

# 智能通风精准调控系统架构及实现

张智韬, 李雨成, 李俊桥, 张 静, 李博伦

(太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:**为满足矿井通风系统智能化升级的战略需求,研究了智能通风精准调控系统的设计原则、逻辑架构及具体实现。从状态感知、控制算法和调控策略3个方面梳理了智能通风调控系统的现状,针对当前智能通风调控系统各研究领域相互割裂、数据难以相互支撑的不足,从顶层设计入手,提出以融合感知算法与控制算法为核心的系统全生命周期设计原则,以此为基础提出了以边缘端“感控一体”为核心的逻辑框架;设计并搭建了矿井智能调风软硬件平台,采取各种措施保障人车安全与系统可靠运行;针对传统框架中状态感知与精准控制算法相对分离,导致风量控制对噪声敏感的具体问题,提出采用结合卡尔曼滤波的比例积分微分闭环控制算法精准追踪巷道风量,并融入了专家建模、算法寻优和设备联动的决策与控制理念。最后,在矿井智能调风软硬件平台中开展了正常时期的风窗风量精准追踪实验和灾变时期的风烟流排除实验。实验结果表明,结合卡尔曼滤波的比例积分微分闭环控制算法相比传统比例积分微分闭环控制算法在风量追踪的准确性、抗干扰性和整体效率3个方面分别提高了20.3%、17.4%和13.9%,实现了正常时期风量的精准高效控制;风烟流排除实验中,风窗两侧恒定压差实时调控可以兼顾窒息灭火与防止烟流入侵,实现了灾变时期烟流的精准控制。2者验证了智能通风精准调控系统设计原则和逻辑框架的有效性。

**关键词:**智能通风;精准调控;感控一体;系统架构;逻辑框架

中图分类号:TD72 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2023)04-1596-10

## Architecture and implementation of intelligent ventilation precise control system

ZHANG Zhitao, LI Yucheng, LI Junqiao, ZHANG Jing, LI Bolun

(School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to meet the strategic needs of intelligent upgrading of mine ventilation system, the design principle, logical structure and specific implementation of intelligent ventilation precision control system are studied. The current situation of intelligent ventilation control system is reviewed from three aspects of state perception, control algorithm and control strategy. In view of the shortcomings of the current intelligent ventilation control system that each research field is separated from each other and the data are difficult to support each other, starting from the top-level design, the whole life cycle design principle of the system with the fusion of perception algorithm and control algorithm as the core is proposed. Based on this, the logical framework with the edge's integration of perception and control as the core is proposed. The hardware and software platform of mine intelligent air conditioning is designed and built, and various measures are taken to ensure the safety of people and vehicles and the reliable operation of the system. Aiming at the specific problem that the state perception and precise control algorithm are relatively separated in the traditional framework, which leads to the sensitivity of air volume control to noise, a proportional integral differential closed-loop control algorithm combined with

收稿日期:2022-04-15 修回日期:2022-07-19 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0503

作者简介:张智韬(1998—),男,山西运城人,硕士研究生。E-mail: zzt\_tyut@163.com

通讯作者:李雨成(1978—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士。E-mail: lycntu@163.com

引用格式: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.



移动阅读

the Kalman filter is proposed to accurately track the air volume of roadway, and the decision and control concepts of expert modeling, algorithm optimization and equipment linkage are integrated. Finally, in the hardware and software platform of mine intelligent air conditioning, the accurate tracking experiment of wind window air volume in normal period and the smoke flow elimination experiment in disaster period are carried out. The experimental results show that compared with the traditional proportional-integral-derivative closed-loop control algorithm, the proportional-integral-derivative closed-loop control algorithm combined with the Kalman filter improves the accuracy, anti-interference and overall efficiency of air volume tracking by 20.3%, 17.4% and 13.9%, respectively, and realizes the accurate and efficient control of air volume in the normal period. In the smoke flow exclusion experiment, the real-time control of constant pressure difference on both the sides of the wind window can take into account the suffocation fire extinguishing and the prevention of smoke flow invasion, so as to achieve the precise control of smoke flow in the disaster period. The two experiments verify the effectiveness of design principles and logical framework of intelligent ventilation precise control system.

**Key words:** intelligent ventilation; precision regulation; sensory control integration; system architecture; logical framework

随着“碳达峰,碳中和”战略的实施,传统的煤炭开采方式逐渐被淘汰,以智能化为核心的技术正在将煤炭行业推向一个高质量发展的新阶段<sup>[1-3]</sup>。作为矿井智能化的重要组成部分,矿井智能通风系统需要遵循全息感知、实时分析、智能决策、精准调控、自主学习的智能化发展模式<sup>[4-6]</sup>。智能通风精准调控系统的动作直接关系到通风系统的状态,在矿井智能通风系统中扮演着重要角色。因此,深入研究智能通风精准调控系统对矿井通风系统智能化具有重要意义。

