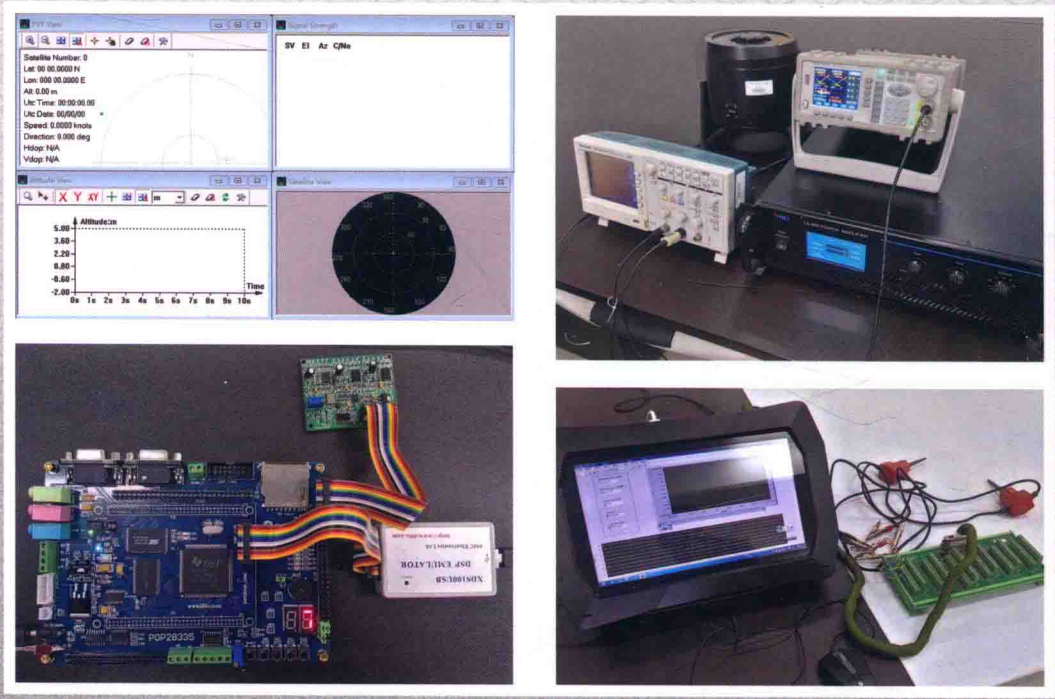


河北省高等学校科学技术研究项目（编号：QN2015055）
河北省人才工程培养经费资助科研项目（编号：A201500119） 联合资助
河北地质大学学术著作出版基金

无线地震勘探仪器 关键技术研究

李明亮 亢俊健 著



地质出版社

河北省高等学校科学技术研究项目 (编号: QN2015055)

河北省人才工程培养经费资助科研项目 (编号: A201500119) 联合资助

河北地质大学学术著作出版基金

无线地震勘探仪器关键技术研究

李明亮 亢俊健 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是作者及项目组成员 20 年来从事地震勘探仪器维修、升级及新产品研发过程中的科研成果结晶。全书围绕“无线地震勘探仪器关键技术”这个主题,在继承前人有关地震勘探仪器方法及其应用的基础上,从工程角度出发,力求深入浅出地阐述地震勘探仪器的各项关键技术。全书共分为 7 章,内容包括:地震勘探仪器概论,无线地震勘探仪器现状,三项关键技术:MEMS 检波器、采集站定位与授时、无线组网与传输等,基于 LabVIEW 的地震勘探仪器,基于 4G 移动通信的无线地震勘探仪器等。

本书可供地球探测与信息技术、矿产资源普查与勘探、地质工程等专业技术人员和研究人员阅读,也可以作为高等院校相关专业研究生与本科生的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

无线地震勘探仪器关键技术研究 / 李明亮等著. —
北京:地质出版社,2017.6

ISBN 978-7-116-10447-1

I. ①无… II. ①李… III. ①地震勘探-地质勘探仪
器-研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 159300 号

WUXIAN DIZHEN KANTAN YIQI GUANJIAN JISHU YANJIU

责任编辑:柳 青

责任校对:王 瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554632(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:8.5

