

# 地震勘探仪的发展历程与趋势

程建远<sup>1,2</sup>,王盼<sup>2</sup>,吴海<sup>1</sup>,江浩<sup>1</sup>

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院 陕西 西安 710077; 2. 西安科技大学 陕西 西安 710054)

**摘要:**总结了近60年来地震勘探仪历经的5个发展阶段——光点记录地震仪、模拟磁带记录地震仪、数字地震仪、遥测地震仪、全数字遥测地震仪;指出了地震勘探仪设计发生的4个转变——从集中式到分布式、从有线到无线、从模拟到数字以及目前的高密度全数字采集理念;认为国民经济发展对能源的巨大需求、地震勘探新方法新技术的出现以及电子技术、信息技术、计算机技术等相关学科的发展,是推动地震勘探仪不断更新换代的内在驱动力;指出我国自主研发的地震仪和国外同类产品尚存在着较大差距,预测今后地震仪将朝着单站、单道、三分量、全数字、GPS定位与授时、节点数据采集、信号无线传输、观测系统灵活架构等趋势发展。

**关键词:**地震勘探;地震仪;全数字地震仪;遥测地震仪;万道地震仪

中图分类号:P631.43 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2013)01-0030-06

## Progress and Development Tendency of Seismic Exploration Instrument

CHENG Jian-yuan<sup>1,2</sup>, WANG Pan<sup>2</sup>, WU Hai<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The paper summarized the 60 years development experiences of the seismic exploration instrument, including five development stages as the light - spot recording seismograph, simulated tape seismometer, digital seismometer, telemetric seismometer and full digital seismometer. The paper pointed out that four changes were occurred in the design of the seismic exploration instrument, from a centralized to distributed, from wire to wireless, from simulated to digital and to present high density full digital collection conception. The paper held that the national economic development would have a great requirement of energy, the appearances of the new seismic exploration method and technology and the development of the electronic technology, information technology, computer technology and other related the sciences would be the internal driving force to push the continued upgrading and generation of the seismic exploration instrument. The paper pointed out that there was a big gap between the Chinese self developed seismometers and the overseas similar products. The paper estimated that a single - station, single channel, three component, full digital, GPS positioning and time service, node data acquisition, signal wireless transmission, flexible set up observation system and others would be the development tendency of the seismometer.

**Key words:** seismic exploration; seismometer; full digital seismometer; telemetry seismometer; multichannel seismometer

## 1 地震勘探仪的发展历程

1818年科西(Cauchy)发表了关于波传播的论文,1880年Gray、Ewing和Milne在东京设计出第1台地震检波器,1889年Fouque和Levy通过摄影技术记录到了地震数据,1899年Knott提出了地震波传播及其反射和折射的理论。至此,地震勘探技术的波动理论逐渐发展成熟。受1912年泰坦尼克号

遭遇冰山撞击导致沉没事故的触动,加拿大Reginald Fessenden开始研究声波在水中的传播,首次提出利用地震波进行地质勘探的设想,1917年获得了地震勘探的第1个专利“定位矿体的方法及仪器”;1914年,德国勘探家Ludger Mintrop研制出1台机械式地震仪,1919年取得了折射波法勘探的专利;1930年地球物理服务公司GSI(Geophysical Service Incorporated)宣告成立;1936年Frank Rieber筹建了

收稿日期:2012-07-19;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-002);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B04)

作者简介:程建远(1966—)男,陕西乾县人,研究员,博士生导师。Tel:029-81778058,E-mail:cjy6608@163.com

引用格式:程建远,王盼,吴海,等.地震勘探仪的发展历程与趋势[J].煤炭科学技术,2013,41(1):30-35.

