

采煤生产全流程数据协同下安全风险演化特征分析

文 | 高振 胡振明 柳亮

煤炭开采的地质条件特别复杂且风险因素相互交织，传统模式中各环节数据孤立存储且信息传递滞后，这就导致风险识别存在着时空方面的盲区。物联网和大数据技术为全流程数据协同提供了全新路径，不过，现有研究大多聚焦于单一环节，缺少对协同机制下风险演化规律的系统探讨。我们要构建采煤生产全流程数据协同框架，分析数据融合对风险演化特征产生的影响，揭示协同强度与风险时空分布之间的内在关联。

采煤生产全流程数据协同体系

数据协同架构

采煤生产全流程数据协同架构采用分层递进式设计方式，把感知层、传输层、融合层、应用层整合为统一体系。感知层配置地质探测传感器、瓦斯浓度监测仪等智能设备，全面采集地质参数、环境状态等多元数据，并按作业区域风险等级动态调整采样频率。传输层结合工业以太网与无线通信技术构建双通道网络，确保海量异构数据实时汇聚且端到端传输时延控制在毫秒级。融合层构建时空一体化数据库，整合历史地质勘探、生产计划及实时监测数据，并完成跨系统数据标准化处理。应用层开发风险识别与预警算法模块，支撑数据关联分析、趋势预测和应急决策等核心功能。

多源数据融合机制

多源数据融合机制通过构建跨层级跨系统的数据关联模型，进而实现地质勘探数据与生产作业数据的深度整合。地质构造三维模型与掘进工作面实时监测数据进行空间叠加分析，当截割参数出现异常波动时，系统自动提取对应空间坐标地质构造信息，以此判断是否遭遇断层、陷落柱等隐蔽致灾地质体。通风监测数据与瓦斯涌出数据建立时空关联关系，构建风流 - 瓦斯浓度动态分布模型来全面分析风速、风量、瓦斯涌出量、采空区封闭状态等关键参数协同演化规律，以此识别通风系统失效导致的瓦斯积聚风险。运输系统状态数据与人员定位数据实现实时联动，在设备故障或者灾害发生的时候快速生成最优疏散路径，从而将疏散方案生成时间压缩至秒级响应。

数据协同度量方法

数据协同度量评估体系按照完整性、时效性、一致性、关联性这四个维度来构建综合评价模型。完整性指标通过计算各环节数据采集覆盖率的方式进行量化，并且关键监测点数据缺失率要控制在 2% 以内。时效性指标是考察数据从采集到应用整个流程的延迟情况，实时监测数据端到端处理时间需满足秒级要求。一致性指标采用交叉验证算法来识别不

同来源数据的逻辑矛盾。关联性指标运用互信息熵方法量化不同环节数据间的相关强度。建立数据协同度综合评估模型：

$$DCS = 0.3C + 0.3T + 0.2S + 0.2R$$

式中，DCS 为数据协同度综合评分，取值范围 0 ~ 100；C 为数据完整性指数；T 为数据时效性指数；S 为数据一致性指数；R 为数据关联性指数，均为无量纲。根据 DCS 数值将协同水平划分为低度协同（0 ~ 40）、中度协同（40 ~ 70）、高度协同（70 ~ 100）三个等级。

数据协同下安全风险演化实验

实验方案设计

实验挑选某矿区的三个典型工作面为研究对象，这三个工作面分别对应低度协同、中度协同、高度协同这三种数据协同模式。低度协同的工作面维持传统的独立监测模式，各个子系统的数据库处于分散存储状态；中度协同的工作面达成瓦斯监测与通风控制系统的数据集成，进而建立起局部联动响应机制；高度协同的工作面构建覆盖地质勘探、采掘作业、通风监测、运输管理全流程的数据融合平台。实验的周期设定为 180 天，数据采集涵盖地质构造、环境参数、设备运行、视频监控这四大类别，累计的数据量达到 30 TB，风险事件划分为顶板灾害、瓦斯事故、机电事故、运输事故这四类，建立风险事件数据库以记录关键信息。

风险识别效能测试

风险识别效能测试对不同数据协作模式下的识别精确度和预警速度进行了比较（见表 1）。在低度协同模式下，重大风险识别精确度达到了 62.4%，预警提前时间为 34 分钟，漏报率为 18.7%；中度协同模式让识别精确度提升到了 76.8%，预警提前时间延长至 58 分钟，漏报率下降到 9.3%；在高度协同模式条件下，识别精确度达到了 89.5%，预警提前时间增加至 81 分钟，漏报率仅为 3.2%。针对顶板灾害这一情况，高度协作模式通过整合地质构造数据、顶板离层监

测数据及采掘进度数据，使冒顶预测精度从 71.3% 提升到 87.6%。在瓦斯事故方面，运用多源数据时空关联分析方法，瓦斯突出预警精确度达到了 85.9%，比单一监测方法提高了 27.4 个百分点。