字 数:210 千字

版 次:2017 年 6 月北京第 1 版

印 次:2017 年 6 月北京第 1 次印刷

定 价:38.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-10447-1



(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

随着国家经济的快速发展,对能源、矿产需求的缺口也随之加大,地震勘探法是目前最主要的能源、矿产勘探方法。我国在地震仪器投入方面同国外相比差距较大,但国外仪器价格昂贵,维修困难,因此研究具有自主知识产权的地震勘探仪器具有重要的意义。

随着电子信息技术、集成电路技术、计算机技术、无线通信技术以及 GPS 定位和授时技术的不断发展,地震勘探仪器也在不断地更新换代。尤其是无线地震勘探技术的出现,成功地解决了传统地震勘探仪设备重、受勘探地形限制、传输精度低和传输距离短等诸多弊端,也为今后地震勘探技术的发展指明了方向。

本书是作者及项目组成员 20 年来从事地震勘探仪器维修、升级及新产品研发过程中的科研成果结晶。本书的撰写和出版凝聚了项目组所有成员的汗水和心血,尤其是河北地质大学地震勘探仪器研究团队的奠基人亢俊健教授和刘泰峰教授,他们孜孜以求不断创新的学术精神、科学严谨的治学态度、一丝不苟的工作作风和无私忘我的奉献精神,为本书的完成打下了良好的基础。

本书围绕“无线地震勘探仪器关键技术”这个主题,在继承前人地震勘探仪器方法及其应用的基础上,从工程角度出发,力求深入浅出地阐述地震勘探仪器的各项关键技术。

第一章和第二章由亢俊健、李明亮编写,介绍了地震勘探仪器的发展历程、国内外进展情况,阐述无线地震勘探仪器的现状及存在的问题;第三章由李明亮编写,重点介绍无线地震勘探仪器中 MEMS 检波器的原理、测试及选型;第四章由亢俊健编写,重点分析了无线地震勘探仪器中采集站的定位和授时问题,提出新的高精度定位授时方法;第五章由李明亮编写,重点分析了在无线地震勘探仪器中的无线组网手段及基本方法;第六章由李明亮编写,重点研究了基于 LabVIEW 的地震勘探仪器原理、开发过程及基本应用;第七章由李明亮编写,重点分析了基于 4G 移动通信的无线地震勘探仪器的架构及核心模块实现。整篇书稿由亢俊健和李明亮统一编审。

