



# 煤矿水害智能预警系统关键架构及模型研究

邱浩 李宏杰 李文 李江华 杜明泽 姜鹏

## 引用本文：

邱浩, 李宏杰, 李文, 等. 煤矿水害智能预警系统关键架构及模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 197–206.  
QIU Hao, LI Hongjie, LI Wen. Research on key architecture and model of coal mine water hazard intelligent early warning system[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 197–206.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0371>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究

Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing  
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b0ab44ca-6dcf-4469-aa36-9945f0f926c9>

#### 矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望

Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 154–177 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-2016>

#### 基于微震数据及模型的煤矿水害“双驱动”预警体系构建与应用

Construction and application of “Dual-drive” pre-warning system for coal mine water disaster based on microseismic data and model  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 242–255 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2228>

#### 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望

Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control  
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e7d07419-329e-4374-9451-0452aacddae7>

#### 智能矿山大数据关键技术与发展研究

Key technology and development research on big data of intelligent mine  
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ad5665a8-9386-4e4d-9961-f162334cdf89>

#### 煤矿安全风险智能分级管控与信息预警系统

Intelligent hierarchical management & control and information pre-warning system of coal mine safety risk  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 136–144 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3d8d1a22-07dd-43ff-8227-047186e3bac9>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

邱 浩, 李宏杰, 李 文, 等. 煤矿水害智能预警系统关键架构及模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 197–206.

QIU Hao, LI Hongjie, LI Wen, et al. Research on key architecture and model of coal mine water hazard intelligent early warning system[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 197–206.

## 煤矿水害智能预警系统关键架构及模型研究

邱 浩<sup>1,2</sup>, 李宏杰<sup>1,2</sup>, 李 文<sup>1,2</sup>, 李江华<sup>1,2</sup>, 杜明泽<sup>1,2</sup>, 姜 鹏<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

**摘要:**为保障我国受水害威胁矿井的安全生产, 加快煤矿水害预测预警技术的智能化进程, 提高煤矿水害预测预警效果, 基于国内水害机理与预警领域的研究现状, 对煤矿水害智能预警系统建设过程中存在的预警系统建设水平与数据接入标准不统一、水害大数据信息的分类与时空匹配管理复杂、水害大数据信息的智能处理分析不足、预警及智能决策信息发布的时效性差4类技术问题进行了详细论述。针对4类技术问题, 从预警系统资源整合及数据驱动角度出发, 将水害预警资源分为信息采集资源与计算资源, 将水害预警大数据信息分为静态本源信息与动态监测信息, 将数据处理分为基础地质模型数据处理、数值处理与计算模拟及信息融合数据处理, 将煤矿灾害预警分为监测参数预警、指标分级预警、智能模型预警, 提出并剖析了煤矿水害智能预警系统关键技术架构。提出满足技术需求系统软件服务架构, 给出了基础设施层、数据资源层、应用支撑层、业务应用层、用户展现层的软件服务方案。结合水害预警建设流程提出了针对水害监测数据的门控循环单元算法预警模型, 给出了预警模型的网络结构, 研究了预警模型的前向计算、反向传播计算、权重梯度计算方法, 分析了不同类型感知数据接入、存储、编码、模型的分类、智能深度学习模型的构建测试、预警信息发布的技术路径, 为煤矿水害智能预警系统智能化建设提供借鉴。

**关键词:**矿井水害; 智能预警; 深度学习; 大数据处理; 智能计算

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)07-0197-10

## Research on key architecture and model of coal mine water hazard intelligent early warning system

QIU Hao<sup>1,2</sup>, LI Hongjie<sup>1,2</sup>, LI Wen<sup>1,2</sup>, LI Jianghua<sup>1,2</sup>, DU Mingze<sup>1,2</sup>, JIANG Peng<sup>1,2</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe production of mine threatened by water hazard, speed up the intelligent process of mine water hazard prediction and early warning technology, and improve the effect of mine water hazard prediction and early warning, based on the research status of water hazard mechanism and monitoring and early warning at home and abroad, four types of key technical issues for constructing water hazard monitoring and intelligent early warning systems are analyzed. The complexity of early warning requirements and data access standards, the classification and spatio-temporal matching of multi-source heterogeneous big data information, the intelligent processing and analysis of water hazard big data information, and the timeliness of early warning and intelligent decision information release are discussed in detail. From the perspective of early warning system resource integration and data drive, water hazard warning resources are divided into information collection resources and computing resources, water hazard warning big data information is divided into static source information and dynamic monitoring information, and data processing is divided into basic geological model data processing, numerical processing and Computational simulation and information fusion data processing divide coal mine disaster early warning into primary monitoring parameter early warning, intermediate index grading early warning, and advanced intelligent model early warning. The

收稿日期: 2023-03-20 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0371

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104196); 中煤科工集团科技创新创业资金专项重点资助项目(2019-ZD004); 煤炭科学技术研究院有限公司科技发展基金资助项目(2022CX-I-11)

作者简介: 邱 浩(1987—), 男, 辽宁铁岭人, 副研究员。Tel: 010-84264744, E-mail: qiuhaogeo@163.com

key technical architecture of an intelligent warning system for coal mine water hazards is proposed and analyzed. A software service architecture that meets the technical requirements is proposed, including infrastructure layer, data resource layer, application support layer, business application layer, and user presentation layer. Based on the water hazard warning construction process, a Gated Recurrent Unit algorithm warning model for water hazard monitoring data is proposed, and the network structure of the warning model is given. The forward calculation, backward propagation calculation, and weight gradient calculation methods of the warning model are studied. The classification of different types of perception data access, storage, encoding, models, construction and testing of intelligent deep learning models, and technical paths for warning information release are analyzed. It provides a reference for the intelligent construction of coal mine water hazard early warning.