目前智能通风调控系统的研究主要集中在状态感知、控制算法和调控策略三大领域。

(1) 状态感知。精准感知系统中的人机环状态,是控制与决策的基础,主要研究内容包括人员及车辆信息感知、控制系统状态感知和环境信息感知。在人车信息感知方面,目前井下常用红外、光控、压力和视频监控等方式,检测人员或车辆通过构筑物的信息,相关研究较为成熟。在通风控制系统自身状态感知方面,目前的研究包括系统的故障诊断和可靠性等方面。程晓之等<sup>[7]</sup>采用贝叶斯网络对局部通风机和传感器的健康状况进行了诊断;王凯等<sup>[8]</sup>利用故障树和贝叶斯网络分析灾变联动控制系统的可靠度,证明了系统冗余设计的必要性和可行性。在通风系统环境信息感知方面,目前的研究集中在测风原理、测风方式、噪声处理以及多源信息融合等方面。测风原理方面,针对传统的机械式、涡街式和红外线式传感器精度不足的问题,蔡峰等<sup>[9]</sup>研究了超声波在煤矿井下的传播与衰减规律,为煤矿井下超声波测风传感器的研发提供了坚实的基础。测风方式方面,针对单点测风难以反映整个断面平均风速的问题,刘剑等<sup>[10]</sup>研究了点风速和断面平均风速之间的转换关系;魏连江等<sup>[11-12]</sup>研究了超声波线测量矿井回风井风速的方法和巷道

全断面风速的测量系统及方法。噪声处理方面,针对风速测量受环境因素影响导致结果不准确的问题,范京道等<sup>[13]</sup>研究了风流中各种扰动的来源;刘剑等<sup>[14-16]</sup>研究了断面风速的分布规律,指出均直巷道稳定流动的测点风速大小及风向均服从正态高斯分布的结论;学者们利用各种误差处理手段如曲线拟合<sup>[17]</sup>、均值滤波、中值滤波<sup>[18]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[19-20]</sup>和卷积滤波<sup>[21]</sup>等对风速中的环境噪声进行了处理,取得了一定的效果。信息融合方面,吴新忠等<sup>[22-23]</sup>针对时差法测量线风速受环境因素影响导致结果不准确的问题,提出了融合线风速和环境信息的自适应烟花-BP神经网络的数据融合方式进行风速精准测量。

(2) 控制算法。精准调控通风参数,直接改变通风系统状态,主要研究内容包括PID算法、模糊控制算法和史密斯预估补偿控制。针对风量自动控制过程中存在的收敛较慢和滞后问题,一些学者采用比例积分微分(PID)算法、模糊控制和史密斯预估补偿等方法<sup>[24-26]</sup>,在均压防火中实践了风窗开度的自动调控,取得了较好的效果;之后的学者们大都沿用已有算法对风窗<sup>[27-28]</sup>进行控制。

(3) 调控策略。综合分析相关信息,对调控方式进行决策,目前常用的调控策略可以归纳为“专家建模,算法寻优,设备联动”。SJÖSTRÖM等<sup>[29]</sup>以通风系统的能耗最低为目标进行建模,优化了多风机联合运转策略;吴新忠等<sup>[30-31]</sup>分别以网络需风分支风量可调和用风地点需风量为目标进行建模,并用不同的优化算法对模型进行寻优;邵良杉等<sup>[32]</sup>以通风网络总功率最小为目标建立了数学模型,并用模拟退火改进的粒子群算法进行了模型寻优;郝海清等<sup>[33]</sup>以烟气浓度最低为目标,建立了灾变控风模型,优化了运输巷火灾烟流调控方案。

学者们在状态感知、控制算法和调控策略 3 个方面已经做了大量的工作,推动了智能通风调控系统领域的长足发展,但仍存在以下不足:①目前的智能通风调控系统逻辑框架中,状态感知和自动控制结合的程度较低。感知方向更多地研究如何精准测量矿井风速,较少关注实时反馈信号能否满足闭环控制的要求;控制方向目前仅研究了风量滞后补偿的算法,忽略了感知数据中噪声对控制结果的影响,造成了实际工程中风量控制算法对噪声敏感的不足。②上述感知与控制算法难以相互支撑的现状,根源在于目前尚缺乏一套能够指导智能通风精准调控系统设计的原则,导致各相关领域的研究内容相互割裂,对设计更高水平的智能通风精准调控系统产生了一定的阻碍。

因此,笔者从 2 个方面入手:①针对学者们在智能通风调控系统研究中关注较多的几个领域相互割裂的问题,提出了涵盖系统全生命周期的设计原则,为智能通风精准调控系统的设计提供了一条参考路线。②针对传统逻辑框架中感知和控制相对分离导致控制算法对噪声敏感的问题,提出边缘端融合感知数据去噪算法和闭环控制算法的感控一体化逻辑框架。

## 1 智能通风精准调控系统设计原则及框架

### 1.1 系统设计原则

结合当前智能通风精准调控系统三大研究领域的现状,指出在设计智能通风精准调控系统时,遵循的原则应为:安全可靠、感控一体、协同联动。具体的含义如下所述:

(1) 安全可靠。人车安全,系统可靠。例如风门关闭过程需采取安全措施防止夹伤人员及车辆;防止通风构筑物的异常状态造成通风系统的异常或灾变,如风门异常开启引起风流短路和瓦斯积聚。

(2) 感控一体。实时监测并快速处理人机环相关信息,作为精准闭环控制算法的反馈。例如对风量监测值进行滤波去噪,在闭环控制算法中采取预估补偿消除滞后,将去噪风量作为消除滞后的闭环控制算法的反馈。

(3) 协同联动。人机协同决策,设备联动控制。具体可描述为专家建模,算法寻优,设备联动。例如专家根据丰富的理论知识和现场经验建立风量调控模型,利用优化算法找到模型的最优解,将最优解下发至边缘端设备进行联动控制。

三大原则分别是实现智能通风精准调控系统的基石、核心与整体策略。

### 1.2 系统框架

智能通风精准调控系统在矿井正常生产时期的行人通车及风量按需调控,以及灾变时期的灾害隔离及引导中发挥着重要作用。

智能通风精准调控逻辑框架从下到上可以分为感知与执行层、现场控制层、人机协同层和云端服务层,如图 1 所示。

值得关注的是,针对感知算法与控制算法的数据难以相互支撑的问题,提出现场控制层接收感知与执行层感知的信息并实时去噪,反馈至闭环控制算法中,得到优化的控制方案并下发执行,在边缘端形成以感知控制一体化为核心的硬件联动控制闭环,从逻辑上弥补了控制算法对风量敏感的不足。