作者感谢所有的合作者们,在本书中大量地引用了他们的工作成果。他们包括项目组成员:亢俊建、刘泰峰、王广祥、张生元、刘强、王远、孙大鹏、李洪刚、李婧

婷、王军芬；为本书文稿整理和图件绘制的硕士研究生：李树鹏、肖震霞、高静、梅亚斌、袁建民、李雪晴等。

在本书的撰写过程中，参阅了大量参考文献，同时也得到了多名业内专家的指导。在此对参考文献作者和指导专家一并表示衷心感谢！

本书涉及的内容广泛，由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者和同行批评指正。

作 者
2017 年 4 月

目 录

前 言

第 1 章 地震勘探仪器概论	(1)
1.1 地震勘探方法	(1)
1.2 地震勘探仪器起源及进展	(1)
1.3 数字地震勘探仪器	(3)
1.4 地震勘探仪器发展趋势	(4)
1.4.1 地震勘探仪器升级换代需求	(4)
1.4.2 地震勘探仪器总体发展方向	(5)
1.4.3 地震勘探仪器具体发展方向	(6)
第 2 章 无线地震仪器现状	(8)
2.1 无线地震勘探仪器概述	(8)
2.1.1 行业及技术需求	(8)
2.1.2 无线地震勘探仪器发展	(9)
2.1.3 机遇及挑战	(10)
2.2 国内外无线地震勘探仪器现状	(11)
第 3 章 MEMS 检波器关键技术	(13)
3.1 地震检波器概述	(13)
3.1.1 电动式地震检波器	(13)
3.1.2 压电式地震检波器	(15)
3.1.3 涡流式地震检波器	(15)
3.1.4 MEMS 地震检波器	(15)
3.2 平面电极型 MEMS 电化学地震传感器	(17)
3.2.1 结构设计	(17)
3.2.2 结构参数仿真与优化	(18)
3.2.3 性能测试	(19)
3.3 MEMS 检波器性能测试及选型	(21)
3.3.1 测试系统组成	(21)
3.3.2 测试系统标定	(22)
3.3.3 检波器性能比较及选型	(27)
第 4 章 采集站定位授时关键技术	(33)
4.1 采集站 GPS 定位技术	(33)
4.1.1 静校正与 GPS 高程数据	(34)

4.1.2	高程数据获取方式	(35)
4.1.3	位置数据精度衡量标准	(37)
4.2	GPS - OEM 板定位精度	(38)
4.2.1	CC50 - BG GPS 模块	(38)
4.2.2	GPS 模块定位精度分析	(42)
4.3	GPS - OEM 板差分定位精度分析	(50)
4.3.1	差分系统硬件	(50)
4.3.2	差分系统软件工作流程	(51)
4.3.3	实验与精度分析	(57)
4.4	GPS 精确授时技术	(57)
4.4.1	系统总体结构	(58)
4.4.2	精确时间测量原理	(59)
4.4.3	授时功能的触发机制	(60)
4.4.4	系统集成测试	(62)
4.4.5	时差估计结果与分析	(65)
4.5	基于北斗系统的授时	(67)
4.5.1	授时原理	(67)
4.5.2	授时解算	(67)
4.5.3	授时接收机的结构设计	(68)
4.5.4	授时性能测试	(71)
第5章	无线组网与传输关键技术	(73)
5.1	无线传输与通信技术	(73)
5.1.1	甚高频	(73)
5.1.2	蓝牙	(73)
5.1.3	射频识别 RFID 与近场通信 NFC	(74)
5.1.4	ZigBee	(74)
5.1.5	WiFi、MeshWiFi、TSCH	(75)
5.2	ZigBee 无线自组网技术	(75)
5.2.1	ZigBee 网络拓扑结构	(75)
5.2.2	ZigBee 网络组建	(76)
5.3	WiFi 无线自组网关键技术	(81)
5.4	4G 无线自组网关键技术	(82)
第6章	基于 LabVIEW 的地震勘查仪器	(83)
6.1	虚拟仪器概述	(83)
6.2	仪器总体设计	(84)
6.2.1	仪器架构	(84)
6.2.2	总线方案的选择	(84)
6.2.3	硬件系统设计	(84)
6.2.4	软件设计方案	(85)

6.3 仪器硬件系统	(86)
6.3.1 技术指标	(86)
6.3.2 数据采集模块	(86)
6.3.3 AMC4321D 数据采集模块	(87)
6.4 接线方式选择	(89)
6.5 采集系统软件设计	(90)
6.5.1 系统软件架构	(91)
6.5.2 数据采集流程	(91)
6.5.3 数据处理与分析模块	(93)
6.5.4 自检模块	(97)
6.5.5 数据存储模块	(97)
6.6 仪器设计与实现	(98)
6.6.1 硬件平台搭建	(98)
6.6.2 软件功能模块测试	(98)
6.6.3 仪器调试运行与结果	(101)
第7章 基于4G通信的无线地震勘探仪器	(103)
7.1 概述	(103)
7.2 4G 通信技术	(104)
7.2.1 移动通信发展过程	(105)
7.2.2 4G 通信系统关键技术	(105)
7.2.3 LTE 网络系统	(107)
7.2.4 4G 通信模块	(109)
7.3 基站部署方法	(110)
7.3.1 10000 道的组网方式	(111)
7.3.2 扩展到 100000 道的组网方式	(111)
7.4 定位与授时技术	(113)
7.4.1 移动终端 GPS 定位技术	(113)
7.4.2 A-GPS 定位工作流程	(114)
7.4.3 GPS 授时原理	(114)
7.4.4 GPS 芯片	(114)
7.5 基于4G通信的无线地震仪	(115)
7.5.1 系统方案的优势与劣势	(115)
7.5.2 系统架构设计	(116)
7.5.3 采集站搭建	(117)
7.5.4 服务器搭建	(117)
7.5.5 服务器与采集站通信平台	(118)
7.5.6 实施中的关键技术解决方案	(122)
参考文献	(124)

