



移动阅读

武强,徐华,赵颖旺,等.基于云平台的矿井水害智慧应急救援系统与应用[J].煤炭学报,2018,43(10):2661-2667. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0899

WU Qiang, XU Hua, ZHAO Yingwang, et al. Cloud-based smart emergency rescue system and its application in mine water disaster[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10):2661-2667. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0899

基于云平台的矿井水害智慧应急救援系统与应用

武 强^{1,2}, 徐 华³, 赵颖旺^{1,2}, 杜沅泽^{1,2}, 张小燕^{1,2}, 穆文平^{1,2}, 姚 义^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)地测学院,北京 100083; 2. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心,北京 100083; 3. 北京石油化工学院信息学院,北京 102617)

摘要:随着云计算、物联网、大数据、人工智能等技术的发展,智慧应急救援已成为矿山安全生产监察的迫切需求。提出了基于云平台的矿井水害智慧应急救援服务体系,采用混合云架构,提供按需和弹性计算能力及存储资源。通过集成与挖掘所有可能的历史和实时数据,建立云环境下多源异构、大规模、跨领域、动态信息资源“一张图”,推动信息资源共享,建设应急救援智库。在此基础上,研发了应急救援系统,实现数值模拟、预测预警、应急疏散、应急评估、人员设备管理等功能,支持矿山应急演练和应急决策,依托现代信息技术为矿井水害应急救援提供智能化的服务和管理,实现矿井水害事故预防、检测、预警、处置、评估等全过程动态管理和控制。

关键词: 矿井水害;智慧应急救援;云计算;服务体系;“一张图”

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)10-2661-07

Cloud-based smart emergency rescue system and its application in mine water disaster

WU Qiang^{1,2}, XU Hua³, ZHAO Yingwang^{1,2}, DU Yuanze^{1,2}, ZHANG Xiaoyan^{1,2}, MU Wenping^{1,2}, YAO Yi^{1,2}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, Beijing 100083, China; 3. Information Engineering College, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: With the development of cloud computing, internet of things, big data, artificial intelligence and other technologies, smart emergency rescue has become an urgent need for the supervision of mine production safety. This paper proposes a service architecture, using hybrid cloud architecture to provide on-demand and elastic computing power and storage resources. Through the integration and mining of all possible historical and real-time data, a “one map” of heterogeneous, large-scale, cross-domain and dynamic information resources in cloud environment is established to promote the sharing of information resources and build intelligent databases. On this basis, an emergency rescue system has been developed to achieve the functions such as numerical simulation, prediction and early warning, emergency evacuation, emergency assessment, and personnel and equipment management, to support mine emergency drills and emergency decision-making. Relying on modern information technology, it provides intelligent service and management for emergency rescue in mine water disaster to realize the dynamic management and control of the whole process of mine water accident prevention, detection, early warning, disposal and evaluation.

Key words: mine water disaster; smart emergency rescue; cloud computing; service architecture; “one map”

收稿日期:2018-07-08 修回日期:2018-08-30 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41430318,41877186);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)

作者简介:武 强(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,中国工程院院士。E-mail:wuq@cumt.edu.cn

矿井水害已成为影响矿山安全生产的主要危害之一,不但影响矿井正常生产,有可能淹没采区或矿井,造成重大人员伤亡和财产损失。国家突发事件应急体系建设“十三五”规划中明确提出:提升应急平台智能辅助指挥决策等功能;提高突发事件专业信息汇集、应急决策和指挥调度能力;对基础地理信息和专业部门的风险隐患、防护目标、队伍、物资等数据进行空间化整合,探索建立应急信息资源“一张图”;打造基于云架构的突发事件预警信息发布系统,等等^[1-3]。矿山突发事件应急体系建设面临新的发展机遇,充分利用互联网、大数据、智能辅助决策等现代信息技术,提升矿井水害应急平台支撑能力,为矿山应急救援提供科学支撑。

