

张修峰,曲效成,魏全德. 冲击地压多维度多参量监控预警平台开发与应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 013013.
ZHANG Xiufeng, QU Xiaocheng, WEI Quande. Development and application of multi-dimension multi-parameter monitoring and early warning platform of coalbursts[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 013013.

冲击地压多维度多参量监控预警平台开发与应用

张修峰¹, 曲效成², 魏全德²

(1. 兖矿集团有限公司 煤矿冲击地压防治研究中心, 山东 邹城 273500; 2. 北京安科兴业科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对兖矿集团有限公司下属冲击地压矿井数量多、地区分布广、条件差异性大、致冲机理复杂等导致的冲击地压防控难题, 通过冲击地压多参量联合监测预警方法研究、监测监控平台系统开发和现场实践, 开展了新形势下冲击地压监控预警新模式的探索。研究与实践结果表明: ① 通过在空间上进行冲击地压监测分区, 依据致冲因素进行监测参量选择与权重系数的设置, 可以实现冲击地压分类监测与预警, 提升了监测预警准确性; ② 提出“常规预警”与“特殊条件预警”相结合的预警机制, 可通过对某一特定测区的地质及开采技术因素分析, 定制各监测参量的权重系数, 提高预警算法的普适性和针对性; ③ 提出空间上井上与井下、时间上静态数据与动态数据、强度上采掘速度与预警指标、管理上预警与处置的四维数据分析理念, 通过对监测参量的多维度分析, 实现了监测数据的深度挖掘, 提高了冲击地压监测数据的利用效果; ④ 开发了平台系统, 实现了矿井与防冲研究中心、井上与井下、静态数据与动态数据、预警结果与现场处置措施等智能联动及自动上报功能, 提高了冲击地压监测预警和管理的时效性, 降低了人力成本。

关键词: 冲击地压; 监测预警; 平台; 多维度; 多参量

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2021)01-3013-10

Development and application of multi-dimension multi-parameter monitoring and early warning platform of coalbursts

ZHANG Xiufeng¹, QU Xiaocheng², WEI Quande²

(1. Coal Burst Prevention and Control Research Centre, Yankuang Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China; 2. Beijing Anke Xingye Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Yankuang Group Co., Ltd. has many coal mines that are suffering coalbursts. These coal mines differ from each other with different regions, different geological, and geotechnical conditions. From the perspective of the research center for coal burst prevention and control, researches on the multi-parameter joint monitoring and early warning method of coal burst, the development of the monitoring platform system, and the field practice, the exploration of the monitoring early warning mode of coal burst in the new situation have been conducted. Research results are as follows: ① The classification monitoring and early warning of coalbursts can be realized and the accuracy of monitoring and early warning can be improved by dividing coalburst monitoring area in space, selecting monitoring parameters and setting weight coefficients according to impact factors. ② A combined warning

收稿日期: 2020-05-22

修回日期: 2020-07-27

责任编辑: 李青

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904017, 51674014, 51634001); 山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02)

作者简介: 张修峰(1970—), 男, 山东鄄城人, 高级工程师, 长期从事现场冲击地压防治与研究方面的工作。E-mail: 415690468@qq.com

mechanism of "conventional warning" and "special condition warning" was proposed, which can be customized to set the weight coefficients of each monitoring parameter by analyzing the geological and mining technology factors in a specific survey area, aiming to improve the universality and pertinence of the early warning algorithm. ③ The concept of four-dimensional data analysis was put forward, including surface and underground of space, static data and dynamic data on the time, mining speed and early warning index in intensity, and early warning and disposal in management. ④ A platform system to realize intelligent linkage and automatic reporting functions, such as mine and coalburst prevention research center, surface and underground, static data and dynamic data, early warning results and on-site disposal measures has been developed, which improves the timeliness of monitoring early warning and management of coal burst, and reduced the labor cost.

Key words: coal burst; monitoring and early alarming; platform; multi-dimension; multi-parameter

据不完全统计,2011年以来,我国发生重大冲击地压事故27起,已造成300多人伤亡,摧毁巷道数千米,严重影响了矿山企业安全生产,且随着开采深度的不断增加,冲击地压灾害呈现“矿井数量快速增加、灾害程度越来越严重”的不良局面^[1-5]。

冲击地压监控预警是避免事故发生的关键手段之一。我国各矿山企业、科研单位、设备厂家经过十余年的研究、开发和实践,煤矿防冲监测手段不断丰富,对于单参量的防冲监测方法及装备取得了大量的研究成果,如应力监测^[6-7]、微震监测^[8-10]、钻屑量监测^[11]、声发射监测^[12-13]、电磁辐射监测^[14-16]、震动波CT监测^[17-18]等。然而,这些研究成果多是单参量的冲击危险性监测预警,其预警的准确性尚不能满足工程现场需要,对于多参量的冲击危险性监测预警方法及现场实践的研究成果相对较少^[19-23]。

从兖矿集团冲击地压防治现状出发,通过现场调研、预警方法研究、平台系统开发和现场实践,探索了新形势下冲击地压的监测监控新模式。

1 冲击地压监测预警存在的技术难题

1.1 全国冲击地压监测预警存在的问题

通过对我国近百座冲击地压矿井现场调研与分析,发现冲击地压矿井的监测预警与防治存在以下几个共性技术问题:

(1) 冲击地压监测参量和设备生产厂家多,造成各监测系统及不同厂家生产的同类系统之间难以建立统一规范的数据接口,各个冲击地压监测参量之间缺乏“时空”关联性,且多为单指标预警,预警结果无法实现实时联合分析,监测预警结果的准确性有待进一步提高。

(2) 冲击地压矿井配备了多套冲击地压监测系统,但是,现场应用中各系统单独设置预警指标,未实现多系统联合监测预警冲击地压。

(3) 部分监测预警参量缺失或独立,尤其是井上相关监测参量未能参与预警,导致冲击地压预警准确性受限。如地表沉降监测数据未能接入,缺乏井上与井下的联合预警。

(4) 缺乏动静态联动预警判别,已有的多参量联合监测预警仅仅实现了动态监测参量的联合分析,尚未实现动态-静态联合监测分析与预警,尤其是预评价结果与现场实际开采信息、卸压、支护等数据的动静联合监测预警尚待进一步研究。

(5) 监测预警结果与管理处置时效性差,部分已实现多参量联合监测预警的先进矿井,在出现预警时,仍需人工纸质审批与研判,造成预警处置时间过长。

(6) 冲击地压数据挖掘、分析利用程度低,受限于以上所描述的问题,加之现场专业技术人员数量不足,导致监测结果对现场生产、冲击地压防治工作的指导与监测装备投入不匹配。

1.2 兖矿集团冲击地压现状

兖矿集团自2001年6月起,先后在东滩、济三、南屯、赵楼等煤矿发生破坏性冲击地压20余次,共计造成4人死亡,7人重伤,983 m巷道破坏。近年来随着兖州矿区矿井开采深度、开采范围不断增大,受煤柱及厚硬覆岩影响的矿井,弹性震动、冲击波、矿震、煤炮等形式的动压显现时有发生。

随着兖矿集团陕蒙、新疆开发战略的快速推进,省外矿井依据《防治煤矿冲击地压细则》开展了煤层及其顶底板岩层的冲击倾向性鉴定和冲击危险性评价,其中石拉乌素煤矿、营盘壕煤矿和硫

磺沟煤矿为冲击地压矿井。兖矿集团下属冲击地压矿井有11座,见表1。

表1 兖矿集团冲击地压矿井分布
Table 1 Distribution of coal burst mines in Yankuang Group

地区	冲击地压矿井名称
山东济宁	南屯煤矿、兴隆庄煤矿、鲍店煤矿、东滩煤矿、济二煤矿、济三煤矿
山东菏泽	赵楼煤矿、万福煤矿
内蒙古鄂尔多斯	石拉乌素煤矿、营盘壕煤矿
新疆	硫磺沟煤矿

兖矿集团下属冲击地压矿井装备的监测系统有:应力在线监测系统(KJ743, KJ615, KJ550, KJ216和KJ24等)、微震监测系统(ARAMIS, SOS和KJ551)、地音监测系统(KJ479)和电磁辐射监测系统(KBD5)等,系统涉及的国内外生产厂家近10家。由于监测系统繁多,生产厂家各异,同类型不同型号系统的安装标准、性能参数及各矿建设标准、数据分析深度等均存在较大差异,导致数据挖掘、智能分析程度较低,且无法实现数据共享。

通过调研与分析,兖矿集团对冲击地压的监测与防治主要存在以下问题:①冲击地压矿井数量多;②冲击地压矿井地区性分布广,地质及开采技术条件差异性大,影响冲击地压发生的因素不同,冲击地压发生机理、监测预警机制各异;③监测装备多,生产厂商多,监测数据类型多;④监测数据与生产信息未能联合分析;⑤预警与处置措施的防冲

闭环管理多为人员汇报,高水平的防冲技术人员不足。

因此,亟需开展冲击地压多维度多参量监测预警方法研究,建立预警指标体系,开发平台系统。通过可视化方式进行冲击地压危险性综合展示与风险研判,为精准监管和施策提供科学支撑,提高冲击地压监测预警准确性和时效性,有效遏制冲击地压事故的发生。

2 冲击地压多参量监测预警方法

2.1 基于冲击地压监测预警的监测分区

为提高冲击地压监测预警的准确性,解决预警空间域的划分,实现“分类预警”,提出了冲击地压监测大分区与小分区的理念。冲击地压监测大分区为测区划分,暂以单个掘进工作面、单个回采工作面或上下山/大巷等单位进行划分,大分区监测预警主要体现区域性整体冲击危险性,可以根据该区域冲击地压发生的类型、影响因素等,选择监测参量,配置预警权重及预警指标。冲击地压监测小分区为局部监测分区,主要按照有扰动与无明显扰动进行划分,预警的区域以实测数据空间位置为坐标,在设定的“时间域、空间域”内进行冲击地压多参量联合监测预警,注重体现局部区域的冲击危险性。

