



推荐阅读:

[智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径](#)

[煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践](#)

[智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析](#)

[异步测时矿井人员精确定位方法](#)

[煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑](#)

[大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制](#)

[工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术](#)

[采煤机惯性导航定位动态零速修正技术](#)

[采煤机概念设计生态学模型构建与实现](#)

[5G 技术在煤矿智能化中的应用展望](#)

[煤矿机器人体系及关键技术](#)

[智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术](#)

[智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨](#)

[智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法](#)

[基于残差神经网络的矿井图像重构方法](#)



移动阅读

靳德武,赵春虎,段建华,等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2256-2264. doi:10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0309

JIN Dewu,ZHAO Chunhu,DUAN Jianhua, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2256-2264. doi:10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0309

## 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究

靳德武<sup>1,2</sup>,赵春虎<sup>1,2</sup>,段建华<sup>1</sup>,乔伟<sup>1,2,3</sup>,鲁晶津<sup>1</sup>,李鹏<sup>1</sup>,周振方<sup>1,2</sup>,李德山<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710177; 3. 西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710072)

**摘 要:**针对华北型煤田煤层底板突水监测点覆盖不全、智能化水平不高等问题,以底板“下三带”理论为基础,提出集多频连续电法充水水源监测、“井-地-孔”联合微震采动底板破坏带监测以及监测大数据智能预警为一体的煤层底板突水三维监测与智能预警技术思路。其中多频连续电法监测系统以伪随机多频序列为人工场源,利用伪随机相关辨识技术提取强噪声背景中的弱信号,采用拟高斯-牛顿法对预处理数据进行三维电阻率反演,实现对煤层底板充水水源变化过程的自动化三维监测;“井-地-孔”联合微震监测系统主要通过研制带推靠的孔中传感器及回收装置,实现微震传感器“井-地-孔”三维立体布署,采用井下有线(IEEE1588)和地面无线(GPS)时钟同步方式解决地面与井下采集设备的时钟同步问题,建立起“井-地-孔”监测数据的实时传输网络,基于偏振分析联合反演的三分量定位算法,实现采动底板破坏深度时空精细定位与实时监测;智能预警系统利用时序大数据挖掘技术与计算机深度学习技术对电法、微震多元时序监测数据进行分析 and 处理,采用指标预警和模型预警方法对监测数据空间展布和预警级别以三视热力图形式输出,实时显示煤层底板各网格的预警等级,从而形成煤矿底板水害三维监测与智能预警技术体系。最后,以河北葛泉矿东井11916采煤工作面为应用对象,采用多频连续电法监测系统、“井-地-孔”联合微震监测系统,以及基于时空监测数据的智能预警系统对煤层底板岩溶水害进行三维监测与智能预警,为我国华北型煤田煤层底板水害监测预警提供了新的技术与装备支撑。

**关键词:**底板水害;连续电法;微震;深度学习;智能预警

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)06-2256-09

## Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor

JIN Dewu<sup>1,2</sup>, ZHAO Chunhu<sup>1,2</sup>, DUAN Jianhua<sup>1</sup>, QIAO Wei<sup>1,2,3</sup>, LU Jingjin<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, ZHOU Zhenfang<sup>1,2</sup>, LI Deshan<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of incomplete coverage of monitoring points and low intelligent level of karst water disaster of coal mining in Northern China-Type coalfields, on the basis of the theory of “Down Three Zones”, a com-

收稿日期:2020-02-28 修回日期:2020-03-20 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804103);天地科技股份有限公司科技创新基金资助项目(2018-TD-MS069);陕西省自然科学基金基础研究发展计划资助项目(2019JQ-939)

作者简介:靳德武(1966—),男,陕西蓝田人,研究员,博士生导师。E-mail:jindewu@cctegxian.com

通讯作者:赵春虎(1981—),男,陕西扶风人,副研究员,博士。E-mail:zhaochunhu@cctegxian.com

prehensive monitoring and early-warning technical method was proposed, which is composed of the multi-frequency continuous electricity method monitoring source of water-inflow, and “tunnel-ground-borehole” joint micro-seismic technology monitoring of water filling channel during mining, and the intelligent early warning technology of water disaster based on monitoring data. Among them, the multi frequency continuous electrical method monitoring system takes the pseudo-random multi-frequency series as the artificial field source, uses the multi-frequency series and other detection technologies to extract the weak signal in the strong noise background, and uses the quasi Gauss-Newton method to carry on the full space three-dimensional resistivity inversion to the pre-processing data, so as to realize the automation and three-dimensional monitoring of change process of the water inflow. The “roadway-ground-borehole” joint micro-seismic monitoring system is mainly based on the three-dimensional deployment of sensors and recovery devices in the borehole, the underground wired (IEEE1588) and ground wireless (GPS) time synchronization method is used to realize the synchronization of ground and underground data collection time, then the real-time transmission network of monitoring data is established, and the three-component positioning calculation based on polarization analysis joint inversion is carried out. The method realizes the accurate location of the fracture position of the water conducted channel, solves the problems of the precise location and the real-time monitoring of the water inrush channel. The intelligent early warning system uses the time series big data mining technology and the computer deep learning technology to analyze and process the massive monitoring data from electricity and micro-seismic, and uses the index early warning and the model early warning method to predict the spatial distribution of the monitoring data and the real-time danger level. Finally, the paper took the 11916 coal face of the Gequan coal mine as the application site, and adopted multi-frequency continuous electrical monitoring system, “roadway-ground-borehole” combined micro-seismic monitoring system and intelligent early warning system to carry out three-dimensional monitoring and intelligent early warning for the karst water damage in the coal seam floor. The study results provides a technical and equipment support for the monitoring and early warning of coal seam floor water hazard.