第1个地震记录系统。此后,石油地震勘探得到世界上很多国家和政府的资助,进入了一个方兴未艾的发展阶段。

我国于 1951 年成立了第 1 个石油地震勘探队、1955 年创建了第 1 个煤田地震勘探队,迄今为止地震勘探在我国已有近 60 年的发展历史。地震勘探仪的发展可以划分为 5 个阶段。

## 1.1 第1代——光点记录地震仪

国外第1代地震仪是20世纪30—50年代末出现的,比较典型的是51型地震仪,核心技术与器件为电子管,分立元器件。1952年,我国新组建的5个地震勘探队使用仪器除1台为美国制造外,其余4台都是苏制CC-24-48型和CC-26-51型,我国的煤田地震勘探队在起步阶段也都是采用国外进口地震仪器,直到1963年,煤炭系统才开始使用我国自主生产的模拟光点记录地震仪。

光点记录地震仪<sup>[1]</sup>采用的是光点记录,即在照相纸上每道记录1个反射地震信号,其存在明显不足,如记录不能做回放处理;采用自动增益控制(AGC, Automatic Gain Control);仪器动态范围小,增益量一般只有20 dB左右;记录频带窄,一般为30 Hz左右,使得大量的有效波丢失;仪器采用电子管电路,接收道数少,一般为24道,只能做二维地震勘探等。尽管如此,当时在华北、西北等地区开展折射波法、单次覆盖反射波法测量,采用光点记录地震仪在寻找隐伏煤田中发挥了重要作用。

## 1.2 第2代——模拟磁带记录地震仪

为了克服光点记录地震仪的不足，国外从 20 世纪 50 年代初发明了模拟磁带记录地震仪，如法国的 CGG59、AS626X、DZ663、TYDC-24 型，核心技术与器件为晶体管，分立元器件。1970 年，煤炭科学研究院西安煤田地质研究所研制出了 TYDC-24 型磁带记录地震仪样机，随后西安石油仪器一厂及渭南煤矿专用设备厂也先后研制生产出了 DZ661、DZ663、DZ701 等地震仪<sup>[2]</sup>。1973 年，煤炭系统的光点记录地震仪全部被模拟磁带记录地震仪所取代，至此我国地震勘探仪升级到第 2 代，即模拟磁带记录地震仪。

模拟磁带记录地震仪与光点记录地震仪相比，具有诸多优点，如体积小、质量小、耗电量小；接收道数、动态范围和频带宽度都有所增加；原始记录资料可以做回放处理，可以实现多次叠加；仪器采用晶体管电路；接收道数可达48道；实现了自动增益控制。

(AGC) 和程序增益控制; 增益量动态范围一般为 40~50 dB<sup>[3]</sup>; 记录频带一般为 15~150 Hz。

模拟磁带记录地震仪也存在一些问题,如仪器记录精度较低;记录动态范围较小;回放转录一次信噪比降低6 dB,且地震道数少、工作效率低等。

### 1.3 第3代——数字地震仪

随着集成电路的诞生,地震仪进入了小型化和数字化发展阶段。1971年法国生产出SN3x8系列产品<sup>[4]</sup>、美国制造出DFS-V数字地震仪等,核心技术与器件为集成电路模拟传输、数字记录。当时,仪器的设计理念仍是集中式数据采集,采用瞬时浮点增益控制和数字电路,检波器输出的模拟电信号通过大线传送到仪器主机的数据采集部件,经过前置放大、增益控制、A/D转换之后,以数字信号的形式记录到磁带上<sup>[5]</sup>。

1980 年我国进行了 MSD - 1 型数字地震仪研发<sup>[6]</sup>，并于 1983 年完成样机制造并投入试用。改革开放后，我国石油和煤炭行业开始大量引进美国的 DFS - V、ES - 2420 和法国的 SN338HR、SN358 等数字地震仪以及 VSP 测井等性能优良的先进仪器设备，装备了上百个野外地震勘探队，标志着我国地震勘探仪进入了第 3 代：数字地震仪阶段。集中式数字地震仪野外采集布线如图 1 所示。



图1 集中式地震仪野外布线示意

与模拟磁带记录地震仪相比,数字地震仪采用了中小型集成电路,仪器体积减小、功耗降低; A/D 转换技术使系统动态范围提高到 70 dB 以上; 记录频带达到了 250 Hz 左右; 数字磁带记录数据在转录时信噪比不降低; 瞬时浮点放大技术使得仪器的测量精度高达 0.05%<sup>[3]</sup>; 记录道数增至 240 道,且出现了计算机集中控制,野外工作效率大幅提高。但是,数字地震仪也存在一些问题,如集中式数据采集限制了带道能力; 模拟信号长距离传输、模数转换位数较少(16 位 A/D),数据采样率偏低(一般为 2 或 1 ms); 多道模拟信号在同一电缆中传输易产生道间串扰等<sup>[7]</sup>。

