



矿井智能通风与关键技术研究

张浪 刘彦青

引用本文：

张浪, 刘彦青. 矿井智能通风与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 178–195.

ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 178–195.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1987>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国矿井通风技术现状及智能化发展展望

Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dbe9d65c-874e-43d6-89d2-d621859dfa53>

基于粗糙集和改进胶囊网络的煤矿智能通风管理方法

Intelligent ventilation management method of coal mine based on rough set and improved capsule network

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 124–132 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4cd5224e-e186-4f6b-be6f-fd77d4418676>

智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究

Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b0ab44ca-6def-4469-aa36-9945f0f926c9>

智能矿山大数据关键技术与发展趋势

Key technology and development research on big data of intelligent mine

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ad5665a8-9386-4e4d-9961-f162334cdf89>

煤矿瓦斯智能抽采关键技术研究进展及展望

Research progress and prospect of key technology of intelligent gas drainage in coal mine

煤炭科学技术. 2021, 49(5): 27–34 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6c432411-043a-4643-b8b0-c2227107b7bb>

煤矿智能一体化辅助生产系统及关键技术

Intelligent integrated auxiliary production system and key technologies

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/28425ed7-4896-4b08-9d65-840ead25c2f7>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张浪, 刘彦青. 矿井智能通风与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 178-195.
ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 178-195.

矿井智能通风与关键技术研究

张浪^{1,2,3}, 刘彦青^{1,2,3}

(1. 煤科通安(北京)智控科技有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;

3. 智能开采与岩层控制国家重点实验室, 北京 100013)

摘要: 为使智能通风系统建设更加有序、可控, 提出了矿井智能通风流程环节, 将矿井智能通风流程按照生产环节划分为6个板块, 即感知监测、分析诊断、智能决策、方案审批、远程集控联控、执行反馈, 共包含24个具体环节, 建立了各个环节输入输出要素和环节之间的功能逻辑关系。按照“矿井通风系统整体规划+采掘用风区域重点细化”思路, 提出了矿井全系统智能通风应用场景实现方案和采煤工作面与掘进工作面2个细化的智能通风应用场景实现方案, 将矿井智能通风各个具体环节融入具体的应用场景中。为实现智能通风应用场景, 基于逻辑分层思想优化了矿井智能通风系统整体架构, 规划了由硬件驱动层、功能模块层、计算处理层、数据存储层、数据采集层构成的矿井智能通风管控平台。针对通风感知监测、分析诊断、智能决策、远程集控联控4个矿井智能通风关键板块中涉及的风量风速监测感知、通风阻力在线监测、全风网风量风压解算、灾源判识和灾变定位、矿井动态需风量计算、通风系统故障诊断、风量按需调控方案决策、应急控风方案决策、无人化远程控风、无人化应急控风10个关键环节, 总结分析了目前各个关键环节关键技术现状, 提出了各个关键环节关键技术实现路径, 通过关键技术迭代升级, 最终实现矿井通风系统全生命周期内时刻处于稳定可靠、安全可控、高效节能、应急降灾的运行状态。

关键词: 智能通风; 通风流程; 管控平台; 智能决策; 数据采集

中图分类号: TD724 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)01-0178-18

Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines

ZHANG Lang^{1,2,3}, LIU Yanqing^{1,2,3}

(1. CCRI Tongan (Beijing) Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China)

Abstract: The process steps of intelligent ventilation in mines were proposed, which could make the ventilation system more orderly and controllable. The process of intelligent ventilation in mines was divided into six process sections according to the production process, namely perception monitoring, analysis and diagnosis, intelligent decision-making, scheme approval, remote centralized control and joint control, and execution feedback, which included a total of 24 specific process steps. The input and output elements of each process step and the functional logical relationship between the process steps were clarified. According to the concept of “overall plan of the mine ventilation system+key refinement of the mining air area”, the scheme for implementing the intelligent ventilation process of the entire mine system and two refined intelligent ventilation process application scenarios for the coal mining and excavation working faces were proposed. The intelligent ventilation process steps of the mine were integrated into specific application scenarios. In order to achieve intelligent ventilation application scenarios, the overall architecture of the mine intelligent ventilation system was optimized based on the logical layering concept. The mine intelligent ventilation control platform consisting of hardware driver layer, functional module layer, computing processing layer, data storage layer, and data acquisition layer was planned and designed. The four key process sections of intelligent ventilation involved ten key process sections, which were ventilation perception monitoring, analysis and diagnosis, intelligent decision-making,

收稿日期: 2023-12-20 责任编辑: 常琛 DOI: 10.12438/cst.2023-1987

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新创业基金资助项目(2021-2-TD-ZD005)

作者简介: 张浪(1978—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 研究员。E-mail: Lnzhanglang@163.com

ing, remote centralized control and joint control. The ten key process steps included monitoring and perception of air volume and wind speed, online monitoring of ventilation resistance, analysis of air volume and pressure in the entire air network, identification and identification of disaster sources, calculation of dynamic air demand in mines, diagnosis of ventilation system faults, decision-making of on-demand air volume control plans, decision-making of emergency air control plans, unmanned remote air control, and unmanned emergency air control. The current technological status of the ten key process steps were summarized and analyzed, and the technical implementation paths for the ten key process steps were proposed. Through iterative upgrades of various intelligent ventilation key technologies, the mine ventilation system was ultimately achieved to be in the stable, reliable, safe, controllable, efficient, energy-saving, and emergency disaster reduction operation state throughout its entire lifecycle.

Key words: intelligent ventilation; ventilation process; control platform; intelligent decision-making; data acquisition

0 引言

双碳时代背景下要求煤矿生产活动向高效、绿色、清洁方向快速转变,稳定可靠的矿井通风系统是煤矿安全绿色生产的重要保障,矿井通风精细化管控又是实现煤矿通风系统稳定可靠运行的重要技术路径,而以机械式、半自动化式通风技术装备为主的现阶段煤矿通风管控模式难以达到煤矿通风精细化管控的要求。在严格遵守“以风定产”前提下,矿井通风智能化为实现煤矿通风精细化管控和煤矿通风系统高效节能运行提供了有力的技术支撑,因此开展矿井智能通风系统建设是煤矿发展的必然趋势^[1]。

目前我国煤矿通风技术智能化水平处于初级到中级阶段^[2],卢新明等^[3]总结了按需调风、灾变控风等智能通风解算决策理论基础;周福宝等^[4]构建了矿井智能通风人-机-环一体化综合信息流架构,在通风精准监测预警、通风网络实时解算、通风故障诊断与智能决策调控等方面取得了一系列成果。与此同时,矿井智能通风建设过程需要解决的科学技术难题也逐渐凸显,涉及热流耦合理论、传感器布设优化、阻变型故障诊断、非灾变型扰动识别等一系列关键技术难题需要攻关突破^[5]。

为进一步推动矿井智能通风技术的发展与进步,笔者借鉴生产工艺环节思路,将“矿井通风系统时刻处于稳定可靠、安全可控、高效节能、应急降灾的运行状态”类比为“生产工艺流程生产出的合格产品”,将“各项智能通风业务实现”类比为“生产工艺流程中各个生产工艺环节正常运行”,将“各项智能通风业务之前相辅相成的关联关系”类比为“生产工艺流程中各个生产工艺环节之间输入输出资源”,建成具有强耦合性的矿井智能通风系统,充分发挥矿井智能通风系统的整体优势作用,同时能够对影响矿井智能通风系统发挥整体作用的关键环节提出明确的技术先进性要求,促进智能通风关键技术迭代升级。

因此,笔者开展了矿井智能通风建设流程环节、矿井通风智能化应用场景化、矿井智能通风系统整体架构、矿井智能通风管控平台、矿井智能通风关键环节技术实现路径5个方面的研究探讨,为实现矿井通风智能化和无人化提供借鉴。

1 矿井智能通风流程环节

通过梳理矿井通风业务,提出了矿井智能通风流程,将流程整体划分为6个板块,每个板块包括若干项环节,流程共包含24个环节,明确了各个环节之间业务支撑关系,如图1所示。

①感知监测板块主要获取矿井全时域通风环境状态信息、通风动力与通风设施运行状态信息、通风灾变信号,主要包括在线同步监测矿井风速风量风压,在线监测通风设施压差过风量以及设备是否正常运行,在线监测通风动力通风参数和机电参数,并对监测数据进行滤波降噪处理,清洗噪声和异常值,提高监测数据可靠性。②分析诊断板块主要对海量通风相关信息进行有序整理与目的性筛选,通过数理算法模型,定量化分析通风系统健康程度,定量化评估通风系统安全态势,准确定位排查危险隐患和故障问题,实时掌握通风系统人-机-环全方位运行状态。③智能决策板块主要包括矿井最优供风、风量按需调控、灾变应急控风、避灾路线规划等通风业务,自动在线决策生成上述通风业务的执行方案。④方案审批板块主要对自动生成的通风业务执行方案进行审核确认,确认执行方案的实施合理性和安全可靠性。⑤远程集控联控板块主要以数字化、可视化、自动化技术为核心,对矿井通风动力、通风设施进行精准有序的互联控制,实现井下无人或少人条件下通风系统合理供风与风量按需调控,灾变时期应急控风方案快速及时执行。⑥执行反馈板块主要对智能通风业务执行结果进行后评估,提出优化建议或整改意见,逐步提升智能通风系统的整体运行效率。具体环节详细内容见表1。