## 2 智能通风精准调控系统实现

### 2.1 系统概述

结合智能通风精准调控系统的实际需求,按照所提设计原则和逻辑框架,设计并搭建了矿井智能调风软硬件平台,平面布置和三维效果如图 2 和图 3 所示,风门风窗及相关设施如图 4 所示,系统人机环信息感知如图 5 所示。

与传统的智能通风调控系统相比,本平台将特定任务中精准控制所需的传感器和执行器进行绑定,在控制器中编写函数,实现感知与控制算法的深度融合。2.3 节中将详述风窗过风量调节中感知与控制算法的融合。

### 2.2 安全子系统

安全可靠作为系统设计的首要原则,其主要保障措施包括:风门闭锁、超时自动关闭、人车防夹、行人小门、手自动切换和人工远程干预。

风门闭锁:2 道风门(行人小门)不允许同时开启,防止风流短路,PLC 中电控闭锁的梯形图如图 6 所示。

超时自动关闭:在闭锁功能之外,为风门开启设置定时器,规定时间内相关传感器无动作时,风门自动关闭。

人车防夹:设计了 2 套防夹系统。①根据无压风门仅在门中间夹住人员和车辆的特点,采用对射传感器检测此处是否有遮挡;②根据风门夹住人员或车辆的瞬间产生压力阶跃的特点,采用压力传感器检测液压缸压力变化。出现遮挡或压力阶跃时,风门暂停关闭。

