

王琿.基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法研究[J].地震工程学报,2020,42(4):907-913.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.907

WANG Hui.Research on a Zigbee-Based Method for Improving Seismic Data Accuracy[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(4):907-913.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.907

基于 ZigBee 对地震勘探数据精度 提高技术的方法研究

王 琿^{1,2}

(1. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650; 2. 中山大学, 广东 广州 510275)

摘要: 针对传统地震勘探方法不能准确获取高精度勘探数据,提出基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法。采用全站仪极坐标法根据地震勘探地区地质和地表结构进行空间定位划区,利用地震勘探技术,通过分析地震波的传播方式及影响检测效果的地震分辨率因素,获取引入差分 GPS 定位模块的勘探仪器探测的地震数据;运用射线追踪技术,对地震数据中的破损数据进行检测追踪,采用专用检测设备提取破损数据,并对其修复处理;创建由 MEMS 加速度传感器和 ZigBee 模块构成的检测系统,并根据拓扑结构网络实现对地震勘探数据的质量检测,以提高地震勘探精度。根据仿真实验验证,该方法具有较高的地震勘探数据精度和有效性,可为相关工作提供较大的帮助。

关键词: ZigBee 技术; 地震勘探数据; GPS 定位; 射线追踪技术

中图分类号: TH762

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0907-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.907

Research on a Zigbee-Based Method for Improving Seismic Data Accuracy

WANG Hui^{1,2}

(1.Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

2.Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

Abstract: Considering that the traditional seismic exploration methods cannot accurately obtain high-precision exploration data, a method based on Zigbee to improve the accuracy of seismic exploration data is proposed. The polar coordinate method of a total station is used for spatial positioning and zoning according to the geology and surface structure of the seismic exploration area. The propagation mode of seismic wave and the seismic resolution factors that affect the detection effect were analyzed using an exploration instrument with a differential GPS positioning module, and the seismic data were obtained. The seismic damage data were detected and tracked using the

收稿日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71473120)

第一作者简介: 王 琿(1980-),女,河南焦作人,硕士,讲师,研究方向:工程测量技术。E-mail:wanghuiwangh@yeah.net。

ray tracing technology and were then extracted and repaired by a special detection instrument. The detection system composed of an MEMS accelerometer and Zigbee module was established, and the seismic exploration data were effectively detected according to the topological structure network, in order to improve the accuracy of seismic exploration. According to the simulation experiment, the proposed method has high accuracy and validity of seismic exploration data and can provide great help for related work.

Keywords: ZigBee technology; seismic data; GPS positioning; ray tracing technology

0 引言

当今科学发展的前提是观测,现代地球观测仪器设备都具有现代化、数字化和定量化的特点。地震勘探设备时观测的关键设施,与科学技术密不可分^[1]。地震勘探技术就是采用人工方法引发地震波,对地震波在地层中运动的规律进行分析,进而获取地震的数据。

对地震勘探数据质量进行检测,以提高数据精度,是预测地震的最佳途径之一^[2]。因此,如何提高地震勘探数据的精度,实现对地震勘探数据质量的检测是该领域需要研究的课题。目前相关学者研究出很多成果:

文献[3]提出基于滑坡监测数据的 Elman 神经网络动态预测方法,该方法可以任意精度逼近任意非线性函数的特征,并以 sigmoid 为方程的核函数,在选择隐含层数时用了试用法,通过“3 δ ”法及归一化工程实例滑坡累积位移数据,建立了 Elman 神经网络动态预测模型;文献[4]研究了噪声对煤层厚度预测精度的影响规律,提出利用波阻抗反演结果重构地震数据,对重构后的地震数据进行煤层厚度预测,提高煤层厚度预测精度,在煤层厚度预测的实际应用中表明其有一定的实用价值。但是以上两种方法不能对地震勘探破损数据进行有效提取并处理,导致检测到的地震勘探数据精度较低。文献[5]提出了一种用于海洋地震勘探系统的数据变采样率采集及自检控制模块,该模块采用一种基于锁相环的变采样率采集节点同步设计方法,实现了采样率可调节的数据采集功能,同时,该模块还实现了基于奇、偶通道控制模块的自检功能,完成了变道数采集以及系统自检。但是该方法的地震检测系统性能较差。