#### 1.4 第4代——遥测地震仪

随着大规模、超大规模集成电路和微处理器时代的来临 地震勘探仪迎来了一个快速发展的新阶段。1991年ION公司率先设计出基于 $\Delta\Sigma$ 技术的

24位A/D转换器后,大幅提高了模/数转换精度,使得地震仪器的动态范围达到144 dB,基本可以满足地震信号动态范围120 dB<sup>[8]</sup>的要求。

从1994年起,中国煤炭地质总局先后引进了SN-388、IMAGE、DS-6、SUMMIT、408UL、ARIES、BOX、DAS-2等不同国别、种类和型号的多道遥测数字地震仪,预示着我国地震勘探仪跨入了第4代—遥测地震仪阶段,核心技术与器件为分布式结构,由微型机控制技术、位技术、网络遥测技术集成。图2为单站6道遥测地震仪野外布线方式。

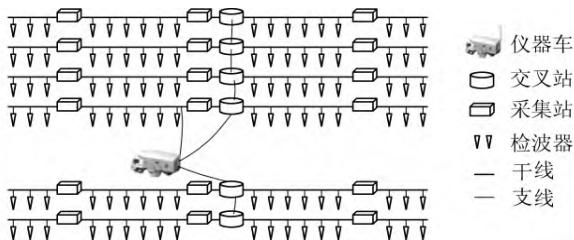


图2 数字遥测地震仪三维勘探野外布线示意

遥测地震仪具有很多优点:如基于分布式数据采集的设计理念,提高了仪器的带道能力,适合三维地震勘探;大线中传输的数据为数字信号,大幅降低了信号传输过程中的道间串音、天电干扰、工频干扰等影响;去掉了转换开关、瞬时浮点放大器和模拟滤波器等,减轻外设和系统质量,降低了功耗,提高了工作效率;采用24位A/D转换器,使记录动态范围增大、量化误差(白噪声)减小;采样率大幅提高,波形畸变减小,频带宽度增大,串音减小(表1);另外,采用遥测技术实现数据的网络传输,传输速率增加,可以实现实时采集;在地震仪中植入GPS(Global

Positioning System)授时系统<sup>[9]</sup>,使地震仪可以独立定位、同步授时。当然,该仪器也存在一些缺点,如检波器和采集站之间传输的信号为模拟信号,处于数据采集前端的检波器的动态范围一般只有50~60 dB<sup>[10]</sup>,采集道数增加后仪器系统显得笨重等。

### 1.5 第5代—全数字遥测地震仪

2002年JON公司首次研制出MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)加速度检波器。可以替代传统的动圈式传感器,地震勘探仪又进入了一个新的发展阶段。目前,以MEMS检波器接收为特征的全数字遥测地震仪中,无线采集系统的代表性仪器有FireFly、Hawk、UNITE,有线采集系统的代表性仪器有428XL、System-IV等,核心技术与器件为MEMS技术全数字传输记录。该采集系统的外设能耗低、质量小、斜角度可达±180°、带道能力可达10万道,采用三分量全数字传感器接收,动态范围达120 dB(4 ms)、失真小(-90 dB)、频带宽(0~800 Hz)<sup>[11]</sup>、幅频特性好、数据传输可靠性高,具有超低噪声、动态范围大、向量保真度高等优点<sup>[12]</sup>,一些地震勘探队伍也已引进了设备。

全数字遥测地震仪的主要特点有:①采用MEMS数字检波器,解决了高频信号接收的问题;②检波器直接输出数字信号,大幅提高了信号保真度;③采用新工艺使仪器的集成度更高、体积更小、质量更小、耗电更少。目前,地震仪正处于由多道遥测向全数字地震仪跨越的进程中,各代地震勘探仪性能见表1。

