



移动阅读

窦林名,王盛川,巩思园,等. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2248-2255. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0318

DOU Linming, WANG Shengchuan, GONG Siyuan, et al. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2248-2255. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0318

冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台

窦林名^{1,2}, 王盛川^{1,2}, 巩思园^{1,2}, 蔡武^{1,2}, 李小林^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与安全开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对制约煤矿安全高效生产愈发严重的冲击矿压问题, 为提高冲击矿压监测预警的准确性及针对性, 紧跟监测预警技术朝着区域化、连续在线化、智能网络化的发展趋势, 基于 GIS 技术、云技术、采矿地球物理等技术, 搭建了集成微震、应力、钻屑等多种监测手段的冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台。该平台由硬件、平台支持软件及云技术 3 个部分组成, 采集并以标准化格式存储上传至云服务器, 利用内嵌于平台的风险判识模式及危险等级预警准则, 判定所评价区域危险状态, 通过选取冲击变形能、时序集中度、时空扩散性等 13 个监测预警指标并利用 F -score 法对不同冲击危险程度的指标赋予动态权重, 根据各指标与震动、应力、能量间的关系, 建立了多场多参量综合预警体系, 克服了单一监测指标预警效能较低弊端, 实现了由点、局部、单参量监测至区域多场多参量综合预警的转变; 同时通过监测数据的信息化与防治措施信息化的融合, 将现场监测、防治信息通过“一张图”的形式实时预警, 在预警冲击危险性的同时指导现场对高危区域加强卸压解危, 同时根据解危效果反馈预警信息准确性, 做到了监防互馈, 该平台在山东古城煤矿等 13 个矿井成功运用。

关键词: 冲击矿压; 监测预警; 云平台; 监防互馈; 监防信息“一张图”

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2020)06-2248-08

Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning

DOU Linming^{1,2}, WANG Shengchuan^{1,2}, GONG Siyuan^{1,2}, CAI Wu^{1,2}, LI Xiaolin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aimed at the increasingly serious rock-burst problems restricting the safety and efficient production of coal mines, and in order to improve the accuracy of rock-burst monitoring and early warning, following the continuous online monitoring and early warning technology towards regionalization, and the development trend of intelligent network, and based on GIS, cloud technology, mining geophysical techniques, a cloud platform for intelligent assessment of rock burst and multi-parameter monitoring and early warning has been built with the integration of monitoring methods including micro-seismic, stress and drilling cuttings. The platform is composed of three parts: hardware, platform support software and cloud technology. It collects and stores the data in a standardized format and uploads them to the cloud server, using the risk recognition mode embedded in the platform and the warning criterion of risk level to determine

收稿日期: 2020-02-28 修回日期: 2020-04-05 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874292, 51934007); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403)

作者简介: 窦林名(1963—), 男, 青海平安人, 教授, 博士。Tel: 0516-83995904, E-mail: lmdou@126.com

通讯作者: 王盛川(1992—), 男, 河北唐山人, 博士研究生。E-mail: wangshengchuan111@163.com

the risk state of the evaluated area. The platform selects 13 indices, of which the dynamic weights are given by using the method of F-score, and according to the relationship between indices and the seismic and stress, energy, setting up multi-parameter and field comprehensive early warning system. It overcomes the disadvantage of low early-warning efficiency of single monitoring index and realizes the transformation from point, local and single parameter monitoring to regional multi-field and multi-parameter comprehensive early-warning. With the information fusion of monitoring data and control measures, the field monitoring, prevention and control information are provided through the “picture” in the form of a real-time warning. In the early warning of the risk, the site should be guided to strengthen the pressure relief and crisis relief in high-risk areas, and the accuracy of early warning information should be fed back according to the crisis relief effect. The platform has been successfully used in the Gucheng coal mine of Shandong province and other 13 coal mines.