第1章 地震勘探仪器概论

1.1 地震勘探方法

地震勘探方法萌芽始于1845年R. 马利特用人工激发的地震波来测量弹性波在地壳中的传播速度。

反射法地震勘探最早起源于1913年前后的R. 费森登的研究。1921年J. C. 卡彻将反射法地震勘探投入实际应用,在美国俄克拉荷马州首次记录到人工地震产生的清晰反射波,1930年通过反射法地震勘探在该地区发现了3个油田。从此,反射法进入工业应用阶段。

折射法地震勘探始于20世纪早期德国L. 明特罗普的研究;20世纪20年代,在墨西哥湾沿岸地区,利用折射法地震勘探发现很多盐丘;20世纪30年代末,苏联甘布尔采夫等对折射法做了相应的改进,可以更细致地研究波形特征。20世纪50~60年代,模拟磁带记录方式代替反射法的光点照相记录方式,因此可进行多次回放,提高了记录质量。20世纪70年代,数字磁带记录代替了模拟磁带记录方式,形成了以高速数字计算机为基础的数字记录、多次覆盖技术、地震数据处理技术相互结合的完整技术系统,大大提高了记录精度和解决地质问题的能力。

1.2 地震勘探仪器起源及进展

1880年Gray、Ewing和Milne在日本东京设计出第一台地震检波器。1889年Fouque和Levy通过摄影技术记录到地震数据。加拿大Reginald Fessenden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一个专利“定位矿体的方法及仪器”。1914年德国勘探家Ludger Mintrop研制出1台机械式地震勘探仪器,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筹建了第一个地震记录系统。

我国于1951年成立了第一个石油地震勘探队,1955年创建了第一个煤田地震勘探队。地震勘探仪器的发展可以划分为6个阶段(6代)。各代地震勘探仪器性能如表1.1所示。

(1) 第一代——光点记录地震勘探仪器

国外第一代地震勘探仪器是20世纪30~50年代出现的。1952年,我国新组建的5个地震勘探队使用的仪器除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。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勘探仪器。第一代地震勘探仪器只能做二维地震勘探,在华北、西北等地区开展折射波法、单次覆盖

反射波法测量，在寻找隐伏煤田中发挥了重要作用。

表 1.1 各代地震勘探仪性能列表

技术指标	第一代 模拟光点 地震仪	第二代 模拟磁带 地震仪	第三代 数字地震仪	第四代早期 遥测数字 地震仪	第五代 24 位遥测地震仪		第六代全数字 遥测地震仪
					408UL	IMAGE	
系统动态 范围/dB	20	40	70	102	140	120	140
瞬时动态 范围/dB	—	—	—	84	130	120	130
带道能力 (2ms)	24 道以下	48 道以下	240 道	240 道	19200 道	3000 道 (1ms)	100000 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	—	—	16,8,4,2,1,0.5	4,2,1	4,2,1,0.5,0.25	4,2,1,0.5	4,2,1,0.5,0.25
串音/dB	—	—	80	86	130	110	130
畸变/%	—	—	0.0500	0.2500(0.075)	0.0003	0.0005	0.0003
传输速率/bps	—	—	32k	4M	8.192M	5.0M	8~50M
传输方式	—	—	有线	有线	有线	有线+无线	无线+有线
频带宽度/Hz	10 左右	15~120	3~250	1~500	3~1640	3~800	0~1640
A/D 转换	无	无	15 位 (14+符号)	15 位 (14+符号)	24 位 (23+符号)	24 位 (23+符号)	24 位
增益控制	自动增益	GGC 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	—	—	—	24,42	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) 第二代——模拟磁带记录地震勘探仪器