随着云计算、物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展,在很多行业及领域得到了应用,如基于云的智慧城市环境、智慧物流、智能能源和电网、以及水资源、洪水预报、地震预警中的信息共享与实时管理,等等^[4-7]。KURTZ研发了一套基于卡尔曼滤波器的数据同化系统,云计算环境下的应用计算开销小,实际的水资源管理问题^[4];JONES等研究了基于云的MODFLOW服务,为含水层管理决策提供支持^[8];为提高尾矿库的安全性,基于物联网和云计算的尾矿坝监测预警系统具有实时监测大坝安全能力^[9]。由于日益增长的数据强度、高性能计算、实时数据处理、以及为终端用户提供可靠和经济高效的处理服务等问题,云计算可提供无缝无尽的存储、计算能力,以及随时随地可用、支持多用户平台、减少数据可移植性等^[10]。ModflowOnAzure的科学建模服务可以在云中并行执行地下水流模型,将基于桌面的软件与基于云的服务结合起来,实现桌面和云环境之间的无缝集成,以及桌面环境和云之间高效透明的文件和数据交换^[11];KONSTANTINOS将钻孔、管道和含水层等地理空间数据托管在关系数据库系统中,开发的系统部署在云计算基础架构中,具有弹性功能^[12]。基于云计算可处理大量的实时数据,为灾害情况下的撤离人员和紧急车辆设备等计算安全合适的路线^[13]。MASATO采用OpenStack构建了基于SDN的紧急灾害信息云计算系统,SDN由OpenFlow协议控制^[14];基于云的综合多源数据(如遥感、Wikipedia和Web)、空间数据挖掘等技术框架,可支持历史和未来事件的灾害分析,并降低维护成本^[5,15];结合“国家安监云”,研究设计煤矿安全监察执法等平台^[16],推动矿山安全生产监管信息化、智能化建设。

云计算已被作为模拟、计算和不确定性分析等的未来平台^[4,10],能够为研究人员、利益相关者和决策

者等提供及时的专业分析,云计算将“计算作为第5项工具”(在水、电、气和电话之后)的愿景成为可能^[11,17]。笔者提出了基于云平台的矿井水害智慧应急救援服务体系,融合云计算、物联网、大数据、人工智能、移动互联等技术,为矿山应急救援提供更优解决方案。

1 应急救援

矿井水害应急救援主要包括事故发生前应急救援预案和事故发生后应急救援方案。

应急救援预案包括两部分内容:①事故发生前的水害预测预防预案;②事故发生后的水害现场救援与处置指挥。通过加强矿井防治水的基础工作,制订应急救援管理系统,提高水害预兆信息捕捉与辨识能力,实现水害预测预防^[1-2]。由于矿井水害事故时有发生,且相互独立,形成数据孤岛,缺乏系统分析,因此,建立完善基础信息库、突水模式库、案例库、知识库、预案库、风险隐患库、应急物资库、应急队伍库、规程库、标准库等共享应急救援智库并接入云计算环境中,有助于应急救援预案的制定与演练,并为应急救援方案科学决策提供重要依据。

事故发生后应急救援方案主要包括:启动应急预案、成立抢险指挥部;基于“一张图”及时制定救援方案,并实施救援;进行突发事件应急评估,为进一步加强应急管理工作提供支持。基于物联网技术将矿井水害监控和预警系统与矿山设备和环境、人员定位、数值模拟以及管理平台全面整合,实现矿山生产安全、应急救援等系统的智能化。在应急救援过程中,需要协调调动监管监察、救护、公安、水利、地质、环保、医疗、气象、新闻、电力、通信、武警、后勤保障等单位及时赶赴现场开展救援工作。在发生水害事故后第1时间,监管监察部门、地质、水害防治和排水专家及企业技术负责人收集整理与水害相关的基础资料,判断井下被困人员是否存在生存空间,分析突(透)水水源和水量、突(透)水通道,查明水害类型^[1],实施科学的现场救援指挥和突发事件的合理处置。

制定科学的法规标准体系,推动信息资源共享,建设应急救援智库,实现矿井水害事故预防、检测、预警、处置、评估等全过程动态管理和控制。

2 体系设计

通过对矿井水害应急救援的综合分析,结合高新技术和企业需求,设计了基于云平台的矿井水害智慧应急救援服务体系(图1),适用于紧急情况下的应急救援所需的计算和存储资源,为智能决策服务。