行人小门:正常时期,行人从小门通行,车辆从大门通行,延长风门使用寿命;灾变时期,大门发生形变无法开启时,行人可以从小门快速逃生。

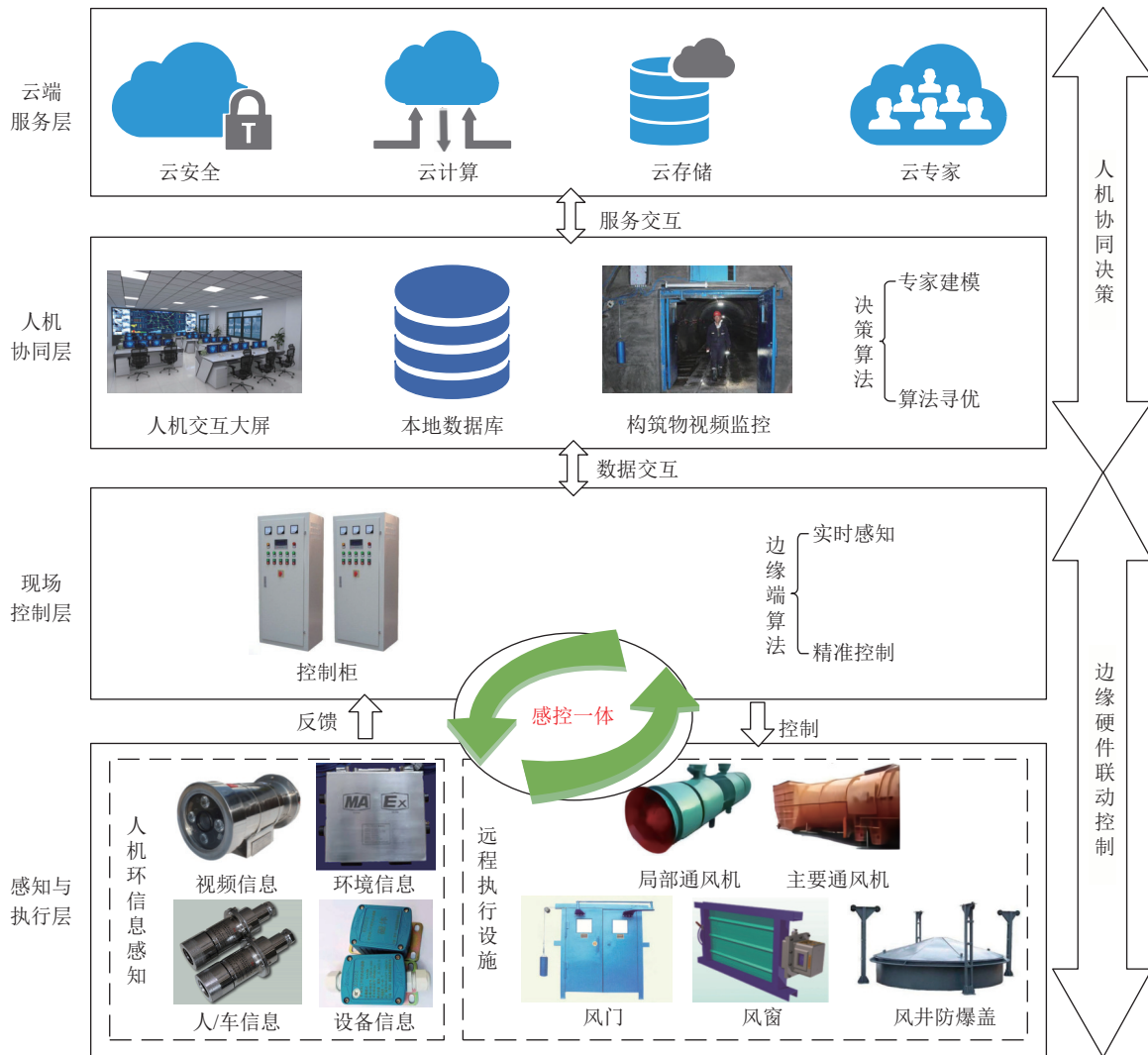


图 1 智能通风精准调控系统逻辑框架

Fig.1 Logical framework of intelligent ventilation precision control system

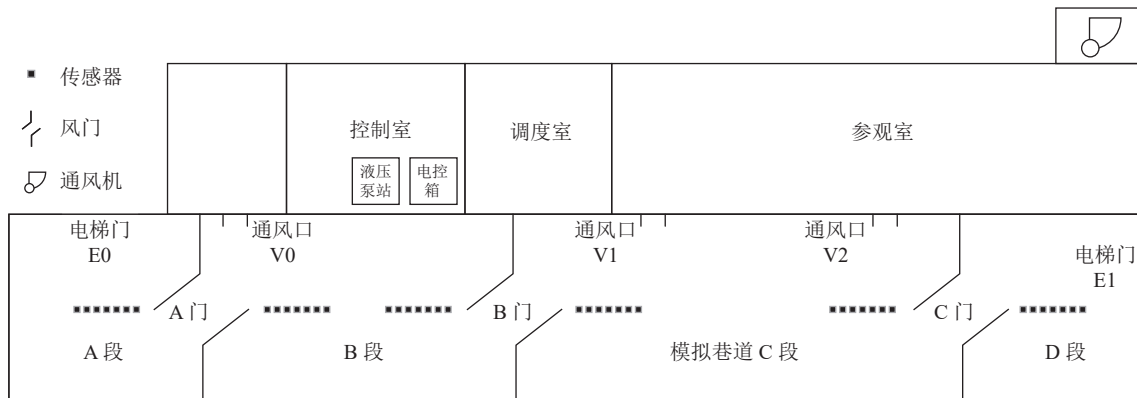
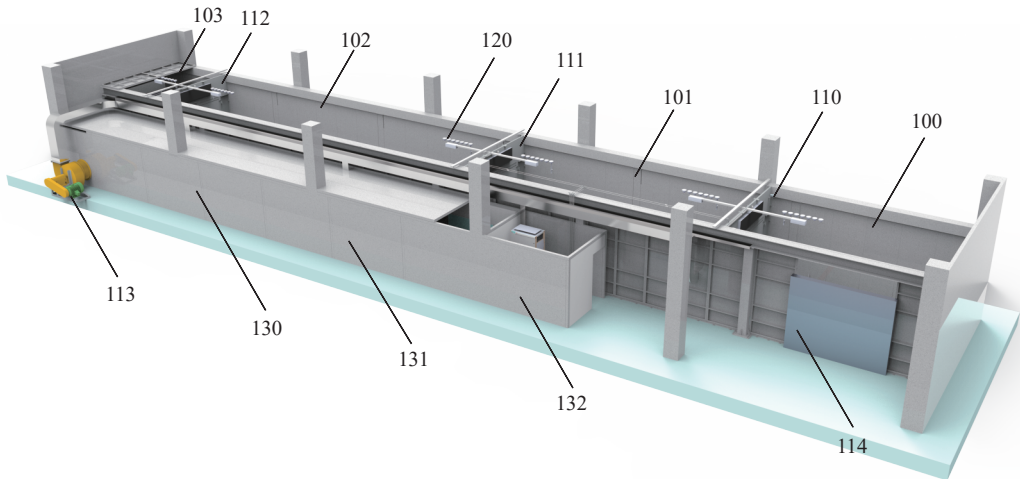


图 2 平面布置

Fig.2 Plan layout

手自动切换: 传感器因粉尘污染或巷道变形等因素失效后, 系统的自动模式会受到影响, 因此在风门两侧设置手动控制箱, 作为安全冗余。手动控制箱包含手自动切换、大门开闭、小门开闭和急停等功能。

人工远程干预: 有限的程序逻辑无法使控制器应对复杂多变的情况, 发生意外时需要人工远程介入。例如部分传感器失效导致信息缺失时, 可以人工远程干预构筑物的动作。



100—模拟巷道 A 段；101—模拟巷道 B 段；102—模拟巷道 C 段；103—模拟巷道 D 段；110—A 门；111—B 门；112—C 门；113—通风机；114—电梯门；120—传感器；130—参观室；131—调度室；132—控制室

图 3 三维效果

Fig.3 Three-dimensional effect

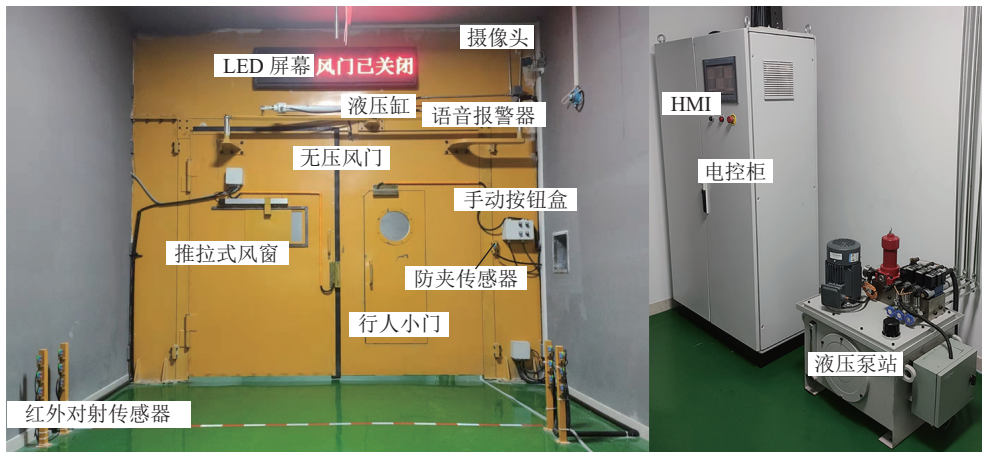


图 4 风门风窗及相关设施

Fig.4 Mine door and windows and related facilities

### 2.3 感控融合子系统

感知方面, 噪声按照来源不同可以分为过程噪声和测量噪声。实际井下的过程噪声源自湍流扰动<sup>[34]</sup>、采掘推进和人员车辆活动等引起的风量扰动<sup>[13]</sup>; 测量噪声则是指传感器自身精度不足引起的误差。

