

# 地震数据采集核心装备现状及发展方向

刘振武\*<sup>①</sup> 撒利明<sup>①</sup> 董世泰<sup>②</sup> 韩晓泉<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>中国石油天然气集团公司,北京 100007; <sup>②</sup>中国石油勘探开发研究院,北京 100083;

<sup>③</sup>INOVA 地球物理设备公司,陕西西安 710061)

刘振武,撒利明,董世泰,韩晓泉.地震数据采集核心装备现状及发展方向.石油地球物理勘探,2013,48(4):663~675

**摘要** 地震数据采集核心装备是推动地震勘探技术和方法发展的原动力。高密度、宽方位、全波采集等地震勘探技术已成为解决复杂地质问题的关键技术,超万道地震仪器、高保真宽频数字检波器、高效激发震源等是这些技术推广应用的基础。本文系统地介绍了当今世界地震数据采集核心装备技术进展,剖析了中国石油地震数据采集核心装备的发展现状。根据物探技术发展需求,提出了发展有线、无线相结合的地震仪器、数字检波器和宽频高效采集可控震源的方向。

**关键词** 地震 数据采集 核心装备 现状 发展方向

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

地震数据采集核心装备包括地震(记录)仪器、地震检波器、激发震源三个主要部分,其中地震仪器是关键装备。纵观地震勘探技术的几个发展阶段,从光点地震、模拟地震、数字地震、三维地震,一直到现在的高密度、全波乃至未来的矢量地震,无不受地震仪器技术发展的驱动而发展。电子管仪器时代以模拟光点地震为主;晶体管和模拟磁带记录时代是模拟地震;晶体管和集成电路开始了数字地震,使野外记录道数大幅度提升,覆盖开关技术的应用,使得高覆盖二维地震技术、小规模三维地震技术成为可能;16位、24位模数转换技术大幅度提高了勘探仪器的分辨率,大规模集成电路的应用又促进了千道以上地震仪器的诞生,使三维地震技术得到普遍推广应用;超大规模集成电路促使万道地震仪器诞生,使高密度、全波等地震技术得到迅猛发展;2002年Sercel和ION相继推出的基于MEMS传感器的全数字地震仪被业界认为是第六代地震仪;2003年英国Vibtech公司推出的蜂窝地震系统、2009年美国Wireless公司推出的实时无线系统,代表了地震数据采集系统发展的新趋势;Shell等公司现致力于发展的

百万道地震仪器,代表未来超高密度地震技术应用的发展方向。

如今,石油勘探开发目标多为复杂地质体,对分辨率要求更高。为了使深层目标能更好地成像、能够准确检测油气,覆盖次数增加、观测密度不断提高、观测方位不断增加,高密度、宽方位、多波等技术已成为主流技术。为了适应这些需求,在大规模集成电路基础上,人们将现代有线和无线通信、计算机技术、网络技术、微电子学及软件技术、遥控技术、海量数据管理技术等纳入地震仪器,使地震仪器在信号质量、采集能力、海量数据处理、传输方式、交互管理、施工效率及HSE等方面都有了质的飞跃。这些技术的发展已经真正成为地震勘探技术发展的驱动力。

## 2 对地震勘探核心装备的需求

地震仪器是真实记录返回地面地震信号的核心装备,既要求不丢失有用的地震信号,又要求对于干扰信号充分采样,以利于在野外或室内进行压制。

不同的应用对象对地震仪器的需求不同。油公司要求地震仪器采用高位数(大于24位)模数转换器,高动态范围( $\geq 120\text{dB}$ ),低系统噪声和低道间串音,线性宽频响应(几赫兹~几百赫兹),各地震道电

\*北京市西城区六铺炕街6号中国石油天然气集团公司咨询中心,100724。Email:lzw@cnpc.com.cn

本文于2013年4月12日收到。

路的振幅特性和相位特性保持一致,高保真度,大道数(十万道)控制,适宜大道数、高密度、单道接收、高精度和宽方位采集、现场质量控制,野外实施道距灵活,对野外环境造成的伤害最低,使用低成本技术。物探公司则要求仪器在满足油公司需求的同时,具有便携、稳定、可靠、灵活、便于维修和维护、工业标准器件、更灵活的多功能操作系统和人性化的操作界面,简化野外施工、适应各种复杂的野外环境、超低功耗、高效采集、低 HSE 风险、利用成熟的新技术、有线无线混合等性能特点,以减少野外施工人员、提高工作效率、降低综合使用成本、提高生产效益。

不同的地质目标和技术需求对地震仪器也提出了不同的配置要求。以提高分辨率为目的的地震采集要求高密度、超高密度观测;以提高储层预测精度为目标的地震采集需要宽方位、宽频接收,要求仪器的实时作业能力达到几万道甚至几十万道;另一方面,为了同时记录强信号和受大地吸收衰减影响的高频弱小信号,要求仪器系统的动态范围达到或接近 120dB,并具有高频补偿功能,以进一步推动小断层、小幅度构造、小尺度潜山、薄储层、小砂体勘探和精细油藏描述技术的进步。

复杂环境大道数作业则需要地震仪器具有良好的环境适应性,能够适应平原、森林、水网、城区、山地等不同地表类型,具有野外实时监控功能,体积小、重量轻、操作简单、易于复杂地形布设。

对于深层地震勘探,则需要长排列、宽排列片,除要求仪器带道能力达到万道以上外,还要求单线带道能力足够大,以尽量减少野外设备量,改善震源设备的通行能力。另外,具有良好的网络冗余功能,在大排列工作当中,任何点的传输故障都可通过网络冗余功能自动解决。

对于致密储层油气、页岩油气、煤层气等非常规领域的资源勘探<sup>[1]</sup>,地面地震对记录仪器的要求与常规地震相同,但增产改造过程监测的微地震监测技术应用,则需要地震仪器具备实时不间断连续时间记录的能力。地面监测时,除满足不间断连续记录能力外,必需尽量少占用井场,无连接大线,不影响车辆通行和压裂施工。

对于海洋地震勘探,要求仪器具备压制“鬼波”的能力和较宽的频带响应范围,能够适应大于 1000m 水深作业,海底电缆具有多分量并配备精确

的定位系统。

综上所述,对于低渗透层、深层、深海、非常规等勘探目标,要求地震勘探的核心装备具有大道数、大动态范围、频率响应宽、数据采集效率高等特点,因此需要地震仪器具有灵活、适应和管理万道以上、海量数据作业的能力,检波器具有高保真、大动态范围、宽频响应的性能,激发设备能够环保且适应高效采集、宽频激发的要求<sup>[2]</sup>。