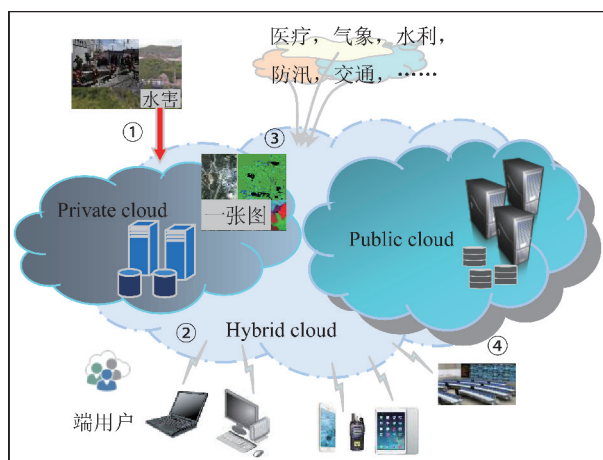


图 1 服务体系

Fig. 1 A service architecture

(1) 当矿井水害发生时, 预测预警系统会在灾害发生前响应, 通过矿井突(透)水征兆信息捕捉和识别, 分析判断水害可能发生的位置、突水量等信息, 获取井下遇险人员情况。基于物联网等技术, 通过人员定位、传感器、视频监控等, 实现对灾害的智能化识别、定位、监控和管理。

(2) 应急预案启动之后, 数据和运算量会急剧增加, 导致基础设施需求增加, 需要大规模的计算和存储资源。云计算具有计算和存储资源的按需可扩展性, 在灾害情况下, 可用于处理大量数据, 实时计算出更安全可行的救援方案。

(3) 对来源于物联网、数据接口服务、数据库等大量的历史数据和实时数据, 进行多源数据集成, 经过数据整合、数据清洗等处理, 以及数据挖掘与知识发现, 形成云环境下多源异构、大规模、跨领域、动态信息资源“一张图”, 为应急救援提供科学决策依据。

(4) 基于“一张图”, 进行突水模式匹配、水流数值模拟、智能动态路径搜索、人员疏散仿真等, 并将计算结果及时传送到水害事故应急救援指挥控制中心、井下人员等端用户。通过可视化展示与分析, 辅助制定抢险救援方案, 实施救援。对突发事件应急评估, 为进一步加强应急管理工作提供支撑。

支持 PC、手机、PAD、电视等智能终端, 通过本地和远程方式实现矿山的应急演练和应急决策, 依托现代信息技术为矿井水害应急救援提供智能化的服务和管理。

3 技术方法

应急平台体系关键技术主要包括: 应急平台建设的风险隐患监测防控、综合预测预警、协同会商、应急保障、应急决策、应急评估、应急演练、数据组织与管

理、应急地理信息服务等^[18]。随着数据采集与处理技术发展、数值模拟计算能力增强、以及实时数据在模拟过程中的融合, 促进了更加复杂、高计算负担、更接近实际的问题解决。云计算、物联网、大数据、人工智能、VR/AR 等技术将成为支撑矿井水害智慧应急救援的重要技术方法。

3.1 混合云架构

目前, 云计算被广泛使用, 混合云已成为企业关注的焦点, 它将服务提供商运营的公有云与企业内部构建的私有云相结合。由于私有云在企业内部管理, 被认为是安全的, 如为钻孔、水量等敏感数据提供内部存储库的私有云; 而公有云可扩展, 因其具有弹性特征, 当临时需要大量计算资源时, 可租用诸如 AWS, Azure, 百度云之类的公有云。通过组合这两种云, 可构建有效的云平台。

基于融合基础设施、无限扩展和共享服务等, 云计算技术可直接响应应急救援指挥控制中心处理和存储功能的动态性、弹性和适应性需求。当紧急水害事故发生时, 由于会产生大量数据并流入基础设施, 因此, 能够在云间和云内动态改变环境来处理负载是非常重要的。灵活的架构方案可以解决面临的各种问题, 支持基于可扩展框架的不同实体(计算系统/集群、存储、传感设备等)之间的合作, 用于动态和透明配置, 将属于多个数据中心并与不同公有和私有云基础设施关联的多种资源互连。可见, 混合云模式可提供应急救援运行时间和存储服务所需灵活性, 同时尊重本地设备限制或边界限制^[5,7,14]。