卡尔曼滤波可以同时处理过程噪声和测量噪声, 时间复杂度和空间复杂度均比较小, 容易布置在边缘端实时滤波, 且未来方便进行多传感器数据融合的拓展, 故选择该方法进行风速传感器数据的实时降噪。一维卡尔曼滤波处理风速传感器数据的方程及更新流程如图 7 所示。

卡尔曼滤波更新可分为滤波计算回路和增益计算回路。左侧滤波计算回路接收右侧增益计算回路更新的卡尔曼增益 $K_k$ 和外界风速传感器的测量值 $Z_k$ , 对风速 $\hat{v}_k$ 进行更新; 右侧增益计算回路中, 过程噪声的

协方差矩阵 $Q$ 和测量噪声的协方差矩阵 $R$ 均为定值, 不断更新增益 $K_k$ , 并输出后验估计误差协方差矩阵 $P_k$ 的更新。可以看出, PLC 的数据块中仅需保存 $\hat{v}_k$ 和 $P_k$ 两个值, 内存占用小, 计算时间较短, 适合部署在边缘端进行实时计算, 为控制算法提供及时准确的反馈。

将卡尔曼滤波处理后的风量数据作为 PID 算法的反馈, 增加风量调控的准确性, 结合卡尔曼滤波的 PID 风量控制流程如图 8 所示。此外, 当调控的目标设定为风压、瓦斯体积分数和烟雾质量浓度等其他单一指标或者由专家构建出的复合指标时, 该调控思路仍然适用。

需要注意, 卡尔曼滤波算法和 PID 算法是感知控制一体化逻辑框架中的具体案例, 可以替换为其他更加先进的算法, 例如当边缘端算力提升到更高水平时, 可以考虑在边缘端部署粒子滤波算法, 结合 MPC 或