国外从 20 世纪 50 年代初发明了模拟磁带记录地震勘探仪器，如法国的 CGG59，AS626X，DZ663，TYPC-24 型。1970 年，煤炭科学研究院西安煤田地质研究所研制出了 TYPC-24 型磁带记录地震勘探仪器样机，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 等地震勘探仪器。1973 年，我国地震勘探仪全部升级到第二代。

(3) 第三代——数字地震勘探仪器

1971 年法国生产出 SN3x8 系列产品、美国制造出 DFS-V 数字地震勘探仪器等，核心技术与器件为集成电路模拟传输、数字记录。1980 年我国研发 MSD-1 型数字地震勘探仪器，并于 1983 年完成样机制造并投入试用。改革开放后，我国地震勘探仪器进入第三代。

(4) 第四代——早期遥测地震勘探仪器

第四代地震勘探仪器包括 SN348、SN368、OPSEIS5586、SYSTEM ONE、OPSEIS EAGLE、TELSEIS STRT、YKZ480、SK1004 等型号。这类仪器与第三代仪器不同的是主机系统通过控制“分布”在排列上的采集站来采集地震数据。简化了主机的积木式硬件结构并甩掉

了笨重的模拟大线,其采集能力和抗干扰能力都有显著提高。

(5) 第五代——24 位遥测地震勘探仪器

1991 年 ION 公司率先设计出基于 $\Delta - \Sigma$ 技术的 24 位 A/D 转换器,大幅提高了模/数转换精度,使得地震勘探仪器的动态范围达到 144dB,基本可以满足地震信号动态范围 120dB 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勘探仪器,预示着我国地震勘探仪跨入了第五代。

(6) 第 6 代——全数字遥测地震勘探仪器

2002 年,ION 公司首次研制出 MEMS 加速度检波器。以 MEMS 检波器接收为特征的全数字遥测地震勘探仪器中,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。

全数字遥测地震勘探仪器的主要特点为:①采用 MEMS 数字检波器,解决了高频信号接收问题。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。

1.3 数字地震勘探仪器

数字地震勘探仪器由地震检波器、信号放大和模数转换电路(数据采集单元)、中央记录系统三部分组成。数字地震勘探仪器按其结构不同可分为集中式、分布式和数字存储式独立地震勘探仪器。

(1) 集中式数字地震勘探仪器

将数据采集单元和中央记录系统集成到一起构成主机系统,地震检波器通过多芯电缆线(大线)将模拟信号传输至主机系统。随着道数的增多,大线会变得十分笨重以至于难以实现更多采集道数。常用的型号是 24、48、96 道等,主要用于小规模地质调查、环境物探等领域。第三代地震勘探仪器就属于集中式数字地震勘探仪器。

(2) 分布式数字地震勘探仪器

将中央记录系统和数据采集单元分离,通过地震采集站的形式,将数据采集单元模块化。地震检波器输出的信号在采集站中完成数字化,并通过电缆线或无线电通信将数据转换结果传输至中央记录系统。第四代和第五代遥测地震勘探仪器均属于分布式地震勘探仪器。分布式数字地震勘探仪器根据采集站到中央记录系统的数据传输方式不同可分为有线分布式和无线分布式数字地震勘探仪器。①有线分布式数字地震勘探仪器电缆线中传输的是纯数字信号,抗干扰能力强。电缆线内部芯数不随采集道数的增加而变化,系统最大道能力只受通信速率的约束,可以达到百道、千道、万道记录能力不等。由于以上优势,有线分布式数字地震勘探仪器广泛应用于石油、天然气、煤炭等领域的勘探,适合在陆地、沙漠、平原、丘陵、过渡带和植被浓密工区施工。其典型代表是美国 ION 公司生产的 I/O SYSTEM II、SYSTEM Four 等系统,法国 Sercel 公司生产的 SN388、408UL,以及加拿大 Geo-X 公司生产的 ARAM24 等。②无线分布式地震勘探仪器采用无线通信技术实现采集