Key words: rock-burst; monitoring and early warning; cloud platform; monitoring and controlling mutual feed-backs; the “picture” of warning and prevention

冲击矿压是典型的煤矿动力灾害,具有突然、急剧、猛烈等特点,常造成井巷严重破坏和人员重大伤亡,甚至引起地表破坏和局部地震^[1]。如山东龙郛煤矿“10·20”冲击矿压事故、龙家堡“6·9”冲击矿压事故都造成多名矿工遇难。冲击矿压有效防治的前提是对冲击危险进行有效预警和监测^[2],然而冲击矿压一般没有明显宏观前兆,冲击矿压监测预警的准确性仍有待大幅度提高。

目前冲击矿压监测预警方法主要分为 4 类:岩石力学方法、综合指数法等经验类比法、采矿方法及地球物理方法^[3-6]。冲击矿压监测方法众多,但大部分监测方法反映的都是煤岩的物理力学特性、受载应力大小、扰动动载的作用,每种方法仅反映某一方面的特征且大多方法仅能监测而不能预警,其次监测指标单一,无法准确反映冲击前兆信息。冲击矿压监测技术朝着区域化、连续在线化、智能网络化方向发展^[7],但目前冲击矿压灾害风险判识以及监测预警准确性尚不能满足生产需

求。

为进一步满足冲击矿压监测预警的需求,通过建立冲击矿压灾害风险智能判识与多参量监测预警云平台,将不同监测手段的数据经信息化融合并赋予动态权重,实现多监测手段多参量的综合监测预警;同时对现场采集并实时上传的数据进行平台智能化处理,实时计算并反映现场监测区域的冲击危险状态,以便指导现场工作人员对高危区域进行实时解危及效果检验。

1 预警指标及综合预警方法

1.1 预警指标及其意义

近年来,多物理量冲击矿压预警方法得到推广应用^[8],有效克服了单一指标监测预警的弊端,根据冲击矿压机理,针对性地对采掘空间的应力场、震动场及能量场进行监测,从源头监防冲击矿压。根据相关研究^[9-17],用于监测应力场、震动场、能量场指标及其意义见表 1。

表 1 冲击矿压监测预警指标及意义

Table 1 Monitoring and early warning indices of rock burst and their significance

物理场	指标名称	指标公式	指标含义
	时序集中度 Q_{11}	$Q_{11} = \text{Var}(T) / \Delta \bar{T}$	计算相邻微震事件发生的时间间隔来反映微震序列的时序集中度, $\Delta \bar{T}$ 和 $\text{Var}(T)$ 分别为相邻微震事件发生时间间隔的平均值和方差
	时空扩散性 d_s	$d_s = (\bar{X})^2 / \bar{t}$	微震事件时间空间上发生的分散程度, \bar{X} 为顺序发生微震间的平均距离, m ; \bar{t} 为顺序发生微震间的平均时间间隔, d
震动场	时间信息熵 Q_1	$Q_1 = \frac{-(1/n) \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i}{\ln(n-1)}$	描述矿震事件演化过程中的非均匀性或有序性,其中, n 为某时间窗长的矿震事件总数; $p_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{t_n - t_1}$; t 为第 i 个矿震发生的时间; p_i 取值 0~1
	总应力当量 Q_{32}	$Q_{32} = \frac{1}{ST} \sum \sqrt{E_i}$	单位面积、单位事件内的应力当量综合作为总应力当量指标, E_i 为统计区域内第 i 个微震事件的能量, J ; S 为面积, m^2 ; T 为统计时间, d