表1 各发展阶段地震勘探仪性能对比

技术指标	第1代光点地震仪	第2代模拟磁带地震仪	第3代数字地震仪	第4代遥测地震仪			第5代全数字地震仪
				ARIES	408UL	IMAGE	
系统动态范围/dB	20	40	70	120	140	120	140
瞬时动态范围/dB	—	—	—	120	130	120	130
带道能力(采样率2 ms)	24道以下	48道以下	240道	1 280道	19 200道	3 000道(1 ms)	100 000道
记录方式	模拟相纸	模拟磁带	数字磁带	数字磁带	硬盘	硬盘	光盘/硬盘
采样间隔/ms	—	—	16.8±2, 1.0.5	8.43.2, 1.0.5, 0.25±0.125	4.2, 1.0.5, 0.25	4.2, 1.0.5	4.2, 1.0.5, 0.25
串音/dB	—	—	80	100	130	110	130
畸变/%	—	—	0.050 0	0.000 4	0.000 3	0.000 5	0.000 3
传输速率	—	—	32 kB	6.25 MB	8.192 MB	—	8.16 MB
传输方式	—	—	有线	有线	有线	有线+无线	无线+有线
频带宽度/Hz	20左右	100以下	3~256	3~750	3~1 640	3~800	0~1 640
A/D转换	无	无	15位(14+符号)	24位(23+符号)	24位(23+符号)	24位(23+符号)	24位
增益控制	自动增益	AGC和PGC	固定+IFP	前置增益	前置增益	前置增益	前置增益
前置增益/dB	—	—	—	12.24.30	0.12	12.24.36.48	0.12
检波器信号	模拟传输	模拟传输	模拟传输	模拟传输	模拟传输	模拟传输	数字传输
采集站信号	模拟传输	模拟传输	模拟传输	数字传输	数字传输	数字传输	数字传输

## 2 地震勘探仪升级换代的启示

1) 社会发展对能源的巨大需求是地震勘探仪升级换代的直接推动力。从18世纪英国工业革命开始,人类对能源的依赖越来越大。特别是从20世纪50年代开始,西方发达国家相继进入高度工业化阶段,世界能源消耗量猛增。在1950—1980年期间,世界能源消耗量从25亿t增长至100亿t标准煤;随着发展中国家的兴起,世界能源消费量出现了再一次迅猛增长,到2000年能源消耗量超过了200亿t标准煤;近10年来,许多发展中国家正处于城市化和工业化的进程中,世界能源消费量还在持续增长<sup>[16]</sup>。据

2) 地震勘探方法技术的进步对地震仪更新提出了更高要求。20世纪50年代,地震勘探方法中多次覆盖技术的萌芽和出现,促进了光点记录地震仪被模拟磁带记录地震仪所取代;60年代,反褶积技术和速度滤波技术的提出,数字地震仪迅速替代了模拟磁带记录地震仪,而在70年代提出的三维地震勘探技术,对地震仪的带道能力有更高的要求,多道遥测数字地震仪应运而生;至90年代高精度三维地震勘探技术要求仪器必须解决高频信号的瓶颈问题,全数字遥测地震仪开始出现;高密度全数字三维地震勘探概念的提出,成为万道地震仪面世的第一推手<sup>[17]</sup>。随着多分量地震勘探技术、时移地震技术的不断推广应用,以解决复杂地区的勘探问题及提高油藏采收率<sup>[18]</sup>,今后地震勘探技术对地震仪器高精度、轻便性、灵活性等方面将提出了新的要求。

3) 电子技术的进步给地震仪升级带来了发展机遇。生产需求是地震勘探仪升级改造的内在动力,而数学、物理、计算机、电子、信息、新材料和新工艺等相关学科的发展和进步,则是地震勘探仪发展的内在动力。

伴随着电子技术从电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路到超大规模集成电路以及MEMS、FPGA(Field-Programmable Gate Array)等技术发展,地震仪器一直朝着体积小、质量小、功耗低、功能强、高可靠性、便携性等方向发展。

