



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 煤炭科学技术

## 基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控体系建设

陈晓晶

### 引用本文:

陈晓晶. 基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控体系建设[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 136-143.

CHEN Xiaojing. Construction of intelligent prevention and control of coal mine fire based on “cloud-edge-end” cooperation[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 136-143.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0488>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于5G+云边端协同技术的采煤机智能调高调速 控制系统设计与应用

Research on cloud-edge-terminal collaborative intelligent control of coal shearer based on 5G communication  
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 205-216 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1017>

#### 煤矿安全监测监控体系中边缘计算模式研究

Research on edge computing mode in coal mine safety monitoring and control system  
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b7b2e91a-40d9-4a4a-b8f0-d3e66858d450>

#### 冲击地压矿井智能化防冲控采技术的思考

Thinking about intelligent technology of rockburst prevention and controlled mining in rockburst mine  
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 151-158 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f503f7d9-59e4-44fd-b799-727274e93ca0>

#### 论露天煤矿智能化建设总体设计

Overall design of intelligent construction in open pit coal mines  
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 37-46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7aab28c5-c0a7-4130-b4fb-100b927e3bbe>

#### 综采装备单机智能化向智能协同模式转型的探索研究

Exploration and research on transformation from intelligent single machine equipment to intelligent synergy in coal mine  
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 169-175 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.020>

#### 煤矿智能双重预防机制与智能安全管控平台研究

Research on intelligent dual prevention mechanism and intelligent security control platform of coal mine  
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 464-473 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2155>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

安全科学与工程



移动扫码阅读

陈晓晶. 基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控体系建设[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 136-143.  
CHEN Xiaojing. Construction of intelligent prevention and control of coal mine fire based on “cloud-edge-end” cooperation[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 136-143.

## 基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控体系建设

陈晓晶<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015; 2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

**摘要:** 针对智能矿山火灾防控子系统建设过程中数据采集及执行层不全面、边缘计算功能未体现、综合防控平台建设标准不明确等问题, 对照国家及地方煤矿智能化建设标准中火灾防控相关条款, 提出了基于“云-边-端”协同的架构体系。增设光纤测温、MEMS 温度传感器、巡检机器人等火灾数据感知装置及灌浆、注氮、自动洒水、巷道快速封闭装置等火灾执行控制装置, 形成数据感知与执行控制层, 负责感知火灾数据信息以及执行云计算中心或边缘侧下发的控制命令; 增加边缘计算装置, 形成边缘计算层, 实现对现场防灭火装置的联动控制; 以“智能矿山基础信息平台”为中台底座, 建立智能矿山火灾防控业务应用, 形成平台防控层, 融合专家知识库, 对火灾防控关键指标进行专业分析。形成云平台层智能分析、边缘层就近分析控制、感知执行层数据采集及执行的综合防控体系, 且辩证分析了“云-边-端”火灾防控体系三层之间的对立统一关系。探讨了无线低功耗火灾传感器、巡检机器人、火灾危险区域监测点部署优化、边缘侧配套物理装置、边缘侧火灾预警算法、决策边缘计算算法、边缘节点部署策略、综合防控平台、火灾数据治理、火灾预警及决策模型等关键装置及技术。

**关键词:** 智能矿山; 火灾防控; 云边端协同; 边缘计算; 智能决策

**中图分类号:** TD75      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2022)12-0136-08

### Construction of intelligent prevention and control of coal mine fire based on “cloud-edge-end” cooperation

CHEN Xiaojing<sup>1,2</sup>

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China; 2. Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

**Abstract:** In view of the problems such as incomplete data collection and implementation layer, non embodiment of edge computing function, and unclear construction standards of integrated prevention and control platform during the construction of intelligent mine fire prevention and control subsystem, an architecture model based on “cloud-edge-end” collaboration was proposed in comparison with relevant provisions of national and local coal mine intelligent construction standards for fire prevention and control. Fire data sensing devices such as optical fiber temperature measurement, MEMS temperature sensors and inspection robot, as well as fire execution control devices such as grouting, nitrogen injection, automatic sprinkler and roadway rapid closure device were added to form the data sensing and execution control layer, which is responsible for sensing fire data information and executing control commands issued by cloud computing center or edge side; Edge computing devices were added to form the edge computing layer to realize the linkage control of on-site fire prevention and extinguishing devices; with the “Intelligent Mine Basic Information Platform” as the middle platform base, intelligent mine fire prevention and control business application was established to form a platform prevention and control layer, expert knowledge base was integrated, and professional analysis on key indicators of fire prevention and control were conducted. A comprehensive prevention and control system for intelligent analysis at the cloud platform layer, nearby analysis and control at the edge layer, and data collection and execution at the perception and execution layer were formed. The opposition and unity relationship among the three layers of “cloud-edge-end” fire

收稿日期: 2022-01-18      责任编辑: 周子博      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0488

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2019-TD-ZD007)

作者简介: 陈晓晶(1981—), 男, 江苏南通人, 高级工程师。E-mail: chxjme@163.com

prevention and control system were dialectically analyzed. Key devices and technologies such as wireless low-power fire sensor, patrol robot, monitoring point deployment optimization in fire hazard area, edge side supporting physical devices, edge side fire early warning algorithm, decision edge calculation algorithm, edge node deployment strategy, comprehensive prevention and control platform, fire data governance, fire early warning and decision model were discussed.