续 表

物理场	指标名称	指标公式	指标含义															
	活动度 S	$S = 0.1171 \lg(N + 1) + 0.029 \ln \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{1.5M_i} + 0.015M$	微震频度、平均能级或平均释放能量、最大能级以及微震空间分布的集中度及记忆效应。其中, N 为微震总数; M_i 为能级, M 为最大能级。强矿震理论上发生在 S 值增强后															
震动场	算法复杂性 AC	$AC = \ln n / (n \ln M)$	用来表征一个有限序列所代表的动力系统的周期性和混沌性, 其中 n 为某时间窗内能级变化次数; $M = M_{\max} - M_{\min} + 1$															
	缺震	$b = \frac{0.4343}{M - M_0}$	如果一个区域一段时间内的短期平均能级比长期平均能级偏小的话, 则可能发生一些较大微震来弥补, \bar{M} 为统计时段平均能级; M_0 为起始能级															
能量场	冲击变形能 W_ε	$W_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{E_1} - \varepsilon_{E_0}}{\varepsilon_{E_1} - \varepsilon_{E_0}}, \varepsilon_{E_i} = \sum_{i=1}^N \sqrt{E_i}$	ε_{E_0} 为初始应变值; ε_{E_1} 为临界应变值; E_i 为第 i 个震动事件释放的能量值															
			v_p 为 P 波在某点的波速, m/s; v_p^a 为平均波速, m/s															
应力场	震动波层析成像	$A_n = \frac{v_p - v_p^a}{v_p^a}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>危险性</th> <th>应力集中</th> <th>波速异常系数 $A_n / \%$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>无</td> <td><5</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>弱</td> <td>5 ~ 15</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>中</td> <td>15 ~ 25</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>强</td> <td>>25</td> </tr> </tbody> </table>	危险性	应力集中	波速异常系数 $A_n / \%$	0	无	<5	1	弱	5 ~ 15	2	中	15 ~ 25	3	强	>25
危险性	应力集中	波速异常系数 $A_n / \%$																
0	无	<5																
1	弱	5 ~ 15																
2	中	15 ~ 25																
3	强	>25																

1.2 综合预警方法

1.2.1 临界值确定及归一化

由于各项预警指标的计量单位不统一, 并且各指标还存在不同趋势的异常敏感信息, 如低值异常(负向异常)、高值异常(正向异常)以及高低值异常(双向异常), 于是, 为了统一分析各指标, 应先将指标的绝对值转化为相对值。对于正(负)向及双向指标, 用不同的算法进行数据归一化处理:

$$W_{ij} = \frac{e - e^{1-F_{ij}(t)}}{e - 1} \quad (1)$$

式中, $F_{ij}(t)$ 为指标在统计时间内的异常隶属度, 取值 0 ~ 1, 其中 $F_{ij}(t)$ 计算可表示为

$$\text{正向: } F_{ij} = (R_{ij} - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (2)$$

$$\text{负向: } F_{ij} = (R_{\max} - R_{ij}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (3)$$

$$\text{双向: } F_{ij} = R'_{ij} / R'_{\max} \quad (4)$$

式中, R_{ij} 为指标在第 j 个时间序列中第 i 个值; R_{\max} 为指标序列最大值; R_{\min} 为指标序列最小值; $R'_{ij} = |R_i - R_{\text{avg}}|$; R'_{\max} 为 R'_{ij} 序列的最大值; R_{avg} 为指标序列的平均值。

指标归一处理后, 其冲击危险等级划分见表 2。

1.2.2 指标权重确定

以混淆矩阵形式记录冲击矿压监测预警, 如图 1 所示^[9,18]。当实际情况为真, 如果预测为真, 则记作 True Positive(TP); 如果预测为假, 则记为 False Negative(FN)。当实际情况是假, 如果预测为假, 则记为 True Negative(TN), 如果预测为真, 则记为 False Posi-

tive(FP)。将预测为真, 实际也为真的事件数与所有预测为真的事件数的比值称为精确率(P); 预测为真, 实际也为真的事件数与实际为真的事件数的比值称为召回率(R); 预测准确的事件数与总事件数的比值称为准确性(A)。基于这个混淆矩阵, 采用分类模型评估方法来评估每个指标的预测准确度。

表 2 冲击危险判别准则

Table 2 Criterion of rock-burst risk

冲击危险等级	冲击危险状态	冲击危险指数
A	无	≤0.25
B	弱	0.25 ~ 0.50
C	中	0.50 ~ 0.75
D	强	≥0.75

		实际状况		$F=2/(1/R+1/P)$
		真	假	
预警状况	真	“真-真”(TP)	“真-假”(FP)	精确率 $P=TP/(TP+FP)$
	假	“假-真”(FN)	“假-真”(TN)	负向预测值 $=TN/(TN+FN)$
		召回率 $R=TP/(TP+FN)$	特异性 $S=TN/(FP+TN)$	准确性 $A=(TP+TN)/(TP+TN+FN)$