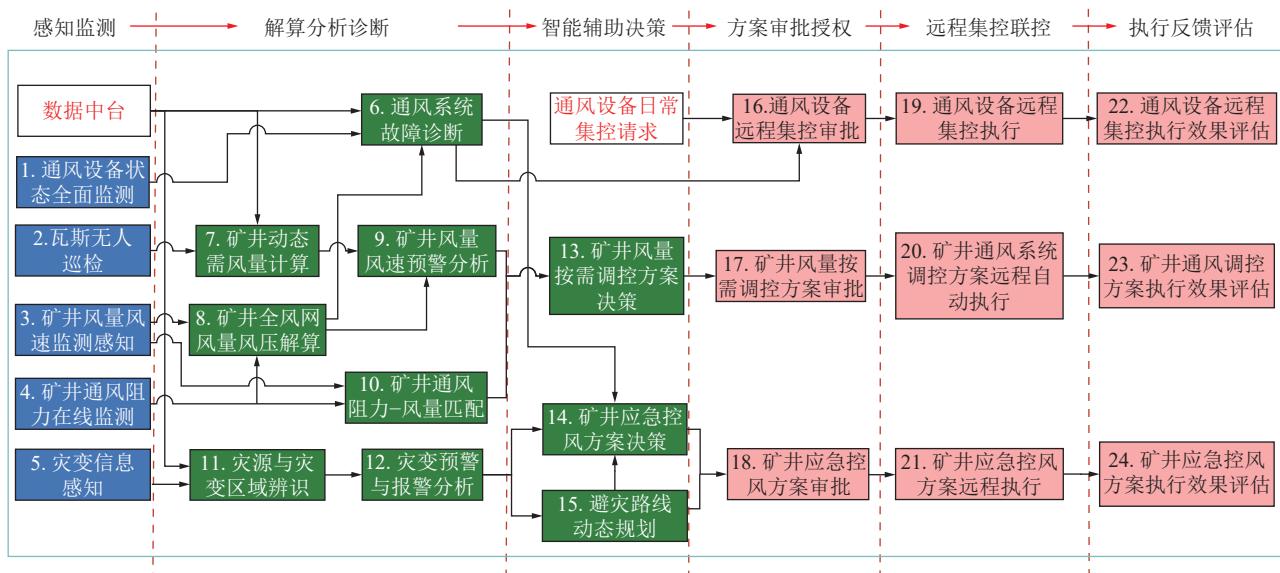


图1 矿井智能通风系统流程环节逻辑关系

Fig.1 Logical relationship between process links of mine intelligent ventilation system

表1 矿井智能通风系统流程环节信息汇总

Table 1 Summary of process information of mine intelligent ventilation system

板块	环节	各环节主要执行内容	环节输入	环节输出
感知	通风设备状态全面监测	①智能通风设备运行状态数据采集，实现通风设备原始状态数据的全方位采集；②智能通风设备运行状态数据清洗，实现通风设备关键状态信息提取与滤波降噪	—	①设备网络通信状态；②设备通风工况状态参数；③设备机电工况状态参数
	瓦斯无人巡检	①瓦斯体积分数监测数据采集；②瓦斯体积分数监测数据清洗	—	巷道瓦斯体积分数准确监测值
	矿井风量风速监测	①风速风量监测数据采集；②风速风量监测数据清洗	—	巷道实时风速、风量
	矿井通风阻力监测	①矿井通风阻力基础数据监测采集；②矿井通风阻力基础数据清洗	—	矿井通风阻力基础参数值
	灾变信息感知	①风流温度、风流方向、风流组分监测数据采集；②风流温度、风流组分监测数据清洗	—	巷道风流温度、风流组分、风流是否逆转
解算分析	通风系统故障诊断	①设备故障超前预警或及时报警，自动给出故障解决建议；②通风网络阻变型故障快速诊断与定位	①设备网络通信状态；②设备通风工况状态参数；③设备机电工况状态参数；④通风网络风量风压数据	①设备运行状态是否正常，如有故障，明确设备故障类型与故障原因；②通风网络是否存在阻变型故障，明确故障位置与故障原因
	矿井风量风速预警分析	按照《煤矿安全规程》中巷道风速、粉尘质量浓度、瓦斯体积分数、二氧化碳浓度等通风相关要求，验证风量风速安全性	①矿井所有巷道动态需风量区间范围值；②矿井所有巷道实时风量、风速数据	明确给出待调节风量巷道，及风量调节目标值
	矿井动态需风量计算	参照AQ1056—2008《煤矿通风能力核定标准》中规定各类用风地点需风量计算办法，进行需风量动态计算	①获取巷道长度、断面积等巷道信息；②获取瓦斯、二氧化碳等有毒有害气体浓度动态信息；③从数据中台获取人员、车辆动态信息；④获取巷道风流温度等环境气候条件动态信息	矿井所有巷道动态需风量范围值
	灾源与灾变区域辨识	基于灾变感知信息，采用人工智能算法或者灾变风流模拟技术进行快速自动模拟反演灾变演化过程与趋势	输入部分巷道风流温度、气体组分、粉尘质量浓度、冲击波破坏范围与破坏强度	①输出灾源位置(具体巷道分支)；②输出灾变影响区域(具体矿井区域范围)
	矿井全风网风量风压实时解算	①矿井通风网络更新信息收集；②矿井通风网络解算模型更新；③矿井通风网络实时解算	①矿井巷道采掘信息；②数量有限的巷道分支实时风速、风量数据；③矿井通风阻力基础参数值	①矿井所有巷道实时风量和风速数据；②矿井所有巷道风压和通风阻力数据
	矿井通风阻力与风量匹配分析	按照AQ1028—2006《煤矿井工开采通风技术条件》中矿井通风阻力相关规定，进行矿井通风阻力与风量量化匹配性分析	①矿井总风量数据；②矿井通风阻力基础参数数据	①实时矿井通风阻力值；②矿井通风阻力与矿井总风量是否匹配，如不匹配，给出矿井通风阻力优化目标区间值
	灾变预警与报警分析	①灾变预警与报警级别划分；②定量模拟灾变动态演化过程和发展趋势	①灾源位置(具体巷道分支)；②灾变影响区域(具体矿井区域)	①矿井各巷道灾变预警报警级别；②灾变影响区域发展演化过程

续表

板块	环节	各环节主要执行内容	环节输入	环节输出
智能辅助决策	矿井风量调控方案决策	采用人工智能算法或直接解算算法对按需供风非线性规划问题进行求解,求解结果满足以下四方面要求①矿井各用风点满足需风量要求;②矿井各用风点满足风速要求;③矿井通风系统满足合理功耗要求;④矿井通风阻力与总风量满足匹配要求	①需进行调节风量巷道,及巷道风量调节目标值;②风量风速预警报警巷道应急需风量区间及应急调节风量目标值	①给出矿井通风系统调节方案决策结果;②给出多系统联动调控方案决策结果,涉及其他系统联动调控内容
	避灾路线规划	根据灾情演变情况,划分矿井灾变影响区域,根据巷道坡度、温湿度、光线等因素,按区域动态生成最佳避灾路线	①从数据中台获取井下人员信息;②灾源位置(具体巷道分支)、灾变影响区域(具体矿井区域);③灾变影响区域发展演化过程	显示与发布人员避灾逃生路线
	矿井应急控风方案决策	井下远程快速密闭等设施优先调节,主通风机应急调控置后,实现灾变有毒有害气体不侵入人员集中区域,快速排出矿井,同时对采掘系统造成损坏最小	①灾源位置(具体巷道分支);②灾变影响区域(具体矿井区域);③设备故障诊断信息;④通风阻变故障诊断信息	①矿井应急控风方案结果;②多系统联动调控方案决策结果;③通风系统故障处置方案
方案审批授权	矿井通风系统调控方案审批	从人员调度管理、外部政策多个方面分析调控方案的合理性	①矿井通风系统调节方案决策结果;②多系统联动调控方案决策结果涉及通风系统调整内容	审批通过的矿井通风系统调整方案
	通风设备远程集控指令审批	从人员调度管理、外部政策多个方面分析调控方案的合理性	向管控平台提交的通风设备远程集控指令	审批通过的通风设备远程集控指令
	矿井应急控风方案审批	从人员、物资、设备等救援调度多个方面分析应急控风方案合理性	①矿井应急控风方案结果;②多系统联动调控方案决策结果	审批通过的矿井应急控风方案
	矿井通风系统调控方案远程自动执行	①通风动力目标工况自动调节执行;②通风设施目标工况自动调节执行	审批通过的矿井通风系统调整方案	通风动力和通风设施目标工况调节是否完成
远程集控执行	通风设备远程集控自动执行	①主通风机反风演习、定期切换等;②局部通风机日常切换等;③风门远程解闭锁试验等	①通风设备故障诊断结果;②管控平台下发通过审批的远控指令	通风动力和通风设施是否完成指令执行要求
	矿井应急控风方案远程执行	①自动控制风门远控解闭锁并全部打开;②防火门远控关闭;③快速密闭远控关闭	审批通过的矿井应急控风方案	①自动控制风门远控解闭锁完成情况;②防火门远控关闭完成情况;③快速密闭远控关闭;④人员位置信息
	通风设备集控评估	按照通风设备运维管理要求和《煤矿安全规程》等规程规范,对通风设备集控功能进行日常测试检验	通风动力和通风设施完成指令执行要求之后,通风设备的运行状态和集控指令执行情况	①设备是否处于正常待机状态;②设备常规功能是否能够正常使用;③设备灾变应急功能是否能够正常使用
执行反馈评估	矿井风量按需调控方案执行效果评估	—	调控方案执行后,获取矿井风量、风速、通风阻力监测数据	①是否达到风量调节目标值;②矿井通风阻力与总风量匹配程度;③定量评估方案执行后通风实际能耗
	矿井应急控风方案执行效果评估	—	应急控风方案执行后,获取矿井通风系统灾变信息监测数据、人员位置信息	①明确灾变区域是否缩减或消失;②明确灾变有毒有害气体是否排出矿井;③明确人员安全撤离情况

2 矿井通风智能应用场景化

为了实现整个矿井通风系统安全、高效、可靠运行,根据矿井智能通风系统流程环节,将整个矿井通风系统按功能划分为矿井采煤工作面区域通风系统、掘进工作面区域通风系统、矿井主要进回风大巷通风系统,按照“矿井通风系统整体规划+采掘用风区域重点细化”思路,进行智能通风应用场景构建,提出了矿井智能通风应用场景如图2所示,应用场景具体实现内容包括:①满足矿井各类巷道(采掘巷道之外)风速上下限规定、人员呼吸,车辆尾气排放、瓦斯二氧化碳气体稀释等要求;②解决矿井各类巷

道(采掘巷道之外)瓦斯二氧化碳异常涌出、外因火灾、煤尘瓦斯爆炸等突发灾害问题;③解决矿井各类巷道(采掘巷道之外)车辆尾气超限等突发职业卫生问题;④实现掘进工作面智能通风应用场景;⑤实现采煤工作面智能通风应用场景。

以采掘工作面为智能通风重点区域,分别对采煤工作面、掘进工作面进行智能通风应用场景研究,如图3、图4所示。采煤工作面智能通风应用场景的具体实现内容包括:①满足采煤工作面风速上下限规定、工作面人员呼吸,车辆尾气安全排放、瓦斯二氧化碳安全气体稀释等要求;②解决上隅角低氧、