**Key words:** intelligent mine; fire prevention and control; cloud side collaboration; edge computing; intelligent decision-making

## 0 引 言

自2020年3月,八部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》以来,国家部委、行业协会、煤炭企业、装备制造、科研院所及高校等都对煤矿智能化建设进行了不同层次探讨,如王国法院士团队分别从智能矿山发展方向<sup>[1]</sup>、顶层设计<sup>[2]</sup>、及标准体系<sup>[3]</sup>等方面对煤矿智能化引领及推动做了大量工作,其他学者从不同角度论述了煤矿智能化发展的现状及趋势如钱建生<sup>[4]</sup>提出“3115”建设路线,丁恩杰<sup>[5]</sup>顾了煤矿信息化建设历程并对智能矿山发展进西宁展望。这些方案对我国智能矿山建设及整体解决思路给出明确的指导意见,但对相应的子系统建设的落地方案介绍较少。

矿井火灾作为长期困扰煤炭工业生产的灾害之一,不仅影响正常生产、损毁采煤机等机械设备,而且严重威胁到井下作业人员的安全,如2020年9月27日重庆松藻煤矿胶带巷火灾造成16人死亡、42人受伤,直接经济损失达2501万元,同年12月4日重庆吊水洞煤业有限公司回收设备时发生重大火灾事故,造成23人死亡、1人重伤,直接经济损失达2632万元。对于触目惊心的煤矿火灾事故任何时候都不应掉以轻心,借此次煤矿智能化升级改造契机,煤矿企业应该加强火灾防控建设,补齐短板,让火灾防控不存在盲区。

业内学者对煤矿火灾防控进行了深入的研究:火灾综合防控方面,卢瑞翔等<sup>[6]</sup>设计了基于专家决策支持的煤自燃火灾防控系统,采用EDSS将引起煤自燃的相关条件作为信息参量,应用TOPSIS方法对不同决策进行评价排序,获得最优的煤自燃火灾防控决策,该系统重点在于云端模型,未考虑感知执行层及边缘计算层;梁运涛等<sup>[7-8]</sup>提出近距离煤层群自燃火灾超前协同防治理念,重点研究了现场治理方案;郑学召等<sup>[9]</sup>分别从矿井内外因火灾成因和防控技术两方面展开论述,并提出展望;申林<sup>[10]</sup>构建了煤矿外因火灾险兆事件关系结构模型,并根据分析结果提出煤矿外因火灾险兆事件的管控办法。内因火灾和外因火灾的预测模型算法方法,孙继平等<sup>[11]</sup>借助遗传算法、采用模糊聚类的方法实现内因火灾程度的识别;李兴东等<sup>[12]</sup>基于集对分析-区间三角模

糊数的煤矿内因火灾危险性评价耦合模型对鹤岗矿区内因火灾危险性进行评价;秦忠诚等<sup>[13]</sup>通过构建CW-TOPSIS煤矿内因火灾评价模型对火灾危险等级进行评价;王君莉<sup>[14]</sup>提出PHA-LEC评估模型对电气火灾定性分析;陈雅等<sup>[15]</sup>选用BP神经网络模型对内因火灾进行预测;刘永立等<sup>[16]</sup>提出基于Unity3D渲染引擎的煤矿火灾应急救援演练系统的设计方案,并分析了系统实现方法;张园园等<sup>[17]</sup>提出改进的梯形模糊事故树预测算法预测火灾事故;火灾数值模拟方面,文虎等<sup>[18]</sup>采用数值模拟分析研究了煤矿水平巷道发生火灾时期的温度场和烟气逆流层的变规律;邢震<sup>[19]</sup>对浅埋煤层地表漏风进行仿真,研究了不同物理场分布规律;张小翌等<sup>[20]</sup>利用FDS对硐室火灾进行研究,探索了关键参数变化情况;路新惠<sup>[21]</sup>利用CFD软件对煤矿火灾烟气传播过程进行模拟,为救援和灾情控制提供参考;徐劭懿等<sup>[22]</sup>研究了带约束条件的煤矿火灾避灾路线算法。对于火灾监测方面<sup>[23-26]</sup>,研究集中在采用光纤测温及束管监测等方法。火灾防治技术及执行装置方面,梁运涛等<sup>[27]</sup>系统介绍了我国煤矿火灾防治现状并提出发展对策;刘红威等<sup>[28]</sup>对井下细水雾防灭火技术应用现状进行综述并提出展望;王丽威<sup>[29]</sup>介绍了井下车载灭火系统应用现状及发展趋势;何景强<sup>[30]</sup>对矿用防爆无轨胶轮车火灾提出针对性预防对策;韩兵等<sup>[31]</sup>研究了复合惰性气体采空区自然发火防治技术,并应用于实践;史波波<sup>[32]</sup>梳理了煤矿液氮防灭火技术应用现状,定量讨论了液氮灌注量、管路的压降、注液氮口位置与间距等液氮防灭火技术参数。