图 1 混淆计算矩阵

Fig. 1 Obfuscation computing matrix

在混淆矩阵的计算过程中, 首先对前文中的“真、假”进行定义, 其中“真”可表示为发生冲击矿压或大能量事件矿震“假”为未发生冲击矿压或大能

量事件,这里对大能量事件进行定义^[1],掘进期间微震事件能量超过 10⁴ J,回采期间超过 10⁵ J,将其称为大能量事件。

根据前文中冲击危险等级的划分,对弱、中强等级的 F -score 值分别用 F_w, F_M 和 F_s 表示,其中第 i 个指标的评分值即为 F_{icom} 。强冲击危险等级对于预测冲击矿压来说比弱冲击危险和中等冲击危险等级更重要,可使用下列公式对每种等级赋予一个权重,并计算综合值:

$$F_{icom} = \frac{0.75F_s + 0.50F_M + 0.25F_w}{0.75 + 0.50 + 0.25} \quad (5)$$

其中,第 i 项指标的权重可表示为

$$a_i = \frac{F_{icom}}{\sum F_{icom}} \quad (6)$$

2 云平台架构及软件编制

2.1 云平台系统架构

冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台主要包括硬件、平台支持软件及云技术 3 个部分。硬件主要是用于数据采集、构建客户端至服务器端的网络环境、传输和存储并显示从客户端传来的数据信息,包括矿区数据采集设备及局级、监管客户的展示设备;服务器目前设置于中国矿业大学煤炭资源安全开采国家重点实验室,云平台已在临矿集团古城煤矿,彬长集团胡家河、孟村煤矿及兖矿、徐矿集团等 13 个矿井进行应用。

平台支持软件部分主要用于数据的生成、传输和存储,由客户端分析人员对基础数据进行处理后,实时上传标准化格式数据至服务器并存储,包括矿区数据采集软件及矿区、局级、监管部门的 Web 浏览器等。

基于信息的实时传播及云技术,冲击矿压专家利用网络终端获取多参量综合预警信息,并根据风险判识模型确立的冲击危险等级,实施远程诊断及决策。

冲击矿压风险智能判识及多参量监测预警云平台架构如图 2 所示。平台最底层是由现场微震、应力在线、钻屑等监测手段形成监测网络,数据采集后进行预处理,以标准化格式通过远程数据连接实时上传至服务器;研究人员通过调取服务器数据,利用监测预警分析软件^[15]、震动波 CT 反演软件等得到处理后的预警结果,基于风险判识模型及危险等级确定准则,判定矿区工作面的危险状态并制定相应的防治及管理措施,指导现场工作;矿区用户通过 Web 浏览器下载预警和防治意见,达到防冲的目的。