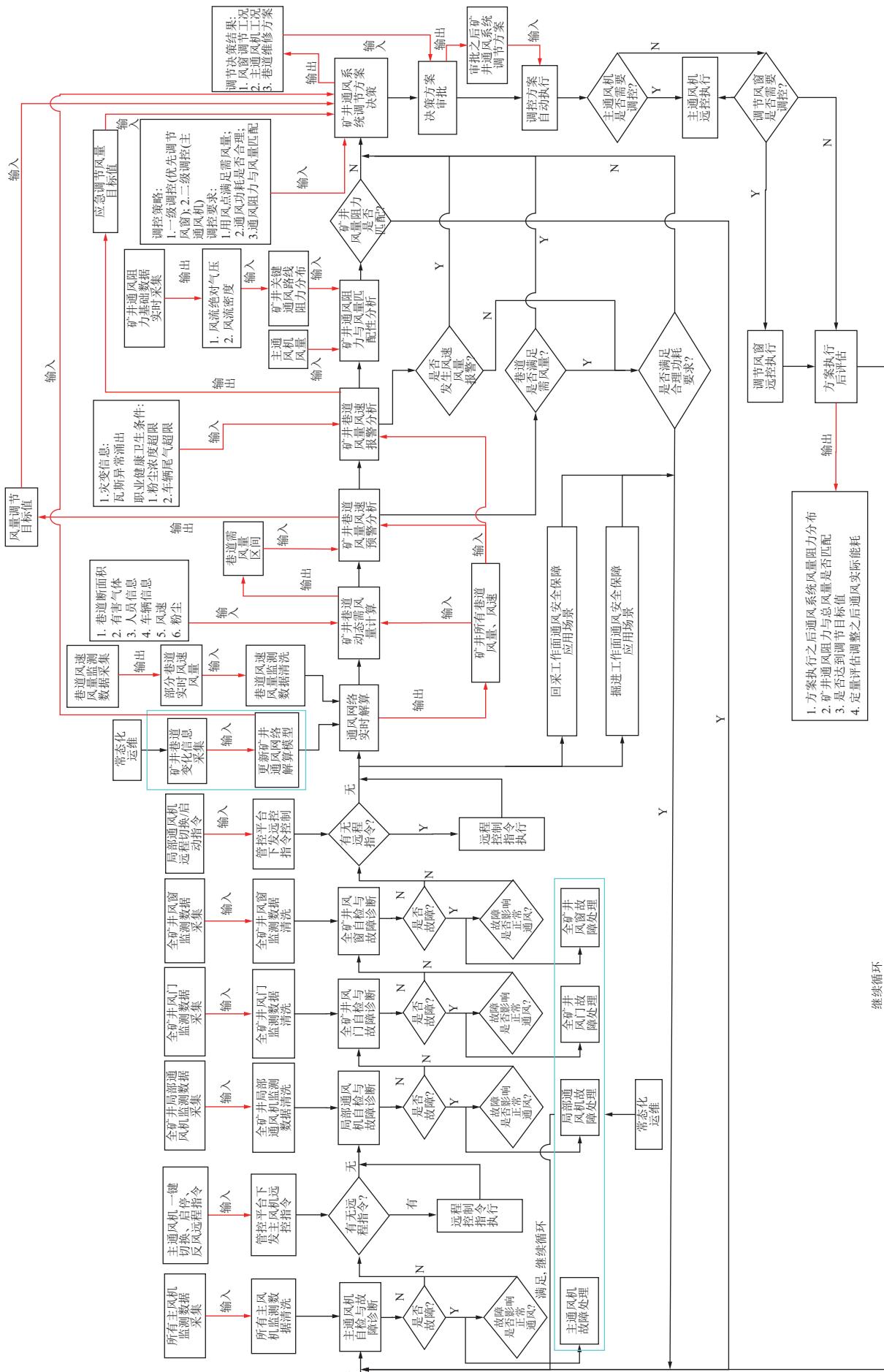


Fig.2 Implementation scheme of application scenario of intelligent ventilation system of whole system of mine

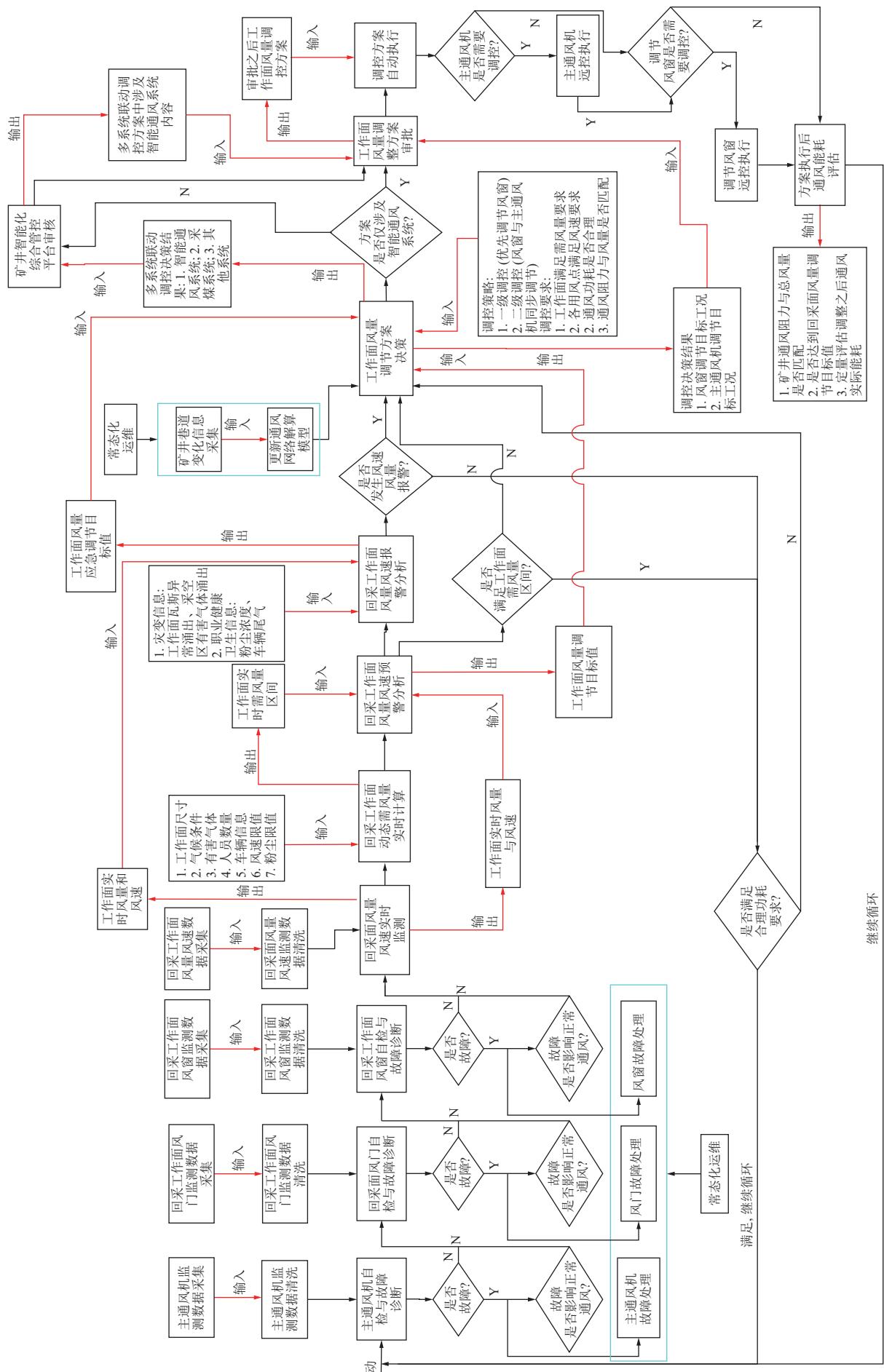


Fig.3 Implementation scheme of application scenario of intelligent ventilation process of coal mining face

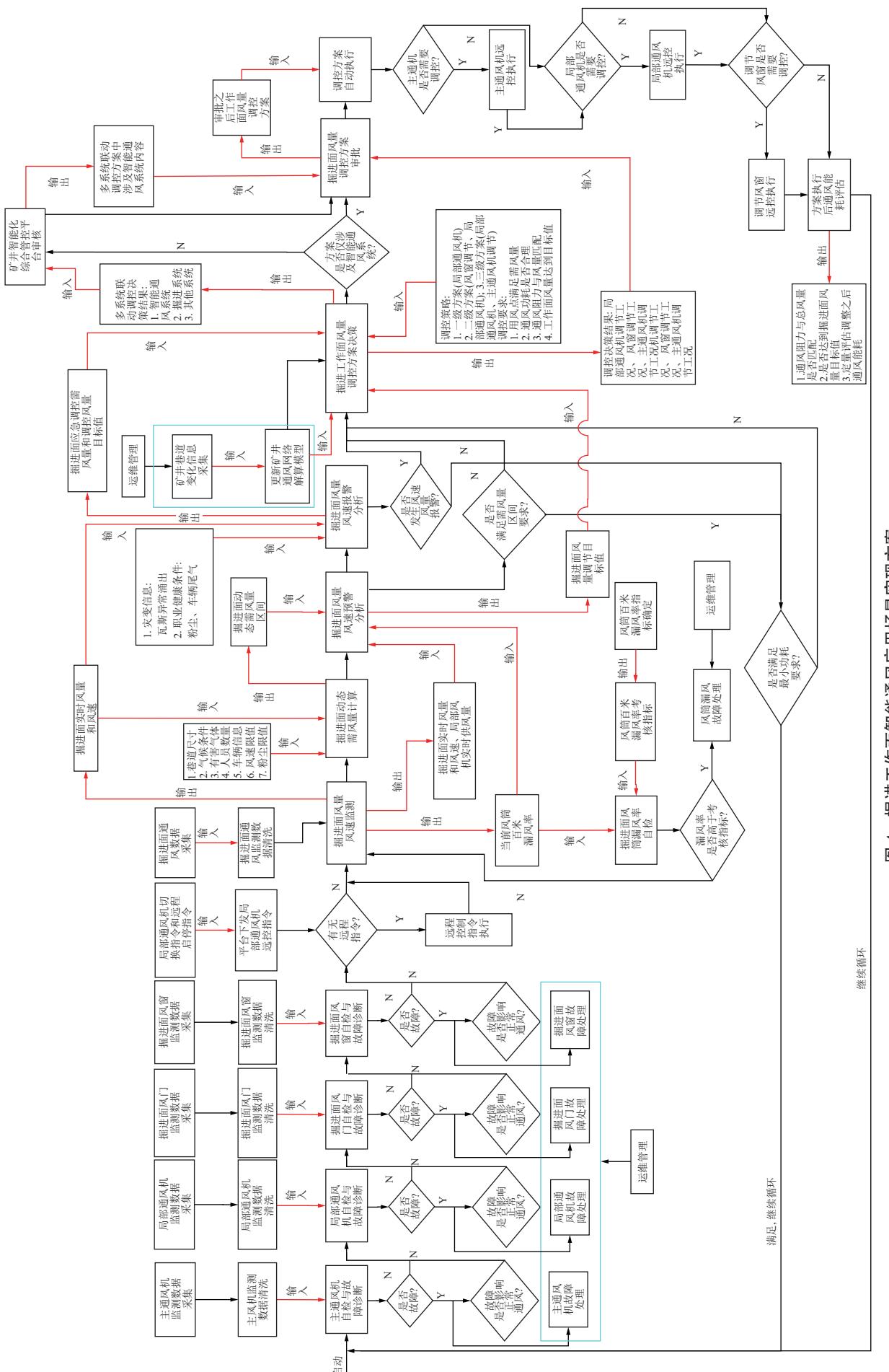


Fig.4 Implementation scheme of application scenario of intelligent ventilation process of excavation face

