

中文引用格式:任文华. 煤矿灾害监测预警平台设计及应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增刊1): 84-89.

英文引用格式:REN Wenhua. Design and application of coal mine disaster monitoring and early warning platform[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 84-89.

煤矿灾害监测预警平台设计及应用*

任文华

(国能乌海能源信息技术有限公司, 内蒙古 乌海 016000)

中图分类号: X948

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0011

基金项目: 国家能源集团乌海能源公司科研项目(E130000050)。

【摘要】 为改善矿井灾害监测手段单一、预警分析能力薄弱、灾变处置不及时现状,以成因机理分析方法为基础,建立瓦斯、水、火、顶板、粉尘单灾害分级预警模型,通过数理统计方法分析灾害监测数据的突变、缓升、波动、周期变化和恒定不变等数据特征图谱变化趋势,提出灾害融合预警分析方案,设计灾害监测预警平台构建方案,并从硬件与软件部署2个方面分析平台在乌海能源公司黄白茨煤矿的现场应用情况。结果表明:基于灾害成因机理和特征图谱分析技术的多灾害融合预警分析方案,实现灾害的溯源、关联和传递分析,可以提高预警的准确性;基于巷道参数计算和迪杰斯特拉算法的实时动态规划避灾逃生路径的方法,能提高人员在矿井灾害中的逃生效率。

【关键词】 灾害监测; 预警分析; 联动控制; 数据采集; 成因机理; 避灾路线规划

Design and application of coal mine disaster monitoring and early warning platform

REN Wenhua

(National Energy Wuhai Energy Information Technology Co., Ltd., Wuhai Inner Mongolia 016000, China)

Abstract: In order to improve the current situation of single disaster monitoring methods, weak early warning analysis capabilities, and untimely disaster disposal in mines, a single disaster classification and early warning model for gas, water, fire, roof, and dust was established based on the analysis method of formation mechanism. Through mathematical and statistical methods, the changing trends of data characteristic graphs of disaster monitoring data such as sudden changes, gradual increases, fluctuations, periodic changes, and constant changes were analyzed. Accordingly, a disaster fusion and early warning analysis plan was proposed. A disaster monitoring and early warning platform construction plan was designed. The on-site application of the platform in the Huangbaici Coal Mine of Wuhai Energy Company was analyzed from the perspectives of hardware and software deployment. The results show that the multi-disaster fusion and early warning analysis scheme based on the disaster formation mechanism and characteristic graph analysis technology can realize the disaster source tracing, correlation, and transmission analysis and improve the accuracy of early warning. The method of real-time dynamic planning of disaster avoidance routes based on tunnel parameter calculation and Dijkstra's algorithm can improve the escape efficiency of personnel in mine disasters.

Keywords: disaster monitoring; early warning analysis; linkage control; data acquisition; formation mechanism; disaster avoidance route planning

0 引言

煤炭是国家主体能源,是国家能源的压舱石^[1]。煤炭开采中瓦斯突出、冲击地压等典型动力灾害频现,开采扰动区矿井水突出、瓦斯涌出等渗流灾害凸显,同时水、火、瓦斯、顶板等多场灾害形成共生铀、煤层气、油气资源勘探及开发难题^[2]。目前,矿井灾害的预防措施主要集中在灾变发生后的应急处置上,限制了对井下人员伤亡的有效预防。