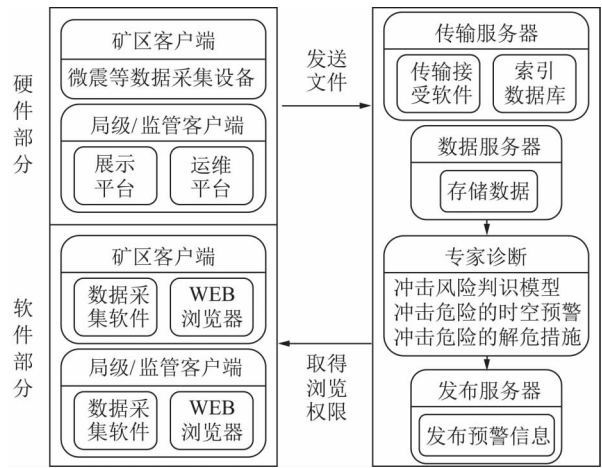


图 2 云平台架构

Fig. 2 Architecture of cloud platform

数据发送和接受采用主从时(C/S)网络架构,客户端的程序运行在分析仪上,服务端的程序运行在服务器上,浏览发布模块采用(B/S)模式。

2.2 云平台软件编制

云平台软件系统包括服务器端、客户端及浏览器发布 3 个部分,客户端主要与矿井微震监测分析软件、震动波 CT 反演软件及其他应力、地音等相关数据处理软件的交互,将以上软件进行分析操作后的数据以标准化格式上传至服务器。服务器主要完成数据处理、添加客户端、界面显示等功能,数据处理包括利用内嵌于软件的多参量综合预警、冲击变形能时空预警及微震数据定位、频次能量展示等任务;添加客户端主要完成客户端的增减,并发送端口号至指定矿区、局级单位;界面显示主要完成显示各个客户端的连接状态、底图显示、预警信息及防治措施展示等功能;浏览器发布通过查询各矿井最新上传的文件,实施显示并根据用户权限提供下载。

与其他冲击矿压监测预警平台^[19-20]的区别是,冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台是基于 GIS 地理信息系统的云平台,通过将矿井原有的 AutoCAD 采掘工程平面图转换至与地理坐标相对应的 GIS 底图,该底图不仅包括原 CAD 图中的点、线信息,还可赋予工作面、巷道等属性,这就为智能拾取判识奠定了基础。通过对服务器数据的调取,利用底图中工作面、巷道的属性信息实现矿井采掘、监测、防治信息的一张图展示。

如图 3 所示,云平台功能模块主要包括时序预警及空间预警模块。其中时序预警模块包括:① 矿井冲击监测预警信息卡片;② 采掘区域微震事件日能量、频次信息查询;③ 采掘区域应力在线数据查询。空间预警模块包括:① 采掘区域震动波 CT 反演预警

云图; ② 采掘区域冲击变形能空间预警云图; ③ 微震事件空间定位; ④ 监防措施空间显示。

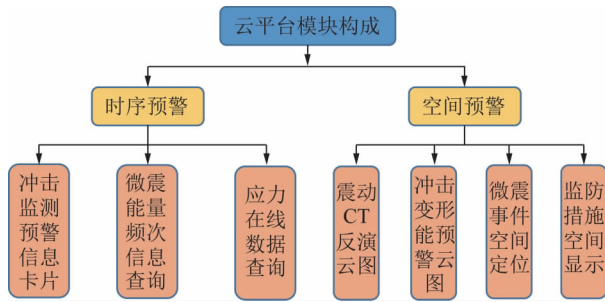


图 3 云平台总体功能

Fig. 3 Overall functionality of cloud platform

2.3 监测与防治信息化融合

云平台监测预警体系形成后,可用于指导现场冲击矿压相关工作。通过监测的时序预警与空间预警,首先在时间上结合现场工作面采掘工作进程,确定周期来压、见方等特殊回采位置时的危险性。其次在空间上通过预警云图及微震事件定位等确定工作面煤岩高应力区域。云平台通过录入现场防治信息的位置及动力现象信息,与高应力区预警相结合,若高应力区防治措施欠缺且钻屑、大直径钻孔等措施施工过程中动力现象明显,则需补强此区域的解危强度。若

预测高应力区通过实施解危措施后,预警体系重新评定后危险程度有所降低,则说明此区域的补强解危行之有效。若补强后冲击危险性未降低,则需采取其他措施进行再次解危。综上,通过监测与防治信息的融合,监测指导防治,防治反馈监测。

3 云平台工程应用实例

根据冲击矿压风向智能判别及多参量监测预警云平台的设计思想,目前已在全国 13 个矿井进行试验应用,以古城煤矿为实例进行说明。

3.1 综合预警信息卡片

用于冲击矿压监测的设备与方法多种多样,根据现场微震、应力在线等设备及钻屑法等采集所得数据,如图 4 所示,通过提取存储与服务器中的数据并对其进行分析,得到古城煤矿冲击矿压监测预警信息卡片,其中包含工作面名称、24 h 内最大应力、30 d 内最大应力、30 d 内矿震最大能量及综合预警值,其中综合预警值是以第 1,2 节中冲击矿压监测预警体系为基础,通过对选取时间段、选取区域内的应力及微震数据计算,得到各指标预警值及综合预警结果。