冲击地压监测大分区与小分区划分及关系如图1所示。

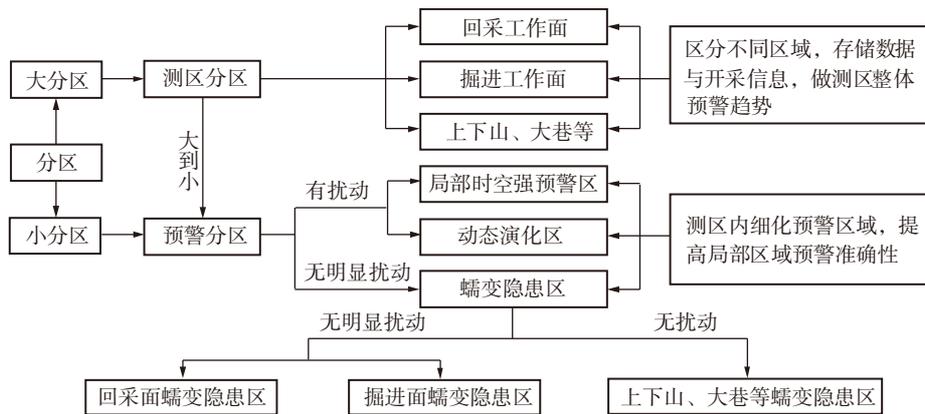


图1 “分类预警”指导下的监测区域划分

Fig. 1 Division of monitoring areas under the guidance of "classified early warning"

2.2 冲击地压多参量监测预警算法及指标体系

多参量预警算法主要针对致灾诱因的多源数据类型以及多参量预警指标的相互配合机制2方面开展。

(1) 全面的多源数据类型与基础指标

多参量预警的基础是海量信息,传统多参量预警通常以煤层应力、微震等监测数据为主,而忽略了与冲击地压相关的地质条件、开采信息、卸压施

工信息等。算法体系中数据集类型分为“资料信息”、“开采信息”和“监测信息”三大类16种基础指标,见表2。

(2)“常规预警”与“特殊条件预警”相结合的预警机制

预警机制采用“常规预警”与“特殊条件预警”相结合的方式进行设计。常规预警模型对16项指标采用权重法进行耦合计算,文献[19]和[20]已有论述。首先根据基础指标对于冲击危险的表征程度分配权重系数 k ,以微震监测指标为例,对表2中编号为4~8的5个微震基础指标进行归一化的权重分配,得到微震监测预警指标 I_{wz} ,采用相同的方法对其他类型数据进行处理;然后根据不同类型数据对冲击危险性影响程度进行权重 K 值分配(图2中 $K_1 \sim K_8$),最终得到监测区域的整体危险程度,如式(1)所示。常规预警指标计算的数据类型、指标全面,其预警结果反映监测区域的整体冲击危险性。

表2 数据类型与基础指标分类

Table 2 Data type and basic index classification

数据分类	基础指标
资料信息指标	1. 冲击危险性评价指标
	2. 水文条件指标
开采信息指标	3. 采掘强度指标
微震监测指标	4. 微震日最大能量事件能量异常率指标
	5. 微震日事件总能量异常率指标
	6. 微震吨煤能量释放率指标
	7. 微震日事件总频次异常率指标
	8. 微震日大能量事件频次指标
煤层应力监测指标	9. 测点应力值指标
	10. 测点应力增幅值指标
	11. 测点应力增速值指标
支架阻力监测指标	12. 支架阻力揭示的来压状态指标
钻屑量监测指标	13. 钻屑量监测指标
地音监测指标	14. 地音能量异常率指标
	15. 地音频次异常率指标
顶板离层监测指标	16. 顶板离层监测指标