混合云的分层架构(图 2)包括“基础设施即服务”(Infrastructure as a Service - IaaS), “平台即服务”(Platform as a Service - PaaS)和“软件即服务”(Software as a Service - SaaS)3 个层次。

最底层是一个集成了私有和公共计算和存储资源的混合 IaaS 层。由于使用了高层次网络虚拟化组件, 这两类资源可以高度集成, 并与开源云平台紧密耦合, 监督所有资源供应和管理任务^[5,7]。提供动态云计算管理服务, 主要包括物理资源管理, 如弹性 IP 资源、网络设备等; 虚拟资源管理, 如虚拟机、镜像、存储等; 以及自动伸缩管理; 资源监控管理; 用户身份管理等。

PaaS 通过 IaaS 提供的 API 调用硬件资源, 提供足够的存储和处理资源, 实时监控资源使用情况, 并动态扩展或减少资源。允许获取和集成来自多源(如传感器、地质勘探、网络等)的非结构化、异构数据, 进行必要的清理, 确保获得的数据质量; 可管理分布式数据库、大容量存储和高层次分析设备

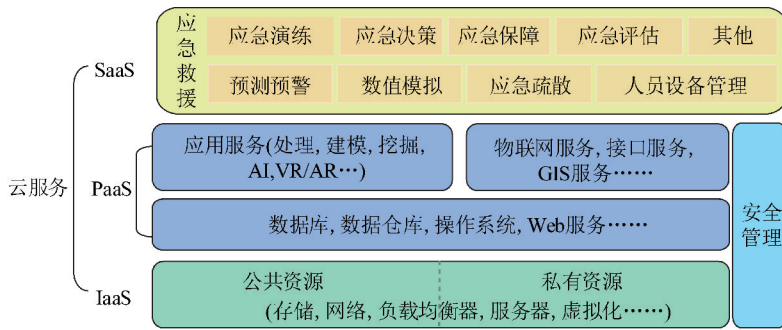


图2 混合云架构

Fig. 2 Hybrid cloud architecture

等。基于Web/GIS的集成可视化服务,为用户提供统一的服务接口,实现数据采集和处理、模型选择和计算资源管理。应用服务提供一系列处理、建模、挖掘、人工智能AI、虚拟/增强现实VR/AR等,支撑上层应用。

安全、管理主要涉及数据安全、加密管理、用户身份识别和访问管理、变更管理等。

SaaS层提供应急救援服务,能够使用现有工具,基于矿山现状与发展开发特定的组件及系统,以满足多端用户需求。

3.2 数据集成与挖掘

由于灾害信息的来源越来越广泛,信息源数量不断增加的情况下,智慧应急救援所面临的基本挑战在于收集、整合、汇总和处理来自异构源的所有可能的数据,并深度数据挖掘与知识发现。数据的及时融合需要更多资源,可通过云计算处理大数据并实时计算^[13,19-20]。为了制定正确的适应性应急救援方案,取决于数据集的可用性和可靠性。

根据矿井水害智慧应急救援需求,通过对矿井相关数据分析,将多源数据分为:历史数据和实时数据(图3)。

(1)在长期的勘探开发过程中,积累了大量的原始数据和成果数据,形成历史数据。如钻孔、地质构造、地震剖面、遥感影像、点云、导线点、巷道、硐室、井、障碍物、人员、设备、灾害案例等数据和相关成果报告;以及部分时序数据也可转为历史数据进行存储。

(2)实时数据主要来源于物联网等直接监测数据、以及各种应用程序编程接口(API)收集的在线数据和中间计算结果等。这些数据能够有效提高应急疏散模拟精度,为矿井水害智慧应急救援提供科学依据。监测数据主要包括实时采集的水位、水流速与流量、温度,以及水害发生时突(透)水点、突(透)水量、突(透)水类型;跟踪识别井下人员位置及行为状态;等等。利用各类传感器、网络摄像头、定位系统等设