综上所述,目前针对火灾防控的研究大多关注云端算法或防控技术,未能满足智能化建设中火灾防控体系的要求。

鉴于此,以火灾防控子系统智能化建设为例展开讨论,在上述智能化矿山建设综合解决方案框架内,细化补充火灾防控子系统建设,探讨煤矿智能化建设过程中火灾防控存在的问题、建设方案及关键技术支撑,提出一种基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控建设思路,系统融合火灾智能分析预警模型、边缘计算、数据采集及防灭火执行装置等火灾防控技术为一体,对标国家能源局及各地验收标准,为煤矿企业火灾防控智能化建设提供参考。

## 1 智能化煤矿建设中火灾防控相关标准

对于煤矿智能化建设的相关标准,国家能源局于2021年3月份发布《智能化煤矿建设指南(2021年版)(征求意见稿)》,专栏5智能安全监控系统中指出“建设束管监测、分布式光纤测温等系统,实现对井下采空区自然发火情况的实时监测、数据分析及上传;在电气设备、带式输送机等易发生火灾的区域,建设烟雾、一氧化碳、火焰等综合火灾监测设备,配备智能喷淋、自动喷粉喷气等自动防灭火装置,实现火灾参数的智能监测、分析、预测、预警及联动控制”。《陕西省煤矿智能化建设指南(试行)》中内因火灾除建设上述监测系统外,还需要建立以灌浆、注氮为主的两种以上综合防灭火系统,且实现预警和灭火功能,外因火灾要求配备红外成像、光纤测温等监测装置和防灭火装置;《陕西煤业智能矿井建设验收评分方法(暂行)(征求意见稿)》在陕西省煤矿智能化建设指南基础上,进一步提出开采易自燃煤层的矿井,应配备灌浆、注氮、注液态二氧化碳、注高分子胶体等防灭火装备,矿井配备煤矿井下快速应急防灭火系统设备,自然发火危险的采煤工作面在进、回风巷配备安全封闭的设施,具有火灾仿真、应急处置功能,实现火灾避灾路线规划。

中国煤炭学会团体标准《智能化采煤工作面分类、分级技术条件与评价指标体系》(T/CCS 002—2020)指出具有采空区、上隅角关键区域环境参数实时监测功能;具有实时预警功能;具有矿井通风、防灭火系统互联互通功能;具有自动启动灭火设施功能。《安徽省煤矿智能化建设验收办法(试行)》提出要建立实时在线监测井下采空区、巷道及工作面等关键区域的环境参数,并根据变化趋势实时预警。实时监测防灭火设备及管路的运行状态,制氮站实现无人值守、远程控制。《山东省煤矿智能化验收办法(试行)》提出,应用智能化注胶体设备的,实现定量调节。

综合以上国家、行业、地方以及煤业集团煤矿智能化建设相关标准,火灾防控智能化建设主要是在现有装备基础上增加光纤测温、红外成像等监测测点,通过综合防控平台实现不同子系统的数据共享功能,对监测结果进行数据分析,实现火灾监测装置与防灭火装置的定量联动控制,并且能实现火灾仿真、应急处置功能,实现火灾避灾路线规划。

## 2 火灾防控智能化建设中存在的问题

### 2.1 数据采集及执行层不全面

现有标准中对火灾数据采集端提到束管监测系

统、光纤测温系统、红外成像及安全监测系统防灭火相关传感器,这些传感器尽管能解决大部分矿井的火灾日常监测需求,但是对于部分自燃倾向性严重的矿井,若要实现火灾智能分析以便达到联动控制的目的,现有监测数据还远远达不到需求,特别是采空区自然发火监测,如束管监测系统仅仅覆盖采空区内的有限监测点;光纤测温系统只能监测两巷底部的遗煤温度,且由于煤的导热性较差,测到的高温点到底反映了哪个区域的温度,也是有待研究的课题;外因火灾监测中光纤测温距离带式输送机容易积聚高温的托辊、滚筒、皮带机头、机尾等关键位置无法实现接触式测量等。总而言之,若实现数据智能分析,前提是有足够有效的数据监测点作为数据输入,才能得到更准确的分析结果,从而成熟应用于火灾灭火执行装备的联动控制。

### 2.2 边缘计算功能未体现

对于边缘计算功能,有学者从瓦斯监测预警方向做了研究<sup>[33-34]</sup>,但是对于火灾预警方面的边缘计算研究为空白。煤矿智能化建设的前提是保证安全,煤矿火灾特别是外因火灾反应迅速,仅仅通过云平台计算分析,由于算法复杂、网络传输滞后甚至由于灾害发生导致网络中断等,很大程度上会错过最佳的火灾防治时机,从而导致不良后果,因此很有必要增加边缘计算功能,在一些需要紧急处理的、不会引起大的故障或后果的措施中,采用边缘计算的方法,对灾情进行第一时间的分析及判断。