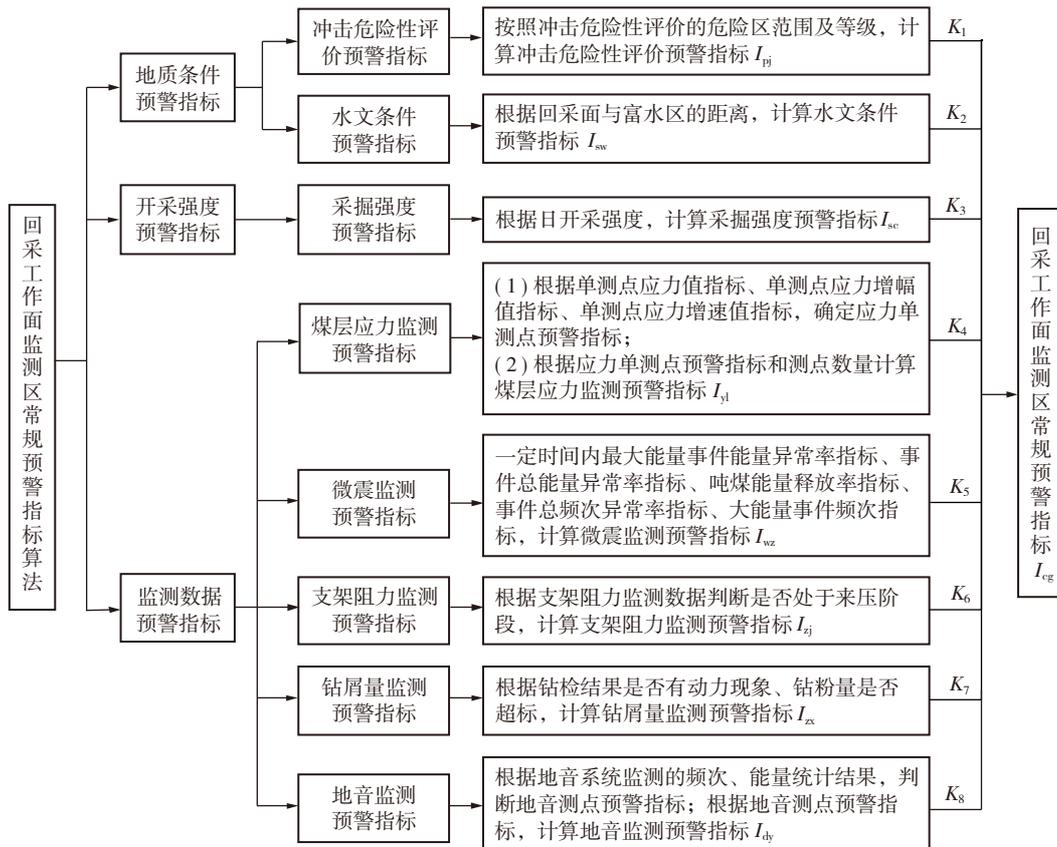


图2 常规预警指标运算机制

Fig. 2 Operation mechanism chart of conventional early warning indicators

$$I_{cg} = K_1 I_{pj} + K_2 I_{sw} + K_3 I_{sc} + K_4 I_{yl} + K_5 I_{wz} + K_6 I_{zj} + K_7 I_{zx} + K_8 I_{dy}$$

(1)

特殊条件预警是对常规预警方法的补充,规避了极端异常指标在权重法体系下被淹没的特殊情况,如,石拉乌素煤矿冲击地压的发生主要受多层

厚硬砂岩悬臂梁结构影响,在厚硬砂岩断裂时产生大能量微震事件。微震大能量事件是厚硬岩层断裂、运动的表征参量之一,因此,大能量微震事件发

生时可直接触发特殊条件预警,可对常规预警进行有效补充,提高预警针对性,特殊条件预警算法的判别流程如图3所示。

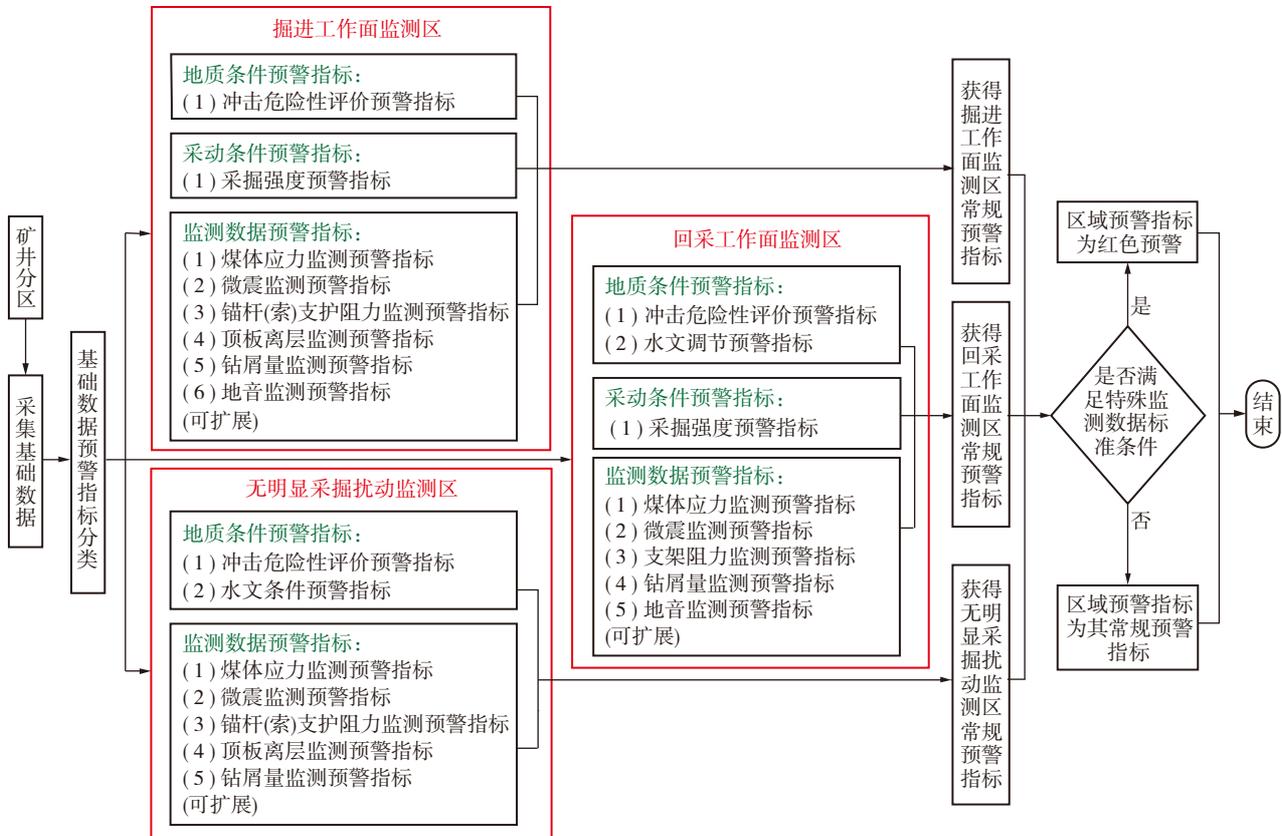


图3 特殊条件预警算法的判别流程

Fig. 3 Discrimination process of early warning algorithms in special conditions

3 监控预警平台系统开发

3.1 平台系统构建

在文献[20]提出的平台技术构成包含监测硬件、分析软件及预警指标3个部分的基础上,针对兖矿集团自身条件,补充与优化了平台系统的构建内容,主要有数据库建设、数据信息标准化建设、风险动态分析模型建设、大数据挖掘与分析、风险指标体系与管控建设5个方面的主要内容,如图4所示。