### 3 地震勘探核心装备新进展

#### 3.1 地震仪器新进展

地震仪器一直伴随着基础电子工业的发展在不断地发展,经历了光点、模拟、数字、初期遥测、后期遥测、全数字记录、节点到实时无线万道网络遥测等七代发展历程。

第一代是模拟光点记录地震仪器。以 51 型仪器为代表,以光点感光照相纸记录作为地震勘探的原始资料,信号的动态范围小,频带窄,接收道数少。

第二代为模拟磁带记录地震仪器。以 CGG59 为代表,以磁带为介质。上述第一、第二阶段代表了模拟地震阶段。

第三代是数字磁带记录地震仪器。以 DFS-V、SN338 为代表,采用了前置放大、瞬时浮点放大和 A/D 转换技术,实现了由模拟记录到数字记录的变革,其记录的动态范围、有效频带与接收道数均有大幅提高。这一阶段代表了数字阶段。

第四代是遥测数字地震仪器。以 SN368、OP-SEIS5586 等为代表,实现了以数字信号形式在电缆上串行传输地震道信息,主机充分地简化,系统的采集能力、抗干扰能力得到了显著提高,带道能力达到 1000 道。这一阶段促进了三维地震的到来。

第五代是多道遥测数字地震仪器。以 SN388、ARIES、BOX、SYSTEM II 等为代表,采用集成的 24 位 A/D 转换器取代了先前的瞬时浮点放大器和 16 位 A/D 转换器,系统的瞬时动态范围、记录频带又有大幅提升,带道能力达到 5000 道。

第六代是全数字地震仪器。以原 I/O 公司的 VECTORSEIS 和 Sercel 的 DSU 系列为代表,以 MEMS 技术为核心的加速度数字检波器,使整个接收系统的动态范围达 90 dB 以上,实现了全数字化万道以上实时采集<sup>[8]</sup>。

第七代地震仪器野外作业方式更加灵活,适宜十万道以上的大道数作业。以有线 G 系统、实时无线仪器 RT2、节点仪器 UNITE、HWAK 等为代表。野外布设灵活,具有强大的网络化数据管理能力,促进了“两宽一高”地震采集技术、高效采集技术的推

广应用。

目前各制造商推出的第七代地震仪器具有不同技术特点和适用能力,大体有三类系统,即有线传输系统、节点系统、实时无线传输系统。

历代地震仪器主要性能见表 1。

表 1 历代地震仪器主要性能指标对比

代序	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代	第六代	第七代	
代表仪器	苏制 51	CGG59 AS626X	DFS-V SN338 GS2000 MD2-20	SN348 SN368 OPSEIS SYSTEM I TELSEIS	SN388 ARIES BOX SYSTEM II	SYSTEM IV SN408/SN428 Q-Land	GSR UNITE Z-LNAD HWAK	G 系统 G3i RT2
记录方式	光点照相	模拟磁带	数字磁带	数字介质	数字介质	数字介质	数字介质	数字介质
动态范围/dB	≤20	≤20	≥70	≥70	≥70	≥90	≥70	≥70
记录频宽/Hz	0~20	0~100	0~250	0~250	0~300	0~500	0~300	0~300
带道能力/道	≤24	≤48	240	1000	5000	≥10000	≥100000	≥100000
模数转换/位			15+1	15+1	15+1	23+1	23+1	23+1
检波器类型	模拟	模拟	模拟	模拟	模拟	数字	模拟	模拟/数字
数传方式	模拟电缆	模拟电缆	电缆	电缆/无线	电缆/无线	电缆/无线	电缆/无线	电缆/实时无线
支持观测方式	2D	2D	2D/3D	2D/3D	2D/3D	全数字/高密度	高密度	超高密度

### 3.1.1 有线传输系统

有线仪器就是从采集站到交叉站再到主机的数据传输采用电缆来实现,其数据传输的速率及可靠性较高。

有线仪器发展的重点是扩展实时带道能力、满足高效施工要求、提高野外适应性。把先进的网络遥测技术、数据压缩技术、光纤通信技术、数据存储技术、源同步控制技术融入地震仪器当中,使仪器的稳定性、可靠性、数传速度、存储速度、源同步控制能力、带道能力大幅度提高。具备高密度采集、海量地震数据管理、多组移动激发源同步控制等能力。操作系统软件功能不断完善和强大,可进行排列监控和野外设备测试,可以进行现场数据质量控制,几十万道仪器同步采集时差精度大幅度提高。交叉线数据传输速率达 GB 级。数据存储和显示能力大幅度提高,系统的实时记录能力达到每秒几百兆字节<sup>[9]</sup>。

为适应可控震源高效采集(HPVA)、高保真采集(HFVS)、以及由激发源自动驱动仪器采集的需求,有线仪器开发了多组移动激发源同步控制技术,包括:数据分离、连续采集、GPS 授时、导航定位、TDMA 通信、自动触发控制、移动源的振动信号采集等技术。HFVS 施工方法和几十台震源共同作业的 HPVA (包括 ISS、DSSS、VI 等)施工方法等得

到实现。

目前,有线仪器的杰出代表是 428XL-G 系统和 G3i 系统。

428XL-G 系统是原 428XL 系统的升级扩展版,其技术突破主要体现在排列管理能力、源同步控制能力、交叉线的光缆传输速度、实时采集能力和记录能力等方面。G 系统的光纤传输率达 GB 级,单交叉线的最大管理能力达 100000 道,目前受主控制计算机能力和速度制约,系统能管理的排列在 200000 道左右。由于采集链的传输率维持 16MB,所以 2ms 采样间隔条件下,带数据压缩时的二维实时采集能力仍为 2000 道。为适应快速存储海量数据,G 系统选择为其特别开发了专用 NAS 盘,存储速率大于 200MB,能满足实时 50000 道数据流的记录<sup>[6]</sup>。

G3i 的主要技术指标与 428XL-G 系统相近,带数据压缩时的单交叉线最大管理能力达 96000 道,系统采用 esata3.0 接口标准,极限存取速度达 400MB,可满足实时 100000 道数据流的记录<sup>[9]</sup>。

有线系统由于采集站之间有电缆,使得野外布设不太灵活方便,且电缆保养维修、存储运输增加了使用成本。道数的增加带来插头节点的增加,也使系统的稳定性降低,如果一个接头或大线出现问题,那么其后的排列将无法工作。

### 3.1.2 节点传输系统

节点仪器是一种没有实时信息交换能力、以站为单位独立工作、按精确时序连续采集、存储式地震数据采集系统。

节点仪器站单元采用分布式供电,检波器有内置和外接两种方式。节点系统由于不采用实时数据回传,避开了传输系统的限制,道数可随意扩展。采集站采用GPS定位和精确计时,数据连续采集并保存在大容量的存储设备中,每天收工以后或一个阶段后,一般采用手持设备或遥控回收数据。有些仪器虽不能回传数据,但可及时监视野外采集站的工作状态,避免数据的大量丢失。典型的仪器如OYO公司的GSR节点式采集系统,该系统无大线传输、无电台传输、无主机记录、连续记录时间可长达30天;INOVA公司的HAWK系统,该系统有部分现场监控能力;Sercel公司的UNITE系统,该系统采用存储式或蜂窝式数据回收;Fairfield的Z-LAND系统,有部分现场监控能力;东方地球物理公司的GPS授时系统等。节点系统也可和现有的有线系统混合使用,弥补有线仪器野外布设不方便,增强野外使用的灵活性等<sup>[10,11]</sup>。