许多学者对矿井的灾害预防开展大量研究,主要分为基于成因机理分析^[3]与基于数据驱动^[4]的方法。基于成因机理分析的方法通过取样分析、工艺考察,建立灾害预警模型,结合监测数据实现灾害预警。李东发等^[5]根据矿井内外因火灾分级判定依据,实现矿井火灾智能分级预警。施式亮等^[6]采用数值模拟等方法研究共生灾害的演化过程,建立煤自燃与瓦斯共生灾害预警和防治体系架构。马旭等^[7]采用煤自燃程序升温试验得到采空区气体随温度的变化规律,构建煤自燃隐患的预测预警指标,实现煤自燃隐患的早期预警。基于数据驱动的方法从监测数据的变化趋势入手,根据海量的传感器监测数据,结合大数据、数据挖掘和人工智能等方法,分析监测数据的潜在变化规律,实现监测值变化和幅度变化预警。徐磊等^[8]将大数据技术与煤与瓦斯突出、矿井水害、矿井火灾和矿井顶板灾害预防机理相结合,建立基于大数据的矿井灾害预警模型。董丁稳等^[9]运用希尔伯特黄变换的数学分析理论与方法对瓦斯数据进行多尺度的分解处理,提取数据特征,进而实现瓦斯浓度的预测和预警。龚晓燕等^[10]构建风流调控下的粉尘浓度双目标优化模型,基于粒子群算法求解,并选取理想解作为最优风流调控方案。张巨峰等^[11]应用大数据驱动技术,分析瓦斯与煤自燃共生灾害的大数据智能化预警系统的数据特征、应用架构和关键技术,搭建大数据驱动的共生灾害智能化预警系统应用架构。基于成因机理的灾害预警方法应用广泛,但预警方法通常只针对单一型灾害,难以综合评估矿井面对多重灾害时的安全性。基于数据驱动的技术尚不成熟,其分析结果有待论证。此外,大多数灾害预警方法仅提供灾害的提前警示,并未与矿井的生产控制设备实现联动,因此无法满足灾害应急响应和处置的要求。

鉴于此,笔者从成因机理与数据驱动 2 个方面出发,构建矿井灾害安全的综合分析模型,制定灾害应急联动控制策略,辅助井下人员规划避灾路线,旨

在实现灾害的预防和及时消除,从而减少人员伤亡。

1 煤矿灾害预警系统构建

1.1 系统框架构建

按照数据采集流向,构建煤矿灾害预警系统架构,如图 1 所示。框架自底向上包含接入层、采集层、数据层、支撑服务层和应用层,根据用户权限和业务功能逻辑的不同,向矿井的各科室人员提供相应的服务。

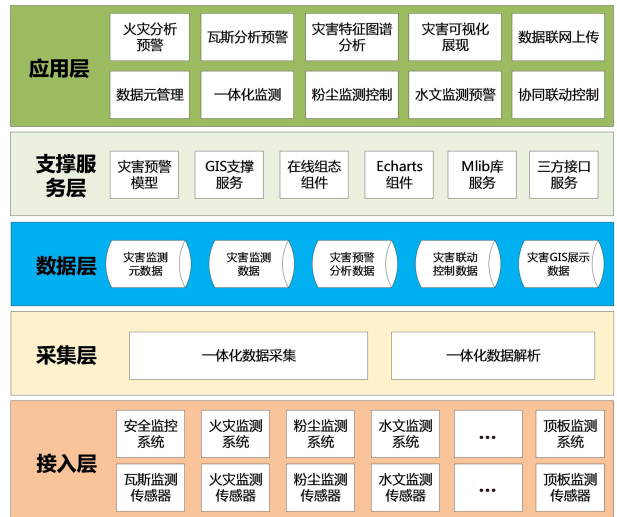


图 1 煤矿灾害预警系统架构

Fig.1 Architecture of coal mine disaster early warning system

系统以灾害预警分析为核心功能。当监测到的灾害条件满足预设的分级预警标准时,系统将通过联动控制策略与关联的控制设备交互,以实现灾害的提前预警,减少人员伤亡事故。

1.2 灾害监测数据采集解析

灾害监测数据采集的核心任务是实现不同灾害监测子系统数据的统一格式化和标准化存储,本质上旨在打破现有监测子系统间信息孤立的现状,实现数据融合,其中还包含数据采集和数据存储展示。

在数据采集阶段,基于文本透传技术实现数据源文件从子系统上位机向采集服务器传输,通过解析原始数据,建立数据交互采集规范,实现采集数据文本格式、标签名称统一等预处理操作。

在数据存储展示阶段,管理和维护在数据采集阶段解析的灾害监测数据,包括数据对象管理、数据源管理和数据报表管理。数据对象管理实现数据库标识说明的管理与维护,数据源管理实现数据源地址、请求方式、返回数据记录信息的管理与维护,数据报表管理实现页面展示的样式、内容的管理与维护。