表 1 不同协同模式风险识别效能对比

评价指标	低度协同	中度协同	高度协同	提升幅度
重大风险识别准确率 (%)	62.4	76.8	89.5	+27.1
平均预警提前量 (分钟)	34	58	81	+47
漏报率 (%)	18.7	9.3	3.2	-15.5
顶板灾害预测精度 (%)	71.3	-	87.6	+16.3
瓦斯突出预警准确率 (%)	58.5	-	85.9	+27.4

来源：山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

风险演化过程监测

风险演化过程监测聚焦不同数据协同模式下风险从初始形成开始、历经逐步发展直至最终呈现的整个动态过程特征。低协同水平时，风险演化具有突发特性，从风险信号识别到事故临界状态平均时间跨度仅 42 小时；中等协同模式把风险演化周期拉长到 76 小时；高协同模式下风险演化呈现渐进步骤，从初始阶段到完全显现平均周期延长到 118 小时，和低协同模式相比增幅达 181%。空间层面监测结果表明，低协同模式中风险呈点状集中态势，热点区域数量多达 17 处。高协同模式下风险分布转变为面状扩散形态，热点区域减少到 9 个，风险分布离散程度提升 0.43，时间序列分析进一步证实数据协同程度与风险演化速度存在显著负向关联，相关系数为 -0.824。

安全风险演化特征分析

时空演化规律

安全风险在时间和空间上的演变有着明显阶段性与差异化特征。从时间角度而言，风险发展能划分为初始形成、逐步扩展和全面爆发三个阶段。低协同状态下，风险演变呈现快速跳跃特征，从初始形成到全面爆发平均仅需 42 小时，预警窗口期极为有限。高协同状态下风险演变遵循渐进规则，积累规律周期延长至 118 小时，可为早期干预提供条件，从空间角度来说，风险分布呈现由局部聚集向广泛扩散的转变趋势，低协同模式下风险热点高度集中于工作面推进前方局部区域，形成 17 个高危聚集点，空间覆盖率仅为 23%。高协同模式下风险源识别范围扩大至采掘、运输、通风等整个系统，热点区域减少至 9 个，空间覆盖率提升至 67%，风险分布熵值增加 0.43，这表明风险管控正趋向空间均衡化，有效消除了传统监测模式下的盲区。

多因素耦合演化机理

安全风险演变过程是由地质构造、生产活动、环境状况及设备状态等多重因素共同作用引发的，并且各要素之间存在复杂的非线性相互作用关系。地质异常与开采扰动的协同作用是导致顶板事故出现的核心原因，当掘进作业经过断层破碎区域的时候，应力集中会加速顶板离层现象产生，若离层程度超出安全界限便可能引发冒顶事故。瓦斯释放量与通风系统的协同关系影响瓦斯事故的发展变化趋势，采空区密封不严密会导致瓦斯大量涌向工作面，若通风量不足或者气流分布出现异常，局部瓦斯浓度将迅速升高，从而埋下事故隐患。设备运行情况与作业环境参数的相互作用会改变机电事故的发生概率，例如皮带输送机在粉尘多、湿度大的环境中故障概率会明显提高。数据协同通过捕捉多要素的时间序列关联和空间协同特征，构建跨系统的风险传递网络模型，能够识别出单一监测手段难以发现的综合性风险模式。

数据协同对演化特征的调控作用

数据协同通过调整风险信息获取处理方式，对风险演变特征起到多方面调节作用。随着协同水平不断增强，风险演变的时间跨度有明显拉长，数据协同程度每提高 10 个百分点，风险从初期出现到明显显现平均周期增加 18.2 小时。在空间分布方面，贯穿始终的数据整合消除了传统监测死角，风险识别范围从局部作业区扩展到整个系统，空间覆盖率提高了 44 个百分点。就演变速度而言，数据协同程度与风险演变速度呈明显负向关联，相关系数达到 -0.824，高度协同状态能让风险演变速度下降 73.6%。在预警准确性上，多源数据关联分析将重大风险识别精确度从 62.4% 提高到 89.5%，漏报率从 18.7% 降至 3.2%，预警提前时间从 34 分钟延长至 81 分钟，推动管理模式从被动响应向主动预防转变。

结束语

研究构建了采煤生产全流程数据协同体系，系统地揭示了数据协同对安全风险演化特征的影响机制。实验证明，高度协同模式能让重大风险识别精确度达到 89.5%，还可把预警提前时间延长到 81 分钟，使风险演化速度降低 73.6%，不过当前依旧面临异构系统集成难度大及数据标准不统一等挑战。未来需要探索跨矿区的数据协同机制，构建行业级安全风险知识图谱，随着 5G、边缘计算、数字孪生等技术的不断演进，全流程数据协同会推动煤炭行业安全管理朝着精准化、智能化方向发展。

作者简介：高振 胡振明 柳亮 山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

责任编辑：孙姗姗 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com