节点系统的不足是不能及时根据地震监视记录来指导下一步的生产,后期回收需要庞大辅助设备,而且大道数接收仪器数据回收工作量大,数据编排繁琐,存在数据错误和丢失的风险。

### 3.1.3 无线传输系统

无线仪器的优势在于依靠无线电波实现信息的传递和交换,采集站与采集站、或者采集站与主机之间没有电缆,提高了系统的灵活性。无线仪器的通信频带一般选择微波域甚高频段,核心技术在于通信协议,不同协议下的信道个数和带宽也不同。近几年,无线仪器在编码技术、调制技术、抗干扰技术、同步技术、授时技术等方面都有大的突破,地震道管理能力和通信速率都得到了显著提高,能够实现万道以上地震数据实时回传采集。

常规无线传输系统地震仪器大多使用甚高频波段,其传播方式接近于光波,可在视距范围内有效通讯。如Fairfield公司的BOX系统,工作频率在214~234MHz的通带范围内,每个频道带宽20kHz,可提供多达1000个无线通道,如果单采集站为8道,最大扩展道数理论上为8000道。主机发射功率可达40W,采集站的发射功率可在0~2W内自动调整,

通视控制范围可达10km左右,最大传输速率60kB。由于传输距离较大,容易受到电视台及其他空间电磁干扰,数据安全和完整性受到影响,功耗、传输速率也不尽人意。射频带宽和传输速率也限制了带道能力的扩展。

随着无线网络技术的发展,地震勘探仪器将这一成熟技术纳入其中。开放的2.4GHz ISM波段局域网无线传输速率高,小区域使用遭遇的干扰少,射频频带可重复利用,以及低功耗的优势,促进了无线传输地震仪器的发展。美国Wireless Seismic公司巧妙地利用这一技术,并研发了5项专利技术,克服了无线网络传输协议的局限性,提高了原有的传输速率,开发了RT2无线实时遥测系统。该系统工作方式类似于有线传输系统的结构,同时具备了节点系统的轻便布设和扩道随意的优点。主要特点是:实时无线传输地震数据,轻便和简单快速的布设带来更高的生产效率,减少了运输和电缆维修成本,具有超低功耗。

RT2无线实时传输地震仪器主要由记录中心单元、无线遥测单元和回程单元三个部分组成。记录中心单元类似于有线系统,采用开放式主从结构,适应不同震源控制器。系统可实时回收地震数据,监视排列信息。可实现被动地震的长时间连续数据采集,如微地震监测,连续实时数据采集,也可实现可控震源和其他脉冲震源的按需传输采集方式,放炮可连续进行零等待间隔。系统可分别监视排列动态、放炮序列、地震数据、排列背景噪声、实时QC状态和地面布设状态等,系统带道能力达100000道以上,与有线仪器相近。其无线遥测单元执行自测,联系它的邻居自动组建排列,中继上一个站的信息和数据以无线方式传输到上游。采集站自动调节发射功率适应不同道距和射频环境。数据采用采集站和采集站之间短距离无线传输,有效避免了以往大距离面积无线传输带来的抗干扰能力差和无线射频传输不稳定的弊病。每个采集站既是采集站也是中继站,以逐个接力方式回传到线接口单元,实现一个排列的数据传输。线接口单元,类似于有线系统的交叉站,可有有线、无线或混合连接到主机或其他排列。接口单元负责上传数据和信息,下传主机的命令,发送高精度GPS同步计时时钟(误差微秒级)。一旦采集站布设后,该系统将自动寻找左右邻居联系,无需地面人工干预,自动建立排列。如排列某个中间

采集站出现问题,信号可以越过一个站继续传输。传输路径也可以迂回进行,在特殊情况如某个排列点不能越过障碍,可在其附近放置一个或多个采集站作为中继站,引导改变传输路径达到迂回传输。野外系统布设如图 1 所示。该系统采用短距离的无线传输,提高了越障能力,可适用于城市、山地等多种复杂的地表环境。实时的数据回传避免了数据丢失。野外操作简单轻便,减少了人力和运输设备,野外的综合使用成本降低<sup>[8]</sup>。该系统堪称目前最先进的无线遥测

地震系统,有望成为地震勘探仪器的换代产品。

### 3.2 地震检波器技术新进展

常规油气勘探中大多使用模拟动圈式速度型或加速度型检波器。主要供应商有 Sercel、ION 和 Geospace 公司。为适应 24 位地震仪器和提高勘探精度及信号保真要求,Sercel、ION 公司分别推出了模拟超级检波器和数字检波器,Geospace 公司也推出了模拟超级检波器。表 2 列出现今 5 家公司的数字检波器技术指标对比。

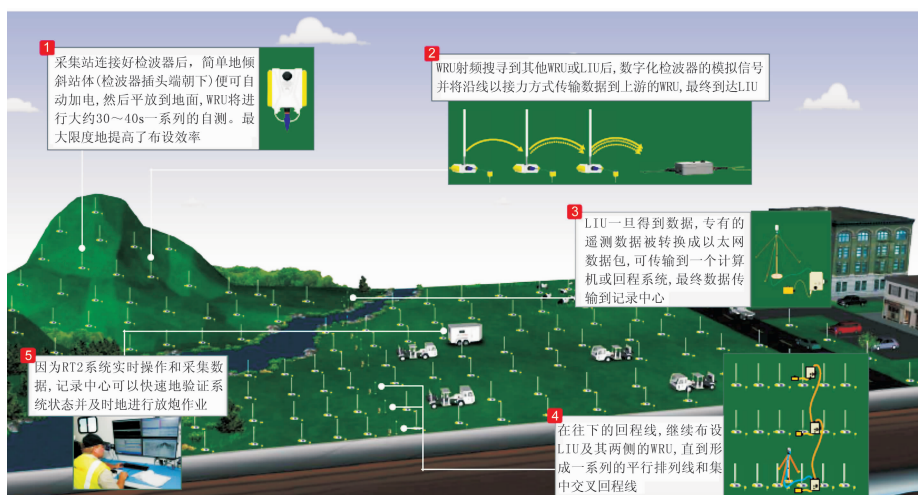


图 1 RT2 系统野外布设示意图  
WRU 指无线遥测单元; LIU 指线接口单元

表 2 主要厂商检波器对比

厂 家	Sercel	ION/INOVA	Geospace	BGP	双丰
超 级 检 波 器					
型号	GS10	SM-24	GS-32CT	SN7C	PS-10ES
自然频率/Hz	10	10	10	10	10
频响/Hz	>240	>240	>250	>300	>240
失真度/(%)	<0.07	<0.03	<0.03	<0.1	<0.1
倾斜角度/(°)	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15
灵敏度/(V·m <sup>-1</sup> ·s)	22.8	28.8	27.5	28.8	28.8
开路阻尼	0.68	0.6	0.316	0.1	0.68
精度/(%)	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5
温度范围/(°C)	-40~90	-40~100	-45~100	-40~100	-40~100
数 字 检 波 器					
型号	DSU3	Vectorseis			
倾斜角度/(°)	±180	±180			
噪声/(μm·s <sup>-2</sup> /√Hz)	0.4	0.44			
失真/dB	<0.003	<0.003			
精度/(%)	±0.25	±0.5			
频率响应/Hz	0~800	0~800			
采样率/ms	0.25,0.5,1,2,4	0.5,1,2,4			
动态范围/dB	120	124			