根据上述方法存在的问题,本文提出基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法。将勘探数据上传至无线传感网络,经过 ZigBee 检测系统对勘探数据进行质量检测,以提高地震勘探数据精度,实现对地震的预测目的。

1 基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法

1.1 差分 GPS 定位

地震勘探是由震动源的起始时间、接收时间,以拾震器与爆破点的准确距离组成的,利用 GPS 定位技术准确定位拾震器与爆破点的距离。在传统地震勘探方法的基础上,将差分 GPS 定位模块引入到勘探仪器中,实现高精度的空间自定位,差分 GPS 定位模块不仅可以提供 GPS 站点的位置信息,而且还能够提供定向信息,可以实现快速、高精度的差分 GPS 定位测量,对提高地震勘探数据精度起到了重要的辅助作用。差分 GPS 的目的是为了消除勘探仪器在获取地震勘探数据的过程中存在的伪距测量误差和载波相位测量误差,通过差分 GPS 定位,使得传感器的空间位置定位更准确,从而间接提高地震勘探数据的精度。图 1 为 GPS 组合导航实验系统。



图 1 GPS 组合导航实验系统

Fig.1 GPS integrated navigation experiment system

1.2 地震勘探数据采集

通过引入差分 GPS 定位模块的勘探仪器,利用地震勘探技术,从地震波传输方式和地震分辨率两个方面分析,从而获取勘探器探测的地震数据。由于在地震勘探中,地质调查是地震工程采集数据的基础,想要完成大规模的现场采集,不仅工作量强度

大,人员增多、工作效率低、作业时间长,而且控制精度掌握不准确。而遥感技术能够对勘探地区的特征、属性和相关信息进行线性测量,如:构造形式、地形特征、地标类型和植被发育状态。利用全站仪极坐标法根据地震勘探地区地质和地表结构进行空间定位划区,从而提高测量数据的精度和工作效率。

地震勘探技术因其具有检测精确度高、识别分辨率高和探测深度大等特点,已经成为地震勘探中的最有效、最常用的方法。目前地震勘探过程中,主要采用反射波的方法^[6]。在对地震波进行勘探分析时,应该清楚的是,只有第一次反射的地震波才有意义,其余的反射波均为干扰波。地震波具体传播规律如图 2。

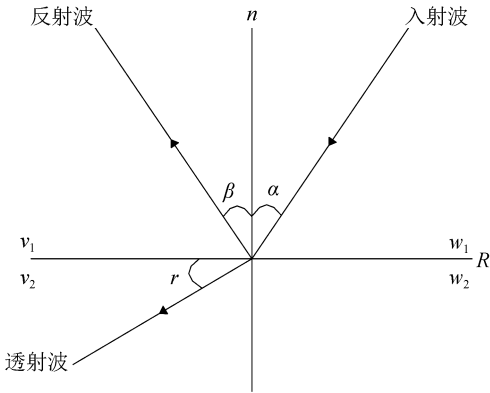


图 2 反射波的传播示意图

Fig.2 Propagation diagram of reflected wave

通过图 2 可知,当地震波传输到两种介质 w_1 、 w_2 的分界面 R 中时,将会分割成两个部分,一部分返回到 w_1 中,即反射波,另一个部分会直接传输到 w_2 中,即透射波或折射波。

这时入射线、反射线和透射线与分界面 R 的夹角由 α 、 β 和 γ 进行表示。其中这几个角之间都存在同样的关系——斯奈尔定律,具体表达式为:

$$\frac{\sin\alpha}{v_1} = \frac{\sin\beta}{v_1} = \frac{\sin\gamma}{v_2} = P \tag{1}$$

可直接看出, α 与反射角相同,透射角 γ 的度数由介质 w_1 和 w_2 的波速 v_1/v_2 决定的。

上述是采用反射波的方法对地震反射波传输方式进行描述的,利用勘探器对地震进行勘探时,地震分辨率也是影响勘探数据精度的一大因素。由此,通过分析地震分辨率,获取地震勘探数据。地震分辨率能够区分独特地质特征的能力,可分为两种:水平分辨率和竖向分辨率^[7]。