采空区火灾气体异常涌出、瓦斯二氧化碳异常涌出、外因火灾等突发灾害问题;③解决风流温度高、粉尘质量浓度超限等突发职业卫生事件。掘进工作面智能通风应用场景化具体实现内容包括:①满足掘进工作面风速上下限规定、工作面人员呼吸,瓦斯二氧化碳气体安全稀释等要求;②解决瓦斯二氧化碳异常涌出等突发灾害问题;③解决工作面掘进工作面风流温度高、车辆尾气异常超限、粉尘质量浓度超限等突发职业卫生问题。

3 矿井智能通风系统整体架构

为了实现矿井智能通风系统各个环节,以逻辑分层思想研究了矿井智能通风系统架构,分解为智能通风感知系统、数据中台、智能通风管控平台、智能通风调控设备,如图5所示,其中数据中台服务于全矿井所有智能化系统,各个智能化系统向数据中台上传数据,数据中台对上传数据进行汇聚整合

和提纯加工,同时各个智能化系统可向数据中台申请获取其他智能化系统数据,实现各个智能化系统之间数据共享,解决各个智能化系统之间数据孤岛问题。

智能通风感知系统中各类终端传感器与监测装置采集各类数据,经边缘计算终端筛选获得有价值数据上传数据中台,同时智能通风管控平台向数据中台获取人员车辆等其他系统的相关数据;数据中台将分散在采掘、人员车辆等其他系统中的智能通风相关业务数据进行汇聚整理和提纯加工之后,向智能通风管控平台提供所需业务数据;智能通风系统从数据中台获取业务数据之后,开展各项智能通风相关分析、解算、决策相关功能服务,智能通风管控平台根据分析、解算、决策相关功能服务结果下发远控指令,同时根据数据中台反馈的设备状态监测、环境参数监测等参数,远控智能通风调控设备,完成智能通风具体业务功能。

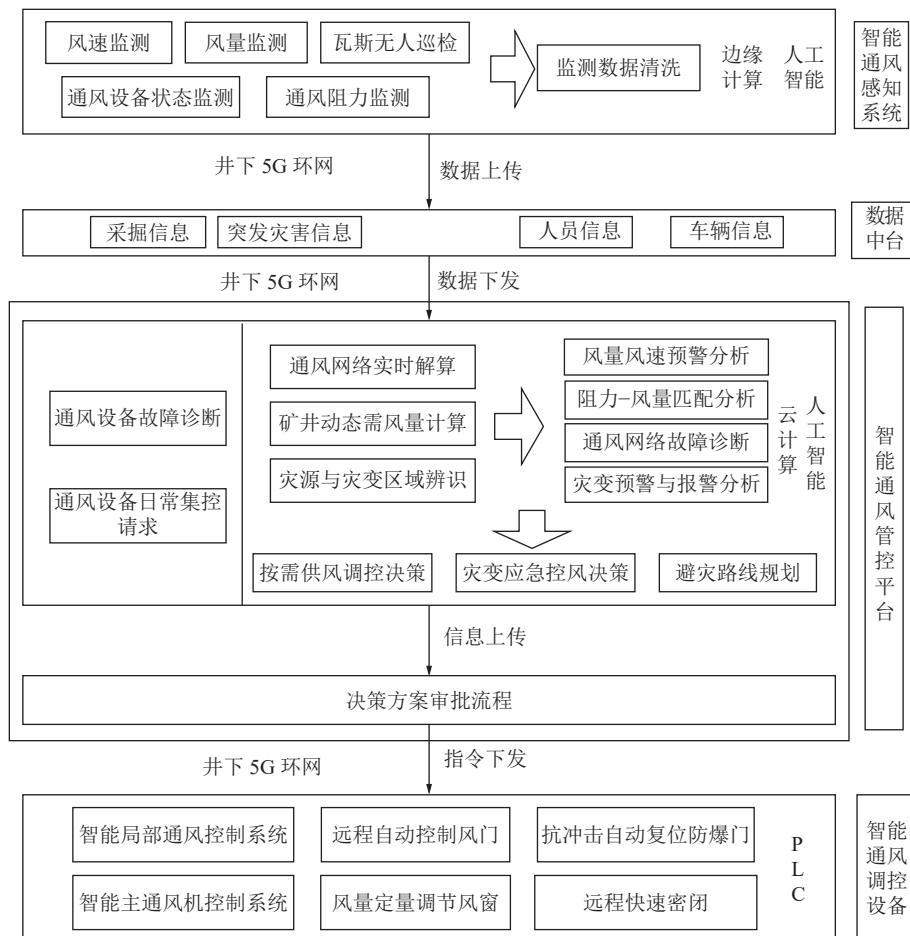


图5 矿井智能通风系统架构
Fig.5 Overall architecture of intelligent ventilation system

4 矿井智能通风管控平台

矿井智能通风管控平台是矿井智能通风系统的

“大脑”，划分为硬件驱动层、业务功能层、计算处理层、数据存储层、数据采集层，如图6所示，其中客户



图6 通风智能决策分析平台架构

Fig.6 Architecture of ventilation intelligent decision analysis platform

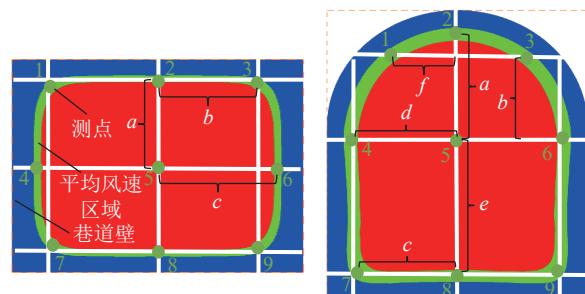
端集中展示与体现的业务功能层,通过客户端实现各类智能通风功能,硬件驱动层与计算处理层直接支撑业务功能层的运行,实现智能通风各类功能;数据采集层、数据存储层为计算处理层提供数据来源支撑和数据存储功能支撑。

5 矿井智能通风关键环节技术实现路径探讨

5.1 通风感知监测板块技术实现路径探讨

对于矿井风量风速监测感知环节,单点式超声波风速传感器、对射式超声波风速传感器已经应用于井下风速在线监测^[6],测风误差为 $\pm 0.1 \text{ m/s}$,测风下限达到 0.1 m/s ,实现巷道点风速、线风速准确监测。根据巷道风速结构场恒定原理,刘剑等^[7-8]论证了基于湍流平均统计的巷道单点风速监测数据反演获得巷道平均风速这一方法在理论上是可行的;笔者^[9]采用CFD模拟与现场测试结合方法探索研究了测风站单点测风的风速传感器布置位置;卞欢等^[10]构建了基于CFD模拟数据的巷道平均风速单点监测神经网络模型,根据巷道断面内任一风速值反算

巷道平均风速值;周福宝等^[4]提出了差压监测反演井巷风量技术,一定程度上降低单点传感器监测巷道平均风速误差;笔者团队^[11]研发了基于巷道断面平均风速区域“9点”采集法的全断面多点移动式全自动测风系统,如图7、图8所示,实现了巷道“点风速”到“面风速”监测升级;笔者团队以对射式超声波风速传感器为基础,基于巷道多条线风速积分成面风速原理,研发了全断面扫描式全自动测

图7 巷道平均风速区域(绿色区域)与风速监测九点布置位置^[11]Fig.7 Average wind speed area of roadway (the green area) and nine-point arrangement of wind speed monitoring^[11]

风系统,如图9所示,实现了巷道全断面风速场扫描式监测。

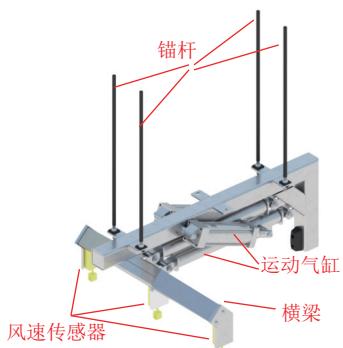


图8 全断面多点移动式全自动测风系统^[11]

Fig.8 Full-section multi-point mobile automatic wind measurement system^[11]

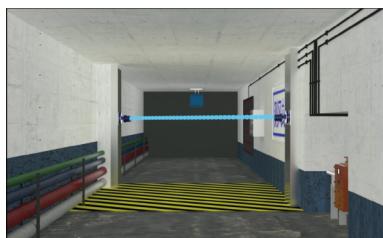


图9 全断面扫描式全自动测风系统

Fig.9 Full-section scanning automatic wind measurement system

对于通风阻力在线监测环节,巷道风流湍流脉动会造成通风阻力测试随机误差,采用传感器在线监测技术在短时间多次测试取统计平均结果能够实现通风阻力准确测试^[12]。目前主要包括压差监测法与绝压监测法,监测原理如图10所示,将以往费时费力的井下通风阻力实测工作升级为在线监测。压差监测法以测压精度达到 ± 1 Pa的压差传感器作为核心设备,实现了矿井通风阻力在线监测,缺点是需铺设整个矿井通风阻力路线长度的测压气管,铺设