**Key words:** mine water hazard; intelligent early warning; deep learning; big data processing; intelligent computing

## 0 引言

随着国家层面煤矿智能化建设指导意见的提出,各省、市、自治区、大型煤炭企业相继出台了煤矿智能化、智慧矿山领域国家标准、地方标准、建设指南、评分办法等政策性指导文件。上述政策性指导文件均将灾害精准预警与风险管控作为重点建设与考评内容。在水害预警研究领域,近年来国内高等院校及科研院所在突水机理、评价方法、预警系统装备与软件研发方面开展了一系列的研究工作<sup>[1-2]</sup>。武强等<sup>[3]</sup>提出基于GIS的ANN型、证据权型、Logistic回归型的底板突水评价脆弱性指数法;白继文等<sup>[4]</sup>开展了深部岩体断层滞后突水多场信息监测预警研究;原富珍等<sup>[5]</sup>采用微震监测技术监测开采过断层区域底板岩体破裂情况,分析底板断层围岩导水裂隙带发育规律;张平松等<sup>[6]</sup>采用分布式光纤传感测试技术监测断层区域岩层变形,分析采动引起断层活化效应特征;王经明等<sup>[7]</sup>基于底板、陷落柱、采空区突水机理,提出突水判别标准和预警分级方法;姜福兴等<sup>[8]</sup>将微震监测技术应用于煤矿突水监测,分析隐伏构造发育情况;尹尚先等<sup>[9]</sup>研究了水害监测装置布置方式和信息获取方法,开发了突水监测预警系统;连会青等<sup>[10]</sup>基于采空区、顶底板突水场景提出突水判据,建立了相应的水情监测与水害风险预警平台;许进鹏等<sup>[11]</sup>研究了积水量与离层空间特别是与离层高度之间的关系,分析了积水量和离层高度对突水的预测预报作用;刘德民等<sup>[12]</sup>采用地球物理勘探手段进行底板破坏深度监测,提出矿井底板突水定性和定量预警准则;王斌<sup>[13]</sup>基于层次分析法进行矿井水害因素权重评价,开发了煤矿顶板水害监测系统;刘盛东等<sup>[14-15]</sup>采用并行电法仪进行电场参数试验,分析渗流过程中电位、电流、视电阻率的时序特征并用于煤层底板水害实时监测分析;鲁晶津等<sup>[16-17]</sup>对含/导水构造正演结果进行三维电阻率反演成像,分析观测系统、采集密度、模型参数等条件

下的反演效果;靳德武、乔伟等<sup>[18-20]</sup>采用构建了煤矿水害多源监测大数据平台,基于机器学习算法实现底板水害微震-电法监测预警;许延春等<sup>[21]</sup>提出了一种包括工作面开采时间周期及工作面评价空间区域划分的底板突水微震监测预警方法。

从水害预警方面研究可以得出:不同学者研究手段、思路不同,但从宏观角度均已建立了水害预警机理的统一认识:基于水文地质与力学等角度分析充水水源、通道、强度矿井充水条件,以水文地质参数监测、地球物理探测、监测为主要技术手段获取预警数据,根据不同种类水害预警问题结合突水致灾机理提出水害预警指标、判据及准则。

通过水害预警系统发展趋势分析可知,微震、电阻率、水文参数、力学参数、光纤光栅等水害实时监测技术手段在顶底板水害预测预警重要性逐步凸显。受近年来政策背景支持,少数智能化建设示范矿井基于水害感知技术装备与突水机理研究初步实现了水害智能分级预警,但国内多数矿井仍未步入水害智能预警阶段,水害预警系统建设的智能化、信息化水平较低,现有预警模型对水害实时监测数据突水前兆信息挖掘不够深入,难以支撑煤矿水害的精准智能预警及决策。因此,针对国内煤矿水害预警系统现状与特点,分析构建水害智能预警系统存在问题,提出针对性强的水害预警科学和技术架构,形成稳定可靠的智能预警模型,以此为基础建设科学合理、技术可行、功能完备水害智能预警系统,对加快形成国内矿井水害精准智能预警与安全管控体系具有重要的科学意义和应用价值。

## 1 水害智能预警系统建设存在的问题

### 1.1 预警系统建设水平与数据接入标准不统一

国内矿井经过近年来的发展建设,已建立不同程度、规模的监测预警系统,但是仍存在以下问题:  
①国内矿井水害预警系统发展不均衡,系统建设水平参差不齐,大部分矿井以水位、流量等单一或数个

水文地质参数为基础数据进行观测,预警系统智能化水平仍较低;②部分国有煤矿配备了水文参数监测及地球物理探测、监测系统,也获取了大量的数据,但对于海量数据的使用仅限于超限报警及定性处理,多源数据之间缺少关联分析;③水害预警系统的智能化改造升级是很多煤矿亟待解决的问题,经过多年发展建设,国内矿井安装了种类多样的水文参数监测及地球物理探测、监测系统,不同系统架构、数据接口标准、技术指标不同,这给煤矿水害预警系统的智能化改造升级带来了困难。

### 1.2 水害大数据信息的分类与时空匹配管理复杂

水害大数据信息复杂多样,既包含地质资料数据、“三探”数据、基础物性测试数据、数值模拟计算数据、水害防治指标数据等静态数据信息,又包含水文参数监测数据、微震监测数据、电磁法监测数据等时序动态数据信息。由于基础地质、“三探”、数值模拟工作对象位置不同,基础物性测试样品来源不同,监测传感器布设地点不同,上述基础静态数据与时序动态数据亦包含空间坐标信息。将水害预警相关多源异构大数据信息进行合理分类,通过数据库将水害预警相关结构化与非结构化的多源异构数据信息进行统一管理、清洗、时空匹配,是解决水害精准智能预警问题的数据基础。