**Key words:** floor water hazard; continuous electrical method; microseism; deep learning; intelligent early warning

煤层采动条件下水害的形成都有一个从孕育、发展到发生的演变过程,通过开发突水监测预警技术与装备,实时捕捉底板岩体中的应力-应变、水压(水位)、水温、水量、水化学等突(透)水前兆信息并进行预警<sup>[1-2]</sup>,一旦发生突水,迅速启动应急救援预案,最大限度地减少突水事故所造成的人员伤亡及经济损失。目前,国外煤矿安全生产监测预警系统多与露天采矿相关,主要包括矿震<sup>[3]</sup>、冲击地压等的监测<sup>[4-5]</sup>,未涉及矿井水害监测领域<sup>[6]</sup>。我国是煤炭开采地质条件最为复杂的国家,矿山水害监测预警主要手段有多参数传感器、微震及电法监测等。其中多参数传感器监测包括水温、水压、水位、应力及应变等参数监测,可以直接监测传感器所处位置的物性参数,靳德武等<sup>[7]</sup>开发了一套基于光纤光栅通信和传感技术的煤层底板突水监测预警系统,实现了对采煤工作面底板一定范围内的应变、水温、水压的实时监测。微震方法通过布设检波器监测采掘扰动条件下岩石破裂时产生的地震波信号,并通过定位算法对破裂位置进行定位,该方法主要用于监测顶、底板破裂情况;段建华等<sup>[8]</sup>基于 Microsoft Foundation Classes (MFC) 框架,开发了一套随采地震监测数据采集软件,该软件具备

随采地震信号的高效采集、完全存储和处理软件的实时通信功能;姜福兴<sup>[9]</sup>、孙运江<sup>[10]</sup>等对突水灾害微震监测的理论、技术与应用等进行了深入研究,证明该技术是实现突水监测预警有效的地球物理手段;李书奎<sup>[11]</sup>、赵春虎<sup>[12]</sup>等利用煤矿微震监测系统开展了工作面回采过程中底板破坏深度监测实践。电法监测是通过布设电极、向地下供电电流建立人工电场,测量在工作面顶、底板富水性变化影响下的自然电场或人工电场,根据电场的异常响应规律对工作面水害发生进行判断。刘盛东等<sup>[13-14]</sup>在煤层顶板布置钻孔开展高密度电阻率动态探测,对煤层上覆岩层的破坏情况进行了分析;王冰纯等<sup>[15]</sup>开展了回采工作面电阻率监测系统研发,利用光纤和互联网进行远程控制和数据传输,通过数据库对监测数据进行自动存储和管理,并开发了数据实时处理软件和动态成像系统。总之,矿山水害监测预警普遍存在监测手段相对单一分散,水害监测点空间覆盖不全、智能化预警水平不高等问题,与矿山生产现场准确性、有效性、实时性等方面的要求仍然存在较大差距<sup>[16-17]</sup>。

2018年9月新颁布的《煤矿防治水细则》提出了水文地质类型复杂矿井开展电法与微震耦合的水害



监测预警要求<sup>[18]</sup>,高精度的电法与微震耦合监测以及智能预警是煤矿水害监测预警技术的主要发展趋势。笔者针对华北型煤田煤层底板突水监测问题,以底板“下三带”理论为基础,采用多频连续电法监测充水水源变化与导升情况、“井-地-孔”联合微震监测采动底板破坏带演化,利用时序大数据挖掘技术对电法、微震多元时空监测数据进行分析处理,开发基于深度学习的智能预警系统,形成煤层底板水害三维监测与智能预警系统,为底板水害监测预警提供新的技术与装备支撑。

## 1 充水水源多频连续电法监测系统

工作面回采过程中,采动应力变化引起围岩体内部结构发生变化,从而导致其导电性能发生变化,当采动破坏产生的裂隙与含水层导通时,岩石电阻率会发生明显变化。因此,通过监测采动过程中工作面底板岩体的电阻率变化<sup>[19]</sup>,实现对煤层底板充水水源变化过程的监测。

多频连续电法监测系统通过地面服务器远程控制,对回采工作面底板电阻率变化进行动态监测,图1为监测系统拓扑图。其中多频连续电法监测系统由地面服务器、通讯主站、连续电法仪(图2)、隔爆兼本安电源、监测电极、监测线缆和配套的地面控制软件、数据实时处理软件等组成。系统布署过程中,监测电极布置于工作面两侧巷道中,通过监测线缆连接至监测分站,隔爆兼本安电源接入井下电网,为监测分站持续供电,监测分站通过光纤接入井下通讯主站,再通过井下工业环网和光端机连接至地面服务器,地面服务器配套安装地面控制软件和数据实时处理软件,前者用来远程控制监测分站并进行监测数据采集,后者对监测数据进行实时处理和成像。