图 4 综合预警信息卡片

Fig. 4 Comprehensive warning card

2020 年 2 月以来,古城煤矿 3105 工作面应力在线数据未上传至服务器云数据库,因此主要得到微震

数据,24 h 及 30 d 内的最大微震事件能量分别为 5.0×10^3 , 9.8×10^4 J; 综合预警值为 0.54,属于中等冲

击危险。现场需加强监测管理,防治措施根据现场动力现象强弱选择是否加强。

基于云技术,监测数据实时上传至数据库,云平台实时计算预警结果,当出现大能量微震事件或预警值持续较高时,可实时指导现场加强防治卸压工作,降低危险区动静载应力,主动卸压做到有效防治。

3.2 监防信息一张图

综合预警信息卡片主要用于矿井采掘工作面的时序预警,而监防信息一张图用于工作面的空间预警,实时监测工作面震动场、应力场及能量场预警信息。如图 5 所示,功能模块包括微震数据查询定位、

震动波 CT 反演空间预警云图,冲击变形能预警云图、应力在线数据云梯及钻屑、大直径钻孔施工信息,通过不同的功能模块按钮在一张底图上实时显示预警结果。

图 5(a) 中为古城煤矿 3105 工作面钻屑及大直径钻孔信息,根据信息中的动力现象,实时反映煤岩应力状态,并与 CT 反演、冲击变形能云图预警相结合,图中超前工作面 200 m 范围内应力较高,此区域大直径钻孔间距 1.5 m,钻屑施工有所欠缺,因此需加强超前区域的钻屑监测工作,并在高危区域补打大直径钻孔。