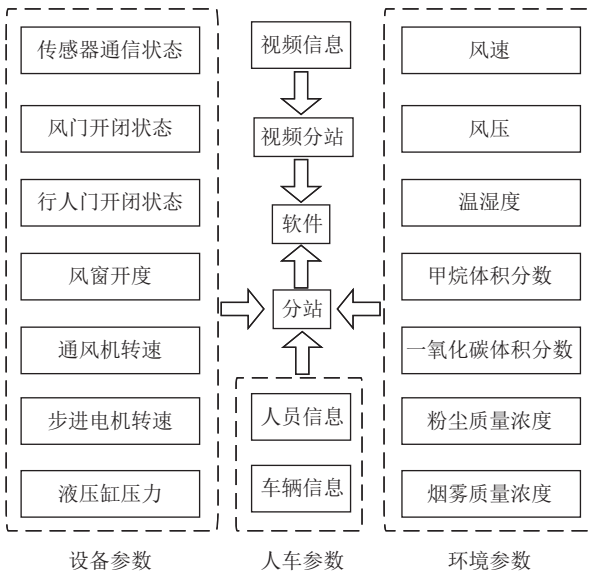


图 5 信息感知

Fig.5 Information perception

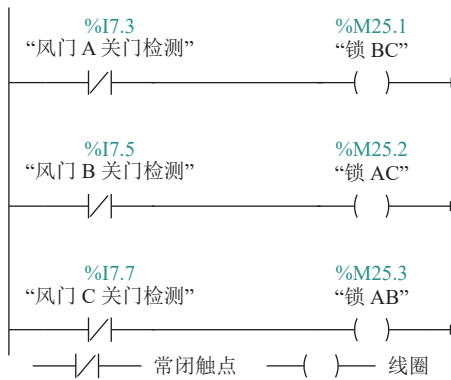


图 6 风门闭锁程序

Fig.6 Mine door locking program

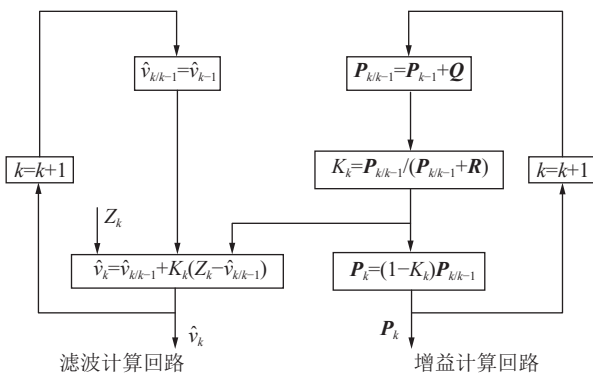


图 7 卡尔曼滤波更新流程

Fig.7 Kalman filter update process

滑膜控制等算法进行实时滤波与精准控制。

### 2.4 协同联动子系统

智能通风精准调控系统的最终目标是实现无人化和自主化,在此之前需要首先实现协同联动,即“专

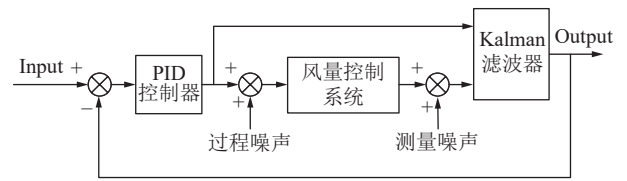


图 8 结合卡尔曼滤波的 PID 风量控制流程

Fig.8 Combined Kalman filter PID airflow control process

家建模、算法寻优、设备联动”的决策与控制模式。

人机协同区别于传统的人员对控制系统的绝对管理权,能够将人类对环境灵活的适应性和丰富的现场经验知识以及算法程序化的执行能力和从数据中挖掘信息的能力有机结合起来,实现更高效的控制。设备联动则是通过下发人机协同决策构建的策略至边缘端,使不同类型的设备高效配合,完成特定目标。

当前的人机协同软件大多为二维图形界面,难以全面反映物理实体的细节,对软件操作人员的要求相对较高,人机协同处于初级阶段。

对巷道、传感器、控制器、风门、风窗和通风机等设施设备进行三维建模,直观地展示在前端界面,并在后台数据库中接入对应物理实体的信息和决策算法,实现在软件中实时监测人员车辆信息、设备状态和环境参数,显示现场构筑物视频画面,决策得到方案并下发指令,联动控制风门、风窗和通风机,如图 9 所示。

## 3 智能通风精准调控实验

### 3.1 正常时期按需调风

矿井正常生产时期,通风系统保证各用风地点的实际风量满足需求。在搭建的智能通风精准调控实验平台中,将巷道实际风量作为调控目标,风窗开度作为调控对象,开展风窗风量调控实验,从准确性、鲁棒性和整体效率 3 方面对比单一 PID 算法与结合卡尔曼滤波的 PID 算法的效果。实验方案如图 10 所示,打开通风口 V0、B 风窗、C 门以及电梯门 E1,新鲜风流由通风口 V0 输入,经过人员工作区域模拟巷道 B 段,从 B 风窗进入模拟巷道 C 段,通过调整 B 风窗,使模拟巷道 C 段的风量达到设定值。

实验步骤为:

(1) 风速传感器布设在模拟巷道 C 段,实时监测风量并将数据上传至软件中,风窗设置为自动调控模式,分别采用普通 PID 和结合卡尔曼滤波的 PID 追踪模拟巷道 C 段的风量。

(2) 在软件中改变风量的目标值,风窗动作使实际的风量达到该目标值后,关闭特定开度的电梯门增加

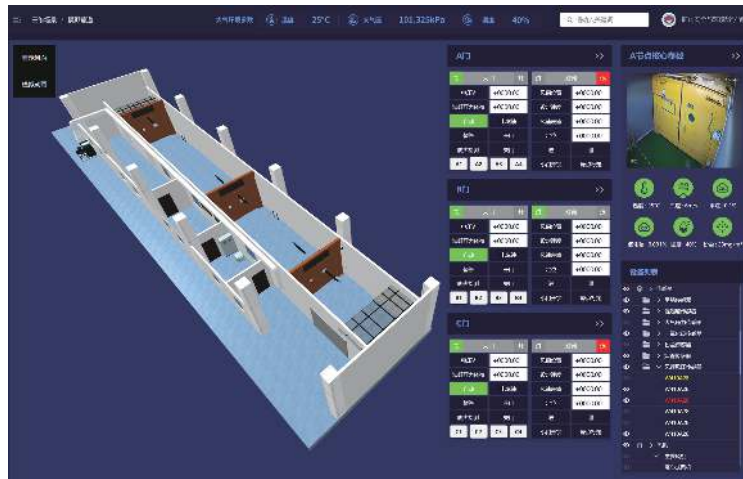


图 9 软件界面

Fig.9 Software interface

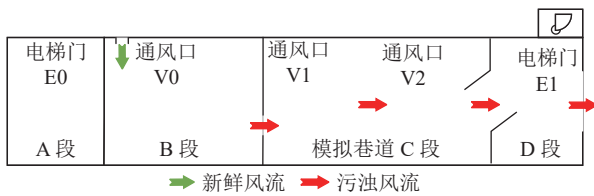


图 10 实验设计

Fig.10 Experimental design

通风阻力,之后立即将电梯门恢复至完全打开的状态,模拟井下行人通车时巷道阻力突然增加后恢复原状的情况。

(3) 将风量调回至初始风量。记录 2 种方案下风量的时序数据,以调控时间为横坐标,模拟巷道 C 段过风量为纵坐标,绘制设定风量、PID 算法调控的风量和结合卡尔曼滤波的 PID 算法(KF-PID)调控的风量变化曲线,实验结果如图 11 所示。由图 11 可以看出,系统阻力变化相同时,单独的 PID 风量调控会受到更大的扰动,结合卡尔曼滤波的 PID 风量调控受到的扰动会减小。

表 1 中,从平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和时间乘绝对误差积分准则(ITAE)3 个方面对系统期望值与实际值进行定量分析。其中,MAE 侧重于系统整体的调控精度, RMSE 对偏差大的值比较敏感,代表系统鲁棒性, ITAE 综合考虑误差和时间,代表总体调控效率。