2 灾害预警分析

2.1 瓦斯灾害预警分析

煤矿工作面瓦斯涌出受煤体瓦斯含量、煤体的瓦斯解析特性、煤体的渗透性、地质构造、采掘进度和产量、煤体的物理力学性质等多因素影响。导致瓦斯超限的原因有瓦斯大量涌出、通风缺陷和管理重大隐患3类,以此构建涵盖通风异常、抽采情况、瓦斯涌出特征、矿压监测特征和瓦斯地质的瓦斯涌出异常指标体系。其中,通风异常包含大气压变化、通风机停风、风量和风速大小以及通风设施损坏;抽采情况包含抽采量变化、抽采浓度变化以及抽采泵运行状态;瓦斯涌出特征包含瓦斯涌出量、瓦斯解析特征、瓦斯波动特征、瓦斯发展趋势特征和瓦斯浓度;矿压监测特征包含矿压监测值和周期来压;瓦斯地质包含断层、陷落柱、煤层厚度变化、煤层倾角变化、煤柱保护区和瓦斯含量。基于瓦斯涌出异常指标体系,构建瓦斯涌出超限分级预警模型,实现瓦斯超限风险趋势预判和提前预警。

2.2 火灾预警分析

火灾预警分析包含内因火灾预警与外因火灾预警2方面。

针对外因火灾预警分析,首先在矿井机电硐室、采掘工作面和带式输送机等易起火区域,以及电缆和电器设备密集的位置,安设CO、烟雾和温度等传感器,通过长期监测火灾事件发生时的CO、烟雾和温度变化,设定分级报警阈值和应急联动预案。当火灾发生时,系统将自动联动已配置的调度通信设备和防灭火设备。

针对内因火灾预警分析,收集采空区的煤样开展煤层自燃倾向性鉴定,以测试不同煤层的自然发火期;结合鉴定结果、现场观测和矿方监测数据的统计分析,综合确定煤层自然发火的标志气体及其浓度临界值,建立包含温度、CO和 C_2H_2 浓度等参数的火灾分级预警模型。

2.3 水灾预警分析

结合矿井现场的防治水基础资料和指标数据监测设备现状,充分考虑指标值的科学性、代表性和可获取性等,确立动态指标、静态指标和关联指标3大类,并优选细化各类水害对应的重要指标,建立水害监测预警指标体系。

矿井水害预警指标体系中,动态指标包含矿井涌水量、长期观测孔的水位和温度、以及排水量;静

态指标包含地面物探成果、积水区的分布范围、静态积水量、积水标高含水层富水性和顶板隔水层厚度;关联指标包含工作面和水文异常区的距离(例如通过瞬变电磁法测量)以及水文地质类型。水害分析预警模型包含水害预测模型与水害判识模型。

水害预测模型基于时间序列,采用传统预测模型或机器学习预测模型,从降雨量等时间序列中找出变量变化的特征、趋势和发展规律,从而有效预测变量的未来变化。

水害判识模型根据上述水害预警指标,利用层次分析法分析动态指标、静态指标和关联指标,得到各指标权重。采用模糊综合评判等判别原则,将指标体系各因素进行耦合,构建蓝色、黄色、橙色和红色4级预警。

2.4 顶板灾害预警分析

顶板灾害分析预警以支架、离层、锚杆和应力等监测数据为基础,分析工作面顶板与巷道顶板灾害监测历史数据,实现工作面顶板压力预警和工作面巷道分级预警,并评价工作面和巷道的支护情况。

针对工作面顶板压力预警,根据支架压力历史监测数据,预测开采煤层基本顶的来压时间、来压强度、来压步距和来压位置。通过对比分析各支架来压强度预测值和支架最大工作阻力,实现顶板压力分级预警。针对工作面巷道分级预警,设定顶板离层、顶底板移进量、两帮移进量、锚杆索应力和钻孔应力等参数报警阈值,分析各工作面巷道监测的预测值达到超限报警值的时间,实现工作面巷道分级预警。