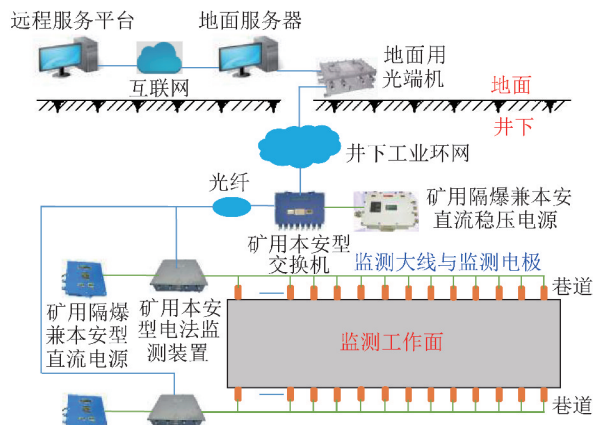


图1 多频连续电法监测系统

Fig. 1 Comprehensive diagram of multi-frequency continuous electrical resistivity monitoring system

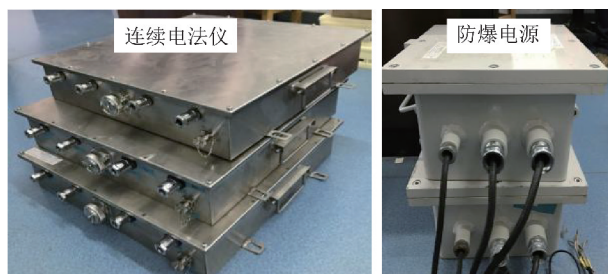


图2 多频连续电法仪与防爆电源

Fig. 2 Multi-frequency continuous electrical instrument and explosion proof power supply

多频连续电法监测系统采用基于音频电透的方法开展电阻率监测,在监测工作面上下两巷布置监测电极,如图3所示,图中圆点代表具有发射和接收自动切换功能的监测电极,一个电极发射时,对侧所有电极都进行接收,两侧电极都完成发射和接收后即完成一组监测数据的采集。工作面回采过程中,通过软件控制发射、接收电极的自动切换和电阻率变化信息的连续采集,以实现工作面围岩体富水性变化的电性异常响应,解决充水水源动态监测问题。

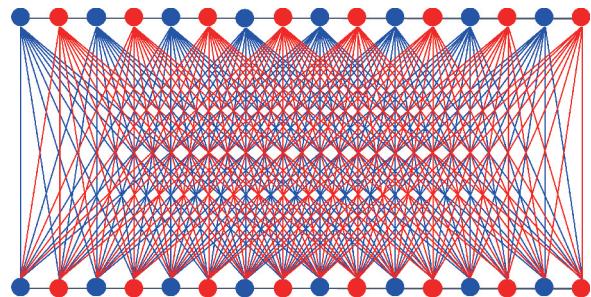


图3 多频连续电法监测系统数据采集方式示意

Fig. 3 Data Sampling method of multi-frequency continuous electrical resistivity monitoring system

其中多频连续电法监测系统发射端采用伪随机信号作为人工场源,实现了多频率信号同步发射。接收端连续采集高精度全波形数据,实现多频率信号同步接收;信号处理采用伪随机辨识技术提取电压值,使系统的小信号分辨能力达到 $5\ \mu\text{V}$ <sup>[20]</sup>,提高了煤矿井下监测环境中弱信号的识别能力。同时,利用光纤进行远程数据传输,通过数据库进行数据存储,实现了井下无人值守和地面远程控制。该系统配套了与数据库自动交互的数据实时处理软件,采用最小二乘法和小波分析技术对不同频率的电压信号进行数据预处理,利用拟高斯-牛顿法对预处理后的数据进行三维电阻率反演<sup>[21]</sup>,软件自动对反演结果进行二维切片、三维异常体提取和立体成像等操作,实现了电阻率异常区的实时动态显示。

如图4所示,在某电厂周边强电磁干扰环境下进

行了多频连续电法监测装备的抗干扰对比试验,试验以抗干扰能力强的单频矿用音频电穿透仪为标定装备,基于伪随机信号的多频连续电法监测系统(15 Hz/8 Hz),利用伪随机相关辨识技术同步提取多频点的观测值,测试装备不同频点的电压曲线与标定设备的电压曲线吻合度均较高,表明多频连续电法监测系统具备较好的抗干扰能力。

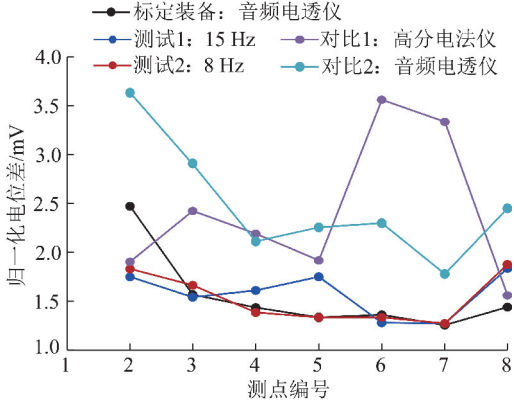


图4 多频连续电法仪抗干扰对比曲线

Fig. 4 Anti-interference comparison curves of multi-frequency continuous electrical resistivity monitoring system

## 2 底板破坏深度“井-地-孔”微震监测系统

微震监测技术是通过布置传感器排列,接收采煤时围岩破裂发生或者诱发的微小震动信号,然后利用震动信号达到不同传感器的时间差,建立空间几何关系,反演求取震源的位置、能量大小等参数,最后通过这些参数获得底板破坏深度。微震监测技术可以从空间和时间上圈定采掘活动引起的底板破坏深度的