1993年,荷兰 Sensor 公司推出了与 24 位遥测地震仪相配套的超级检波器 SM-4SH,失真度由 0.2%降低为 0.1%以下。1994年, Sensor 公司又推出了低失真度 SM-24 超级地震检波器,失真度小于 0.1%,是国际上最早推向物探市场的真正满足 24 位数字地震仪的超级检波器。20 世纪 90 年代末,日本 OYO 公司推出了 GS-30CT 超级检波器,失真度小于 0.12%,随后又推出了 GS-32CT 超级检波器。美国 MAHK 公司为满足国际物探市场需要,也积极开发超级检波器,1995 年推出了一种低失真的 MARK2 超级检波器,失真度小于 0.05%,代表了现今国际上最新一代超级检波器。

所谓数字检波器是相对于常规检波器的输出信号而言的。数字检波器输出的是直接数字化的信号,主要由 MEMS 传感器、ASIC 电路(专用集成电路)和 DSP(数字信号处理器)及其他辅助电路组成。具有动态范围大、噪声水平低、频率响应范围大、失真小等特点。代表产品有 Sercel 公司的 DSU1、DSU3、DSUGPS 和 ION(Sensor)公司的 Vectorseis。

另外,为适应深层勘探需要,各厂家在积极研究宽频检波器,其显著特点是自然频率降至 4.5Hz 及 5Hz,提高了对低频信号的记录能力。代表产品有 Sercel 的 G5、威海双丰的 PS-4.5 等产品。

### 3.3 可控震源技术新进展

在地震勘探中,地震信号的激发源分为爆炸震源和非爆炸震源两种。其中非爆炸震源包括电火花震源、重锤震源、电磁驱动可控震源、液压式可控震源以及精密可控主动震源等。陆地石油勘探中主要

采用大吨位液压式可控震源。

液压可控震源采用液压伺服系统、液压传动、自动控制、电子控制等技术,由电控箱体产生线性或非线性的正弦调频信号,经过液压伺服系统放大,控制伺服阀开启,高压液压油驱动震动锤体作往复运动,驱动与之相连接的落在地面上的平板做往复震动,产生连续地震波。

现代可控震源技术起源于 1952 年。历经 Conoco 等石油公司和装备制造厂的发展,可控震源从早期的 20000 lb(9t 左右)出力已经发展到目前 80000lb(近 40t)的出力;从纵波激发发展到了纵波、横波激发。目前,法国 Sercel 公司生产的 P23/LRS351、P28M28、SM26HD/623B、NOMAND65、NOMAND90 等系列可控震源车,具有更好的性能和适应各种地形的需要,最大出力达到 40t。美国 IVI 公司生产的低频、高频震源、横波及小型高频可控震源,具有轻便、灵活及多种功能的特点;中美合资的 INOVA 公司生产 LRS315、LRS321、AHV IV623 等系列震源,具有先进的降低震源振动产生的谐波畸变功能和野外攀爬功能。另外, Mertz 公司还推出了 M10/601、M12/602、M18/612、M18/615、M27/623、M26HD/623B、M26HD/SF-60 等系列震源,丰富了 Sercel 公司的产品系列(Mertz 公司已被 Sercel 公司收购)。东方地球物理公司(BGP)自主研发推出了 KZ 系列震源,具有低畸变输出信号的特点,其主要技术指标与国外产品技术水平相当。表 3 是几家主要设备制造厂商 28t 可控震源性能对比。可以看出,各厂家产品的技术指标处于同一水平。

表 3 28t 可控震源性能对比(指标为蓝色型号)

厂 家	Sercel	INOVA	IVI	BGP
代表产品	NOMAND65 NOMAND90	LRS315 LRS321 AHV IV623	T-15000 HEMI-50 HEMI-60	KZ28 KZ34
最大理论出力峰值/kN	276	275	274	275
扫描频率/Hz	7~250	5~250	10~300	6~250
液压驱动平衡法	空气气囊	空气气囊	空气气囊	空气气囊
液压驱动隔离法	空气气囊	空气气囊	空气气囊	空气气囊
伺服阀滤芯精度/ $\mu\text{m}$	3	3	3	3
温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	-12~53	-50~50	-20~45	-30~50
轮胎	轮胎	轮胎/履带	轮胎	轮胎
地表适应性	相对平坦	相对平坦 半丘陵	相对平坦	相对平坦
作业方式	常规/滑动/交替	常规/滑动/交替	常规/滑动/交替	常规/滑动/交替

## 4 中国石油地震数据采集核心装备研发现状

### 4.1 地震仪器研发现状

由于以往我国电子制造业落后,我国地震仪器发展经历了漫长的引进、消化吸收、合作生产、自主研发的过程。

20 世纪 50~60 年代,从国外引进模拟光点地震仪生产线,在西安石油仪器厂进行生产,简称 51 型地震仪,采用电子管电路。该仪器的记录是模拟波形光电感光记录,动态范围只有 20dB,作业能力为 26 道,频宽仅 30Hz。60 年代初,自行研制了轻便型 DZ-611 电子管地震仪。

1966 年,西安石油仪器厂成功研制了脉冲调宽式 DZ-661 型地震仪器,并不断改进,升级成 DZ-663、DZ-701 型地震仪。采用模拟磁带记录数据、热敏纸模拟波形监视记录,可以实现多次覆盖,动态范围为 40~50dB,地震道数为 48 道,频宽 15~120Hz。

随着瞬时增益控制放大技术、模数转换技术、数字磁记录技术、通讯技术的发展,1975 年,西安石油仪器厂设计生产了 48 道的 SDZ-751A、SDZ-751B 仪器,物探局仪器厂设计生产了 24 道的 SCD-2 地震仪器。

随着三维地震技术的发展,对仪器道数需求不断提高,西安石油仪器厂对引进的 DFS-V 数字仪进行了革新改造,并设计生产了 SDZ-240 型地震仪器,带道能力为 240 道。同期,物探局仪器厂设计生产了 SK8000、SK83 地震仪器。到 20 世纪 80 年代末,国内所有地震队全部实现数字采集,淘汰了模拟磁带地震仪。

为适应三维地震、高分辨率勘探等技术需求,在

20 世纪 80~90 年代,又推出了分布式遥测地震仪。西安石油仪器厂先后自主研发了 YKZ-480、YKZ-1000 等千道地震仪,物探局仪器厂推出了 SK-1004、SK-1005、SK-1006 等千道地震仪。由于基础机械制造业比较薄弱,制造工艺较差,系统的稳定性和可靠性较低,难以适应野外复杂多变的自然环境。

