

MEMS 数字检波器技术特点及应用效果分析

夏勇^{*1} 徐宏朝²

(1. 长江大学, 湖北荆州 434023; 2. 中海油田服务股份有限公司物探事业部)

摘 要

夏勇, 徐宏朝. MEMS 数字检波器技术特点及应用效果分析. 物探装备, 2013, 23(4): 215~220

基于 MEMS(微电子机械系统)技术的数字检波器优势明显。其重量轻、畸变低、动态范围可达 120dB, 因此能够记录来自地下反射界面非常微弱的低电平信号; 并且由于数字检波器直接输出数字信号, 抗干扰能力强, 不受外界电磁信号的干扰, 从而保证了地震资料的高分辨率和高保真度。

本文首先对比分析了模拟检波器和基于 MEMS 技术的数字检波器的技术特点, 强调了新一代基于 MEMS 技术的数字检波器(以 Sercel 的数字检波器 DSU 为例)给地震勘探带来的巨大优势; 然后结合实际, 对比分析了使用数字检波器与模拟检波器采集地震资料的优劣; 最后总结了当前利用 MEMS 数字检波器进行高密度地震勘探的注意事项。

关键词 地震勘探 MEMS 技术 数字检波器 模拟检波器

ABSTRACT

Xia Yong and Xu Hongchao. Features and application analysis of MEMS digital sensor. EGP, 2013, 23(4): 215~220

Since its light weight, low distortion and wide dynamic range (reach to 120dB), more and more advantages of digital sensor (DSU) based on MEMS technology had been proven and DSU can record weak low level signals. Also because it can output digital signal directly and have less anti-interference to be free from external electromagnetic effect, thus high resolution and fidelity of seismic data are achieved.

Firstly, this article compared the technology features of analog sensors and MEMS-based digital sensor, described the big advantages of new generation of MEMS-Based digital sensors for seismic exploration. Then this paper based on the actual seismic data for further comparative analysis and applications. Finally summarizes the current matters need attention of MEMS digital sensor for high density seismic operation.

Key words seismic exploration, MEMS, digital sensor (DSU), geophone

0 引言

目前, 地震勘探中大量使用的地震检波器仍然是模拟检波器, 这种检波器是依据法拉第定律, 利用线圈切割磁力线产生电压的原理, 来记录地面的振动, 因此又称作动圈式检波器。动圈式检波器依靠线圈的机械运动, 将地面振动所产生的机械能转换成电能, 再经过模/数转换把电能变化的信号转换成数字信号并记录下来。如今, 尽管模拟检波器的机械加工水平有了很大的进步, 但其电气指标受加工精度的影响仍然存在种种缺陷。

随着数字检波器的广泛使用, 人们发现数字检波器能最大程度地弥补模拟检波器的缺陷, 大大地提高地震采集资料的品质。

1 MEMS 技术与 DSU 数字检波器

1.1 MEMS 工作原理

MEMS 本质上是由两对固定电极和一块可移动的质量块电极构成的。实际上, 可移动的质量块电极和固定电极之间形成了一个电容器。当可移动的质量块电极传输重力加速度时, 质量块电极就会沿轴的方向上下运动。这种运动使得两个电极之间

* 夏勇, 男, 1976 年出生, 工程师。1998 年毕业于江汉石油学院电子仪器及测量专业, 现主要从事物探设备的管理工作。

的间隙发生了变化,从而产生了不同的电容量。如图1所示。

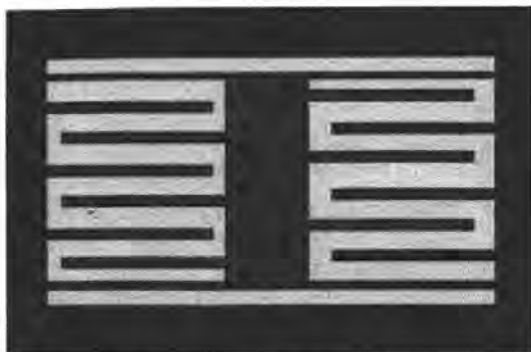


图1 MEMS工作原理示意图

这个电容量变化的信息反馈到ASIC电路中,从而使ASIC电路产生一个配平力来阻止质量块电极运动,使质量块电极返回到零位置。因惯性的作用,质量块电极会产生振动,配平力在ASIC电路中被转换成一个电压来阻止质量块电极的运动。同时这个电压在ASIC电路中被编码成 $\Delta-\Sigma$ 格式,并产生 $\Delta-\Sigma$ 24位的数字输出。如图2所示。