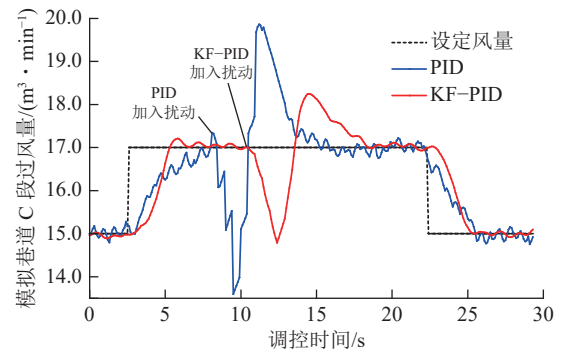


图 11 风量调控对比

Fig.11 Comparison of air volume regulation

对比表 1 可以发现,结合卡尔曼滤波的 PID 在精度和鲁棒性上均优于单纯的 PID 控制系统,分别提高了 20.3% 和 17.4%;加入卡尔曼滤波算法对系统时间开销的影响较小,系统的总体效率提高了 13.9%,优于单纯的 PID 调控。

### 3.2 灾变时期应急调风

矿井火灾在煤矿各类事故中较为严重,社会危害性较大<sup>[35]</sup>,火灾中导致人员伤亡的主要因素为有毒有害气体<sup>[36]</sup>,因此有必要在智能调风系统中开展烟流控制实验,验证风窗灾变时期精准控风的可行性。受限于实验条件,在灾变调风实验中未使用明火,仅用烟雾开展了实验,但实验过程的设计和调控策略的理论依据均为真实火灾的各个发展阶段。实验分为 5 个

表 1 关键指标对比

Table 1 Comparison of key indicators

MAE			RMSE			ITAE		
PID	KF-PID	提升效果/%	PID	KF-PID	提升效果/%	PID	KF-PID	提升效果/%
0.623	0.497	20.3	0.997	0.824	17.4	227.886	196.106	13.9

阶段:

(1) 正常时期。人员位于模拟巷道 A 段和 B 段, A 门和电梯门 E0 完全打开, B 窗开启, 其余门窗均关闭, 新鲜风流由通风口 V1 进入, 为人员供风。

(2) 灾变初期。烟雾发生器置于模拟巷道 C 段, 模拟火灾产生的烟雾。灾变发生初期, 烟雾会迅速上升并在巷道顶部蔓延。若不及时处理, 烟气将随着新鲜风流侵入人员所在的模拟巷道 B 段和 A 段。烟雾传感器精确定位灾变位置, 向调度中心报警, 值班人员启动窒息灭火应急预案, 人员撤离模拟巷道。

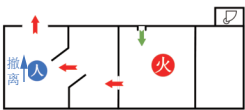
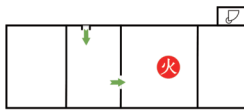
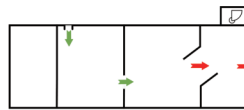
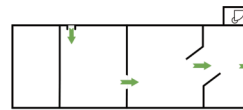




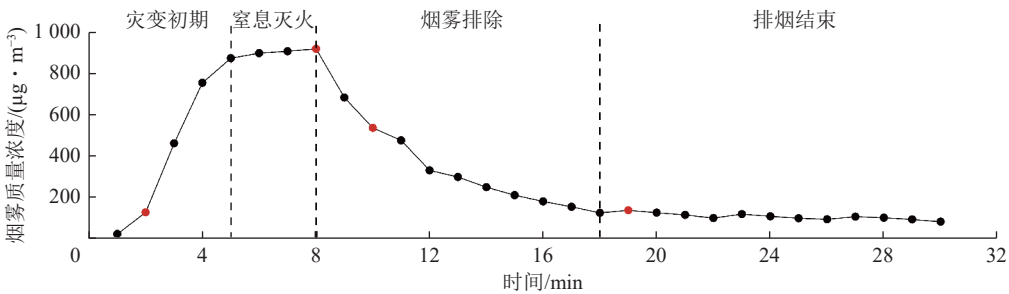
(3) 窒息灭火。关闭 A 门和电梯门 E0, 通风机反风, 由通风口 V0 输入新鲜风流, B 风窗以两侧压力作为精准调控的目标, 实时调控开度, 使 BC 两段模拟巷道始终存在一个较小的恒定压力差。

(4) 烟雾排除。待烟雾质量浓度不再上升, 开启 C 门和电梯门 E1, 完全打开 B 窗, 新鲜风流从通风口 V0 输入, 经过 B 风窗, 将模拟巷道 C 段的烟雾从电梯门 E1 排除。

(5) 恢复生产。烟雾质量浓度回归正常值之后, 由值班人员确认并解除报警信号, 将通风系统恢复至正常时期的状态。

从灾变阶段、调控方案、方案图示、现场画面和烟雾质量浓度等方面对实验进行总结 (表 2)。在窒息灭火阶段, 风窗以两端恒定压差为目标进行自动调控, 一方面, 减少火区供氧可以达到控制火势的目的, 另一方面, 较小的压差可以防止烟流侵入模拟巷道 B 段和 A 段, 有利于人员逃生, 减少灾变对工作区域的破坏, 验证了感知与控制一体化原则的有效性。

表 2 烟雾变化情况  
Table 2 Smoke variation

灾变阶段	灾变初期	窒息灭火	烟雾排除	排烟结束
调控方案	识别火灾并报警 启动预案	风窗精准控制两端压力 恒定压差	通风构筑物联动控制 排除烟雾	烟雾质量浓度等指标回归正常 结束排烟
方案图示				
现场画面				
烟雾质量浓度	 <p>灾变初期 窒息灭火 烟雾排除 排烟结束</p> <p>烟雾质量浓度/(<math>\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}</math>)</p> <p>时间/min</p>			