空间范围,因此,将微震监测数据和采动导水裂隙演化有机联系起来,可实现煤层采掘过程中底板采动充水通道的动态监测<sup>[10]</sup>。

传统微震监测技术仅仅在巷道布置传感器,一般情况下观测系统近乎平面,传感器接收信号在垂直方向的时间差不大,因此,震源在垂直方向上的定位误差较大。“井(巷)-地(面)-孔(中)”联合微震监测系统(简称:井-地-孔联合微震监测系统)是传统微震监测技术在煤矿水害监测中的一项技术创新,如图5所示,位于井下巷道、孔中和地面的微震传感器将震动信号转化为电压,通过电缆传输到微震分站,地面和井下的微震分站统一基于GPS时钟对电压进行重采样,将模拟电压信号转化为数字信号,然后,通过光纤网络或者无线网络传输到地面微震主机,主机对微震信号进行处理与分析,即可获得底板采动破裂信息。

为了实现孔中监测,专门研制了带推靠可回收的孔中拾震传感器,主要由拾震传感器主体、推靠装置以及控制箱组成(图6(a),(b)),利用高电压大功率直线电机驱动柔性靠条使检波器外壳与钻孔壁紧密耦合。由图6(c)所示,通过井下标定炮测试,带推靠的孔中拾震传感器较地面与孔中不带推靠的拾震器,尾震小,余波短,与孔口传感器的波形和主频一致性更好,接收微震事件效果好。如图7所示,带推靠的孔中拾震传感器可以在地面、井巷、地面或井下钻孔同时布置,构建起“井-地-孔”一体化微震监测系统,可提高围岩破裂过程中产生的微震信号在三维空间上的定位精度。

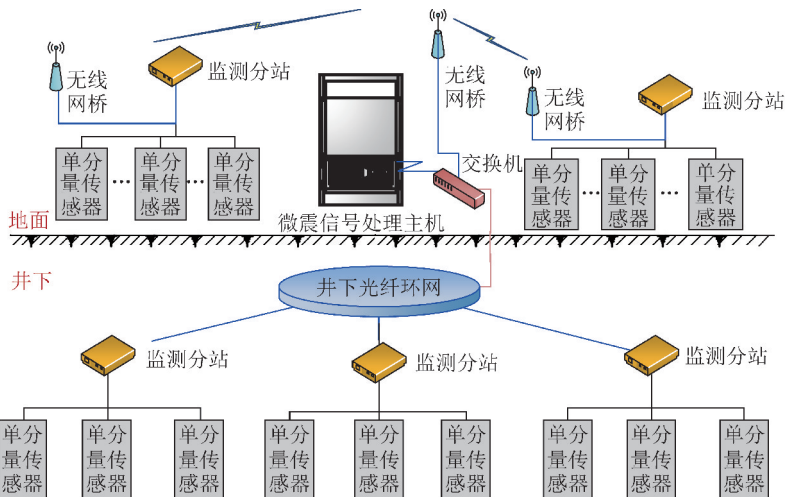


图5 井-地-孔微震监测数据传输与同步示意

Fig. 5 Schematic diagram of transmission and synchronization of microseismic monitoring in tunnel-ground-hole