### 1.3 水害大数据信息的智能处理分析不足

目前,受限于煤矿智能化建设发展水平,大多数矿井针对水位、水压、水温等水文参数进行监测,通过对水文参数设定经验阈值实现水害的初判报警;部分矿井基于不同类型水害突水致灾机理建立突水模型,提出突水判据及指标,具体指标判据主要包含基于力学的顶板采空区抗剪、抗拉破坏力学判据,基于力学与《煤矿防治水细则》融合的邻近采空区隔水煤(岩)柱破坏突水判据、基于《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》与《煤矿防治水细则》的顶底板、构造突水判据,通过对力学、富水性、地质参数等数据的关联归类、统计分析获取突水前兆信息实现水害的指标预警;少数智能化建设示范矿井基于海量多源动态监测、静态探测数据,采用人工智能算法进行信息挖掘及聚类分析,实现煤矿突水危险性的分区、分级预警。国内多数煤矿水害预警尚未步入多源大数据智能预警阶段,由于煤矿水文地质条件的复杂性,水文参数经验阈值报警与突水指标预警结果主观经验性较强,在准确性、有效性方面与煤矿安全高效开采要求还存在较大差距。基于人工智能类算法进行信息挖掘及聚类的方法在

无人驾驶、模式识别、图像识别等非煤领域较为成熟,在煤矿水害预警系统应用还处于初级阶段。

### 1.4 预警及智能决策信息发布的时效性差

影响水害预警及决策信息发布时效性的因素有2点:一是信息传输的时效性,二是智能计算的时效性。基于高精度地球物理探测的透明矿井、灾害预警等应用场景对于信息传输、决策执行延时要求达到秒-毫秒级,特别是基于实时多源动态信息的三维模型动态修正、预警决策信息的实时计算发布方面,对海量数据的传输效率提出极高的要求,同时,海量多源异构水害大数据信息的智能计算效率将影响智能预警模型的更新周期,进而影响预警精度。

## 2 技术架构分析

为合理建设煤矿水害预警与智能决策系统,有效解决上述水害预警存在问题,梳理了煤矿水害预警工作流程,从预警系统资源整合及数据驱动角度出发,提出普适性的煤矿水害智能预警系统技术架构,整个系统技术架构如图1所示。

系统自下向上分别由资源层、采集层、传输层、数据存储层、数据处理层、应用层、预警决策层构成,集成基础设备、智能算法、软件应用服务,为煤矿水害预警系统建设提供一体化的支撑。

1)资源层包含信息采集资源、存储资源、计算资源,为煤矿水害大数据信息采集与科学计算提供必要的硬件基础。信息采集资源包括水害监测传感器、主分站、“三探”装备、基础物性测试设备,为数据层与用户提供数据采集手段;存储资源包含矿山数据中心与存储介质,为数据存储提供硬件基础;计算资源包括云服务器、计算工作站、数据处理计算仿真软件,为远程服务及科学计算提供高性能计算与网络服务资源。

2)采集层包含静态本源信息采集与动态监测信息采集,利用资源层信息采集资源对煤矿静态本源信息及动态监测信息进行高精度、连续采集,其中静态本源信息包括煤矿基础地质资料、“三探”数据、煤岩体物性测试数据、物性响应特征数值模拟数据等,为数据层静态本源数据获取提供技术支撑;动态监测信息采集包括各类监测数据、监测系统状态数据、数据采集管理流程闭环信息及与煤矿信息采集相关系统信息,为数据层动态监测数据的连续获取提供来源与数据接口。

3)传输层为链接采集层与数据存储层的桥梁,主要采用矿用有线、无线、4G/5G网络为煤矿大数据



图1 煤矿水害智能预警系统技术架构

Fig.1 Technical architecture of coal mine water hazard intelligent early warning system

信息由采集层向数据存储层传输提供可靠、稳定、实时、高速的信息通道。

4) 数据存储层建立煤矿水害预警大数据信息数据库管理系统, 实现煤矿水害静态本源信息、动态监测信息、数据库管理信息的智能存储、管理。在数据存储层, 由采集层经传输层传入的静态本源信息, 细化为水文地质基础信息、地球物理勘探信息、钻探工程信息、采掘工程信息、水害分区信息、力学特征信息; 动态监测信息具体包含水文监测、微震监测、电磁法监测、应力应变监测、光纤光栅监测等数据; 数据库管理信息包含静态本源与动态监测数据的分类索引、时空坐标信息、用户管理信息、用户权限信息、

水害感知设备信息。数据存储层采用流程化控制管理节点, 水害大数据全部电子信息化管理, 为实时调用及融合计算提供数据基础, 实现水害大数据信息的高效管理。

5) 数据处理层根据具体系统需求预处理底层数据格式, 划分为基础地质模型数据处理、数值计算模拟及信息融合数据处理3个部分。基础地质模型数据处理用于解决模型底层二、三维地质模型构建以及根据局部采掘、地质、灾害动态信息不断修正地质模型进行展示的问题, 包含模型构建算法、数据结构算法、拓扑关系、模型数据重建、模型动态修正等数据处理算法; 数值模拟主要为各类数值模型的正演

计算、特征数据获取工作提供算法支持,包含有限元、有限差分、积分方程、离散元、边界元等算法;信息融合数据处理用于解决应用层灾害数据科学计算问题,实现静态本源与动态监测数据的深度融合和智能计算,并为其提供算法支持,包含假设检验、滤波跟踪、聚类分析、模式识别、神经网络等智能算法。