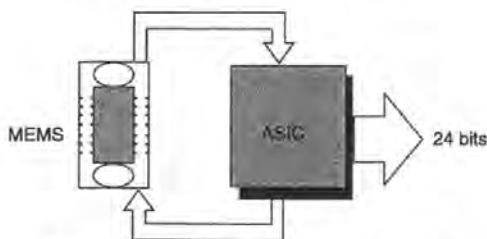


图2 MEMS与ASIC工作关系示意图

1.2 数字检波器的优势

由图2可以看出,采用了微电子机械系统(MEMS)和特定应用集成电路(ASIC)的数字检波器,可以直接将地表振动所引起的模拟电信号直接转变为数字信号,经全程数字传输最终记录下来。图3所示为数字三分量检波器的内部部件图。

与动圈式模拟检波器相比,数字检波器具有以下优势:

(1) 由于从信号采集开始就是数字方式,加之全程数字传输,使之有很强的抗电磁干扰能力,如不受50Hz工业电的干扰。

(2) 0~800Hz的线性频率响应,使得具有很宽的动态范围,达到120dB和矢量保真度,即数字检波器可以毫不失真地记录下0~800Hz的信号,很好地保留了0~10Hz的低频信号和大于100Hz的



图3 数字三分量检波器内部部件图

高频信号。数字检波器的高灵敏度,可以精确地记录下重力加速度的变化,以方便对倾角进行校正,因而可以保证多分量采集时的倾角要求。

(3) 电源功耗低、重量轻,可减轻野外施工的劳动强度。

(4) 低失真度和高灵敏度,特别适合进行高精度地震采集。

2 MEMS数字检波器与模拟检波器的地球物理特性对比

采用MEMS技术的数字检波器是加速度检波器,其工作频带在自然频率以下,具有宽频带的线性幅频响应的特点,其在0~800Hz频带范围内,振幅误差为 $\pm 0.25\%$ 。数字检波器的自然频率远远小于地震信号的频率;而模拟检波器是速度检波器,其响应的频率范围位于自然频率以上,自然频率以下的部分会严重衰减。数字检波器在地震信号的有效频带范围内具有相同的响应特征,更容易无失真地记录低频信号($< 10\text{Hz}$)。表1为数字检波器与模拟检波器的主要性能技术指标对比。

2.1 两种检波器的幅频特性对比

图4为数字检波器与模拟检波器的幅频特性对比。从图中可以看出:

(1) 模拟检波器

1) 模拟检波器在自然频率10Hz(这里对比的是10Hz检波器,其它以此类推)以下存在固有的-6dB的衰减,从而对频率低于10Hz的地震信号有压制衰减作用;

2) 由于模拟检波器的假频影响,使得模拟检波器的高频输出范围受到限制,线性频带一般在10~80Hz;

表 1 数字检波器与模拟检波器的主要性能技术指标对比

性能指标	模拟检波器	数字检波器
自然频率(Hz)	10、14、28、40、60、100	>1000
动态范围	60~70dB	120dB@4ms
灵敏度	0.3~0.6V/(m·s ⁻¹)	0.408V/(m·s ⁻²)
假频(Hz)	250~350	>1000
谐波畸变(dB)	-62	-90
频带宽度(Hz)	10~250	0~800
幅频特性	相位畸变、高/低频衰减	无相位畸变、0~800Hz 无衰减
振幅测定精度(%)	±3.5	±0.25
正交测定精度(°)	±1.0	±0.25
稳定性	差	好

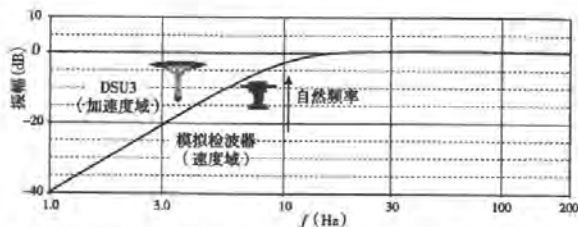


图 4 DSU3 数字检波器与模拟检波器的幅频特性对比

3) 模拟检波器的动态范围小,并且存在使用期内失真和畸变的问题,影响了高保真性能。目前模拟检波器的畸变指标出厂要求也仅为 0.2%,这说明其动态范围仅为 54dB,且超级检波器的动态范围也仅为 62dB;