为了实现井下与地面监测分站同步采集,井下分站采用 IEEE1588 协议(有线)与地面主钟同步时钟,

地面主钟采用 GPS 时间,地面监测分站也采用 GPS 时间,以此实现了地面与井下监测分站的时钟同步。



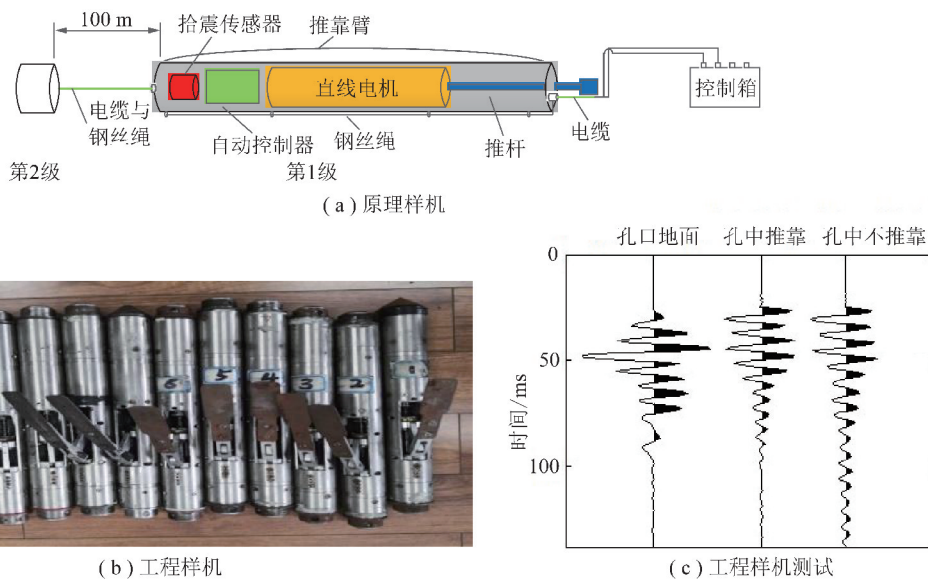


图 6 孔中拾震传感器

Fig. 6 Microseismic pickup sensor in borehole

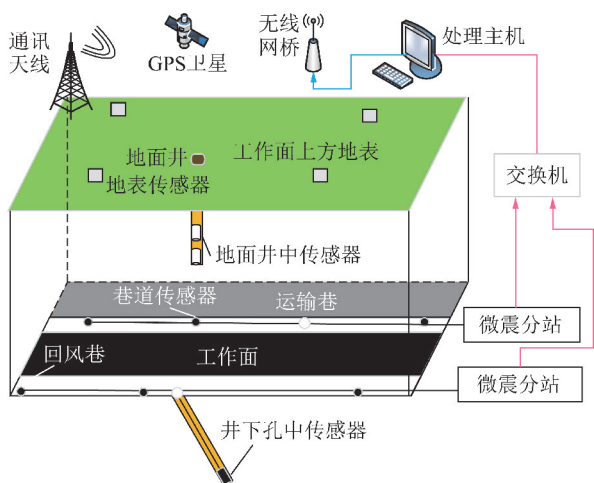


图 7 “井-地-孔”联合微震拾震器布置示意

Fig. 7 Layout diagram of “tunnel-ground-borehole” combined microseismic sensor

地面利用无线网桥、井下利用光纤构建数据传输网络,建立“井巷-地面-孔中”联合微震监测数据的实时传输。因此,“井-地-孔”联合微震系统结合破裂范围、振动能量、影响半径等属性信息实现充水通道的动态监测,解决了采动充水通道的空间精细定位问题。

### 3 时空监测大数据智能预警系统

矿井水害智能预警是煤矿防治水智能化技术的重要组成部分<sup>[22-23]</sup>,基于深度学习的水害监测时空大数据处理与智能预警系统(简称:智能预警系统)是利用时序大数据深度学习网络模型对多元时序监测数据进行分析和处理,在输入矿井水害预警初始判

据基础上,利用机器学习技术对实时监测数据进行分析处理,实时微调预警判据,同时基于多元时序数据可视化技术,将水害预警实时动态图、预警级别信息等进行综合可视化表达,从而实现水害智能动态预警。智能预警系统分为数据迁移子系统、监测数据存储模块、实时处理中心、智能预警模块和 B/S 应用端 5 部分,其体系框架如图 8 所示。

数据迁移子系统采用 Flume 进行设计实现,以流处理方式对源数据进行筛选整理,对关键数据进行采集、聚合和传输,实现监测数据的实时迁移。数据存储模块基于 Hadoop 平台设计,采用 HDFS(分布式文件存储系统)设计构建多元时序大数据存储平台,构建统一的数据存储体系,通过 MapReduce 实现大数据并行处理,同时,通过 YARN 实现资源的调度与管理,为海量数据存储提供支撑。实时处理中心采用具有较强容错能力的 Spark Streaming 框架搭建,通过流处理方式读取 HDFS 中的监测数据,实现监测数据高速处理。

智能预警模块包含预警分析和警情发布两部分。预警分析模块包括指标预警(应力应变、水温、水压等指标)、统计预警(突水系数法)和模型预警(矿井水害大数据机器学习模型)3 部分。如图 9 所示,模型预警模块采用深度学习时空序列预测方法-长短时记忆循环网络智能预警模型(LSTM),设计自适应学习策略对参数进行优化训练,结合煤层底板突水影响因素静态指标和实时监测动态指标,构建用于解决水害预警等级分类问题的智能预警模型。

智能预警过程中,系统根据机器学习策略,以“下三带”理论为基准对模型进行初始化,形成初始

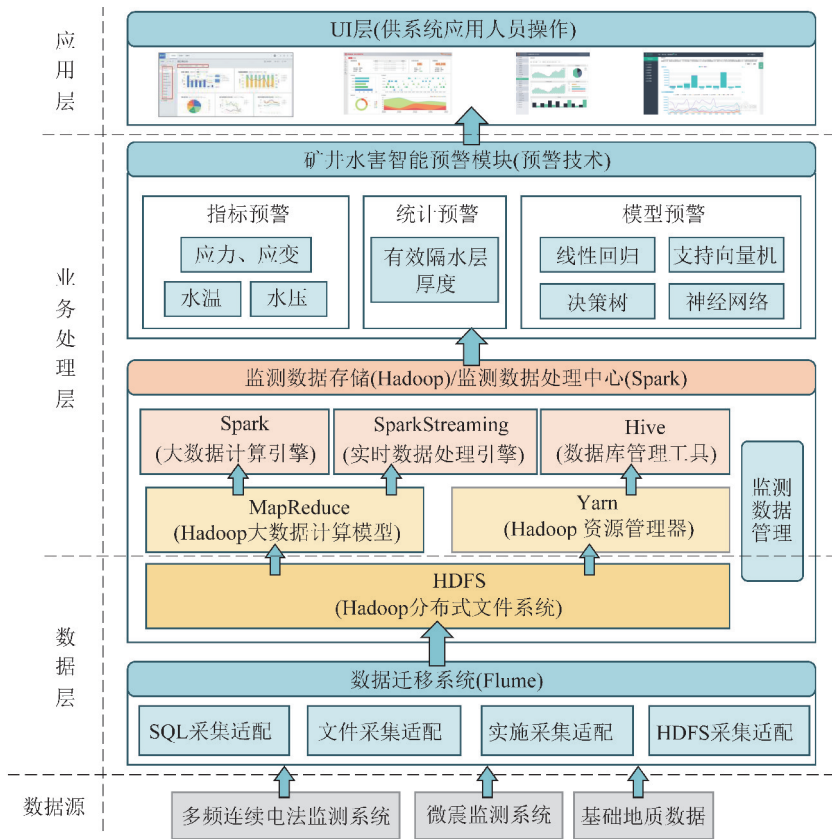


图 8 水害时空监测大数据智能预警系统架构

Fig. 8 Architecture of large data intelligent early warning system for water hazard monitoring