3.2 基于多维度监测分析的平台功能设计

为了充分挖掘监测数据,提高数据利用率,提出了空间上井上与井下、时间上静态与动态数据、强度上采掘速度与预警指标、管理上预警与处置的四维数据分析理念。

空间维度上,实现井上与井下监测范围的全覆盖,自地表至采场空间范围内所有冲击地压影响因素对应的监测参量均需要参与预警,数据分析与展示需要同时考虑地表沉降、覆岩断裂运动(微震事

件、顶板离层)、媒体应力变化(煤层钻孔应力监测)、巷道围岩变形(变形量监测)、围岩应力变化(锚杆索应力)等,并根据不同测区的致冲原理,分配不同监测参量的预警权重系数。

时间维度上,实现静态与动态数据的全覆盖,平台系统定期录入与更新测区冲击危险性评价结果、煤层厚度、覆岩分布、地质构造、水文条件等静态数据,在此基础上,对应地将微震、钻孔应力、锚杆索应力、钻屑量、地表沉降、突水等动态监测数据与静态数据进行耦合分析,从而实现采、掘过程中的冲击地压监测预警。

强度维度上,实现采(掘)工作面采(掘)速度与动态监测预警指标的联合分析。通过矿井上报的实际采掘信息与对应测区内各个单参量预警指标及综合预警指标的联合分析,可以确定不同测区内合理的采掘速度和采掘扰动影响范围,进而确定测区及矿井合理的开采强度。

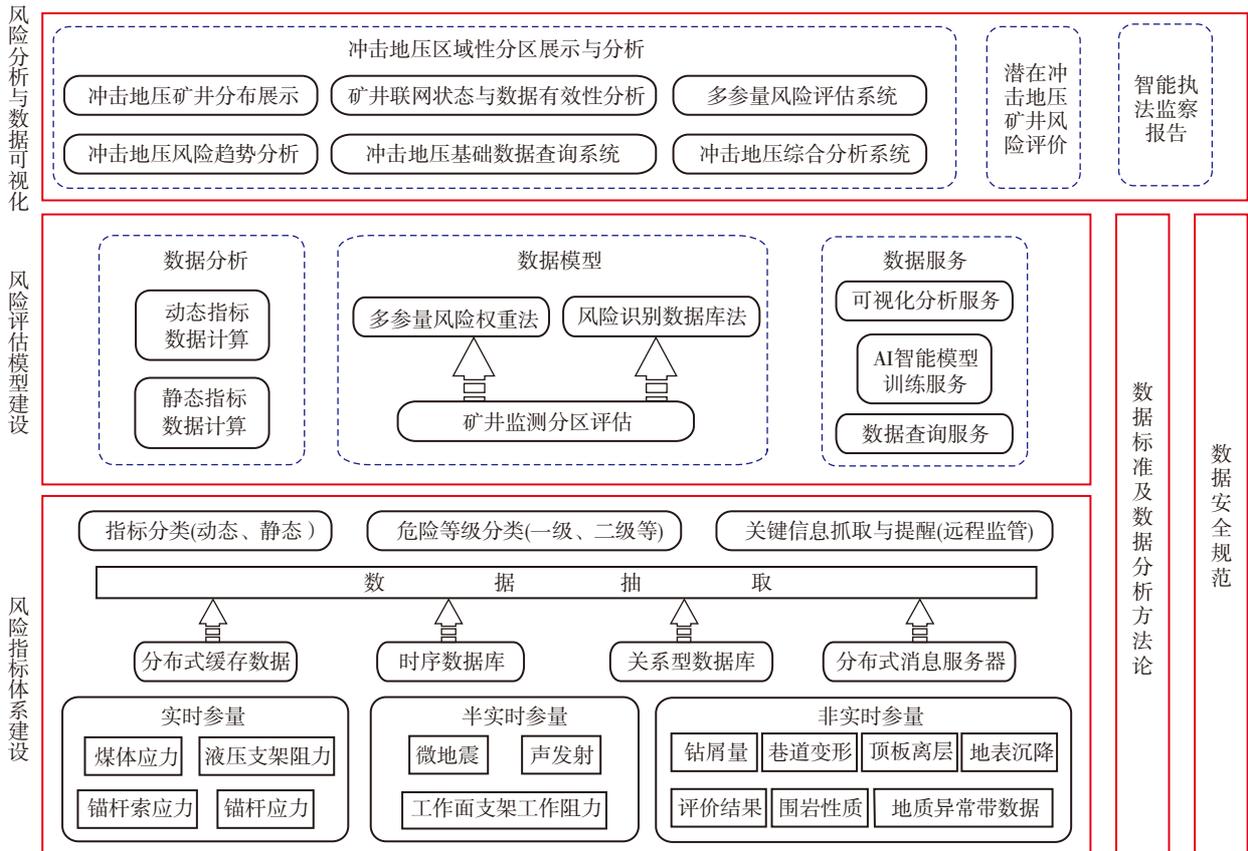


图4 平台系统建设内容及技术体系

Fig. 4 Platform system construction content and technical system diagram

监控与管理维度上,通过平台系统对“预警→上报→处置→现场实施→监测指标校验”的全过程监控与“留痕”备查,监控与管理出现漏洞时,平台系统在应用矿井自动提示,并上报上级监控与管理单位,进而实现监控与管理上的智能研判。