近年来,纳米电子技术发展迅速,电子器件面临新的变革,纳电子器件的体积功耗比硅电子器件小几个数量级。2011年4月,美国匹兹堡大学制造出核心组件直径只有1.5 nm的超小型单电子管,预示着高密度超大规模纳米集成电路和纳米计算机的诞生已经成为可能<sup>[19-20]</sup>,预计未来的地震仪也将随着

英国BP公司2011年发布的能源统计:2010年非经合组织国家一次能源消费比2000年高出了63%,未来20年世界能源消费量还会增长40%。

地球作为人类赖以生存和发展的物质源泉,满足了社会发展进步对能源的需求,从1926年在美国奥克拉荷马洲的沉积盆地上根据反射地震记录解释布置的钻孔第1次打出工业油流之日起,地震勘探技术就以其独有的技术优势在地下煤炭、石油与天然气资源的探测中发挥着不可替代的作用,且随着探测深度的增加、勘探难度的加大,推动了地震勘探技术从仪器装备、处理软件和解释方法上不断发展,以满足提高勘探精度和作业效率的要求。

纳米技术的发展进入一个全数字纳米地震仪时代。

## 3 我国地震仪器的发展方向

在新一轮的资源勘探中,地震勘探技术不可避免地将会遇到来自更大深度、更加隐蔽、勘探难度更大的复杂地质目标的挑战,地震勘探将会更多地深入到复杂的山地、沙漠、戈壁、煤矿井下、无人区甚至深海等开展工作<sup>[21-22]</sup>。面对众多的、恶劣的勘探条件,对新型地震勘探仪的设计和制造提出了更高的要求,而这一切也必将成为地震仪不断更新换代的内在动力。在内外动力的驱动下,预计国内地震仪会朝着以下2个方面发展。

1) 超万道国产化大型地震仪将逐渐得到推广应用。2011年12月,李庆忠院士指出目前国内几乎所有地震仪都是外国制造的<sup>[23]</sup>。国内生产的地震仪器大多为集中式的小型工程地震仪,仅适合于浅层地震反射法和折射法勘探,如重庆地质仪器厂的高分辨率(浅层)地震仪DZQ48/24/12、西安石油厂的工程地震仪GDZ24/48及骄鹏集团的SE2404 PLUS综合工程探测仪等,其最大带道能力为48道<sup>[24]</sup>。“十一五”期间,我国将大型地震勘探仪研制列为重点项目的攻关项目,投资1.2亿元,已于2010年推出了ES109大型地震数据采集记录系统,其整体性能达到国际先进水平,从此结束了地震勘探仪一直依赖进口的被动局面,该仪器有待于通过大量的工程实践加以完善、尽快定型,以投入产品化、工业化的生产和应用。另外,2010年东方物探公司与ION公司合资成立了INOVA(英洛瓦)物探公司,标志着我国地震仪制造技术与世界先进技术的融合越来越紧密。预计万道地震仪将逐步在石油天然气与煤炭资源的精细勘探中得到进一步的推广。

应用。

2) 节点式多道遥测地震仪将成为赶超国外先进地震仪器的突破口。基于节点式的单站、单道、存储式/无线数据传输等特点设计的地震仪,今后将会更加广泛地用于天然地震监测、OBC 地震、煤矿井下地震勘探、微震监测、时移地震等多个特殊领域中,该类仪器由于没有传统地震仪的主机、干线等而显得十分轻便,适于在各种复杂条件下使用,几乎能够适应任何复杂的观测系统要求,且具有极高的施工效率。

以前,在大型地震仪器的设计与生产过程中,由于采用的元器件品种繁多、系统复杂等原因,国内生产的地震仪通常存在整体稳定性欠佳等缺点;而基于节点式的地震仪器,从设计、施工理念上摆脱了传统束缚,采用基于 MEMS 的传感器、FPGA 数字电路设计等,极大地降低了地震仪设计与制造的复杂性。

#### 4 未来地震仪发展趋势的预测

随着地震勘探的技术进步,今后地震勘探将向着高密度、三维、全波场、高分辨率、超多道地震勘探等方向发展<sup>[25]</sup>,因此新一代地震勘探仪的设计与制造,将具有节点式、单站单道、三分量、全数字、GPS 定位与授时、自记存储式与无线通信方式结合、智能化以及便携式等方向发展。