4) 模拟检波器在使用期内存在线圈被磁化、疲劳等问题;

5) 模拟检波器的物理性能受加工精度的影响大,造成不同检波器之间的振幅、频率和相位的响应的差异,降低了地震道之间的一致性,导致勘探精度的降低。

(2) 数字检波器

1) 数字检波器具有极佳的线性幅频特性,在 0~800Hz 范围内,输出相位为零相位,对低频没有衰减压制作用,因此能够记录下低频的反射信息,在一定意义上保护了低频信号;

2) 数字检波器的高频端可以达到 800Hz,并保持线性输出,已经远远大于地震反射的有效频带,因此可以记录下高频弱反射信号。

2.2 两种检波器的相位特性对比

图 5 是数字检波器与模拟检波器的相位特性对比。从图 5 可以看出:数字检波器在 0~800Hz 范

围内的相位响应是零相位;而模拟检波器存在由低频到高频的相位畸变,表现为低频端大相位,高频端小相位的特性。模拟检波器的相位变化与它的动圈式结构有很大关系。

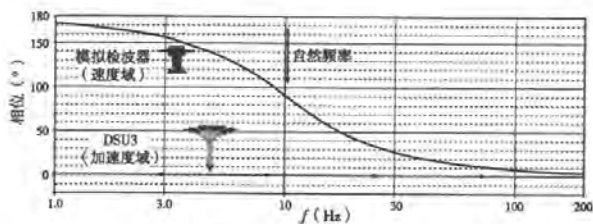


图 5 数字检波器与模拟检波器的相位特性对比

正是由于数字检波器优异的幅频特性和相位响应特性,使得数字检波器特别适合于高分辨率和高精度地震勘探。

3 数字检波器的应用效果

常规地震勘探利用多个检波器以不同形式的组合方式接收地震波,输出信号是对参与组合的检波器的输出电压信号的不同权值的叠加。组合方式不同,组合内检波器叠加的权值也不同,由此达到提高地震信号信噪比、保持耦合和提高灵敏度的目的。众所周知,检波器组合检波存在不可克服的缺点,这也是必须发展新型检波方法的根本原因。

3.1 两种检波器组合检波与点接收对比

(1) 模拟检波器的主要缺点

1) 由于假频的影响,组合检波造成信号和噪音的叠加,即混波效应;

2) 组合方式不同造成不同的炮-检方位滤波效果;

3) 受组内时差的影响,高频信号受到损失(见图 6a)。

(2) 组合检波与点接收对比

图 6a、图 6b、图 6c、图 6d 分别为组合检波与点接收性能对比、组合检波与点接收单炮对比、组合检波器与点接收 F/K 谱对比和组合检波与点接收频谱对比。

1) 对比图 6a~图 6d 可以看出:模拟检波器组合对地滚波的衰减以及假频化地滚波;而数字检波器更为有效地对地滚波进行加强,无假频地滚波;