2.5 粉尘灾害预警分析

通过煤(岩)的产生能力 P 、粉尘分布系数 N 、粉尘分布指数 λ ,确定矿井煤层不同煤样的产生性能。测定过筛后煤样的粒度分布,得到不同粒径 d 下累积质量分数 R 。把 R 和 d 值代入经拟合得到拟合曲线方程,根据所得的直线方程求出 λ 、 N ;通过粒度分布结果求出 $d < 7.07 \mu\text{m}$ 的呼吸性粉尘在粉尘中的比例。在此基础上,基于井下人员定位监测数据,根据煤尘分布与人员实时位置,精准估算人员在所处区域吸入粉尘量累计值,通过比对粉尘量吸入累计值与预设阈值,实现作业人员接尘量预警。

2.6 灾害特征图谱分析

矿井灾害不仅在致灾成因机制上表现出一定的因果关联,而且通过分析海量的历史监测数据,可以观察到一些显著的数理统计分布特征。当监测值长

期处于较低水平时,突然在某一时刻发生急剧的升高,则此时监测区域受外力影响,导致监测值发生突变,有可能引发监测超限情况;当监测值出现长期缓慢升高或者下降的趋势时,可推测出监测区域环境此时正发生微小变化,但还不足以导致灾害发生,需及时安排人员前往现场排查;当监测值在一定周期时间范围内均处于极小的变化范围时,即监测值处于恒定不变状态,需及时安排人员排查是否出现设备故障或数据中断问题;当监测值频繁波动时,监测区域处于极不稳定状态,可能已经发生小部分突变,需尽快查看附近传感器的监测数据,判断是否有超限情况;当监测值呈现出一定的周期变化趋势时,监测区域周围的地质环境已处于稳定状态,可对监测值变化趋势曲线拟合,预测监测点的发展趋势。

2.7 融合灾害预警分析

通过业务融合、数据融合和数据汇聚,以多个单灾害的预警结果为基础,叠加分析灾害区域的多传感器监测数据变化趋势,构建基于半监督机器学习的多灾害融合关联预警分析模型,实现溯源分析、关联分析和传递分析。

在致灾因素溯源中,通过分解灾害预警超限的过程,从结果到发生原因,逐层倒推分析,明确致灾的根本因素。

在灾害关联分析中,综合考察灾害发生时的多种潜在致灾因素,以实现相关灾害的同步预警。

在灾害传递分析中,除探究灾害的成因外,还提出针对上游致灾因素的补救措施建议。

3 灾害联动控制与避灾路线规划

3.1 灾害联动控制

灾害联动控制策略包含联动控制灾害预警区域、联动控制等级、联动条件和联动内容。灾害预警区域需定义预警区域的位置和灾害类型。联动控制等级与灾害分级预警等级一一对应。联动控制条件是灾害分级预警模型不同预警等级的达成条件,包括预警的监测点和预警阈值。联动内容是各联动控制等级对应的需要联动的子系统设备。通过定义灾害联动控制策略,系统根据联动条件是否达成,判断需要联动的设备,同时自动调出联动设备的监测视频,可同步观察设备联动是否成功。为安全起见,联动的出口统一由矿上已建成的集控平台或融合平台实现,不单独直接与子系统联动交互,但在集控平台未建成或集控平台未集成的子系统需联动时,可在矿方允许的条件下,与子系统直接联动。常用的联

动方式包括数据库表写入、应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)调用和文本交互等。

3.2 灾害仿真及避灾路线规划

避灾路线规划以灾害仿真为前提,在预设条件下,通过三维虚拟场景模拟,实现矿井火灾和水害等灾害的仿真蔓延。针对火灾的仿真蔓延,根据胶带火灾特点,结合巷道实际,采用火灾动力模拟学工具(Fire Dynamics Simulator, FDS)对不同工况条件下的皮带火灾蔓延情况进行数值模拟,得到不同工况条件下的烟气、温度和能见度的分布情况。针对水害的仿真蔓延,根据巷道的高程,结合含水层和水仓等位置的分布,实现突水点的水害仿真蔓延。在灾害蔓延的可视化展示方面,通过插件二次开发技术,构建矿井巷道三维模型,实现火灾烟雾和水灾水流效果的三维可视化展现。