在随后的十多年间,地震仪器主要依赖进口,并与国外仪器厂合作生产 SN388、SN408/428、I/O 2 等仪器,自主研发基本处于停顿状态。

2006 年,为提升我国物探技术国际竞争力,中国石油科技管理部启动了“新型地震数据采集记录系统研制”项目,研制具有自主知识产权的地震仪器,实现地震数据采集系统设计制造技术的突破,打破地震仪长期依赖引进的局面。项目研究推行“扁平化核心+网络化协作”的组织模式,提出了多项关键技术并行研发“优中选优”的工作思路,采用产学研结合方式与清华大学、中科院等国内知名大学和院所合作,进行数据传输等关键技术的开发。至 2009 年,成功研制出具有自主知识产权的、与同期国外主流地震采集仪器技术水平相当的 ES109 新型地震数据采集记录系统(图 2)。其中地震仪器的标志性技术——高速数据传输率到达国际领先水平,比同期国际主流产品的数据传输能力提高 2~5 倍,达到 40MB(法国 Sercel 公司的 428XL 仪器传输能力为 16MB、原美国 ION 公司的 SYSTEM IV 仪器传输能力为 8MB)。此外,该仪器嵌入式软件开发、时钟同步、通讯底层设计,协议制定等其他关键技术均达到国际先进水平<sup>[4,6]</sup>。

2009 年 2 月,ES109 仪器投入野外试验及试生产,采集数据质量达到国际同类系统水平(图 3)。2010 年,该仪器投入规模化生产,其带道能力达到 15000 道,并在新疆准东地区高密度地震项目中进

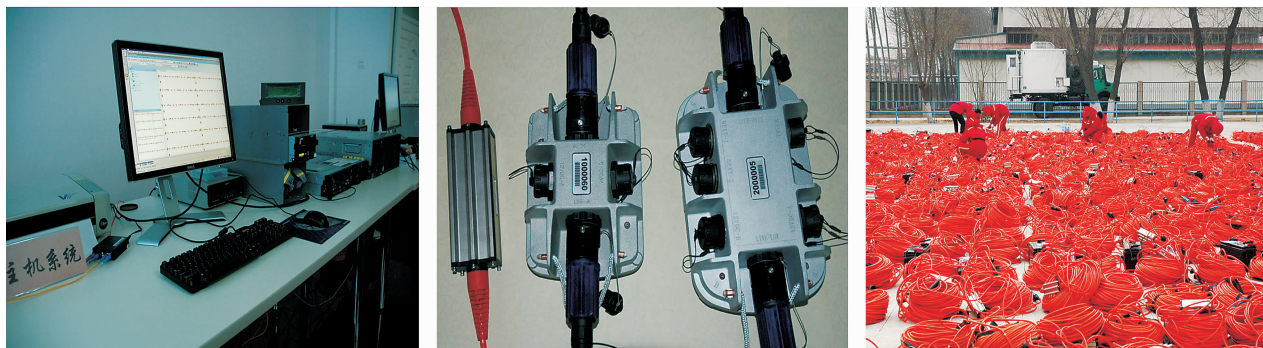


图 2 ES109 系统示意图

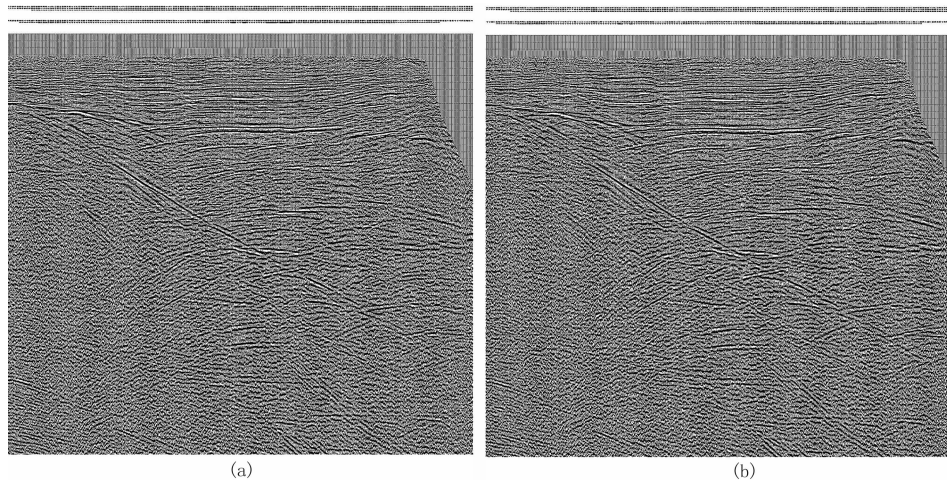


图3 ES109(a)与 ARIES(b)仪器采集地震剖面对比

行了生产性应用。实践表明,ES109 仪器经过全面测试,其主机软件工作稳定,操作界面灵活、实用,野外工作稳定,标志着我国自主研发的地震仪器技术达到国际先进水平。

2010 年,中国石油与美国 ION 公司合作成立了 INOVA 合资公司,集成了 SCORPION、ARIES 和 ES109 系统的优势技术,同时又针对当前地震勘探技术的发展需求开发了 G3i 地震数据采集系统,包括可控震源高效采集等其他独特技术,使得系统的综合采集能力达到国际领先水平。

G3i 采集站单站 4 道,具有低失真振荡测试器,支持与 SMT 兼容的检波器测试,具有自动无错数据传输,LED 指示灯能实时显示排列连接、供电和数传状态(图 4)。该系统包含地震处理模块(SPM)的标准组件,支持脉冲式震源和高效可控震源(HPVS),支持多屏显示,支持多种输出设备(NAS、LTO、3592、HDM),具有冗余大容量内置硬盘驱动器,使用更少的互连集成地震采集数据接口板,支持集成的项目和数据质量控制模块,支持基于网络的远程监控,具有炸药、可控震源、HPVS、气枪、线缆和混合采集功能。

如前所述,G3i 系统带数据压缩时的单交叉线的最大管理能力达 96000 道,理论上系统的最大管理能力达 384000 道。传输率随着道间距的变化自动调整,系统的数据传输电缆是多数据对(三对)结构,在 50m 道距情况下带数据压缩时的二维实时采集能力达 2700 道。在数据记录方面,系统采用 esata3.0 接口标准,极限存取速度达 400MB,可满足单交叉线实时 100000 道数据流的记录。

G3i 软件能够向操作员提供关键信息,从 SPS、SEG-P1、Geo-Ti 或用户定义表中导入关键信息,并在地图叠置中显示;能够跟踪车辆和人员位置,并监测速度、位置或安全性;能够参考实际勘探图,执行遥测质量控制并排除故障,管理与实际地面位置、通道和障碍相关的部署,操作员实时接收与环境相关的信息,并能够进行当前接收道的 RMS 值、噪声、信噪比以及相邻道的相关分析等实时采集质量控制<sup>[15]</sup>。