2) 图 6d 不但更为清楚的反映出图 6b、图 6c 的结论,更可以清楚地看出数字点接收方式可获得更多的高频成份,并且对高频弱反射信号有很好的保

护作用。



图 6a 组合检波与点接收性能对比

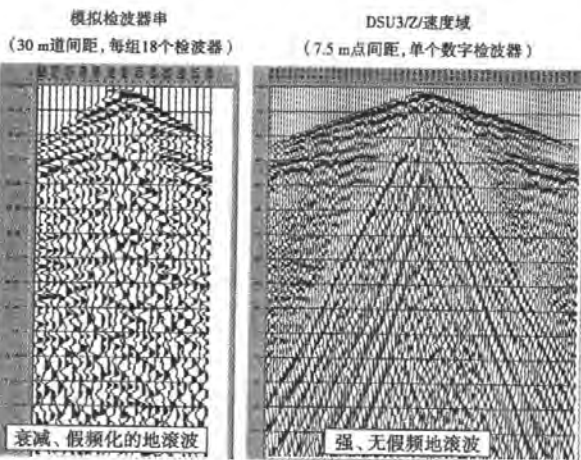


图 6b 组合检波与点接收单炮对比

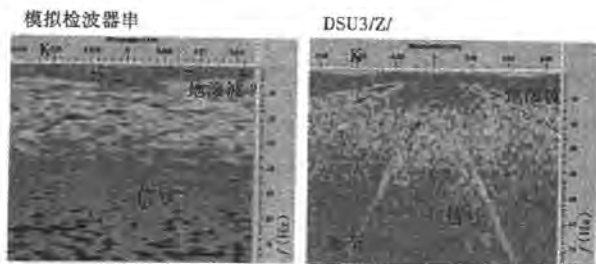


图 6c 组合检波与点接收 F/K 谱对比

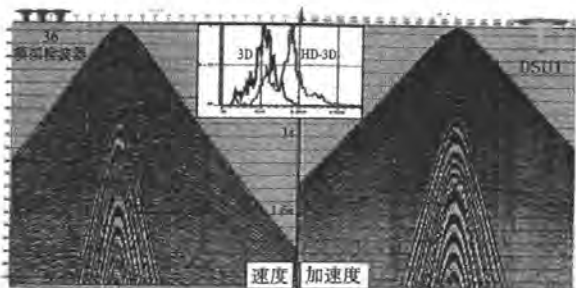


图 6d 组合检波与点接收频谱对比

(3) 数字检波器的特点

1) 采用数字检波器单点接收进行高密度(10~20m 道距)采集,避免了常规方法使用模拟检波器串组合采集的组合效应,对信号和噪音均无压制和衰减,高保真地记录地震波场,即所谓“全进全出”。正因为数字检波器采用单点接收,其资料信噪比往往要低于组合接收的模拟检波器资料。数字检波器空间采样密度高,避免了低频速度干扰波,如面波出现空间假频,干扰波无假频采样更有利于信噪分离,干扰波压制效果更好;而模拟检波器串采用大的组合基距,由于近地表静校量的存在,引起组内时差,造成高频信息的损失,信号发生畸变。

2) 利用数字检波器单点记录通过室内数字组合技术(DGF),首先通过动校正解决大的组合基距引起的正常时差,然后通过静校正把静校正量实施给每个独立的检波点,使组内道间时差趋于零,有效波组合时达到同相叠加,将常规垂直叠加频率滤波作用减小到最小。由此可见,数字检波器资料的评价标准和处理方法应不同于模拟检波器串的资料,只有在观测系统设计、处理阶段保持其优点,克服其缺点,才能发挥出数字检波器在保真、成像、波组特征等方面的优势。

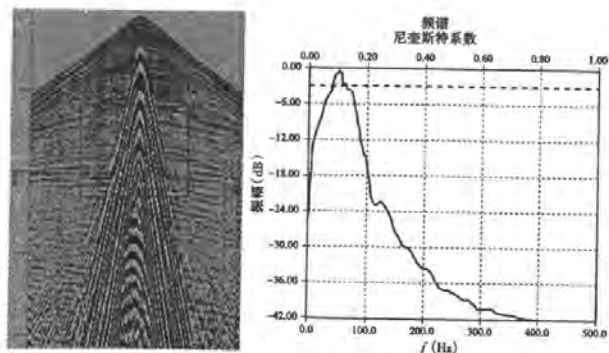


图 7 模拟检波器单炮记录频率分析

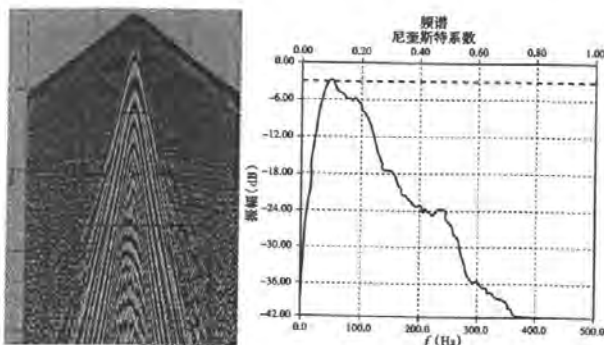


图 8 数字检波器单炮记录频率分析

3) 图 7 为东部某油田的模拟检波器单炮记录, 图 8 为相同炮点激发的相同位置的数字检波器记录。从图 7 可以看出: 模拟检波器记录的信噪比较高, 层次清晰。从图 8 可以看出: 数字检波器记录的层次虽较清晰, 但干扰比较强。