在文献[20]已有研究与开发基础上,以石拉乌素煤矿为例,结合四维冲击地压预警理念,对平台系统展示与分析软件进行了升级,平台系统三维主界面主要有系统标题与菜单栏、三维矿区展示、监测区预警信息、系统图例和地质生产信息控制栏五大模块组成,如图5所示。

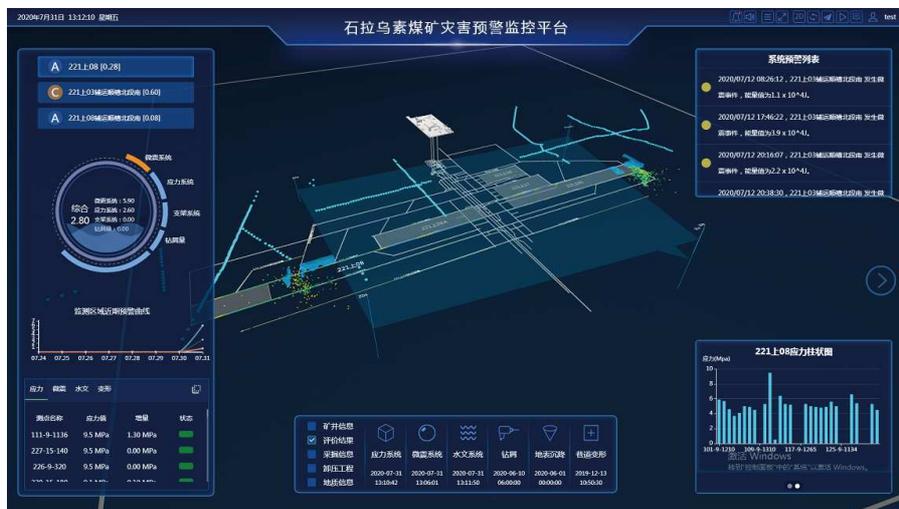


图5 基于四维监测分析的平台系统软件主界面设计

Fig. 5 Main interface design of platform system software based on four-dimensional monitoring analysis

系统标题栏模块,主要用于矿区信息、矿图、显示时间域、能量范围等参数的设置。

菜单栏模块,主要包含预警处理及信息查询(未处理提示)、声光报警、2D与3D界面切换和历史动态回放(某测区设置时间范围内的生产信息、静态数据、动态监测数据与预警结果的自动动画播放)。

三维矿区展示模块,可以实现矿井工业场地、开拓巷道、准备巷道、开采巷道、水文信息、岩层分布信息、评价结果、地表沉降监测、冲击地压在线监测(应力、微震、支架阻力等系统测点位置、运行情况及其监测数据)、生产信息(采掘进尺)和现场施工信息(卸压、爆破、钻屑、支护)等全类型数据的三维展示,空间上自地表至井下全覆盖,时间上根据设置可动态查看。

测区预警信息模块是将矿井监测区域分为独立的预警单元,每个预警单元将随着静态数据(评价、地质信息等)、动态监测数据(微震、应力、钻屑等)、生产信息和防治工程信息的变化而调整预警权重系数。

地质生产信息控制模块,主要用于地质信息(岩层分布、煤层条件、构造、水文等)、采掘信息(采掘进尺及空间位置)和现场工程信息(卸压钻孔、爆破、钻屑)的定期录入与更新,为分析确定合理开采强度、某采(掘)面扰动影响范围、采掘面间安全距离与防冲规定的要求、预警与处置措施闭环管理等提供基础条件。

4 平台系统的现场应用

以石拉乌素煤矿为工程背景,平台预警算法在文献[20]的基础上进行升级,增加、设置了较为灵活的基础指标筛选及权重系数配置方案,可通过对某一特定监测区的地质开采条件特点的分析,进行定制化设置,提高系统普适性。

4.1 多参量基础指标及权重系数的确定

以石拉乌素煤矿221_上01工作面为例,该工作面平均埋深约690 m,工作面斜长280 m,煤层厚度平均5.13 m,煤层单轴抗压强度22 MPa,顶板以硬厚砂岩组为主,工作面最大推进速度11.2 m/d。该工作面冲击地压主要受到厚硬砂岩悬臂、断裂,动载扰动影响,因此,应采用以微震大能量事件及应力突增指标为特殊条件预警的主要指标。

(1) 权重系数确定原则及现场数据选择

经动态监测数据与静态评价结果对比可知,221_上01工作面动态监测数据与静态评价结果具有较高的一致性,即评价得到中等冲击危险区域的动态实测指标明显高于弱冲击地压危险区域,据此,以两类区域内各基础指标的异常程度作为权重系数的确定依据。工作面冲击地压危险区划分如图6所示。