工程量与后期维护工作量较大。绝压监测法以实时监测绝对气压、风流温湿度的通风多参数传感器为核心设备,实现了通风阻力、空气密度、自然风压等通风阻力相关参量在线监测,通风多参数传感器的绝压监测精度为 ± 10 Pa,通风阻力监测精度低于压差监测法,但维护工作量远小于压差监测法。

矿井风量风速监测感知环节和通风阻力在线监测环节的技术实现路径为:①针对传感器探头在井下高粉尘环境中适应差问题,设计开发了脉冲式压风喷气装置、往复机械刷式装置等清灰装置,每日定时清洁传感器探头;②传感器须具备边缘计算能力,构建数据清洗模型^[13-14],能够对采集数据进行分类辨识与提取,过滤掉风门正常开闭、车辆行驶、人员走动等扰动数据和传感器受电磁环境影响产生的失真数据;③开发传感器故障自诊断功能,及时上传反馈故障信号;④传感器实现无线信号传输,能够显著降低传感器安装运行维护工作量。

5.2 通风分析诊断解算板块技术实现路径探讨

对于矿井全风网风量风压解算环节,以往通风网络解算是采用历史数据解算,难以适应动态实时需求,为了准确解算高产高效矿井通风系统风量实时变化,众多学者^[15-18]基于回路风量法和结合风量平差计算模型,提出了基于有限风量监测数据的通风网络实时网络实时解算技术,在全矿井所有风压风速传感器的一个巡检周期内能够完成一次解算,实时解算结果准确率达到90%以上。该环节的技术实现路径为:①研究风量监测巷道分支数量和位置优选方法能够提升实时网络解算结果准确性^[19];②建立考虑井巷热湿影响的通风网络解算数学模型能够提升实时网络解算的结果准确性^[20];③通过基于分形维数描述巷道表面粗糙程度^[21]或BP神经网络等人工智能算法^[22-23]实现了实时网络模型井巷风

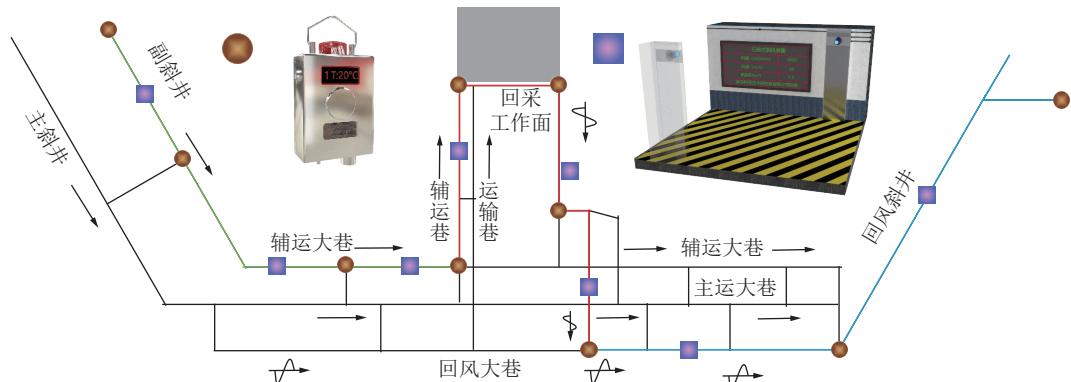


图10 矿井通风阻力在线监测原理示意

Fig.10 Schematic of principle of online monitoring of mine ventilation resistance

阻快速准确自动预测更新,通过采掘设备实时空间坐标实现实时网络模型巷道拓扑关系自动更新,能够大幅度提升通风实时网络解算效率。

对于灾源判识和灾变定位环节,灾变风流模拟是基础,灾变风流模拟数学模型复杂程度、模拟解算速度、模拟解算结果准确性3者之间存在相互制约关系。在矿井灾变风流模拟分析方面,面向矿井通风灾变的场量表达和可视化仿真是关键难点之一^[24],Ventsim,Mfire等模拟软件实现了通风网络解算和火灾烟流或瓦斯风流耦合模拟^[25-26],实现了通风网路内风量变化、风流逆转、有毒有害气体蔓延的快速模拟计算,笔者团队构建了火灾时期通风网络“风量风压-风流温度-各类有毒有害烟气-氧气浓度”风流模拟多物理场耦合模型,实现了火灾风流快速模拟解算,耦合模型如图11所示,解算流程如图12所示。对于瓦斯煤尘爆炸等强破坏性灾变,董铭鑫等^[27]、孟亦飞等^[28]使用CFD软件能够模拟研究通风管网中瓦斯爆炸冲击波传播特性;刘剑等^[29]基于模拟数据构建训练机器学习模型实现了通风网络内爆炸冲击波传播的快速模拟。实际生产中,灾变发生具有时间突发性、地点不确定性等特点,如何快速确定灾源位置和灾变类型至关重要,该工艺环节的技术实现路径为:①研究灾变快速模拟技术,快速模拟各类灾变场景,定量分析火灾影响范围和影响时效;②根据各类灾变场景模拟结果,总结出通风系统拓扑结构特征集、灾源特征集、通风网络内有害气体等致灾危险源蔓延扩散特征集,采用人工智能算法,构建与训练灾源位置与灾变区域智能判识模型;③以矿井通风网络结构、实时解算结果和灾变实时感知信息作为数据输入,通过灾源位置与灾变区域智能判识模型,快速确定灾变类型,圈定灾源位置。

对于矿井动态需风量计算环节,目前矿井需风

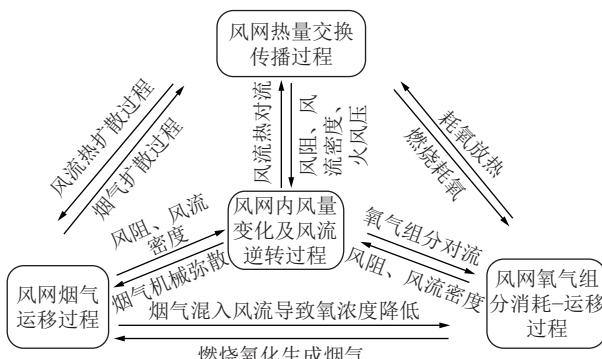


图11 火灾风流模拟多物理场耦合模型

Fig.11 Multiphysics coupling model for fire wind flow simulation

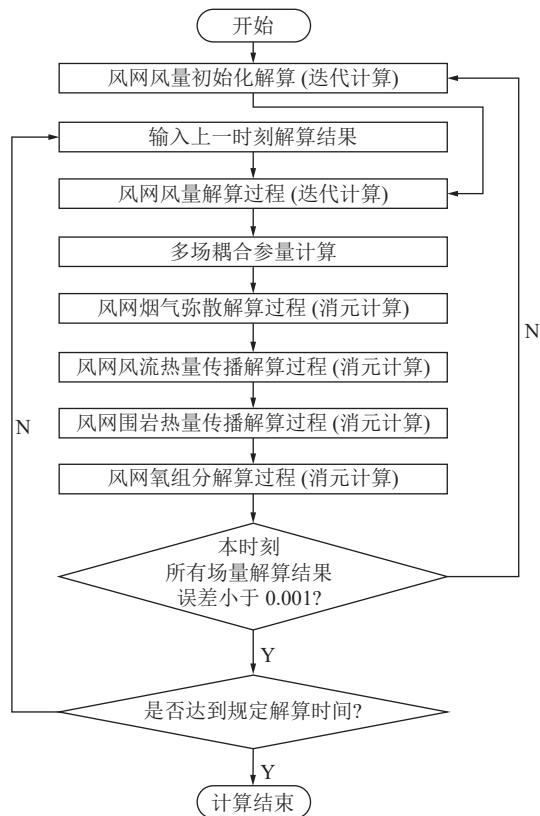


图12 通风网络火灾风流模拟解算流程

Fig.12 Simulation process of fire air flow in ventilation network

量根据往年矿井相关历史数据计算得到,未按照矿井人机环各类条件动态变化情况进行需风量实时计算,矿井实际配风往往明显大于矿井实际需风量,造成矿井风量浪费。该环节的技术实现路径为:①多系统多元数据信息提取融合是实现矿井动态需风量计算的基础,研究多源数据融合信息集成动态展示技术,通过数据中台技术集成智能通风、人员车辆定位、安全监控、防火防尘等其他系统数据信息,建立基于实时数据的矿井最佳供风人-机-环多元动态决策模型,开发矿井多系统信息融合实时决策解算需风量技术,实现通风相关信息融合分析矿井动态需风量;②建立基于实时网络解算结果的需风量动态分析预警模型,通过动态需风量与实际风量对比,对各地点风量不足、风速超限等问题进行报警预警。

在通风系统故障诊断环节方面,实现通风系统故障在线诊断与定位溯源,实时保证通风系统全时域安全稳定高效节能运行,根据故障对通风系统的影响可划分为阻变型故障、通风动力失效故障、非风流隔断与调控功能失效型通风设施故障。对于阻变型故障诊断,刘剑等^[30]提出并验证了适用于单故障条件下优化故障诊断监测传感器布置的扫帚模型,倪景峰等^[31]研究论证了小型通风网络结构条件下随

机森林比决策树具有更高故障诊断准确率;李秉芮等^[32]提出了基于异常巷道风量变化最大理论和通风实时网络解算的巷道风阻异常在线诊断技术;笔者团队^[33]研究论证了大型通风网络结构条件下人工智能算法中神经网络的故障诊断准确率相对较高。该环节的技术实现路径为:①基于通风网络实时解算技术,结合神经网络等人工智能方法,优化传感器布置位置,实现了复杂通风网络结构条件下阻变型故障位置及故障类型快速诊断;②对于通风动力失效故障,冲击脉冲技术能够实现风机关键机械结构损伤的超前探测,风机轴温监测技术能够实现风机电机健康状态实时评价分析;③对于非风流隔断与调控功能失效型通风设施故障,通过开发边缘计算风门控制器,对视频图像、位置传感器信号等数据进行分析,实现了非风流隔断与调控功能失效型通风设施故障诊断。