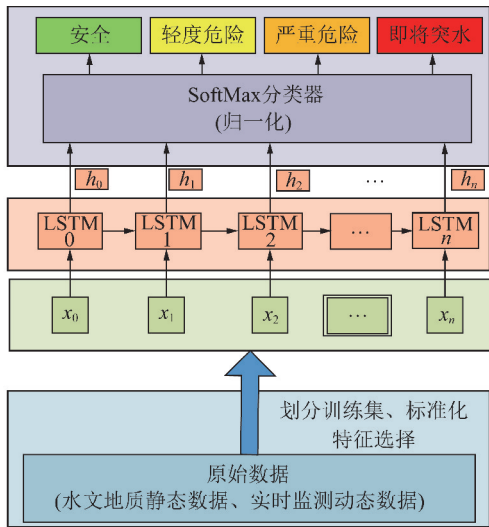


图 9 基于 LSTM 的煤矿水害智能预警模型

Fig. 9 Intelligent early warning model of coal mine water hazard based on LSTM

预警判据,将监测过程中以电法、微震监测数据作为输入变量,实际涌水事件结果作为干预输出量,对智能预警模型进行半监督分类学习训练,形成动态化、参数最优的模型预警准则;通过开源深度学习框架(Keras)和多元分类器(SoftMax)将监测数据动态划分为4个预警等级(安全、轻度危险、严重危险、临

界突水),输出突水危险性动态评价结果,并通过警情发布模块进行预警。

其中突水危险性动态评价结果,在B/S应用端通过X-Y,X-Z,Y-Z三个视角分层刻画工作面煤层的网格结构,采用不同颜色直观表达每个网格的预警等级,以三视热力图形式实时显示煤层底板各网格的预警等级,对可能发生突水危险的情况进行实时评估与智能预警。该平台具有2个特点:①实时分析:利用大数据分布式存储和并行计算技术,采用数据流方法实时处理监测数据;②智能预警:采用突水案例静态数据解决模型冷启动问题,结合实时监测动态数据分析区域动态演化,构建了长短时记忆循环网络智能预警模型(LSTM),模型参数随监测数据自适应学习调整,预测精度不断提高,实现智能动态预警。

#### 4 煤层底板水害三维监测与智能预警系统应用

##### 4.1 基本情况

河北葛泉矿东井11916工作面埋深约300 m,工作面采宽70 m,上、下巷煤层倾角约为24°,9号煤层开采标高-120~-90 m,煤层底板至下伏本溪灰岩顶

界面间距平均 19 m(最薄处仅为 14 m),本溪灰岩平均厚度 7 m,9 号煤层底板至奥灰含水层顶界面平均间距为 40 m,本溪灰岩与奥灰具有水力联系,含水层水位标高均在 +50 m 左右,9 号煤层属带压开采,其中奥灰突水系数约为 0.048,本灰突水系数约为 0.089,存在底板岩溶突水威胁。

如图 10 所示,采用三维监测与智能预警系统对 11916 工作面底板水害进行监测预警,其中在工作面上、下巷外帮浅孔埋设多频连续电法电极 120 个(间距 10 m),微震传感器分别布署于地面(间距 250 m,4 个)、巷道(垂深 1.5 m,间距 50 m,25 个)和井下孔中(垂深 20 m,大于底板破坏深度,间距 100 m,14 个)。

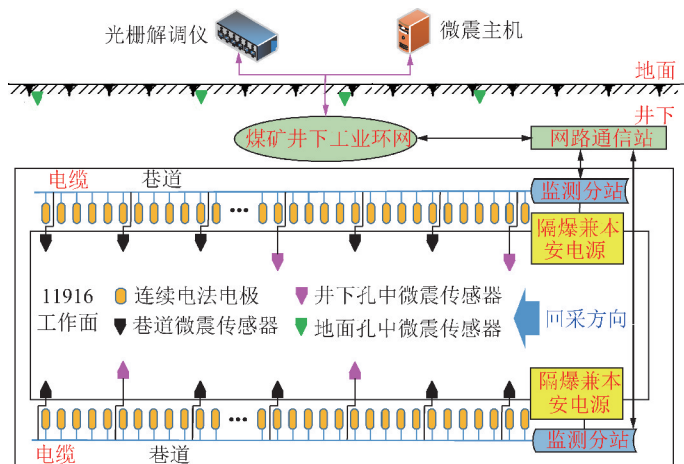


图 10 11916 工作面底板水害电法与微震监测设计

Fig. 10 Design drawing of coal seam water hazard monitoring by electrical and microseism in 11916 mining face

## 4.2 监测预警成果分析

(1)多频连续电法监测成果。图 11 为在 2019 年 9 月 8 日至 10 日工作面回采期间多频连续电法的电阻率垂向剖面图。连续电法监测成果显示,从 9 月 9 日开始工作面底板电阻率发生显著变化,并且在回采线后方约 15 m 的 34~38 号电极之间,煤层底板下方 10~30 m 深度(本溪灰岩)出现显著低阻异常,9 月 10 日开始该低阻异常有增强趋势,随着工作面推进底板低阻异常区有逐渐汇聚和向上运移的趋势,说明在 34~38 号电极之间采空区底板水害威胁加剧。