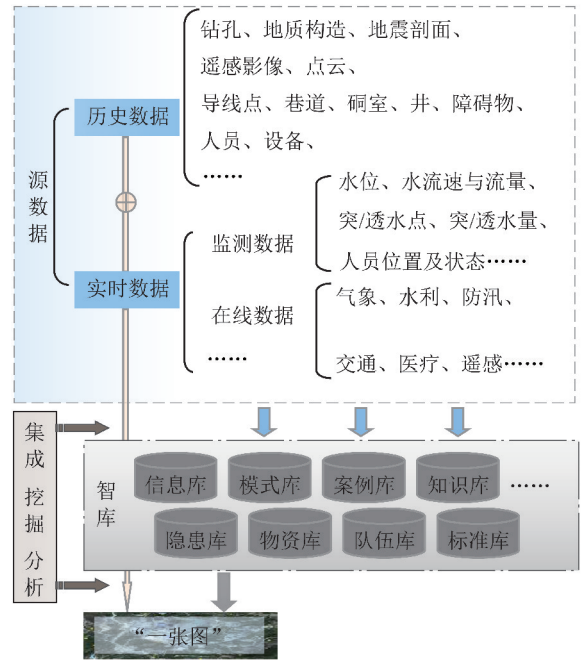


图3 多源数据集成与挖掘

Fig. 3 Multi-source data integration and mining

备进行数据采集与智能识别,实时监测矿井多方面的环境并自动反馈,以改善生产安全、人员安全和应急能力。在线数据如气象、水利、防汛、交通、医疗、遥感、通信、环保、电力、武警、后勤保障、Wikipedia、新闻甚至自媒体等,其中,媒体流已成为追踪灾害事件、联系被救人员及其家属、评估损失的新来源。可以通过不同的应用程序编程接口(API)访问各种相关的数据,如气象API、交通API、环保API、百度map及GoogleMaps APIs等。通过互联网,获取地面救援人员、设备、车辆、以及基本地图、位置、现场环境等信息,以便进行灾害模拟与分析管理。

对多源数据进行整合和清洗,如样本均匀性、完整性、不一致性、准确性、误差等分析,以确保数据质量。从这些数据中抽取、发现可用信息,并自动导入不同的数据库进行灾害分析处理,以便在高性能框架中进行快速访问和分析。在云计算的架构中,存储了

大量的结构化和非结构化数据,需要管理与共享不同类型的数据,例如,文本、视频、音频数据被存储在非传统的数据库系统中,如 MongoDB。逐步建立完善基础信息库、突水模式库、案例库、知识库、预案库、风险隐患库、应急物资库、应急队伍库、规程库、标准库等共享应急救援智库,支持实时事件跟踪监控、以及数据仓库、数据挖掘与可视化分析等。最终形成可靠的应急信息资源动态“一张图”(图 3)。

3.3 关键技术

矿井水害智慧应急救援具有智能感知、预测分析、科学决策等能力,以保障应急救援高效安全。

通过对矿井巷道网络的拓扑关系和连通性分析,提取三维空间多层次拓扑模型,并基于智能优化算法在拓扑模型中进行传感器优化布置。一般情况下水害事故发生前均有一个孕育过程,在接近或临处于突(透)水极限平衡状态的不长时间内,突(透)水点附近的涌水、煤层、围岩、温度(水、岩、气)和气体等均会显现出不同程度的变化异常,即各种各样的突(透)水征兆^[1-2]。通过传感器网络、视频监控、气象 API 等各种监测手段实时采集数据,感知相关环境变化,进行矿井突(透)水征兆信息捕捉和识别;一旦监测到可能发生突水灾害时,启动分级预警。

为量化预测矿井巷道突(透)水的蔓延过程,科学地解释突(透)水在矿井巷道中的蔓延规律,基于 SWMM 建立矿井巷道突(透)水蔓延模型并实现量化计算,通过分析矿井充水条件、设置合理的边界条件,进行矿井巷道突(透)水蔓延过程的动态预测,获得各种可能的突水蔓延过程及其任意时刻的水深、流量数据。突水灾害发生时,采用 K-means 算法、随机森林算法等机器学习方法,进行突水模式匹配,快速识别突水点、突水量、突水蔓延过程等信息。根据采空区分布、以及可能采取突水点封堵、突水通道封堵、疏排水等措施,结合“一张图”中的相关数据,进行实时水流数值模拟,分析突(透)水地点、时间、突(透)水源、突(透)水通道、事故影响范围、估计突(透)水水量等,确定最优的抢险救援解决方案。