##### 4.1 节点式单站单道采集

节点采集<sup>[26]</sup>是指单站单道作为一个采集节点,采集站就地采集地震记录,最后进行数据统一回收。A/D 转换位数将提高到 32 bit 或更高,如 INOVA 公司 2012 年推出的 FireFly DR31、Hawk SN11 的 A/D 转换已经达到 32 bit<sup>[27]</sup>。节点式地震仪将集电源、检波器、采集站于一体,减小质量近 50%~75% 的电缆部分<sup>[28]</sup>,野外工作时只需带 1 个集成的采集站,摆放灵活,无需等待放线查道,随时放炮即可随时接收,仪器将采用太阳能板供电,从而大幅提高工作效率;实现地震勘探真正的高效作业,避免地震信号远距离传输带来的保真度、信噪比和抗干扰性降低的问题,特别适合复杂地形、超多道等条件下的地震勘探。

##### 4.2 自记存储式和无线通信方式结合

目前,地震仪的数据传输大多数是基于分布式地震采集站的蜂窝网络有线数据传输系统,该系统对于上万道以至几十万道的地震采集,其数据传输能力将受到挑战,且整个采集系统的后勤保障将更

加庞大而不堪重负。

随着 WiFi、Wimax 等无线通信系统的快速发展,地震勘探中的无线数据采集系统发展很快,今后地震仪的数据通信方式如能采用存储式和无线通信方式相结合的数据通信方式,既能满足实时监测的要求,且保证信号的不失真,将大幅减少野外工作量,图 3 为 Sercel 公司无线地震仪 UNITE 和有线地震仪 428XL 混合无缝地震采集示意<sup>[29]</sup>。

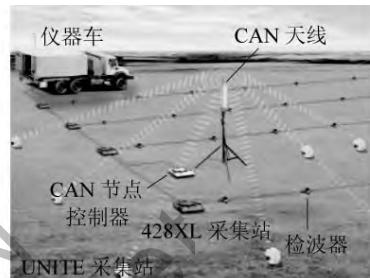


图 3 有线与无线方式通信示意

##### 4.3 高密度全数字三分量信息采集

由于煤炭、油气田勘探目标越来越复杂,常规的面元大小、单分量的地震采集已不能完全满足高分辨率地震勘探要求,高密度、全数字、三分量地震数据采集不但有利于复杂构造的分析,且能够为岩性地震勘探、各向异性介质地震勘探等提供丰富的第一手资料,将成为今后地震勘探技术发展的一个必然趋势。

##### 4.4 高精度 GPS 定位与授时

对于多道地震采集系统异地同步采集而言,时间同步是一个极其重要的因素,决定了地震勘探的准确度;同样,地震检波器与炮点的定位精度,对于高精度地震勘探尤为重要,可为后续地震数据处理提供高精度的位置信息。

目前, GPS 同步授时系统的精度可达纳秒级、位置定位精度达到厘米级,今后地震节点式采集站内置高精度 GPS 模块后,将确保多道采集站走时一致性和高精度的空间定位精度。

##### 4.5 采集站太阳能供电系统

电源系统可以采用太阳能供电,即白天太阳能电池将太阳能转换成电能对蓄电池充电,同时为采集系统供电,夜晚蓄电池放电维持采集系统的正常工作等。

综上所述,地震勘探仪历经 60 多年的发展,从光点记录地震仪发展到全数字地震仪,仪器的性能和技术指标不断得到改善。但是,我国地震勘探仪

的设计和生产制造能力还不成熟,关键的勘探仪设备、资料处理软件<sup>[30]</sup>几乎全部依赖进口。一旦我国的物探技术开始走出国门、参与世界市场竞争的时候,如果缺乏拥有自主知识产权的核心技术与装备,地震勘探仪将面临国外垄断公司的威胁。因此,在学习世界一流地震勘探仪的同时,更要加强自主创新和拥有自主知识产权,大力发展国产化大型地震仪。今后,应该抓住机遇,不失时机地加快推广国产化万道地震仪、抓紧研发节点式单站单道三分量全数字地震仪,以彻底摆脱地震勘探仪长期依赖进口的被动局面,早日形成适合我国复杂条件下的地震勘探仪。