6)应用层建立煤矿水害智能预警软件系统的应用场景,系统基于突水机理与感知技术装备,以海量数据的智能处理作为支撑,结合国家、地方煤矿智能化建设规范,逐级逐次开展煤矿水害监测参数预警、指标分级预警、智能模型预警。基础监测参数预警以矿井水文参数实时监测为主,通过对监测参数进行分解滤波、插补重建实现水害信息的初判报警;指标分级预警通过对煤矿水害信息进行辨识、归类,结合规程规范及突水力学模型实现各类指标的计算及确定突水判据;智能模型预警基于海量多源水害预警数据信息,建立智能预警模型,采用深度学习人工

智能算法对模型进行训练、测试与验证,对突水风险进行预测预警。

7)预警决策层建立煤矿水害预警信息发布与智能决策系统,系统基于应用层科学计算预警结果,实现煤矿水害预警信息的智能决策与信息发布。智能决策系统核心功能在于实现智能预警成果分析与可视化,并辅助进行预警模型的自我诊断及提出预警决策。信息发布通过定制服务,利用有线网、无线网向移动端与PC端实时推送发布预警信息。

### 3 软件服务架构分析

水害智能预警系统基于标准与规范化体系、运行管理体系、安全保障体系规范,图2为水害智能预警平台软件服务架构,采用Spring Cloud微服务架构模式,其为单一应用程序划分成一组小的服务,服务之间互相协调、配合,每个服务运行在独立的进程中,服务与服务间采用RPC、HTTP通信机制互相沟通。

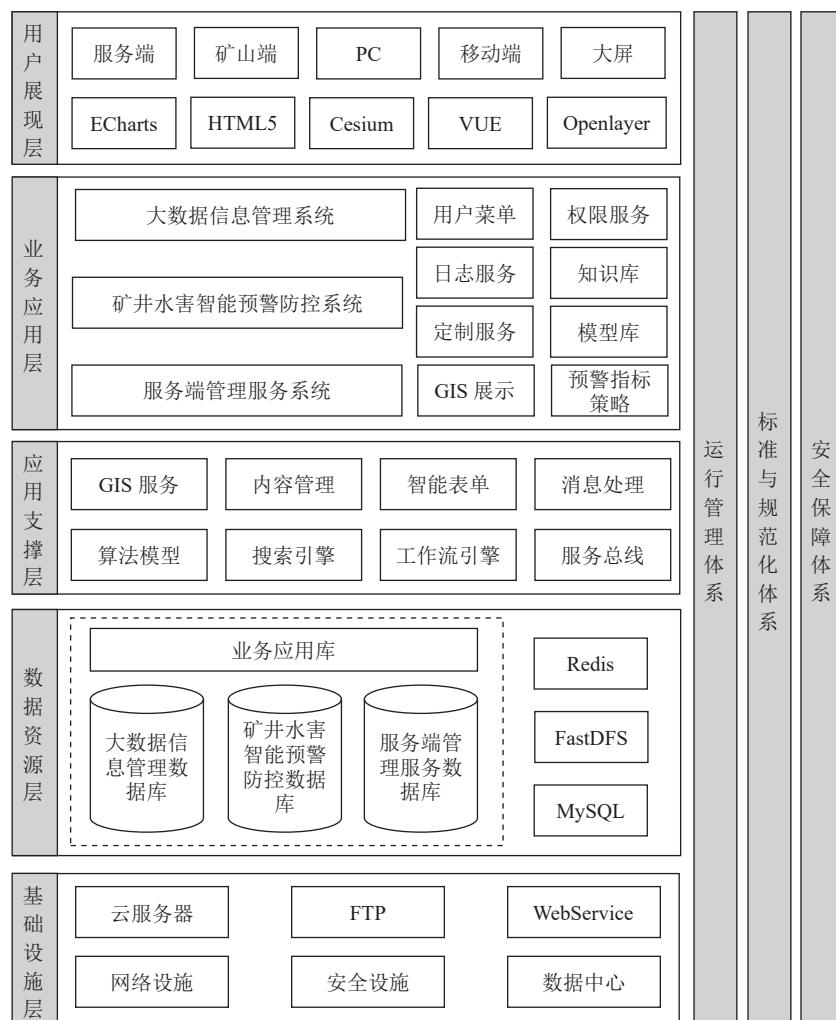


图2 水害智能预警平台软件服务架构

Fig.2 Software service architecture of water hazard intelligent warning platform

微服务架构有以下特点:①复杂度可控,每一个微服务专注于单一功能,体积小、复杂度低,每个微服务可由一个小规模开发团队完全掌控,易于保持高可维护性和开发效率。②独立部署:由于微服务具备独立的运行进程,所以每个微服务可以独立部署。当某个微服务发生变更时无需编译、部署整个应用;具备可并行发布条件,使得发布更加高效。③技术选型灵活:微服务架构下,技术选型是去中心化的。每个团队可以根据自身服务的需求和业务特色,自由选择最适合的技术。④容错:当某一组件发生故障时,在单一进程的传统架构下,故障很有可能在进程内扩散,形成应用全局性的不可用。在微服务架构下,故障会被隔离在单个服务中;其他服务可通过重试、平稳退化等机制实现应用层面的容错。⑤易于扩展:每个服务可以根据实际需求独立进行扩展。