在应急疏散过程中,针对现有路径搜索方法缺乏依据环境信息对疏散路径的实时影响,导致疏散路径出现偏差,造成人员伤亡损失。通过人员定位、视频及传感器等监测监控系统对应急疏散环境实时监测,结合突(透)水蔓延过程、人员稳定性及风险性分析,进行智能动态路径并行搜索,获取最短疏散逃生路径,进行应急疏散路径规划。基于 Agent 的感知、决策以及行为实现巷道内的人员疏散可视化仿真,并对疏散时间、通行系数、灾害对人员疏散影响等进行评

估分析。利用综合调度通讯系统,根据最优疏导方案,组织井下人员安全撤离。

4 工程应用

设计了 OpenStack 私有云与 AWS 公有云的混合云解决方案。OpenStack 为云计算的开源软件平台,可控制整个数据中心的大型计算、存储和网络资源池,通过仪表盘或 OpenStack API 进行操作管理。本次工程应用采用了 1 台云部署服务器,3 台控制/计算/存储超融合节点服务器,2 台千兆 3 层网络交换机,部署私有云平台。提供 Web 界面和开放的 API 管理整个基础设施,图 4(a)为云平台动态资源管理界面示例图。

采用 OpenLayers,GeoServer,PostGIS,Python 等技术,基于 B/S 与 C/S 结构进行系统研发,主要包括信息管理系统、应用服务、Web 服务、物联网服务/接口服务/GIS 服务、以及应急救援系统等。

以河北某煤矿为例,该矿位于河北省张家口区域。在长期的勘探工作中,本矿积累了综合水文地质柱状图、地质构造、地震剖面、导线点、巷道、硐室、井、障碍物、采区排水量、成果图层、研究报告等丰富的勘探资料,为矿井水害应急救援提供了大量数据。通过对突水案例、底板突水量分布规律等分析,以及本矿 1976,1977,1982,1983,……等突水事故历史数据分析,结合来自物联网、数据接口等的实时数据,形成“一张图”(图 4(c)),主要包含:基本历史数据,如含水层、煤层、地质构造、钻孔、巷道、以及部分区域水文地质图、矿井田综合水文地质图等各种图层;井下视频监控、人员定位、水位、来自气象数据网的天气等实时数据。加载了动态卫星地图;提供交互式信息查询,如查询矿井地面(井下)观测孔水位(压)数据;进行水位数据挖掘分析;水流数值模拟等等。

进行了矿井水害水流数值模拟分析,图 4(c)显示了模拟过程中水流蔓延情况,其中,蓝色表示无水巷道,红色表示突(透)水蔓延范围,为确定最优的抢险救援解决方案提供支持。

通过智能动态路径并行搜索、人员疏散仿真等,获得井下和地面救援方案,为撤离人员提供逃生路线建议,为抢险指挥部开展救援工作提供科学决策依据。如图 4(b)为突水灾害发生时井下人员按照模拟救援方案安全撤离,展示了动态疏散过程中某时刻人员在巷道中的分布情况,其中,叠加了煤层(黑色)和部分 3D 剖面。

基于 Web 服务可以及时做好信息发布和舆论引导工作。



图4 工程应用

Fig. 4 Engineering applications

5 结论

(1)通过对矿井水害应急救援的综合分析,结合高新技术和企业需求,提出了基于云平台的矿井水害智慧应急救援服务体系,采用混合云架构,基于融合基础设施、无限扩展和共享服务等提供按需IT资源,支持历史水害事故分析和可能发生的水害事故监测预警,解决大数据处理和大规模计算模拟所带来的挑战。

(2)由于灾害信息的来源不断增加,智慧应急救援所面临的基本挑战在于收集、整合、汇总和处理来自异构源的所有可能的历史数据和实时数据,并深度数据挖掘与知识发现,形成可靠的应急信息资源动态“一张图”,推动信息资源共享,建设应急救援智库,为应急救援提供科学决策依据。

(3)矿井水害智慧应急救援具有智能感知、预测分析、科学决策等能力。随着数据采集与处理技术发展、数值模拟计算能力增强、以及实时数据在模拟过程中的融合,促进了更加复杂、高计算负担、但接近实际的问题解决。支持PC、手机、PAD、电视等智能终端,通过本地和远程方式实现矿山的应急演练和应急决策。