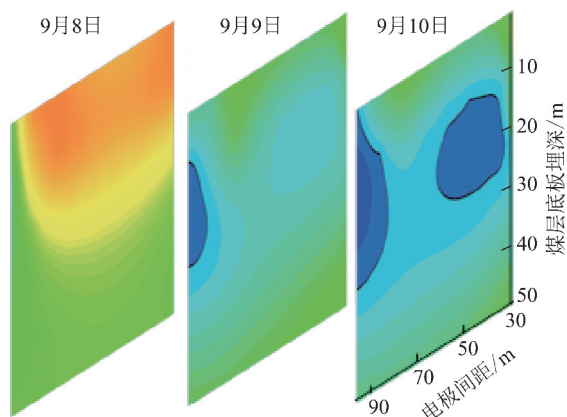


图 11 35 号电极间电阻率监测垂向剖面

Fig. 11 Vertical profile of resistivity monitoring between No. 35 electrodes

(2)井巷-地面-钻孔微震监测成果。图 12 为 2019 年 9 月 34~38 号电法电极之间煤层底板微震

事件分布情况。微震监测成果显示,该区段共接收到微震事件 358 个,大量的微震事件集中在 9 号煤层底板以下垂深 0~15 m 区段内(280 个),约占事件总数的 78%。9 月 8 日至 12 日微震事件已延伸至本溪组含水层内部,微震事件 45 个,表明采动导水裂隙局部沟通本溪灰岩。

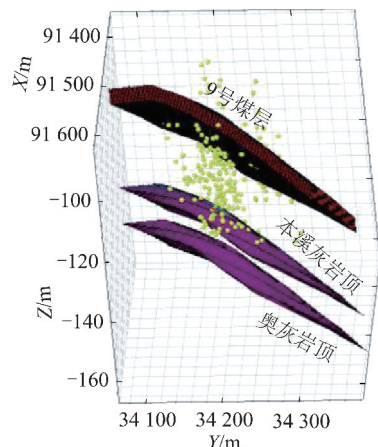


图 12 11916 工作面“井-地-孔”联合微震监测

Fig. 12 “Tunnel-ground-borehole” joint microseismic monitoring results in 11916 mining face

(3)智能预警。图 13 为智能预警系统在 9 月 8 日至 10 日针对采掘区域的突水危险性预警记录,图 14 为该区突水危险性热力分布图。9 月 10 日在回采线后方约 15 m 煤层底板下方 10~30 m 深度随着低阻异常的增强,以及底板破坏的加深,智能系统进行了



突水危险性预警。据矿井水文观测台账显示,该工作面9月10日至12日在采空区内的预警区段周围发生了明显的底板出水过程,水量为 $2 \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$ ,与预警结果基本一致。

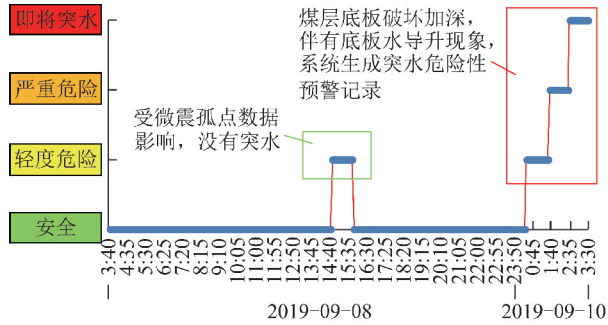


图13 水害预警记录分析

Fig. 13 Analysis of early warning records of water hazard

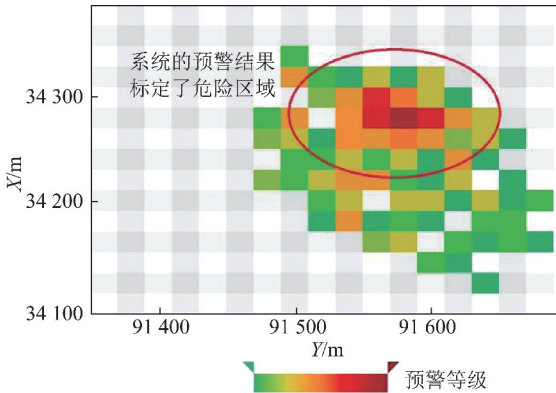


图14 水害监测数据三视热力( $X$ - $Y$ 平面视角)

Fig. 14 Comparison of three view thermodynamic diagram of water hazard monitoring data( $X$ - $Y$  Plan)

## 5 结论

(1) 充水水源多频连续电法监测系统采用伪随机多频序列人工场源,通过控制软件实现发射、接收电极的自动切换和连续采集,利用伪随机相关辨识技术提取强噪声背景中的弱信号、拟高斯-牛顿法对预处理后的数据进行三维电阻率反演,通过监测与实时反演工作面采动过程中的底板岩体的电阻率变化,实现对煤层底板充水水源变化过程的自动化监测。

(2) 充水通道“井巷-地面-孔中”联合微震监测系统主要通过研制带推靠的孔中传感器与回收装置,实现微震拾震器井-地-孔三维立体布署。采用有线(IEEE1588)和无线(GPS)时钟同步方式实现地面与井下微震采集设备的时钟同步,建立“井-地-孔”监测数据的实时传输网络,利用走时和偏振分析联合反演的三分量定位算法,对导(突)水通道破裂位置准确定位,结合破裂范围、振动能量、影响半径等属性信息实现突水通道的动态监测,解决采动充水通道时