整个系统分为5层,自下而上分别为基础设施层、数据资源层、应用支撑层、业务应用层、用户层,系统在各层遵循标准规范体系和安全防护体系。

1)基础设施层主要为各层提供基础设施支撑,主要包括云服务器、网络设施、安全设施、FTP服务、WebService服务等。

2)数据资源层是应用系统的数据基础,它为应用支撑层提供数据存储服务,并最终为业务应用层实现支撑。数据资源层主要分为结构化数据和非结构化数据。结构化数据使用Redis和MySQL进行存储,非结构化数据(文件、图片等)使用FastDFS进行存储。主要的业务应用库,包括大数据信息管理数据库,矿井水害智能预警防控系统,服务端管理服务系统数据库。

3)应用支撑层为业务应用层与数据资源层之间建立了统一的数据访问通道,为业务应用提供应用支撑服务,实现对不同数据库的透明访问能力。应用支撑层根据系统需要构建不同应用服务组件,主要包括GIS服务组件、内容管理组件、智能表单组件、消息处理组件、算法模型组件、搜索引擎组件、工作流引擎组件、服务总线等。

4)业务应用层包括大数据信息管理系统、矿井水害智能预警防控系统、服务端管理服务系统以及支撑上述系统基本服务和应用支撑平台之间消息发送的接口。

5)用户展现层为预警服务提供方、受服务方,分别对应服务端和客户端为服务对象提供大数据查询及预警分析服务,信息发布主要包含PC、大屏展示及移动端,通过HTML5等具体手段形式进行展示

服务。

#### 4 煤矿水害智能预警系统建设

基于煤矿水害智能预警系统技术与软件服务架构,围绕前文所述技术问题,从感知数据接入、数据时空匹配、预警模型开发、预警信息发布4个方面阐述煤矿水害智能预警系统建设技术思路。

##### 4.1 感知数据接入

感知数据是实现煤矿水害精准预警的基础和前提,要实现煤矿水害精准防控,必须先实现水害关键信息,特别水文地质条件信息、采掘信息、突水前兆信息的高精度感知。水害感知数据的接入主要包含地质勘探、水源识别、水位监测、涌水量监测、应力监测、微震监测、电阻率监测等方面,数据接入工作应参照国家、地方标准,接入范围力求全面、规范,同时应根据不同矿井的技术装备配置及建设条件优先接入水害关键信息以平衡系统的经济性与实用性。**图3**为工作面底板水害预警系统数据感知示意,通过微震监测手段感知工作面开采底板破坏情况,通过工作面电阻率监测感知底板承压水导升情况,通过地表、井下水文参数传感器感知突水风险,上述感知数据通过矿用通讯系统传输至地面服务器进行统一存储及管理。

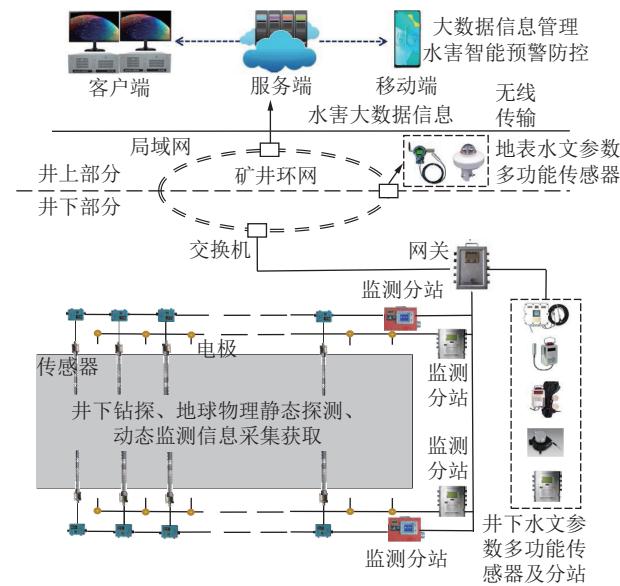


图3 工作面底板水害预警系统数据感知示意

Fig.3 Schematic of data perception for water hazard warning system in working face floor

##### 4.2 数据时空匹配

对水害多源异构数据信息进行归类与时空匹配,以便于采用深度融合及智能计算方法进行处理,是实现煤矿水害精准智能预警的前提条件。基于前文

所述静态本源信息与动态监测信息分类,将接入的感知数据进行时空匹配,形成数据表,对于静态数据只需存储数据的空间坐标与特征数据,对于动态监测数据需要同时存储时间、空间坐标与归一化特征数据,对于微震监测类的触发式数据,首先根据震源定位算法确定空间坐标,然后采用 one-hot 编码方法对触发状态进行编码,同时采用 Z-score 标准化方法对微震事件能量进行归一化处理。**表 1** 为工作面水害预警数据表示例,通过数据库对多源水害监测数据进行存储管理。

表 1 典型工作面水害预警感知数据

**Table 1 Water hazard warning perception data of typical working face**

分类	感知数据来源	时间坐标	空间坐标	归一化特征数据
微震监测		$t$	$(x, y, z)$	微震事件能量大小/J
				微震事件频次(无量纲)
				特征值变化率(无量纲)
电法监测		$t$	$(x, y, z)$	视电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
				不同频率采集电压/V
				特征值变化率(无量纲)
动态监测数据				水温/℃
				水位/m
				水压/MPa
水文参数监测		$t$	$(x, y, z)$	特征值变化率(无量纲)
				应力/MPa
				应变(无量纲)
应力应变监测		$t$	$(x, y, z)$	特征值变化率(无量纲)
地面/井下瞬变电磁法探测		—	$(x, y, z)$	视电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
地面/井下直流电法类探测		—	$(x, y, z)$	视电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
静态本源数据	无线电波透视	—	$(x, y, z)$	场强/dB
				吸收系数(无量纲)
矿井地质雷达		—	$(x, y, z)$	剖面或振幅成像(无量纲)
矿井槽波地震		—	$(x, y, z)$	速度成像/( $m \cdot s^{-1}$ )
				吸收系数成像(无量纲)