目前,G3i 系统带道能力超过 72000 道,并在中国国内及国外超过 20 个地震采集项目中推广应用,效果良好。表 4 为中国石油系统的地震仪器研发历程。



图4 G3i 系统地面电子设备



表 4 中国石油系统历代地震仪器研发历程

代 序	引进仿制阶段			消化吸收阶段		自主创新阶段	合作创新阶段	
	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代	第六代	第七代	
研究成果	DZ-611	DZ-661 DZ-663 DZ-701	SDZ-751 SCD-2 SDZ-240 SK8000	YKZ-480 YKZ-1000 SK-6		ES109	G3i	
国外参照仪器	苏制 51	CGG59 AS626X	DFS-V SN338 GS2000 MDS-20	SN348 SN368 SYSTEM I	SN388 ARIES BOX SYSTEM II	SYSTEM IV SN408/SN428 Q-LAND	GSR UNITE Z-LNAD HWAK	G 系统 G3i RT2
研发方式	部分自主	部分自主	部分自主	消化吸收 部分自主		独立自主	国际合作	
技术水平	相当 稳定性低	相当 稳定性低	相当 稳定性低	相当 稳定性低		国际水平 部分领先	世界领先	
技术能力		覆盖开关	120~240 道	1000 道		数传能力比国际 主流产品高 2~5 倍,达到 40MB	100000 道 有 线、节点网络 技术实时质控	

INOVA 公司研发的 HAWK 节点地震仪,采用了高精度 GPS 同步技术、可控震源高效采集技术、高精度采集及测试技术、低功耗设计技术、高端的机械设计技术等多项关键技术,整体达到了国际先进水平,适合于复杂山地及障碍区的采集施工,可节省大量的人力。该设备已在国内外项目中得到推广应用。

#### 4.2 地震检波器研发现状

1978 年前,西安石油仪器总厂生产了 DJ-541、DJ-581 和 DJ-591、DJ-631、DJ-641、DJ-651 型系列地震检波器,但频带窄(14~60Hz)、灵敏度低(30dB)。20 世纪 70 年代末,我国开始自行研制生产数字级地震检波器,到 80 年代后期,先后引进荷兰 Sensor 公司的 SM-4 系列和美国 Geospace 的 GS-20DX 系列数字级地震检波器的技术和设备。经过消化吸收及改进,推出了 SN4 和 JF-20DX 系列检波器,促进了我国地震检波器的发展。至 90 年代,随着三维地震推广、四维地震、多波多分量及井间地震等新技术应用,与之相配备的地震检波器如三分量检波器、四分量检波器、涡流检波器等也得到了相应发展。进入 2000 年以来,西安石油仪器总厂研制了 SN7C 超级检波器,技术指标达到国际水平。

2004 年,东方地球物理公司、河北俊峰公司、西安石油勘探仪器总厂与 Sercel 公司联合成立了河北俊峰赛舍尔股份公司,生产包括 SG-10 检波器、

JF-20DX 系列地震检波器芯体、JSF 沼泽检波器、JSX 水下检波器、JJX 井下检波器等类型,技术指标达到了国际同类产品水平。

此外,我国威海双丰物探设备股份有限公司还生产五大系列地震勘探检波器,包括超级检波器、陆用检波器、水下检波器、井下检波器等。

如今,我国已成为世界模拟地震检波器的主要生产和供应商。

INOVA 公司研制的 ML21 数字检波器,是全球最低噪声数字传感器,能够满足全波场、宽频采集的需求,支持连续采集,采样精度高(0.25ms),量程宽(335mGal),畸变低(0.002%),与 Sercel 公司 DSU 系列数字检波器性能基本相当,总体性能达到国际先进水平。

#### 4.3 可控震源研发现状

1978 年,原物探局与玉门机械厂和上海七机局合作先后试制了 KZ-7 可控震源。其后相继推出了 KZ-13、KZ-20、KZ-23/2000 等系列可控震源,在我国中西部油气勘探中发挥了重要作用。

2005 年,中国石油科技管理部部署,自主设计生产了大吨位可控震源 KZ-28(28t),真正实现了自主创新设计和自主知识产权。该型震源在大激发能量水平下具有低畸变输出特征,激发信号信噪比高,在关键系统上首次应用了冗余结构设计,极大地提

高了震源的可用性。整体结构简单,便于操作与维护,强化了复杂环境下的作业能力,可以实现连续、高效作业,已成为中国石油系统和国内外可控震源作业的主体设备<sup>[6]</sup>。

在此基础上,2007年推出了具有自主知识产权的 KZ-34(34t)大吨位可控震源,进一步提升了深层地震勘探的能力。

2010年,又推出了具有自主知识产权的 KZ-28LF 低频可控震源,低频扫描频率拓展至 3Hz,是全球技术先进的经过野外采集检验的  $6 \times 10^4 \text{ lb}$  级低频震源,引起了世界物探行业和壳牌石油公司等

国际知名公司的极大关注,并进行了低频震源采集试验。该产品在塔里木盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地山前带采集、高效采集、宽频采集、安全环保施工等方面发挥了重要作用,已成为我国中西部复杂地表条件下中深层油气勘探的主力震源。

图 5 是 KZ-28LF 低频可控震源在库车拗陷博兹山前带作业图片,86%的地表使用 2 台 1 次交替可控震源低频扫描激发技术,扫描频率为 4~84Hz,并利用 DGPS(高精度差分定位系统)和导航系统提高震源炮点准确率,平均日效 1303 炮,仅用 64 天就完成了  $804 \text{ km}^2$  的采集任务。



图 5 KZ-28LF 低频可控震源在库车博兹山前带作业

## 5 地震勘探核心装备发展展望

现今中国石油的勘探区域中,复杂地表约占 60%~90%;深层目标油气占 35%以上;低渗透、低丰度油藏约占总探明储量的 65%以上。深海勘探尚处于起步阶段,未来地震技术将向更高的空间采样密度、全方位、全弹性处理、综合一体化解释方向发展。地震仪器作为地震技术发展的驱动力和实现手段,必将迎来发展的高潮。

### 5.1 陆地地震仪器发展

如前所述,自 2006 年启动大型地震仪器研制以来,我们已跨入地震仪器国际先进行列。为适应复杂目标勘探需求,应发展新一代开放式一体化全数字地震仪,集有线、无线、节点等多项能力,以降低高

密度、单点采集成本,促进物探新技术应用。新型地震仪应具备以下基本功能。

(1)大道数。近年来,物探新技术的应用对地震仪器的带道能力提出了越来越高的要求。一是实现宽方位角采集,有利于提高成像精度及辨识定向断裂;二是便于高密度地震技术刻画小尺度地质体;三是发挥单点采集技术优势,利于提高分辨率、利于室内压制噪声和静校正处理。

