。自组网室内终端和可控震源之间的通讯利用MESH电台多条点对点方式完成,满足复杂地表区无线信号的传输需求。

通过可控震源自组网激发技术的应用,在复杂地表区建立了高冗余的通讯网络,克服了村庄密集、复杂电磁干扰导致的通讯不畅问题,支撑室内终端与野外可控震源的无盲区、不间断通讯,首次在辽河拗陷实现了可控震源24h全天候连续采集。同时,通过室内终端对可控震源生产进度和激发状态的监控,实现地震采集远程实时管理和质控,是地震采集技术信息化的最新成果。

#### 4 地震采集数据质控技术

相对传统的地震采集作业模式,无线节点高效采集质量控制的焦点出现明显的变化,表现为从以往注重单炮质量的后评价转变为注重作业过程的实时控制:①保证表征可控震源每个振次工作状态的6项指标合格,确保可控震源正常激发;②突出无线节点启用前的系统检测和每日状态检查,确保无线节点的正常接收。

##### 4.1 可控震源激发质控

可控震源激发质控主要包含以下环节:①可控震源手质控:可控震源每次振动后箱体屏幕显示相位、畸变、出力等6项指标,震源操作手实时监控震源指标情况;若发现指标超限,可控震源原地重震;②自组网室内终端质控:可控震源每激发一炮,终端实时显示震源指标和COG偏差,发现指标超标,通知可控震源及时重震;③室内质控:对可控震源激发的每个振次的VSS信号和震源指标PSS报告,由可控震源箱体直接下载,汇总分析,全程掌握可控震源工作状态。

##### 4.2 无线节点接收质控

无线节点采集过程中,在接收地震数据的同时,会生成记录节点位置信息(GPS)和信号强度信息(RMS)的两个脚本文件,利用这两个数据可以对节点在野外记录期间的状态进行有效质控。节点室内质控包括:①节点埋置位置质控:对比节点自身记录的GPS位置信息和测量提前实测的坐标,当节点位置信息与实测坐标超过行业标准限定值时,到野外复测节点实际埋置点的坐标和高度,替换测量成果,保证点

位数据的准确性;②节点记录数据质控:数据下载管理系统在下载节点数据的同时,提取每个节点接收期间的使用卫星数量、GPS信号强度、GPS时钟漂移量等状态参数,按照记录时间段生成各个参数的曲线图;表征无线节点正常工作的关键参数为GPS信号强度和GPS时钟漂移量,对比标准值挑选出曲线异常对应的无线节点,可以保证在用节点的正常接收。

#### 5 应用效果

2020年,东方地球物理公司辽河物探处在辽河拗陷SJP地区首次开展全无线节点三维地震采集攻关,地震攻关区满覆盖面积为200 km<sup>2</sup>,位于辽宁省中北部,地处辽河油田勘探老区,全区共涉及10个乡镇、156个村庄、养殖点1950多处;6条河流将工区分割成条带状,障碍区面积占比达58%,是东部典型的地震勘探复杂地表区。三维地震采用44 L×7 S×552 T观测系统、10 m×10 m面元的采集方案,通过无线节点采集技术、可控震源高效激发技术及配套方法的联合应用,实现了辽河拗陷SJP三维地震采集工程的高效采集;全工程采集平均日效达到5332炮,采集平均日效相对同类地表传统有线仪器的日效提高了30%。本区相同位置2000年进行了常规三维地震,采用12 L×12 S×80 T观测系统,25 m×50 m面元,检波器组合接收,并炮激发,表1为新老三维地震采集方案对比,图6为新老三维地震剖面对比。

表1 SJP地区新老三维地震采集方案对比  
Table 1 Comparison of the geometry parameters of new 3D seismic and old 3D seismic in SJP

	新三维观测系统	老三维观测系统
观测系统类型	44 L×7 S×552 T×1 R	12 L×12 S×80 T×6 R
面元大小	10 m×10 m	25 m×50 m
覆盖次数	1012次	60次
炮道密度	1012万道/km <sup>2</sup>	4.8万道/km <sup>2</sup>
激发方式	高精度可控震源1台1次,扫描频率2~130 Hz	1井×6~8 kg
接收方式	1只无线节点	2串×9只检波器组合