为了更广泛地覆盖煤矿火灾危险区域,需要接入更多的火灾关键参数传感器进而产生监测数据,以光纤测温系统为例,该系统共设计6个测温通道、单通道测量距离为6 km、测温光纤每隔1 m一个测点、每5 s更新一次数据,现场应用过程中满载荷情况下24 h内会产生 $6.22 \times 10^8$ 个温度数据。采空区内因火灾遗煤的自然发火周期通常以月为单位,温度变化幅度不大;带式输送机外因火灾监测过程中,发生明火的概率很小,且一旦发生火灾需要第一时间做出判断。也就是说,不论内因火灾还是外因火灾采用光纤测温监测过程中,大部分时间上传的数据都是重复的,若采用上传到云端处理,应用过程中会给通讯网络带来极大的负担,并且数据处理速度受网络带宽、传统服务器计算算力等限制,系统信息处理链路变长、环节变多,从而导致系统无法承受该应用,边缘计算的方案被引入此问题的解决中,边缘设备性能的提升为复杂计算提供了基础保障,使得井下火灾边缘计算具备可行性。简单的说,井下火灾

边缘计算就是在网络边缘执行计算处理分析的计算模式，在火灾数据接入点附近进行数据处理，在网络边缘智能化分析，就近提供智能决策。如在内因火灾分析中，可以过滤大部分重复数据，有用数据上传到云端深入分析，减轻网络负担；外因火灾分析中，可以及时做出自动洒水等控制命令，减少决策耗费时间，避免发生重大紧急灾害。

### 2.3 综合防控平台建设标准不明确

通过对标准的解读，火灾监测、防治及数据分析预警等功能要以统一的防控平台为基础，其中要求平台功能须包括火灾仿真、联动控制等，但是对其详细功能、实现方式、性能指标等均未做细化说明，且数据的联系必须以数据融合为基础，标准中未提及，具体如下：

1)数据融合功能未提及。云端平台集成应用融合深度不够。目前已有的监测预警系统一般只适应于某个监测子系统，对基于大数据、云计算技术的监测预警一体化平台及多技术深度交叉融合缺乏系统性研究，同时此类研究大多集中在理论层面，平台建设的实践研究较少，导致煤矿监测系统协同性较差，对云平台应用大量井下多源监测数据实现深层次数据信息挖掘具有不利影响。

2)联动控制功能未量化。联动控制程度未给出定量指标，大部分标准只是给出具有联动控制功能的需求，但是对于防灭火工程现场应用过程中，到底联动控制到什么程度，并未给出明确指标。联动控制是指光纤测温、束管监测等监测数据通过云平台或者边缘计算数据分析结果，对火灾防治装置如灌浆、注氮、注液态二氧化碳、注高分子胶体等进行控制，但是上述不同的防治手段，需要控制的物理量相差较大，且控制策略不一样。

3)火灾仿真功能不明确。标准中提出需要具备火灾仿真功能，采用通用商业仿真软件，如内因火灾常用的 ANSYS FLUENT、COMSOL Multiphysics，外因火灾常用的 FDS 等适合区域性、精准化、火灾物理参数场模拟，而采用矿用专用火灾仿真软件适合矿井级大范围仿真，火灾智能化矿山建设需要根据不同场景合理选取火灾仿真软件，以便达到不同火灾防控目的。

## 3 火灾综合防控平台建设

为了更快推动智能化煤矿火灾综合防控子系统建设，笔者基于云边协同的物联网系统架构<sup>[35]</sup>，构想了“云-边-端”协同一体化的架构体系如图 1 所示。