5.3 智能通风决策板块关键技术实现路径探讨

对于矿井风量按需调控方案决策环节,魏引尚等^[34]提出了矿井通风系统分级控制策略;裴晓东等^[35]建立了以自动调节风窗为关键调节设施的基于元胞自动机模型的分支风量调节方案决策模型;基于灵敏度矩阵,吴新忠等^[36-37]分别采用改进麻雀搜索算法和灰狼算法,任子晖等^[38]采用改进天牛须搜索算法,均实现了最优风量调节分支集合和分支风阻最优调节值的决策。矿井风量按需调控方案决策以矿井通风系统安全、高效、绿色、低碳运行为目标导向,自动解算给出矿井通风动力与通风设施的调控方案,实现“用风地点→采区→矿井”分级分域矿井风量动态精准调控,调控设备涵盖通风设施与通风动力,矿井分区域控风方案自主决策流程如图13所示,该工艺环节的技术实现路径为:①结合各区域用风地点动态需风量,确定风量调节位置与调节目标;②根据风量调节位置与调节目标,对采掘工作面、采区(盘区)、矿井进行控风区域划分,圈定联控影响区域范围,确定联控设备集;③采用各类改进的人工智能仿生算法,结合灵敏度矩阵,对控风方案决策这类非线性规划问题进行在线解算,控风方案决策结果为自动调节风窗调节风阻范围、局部通风机运行频率、主通风机运行频率叶角等参数组合集。

对于矿井应急控风方案决策环节,根据事故灾变源诊断定位结果,自动给出能够消除故障的矿井通风动力与通风设施应急联控方案,并结合安全监控、人员车辆定位等相关系统信息,在线自动生成安全逃生路线和人员避灾路线,兼顾人员安全迅速撤

离和灾源快速有效控制。针对灾变类型和灾源位置已经明确的灾变场景,张智韬等^[39]提出了基于结合卡尔曼滤波PID的远控风门-风窗-风机联合调控风流算法,实现火灾烟气应急排放;王凯等^[40-41]基于灾变时期矿井通风供需偏离特征,建立了多元特征融合的主通风机调频、关联分支调阻及联合调节的数学模型,实现了以风门和主通风机为调控设备的火灾风流智能调控。实际灾变发生具有时间突发性、地点不确定性等特点,根据通风系统灾情发展动态研判结果进行灾变应急决策^[42],该环节技术实现路径为:①采用人工智能算法,构建和训练以灾变类型和灾源位置为数据输入的灾变应急控风方案快速决策优选模型;②灾变发生之后,根据灾变类型和灾源位置,快速选定应急防控预案,同步实时调用获取安全监控、人员定位、车辆定位等各类安全生产相关子系统数据信息,按照矿井灾变分区域进行人员避灾路线动态规划,在线自动生成安全逃生路线,兼顾人员安全迅速撤离和灾源区域快速有效控制。

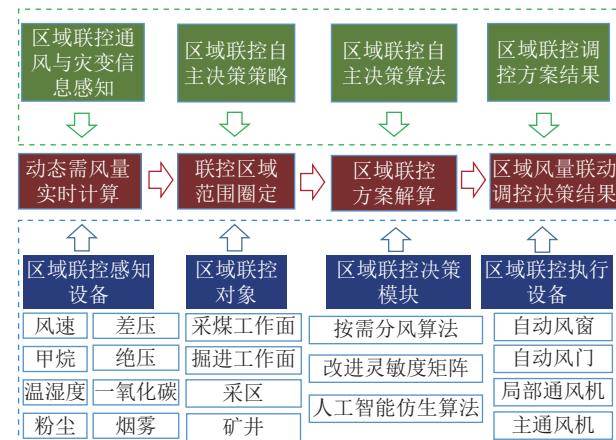


图13 矿井分区域控风方案自主决策流程
Fig.13 Independent decision-making process of mine sub-regional wind control scheme

5.4 通风远程集控联控板块技术实现路径探讨

5.4.1 远程控风无人化执行环节技术路径探讨

自动控制风门和自动调节风窗、具有变频调速功能的主要通风机和局部通风机均已在全国煤矿中推广开来。

目前自动控制风门已实现“红外感应/遥控”“光控感应”“图像识别”等多种自动开闭控制模式,笔者团队^[43]研发了自适应巷道变形-轻量化-可调合页-远程自动控制风门。目前百叶式自动调节风窗应用最为广泛,均实现了风窗过风面积远控调节,笔者团队^[44]建立调节风窗过风面积-等效局部风阻数学模型,如图14所示,笔者团队^[45]研发了基于PID控

制算法的多用风地点风量全自动在线联合调控系统,实现了除井下掘进工作面之外的采煤工作面、各

类硐室等多个用风地点风量在线按需调控,如图15所示。

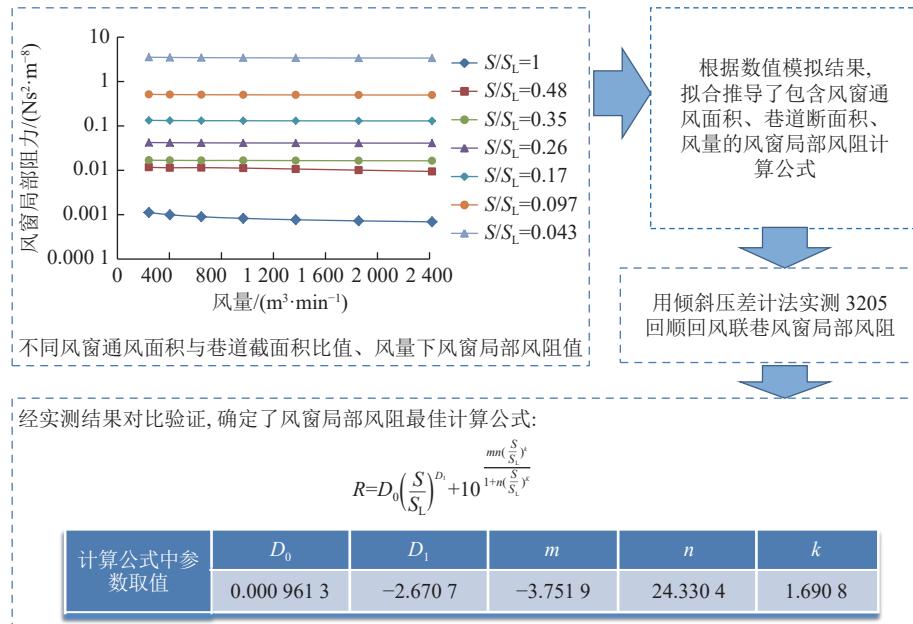


图14 调节风窗过风面积-等效风阻数学模型构建流程^[44]

Fig.14 Building process of mathematical model of automatic adjustment of wind area of wind window and equivalent wind resistance^[44]

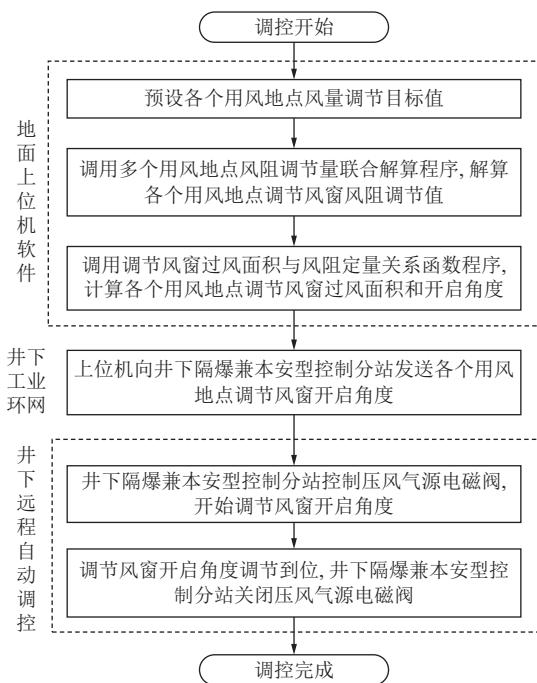


图15 基于自动风窗的多用风地点风量在线调控实现流程^[45]

Fig.15 Implementation process of online air volume control of multi-purpose air location based on automatic air window^[45]

主要通风机以FBCDZ系列轴流式目前应用最广,风压范围为400~6 570 Pa,风量上限达到450 m³/s,变频调速技术已经成熟应用,动叶可调技术也在逐步推广使用中,笔者团队^[43]研发了主通风机远程集

中控制系统,实现了主通风机不停风切换、联动反风和定量供风智能化控制等功能,实现了主通风机复杂的人工操作过程向自动化控制转变和主通风机最佳工况点智能调节。

局部通风机以FBD系列防爆对旋式应用最广,效率达到80%以上,运行噪声低于80 dB,局部通风机变频调速技术已经成熟应用。笔者团队^[43]研发了基于PID算法的掘进工作面智能通风控制系统,融合了掘进工作面风速风量监测、瓦斯监测、变频调速技术,实现了掘进工作面按需动态最优供风功能,如图16所示;王磊等^[46]建立了基于理论供风量/实际供风量/实际需风量匹配性的局部通风机变频调控模

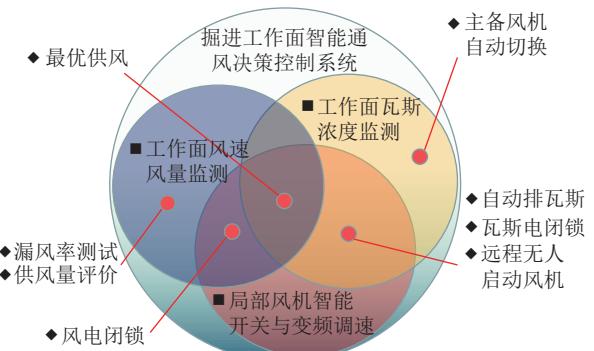


图16 智能局部通风控制系统的功能设计

Fig.16 Functional design of intelligent local ventilation control system

型,实现了长距离掘进工作面动态调风;贾天毅等^[47]提出了基于模糊控制理论的局部通风机运行频率分级应急响应调控模型,实现了无瓦斯突变量预判前提下大量瓦斯异常涌出后局部通风机快速应急响应调频稀释瓦斯。

该环节的技术实现路径为:①将通风设备远程人机干预控制模式逐步升级为可视化人机密切协同交互模式;②开发通风设施本安型电动驱动力系统,提升通风设施调控精准度和调节动力稳定性;③通风设备在保证结构强度条件下轻量化设计,方便现场运输和安装;④基于冗余控制策略,开发具有手动、自动、远程控制多种控制模式的通风设施;⑤基于冗余控制策略,开发具有手动应急控制、远程集中控制、自主调控多种控制模式的通风动力设备;⑥研究通风动力及通风设施联动控制技术,保证设备群联控期间矿井通风系统处于安全可靠状态;⑦开发具有边缘计算和局域自主网能力的井下分布式监控智能分站,节约地面管控平台算力,提高通风设备控风效率。