相对于以往三维地震,本次通过“两宽一高”观测系统+无线节点采集,新资料中深层潜山构造成像精度明显提高,内幕信息更为丰富;断裂细节和组合关系刻画更为精细,地震资料的信噪比和分辨率均得到大幅提升。

#### 6 结论

通过本项目的研究与实施,对无线节点采集技术在东部复杂区地震勘探中的应用和后续采集技术的发展方向,形成以下认识:

(1)对于东部高勘探程度的老油区,为解决复杂地质问题,后续地震采集选用的观测系统将更趋强化;采用无线节点采集技术,排列理论上可无限扩展,野外无需额外设备的

投入,使复杂区超大道数、超高密度地震采集成为可能,是支撑下步超高密度地震勘探技术、经济、资源一体化的有效解决方案。

(2) 在复杂地表区开展地震勘探,相对传统有线仪器采集面临工农活动导致的接收排列断续问题,无线节点不受连接电缆限制,具有放样便捷、点位准确的优势,便于快速形成排列、稳定连续接收,适合在复杂区地震采集中规模推广应用。

(3) 由于无线节点无排列断续问题的影响,实现了 24 h 的连续记录;为将无线节点的技术优势最大程度地转化为采集效率,联合应用滑动扫描、自主网激发技术提高可控震源的激发效率至为重要。

致谢 本项目的研究得到了东方地球物理公司采集技术中心专家肖虎、装备服务处专家刘小峰的指导与帮助,在此一并致谢!

## References

- Cao W X, Zhang M G. 2005. Slide-sweeping harmonic analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 40(5): 499-503, 509.
- Gan Z Q, Zhang L, Li Y, et al. 2017. Joint acquisition method of Hawk and G3i instrument [J]. EGP. (in Chinese), 27(2): 93-95, 102.
- Hu Z, Liu Y F, Ning X P. 2018. Troubleshooting for HAWK instrument problem summary [J]. EGP. (in Chinese), 28(5): 283-288.
- Lan Y J, Zhang S H, Meng Y L, et al. 2013. Harmonics on-site suppression on vibroseis slip-sweep data [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 48(4): 507-512.
- Lin J, Luo Y, Liu Y W, et al. 2014. Harmonic interference suppression on vibroseis slip sweep data [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 49(5): 852-856.
- Lu J T, Meng X S, Pei Q L. 2020. Research and application of wireless node seismic acquisition technology in complex area [J]. Petrochemical Industry Technology (in Chinese), 27(02): 326-327.
- Ni Y D, Wang J F, Ma T, et al. 2011. Advances in vibroseis acquisition [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 46(3): 349-356.
- Nie M T, Zhang M G, Ding G D, et al. 2016. Application of GSR Wireless Node Technology to the Seismic Exploration [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments (in Chinese), 2(4): 68-71.
- Ning H X, Tang D L, Pi H M, et al. 2019. The technology and development of "WBH" seismic exploration inland, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(5): 645-653.
- Ren Y Z, Lu Z W, Zhang X Y, et al. 2021. Progress in data acquisition and processing technology of portable nodal seismograph [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(2): 779-791, doi: 10.6038/pg2021EE0097.
- Shi Z L, Huang Y L, Li J, et al. 2019. Status and Development Trend of Onshore Seismic Nodal Instrument [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments (in Chinese), 5(1): 14-18.
- Tian X Q, Zhou T, Wang Z M, et al. 2011. Method of eliminating harmonic noise for vibroseis data in slip sweep technique [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 50(6): 565-574.
- Wang E H, Zhao B L, Wang X S, et al. 2013. Application and outlook of vibroseis acquisition techniques with high efficiency of CNPC [J]. China Petroleum Exploration (in Chinese), 18(5): 24-34.