4) 从信噪比看, 模拟检波器特性好于数字检波器; 频率分析方面, 数字检波器好于模拟检波器。单炮记录分析由于存在组合的影响, 使得在压制干扰方面二者有所不同, 因此分析数字检波器和模拟检波器不能只看单炮, 而应该结合剖面一起分析。

3.2 数字检波器在海上勘探的优势

数字检波器不仅在陆地勘探发挥了其自身的特性, 大大提高了资料品质, 在海上勘探也有质的飞跃。

Sercel 公司四分量可重复收放的海底电缆 SeaRay 428, 其检波器就是采用了 DSU3 (三分量数字检波器) 和一个压电检波器。SeaRay 428 接收点内部结构见图 9, 检波器具体参数指标见表 2。



图 9 SeaRay 428 型接收点内部结构

表 2 SeaRay 428 检波器参数指标

系 统	SeaRay 428	
检波器	陆检	DSU3 数字三分量检波器
	水检	SSH-01
检波器组合	DSU3+水检	
灵敏度	陆检	$0.452\text{V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
	水检	$5.66\text{V}/\text{Bar}$
频率 (Hz)	陆检	0~400 (考虑到衰减指标, 最高达 1600)
	水检	3~1600
接收点间距 (m)	25	
倾斜度 (°)	-180~+180	
温度 (°C)	-15~+40	
最佳温度 (°C)	0~15	

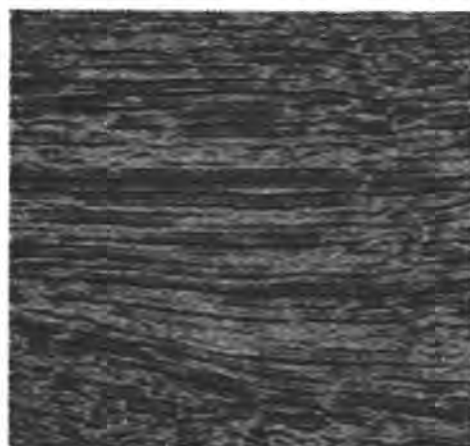
目前海洋勘探的最大目标之一就是压制多次反射(即压制鬼波), 浅滩海以及海底电缆施工主要是通过 PZ 水陆合并进行消除。常规的海底电缆其陆地检波器为模拟万向节 Gimbal 型, 没有倾斜角度,

完全靠机械设备进行垂直调整, 加之模拟检波器(动圈型检波器)的局限性, 例如自然频率 10Hz, 数据的精度、品质以及频带宽度都不高, 所以在进行 PZ 合并时以水检数据为主、陆检数据为辅。

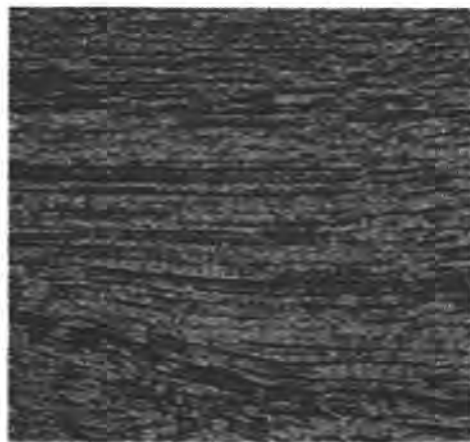
DSU3 数字检波器的特点:

(1) 全向性, 即三个分量的倾斜角度能被记录于数据头段, 便于后期处理获得更为精准的各分量所拾取的能量。当然作为仪器本身也能进行倾斜校正。通过实际对比仪器和后期处理的倾斜校正, 数据的一致性可达 98% 以上。

(2) 具有高保真宽频数字检波器信号的各种特性。数字检波器的数据精度及品质远远高于水检的数据。所以在水陆检合并时, 采用新方法从水检校准到陆检(P→Z), 较老方法陆检校准到水检(Z→P)在频率上有了明显的提高, 同时突显更为丰富的构造属性。图 10 为新、老两种方法叠加剖面的局部信息对比, 图 11 为新、老两种方法频谱对比。



(a) 老方法陆检标定到水检 (Z→P)



(b) 新方法水检标定到陆检 (P→Z)