参考文献 (References):

- [1] 赵苏启,武强,尹尚先. 煤矿水害事故科学快速救援[J]. 煤炭工程,2016,48(11):9-11.
ZHAO Suqi, WU Qiang, YIN Shangxian. Scientific and quick rescue for water hazards of coal mines [J]. Coal Engineering, 2016, 48(11):9-11.
- [2] 武强,管恩太. 煤矿水害应急救援预案探讨[J]. 煤炭学报,2006,31(4):409-413.
WU Qiang, GUAN Entai. A preliminary study on water disaster emergency rescue counterplan in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4):409-413.
- [3] 国办发. 国务院办公厅关于印发国家突发事件应急体系建设“十三五”规划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/19/content_5211752.htm, 2017-07-19.
- [4] KURTZ W, LAPIN A, SCHILLING OS, et al. Integrating hydrological modelling, data assimilation and cloud computing for real-time management of water resources [J]. Environmental Modelling & Software, 2017(93):418-435.
- [5] HUANG Qunying, CERVONE Guido, ZHANG Guiming. A cloud-enabled automatic disaster analysis system of multi-sourced data streams: An example synthesizing social media, remote sensing and Wikipedia data [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017(66):23-37.
- [6] MONIKA M, ASHIS KP, SUMA D, et al. Cloud based management

- and control system for smart communities: A practical case study [J]. *Computers in Industry*, 2015(74):162-172.
- [7] PALMIERI F, FICCO M, PARDI S, et al. A cloud-based architecture for emergency management and first responders localization in smart city environments[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2016, 56:810-830.
- [8] JONES David, JONES Norm, GREER James, et al. A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support[J]. *Computers & Geosciences*, 2015(78):81-87.
- [9] SUN E, ZHANG X, LI Z. The internet of things (IOT) and cloud computing(CC) based tailings dam monitoring and pre-alarm system in mines[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4):811-815.
- [10] REEM AAK, ABDEL RA, MAZHER J. An integrated architectural framework for geoprocessing in cloud environment[J]. *Spat. Inf. Res.* 2017(25):89-97.
- [11] LIU Y, SUN AY, NELSON K, et al. Cloud computing for integrated stochastic groundwater uncertainty analysis[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012;1-25.
- [12] KONSTANTINOS C, HRYSOULA P, CHRISTOS D, et al. Earth and groundwater visualisation using 3D modelling techniques in a cloud computing environment[J]. *IEEE Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 2014;78-84.
- [13] KHALID O, KHAN MUS, HUANG Y, et al. EvacSys: A cloud-based service for emergency evacuation[J]. *IEEE Cloud Computing*, 2016, 3(1):60-68.
- [14] OGUCHI Masato, HARA Ruriko. A speculative control mechanism of cloud computing systems based on emergency disaster information using SDN[J]. *Procedia Computer Science*, 2016(98):515-521.
- [15] EIRINAKI M, DHAR S, MATHUR S, et al. A building permit system for smart cities: A cloud-based framework[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018(70):175-188.
- [16] 刘建, 郜彤, 刘传安. 基于“国家安监云”的煤矿安监执法平台研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(1):237-240.
LIU Jian, GAO Tong, LIU Chuanan. Research on coal mine safety supervision and law enforcement platform based on national security supervision cloud[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(1):237-240.
- [17] RAJKUMAR B, CHEE S Y, SRIKUMAR V, et al. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2009, 25(6):599-616.
- [18] 袁宏永, 黄全义, 苏国锋, 等. 应急平台体系关键技术研究的理论与实践[M]. 北京:清华大学出版社, 2013;1-465.
- [19] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12):3181-3189.
HAN Jianguo. Key technology research and demonstration of intelligent mines in Shenhua Group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12):3181-3189.
- [20] 武强, 徐华, 杜沅泽, 等. 矿山突(透)水灾害应急疏散模拟系统与工程应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10):2491-2497.
WU Qiang, XU Hua, DU Yuanze, et al. Emergency evacuation simulation for water bursting disaster in mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10):2491-2497.