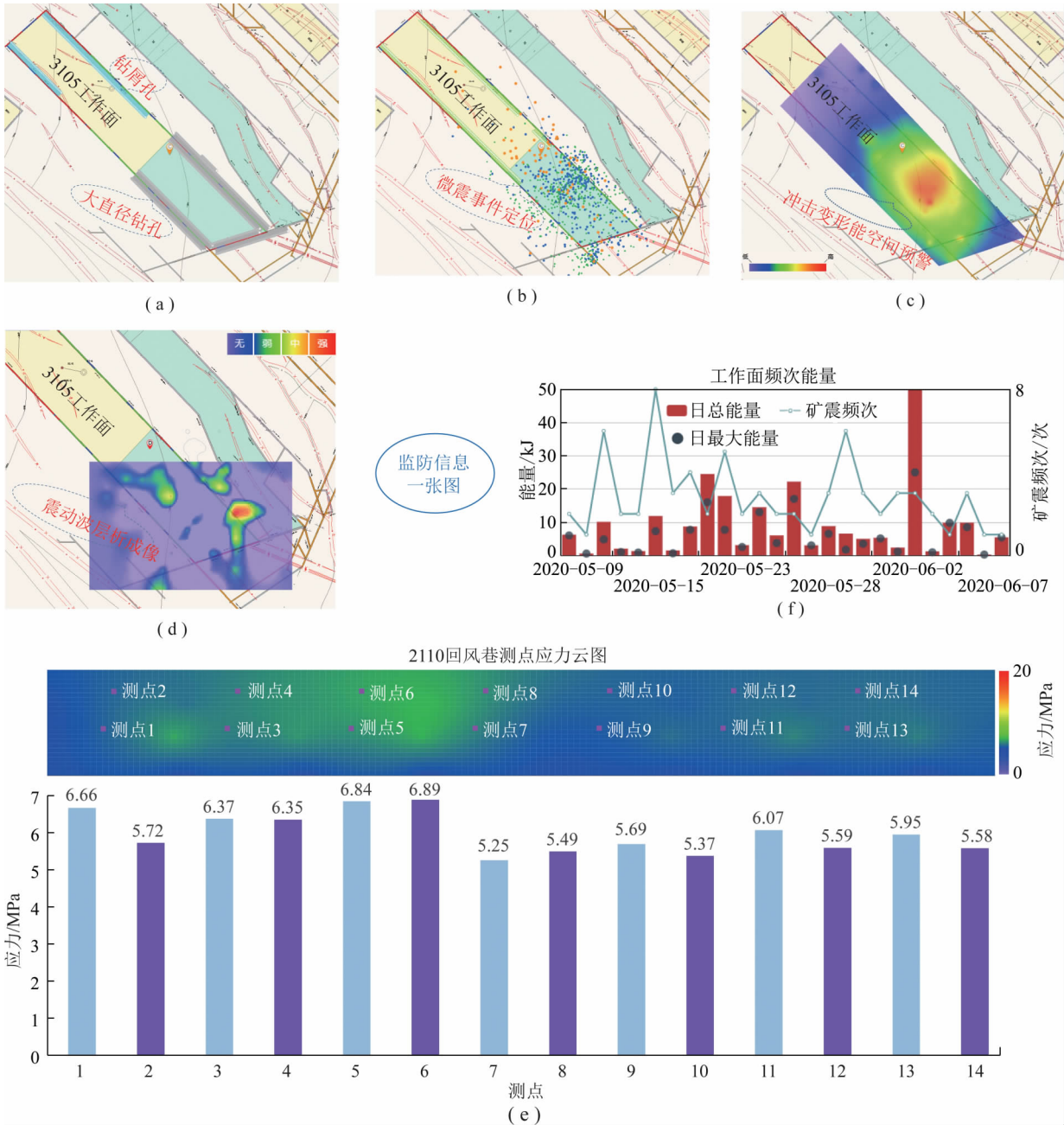


图 5 监防信息一张图

Fig. 5 "One picture" of monitoring and prevention

图 5(b), (f) 分别为 2020 年 2 月 3105 工作面微震事件定位情况及微震日能量、频次曲线。微震事件主要分布于工作面前方 200 m 范围内, 其中最大能量矿震数量级为 10^4 J。根据能量频次曲线, 2 月 14, 15 日微震频次及总能量较高, 分别达到 35, 29 次及 1.50×10^5 , 1.78×10^5 J, 近 7 d 工作面煤岩较为稳定, 事件数量及能量较小。因此该模块可实时准确反映工作面区域的震动场分布。

图 5(e) 为应力在线监测情况, 通过调取数据库中的应力在线采集信息, 实时展示采集点深孔及潜孔的应力数值, 并利用插值法得到两巷内监测区域的应力分布情况。超前工作面 250 m 范围内, 应力在线深浅孔应力监测数据均在 5 ~ 7 MPa。根据插值结果, 超前工作面 40 ~ 80 m 内应力相对较高, 其余区域应力较小。

图 5(c), (d) 分别为震动波 CT 反演及冲击变形能云图。冲击变形能结果与微震事件定位结果耦合性较好, 超前工作面 50 ~ 200 m 内冲击变形能指标较高, 说明此区域内能量场较为活跃, 需加强卸压解危工作; 由震动波 CT 反演结果来看, 3105 轨道巷距工作面 150 ~ 200, 240 ~ 290 m 内靠近 3106 采空区侧应力较高, 工作面超前 100 ~ 150 m 内应力较高, 高冲击危险区域相对冲击变形能较小, 因此通过多参量预警相结合, 对高危险区加强卸压工作, 防止冲击显现。

4 结 论

(1) 冲击矿压风险智能判识及多参量监测预警云平台实现了矿井微震、应力等监测数据的高效实时传输, 并通过浏览器发布实现矿区、局级、监管单位及科研团队的实时数据调取及动态展示, 可根据数据分析及冲击危险等级划分, 指导现场防治工作。