图 10 新、老两种方法叠加剖面的局部信息对比

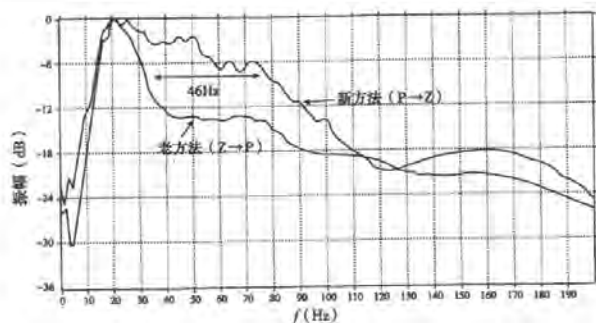


图 11 新、老两种方法频谱对比

4 结束语

(1) 数字检波器的频带宽,表现在低频和高频两个方面;

(2) 数字检波器的动态范围较大;

(3) 单炮记录方面,单只数字检波器在扫描频率方面与模拟检波器单串组合相比有一定的差异,主要表现为数字检波器记录信噪比低于模拟检波器记录。这是由于模拟检波器串组合效果压制了环境噪音,提高了信噪比,因此并不代表模拟检波器记录

优于数字检波器记录。建议衡量对比数字检波器与模拟检波器的优劣时,应以地震剖面为标准;

(4) 由于数字检波器以单点接收,具有宽进宽出的特性,对信号和噪音无损记录,原始记录信噪比低。数字检波器单点接收结合高密度空间采样,才能有利于提高对地质目标的分辨率。

参 考 文 献

- 1 梁运基. 陆上高分辨率地震勘探检波器性能及参数选择分析. 石油物探, 2005, 44(6)
- 2 朱铤. 数字地震仪的发展历史及展望. 地球物理学进展, 2002, 17(2)
- 3 徐锦玺. 检波器尾锥结构对地震采集信号的影响. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2)
- 4 周滨, 刘永霞, 刘俊杰. 渤海浅水海底电缆水陆检合并实例及分析. SPG/SEG 国际地球物理会议论文集, 2011 年
- 5 Wang MeiSheng et al. The application of DSU1 high density 3-D in coal field exploration. SEG2008, Lasvegas
- 6 Shi SongQun et al. Seismic acquisition with digital point receivers and prestack reservoir characterization at China's Sulige gas field. The Leading Edge, March 2009

收稿日期: 2013-06-19

· 消息与简讯 ·

重庆 2013 物探装备技术研讨会圆满闭幕

以“追踪业界前沿动态、交流未来储备技术”为主旨的重庆 2013 物探装备技术研讨会于 7 月 27 日上午 8 时,在风景秀丽、盛夏“火”都的重庆阳光酒店隆重开幕。来自国内外著名物探装备的主流厂商与石油、石化、煤炭、地质勘探单位的近 200 余名用户与厂商代表出席了“重庆 2013 物探装备技术研讨会”。今年物探装备技术研讨会的主题是:面向“低、深、海、非”(即面向“低品质矿、大深度、海洋与非常规油气资源”)的物探装备技术。中国石油学会物探装备分会主任委员李国旗先生出席并致开幕词。他说:近年来,国际能源格局在发生着悄然无息的变化,国际市场的石油价格不再象脱缰的野马一样难以驾驭,而是逐渐安定下来,特别是受北美页岩气规模化工业开发与成功商业运作的影响,非常规能源已经登堂入室,开采价格与天然气几乎相当,这对平衡国际石油价格发挥了重要的作用。……回顾以往的专题研讨内容,从大道数地震数据采集、高密度地震勘探技术、宽频海量地震勘探技术以及今天的面向“低、深、海、非”的物探技术,每个技术交流的命题都与当今地球物理技术的发展密切相关,每次技术讨论后对国内相关行业和技术领域都有较大的触动,也为各地球物理公司提供了选择“攻艰啃硬”工程利器的参考依据,更是石油公司增储上产坚实的基础保障。通过这样的技术交流,为进一步推动国内地球物理技术的快速发展做出了应有的贡献,也得到了业界普遍的认可与关注,这也是装备分会每年举办技术交流会的意义所在。

本届 2013 物探装备技术研讨会上, Sercel、英洛瓦、赛赛尔俊峰、Geospace、Fairfield、iSeis、Wireless Seismic、Trimble、麦格天涯、华徕新虹及怡敏信公司各自围绕会议主题发布了 15 个技术专题报告,受到与会用户代表普遍的欢迎与好评。本届重庆物探装备技术研讨会经过一天半的紧张、高效地认真研讨,于 7 月 28 日圆满闭幕。