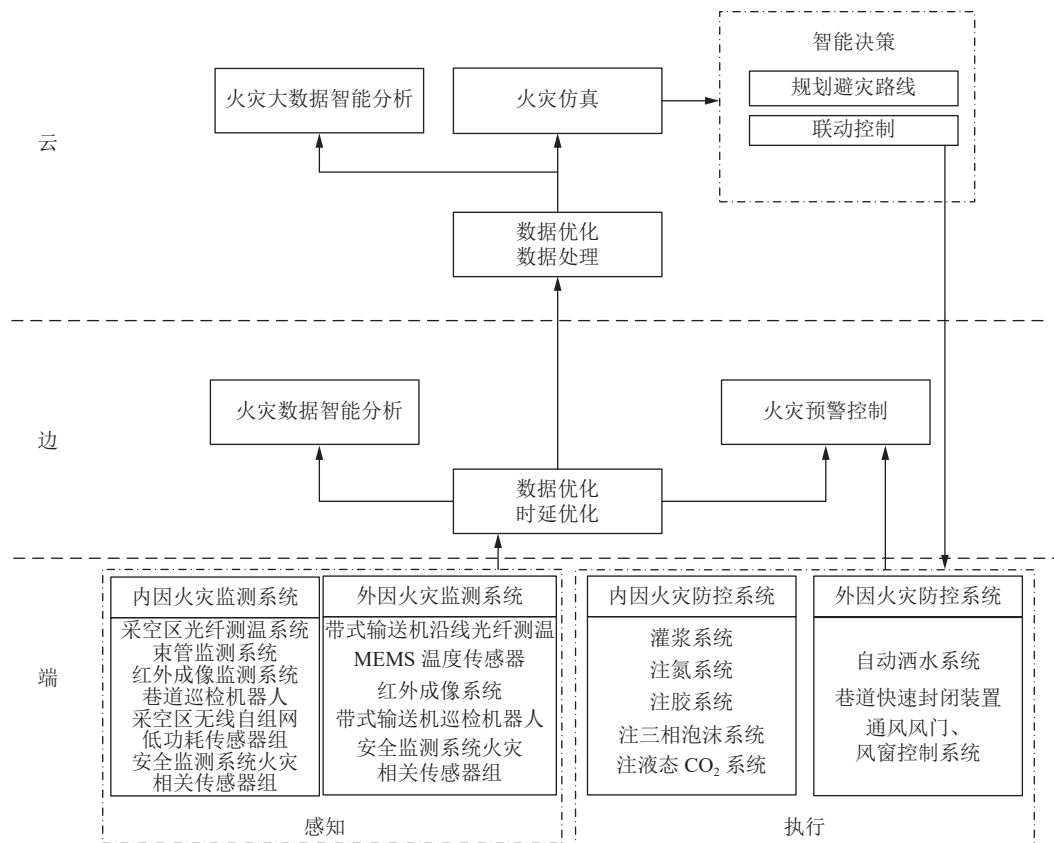


图 1 基于“云-边-端”协同的煤矿智能化火灾防控体系架构

Fig.1 Architecture of intelligent mine fire control system based on "cloud-edge-end" collaboration

### 3.1 数据感知与执行控制层

主要由火灾数据感知装置如光纤测温系统、束管监测系统、红外成像系统、采空区无线自组网低功耗传感器组、带式输送机 MEMS 温度传感器、巷道及带式输送机沿线巡检机器人等,执行装置如灌浆系统、注氮系统、注胶系统、注三相泡沫系统、注液态 CO<sub>2</sub> 系统、自动洒水系统、巷道快速封闭装置、通风风门、风窗控制系统等组成。该层负责感知火灾数据信息以及执行云计算中心或边缘侧下发的控制命令,重要任务是要具备全面感知能力,且不停的收集、上传所监测的海量数据提供给边缘计算装置。

### 3.2 边缘计算层

在火灾感知与执行控制近端增加边缘计算装置,根据火灾监测与控制逻辑配置要求,实现就地数据采集、计算与必要的逻辑控制,主要完成火灾原始数据过滤、清洗、提纯、计算等,有选择性的将处理后的关键、异常数据存储至边缘存储装置,由边缘存储装置上传至云管控平台。融合历史数据及火灾判定逻辑,实现对现场防火装置的联动控制,降低了网络传输及云计算的资源需求,有效解决断线续传问题,减少异常情况下的联动控制时延,满足了火灾防控预警实时、安全、高效的要求。

### 3.3 平台防控层

以“智能矿山基础信息平台”为中台底座,智能矿山火灾防控应用作为“基础信息平台”的子业务应用,融合煤矿企业所涉及的火灾防控业务的相关图纸文档、实时火灾监测与日常防火管理数据,对数据进行统一处理后通过火灾防控应用中的智能分析方法,实现火灾分析结果的信息化展现,实时、动态划分采空区“三带”等,当发生异常时,可根据分级预警与处置原则,实现不同管理人员的分级预警与异常处置,同时在灾变情况下,根据专家知识库,提供火灾应急处置方案。另外实现对胶体防火材料物资与通防人员的信息化调配,通过火灾防控“一张图”,使得煤矿安全管理人员可直观的掌握全矿火灾感知、防控装备的分布与运行状态,对火灾风险及时防控,实现管控一体化。

在“云-边-端”协同的火灾防控体系架构中,云平台是重中之中,不仅是要永久存储火灾管控数据、支撑火灾防控业务应用,并融合专家知识库,对火灾防控关键指标进行专业分析,采用直观、多维的指标、图形、报表等多种方式进行火灾防控业务的综合展示,指导作业现场火灾防控工作。

### 3.4 “云-边-端”协同架构辩证关系

根据辩证法对立统一规律,一方面,基于“云-边-端”协同一体化的火灾防控体系三个层级是辩证统一的有机整体。只有具备数据感知与执行控制层的装备等物质基础,才能为边缘计算及云平台的专家分析提供数据支撑;具备边缘计算层,才能将感知与执行控制层的有效数据上传下达,减轻云平台的计算压力,减少异常情况下的联动控制时延;云平台的存在,使得感知与执行控制层的存在有意义,不经过专家系统分析的数据无法指导现场实践。另一方面,三者之间存在对立关系。随着技术的发展,采空区、胶带输送机沿线等布置大量的低成本 MEMS 等传感器及控制器覆盖更多的危险区域,负责数据分析及处理的云平台专家分析系统及边缘计算功能无需太智能便可实现火灾报警功能;边缘计算层若能分担更多的计算功能,也可减弱云平台的计算需求;随着云平台的分析模型趋于智能化,通过较少的感知数据便可实现准确的专家预测分析,对感知控制层的硬件配置及数量要求会降低。

总之,“云-边-端”协同的火灾防控体系各层级之间是一个统一的整体,同时既相互联系、相互依赖,又相互排斥、相互对立。当前存在有效感知点少、边缘计算不成熟、云端计算结果可信度不高等问题,各层级技术平均需要大力推进。基于“云-边-端”协同的火灾防控体系的构建,在满足国家能源局等智能矿山验收标准的基础上,融合先进火灾防控技术,推进煤矿火灾防控进步。