- Wang W, Zhang M F, Zhu X J. 2018. Application of GSR node instrument with DSS seismic team [J]. EGP. (in Chinese), 28(1): 57-59, 64.
- Wang X J, Yu B L, Zhao X H, et al. 2015. Development and Application of "2W1H" Technique in Oil and Gas Exploration [J]. China Petroleum Exploration (in Chinese), 20(5): 41-53.
- Wei G W, Zhang M G, Wei T, et al. 2008. Slide-sweeping acquisition method of vibroseis and application [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 43(S2): 67-69.
- Xiao H, Tang D L, Yang G P, et al. 2019. Vibroseis dynamic sweep [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 54(3): 493-499.
- Zhang L Y, Li A, Pei J Y, et al. 2018. Low frequency vibrator "Two-wide One-high" seismic processing technique research [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(4): 1629-1636, doi: 10.6038/pg2018BB0267.
- Zhang L Y, Li A, Yu C Q. 2017. Application of broadband wide-azimuth and high-density 3D seismic exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 52(6): 1236-1245.
- Zhang M G, Zhu Y, Dong L Q, et al. 2021. Ultra-high productivity acquisition technology and its application [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 1176-1186, doi: 10.6038/pg2021EE0147.

## 附中文参考文献

- 曹务祥, 张慕刚. 2005. 滑动扫描谐波分析 [J]. 石油地球物理勘探, 40(5): 499-503, 509.
- 甘志强, 张琳, 李云, 等. 2017. Hawk 和 G3i 仪器联合采集的实现方法 [J]. 物探装备, 27(2): 93-95, 102.
- 胡峥, 刘一帆, 宁小平. 2018. HAWK 节点仪器常见故障及其解决方法 [J]. 物探装备, 28(5): 283-288.
- 蓝益军, 张树慧, 孟银龙, 等. 2013. 滑动扫描谐波的现场压制方法 [J]. 石油地球物理勘探, 48(4): 507-512.
- 林娟, 罗勇, 刘宜文, 等. 2014. 可控震源滑动扫描谐波干扰压制方法 [J]. 石油地球物理勘探, 49(5): 852-856.
- 路交通, 孟祥顺, 裴全理. 2020. 无线节点地震采集技术在复杂地区应用研究 [J]. 石化技术, 27(02): 326-327.
- 倪宇东, 王井富, 马涛, 等. 2011. 可控震源地震采集技术的进展 [J]. 石油地球物理勘探, 46(3): 349-356.
- 聂明涛, 张慕刚, 丁冠东, 等. 2016. GSR 无线节点采集技术在地震勘探中的应用 [J]. 石油管材与仪器, 2(4): 68-71.
- 宁宏晓, 唐东磊, 皮红梅, 等. 2019. 国内陆上“两宽一高”地震勘探技术及发展 [J]. 石油物探, 58(5): 645-653.
- 任彦宗, 卢占武, 张新彦, 等. 2021. 便携式节点地震仪数据采集和处理技术进展 [J]. 地球物理学进展, 36(2): 779-791, doi: 10.6038/pg2021EE0097.
- 史子乐, 黄艳林, 李静, 等. 2019. 陆上地震数据采集节点设备现状与发展 [J]. 石油管材与仪器, 5(1): 14-18.
- 田新琦, 周彤, 王志明, 等. 2011. 滑动扫描可控震源地震数据谐波干扰的消除方法 [J]. 石油物探, 50(6): 565-574.
- 汪恩华, 赵邦六, 王喜双, 等. 2013. 中国石油可控震源高效地震采集技术应用与展望 [J]. 中国石油勘探, 18(5): 24-34.
- 王伟, 张孟芬, 朱旭江. 2018. GSR 节点仪器与数字化地震队系统联合应用 [J]. 物探装备, 28(1): 57-59, 64.
- 王学军, 于宝利, 赵小辉, 等. 2015. 油气勘探中“两宽一高”技术问题的探讨与应用 [J]. 中国石油勘探, 20(5): 41-53.
- 魏国伟, 张慕刚, 魏铁, 等. 2008. 可控震源滑动扫描采集方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 43(增刊 2): 67-69.

肖虎,唐东磊,杨国平,等. 2019. 可控震源动态扫描技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 54(3): 493-499.

张丽艳,李昂,裴江云,等. 2018. 低频可控震源“两宽一高”地震处理技术研究[J]. 地球物理学进展, 33(4): 1629-1636, doi: 10.6038/pg2018BB0267.

张丽艳,李昂,于常青. 2017. 低频可控震源“两宽一高”地震勘探的应用[J]. 石油地球物理勘探, 52(6): 1236-1245.

张慕刚,祝杨,董烈乾,等. 2021. 可控震源超高效混叠采集技术及应用[J]. 地球物理学进展, 36(3): 1176-1186, doi: 10.6038/pg2021EE0147.