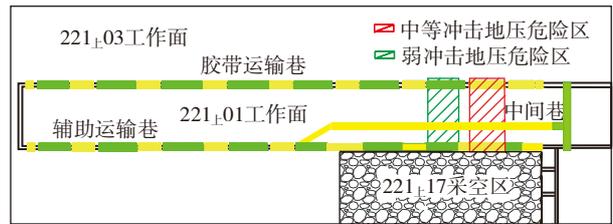


图6 221_上01工作面危险区划分

Fig. 6 Division diagram of dangerous area of working face 221 upper 01

图2中给出8类综合预警指标的参量,以微震监测和煤层应力监测为例,对各参量权重系数的确定方法进行示例性说明。选取221_上01工作面中等冲击地压危险区(1 980 ~ 2 190 m)和弱冲击地压危险区(1 830 ~ 1 980 m)实测数据进行对比分析,其中弱冲击地压危险区选取时间段为2019-11-12—12-06,累计推进138.9 m;中等冲击地压危险区选取时间段为2019-12-20—2020-01-13,累计推进137.5 m,见表3。

表3 工作面危险区划分及回采时间统计

Table 3 Dangerous area division and mining time statistics of working face

危险等级	距离开口/m	时间
中等冲击地压危险	[1 380, 1 550]	2019-07-17—2019-08-18
	[1 730, 1 830]	2019-10-27—2019-11-11
	[1 980, 2 190]	2019-12-11—2020-01-18
弱冲击地压危险	(1 550, 1 730)	2019-08-19—2019-10-26
	(1 830, 1 980)	2019-11-12—2019-12-10

对比表2中编号为4~8的5个微震基础指标、编号9~11的3个应力指标在中等冲击地压危险区域和弱冲击地压危险区的占比情况,得到各基础指标对冲击危险的实测变化量(其中,微震日总能量的统计情况如图7所示),并根据变化量的占比情况进行归一化的权重分配(即:某一基础指标权重系数 k 值等于其自身变化量除以所有基础指标变化量的总和,其中变化量为负数的不参与计算),得到各指标权重系数取值见表4。采用同样的方法对其他基础

指标进行统计分析,得到各基础指标权重系数见表5。

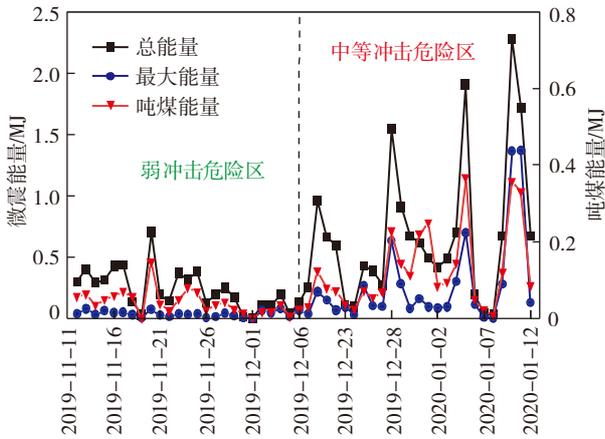


图7 不同阶段微震日能量对比关系
Fig. 7 Relationship between daily energy of microseisms in different stages

4.2 不同条件工作面的系数对比分析

赵楼煤矿7301工作面平均埋深约1 000 m,工作面斜长230 m。工作面具有典型的巨野煤田千米深井、特厚煤层、薄-中厚基岩、厚表土层等特点,采用以应力监测及微震数量为主要的预警原则。采用与石拉乌素煤矿相同的权重系数确定方法,通过一段时间的实测数据分析,得到赵楼煤矿基础指标的权重系数,见表5。据此,平台预警机制通过权重系数k值的调整及特殊条件预警的补充,可同时满足不同赋存条件下监测预警的需要,且预警权重系数可应用AI智能模型训练进行自学习与调整。

平台系统经过在石拉乌素煤矿和赵楼煤矿的现场实践,应用了“常规预警”与“特殊条件预警”相结合的预警机制后,平台系统监测预警结果较原有预警算法准确,现场应用效果显著提高。

表4 不同危险区微震、应力预警指标对比统计

Table 4 Comparison of microseismic and stress early warning indexes in different risk areas

基础指标	弱冲击危险区	中等冲击危险区	变化量/%	权重系数k	
微震监测	微震总能量/J	2.31×10^5	6.86×10^5	196.97	0.19
	微震总频次/次	69.68	36.8	-47.19	0
	微震吨煤能量释放/J	4.25×10^4	1.26×10^5	196.47	0.18
	微震大能量事件频次($\geq 10^4$ J)/次	5.52	9	63.04	0.06
	微震最大事件能量/J	3.85×10^4	2.71×10^5	603.90	0.57
煤层应力监测	应力值指标/%	4.93	6.33	128.40	0.35
	应力增幅平均值/%	22.11	23.15	135.69	0.36
	应力增幅最大值/%	108.30	180.50		
	应力增速平均/%	5.51	5.04	106.58	0.29
	应力增速最大/%	52.44	63.81		

表5 石拉乌素煤矿与赵楼煤矿预警参量的选择及其权重系数

Table 5 Early warning parameter selection and weight quantification between Shilawusu Coal Mine and Zhaolou Coal Mine