5.4.2 应急控风无人化执行环节技术路径探讨

针对矿井内外因火灾、瓦斯涌出等弱破坏性灾变,控制通风网络中烟气扩散(或含瓦斯风流)和降低通风网络内风流紊乱程度是火灾通风应急的关键核心问题,利用火灾烟气传播具有一定延时特点,超前采取措施疏导、排放烟气,并及时控制灾变区域范围。研发具有远控功能、漏风率低的耐火密闭/风门和烟气疏导排放动力设备是防控矿井内外因火灾的有效手段。为了防止火灾烟气通过风门侵入矿井安全区域,需提升风门闭锁可靠性,以保证风门的风流隔断效果;同时为了将火灾烟气快速排出矿井系统,需对风门进行远程解闭锁,将同一位置2道风门同时打开,火灾烟气随短路风流快速进入矿井回风巷,为此笔者团队^[43]开发了风门双重闭锁-远程解闭锁应急控制技术;基于此构建了采煤工作面一键反风降灾减灾应急系统(图17)和主运巷火灾应急短路烟排气系统;针对井下外因火灾、瓦斯涌出等具有灾变位置不确定的特点,为了快速控制灾变区域火灾烟气蔓延范围,同时为井下人员争取逃生时间,刘尚明等^[48]研发了耐火性充气式气囊,重量轻操作简单,能够实现井下灾变风烟流快速临时封堵与隔离。

针对煤与瓦斯突出、瓦斯煤尘爆炸灾害等强破坏性灾变,如何保证爆炸冲击波之后通风系统恢复通风功能是瓦斯煤尘爆炸灾害之后应急防控的关键。研发具有保护通风动力、快速复原、灾害有毒有害气

体疏导排放等功能的应急控风设备是防控瓦斯煤尘爆炸灾害的有效手段。范喜生^[49]研发了抗冲击自动复位式风井防爆门(图18),王雁鸣等^[50]优化了抗冲击自动复位式风井防爆门,实现了爆炸冲击波作用下风井防爆门自动泄压与自动恢复;姜文忠等^[51]研发了抗冲击远程快速密闭,解决了回采工作面内外因火灾、瓦斯涌出等弱破坏性灾害的快速密闭隔离难题;为了实现井下巷道发生煤尘瓦斯爆炸等强破坏性灾害之后实现无人化远程快速隔离灾区,笔者团队升级研发了自动复位式抗冲击远程快速密闭,如图19所示,冲击波快速泄压之后快速密闭能够自动复位,抗冲击波强度达到0.5 MPa,达到煤矿永久避难硐室防护密闭门抗冲击压力要求。

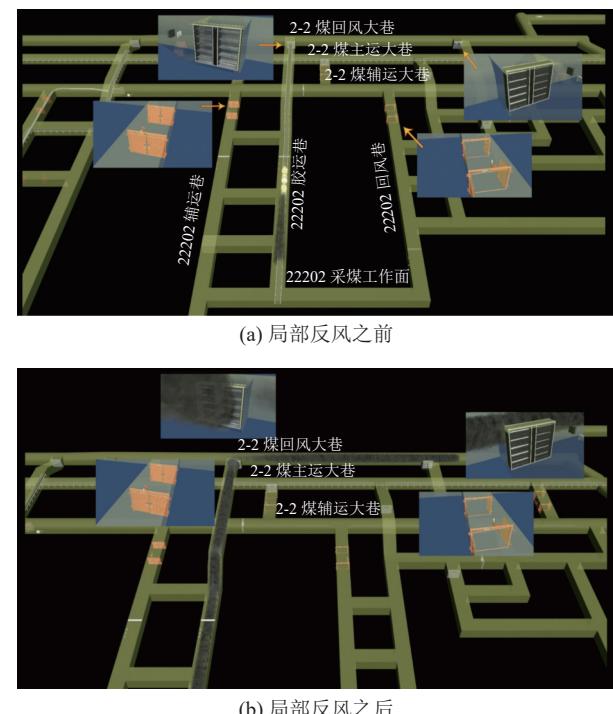


图17 采煤工作面一键反风降灾减灾应急系统

Fig.17 Local anti-wind system of coal mining face with disaster mitigation and mitigation effect

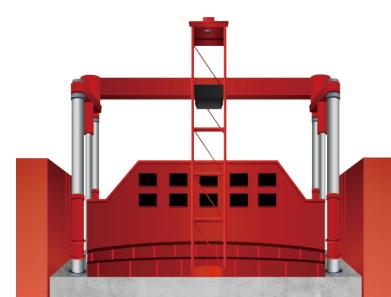


图18 回风立井抗冲击自动复位式风井防爆门

Fig.18 Impact-resistant self-resetting blowshaft explosion-proof door for return air shaft



图 19 自动复位式抗冲击远程快速密闭

Fig.19 Fast sealing with auto-reset and impact-resistant remote functions

该环节的技术实现路径为:①研发灾变信息感知传感器及配套系统,提高灾变信息获取能力;②应急控风减灾设备应具备远程控制、断电续航、抗冲击自动复位、有毒有害气体疏导与阻隔等功能;③针对煤尘爆炸产生爆炸冲击波、有毒有害烟气等多种致灾危险源,设计开发组合式应急控风设备,进行有效防控。

6 结 论

1)围绕实现矿井通风业务智能化和无人化的目标,提出了矿井智能通风流程环节,按照业务类型划分为6个板块,共包含24个环节,明确了矿井智能通风各环节之间业务逻辑关联关系和每个环节的输入输出要素。

2)按照“矿井通风系统整体规划+采掘用风区域重点细化”思路,研究了矿井全系统智能通风应用场景实现方案和采煤工作面、掘进工作面两个细化的智能通风应用场景实现方案。

3)建设矿井智能通风系统能够使矿井通风系统更加有序、更加可控,实现通风智能感知、智能决策分析关键环节是推进矿井通风系统信息化进程的关键,实现通风智能调控和灾变应急调控关键环节是推进矿井通风系统智能化进程的关键。针对通风感知监测、通风分析诊断解算、通风智能决策、通风远程集控联控4个矿井智能通风关键板块,总结分析了目前关键环节技术现状,提出了关键环节的技术实现路径。

参考文献(References):

- [1] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. Discussion on lastest technological progress and problems of coal mine intelligence[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [2] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huawei, et al. 2025 scenarios

and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.

- [3] 卢新明, 尹红. 矿井通风智能化理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2236-2247.
LU Xinming, YIN Hong. The intelligent theory and technology of mine ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2236-2247.
- [4] 周福宝, 辛海会, 魏连江, 等. 矿井智能通风理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 313-328.
ZHOU Fubao, XIN Haihui, WEI Lianjiang, et al. Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 313-328.
- [5] 刘剑. 矿井智能通风关键科学技术问题综述[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 108-111, 117.
LIU Jian. Overview on key scientific and technical issues of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 108-111, 117.
- [6] 张庆华, 姚亚虎, 赵吉玉. 我国矿井通风技术现状及智能化发展展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 97-103.
ZHANG Qinghua, YAO Yahu, ZHAO Jiyu. Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 97-103.
- [7] 刘剑, 李雪冰, 宋莹, 等. 无外部扰动的均直巷道风速和风压测不准机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1447-1453.
LIU Jian, LI Xuebing, SONG Ying, et al. Experiment study on uncertainty mechanism of mine air velocity and pressure with non-external disturbances[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1447-1453.
- [8] 刘剑, 李雪冰, 高科, 等. 井巷风速单点测试方法及其可行性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 23-27.
LIU Jian, LI Xuebing, GAO Ke, et al. Study on single-point measurement method of roadway air velocity and its feasibility[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 23-27.
- [9] 张浪. 巷道测风站风速传感器平均风速测定位置优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 96-102.
ZHANG Lang. Optimized study on location to measure average air velocity with air velocity sensor in wind measuring station of underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 96-102.
- [10] 卞欢, 刘剑, 刘学, 等. 基于 GA-BP 神经网络的巷道平均风速单点测试研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 57-64.
BIAN Huan, LIU Jian, LIU Xue, et al. Research on single point test of average wind speed in roadway based on GA-BP neural network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 57-64.
- [11] 孙永新, 张浪, 杨旭, 等. 巷道风量全自动在线测试装置研制与应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 251-256.
SUN Yongxin, ZHANG Lang, YANG Xu, et al. Development and application of automatic on-line measuring Device for roadway air volume[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 251-256.
- [12] 刘剑, 李雪冰, 陈廷凯, 等. 矿井定常湍流脉动对通风阻力测试影响的理论分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5):