#### 4.3 预警模型开发

预警模型的构建是实现水害预警的核心问题,需在明晰不同水害类型突水机制的基础上获取多源突水前兆感知数据,构建基于水文地质与数学物理方法的智能预警模型,设计煤矿水害智能预警系统应用场景。预警的手段主要分为 3 类:第一类为参数初判报警,设定阈值,当观测值达到或超过限定阈值则发出预警;第二类为指标预警,在明晰水害致灾

机理的基础上,分析不同类型水害的突水模式,从水文地质、开采、力学角度构建指标体系并提出突水判据,实现基于水害监测时空数据的指标预警;第三类为智能模型预警,在实际地层结构中,水害威胁程度受多因素影响,无法直接定量预测出水量与定量评价突水风险,可以借助非确定性的学习算法,通过大量感知数据的训练测试验证来寻找突水预警内在规律,该类方法包含层次分析、灰色理论以及以机器学习、深度学习为代表的人工智能类算法。在预警系统建设过程中,需根据矿井的感知技术装备配置及数据条件选用适用的预警方法,既需要矿井大数据的融合分析与智能计算,也需要尽可能明确突水致灾机理与预警判据,通过以上方法进行水害预警客观且精度较高,避免判断结果依赖人为经验。在水害监测范围内,突水风险的分级标准与数据集的构建,应根据探测区域局部地质条件与探测范围煤岩体富水性实际情况确定。以工作面底板水害深度学习预警问题为例,可以采用微震、电阻率等监测手段推断底板破坏与承压水导升情况,对微震、电阻率数据时空匹配与特征提取,在工作面开采初期,可将井下电磁法、槽波地震、无线电波透视等探测静态本源数据信息作为模型初始特征,以微震、电法多源时序动态监测信息作为输入,以出水量等水文参数作为输出,构建智能预警模型,采用小批量算法及自适应学习策略对微震、电法等水害动态监测数据信息进行分类训练。

在众多的智能算法之中,线性回归 LR、自回归移动平均值 ARMA 存在对复杂非线性关系逼近能力不足的问题,人工神经网络 ANN 对复杂非线性关系逼近能力较好,但无法有效学习时序监测数据的相关性,支持向量机 SVM 可解决非线性问题,但处理大规模监测数据存在困难,水害预警问题是典型的非线性时序预测问题,上述模型方法在水害预警应用方面存在局限性。深度神经网络 DNN 基于深层非线性网络结构,非线性学习优化能力更强,但仍无法有效学习时序特征,循环神经网络 RNN 可学习时序数据特征,但存在梯度消失及梯度爆炸问题,无法解决水害预警数据的长期记忆问题,长短时记忆 LSTM、门控循环单元 GRU 是具备代表性的 RNN 类方法,相比于 RNN, LSTM、GRU 可长期记忆时序数据中包含的数据特征,其中 GRU 在 LSTM 基础上发展优化的神经网络<sup>[22-23]</sup>,两者计算精度相近,与 LSTM 相比,GRU 模型收敛更快。选用工作面底板水害 GRU 深度学习算法进行说明,图 4 为 GRU 深

度学习数据融合预警模型网络结构,GRU计算模型层采用门控循环单元算法学习训练输入数据 $x_t$ ,将GRU输出至全连接层,优化更新计算模型,输出训练结果 $\mathbf{h}_t$ ;采用稀疏交叉熵损失函数与Softmax多元分类器将训练结果 $\mathbf{h}_t$ 进行预警等级分类及输出, $\mathbf{H}$ 为4个预警等级:0—正常、1—较危险、2—非常危险、3—即将突水的分类预测概率。GRU计算单元示意如图5所示, $x_t$ 为当前输入值, $\mathbf{h}_t$ 为当前GRU计算单元输出值, $\mathbf{h}_{t-1}$ 为上一时刻GRU单元的输出值, $\mathbf{W}_r$ 为重置门权重矩阵, $\mathbf{W}_z$ 为更新门权重矩阵, $\mathbf{W}$ 为当前计算单元状态权重矩阵。模型的训练测试包含以下3个步骤:

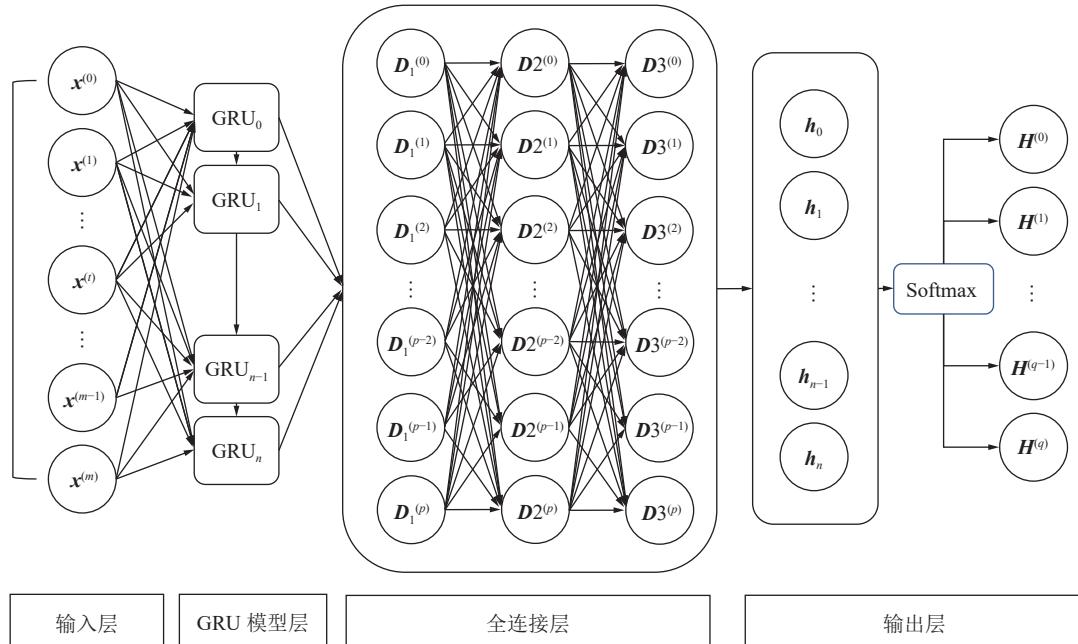


图4 煤矿水害GRU(门控循环单元)智能预警模型

Fig.4 Water hazard GRU (Gated Recurrent Unit) intelligent early warning model of coal mine

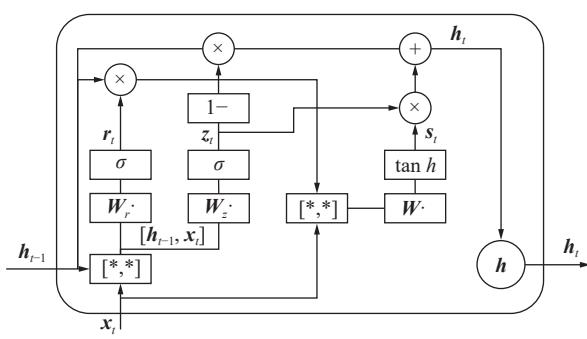


图5 GRU计算单元示意

Fig.5 Schematic of GRU calculation unit

1)前向计算每个GRU计算单元的输出值,包含当前节点控制重置的门控 $r_t$ ,当前节点控制更新的门控 $z_t$ ,当前GRU计算单元输出值 $\mathbf{h}_t$ 三个向量, $\odot$ 为按元素乘逻辑运算符,具体前向计算方法见式(1)。

$$\begin{aligned} z_t &= \sigma(W_z[h_{t-1}, x_t]) \\ r_t &= \sigma(W_r[h_{t-1}, x_t]) \\ s_t &= \tan h(W[r_t \odot h_{t-1}, x_t]) \\ h_t &= (1 - z_t) \odot h_{t-1} + z_t \odot s_t \end{aligned} \quad (1)$$

2)反向计算每个GRU计算单元的误差项,定义

误差项 $\delta_k^T$ 为 $k$ 时刻向前一时刻传播的误差项; $\delta_{r,j}^T, \delta_{z,j}^T, \delta_{s,j}^T$ 为反向传播各层的误差项; $\mathbf{W}_{rh}, \mathbf{W}_{zh}, \mathbf{W}_{sh}$ 为反向传播权重矩阵; $E$ 为层误差; $\text{net}_t^{l-1}$ 为上一层网络; $\delta_{r,t}^T, \delta_{z,t}^T, \delta_{s,t}^T$ 为当前层的误差项; $\mathbf{W}_{rx}, \mathbf{W}_{zx}, \mathbf{W}_{sx}$ 为连接权重; $f'$ 为激活函数。GRU单元误差项向前传播到任意 $k$ 时刻公式为

$$\delta_k^T = \prod_{j=k}^{l-1} (\delta_{r,j}^T \mathbf{W}_{rh} + \delta_{z,j}^T \mathbf{W}_{zh} + \delta_{s,j}^T \mathbf{W}_{sh} \odot r_t + \delta_j^T (1 - z_t)) \quad (2)$$

误差传递到上一层的公式为

$$\frac{\partial E}{\partial \text{net}_t^{l-1}} = (\delta_{r,t}^T \mathbf{W}_{rx} + \delta_{z,t}^T \mathbf{W}_{zx} + \delta_{s,t}^T \mathbf{W}_{sx}) \odot f'(\text{net}_t^{l-1}) \quad (3)$$

3)由前向传播公式及已经求得的误差项计算每个参数的权重梯度,采用Adam优化算法更新权重梯度,完成预警模型的训练过程,对模型进行验证与测试,评价模型的精度表现与泛化能力,最后保存模型参数。在系统建设过程中可采用Keras等深度学习框架进行深度学习预警模型开发、训练、评价与更新,完毕后将模型部署到系统后端,在系统前端发出

预警指令后,将待预警数据输入训练好的模型,输出预警结果并可在前端进行可视化展示,如图6所示,完成预警过程。

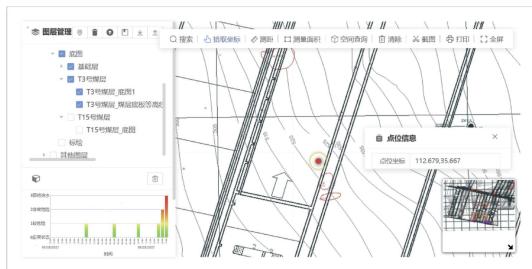


图 6 煤矿水害智能预警系统

Fig.6 Display of water hazard intelligent early warning system for coal mine

#### 4.4 预警信息发布

为了应对预警信息发布与预警模型智能计算的时效性问题,可采用云计算与边缘计算协同的计算服务架构,将模型修正与水害预警类低延时需求数据采用边缘计算处理,在智能预警模型计算过程采用并行计算技术提高预警模型的计算更新效率,以实现预警模型及预警结果发布的高效率、低延时,解决水害预警及智能决策信息发布的时效性问题。