站数据向中央记录系统的传输,数字电缆线的取消大大削减了系统的质量,提高了野外的施工效率。但由于无线电通信数据传输速率较低,难以与有线传输方式相比,而地震勘探数据量很大,因此只在特殊勘探环境如海上、湖泊、沼泽等电缆线难以铺设的工区采用。其代表性仪器是美国 FairField 公司生产的 TELSEIS STAR、BOX 仪器,法国 Sercel 公司生产的 Eagle88 等。

(3) 数字存储式独立地震勘探仪器

其典型特征是:采集站配备大容量非易失性数据存储器,野外采集到的地震数据存储在采集站内部,经过一段时间的施工后,将所有采集站集中到一起,再通过专门的数据回收设备对数据进行回收和整理。地震勘探仪器没有中央记录系统,仪器主机是数据回收与整理部件。此类仪器由于采集站本身能够存储大容量的地震数据,因而不需要对采集站的数据进行实时回收,省去了有线仪器的专用数传电缆和无线仪器中庞大的数据收集装置,并且道数不受传输速率的限制。此类仪器包括美国 ION 公司的 RSR 系统、VectorSeis SYSTEM Four、FireFly 无线系统,Refracture Technology 公司的 RefTek130-01 记录器,日本 JGI 公司的 MS-2000 独立系统等。

2005 年,ION 公司在 VectorSeis SYSTEM Four 基础上研制出 FireFly 无线全波陆地地震采集系统,该系统基于射频无线通信链接,由安装在分段拖车中的中央控制系统(包含天线、射频收发器及其控制器)、射频中继塔、远程无缆地面电子系统以及高精度手持式导航定位单元构成。其中,无缆地面电子系统由野外采集站单元(Field Station Unit, FSU)、一个三分量数字检波器和一个外接锂电池构成,只支持数字检波器,属于单站单道三分量记录结构。FSU 是 FireFly 系统的核心,内置 Flash 存储器和射频收发模块,完成数字检波器地震信号记录、存储和射频通信。系统同步依靠射频通信实现,FSU 完成数据采集任务后,被集中到在分段拖车中进行数据回收。与 VRSR2 相比,FireFly 系统新增了高精度手持式导航定位单元,实现了每个检波器位置的三维位置测量,并将位置信息存入地震数据文件头中,取代了常规地质测量以及后期的测量数据和地震数据的融合工作,极大地提高了野外工作效率。检波器的位置参数分为水平 X 分量、Y 分量和垂直 Z 分量(海拔)共 3 个分量,其中 X 和 Y 通过单点 GPS 定位测定,Z 分量则通过 LiDAR (Light Detection and Ranging) 技术实现。

1.4 地震勘探仪器发展趋势

随着地震勘探技术及方法的不断进步,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,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。

1.4.1 地震勘探仪器升级换代需求

(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 1926 年在美国俄克拉荷马州的沉积盆地上根据反射地震记录解释布置的钻孔第一

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的不断发展,以满足提高勘探精度和作业效率的要求。

(2) 地震勘探方法技术的进步对地震勘探仪器更新提出了更高要求

高密度全数字三维地震勘探概念的提出,成为万道地震勘探仪器面世的第一推手。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,今后地震勘探技术对地震勘探仪器高精度、轻便性、灵活性等方面将提出新的要求。

(3) 电子技术的进步给地震勘探仪器升级带来了发展机遇

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,是地震勘探仪发展的内在动力。伴随着超大规模集成电路以及 MEMS、FPGA 等技术发展,地震勘探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,纳米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 1.5nm 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,预计未来的地震勘探仪器将随着纳米技术的发展进入全数字纳米地震勘探仪器时代。