(2) 基于煤岩震动场、应力场及能量场与监测预警指标的关系的云平台, 选取并应用了包括时间信息熵、总应力当量等 7 个用于监测震动场的指标, 用于监测应力场的指标为震动波 CT 反演及用于监测能量场的指标为冲击变形能, 并通过监测信与防治信息化的融合, 做到了监防互馈。

(3) 利用搭建的云平台在 13 个矿井的成功应用, 在古城煤矿 3105 工作面的实际应用, 表明云平台综合预警信息及监防信息一张图能有效分析并指导现场冲击矿压的监防工作。

参考文献(References):

[1] 窦林名, 赵从国, 杨思光, 等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 1-3.

- [2] 姜福兴, 曲效成, 于正兴, 等. 冲击地压实时监测预警技术及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 59-64.
JIANG Fuxing, QU Xiaocheng, YU Zhengxing, et al. Real time monitoring and measuring early warning technology and development of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 59-64.
- [3] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306-318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [4] GU S T, WANG C Q, JIANG B Y, et al. Field test of rock burst danger based on drilling pulverized coal parameters[J]. Disaster Advance, 2012, 5(4): 237-240.
- [5] 刘金海, 翟明华, 郭信山, 等. 震动场、应力场联合监测冲地压的理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 353-363.
LIU Jinhai, ZHAI Minghua, GUO Xinshan, et al. Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 353-363.
- [6] 窦林名, 李振雷, 张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 41-46.
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 41-46.
- [7] 于庆, 赵新权, 黄强, 等. 新型智能多参数检测报警仪的研制[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(6): 8-10.
YU Qing, ZHAO Xinquan, HUANG Qiang, et al. Development of novel intelligent multi-parameter detection alarm[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2001, 28(6): 8-10.
- [8] 姜福兴, 杨光宇, 魏全德, 等. 煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 333-339.
JIANG Fuxing, YANG Guangyu, WEI Quande, et al. Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time prewarning platform[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 333-339.
- [9] CAI W, DOU L M, ZHANG M, et al. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 232-245.
- [10] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104086.
- [11] LU C P, LIU G J, LIU Y, et al. Microseismic multi-parameter characteristics of rockburst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 76: 18-32.
- [12] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 803-811.
DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, et al. Monitoring and

- pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.
- [13] 夏永学, 康立军, 齐庆新, 等. 基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 2011-2016.
- XIA Yongxue, KANG Lijun, QI Qingxin, et al. Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecastion [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 2011-2016.
- [14] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1487-1491.
- HE Xueqiu, DOU Linming, MU Zonglong, et al. Continuous monitoring and warning theory and technology of rock burst dynamic disaster of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1487-1491.
- [15] 巩思园, 窦林名, 徐晓菊, 等. 冲击倾向煤岩纵波波速与应力关系试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 67-71.
- GONG Siyuan, DOU Linming, XU Xiaojun, et al. Experimental study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 67-71.
- [16] 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动波CT技术研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 238-244.
- DOU Linming, CAI Wu, GONG Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [17] 蔡武, 窦林名, 李振雷, 等. 微震多维信息识别与冲击矿压时空预测——以河南义马跃进煤矿为例[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2687-2700.
- CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Microseismic multidimensional information identification and spatiotemporal forecasting of rock burst: A case study of Yima Yuejin coal mine, Henan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2687-2700.
- [18] 陈为帅. 褶皱区域煤柱型冲击矿压前兆信息与监测预警指标研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Weishuai. Study on the precursor information and forecasting indices of pillar-rockburst in fold area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [19] 窦林名, 巩思园, 刘鹏, 等. 矿震冲击灾害远程在线预警平台[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 48-53.
- DOU Lingming, GONG Siyuan, LIU Peng, et al. Remote online early warning platform of mine seismic and bump disaster [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 48-53.
- [20] 姜福兴, 曲效成, 王颜亮, 等. 基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 199-206.
- JIANG Fuxing, QU Xiaocheng, WANG Yanliang, et al. Study on monitoring & control and early warning technology of mine pressure bump based on cloud computing [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 199-206.