(2)无线遥测数据实时传输。随着地震勘探道数的不断增加和环保形势日趋严峻,越来越多的区域不允许大量设备进入,不可避免地带来了野外成本攀升、排列布放效率、装备重量和数量、队伍人数、运输及 HSE 等问题,而无线系统能比较有效地解决这些问题并具有野外使用灵活的特点。主要有:①任意密度、任意方位布设;②可无限扩展接收道数,连续采集;③各道独立,无接触故障,单点故障不

影响生产进行;④没有传输电缆和接插件,减少了大量的排列检查工作量;⑤重量轻、体积小,大幅度降低运输、搬迁成本,提高施工效率;⑥施工痕迹少,环境影响小。图 6 为接力式无线数据传输示意图<sup>[16]</sup>。在确保数据传输安全、数传速度满足野外施工要求的情况下,无线仪器是未来大道数、高密度地震技术应用和地面微地震监测技术推广应用的最佳选择。

(3)有线、无线、节点混装系统。无线地震仪器备受甲方和各物探公司的推崇,但在某些特别困难的地形区,以及无线数据传输受限的地区,应用有

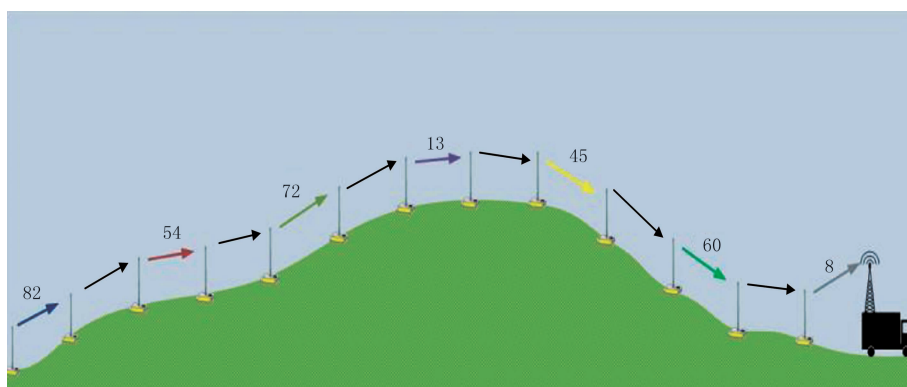


图 6 新一代无线系统数传示意图(数字为自适应频点)

## 5.2 陆地地震检波器发展

陆上地震采集仪器发展的关键是检波器。对于一个完整的地震数据采集系统来说,传统地震检波器的指标和性能与采集仪器(主机与地面采集站)差距甚大,地震仪器的动态范围普遍大于 120dB,分辨率达到几微伏,而传统检波器的动态范围只有 70dB 左右,分辨率远低于地震记录仪器。所以,提高地震采集系统精度的关键是提高检波器的动态范围和灵敏度,研究的重点是数字型检波器。

全数字系统就是数字检波器加先进的网络控制和数据传输技术。MEMS 数字检波器具有:①动态范围大(90dB)、信号畸变小、频带宽的特征,对高、低频信息均具有较强的录制能力;②对层间弱反射的接收效果要优于模拟检波器,对中浅目的层勘探具有更为明显的优势;③由于抗电磁干扰能力较强,因此适合用于电磁干扰比较严重的地区;④可用于单点高密度采集、宽频接收,室内组合或进行三维去噪,是提高分辨率和保真度的有效途径;⑤矢量保真度高,对地震属性的研究具有明显优势<sup>[6,7]</sup>。

综上所述,数字传感器的应用将是大势所

趋,无线与节点仪器相结合,能够实现所有地表类型的全覆盖。

(4)远程技术支持及实时质量控制。利用区域网络技术,将仪器车作为一个网络节点,扩展至远方基地,以便专家对远在千里之外的施工作业现场进行分析和指导,甚至可将采集数据通过卫星实时传回基地进行质量控制。在大道数作业情况下,地震仪器应具备实时 QC 分析和数据质量存在重大问题时的报警功能,以便野外及时采取相应的措施。

趋<sup>[11]</sup>,是地震技术的发展方向。值得注意的是,目前的三分量检波器包括数字三分量检波器,仅是记录垂直分量和两个剪切分量,而不是矢量地震信号。应研究记录矢量地震信号的地震数据采集方法,推动矢量地震技术发展。

## 5.3 海洋地震仪器发展

海洋油气勘探关系到国民经济发展及国家安全。大多数海洋地质勘探都采用声学探测的方法。在声学探测中,产生强脉冲压力波的声源(电火花、水枪、气枪)、地震波记录仪器、导航、定位等设备是海洋油气勘探的关键设备。其中震源、导航、定位技术与工业技术紧密相关,比较成熟,地震记录设备发展是海洋地震勘探新技术应用的基础,主要表现如下。

(1)大道数长排列多缆拖缆系统。在拖缆地震采集中,为了拓展地震低频成分、压制海洋环境噪声,目前采用震源和拖缆之间不同的排列方式,通过上下缆的组合填补虚反射陷频,扩展频带宽度,将上行波与下行波分离,压制与海平面有关的多次波。另外,多方位、宽方位海洋地震勘探技术获得的多方位角地震数据,增加了覆盖次数,同时还扩大了方位

角覆盖范围,能够明显提高地震成像精度。尤其是盐底之下的区域,经过简单处理后清晰度和照射度都有了明显提高。宽方位角地震勘探是一艘配有一个震源的拖缆船和两艘震源船沿着3个方位角(30°、90°、150°)放炮完成采集作业,允许每一个爆破点至少可以重复3次地震勘探,能够消除更多的噪声假象,产生更清晰的盐底照射及盐下反射,甚至还能够确定盐层内的反射<sup>[12]</sup>。海上存在大量的高速层(火山岩丘等)覆盖于储层之上的现象,造成储层内部反射弱、信噪比低、多次波发育,此时利用广角反射地震技术,可以避开近炮检距上的各种干扰,提高高速覆盖层之下的资料品质。这些技术的应用,需要大道数、多缆记录设备的支持<sup>[13]</sup>,所以在拖缆采集中,大道数、多缆、支持长排列的采集系统是未来发展方向。

(2)多分量海底采集系统。固定的海底接收器被广泛用于海洋地震调查。设备本身包括记录单元,通过缆线或者回收船回收数据。海底地震仪(OBS)和海底电缆(OBC)具有更多的优势,它们能放置的范围超过声纳浮标无线传输的最大距离,因而可以用来进行长偏移地震,探测深至几十公里和海底下更深的部分;固定的海底接收器降低了因地形不平坦和构造水平变化造成地震走时解释的不确定性;来自浅部构造的纵波被OBS设备记录为首波,这提供了更精确的速度—深度曲线,对于深海研究尤为重要;深水中的海底接收器噪声水平通常很低,可很好地记录压缩波、剪切波和表面波,对物性和属性研究提供了可靠资料。针对这种需求,近年来发展了海洋节点地震仪、4C海底电缆等系统。为适应海洋三维地震勘探需求,网络冗余数传系统、多道(点)管理系统、长寿命供电系统等是未来海底接收系统发展方向。