1.4.2 地震勘探仪器总体发展方向

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。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勘探仪器不断更新换代的内在动力。在内外动力的驱动下,预计国内地震勘探仪器会朝着以下方向发展:

(1) 超万道大型地震勘探仪器

2011 年 12 月,李庆忠院士指出目前国内几乎所有地震勘探仪器都是外国制造的。“十一五”期间,我国将大型地震勘探仪器研制列为重大专项的攻关项目,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 年东方地球物理公司与 ION 公司合资成立了 INOVA(英洛瓦)物探公司,标志着我国地震勘探仪器制造技术与世界先进技术的融合越来越紧密。预计万道地震勘探仪器将逐步在石油、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勘探仪器

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勘探仪器,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勘探仪器的主机、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。基于节点式的地震勘探仪器，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，极大地降低了地震勘探仪器设计与制造的复杂性。

1.4.3 地震勘探仪器具体发展方向

(1) 节点式单站单道采集

节点采集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 32bit 或更高。如 INVOA 公司 2012 年推出的 Fire-FlyDR31、HawkSN11 的 A/D 转换已经达到 32bit。节点式地震勘探仪器将集电源、检波器、采集站于一体，减小质量约 50% ~ 75% 的电缆部分，野外工作时只需带 1 个集成的采集站，摆放灵活，无须等待放线查道，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。

(2) 节点自存储和无线通信结合

目前，地震勘探仪器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，今后地震勘探仪器的数据通信方式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 1.1 为 Sercel 公司无线地震勘探仪器 UNITE 和有线地震勘探仪器 428XL 混合无缝地震采集。

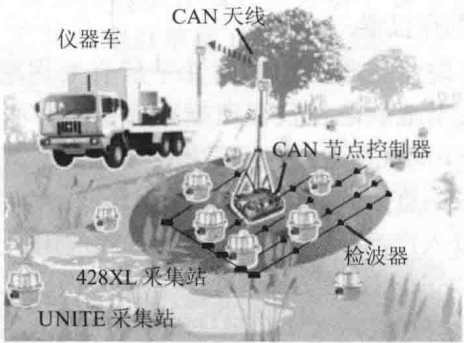


图 1.1 有线与无线通信

(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) 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的一致性和高精度的空间定位精度。

(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。

第2章 无线地震仪器现状

2.1 无线地震勘探仪器概述

2.1.1 行业及技术需求

地震勘探采集作业覆盖面大，通常需要布设万道以上的检波点，采集道数甚至达到10万至几十万道。传统的有线传输方式需要大量的电缆，相应的施工布设与回收就成了问题。日益增加的施工道数对有线仪器来说也面临严峻的挑战：施工队伍庞大，经费增加，野外排列管理困难，HSE风险增大，海量数据传输及处理技术要求更高等。有线地震勘探仪器存在的主要问题为：

1) 笨重的电缆增加了运输成本。有线遥测地震仪器需要大量的电缆来传输数据和指令。对于1万道的仪器，电缆质量可达几十吨，这将大大增加野外队的运输成本。通常电缆的运输和收放成本占陆上地震数据采集成本的20%左右。

2) 地震采集排列的布设、搬家及电缆故障排除和维修需要大量的人工。地震勘探中，电缆布设大约占用25%~50%的人力资源；而在故障的诊断和排除上，电缆部分要占到总工作量的50%~75%。

3) 人工投入量大，增加了HSE风险。无论对于公司还是个人，投入大量的人工，则意味着HSE风险的增加。特别是对于复杂地区的施工，布设笨重的电缆具有高度的危险性。

4) 电缆故障的查找与检修，耽误了生产。地震采集中，大于50%的时间在查找和解决电缆故障，这大大影响了地震采集的生产效率。随着采集站数量的增加，用于传输数据的电缆也在增加，相应地查找和解决电缆故障的时间也会增加，导致用于采集数据的时间相应减少。