- 22–25.
- LIU Jian, LI Xuebing, CHEN Tingkai, et al. Theoretical analysis on influence of steady turbulence fluctuation on ventilation resistance measurement in mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(5): 22–25.
- [13] 赵丹, 沈志远, 宋子豪, 等. 智能通风矿井风速传感器数据清洗模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 56–62.
- ZHAO Dan, SHEN Zhiyuan, SONG Zihao, et al. Mine airflow speed sensor data cleaning model for intelligent ventilation[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(9): 56–62.
- [14] 张巍, 李雨成, 张欢, 等. 面向通风智能化的风速传感器结构化数据降噪方法对比[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(8): 70–76.
- ZHANG Wei, LI Yucheng, ZHANG Huan, et al. Comparison of structured data noise reduction methods for airflow speed sensor of intelligent ventilation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8): 70–76.
- [15] 李伟, 霍永金, 张浪, 等. 矿井通风实时网络解算技术研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(3): 167–170.
- LI Wei, HUO Yongjin, ZHANG Lang, et al. Research on ventilation real time network solution[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(3): 167–170.
- [16] 罗广, 邹银辉, 宁小亮, 等. 矿井通风网络在线监测技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(5): 47–50, 55.
- LUO Guang, ZOU Yinhui, NING Xiaoliang, et al. Research and application of online monitoring technology for mine ventilation network[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(5): 47–50, 55.
- [17] 宋涛, 王建文, 吴奉亮, 等. 基于超声波全断面测风的矿井风网实时解算方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 114–120, 141.
- SONG Tao, WANG Jianwen, WU Fengliang, et al. Real-time calculation method of mine ventilation network based on ultrasonic full-section wind measurement[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 114–120, 141.
- [18] 谈国文. 复杂矿井通风网络可视化动态解算及预警技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(2): 6–11.
- TAN Guowen. Visualized dynamic solution and early warning technology for ventilation network complex min[J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(2): 6–11.
- [19] 李亚俊, 吴洁葵, 李印洪, 等. 基于最小生成树原理的矿井通风网络监测布局优化[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 172–175.
- LI Yajun, WU Jiekui, LI Yinhong, et al. Optimization on monitoring layout of mine ventilation network based on the principle of minimum spanning tree[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 172–175.
- [20] 陈开岩, 周福宝, 夏同强, 等. 基于空气状态参数与风量耦合迭代的风网解算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 613–623.
- CHEN Kaiyan, ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, et al. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 613–623.
- [21] 吴兵, 赵晨光, 雷柏伟. 巷道摩擦风阻粗糙表面分形表征及计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 633–640.
- WU Bing, ZHAO Chenguang, LEI Baiwei. Characterization and calculation and calculation method of friction resistance based on fractal theory of roadway rough surface[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 633–640.
- [22] 刘彦青. 基于巷道摩擦阻力系数BP神经网络预测模型的矿井风网风量预测研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(2): 101–106.
- LIU Yanqing. Study on the air quantity of mine ventilation network based on BP neural network prediction model of friction resistance coefficient in roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(2): 101–106.
- [23] 戚志鹏, 高科, 刘玉姣, 等. 巷道通风摩擦阻力系数遗传投影寻踪回归预测[J/OL]. 安全与环境学报: 1–10 [2023–12–10]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.1603>.
- QI Zhipeng, GAO Ke, LIU Yujiao, et al. Ventilation resistance coefficient prediction of tunnels based on GA-projection pursuit regression[J/OL]. Journal of Safety and Environment: 1–10 [2023–12–10]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.1603>.
- [24] 李翠平, 曹志国, 钟媛. 矿井火灾的场量模型构建及其可视化仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 902–908.
- LI Cuiping, CAO Zhiguo, ZHONG Yuan. Field variables modeling and visualization simulation of fire disaster in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 902–908.
- [25] 张景钢, 孙春峰, 张海洋, 等. 矿井火灾模拟解算软件开发研究[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(1): 30–35.
- ZHANG Jingang, SUN Chunfeng, ZHANG Haiyang, et al. Development and research of simulation calculating software of mine fire simulation[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2015, 12(1): 30–35.
- [26] 郝海清, 王凯, 张春玉, 等. 矿井皮带巷火灾风烟流场–区–网演化与调控规律[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 716–724.
- HAO Haiqing, WANG Kai, ZHANG Chunyu, et al. Evolution and regulation law of wind and smoke flow field area network in mine belt roadway fire[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 716–724.
- [27] 董铭鑫, 赵东风, 尹法波, 等. 通风管网中瓦斯爆炸火焰波传播特性三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 291–299.
- DONG Mingxin, ZHAO Dongfeng, YIN Fabo, et al. Flame propagation characteristics of gas explosion in 3D ventilation pipe network by numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 291–299.
- [28] 孟亦飞, 董铭鑫, 赵东风, 等. 大尺寸通风管网中障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播特性影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 99–104.
- MENG Yifei, DONG Mingxin, ZHAO Dongfeng, et al. Numerical simulation on influence of obstacle on propagation characteristics of shock wave caused by gas explosion in large size ventilation pipe network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(2): 99–104.
- [29] 刘剑, 曲敏, 黄德, 等. 应急状态下矿井瓦斯爆炸致灾因

- 予传播快速分类器研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 11-17.
- LIU Jian, QU Min, HUANG De, et al. Research on fast classifier for propagation of hazard factors in mine gas explosion under emergency state[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 11-17.
- [30] 刘剑,蒋清华,刘丽,等.矿井通风系统阻变型故障诊断及风速传感器位置优化[J].煤炭学报,2021,46(6):1907-1914.
- LIU Jian, JIANG Qinghua, LIU Li, et al. Resistance variant fault diagnosis of mine ventilation system and position optimization of wind speed sensor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1907-1914.
- [31] 倪景峰,李振,乐晓瑞,等.基于随机森林的阻变型通风网络故障诊断方法[J].中国安全生产科学技术,2022,18(4):34-39.
- NI Jingfeng, LI Zhen, LE Xiaorui, et al. Resistance variant fault diagnosis method of ventilation network based on random forest[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(4): 34-39.
- [32] 李秉芮,陈凤梅,刘娜.矿井通风系统异常诊断的方法研究[J].安全与环境学报,2022,22(5):2453-2460.
- LI Bingrui, CHEN Fengmei, LIU Na. Research on anomaly diagnosis method of mine ventilation system[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2453-2460.
- [33] 张浪,张迎辉,张逸斌,等.基于机器学习的通风网络故障诊断方法研究[J].工矿自动化,2022,48(3):91-98.
- ZHANG Lang, ZHANG Yinghui, ZHANG Yibin, et al. Research on fault diagnosis method of ventilation network based on machine learning[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(3): 91-98.
- [34] 魏引尚,贾玉泉,王奕博,等.矿井通风系统分级控制研究[J].工矿自动化,2018,44(12):30-33.
- WEI Yinshang, JIA Yuquan, WANG Yibo, et al. Research on garding control of mine ventilation system[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(12): 30-33.
- [35] 裴晓东,王凯,李晓伟,等.基于元胞自动机的集约化矿井调风模型分析与仿真[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):755-761.
- PEI Xiaodong, WANG Kai, LI Xiaowei, et al. Analysis and simulaiton of intensive mine air regulation model based on the cellular automation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 755-761.
- [36] 吴新忠,韩正化,魏连江,等.矿井风流智能按需调控算法与关键技术[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):725-734.
- WU Xinzong, HAN Zhenghua, WEI Lianjiang, et al. Intelligent on-demand regulation algorithm and key technology of mine air flow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 725-734.
- [37] 吴新忠,张芝超,王凯,等.基于DE-GWO算法的矿井风网风量调节方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):3981-3989.
- WU Xinzong, ZHANG Zhichao, WANG Kai, et al. Method for adjusting air volume of mine ventilation network based on DE - GWO algorithm[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 3981-3989.
- [38] 任子晖,李昂,吴新忠,等.矿井通风网络风量智能调控研究[J].工矿自动化,2022,48(11):110-118.
- REN Zihui, LI Ang, WU Xinzong, et al. Research on intelligent control of air volume of mine ventilation network[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 110-118.
- [39] 张智韬,李雨成,李俊桥,等.智能通风精准调控系统架构及实现[J].煤炭学报,2023,48(4):1596-1605.
- ZHANG Zhitao, LI Yucheng, LI Junqiao, et al. Architecture and implementation of intelligent ventilation precise control system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1596-1605.
- [40] 王凯,郝海清,蒋曙光,等.矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统研究[J].工矿自动化,2019,45(7):21-27.
- WANG Kai, HAO Haiqing, JIANG Shuguang, et al. Research on regional linkage and intelligent control system of mine fire winds smoke flow[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(7): 21-27.
- [41] 王凯,裴晓东,杨涛,等.矿井智能通风联动调控理论与供需匹配实验研究[J].工程科学学报,2023,45(7):1214-1224.
- WANG Kai1, PEI Xiaodong, YANG Tao, et al. Study on intelligent ventilation linkage control theory and supply-demand matching experiment in mines[J]. Chinese Journal of Engineering 2023, 45(7): 1214-1224.
- [42] 魏连江,周福宝,夏同强,等.矿井智能通风与灾变应急决策平台[J].中国安全科学学报,2022,32(9):158-167.
- WEI Lianjiang, ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, et al. Mine intelligent ventilation and disaster emergency decision platform[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 158-167.
- [43] 张浪,姚海飞,李伟,等.矿井智能通风成套技术装备研究及应用[J].智能矿山,2022,3(6):71-79.
- ZHANG Lang, YAO Haifei, LI Wei, et al. Research and application of mine intelligent ventilation technology and equipment[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(6): 71-79.
- [44] 尹斌,刘彦青,李伟,等.矿用自动控制风窗局部风阻数值模拟[J].煤矿安全,2016,47(10):172-175.
- YIN Bin, LIU Yanqing, LI Wei, et al. Numerical simulation for local wind resistance of mine automatic control wind window[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(10): 172-175.
- [45] 杨旭,张浪,马强,等.多个采煤工作面风量按需动态联动调控系统[J].工矿自动化,2022,48(6):112-117.
- YANG Xu, ZHANG Lang, MA Qiang, et al. On demand dynamic linkage control system for air volume of multiple coal working faces[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 112-117.
- [46] 王磊,王凯.长距离掘进工作面局部通风智能联动调控研究[J].工矿自动化,2023,49(9):55-63.
- WANG Lei, WANG Kai. Research on intelligent linkage regulation and control of local ventilation in long distance heading face[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 55-63.
- [47] 贾天毅,徐立军,陈志峰,等.基于模糊理论的局部通风机变频控制系统设计[J].工矿自动化,2022,48(10):88-96,106.
- JIA Tianyi, XU Lijun, CHEN Zhifeng, et al. Design of variable

- frequency control system for local ventilator based on fuzzy theory[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(10): 88–96, 106.
- [48] 刘尚明, 马砾, 魏高明, 等. 井下灾变风烟流快速密闭气囊特性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 735–743.
- LIU Shangming, MA Li, WEI Gaoming, *et al.* Study of the characteristics of ast airtight airbag in underground catastrophic wind smoke flow[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 735–743.
- [49] 范喜生. 矿用自动复位式风井防爆门研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 58–61.
- FAN Xisheng. Research on mine automatic resetting type flame proof door of ventilation shaft[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(6): 58–61.
- [50] 王雁鸣, 牛开强, 董玉革, 等. 新型立井防爆门冲击力学响应与泄压复位行为[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 755–763.
- WANG Yanming, NIU Kaiqing, DONG Yuge, *et al.* Impact mechanical response and pressure relief-reset behavior of innovative shaft explosion-proof door[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 755–763.
- [51] 姜文忠, 肖长亮. 煤矿井下灾区快速密闭技术及装备研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 231–238.
- JIANG Wenzhong, XIAO Changliang. Rapid airtight technology and equipment in underground coal mine disaster area[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 231–238.