#### 5.4 陆地激发设备发展

地震激发包括炸药、可控震源、气枪、电火花、重锤等不同震源形式,其中气枪、电火花、重锤等震源由于能量弱,不适合陆地石油天然气勘探,故陆地勘探通常使用炸药震源及可控震源。

炸药震源应用的关键是如何选择激发井深、激发岩性、药量、药型、组合形式,通常是依据现场实际情况进行必要的理论分析,在此基础上根据野外试验结果确定。此外需要发展适应各种地表条件的钻机,这里不做进一步分析。本文认为当前激发设备

发展主要是可控震源技术的发展。

可控震源因其采用地面激发,不污染地下水,比炸药更安全,激发频带宽度和主频可以控制,出力大小可调整,施工效率高、激发成本低等特点,被国内外地球物理公司广泛使用。据统计,全球主要地球物理公司完全使用可控震源的队伍占16%,可控震源与炸药震源结合使用的占33%,即使用可控震源施工的队伍达到49%。巨大的应用市场促进了可控震源技术的快速发展,特别是以提高作业效率为目标,形成了交替扫描、滑动扫描、滑动扫描同步激发、独立同步扫描等可控震源高效采集技术,大幅度降低了单炮费用和高炮点密度的野外施工成本,提高了高炮密度野外施工日效率,推动了高密度、宽方位地震技术的发展和推广应用。随着设备机械可靠性的提高,低频可控震源技术也得到快速发展,起振频率最低可达1.5Hz,可以有效增加地震资料低频信息,为全波场反演、能量屏蔽区域的勘探、深层勘探、高分辨率勘探等提供了有效手段。

中国石油陆地地震勘探地表类型复杂,山地、水网、人口商业密集区、大沙漠等不完全适应可控震源施工。据统计,中石油系统国内适宜可控震源施工的勘探面积达 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占中石油陆上矿权面积的17%,可控震源在国内有很大应用空间。

经过20多年的发展,国产KZ系列震源已占总震源数的40%以上,已使用过可控震源的作业队伍26支,占施工队伍的13%;使用混合震源的队伍有23支,占施工队伍的11%。但是,我们在用的技术仍处于交替扫描、滑动扫描、单台点源激发、低频率扫描的初级阶段。当前要大力发展和推广多台同步及滑动、多台随机激发的可控震源高效采集技术,进一步挖掘可控震源的应用潜力。在我国东部平原区,开展单台次可控震源分散能量扫描、垂直能量叠加激发试验,探索东部平原区低成本环保型激发技术;研发通行能力强的、适应不同地表类型的可控震源装备,并不断提高可控震源的质量及稳定性;针对深层目标,发展大吨位低频可控震源,不断提高低频可控震源的稳定性和可靠性。

## 6 结束语

地震仪器及震源作为地震勘探的核心设备,其发展进程一直受到人们的持续关注,G3i地震仪、

KZ系列可控震源的成功研发和规模应用,标志着中国石油集团跨入了地震勘探装备制造设计的国际先进行列。为推动高密度宽方位地震勘探,实现绿色物探、安全物探,中国石油集团将不断加大物探装备科技创新力度,研发新一代一体化的全数字地震仪和低畸变、宽频、高精度可控震源,为复杂油气藏勘探开发的物探新技术应用保驾护航。

#### 参考文献

- [1] 孙龙德,撒利明,董世泰. 中国未来油气新领域与物探技术对策. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 317~324  
Sun Longde, Sa Liming, Dong Shitai. New challenges for the future hydrocarbon in China and geophysical technology strategy. *OGP*, 2013, 48(2): 317~324
- [2] 刘振武,撒利明等. 中国石油物探技术现状及发展. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 1~10  
Liu Zhenwu, Sa Liming et al. Current situation and trend of geophysical technology in CNPC. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 1~10
- [3] 刘振武,撒利明,董世泰等. 主要地球物理服务公司科技创新能力对标分析. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 155~162  
Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai et al. Innovation ability in science and technology and benchmarking for major geophysical service companies. *OGP*, 2011, 46(1): 155~162
- [4] 刘振武,撒利明,董世泰等. 中国石油天然气集团公司物探科技创新能力分析. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 462~471  
Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai et al. Analysis on scientific and technological innovation ability of China National Petroleum Cooperation in geophysical exploration. *OGP*, 2010, 45(3): 462~471
- [5] 刘振武,撒利明,董世泰,唐东磊. 中国石油高密度地震技术的实践与未来. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129~135  
Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai, Tang Dongle. Practices and expectation of high-density seismic exploration technology in CNPC. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(2): 129~135
- [6] 撒利明,董世泰,李向阳. 中国石油物探新技术研究及展望. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 1014~1023  
Sa Liming, Dong Shitai, Li Xiangyang. Research and perspective on new geophysical technologies and methods in China. *OGP*, 2012, 47(6): 1014~1023
- [7] 王喜双,董世泰,王梅生. 全数字地震勘探技术应用效果及展望. 中国石油勘探, 2007, 33(6): 32~36  
Wang Xishuang, Dong Shitai, Wang Meisheng. Application and prospect of full digital seismic exploration technology. *China Petroleum Exploration*, 2007, 33(6): 32~36
- [8] 王铁军,郝会民,李国旗等. 物探装备技术进展与发展方向. 中国工程科学, 2010, 12(5): 78~83  
Wang Tiejun, Hao Huimin, Li Guoqi et al. Technical advance and development of China geophysical equipment. *Engineering Science*, 2010, 12(5): 78~83
- [9] 罗福龙. 地震仪器技术新进展. 石油仪器, 2012, 26(1): 1~4  
The progress of seismic instrument technology. Luo Fulong. *Petroleum Instruments*, 2012, 26(1): 1~4
- [10] 罗福龙. 现代地震仪器采集因素及其对地震信号的作用. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 314~319  
Luo Fulong. The acquisition parameters of the modern seismic instrument and their affects on seismic signals. *OGP*, 2010, 45(2): 314~319
- [11] 韩晓泉,穆群英,易碧金. 地震勘探仪器的现状及发展趋势. 物探装备, 2008, 18(1): 1~6  
Han Xiaoquan, Mu Qunying, Yi Bijin. Current situation and development trend of seismographs. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2008, 18(1): 1~6
- [12] 王桂华. 海上地震数据采集主要参数选取方法. 海洋石油, 2004, 24(3): 35~39  
Wang Guihua. A study on selection of marine seismic data acquisition parameters. *Offshore Oil*, 2004, 24(3): 35~39
- [13] 王聪,韦成龙. 国内外中深层海洋地震勘探技术概述. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 106~110  
Wang Cong, Wei Chenglong. Domestic and overseas technology of marine seismic survey in middle-deep water. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 2012, 29(2): 106~110
- [14] SN428地震数据采集系统简介. 法国 Sercel 公司
- [15] G3i地震数据采集系统简介. INOVA物探装备公司
- [16] RT2地震数据采集系统简介. 美国 Wireless Seismic 技术公司

(本文编辑:冯小球)