矿井及工作面基础指标及k	石拉乌素煤矿 221 _上 01工作面	赵楼煤矿 7301工作面
冲击危险性评价指标	0.50	0.70
水文条件指标	0.50	0.30
事件总频次异常率指标	0	0.35
事件总能量异常率指标	0.19	0.15
最大能量事件能量异常率指标	0.57	0.20
大能量事件(10^3 J)频次指标	0.06	0.15
吨煤能量释放率指标	0.18	0.15
测点应力值指标	0.34	0.30
测点应力增幅值指标	0.38	0.20
测点应力增速值指标	0.28	0.50

5 结论

(1) 提出了冲击地压监测预警大分区与小分区相结合的预警分区方法,监测上实现分区分类监测,预警上实现大分区整体预警与小分区局部预警相结合,提高了冲击地压监测参量选择的针对性和平台系统现场适用性。

(2) 提出了“常规预警”与“特殊条件预警”相结合的预警机制,通过石拉乌素煤矿和赵楼煤矿的现场应用,分析总结了常规预警中各预警指标权重系数基于实测数据的调整方法,并在平台软件中进行AI智能模型训练功能的开发,实现了平台系统对于权重系数的自学习与智能修正。

(3) 基于原有的平台系统进行升级开发,实现

矿井与防冲研究中心、井上与井下、静态与动态数据、预警结果与现场处置措施等智能联动及自动上报功能,提高了冲击地压监测预警和管理的时效性,解决了兖矿集团存在的部分防冲难题,降低了人力成本。

(4) 提出的冲击地压多维度多参量监测预警方法、预警体系及指标确定方法虽已有现场实践,但是,对于“一面一分类的预警方法、预警体系、指标设置及优化”和“现场显现案例库”的建设,仍需要在现场实践中不断完善。

参考文献(References):

- [1] 姜福兴,魏全德,姚顺利,等. 冲击地压防治关键理论与技术分析[J]. 煤炭科学技术,2013,41(6):6-9.
JIANG Fuxing, WEI Quande, YAO Shunli, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 6-9.
- [2] 潘一山,李忠华,章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [3] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [4] 齐庆新,欧阳振华,赵善坤,等. 我国冲击地压矿井类型及防治方法研究[J]. 煤炭科学技术,2014,42(10):1-5.
QI Qingxin, OUYANG Zhenhua, ZHAO Shankun, et al. Study on types of coal bump mine and prevention methods in China [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 1-5.
- [5] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [6] 付东波,齐庆新,秦海涛,等. 采动应力监测系统的设计[J]. 煤矿开采,2009,14(6):13-16.
FU Dongbo, QI Qingxin, QIN Haitao, et al. Design for mining stress monitoring system [J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(6): 13-16.
- [7] 王平,姜福兴,王存文,等. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报,2010,35(S1):5-9.
WANG Ping, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. The stress incremental forecasting method of coal bump [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 5-9.
- [8] 陆菜平,窦林名,王耀峰,等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. 地球物理学报,2010,53(2):450-456.
LU Caiping, DOU Linming, WANG Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hard roof [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 450-456.
- [9] 姜福兴,杨淑华,成云海,等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1511-1516.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of coal bump in coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [10] 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(12):2011-2015.
XIA Yongxue, KANG Lijun, QI Qingxin, et al. Five index of microseismic and their application in coal bump forecastion [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011-2015.
- [11] GU S T, WANG C Q, JIANG B Y, et al. Field test of coal bump danger based on drilling pulverized coal parameters [J]. Disaster Adv, 2012, 5(4): 237-240.
- [12] 齐庆新,李首滨,王淑坤. 地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J]. 煤炭学报,1994,19(3):221-232.
QI Qingxin, LI Shoubin, WANG Shukun. Application of AE technique in monitoring ground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(3): 221-232.
- [13] 贺虎,窦林名,巩思园,等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学,2011,32(4):1262-1268.
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1262-1268.
- [14] 王恩元,刘忠辉,刘贞堂,等. 受载煤体表面电位效应的实验研究[J]. 地球物理学报,2009,52(5):1318-1325.
WANG Enyuan, LIU Zhonghui, LIU Zhen tang, et al. Experimental study on surface potential effect of coal under load [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1318-1325.
- [15] HE X Q, CHEN W X, NIE B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2011, 48(8): 1352-1358.
- [16] 窦林名,何学秋,王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. 煤炭学报,2004,29(4):396-399.
DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Electro-Magnetic emission technique of monitoring coal bump and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 396-399.
- [17] 王书文,毛德兵,杜涛涛,等. 基于地震CT技术的冲击危险性评价模型[J]. 煤炭学报,2012,37(S1):1-6.
WANG Shuwen, MAO Debing, DU Taotao, et al. Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 1-6.
- [18] 窦林名,蔡武,巩思园,等. 冲击危险性动态预测的震动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 coal bump based on the technology of seismic

- computed tomography detection[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [19] 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, 244.
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, 244.
- [20] 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 pre-warning platform[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 333-339.
- [21] 罗浩, 潘一山, 肖晓春, 等. 矿山动力灾害多参量危险性评价及分级预警[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(11): 85-90.
LUO Hao, PAN Yishan, XIAO Xiaochun, et al. Multi-parameter risk evaluation and graded early warning of mine dynamic disaster [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(11): 85-90.
- [22] 刘金海, 翟明华, 郭信山, 等. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[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.
- [23] 窦林名, 王盛川, 巩思园, 等. 冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台[J/OL]. 煤炭学报, doi.org/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/OL]. Journal of China Coal Society, doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0318.