避灾路线规划基于迪杰斯特拉算法,结合人员逃生与救灾的相关规范,评估灾害影响因素的作用程度,构建巷道当量长度计算模型;基于灾害蔓延规律模型以及实时监测数据,采用最短路径算法,综合考虑巷道空间结构和灾害蔓延情况,实现动态规划出有效的人员逃生避灾路线。

避灾路线规划所需的巷道当量长度:

$$L_i = K_v K_h K_z K_p L + \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (1)$$

式中: L_i 为第*i*条巷道的当量长度,m; K_v 为巷道风速通行难易系数; K_h 为巷道高度通行难易系数; K_z 为巷道类型通行难易系数; K_p 为巷道坡度通行难易系数; L 为第*i*条巷道实际长度,m; l_{ij} 为第*i*条巷道中第*j*个障碍物的当量长度,m。各参数的取值见表1。

表1 巷道当量长度参数取值规则

Table 1 Value rules for equivalent length parameters of tunnels

类型	取值规则
风流风向	顺风:1; 逆风:1.1
巷道高度	高度大于2 m:1; [1.3, 2]:1.1; [0.8, 1.3]:1.2; 低于0.8:10
巷道类型	运输、轨道、胶带大巷/轨道下山/进、回风筒:1; 轨道、胶带平巷/工作面进回风联络巷:1.2; 总回风巷/采取进风-回风联络巷:1.2; 工作面/总进风-采取联络巷:1.3; 其他:2
巷道坡度	上坡:1+坡度×0.1; [-30°, 0°]下坡:1; [-60°, -30°]下坡:1+(坡度-30)×0.03; [-90°, -60°]下坡:2

4 现场应用

黄白茨煤矿隶属乌海能源有限责任公司,开采年限较长,系统复杂且采掘条件复杂,瓦斯、火和粉尘等自然灾害频发。在黄白茨煤矿引入灾害精准预警系统,集成光纤测温、束管监测和粉尘触控喷雾等硬件设备与软件平台,实现对灾害的融合监测、分级预警和应急联动控制,进一步减少现场作业人员数量,提升矿井的安全水平和生产效率。

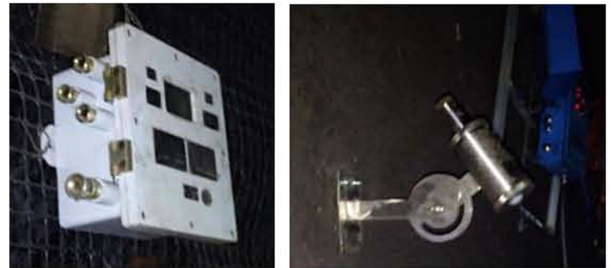
在井口胶带电机处安设2套干粉灭火装置,实时采集监测电机过热、过负荷运行导致的烟雾超限和火焰报警情况,同时联动防火灭火装置触发喷洒干粉灭火操作(图2)。在运输巷、综掘工作面等粉尘灾害严重区域,安装粉尘浓度超限喷雾降尘装置(图3),当粉尘浓度监测值超限报警时,自动触发喷雾操作,降低区域粉尘浓度。图4为黄白茨煤矿灾害监测预警平台门户首页。

建设完成的灾害监测预警平台将矿井各种灾害的监测数据集成于一个统一的系统中,取代了原先多台独立上位机的分散部署。平台具备的灾害预警分析功能在原有监测基础上增强了对灾害的超前预防能力。一旦平台触发预警,将通过手机APP以云



图2 防火灭火装置

Fig.2 Fire prevention and extinguishing equipment



(a) 主控箱

(b) 红外探头

图3 触控喷雾主控箱、红外探头

Fig.3 Main control box and infrared probe of touch spray

短信形式即时推送通知至相关科室负责人,确保灾害预警的及时处置。



图4 灾害监测预警平台门户首页

Fig.4 Home page of disaster monitoring and early warning platform portal

5 结 论

1) 结合灾害成因和特征图谱分析技术,提出多灾害融合预警分析方案,实现对灾害的溯源分析、关联分析和传递分析。

2) 基于巷道风向、高度、类型和坡度参数计算巷道的当量长度,并以迪杰斯特拉算法为基础,实时动态规划人员避灾逃生路线。

3) 研究重点在矿井环境灾害的监测预警分析,

应综合考虑并深入分析人员、机电、环境和管理等多个维度,未来的研究计划将聚焦于矿井机电设备故障自诊断、安全管理和人员异常分析等安全预警方法,以实现对于矿井整体安全风险的预警分析。