(1) 水平分辨率

水平分辨率也叫空间分辨率,是地震沿着横向

传播,能够对最小地质体的宽度进行分辨的能力。地震波自 O 点,以球形运动方式向速度为入射线、反射线和透射线与分界面 R 的夹角的介质中运动,在某个时刻地震波前面的半径为 h ,与分界面交于 O_1 点, O 点只能对某一个点的反射进行接收^[8-10]。地震波继续向前运动 $T/4$ 时间,与分界面交于 C 和 C_1 点,地震波前面的半径由 h 变为 OC 。将 CC_1 区域设定为生成反射波的有效分界面,这样的现象称为第一菲涅尔带,如图 3 所示。

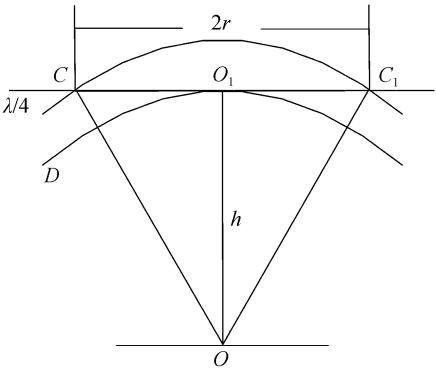


图 3 第一菲涅尔带示意图

Fig.3 Schematic diagram of the first Fresnel zone

当地下地质体的宽度等于第一菲涅尔带,或者大于第一菲涅尔带,才能对地质体是否存在进行判断^[11]。将第一菲涅尔带的半径设为 r , t_0 表示射线 OO_1 双程旅行,那么根据图 3 可以得出:

$$r = \sqrt{OC^2 - OO_1^2} = \sqrt{\left(h + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - h^2} = \sqrt{\frac{h\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \tag{2}$$

由此可看出,水平方向分辨能力可由反射波的频率、地层深度决定。

(2) 竖向分辨率

竖向分辨率也被称为时间分辨率,值地震记录沿着竖向能够分辨的最薄地层深度。

对水平分辨率和竖向分辨率进行定量计算,将分辨率设定为子波主极值的平方和能量之间的比值,零相位子波的表达式为:

$$R_w = \frac{a_m^2}{\int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt} = \frac{a_m^2}{E} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} A(f) df\right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} A^2(f) df} \tag{3}$$

式中: $A^2(f)$ 表示子波的振幅谱; a_m^2 表示子波中的振幅最大值, E 表示子波的总能量。

在整个含有噪声的过程中,当两个地震道地震数据相同,噪声之间不存在任何关系时,并且地震数据和噪声之间也没有关系,那么其中一个地震道的

功率谱可以由地震勘探数据和噪声的功率谱相加而得,而两个地震道的功率谱就可以代表地震勘探数据的功率谱。利用下式可对功率谱进行估算:

$$R_w = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} [S^2(f) + N^2(f)] df} = \frac{a_m^2}{E} \left(1 + \frac{1}{r^2} \right)^{-1} = R_w \left(1 + \frac{1}{r^2} \right)^{-1} \tag{4}$$

式中: $S^2(f)$ 和 $N^2(f)$ 分别表示地震数据和噪声的功率谱; a_m 表示地震数据的最大振幅; r^2 表示信噪比(这里为地震数据和噪声的总能量比)在理想无噪声干扰的情况下,则:

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} A(f) df \right]^2 > \int_{-\infty}^{\infty} A^2(f) df \tag{5}$$

因此,在理想状态下,设定的分辨率 E 总是比1大。当含有噪声干扰时,分辨率就会比上述估计值小^[12]。

1.3 破损数据修复处理

在上述过程中,由于采集到的地震勘探数据会存在破损数据,需要对破损数据进行修复处理,进一步提高地震勘探数据精度。运用射线追踪技术,对破损数据进行检测追踪,用专用检测设备提取破损数据。计算与网格中心点相应的检波器的走时,并对地震勘探数据按照走时,在时间轴上进行反向平移,同时将这个经过平移的地震勘探数据线叠加在一起,可以得到经过叠加后网格的数据线,若 (x_i, y_i, z_i) 表示第 i 个网格中心点坐标, t_{ij} 表示地震波从第 i 个网格中心点运动到第 j 个勘探器勘探所用的时间,勘探器勘探到的地震波场数据表示为 $A_i = \{a_i, a_2, \dots, a_n\}$,时间窗长度表示为 n ^[13]。那么第 i 个网格中心点与所有勘探器地震记录经过偏移后,经过叠加提取破损数据 $E(x_i, y_i, z_i, t)$ 的计算公式为:

$$E(x_i, y_i, z_i, t) = \sum_{j=1}^M a_{j(t-t_{ij})}^2 A_i n \tag{6}$$

式中: j 表示勘探器的序号; M 表示勘探器数量; $a_{j(t-t_{ij})}^2$ 表示第 j 个勘探器在 $t-t_{ij}$ 时刻的破损点。分析所有在网格中的中心点,在整个目标区域内,可得到一个破损数据组 (x, y, z, t) , x, y, z 分别与网格中心点序号相呼应,破损数据组中的各个数值分别代表不同网格中心点在不同时间的振幅叠加结果^[14-15],根据上式,对提取到的破损数据进行修复处理,表达式为:

$$\text{Source}(x_i, y_i, z_i, t) = \arg \max_{i \in I} (E(x_i, y_i, z_i, t)) \tag{7}$$

1.4 基于 ZigBee 的地震勘探数据质量检测

ZigBee 技术是一种短距离、低功耗的无线通信技术,现代通信网络 ZigBee 的加入之后,能够快速的传输地震勘探数据,使爆破组工作效率得到提高,间接的提高了地震勘探数据精度。采用 ZigBee 无线模块将地震勘探数据进行实时传输,地震勘探数据传输的整体框架如图 4 所示。

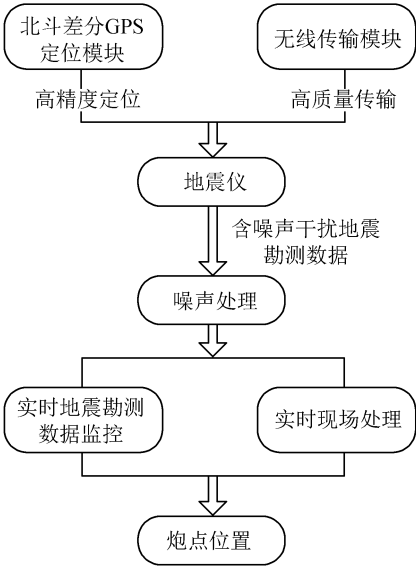


图 4 地震勘探数据传输的具体结构
Fig.4 Specific structure of data transmission in seismic exploration

针对地震勘探数据,创建出一个基于 ZigBee 的数据质量检测系统,该系统由地震波的检拾、微处理器、ZigBee 模块和电源四个部分构成的,具体结构如图 5 所示。

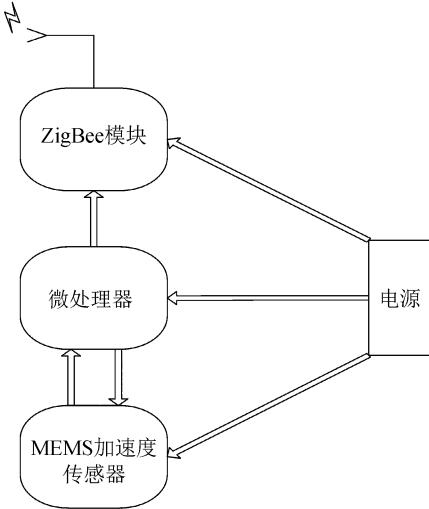


图 5 ZigBee 地震勘探数据质量检测系统
Fig.5 ZigBee-based seismic exploration data quality detection system

该 ZigBee 质量检测系统通过 MEMS 加速度计对地震波进行采集,并将电源内电压信号转换成数据输出出去,经过微处理器部分将数据的格式和阈值进行判定,最后采用 ZigBee 无线模块对数据进行传输。ZigBee 无线模块需要对网络进行组合,并对数据进行传输,组合的网络包含协调器、路由器和终端节点三种设备,该网络中的节点可将地震勘探数据传输到相应的协调器,协调器将地震勘探数据进行汇总,并将汇总结果上传到汇集器,然后采用网络技术将勘探数据输送到管理数据库。同时管理终端也可以分配系统的配置参数。