## 4 煤矿火灾智能化防控相关技术

### 4.1 数据感知关键技术

煤矿火灾数据的采集(感知)、传输、存储是智能矿山火灾防控所有业务的基础保障。在相关标准建设提出的最基本的监测、防治装备基础上,还需要重点攻克以下关键技术。

1)大样本感知技术与装置。现有矿山火灾传感监测传感器以有线供电、传输为主,其体积及功耗大,导致移动、维护困难、成本高,导致只能按照煤安要求安装有限的传感器,无法实现对矿井火灾全方位监测感知。因此,须研发新型的微功耗传感、超低功耗与无线通信的火灾监测传感装置<sup>[36]</sup>,在降低传感及传输设备成本的基础之上,保证稳定的供电能力。通过安装大量火灾传感装置实现大样本火灾信息感知,提升火灾的感知能力、完善“智慧”体系的神经网络。如应用在采空区中的无线自组网 MEMS 温

度传感器,可大范围的部署在采空区中,全面覆盖煤自燃危险区域。可部署在带式输送机托辊上,可全面、接触式测量带式输送机异常点温度,实现主运输环节火灾的实时监测预警。

巷道巡检机器人应用于采煤工作面进、回风巷道,配置红外成像、多参数气体传感器等,对顶板煤层及两帮监测,加大煤壁隐蔽自燃高温点的监测频率,同样对于带式输送机配置轨道巡检机器人,作为MEMS无线温度传感器的补充,实现带式输送机沿线的全面监测。

2)火灾危险区域监测点部署优化策略。利用火灾数值模拟、理论计算、实验研究等方式研究煤矿火灾状态下关键参数流场分布规律,优化光纤测温、束管监测、红外成像、无线自组网传感器等监测及联动控制的装备部署策略,并对采空区及皮带等区域进行分区防控,充分利用有限的感知与控制装置,实现煤矿火灾危险区域的最优化覆盖。

#### 4.2 边缘计算关键技术

1)边缘侧配套物理装备。边缘侧需要具有低能耗、低时延以及高速读写特性的存储设备来支持多源异构数据的存储。此外,计算能力强、耐用性好、抗干扰、低成本的微型人工智能芯片是实现煤矿井下火灾边缘计算的设备基础。

2)火灾预警、决策边缘计算算法。构建以火灾智能决策业务为导向、与云中心相协调的边缘算法,首先对涉及到火灾的各物理层数据进行优化、处理,具备各子系统多源异构数据接入、汇总、转换能力,建立规范化火灾数据标签体系,完善火灾数据映射功能,优化构建边缘计算数据基础平台;其次建立火灾预警及决策边缘计算方法,不同于云计算全面、专业的分析模型,该计算主要根据控制逻辑完成紧急处置命令的下发(如外因火灾自动洒水)。

3)边缘节点部署策略。多方面权衡终端数据、安装成本、通信时延、计算速率和业务需求等因素,制定边缘节点在空间上的最优部署策略,此外,各边缘节点必须保障数据的私密性和安全性<sup>[37]</sup>。

#### 4.3 云平台关键技术

1)火灾数据治理技术。煤矿智能化火灾防控应用需融合光纤测温系统、红外成像系统、束管监测系统、安全监测系统等不同子系统数据,具有图像、文本等不同的数据格式,气体、分布式温度等不同的数据结构,以及时间、地点等信息,数据来源复杂、结构多样,数据质量是应用及模型分析的基础,利用大数据处理技术<sup>[38-39]</sup>构建符合煤矿火灾数据特征的数据

存储,取代现有分散子系统获取数据直接到上位机软件分析的模式,提升火灾数据的自由调取、灵活组合能力,解决众多子系统信息孤岛问题。

2)火灾预警及决策模型。煤矿智能化火灾防控应用需要具备专业的火灾预警及决策模型<sup>[40]</sup>,包含模糊聚类算法、支持向量机、人工神经网络、贝叶斯算法等常规火灾风险预警数学算法,融合安全管理数据、火灾专家智能决策知识库、火灾应急处置方案,以处理后的多源信息数据为基础,充分挖掘发现火灾规律,判断煤矿火灾危险状态及灾害发生位置,作为数值仿真软件初始条件实时仿真,即时规划火灾避灾路线及应急处置方案,根据仿真结果对火灾防控装备进行定量精准联动控制。

## 5 结 论

1)提出基于“云-边-端”协同的煤矿智能化火灾防控架构体系,完善感知执行层数据采集装置、补充边缘计算层需求、优化云端综合管控功能,并对平台建设需要解决的关键技术进行详细论述,满足国家能源局《智能化煤矿建设指南(2021年版)(征求意见稿)》、中国煤炭学会团体标准《智能化采煤工作面分类、分级技术条件与评价指标体系》(T/CCS 002 2020)等已出台的各层级标准中对于火灾防控的要求,以适用于煤矿火灾防控智能化的建设实践;

2)煤矿智能化火灾防控应用集成多源异构数据,融合智能分析决策算法,能有效的指导煤矿企业技术、管理人员进行灾害防控,对煤矿火灾重大风险防控起到积极的作用;

3)随着地面通用技术行业传感技术的提高及灾害预警算法的成熟,未来包括火灾防控业务应用在内的煤矿智能化综合管控平台必将能为煤炭行业提供成熟的决策支持。

#### 参考文献(References):

- [1] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.  
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.
- [2] 王国法,杜毅博,任怀伟,等.智能化煤矿顶层设计研究与实践[J].煤炭学报,2020,45(6):1909-1924.  
WANG Guofa, DU Yibo, REN Huaiwei, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909-1924.
- [3] 王国法,杜毅博.煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J].煤炭科学技术,2020,48(1):1-9.

- WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 1-9.
- [4] 钱建生, 胡青松. 智能煤矿建设路线与工程实践[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 109-117.
- QIAN Jiansheng, HU Qingsong. Construction routes and practice of intelligent coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 109-117.
- [5] 丁恩杰, 廖玉波, 张雷, 等. 煤矿信息化建设回顾与展望[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(7): 5-11.
- DING Enjie, LIAO Yubo, ZHANG Lei, et al. Review and prospect of coal mine information construction[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(7): 5-11.
- [6] 卢瑞翔, 苏贺涛, 康宁, 等. 基于专家决策支持的煤自燃火灾防控系统设计[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2020, 42(5): 403-408.
- LU Ruixiang, SU Hetao, KANG Ning, et al. Design of coal spontaneous combustion fire prevention and control system supported by expert decision-making[J]. *Journal of WUT(Information & Management Engineering)*, 2020, 42(5): 403-408.
- [7] 梁运涛, 王伟. 矿井自燃火灾超前协同防控技术[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 39-45.
- LIANG Yuntao, WANG Wei. Advanced cooperative prevention and control technology of mine spontaneous combustion fire disaster[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 39-45.
- [8] 梁运涛, 辛全昊, 王树刚, 等. 煤自然发火过程颗粒堆积体结构形态演化实验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1398-1405.
- LIANG Yuntao, XIN Quanhao, WANG Shugang, et al. Structure variation of coal particle packing during the spontaneous combustion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1398-1405.
- [9] 郑学召, 回硕, 文虎, 等. 矿井火灾孕灾机制及防控技术研究进展[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(10): 148-151, 155.
- ZHENG Xuezhao, HUI Shuo, WEN Hu, et al. Research Progress on Preventing and Controlling Technology and Disaster-forming Mechanism of Mine Fire[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(10): 148-151, 155.
- [10] 申林. 煤矿外因火灾危险兆事件致因及防控对策研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- SHEN Lin. The Study on Causes of External Fire Near-Miss in Coal Mine and Its Control Measures[D]. Xi'an: Xi'an University of science and technology, 2015.
- [11] 孙继平, 宋姝. 基于遗传算法实现聚类的煤矿内因火灾识别[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 1-4.
- SUN Jiping, SONG Shu. Clustering in early recognition of coal mine internal-caused fire based on genetic algorithm[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2006(1): 1-4.
- [12] 李兴东, 王少强, 陈洋蕾, 等. 煤矿内因火灾危险性评价新耦合模型[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(7): 159-163.
- LI Xingdong, WANG Shaoqiang, CHEN Yanglei, et al. New Coupling Model for Risk Assessment of Spontaneous Fire in Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(7): 159-163.
- [13] 秦忠诚, 陈光波, 李谭, 等. “AHP+熵权法”的CW-TOPSIS煤矿内因火灾评价模型[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(2): 193-201.
- QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, LI Tan, et al. CW-TOPSIS mine internal caused fire evaluation model of “AHP+entropy weight method”[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 193-201.
- [14] 王君莉. 煤矿电气火灾风险的PHA-LEC评估模型及其应用[J]. *煤矿机械*, 2017, 38(12): 138-140.
- WANG Junli. Risk assessment model for coal mine electrical fire based on PHALEC and application[J]. *Coal Mine Machinery*, 2017, 38(12): 138-140.
- [15] 陈雅, 蒋仲安, 谭聪. 基于危机征兆的煤矿内因火灾预测模型的研究[J]. *矿业安全与环保*, 2015, 42(1): 56-59.
- CHEN Ya, JIANG Zhong'an, TAN Cong. Study on prediction model of coal mine spontaneous combustion based on crisis symptoms[J]. *Mine Safety & Environmental Protection*, 2015, 42(1): 56-59.
- [16] 刘永立, 杨虎. 煤矿火灾应急救援演练虚拟现实系统研究[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(6): 22-25.
- LIU Yongli, YANG Hu. Study on virtual reality system for mine fire emergency rescue training[J]. *Mine Safety & Environmental Protection*, 2013, 40(6): 22-25.
- [17] 张园园, 孙麟, 刘明. 梯形模糊事故树预测算法的改进及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(11): 156-161.
- ZHANG Yuanyuan, SUN Lin, LIU Ming. Improvement and application of trapezoidal fuzzy fault tree prediction algorithm[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(11): 156-161.
- [18] 文虎, 张铎, 郑学召. 煤矿平巷火灾数值模拟及其特征参数研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(4): 62-67.
- WEN Hu, ZHANG Duo, ZHENG Xuezhao. Study on numerical simulation and feature parameters of fire disasters occurred in mine roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(4): 62-67.
- [19] 邢震. 浅埋厚煤层地表漏风对采空区煤自燃影响数值模拟研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(2): 80-87, 103.
- XING Zhen. Numerical simulation study on the influence of surface air leakage in shallow thick coal seam on coal spontaneous combustion in goaf[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(2): 80-87, 103.
- [20] 张小翌, 王德明, 杨雪花. 煤矿硐室电缆火灾数值模拟[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(3): 52-55.
- ZHANG Xiaoyi, WANG Deming, YANG Xuehua. Numerical simulation of cable fire in coal mine chamber[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(3): 52-55.
- [21] 路新惠. 煤矿火灾烟气流动传播过程仿真研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(6): 14-16.
- LU Xinhui. Smoke flow propagation simulation research of coal mine fires[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(6): 14-16.
- [22] 徐劭懿, 李梅, 毛善君, 等. 带约束条件的煤矿火灾避灾路线算法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(5): 59, 173-178.
- XU Shaoyi, LI Mei, MAO Shanjun, et al. Study on escape route algorithm with constraints during coal mine fire[J]. *Coal Science*