6 致 谢

特别感谢中煤科工集团重庆研究院有限公司提供的灾害监测和预警分析技术支持。

参 考 文 献

- [1] 王国法,任怀伟,马宏伟,等.煤矿智能化基础理论体系研究[J].智能矿山, 2023, 4(2):2-8.
- [2] 袁亮.煤及共生资源精准开采科学问题与对策[J].煤炭学报, 2019, 44(1):1-9.
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):1-9.
- [3] 徐刚,黄志增,范志忠,等.工作面顶板灾害类型,监测与防治技术体系[J].煤炭科学技术, 2021, 49(2):1-11.
XU Gang, HUANG Zhizeng, FAN Zhizhong, et al. Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2):1-11.
- [4] 梁荣,董丁稳.矿井瓦斯监测数据消噪方法[J].工矿自动化,2018,44(2):18-22.
LIANG Rong, DONG Dingwen. De-noising method of mine gas monitoring data[J]. Journal of Mine Automation, 2018, 44(2):18-22.
- [5] 李东发,臧燕杰,师吉林.矿井火灾智能预警系统[J].工矿自动化, 2022, 48(S1):112-115,120.
LI Dongfa, ZANG Yanjie, SHI Jilin. Intelligent mine fire early warning system[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(S1):112-115,120.
- [6] 施式亮,曾明圣,李贺,等.煤自燃与瓦斯共生灾害演化与预警[J].煤矿安全, 2022, 53(9):9-16.
SHI Shiliang, ZENG Mingsheng, LI He, et al. Coal spontaneous combustion and gas symbiotic disasters evolution and early warning[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9):9-16.
- [7] 马旭,丁宜军,张连锋,等.南屯煤矿综采工作面煤自燃分级预警体系研究[J].煤炭技术, 2022, 41(10):170-173.
MA Xu, DING Yijun, ZHANG Lianfeng, et al. Study on grading early warning system of coal spontaneous combustion at fully mechanized mining face of Nantun coal mine[J]. Coal Technology, 2022, 41(10):170-173.
- [8] 徐磊,李希建.基于大数据的矿井灾害预警模型[J].煤矿安全, 2018, 49(3):98-101.
XU Lei, LI Xijian. Mine disaster warning model based on big data[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3):98-101.
- [9] 董丁稳,屈世甲,王红刚.矿井瓦斯监测数据特征分析及预处理[J].工矿自动化,2015,41(9):1-4.
DONG Dingwen, QU Shijia, WANG Honggang. Characteristic analysis and preprocessing of mine gas monitoring data[J]. Journal of Mine Automation, 2015, 41(9):1-4.
- [10] 龚晓燕,童丹丹,樊江江,等.综掘面风流调控下粉尘双目标优化研究[J].中国安全科学学报, 2022, 32(4):44-50.
GONG Xiaoyan, TONG Dandan, FAN Jiangjiang, et al. Study on dual-objective optimization of dust under airflow regulation in fully mechanized faces[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4):44-50.
- [11] 张巨峰,施式亮,鲁义,等.大数据下瓦斯与煤自燃共生灾害智能预警系统:数据特征,应用架构,关键技术[J].中国安全科学学报, 2021, 31(9):60-66.
ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Intelligent early warning system of gas and coal spontaneous combustion disaster based on big data: data characteristics, application structure and key technologies[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(9):60-66.



作者简介: 任文华 (1981—),男,内蒙古卓资人,本科,高级工程师,主要从事煤矿信息化、智能化建设、5G 融合技术、AI 视觉识别技术、业务数据模型构建、大数据技术和监测监控技术等方面的研究。E-mail: 63132905@qq.com。