其中无线传输网络的拓扑结构主要分星型和对等型拓扑结构,如图 6、图 7 所示。

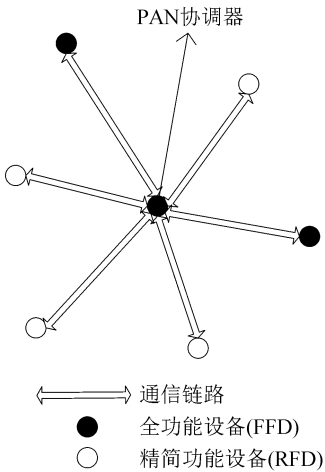


图 6 ZigBee 组网的星型拓扑结构
Fig.6 Star topology of ZigBee network

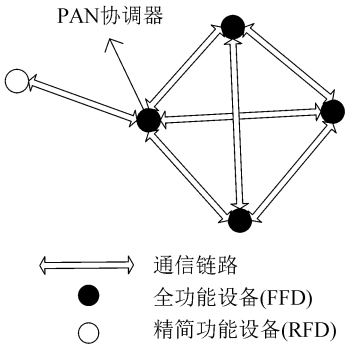


图 7 ZigBee 组网的对等型拓扑结构
Fig.7 Peer to peer topology of ZigBee network

根据图 6 可知,在星型拓扑结构中,各个环节之间相互连接通信。在设备被激活时,作为个人无线局域网(PAN)协调器,创建一个网络。该网独具居特性,特点可通过 PAN 标识符体现。当选定 PAN 后,协调器可允许其他设备加入到创建的网络中。

根据图 7 可知,在对等网络拓扑结构中,网络中的任何一个设备,只要在其他设备的通信范围内,就可实现各个设备之间的通信。在该网络中一个设备发出的信息,可经过多跳路由达到其他的设备。

通过创建的地震勘探数据质量检测的 ZigBee 系统,可实现对地震勘探数据的精度提高。

2 仿真实验证明

为了验证基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法的性能,进行一次仿真对比实验。实验运行环境为:英特尔(Intel) i3 8 350 K 酷睿四核盒装 CPU 处理器,内存为 32 GB,网络为 10/100 M 自适应以太网卡,操作系统为 Windows 7,数据库为 MATLAB。

2.1 星型拓扑结构的检测性能

采用文献[4]方法、文献[5]方法和本文方法进行对比实验,本文方法选取星型网络进行测试,选取五个 ZigBee 节点模块,构成星型拓扑结构网络,如图 6 所示,其中一个节点代表 PAN 协调器节点,其余四个节点代表终端节点。采用 JAVA 语言对测试程序进行编程,终端节点和 PAN 协调器节点之间传输 1 000 次 10 字节长度的数据,最终测试结果如表 1 所列。

表 1 不同方法的检测性能对比结果						
Table 1 Test performance comparison results of different methods						
实验指标	文献[4]方法		文献[5]方法		本文方法	
点到点距离/m	50	100	50	100	50	100
数据长度/Byte	10	10	10	10	10	10
正确数	897	803	836	751	998	989
错误数/个	92	172	154	240	2	10
误包率/%	0.092	0.172	0.154	0.24	0.002	0.01
丢包数/个	11	20	10	9	0	1
丢包率/%	0.011	0.02	0.01	0.009	0	0.001

由表 1 可知:采用本文方法的星型拓扑结构网络进行测试,数据传输的准确率明显比其他两种方法高。但是由于采用星型网络进行数据传输,会存在一定程度的频率干扰,协调器节点控制复杂度增加,这样就会导致数据检测的误差,通过分析表 1 的实验结果来看,本文方法星型拓扑结构网络存在的误差还是可以接受的,且比其他两种方法的错误率要低。由此可说明本文方法检测到的地震勘探数据精度较高,是因为本文利用射线追踪技术,对地震数据中的破损数据进行检测追踪,采用专用检测设备提取破损数据,并对其进行修复处理,提高了数据精度。

2.2 基于 ZigBee 的地震检测系统性能测试

将地震仪及其他勘探设备配置完成后,在实验环境中,对检测系统的性能进行检测。将检波器至于地面上,用硬胶锤敲击地面 3 次,第一次在 0.5 s

左右,第二次在 1.3 s 左右,最后一次在 2.5 s 左右,用于产生震源波,采用上述三种方法对震源波进行勘探,并对勘探数据进行检测,将最终得到的结果进行对比,对比结果如图 8 所示。