5) 采集成本制约了有线采集系统道数的增加。随着采集道数的增加，所需电缆数量也迅速增加。比如对5万道以上的有线采集系统的电缆布设的管理就非常困难，导致采集成本大大提高。也可以说，采集成本制约了有线采集系统道数的增加。

6) 数据传输的带宽也制约了采集道数的增加。

7) 为减少环境噪音将导致成本增加。环境噪音可能通过电缆传输到采集站。为此，地震队采用埋置电缆的方法来减少噪音。而埋置电缆将大大增加工作量和布设成本。

随着国家对矿产资源勘查深度的不断提高以及资源勘查所需要面临的更加复杂的地质条件，地震勘探作为最重要的矿产资源勘探方式，无线地震勘探仪器的需求逐步提上了日程，主要表现为：

1) 国家对矿产资源勘查能力提高及新增矿产资源容量的需求（“十二五”及“十三

五”规划)及矿产资源勘查深度的变化(500~1200m)。

2) 矿产资源勘查环境及地面障碍物情况使现有地震勘查系统力不从心。

3) 有缆地震仪的运输摆放维护成本占数据采集成本的30%以上,施工过程中电缆故障排除、布设及回收占人工工作量的50%~75%;随着采集道数的增多,上述两项成本所占比率呈上升趋势。

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,行业对无线地震勘探仪器的需求解决已迫在眉睫。

2.1.2 无线地震勘探仪器发展

(1) 传统无线遥测地震仪

无线遥测地震仪利用无线系统发送指令和传输采集数据,地震仪器的中央控制系统与地震数据采集站点之间直接采用电台进行通信,增加了仪器应用的灵活性,排列部署更方便快捷,且降低了数据采集作业对环境的影响,更适应于地表通过较为困难的复杂地形以及海上勘探。这类仪器具有代表性的是美国 FairFiled 公司的 BOX 和法国 Sercel 公司的 Eagle88 仪器等。BOX 以最大道能力 8000、传输距离达 10km 而影响较大。

传统的无线遥测地震仪均采用窄带无线通信方式实时传输采集的地震数据,其无线系统使用射频通信技术,而不是真正意义上的网络通信技术。采用这种无线技术的仪器,主要受频率资源的限制,使其在实时采集道数上难以扩充,不能满足如今大道数、大范围数据采集的勘探作业需求,加之功耗较大,已难以适应物探对装备的需求。

(2) 无线节点仪器

近年来,无线节点仪器在勘探仪器市场占据的份额在逐步增加。无线节点仪器不使用无线技术实时传输采集的地震数据,只在必要时应用低功耗的无线技术(例如蓝牙)来进行采集点参数的配置、状态信息的监控。

最早提出并且应用于地球物理勘探的节点仪器是东方地球物理公司研发的 3S 仪器、日本 JGI 公司的 MS-2000 等。目前国内外具有代表性的有 INOVA 公司的 HAWK, GEO-SPACE 公司的 GSX/GSR, Fairfield 公司的 Z LAND 以及 Autoseis 公司的 HDR 等。这些仪器的共同特点是:

- 1) 无电缆独立式的采集站自主记录数据,本地存储。
- 2) 采集站内置高灵敏度 GPS 模块和高精度时钟源,实现精确的系统级同步采集。
- 3) 低功耗设计,内置高容量锂电池或外接电池满足长时间连续工作。
- 4) 通过激发点激发的 GPS 时间提取出每道有用记录数据。
- 5) 通过有线或无线串行接口,例如 RS485、WiFi、ZigBee 或蓝牙等近距离通信技术,辅助配置采集站的参数、回收站体状态信息和采集数据状况。

无线节点仪器的不足之处是不能在主机实时监控地震采集数据和节点状态信息,只能通过手持设备以无线方式近距离回收;对地震数据的质量分析一般都要等到把采集站收到室内后,连接到专用机架上下载每个采集站存储的地震数据,并进行道集成后才能进