#### 参考文献:

- [1] 王百成. 我国地震勘探仪器的发展[J]. 地质装备, 2000, 1(3): 3-10.
- [2] 陕西渭南煤矿专用设备厂情报资料组. TYDC-24型半导体磁带地震仪试产[J]. 煤炭科学技术, 1976, 4(6): 65-66.
- [3] 袁子龙, 狄帮让, 肖忠祥. 地震勘探仪器原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [4] 鲁光宇. SN348数字地震仪介绍[J]. 国外地质勘探技术, 1980(11): 15-22.
- [5] 孙传友. 遥测地震仪原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [6] 煤炭科学研究院西安分院. 煤田地质勘探研究的光辉历程[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(6): 52-57.
- [7] 朱 钰. 数字地震仪的发展历史及展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 301-304.
- [8] 程建远. 中国煤矿采区地震勘探技术的回顾与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2004(5): 30-36.
- [9] 夏 颖, 周德茂, 王 艳. GPS技术在地震勘探仪器中的应用及发展[J]. 物探装备, 2010, 20(2): 78-82.
- [10] 吕公河. 地震勘探检波器原理和特性及有关问题分析[J]. 石油物探, 2009, 48(6): 531-543.
- [11] Sercel Corporation. DSU3 Digital Sensor Units [DB/OL]. (2010-12-15) [2013-01-06]. <http://www.sercel.com>.
- [12] 张 莉, 解文荣, 李秀荣. 基于微电子系统(MEMS)加速度地震勘探三分量数字检波器简介[J]. 中国煤炭地质, 2006, 18(2): 57-60.
- [13] Maginot, Denis. How Digital Sensors Compare Geophone [C]. CPS/SEG 2004 International Geophysical Conference, Vol I, 2004: 31-43.
- [14] 德克萨斯仪器公司. DFS-V数字地震仪性能介绍[J]. 石油物探, 1977, 16(4): 108-135.
- [15] 孔令纲, 金树波, 王金州, 等. 地震勘探仪器原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [16] 柏立田, 刘 静. 工业进化进程中能源的演变与勘探地球物理学的进展[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(9): 74-78.
- [17] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [18] 赵 波, 王 贲, 芦 俊. 多分量地震勘探技术新进展及关键问题探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 506-519.
- [19] CHENG G L SILES F, BI F, et al. Sketched Oxide Single-electron Transistor [J]. Nature Nanotechnology, 2011(6): 343-347.
- [20] 刘长利, 沈雪石, 张学繁. 纳米电子技术的发展与展望[J]. 微电子技术, 2011, 48(10): 617-623.
- [21] 唐汉平. 黄土塬区地震勘探方法与效果分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 97-101.
- [22] 吴有信, 王 琦. 煤矿井下采区地震勘探技术现状与思考[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 101-106.
- [23] 李庆忠. 石油物探领域的创新意识与求实精神[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(6): 995-1011.
- [24] 重庆地质仪器厂. DZQ48/24D/12A高分辨率地震仪(浅层地震仪)[J]. 地质装备, 2006, 7(5): 36.
- [25] 杨德义, 赵 锴, 王 惠. 煤矿三维地震勘探技术发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(6): 42-48.
- [26] 吴铁军. 节点数据采集系统数字地震仪[J]. 石油仪器, 2011, 25(1): 51-54.
- [27] INOVA Corporation. Hawk SN11 Recording System [DB/OL]. (2011-09-20) [2013-01-06]. <http://www.inovageo.com>.
- [28] 郭 建, 刘光鼎. 无缆存储式数字地震仪的现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1540-1549.
- [29] Sercel Corporation. Unite Cable-free Sismic Acquisition [DB/OL]. (2011-05-15) [2013-01-06]. <http://www.sercel.com>.
- [30] 董书宁. 煤矿安全高效生产地质保障技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(3): 1-5.