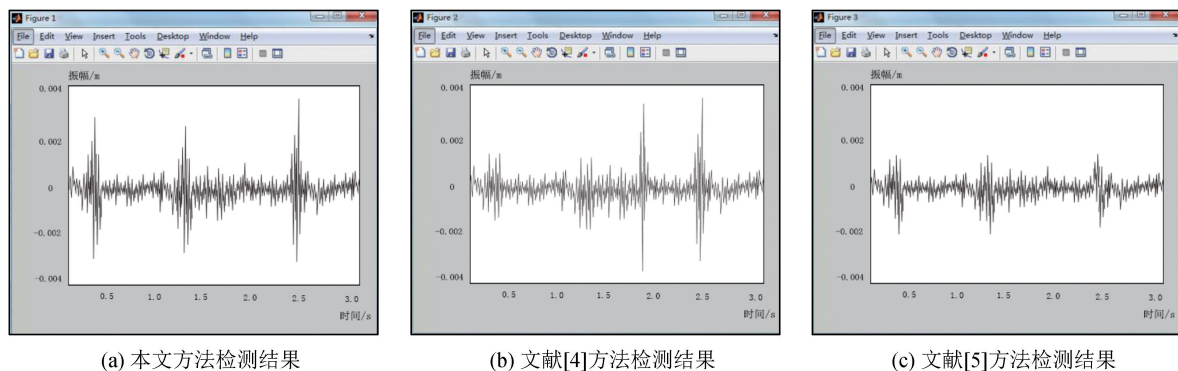


图 8 不同方法的检测结果

Fig.8 Test results of different methods

通过分析图 8 可知:本文检测方法能够在准确的时间内,检测出震源波,并且比其他两种方法的检测结果更明显。文献[4]方法只检测到两次敲击,而文献[5]方法索然能够检测出三次数据,但是该方法的检测结果不明显。由此可说明本文方法具有较好的检测性能。

3 结语

ZigBee 技术是近几年来新型通讯技术,具有低能耗、高精度等优势。将其运用到地震勘探数据检测中,可以发挥较大的作用。本文为了提高地震勘探数据的精度,提出基于 ZigBee 对地震勘探数据精度提高技术的方法,首先采用全站仪极坐标法对地震勘探地区地质和地表结构进行定位划区,通过对地震波传输方式和地震分辨率进行分析,获取勘探器探测的地震数据;接着提取地震勘探数据中的破损数据,并对其进行修复处理;然后通过 ZigBee 无线模块将地震勘探数据进行实时传输,根据拓扑结构网络检测地震勘探数据的质量,以提高地震勘探数据的精度;最后经过仿真实验可知,本文方法的地震勘探数据精度较高,且具有较好的检测性能。

现阶段研究的地震勘探数据精度提高技术,可能会因为数据传输过程中受到电磁波频率干扰,而存在误差,导致数据检测结果不是很精确,因此在接下来的研究中,着重考虑对数据传输造成干扰的因素,尽量做到整个过程中不受任何干扰,令检测结果更加精确,提升数据精度。

参考文献(References)

- [1] 张恒涛,杨卓.428XL 仪器在高科技大道数地震勘探中故障分析及探讨[J].石油管材与仪器,2017(6):98-100.
ZHANG Hengtao, YANG Zhuo. Failure Analysis and Discussion of 428XL Instruments in Seismic Exploration of High-tech and Large Seismic Trace[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017(6): 98-100.
- [2] 周松,吕尧,吕公河,等.基于压缩感知的非规则地震勘探观测系统设计与数据重建[J].石油物探,2017,56(5):617-625.
ZHOU Song, LV Yao, LÜ Gonghe, et al. Irregular Seismic Geometry Design and Data Reconstruction Based on Compressive Sensing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(5): 617-625.
- [3] 李寻昌,叶君文,李葛,等.基于滑坡监测数据的 Elman 神经网络动态预测[J].煤田地质与勘探,2018,46(3):113-120,126.
LI Xunchang, YE Junwen, LI Ge, et al. Elman Neural Network Dynamic Prediction Based on Landslide Monitoring Data[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 113-120, 126.
- [4] 孙喆.利用波阻抗反演重构地震数据提高煤层厚度预测精度[J].矿业安全与环保,2016,43(5):90-94.
SUN Zhe. Using Wave Impedance Inversion Reconstruction Seismic Data to Improve Coal Seam Thickness Prediction Accuracy [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2016, 43(5): 90-94.
- [5] 李彦超,段发阶,蒋佳佳,等.用于海洋地震勘探系统的数据变采样率采集及自检控制模块[J].传感技术学报,2016,29(9):1376-1382.
LI Yanchao, DUAN Fajie, JIANG Jiajia, et al. A Sampling Rate Adjustment and Self-Check Control Module Based on Marine Seismic Exploration System[J]. Chinese Journal of Sensors and