- and Technology, 2018, 46(5): 59,173-178.
- [23] 旷永华. 分布式激光火情监测系统应用及其测点部署优化[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(5): 99-102.  
KUANG Yonghua. Application and optimization of test point deployment of distributed laser fire monitoring system[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(5): 99-102.
- [24] 陈洋, 王伟. 采空区自燃火灾预报方法与监测新技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 118-122.  
CHEN Yang, WANG Wei. Prediction method and new monitoring technology of goaf spontaneous combustion fire[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 118-122.
- [25] 邢震. 综放工作面采空区自然危险区域监测技术及应用研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(11): 130-132,137.  
XING Zhen. Research on monitoring technology for danger zone of spontaneous combustion in goaf of fully-mechanized top-coal caving face[J]. Coal Engineering, 2017, 49(11): 130-132,137.
- [26] 冯加宇, 唐洪, 贺涛, 等. 基于红外热成像的煤矿输送带火灾监测预警技术研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 280-282.  
FENG Jiayu, TANG Hong, HE Tao, et al. Infrared image monitoring and early-warning technology of coal mine conveyor belt fire[J]. Coal Technology, 2016, 35(12): 280-282.
- [27] 梁运涛, 侯贤军, 罗海珠, 等. 我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 1-6,13.  
LIANG Yuntao, HOU Xianjun, LUO Haizhu, et al. Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 1-6,13.
- [28] 刘红威, 王飞. 井下细水雾防灭火技术应用现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 86-92.  
LIU Hongwei, WANG Fei. Application status and development tendency of fire prevention and extinguishing technology with water mist in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 86-92.
- [29] 王丽威. 井下车载灭火系统应用现状及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2019, 50(9): 126-129.  
WANG Liwei. Application situation and development trend of underground vehicular fire-extinguishing system[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(9): 126-129.
- [30] 何景强. 矿用防爆无轨胶轮车火灾预防对策及自动灭火系统[J]. 煤矿安全, 2019, 50(4): 191-194.  
HE Jingqiang. Fire protection countermeasures and application of automatic fire extinguishing system for explosion-proof trackless rubber-tyred vehicle[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(4): 191-194.
- [31] 韩兵, 杨宏伟, 高宏, 等. 复合惰性气体采空区自然发火防治技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 73-76.  
HAN Bing, YANG Hongwei, GAO Hong, et al. Research on prevention and control technology of spontaneous combustion in goaf based on composite inert gas[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 73-76.
- [32] 史波波. 煤矿液氮防灭火技术应用及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2014, 45(10): 154-157.  
SHI Bobo. Development tendency and application of coal mine liquid nitrogen fire prevention technology[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(10): 154-157.
- [33] 王斌国. 面向矿山瓦斯预警应用的多元多尺度数据融合方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.  
WANG Binguo. Research on multi scale data fusion method for mine gas early warning application[D]. Qingdao: Shandong University of science and technology, 2019.
- [34] 屈世甲, 武福生. 基于边缘计算的采煤工作面甲烷监测模式研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 161-167.  
QU Shijia, WU Fusheng. Discussion on methane monitoring mode of coal face based on edge computing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 161-167.
- [35] 陈晓晶, 何敏. 智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 208-212,236.  
CHEN Xiaojing, HE Min. Framework system and key technology of intelligent mine construction[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 208-212,236.
- [36] 程文波, 王华军. 矿井无线传感器网络建构方法研究[J]. 金属矿山, 2012(3): 107-109.  
CHENG Wenbo, WANG Huajun. Research of wireless sensor network construction method for mine[J]. Metal Mine, 2012(3): 107-109.
- [37] 程琦. 基于物联网的安全预警系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
CHENG Qi. Research on security early warning system based on Internet of things[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [38] 周雁斌. 智能矿山大数据关键技术与发展研究[J]. 世界有色金属, 2020(11): 13-14.  
ZHOU Yanbin. Research on key technology and development of big data in intelligent mine[J]. World Nonferrous Metals, 2020(11): 13-14.
- [39] 何敏. 智能煤矿数据治理框架与发展路径[J]. 工矿自动化, 2020, 46(11): 23-27.  
HE Min. Intelligent coal mine data governance framework and development path[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(11): 23-27.
- [40] 马小平, 杨雪苗, 胡延军. 人工智能技术在矿山智能化建设中的应用初探[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 8-14.  
MA Xiaoping, YANG Xuemiao, HU Yanjun, et al. Application of artificial intelligence technology in mine intelligent construction[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 8-14.