空定位问题。

(3) 基于深度学习的水害监测时空大数据处理与智能预警系统,利用时序大数据挖掘技术对电法、微震多元时序监测数据进行深入分析和处理,采用指标预警和模型预警方法,对监测数据空间展布和预警级别以三视热力图的形式实时显示煤层底板各网格的预警等级,其中以“下三带”理论为基准形成初始预警判据,监测过程中以电法、微震监测数据作为输入变量,实际涌水事件结果作为干预输出量,对智能预警模型进行半监督分类学习训练,形成动态化、参数最优的模型预警准则,实现矿井底板水害的智能预警。

## 参考文献(References):

- [1] 靳德武. 煤层底板突水灾害实时监测预警技术基础研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.  
JIN Dewu. Basic research on real-time monitoring and early warning technology of water inrush from coal seam floor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [2] JIN Dewu, ZHENG Gang, LIU Zaibin, et al. Real-time monitoring and early warning techniques of water inrush through coal floor[J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2011, 3: 37-46.
- [3] GE Maochen. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(8): 44-56.
- [4] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 83-96.  
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: Present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83-96.
- [5] 陶志刚, 孟祥臻, 马成荣, 等. 南芬露天采场楔形滑坡机理及滑动力监测预警分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3149-3158.  
TAO Zhigang, MENG Xiangzhen, MA Chengrong, et al. Analysis of wedge-shaped landslide mechanism and sliding force monitoring warning in Nanfen open pit iron mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3149-3158.
- [6] HARTEIS S P, DOLINAR D R. Water and slurry bulkheads in underground coal mines: Design, monitoring and safety concerns[J]. Mining Engineering, 2006, 58(12): 41-47.
- [7] 靳德武, 刘英锋, 冯宏, 等. 煤层底板突水监测预警系统的开发及应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11): 14-17.  
JIN Dewu, LIU Yingfeng, FENG Hong, et al. Development and application of monitoring and early warning system to seam floor water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 14-17.
- [8] 段建华, 王云宏, 王保利. 随采地震监测数据采集控制软件开发[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 35-40.  
DUAN Jianhua, WANG Yunhong, WANG Baoli. Development of data acquisition and control software for seismic monitoring with mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 35-40.
- [9] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1938.

- JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technology in coal mine water inrush monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1938.
- [10] 孙运江, 左建平, 李玉宝, 等. 邢东矿深部带压开采导水裂隙带微震监测及突水机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2335-2342.
- SUN Yunjiang, ZUO Jianping, LI Yubao, et al. Microseismic monitoring and water inrush mechanism analysis of water-conducting fracture zone in deep mining under pressure in Xingdong Mine[J]. Geotechnical Mechanics, 2017, 38(8): 2335-2342.
- [11] 李书奎, 张连福, 张少峰, 等. 微震监测技术在煤层底板突水防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(5): 94-96.
- LI Shukui, ZHANG Lianfu, ZHANG Shaofeng, et al. Application of microseismic monitoring technology in prevention and control of water inrush from coal seam floor[J]. Coal Mine Mining, 2011, 16(5): 94-96.
- [12] 赵春虎. 孤岛工作面底板破坏深度微震测试与模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 110-116.
- ZHAO Chunhu. Microseismic test and numerical simulation analysis of floor failure depth of isolated coal mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 110-116.
- [13] 刘盛东, 王勃, 周冠群, 等. 基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 267-272.
- LIU Shengdong, WANG Bo, ZHOU Guanqun, et al. Experimental research on mine floor water hazard early warning based on response of geoelectric field in groundwater seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 267-272.
- [14] 刘盛东, 杨彩, 赵立瑰. 含水层渗流突变过程地电场响应的物理模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 772-777.
- LIU Shengdong, YANG Cai, ZHAO Ligui. Physical simulation research on response to geoelectricity of the aquifer in seepage mutation process[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 772-777.
- [15] 王冰纯, 鲁晶津, 房哲. 基于伪随机序列的矿井电法监测系统[J]. 煤矿安全, 2018, 49(12): 118-121.
- WANG Bingchun, LU Jingjin, FANG Zhe. Research on mine electrical monitoring system based on pseudo-random sequence[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 118-121.
- [16] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
- WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [17] 张雁, 刘英锋, 吕明达. 煤矿突水监测预警系统中的关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 60-62.
- ZHANG Yan, LIU Yingfeng, LÜ Mingda. Key technologies on mine water inrush monitoring and warning system[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(4): 60-62.
- [18] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [19] 张平松, 孙斌杨. 煤层回采工作面底板破坏探查技术的发展现状[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 577-588.
- Zhang Pingsong, Sun Binyang. Development status of the detection technology for coal-seam stope floor damage[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 577-588.
- [20] 鲁晶津, 李德山, 王冰纯. 超大采高工作面顶板电阻率监测可行性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 186-194.
- LU Jingjin, LI Deshan, WANG Binchun. Feasibility test of roof resistivity monitoring for super high mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 186-194.
- [21] 鲁晶津. 煤矿井下含/导水构造三维电阻率反演成像技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 687-695.
- LU Jingjin. 3D electrical resistivity inversion and imaging technology for coal mine water-containing/water-conductive structures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 687-695.
- [22] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285-2295.
- CHEN Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [23] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10-17.
- JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10-17.