Actuators, 2016, 29(9): 1376-1382.

[6] 黄艳林. SVD 与 EMD 联合去噪方法在地震勘探数据处理中的研究与应用[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 323-326.

HUANG Yanlin. Application of Joint Denoising Using Empirical Mode Decomposition and Singular Value Decomposition in Seismic Data Processing [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 323-326.

[7] 李鹏, 张建清, 尹剑. 基于 jittered 采样的浅层三维地震数据处理及应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1784-1790.

LI Peng, ZHANG Jianqing, YIN Jian. Shallow Seismic Data Processing and Application Based on Jittered Sampling[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1784-1790.

[8] 郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 93-98.

HAO Xiaozhu, ZHANG Hanquan, WEI Chenglong, et al. Sea Trial for Fiber-optic Hydrophone Array Used in Marine Geophysical Exploration[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(3): 93-98.

[9] 刁瑞, 吴国忱, 崔庆辉, 等. 地面阵列式微地震监测关键技术研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 104-109.

DIAO Rui, WU Guochen, CUI Qinghui, et al. Key Techniques for Surface Array Microseismic Monitoring[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 104-109.

[10] 陈斌, 袁洁浩, 王粲, 等. 流动地磁监测数据处理流程[J]. 地震研究, 2017, 40(3): 335-339, 510-511.

CHEN Bin, YUAN Jiehao, WANG Can, et al. Data Processing Flowchart of Chinese Mobile Geomagnet Monitoring Array [J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 335-339, 510-511.

[11] 黄玲珠, 林彬华, 王士成. 测震台网实时波形数据质量自动监控[J]. 华南地震, 2017, 37(4): 20-25.

HUANG Lingzhu, LIN Binhua, WANG Shicheng. Automatic Monitoring of Real-time Waveform Data Quality of Seismic Network[J]. South China Journal of Seismology, 2017, 37(4): 20-25.

[12] 赵贤任, 王立新, 郭德顺, 等. 基于 Java 的桥梁强震动实时监测及警报系统开发与应用[J]. 华南地震, 2016, 36(2): 101-106.

ZHAO Xianren, WANG Lixin, GUO Deshun, et al. Development and Application of Strong Motion Real-time Monitoring and Alarm System for Bridges Based on Java[J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(2): 101-106.

[13] 李海军, 周严. 浅层地震勘探数据采集技术研究[J]. 仪表技术, 2016(9): 20-23.

LI Haijun, ZHOU Yan. Research on Data Acquisition Technology of Shallow Seismic Exploration [J]. Instrumentation Technology, 2016(9): 20-23.

[14] 李成艳, 张进铎, 马迅飞, 等. 基于 SeisBase 模型的地震勘探成果数据管理系统设计[J]. 计算机时代, 2017(2): 38-40, 44.

LI Chengyan, ZHANG Jinduo, MA Xunfei, et al. Design of Seismic Exploration Results Data Management System Based on Seis Base Model[J]. Computer Era, 2017(2): 38-40, 44.

[15] 尹龙, 张卫华, 程实, 等. 大规模计算机集群在地震勘探资料处理中的应用探讨[J]. 计算机时代, 2016(8): 1-3.

YIN Long, ZHANG Weihua, CHENG Shi, et al. Discussion on the Application of Large Scale Computer Cluster in Seismic Data Processing[J]. Computer Era, 2016(8): 1-3.