### 5 结 论

1)解读国家煤矿智能化发展政策及理念,分析了国内煤矿水害监测预警发展现状及趋势,指出了建设煤矿水害监测与智能预警系统的问题,即水害智能预警需求的复杂性与数据接入标准、水害多源大数据信息的分类与时空匹配、水害大数据信息的智能处理分析及水害预警及智能决策信息发布的时效性。

2)针对煤矿水害监测与智能预警系统存在问题,提出煤矿水害监测与智能预警系统技术架构,将水害预警资源分为信息采集资源与计算资源,将水害预警大数据信息分为静态本源信息与动态监测信息,将数据处理分为基础地质模型数据处理、数值处理与计算模拟及信息融合数据处理,将煤矿水害预警分为监测参数预警、指标分级预警、智能模型预警,对技术架构进行了详细分析。

3)基于煤矿水害智能预警系统技术架构需求,提出了复杂度可控、独立部署、技术选型灵活、容错率高、易于扩展服务的系统软件服务架构,给出了基础设施层、数据资源层、应用支撑层、业务应用层、用户展现层的软件服务方案。

4)基于煤矿水害智能预警系统技术与软件服务

架构,围绕煤矿水害预警系统技术问题,从感知数据接入、数据时空匹配、预警模型开发、预警信息发布4个方面阐述煤矿水害智能预警系统建设技术思路,结合具体水害预警建设流程给出了不同类型感知数据接入、存储、编码、模型的分类、智能深度学习模型的构建测试、预警信息发布的技术路径。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 曾一凡, 刘晓秀, 武 强, 等. 双碳背景下“煤–水–热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538–550.  
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and Technical Conception of Coal-Water-Thermal Positive Synergistic Co-extraction under the Dual Carbon Background[J]. Journal of China coal society, 2023, 48(2): 538–550.
- [3] 武 强, 张 波, 赵文德, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 V: 基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 21–26.  
WU Qiang, ZHANG Bo, ZHAO Wende, et al. Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 21–26.
- [4] 白继文, 李术才, 刘人太, 等. 深部岩体断层滞后突水多场信息监测预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2327–2335.  
BAI Jiwen, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Multi-field information monitoring and warning of delayed water bursting in deep rock fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2327–2335.
- [5] 原富珍, 马 克, 庄端阳, 等. 基于微震监测的董家河煤矿底板突水通道孕育机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1846–1856.  
YUAN Fuzhen, MA Ke, ZHUANG Duanyang, et al. Preparation mechanism of water inrush channels in bottom floor of Dongjiahe Coal Mine based on microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1846–1856.
- [6] 张平松, 鲁海峰, 韩必武, 等. 采动条件下断层构造的变形特征实测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 351–356.  
ZHANG Pingsong, LU Haifeng, HAN Biwu, et al. Monitoring and analysis of deformation characteristics of fault structure under mining condition[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 351–356.
- [7] 王经明, 董书宁, 刘其声. 煤矿突水灾害的预警原理及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(S1): 1–4.  
WANG Jingming, DONG Shuning, LIU Qisheng. The principal of early warning for groundwater hazards in coal mine and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(S1): 1–4.
- [8] 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 technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932–1938.
- [9] 尹尚先, 王经明, 梁育龙, 等. 矿井突水灾害监测预警系统及其控制方法[P]. 中国: ZL200910119379.7, 2009-09-09.
- [10] 连会青, 徐斌, 田振焘, 等. 矿井水情监测与水害风险预警平台设计与实现[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 198–207.  
LIAN Huiqing, XU Bin, TIAN Zhentao, et al. Design and implementation of mine water hazard monitoring and early warning platform[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 198–207.
- [11] 许进鹏, 周宇, 蒲早红, 等. 离层积水量估算方法及离层突水预测: 以陕西招贤煤矿1304工作面突水为例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3083–3090.  
XU Jinpeng, ZHOU Yu, PU Zaohong, et al. Calculation method of separated water accumulation in the process of separated water inrush and its forecast: taking the water inrush at 1304 working face of Zhaoxian Coal Mine in Shaanxi Province as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3083–3090.
- [12] 刘德民, 尹尚先, 连会青. 煤矿工作面底板突水灾害预警重点监测区域评价技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 9–15.  
LIU Demin, YIN Shangxian, LIAN Huiqing. Evaluation technology for key monitoring area of early warning of water inrush from the floor of working face in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 9–15.
- [13] 王斌. 浅埋煤层顶板水灾害预警系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.  
WANG Bin. Study on early warning system of roof water disaster in shallow seam[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [14] 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.
- [15] 刘静, 刘盛东, 曹煜, 等. 采动条件下一次场电位对地下水渗流响应的定量研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 748–755.  
LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu, et al. Response of primary electric voltage to groundwater seepage during mining operation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 748–755.
- [16] 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.
- [17] 鲁晶津, 王冰纯, 颜羽. 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 18–26.  
LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 18–26.
- [18] 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.
- [19] 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.  
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.
- [20] 乔伟, 靳德武, 王皓, 等. 基于云服务的煤矿水害监测大数据智能预警平台构建[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2619–2627.  
QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2619–2627.
- [21] 许延春, 黄磊. 基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 369–382.  
XU Yanchun, HUANG Lei. Full-time and space early-warning method for floor water inrush in working face based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 369–382.
- [22] 王鑫, 吴际, 刘超, 等. 基于LSTM循环神经网络的故障时间序列预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 772–784.  
WANG Xin, WU Ji, LIU Chao, et al. Exploring LSTM based recurrent neural network for failure time series prediction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 772–784.
- [23] 王增平, 赵兵, 纪维佳, 等. 基于GRU-NN模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 53–58.  
WANG Zengping, ZHAO Bing, JI Weijia, et al. Short-term load forecasting method based on GRU-NN model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 53–58.