### 4 结 论

(1) 提出了“安全可靠、感控一体、协同联动”的智能通风精准调控系统设计原则, 有利于从顶层设计解决目前各相关领域研究相互割裂、数据难以相互支撑的不足; 提出了以边缘端感控一体化为核心的逻辑架构, 弥补了感知算法与控制算法无法有效结合导致的风量控制算法对噪声敏感的不足。

(2) 搭建了矿井智能调风软硬件平台并开展了正常时期的风量追踪实验和灾变时期的烟流调控实验。

实验结果表明, 相比于单纯的 PID 控制算法, 结合卡尔曼滤波的 PID 算法在平均绝对误差、均方根误差和时间乘绝对误差积分准则 3 个指标中分别提高了 20.3%、17.4% 和 13.9%, 分别代表准确性、鲁棒性和系统总体效率的提升; 风窗恒定压差调控烟流对窒息灭火和防止烟流入侵具有一定的作用。

(3) 为打造更高水平的智能通风精准调风系统, 除了本文提出的边缘端感控一体化策略, 还需要关注通风系统的流体特性及网络结构, 建立能够更加准确地描述系统特性的数学模型, 并采用复杂度较低的算法

进行求解,方便将数学模型及求解算法部署在边缘端,实现边缘端感知-决策-控制算法相互支撑的精准调控模式。

### 参考文献(References):

- [1] 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 Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [2] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [3] 陈浮,于昊辰,卞正富,等.碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J].煤炭学报,2021,46(6):1808-1820.  
CHEN Fu, YU Haochen, BIAN Zhengfu, et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808-1820.
- [4] 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.  
LIU Jian. Overview on key scientific and technical issues of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 108-111.
- [5] 周福宝,魏连江,夏同强,等.矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J].煤炭学报,2020,45(6):2225-2235.  
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225-2235.
- [6] 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.
- [7] 程晓之,王凯,郝海清,等.矿井局部通风智能调控系统及关键技术研究[J].工矿自动化,2021,47(9):18-24.  
CHENG Xiaozhi, WANG Kai, HAO Haiqing, et al. Research on intelligent regulation and control system and key technology of mine local ventilation[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 18-24.
- [8] 王凯,蔡炜垚,高士伟,等.矿井火灾风烟流应急调控系统联动可靠性研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):744-754.  
WANG Kai, CAI Weiyao, GAO Shiwei, et al. Research on the linkage reliability of mine fire wind and smoke flow emergency control system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 744-754.
- [9] 蔡峰,袁媛,刘泽功,等.超声波在煤矿井下环境中的传播与衰减特性[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):685-690.  
CAI Feng, YUAN Yuan, LIU Zegong, et al. Propagation and attenuation characteristics of ultrasonic in underground environment of coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 685-690.
- [10] 李雪冰,刘剑,宋莹,等.井巷断面内单点风速与平均风速转换机制[J].安全与环境学报,2018,18(1):123-128.  
LI Xuebing, LIU Jian, SONG Ying, et al. On the conversion between the mean airflow velocity and that of the individual point in the underground mine tunnels[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 123-128.
- [11] 魏连江,康家康,周福宝,等.一种巷道全断面风量测量系统及方法:112377260 B[P].2021-07-02.
- [12] 魏连江,魏宗康,周福宝,等.一种基于超声波线矿井回风井的风速测算方法:CN 109063368 B[P],2020-05-01.
- [13] 范京道.矿井风量波动与漂移的溯源分析研究[D].西安:西安科技大学,2013.  
FAN Jingdao. Study on the cause tracing of airflow fluctuation and drift in mine ventilation system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [14] 刘剑,宋莹,刘明浩,等.基于LDA的均直巷道断面风速分布规律实验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(12):65-71.  
LIU Jian, SONG Ying, LIU Minghao, et al. Experimental study on distribution laws of wind velocity in straight roadway section based on LDA[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(12): 65-71.
- [15] 刘剑,宋莹,李雪冰,等.基于LDA的均直巷道断面突扩风速分布规律实验研究[J].煤炭学报,2016,41(4):892-898.  
LIU Jian, SONG Ying, LI Xuebing, et al. Experimental study on wind speed distribution of the straight roadway and sudden enlarged sections based on LDA[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 892-898.
- [16] 宋莹,刘剑,李雪冰,等.矿井巷道风流平均风速分布规律的试验与模拟研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):146-151.  
SONG Ying, LIU Jian, LI Xuebing, et al. Experiment and numerical simulation of average wind speed distribution law of airflow in minetunnel[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(6): 146-151.
- [17] 李曼,霍曼.矿井通风风量测量及误差补偿的仿真研究[J].中国安全科学学报,2018,28(5):153-158.  
LI Man, HUO Man. Simulation study on mine ventilation air quantity measurement and error compensation[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 153-158.
- [18] 李敏,赵硕婧.基于实施监测数据的矿井通风仿真技术研究[J].煤炭技术,2021,40(5):145-148.  
LI Min, ZHAO Shuoqing. Research on mine ventilation simulation technology based on monitoring data[J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 145-148.
- [19] 赵天,田润,易真翔,等.卡尔曼滤波算法在MEMS热式风速风向传感器中的应用[J].传感技术学报,2021,34(2):183-188.  
ZHAO Tian, TIAN Run, YI Zhenxiang, et al. Application of Kalman filter algorithm in MEMS thermal wind speed and direction sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(2): 183-188.
- [20] 屈世甲,武福生.矿井风速数据预处理中卡尔曼滤波方法[J].煤矿安全,2016,47(1):116-118.  
QU Shijia, WU Fusheng. Kalman filtering method in mine wind speed data preprocessing[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(1): 116-118.

- 116-118.
- [21] 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.
- [22] 吴新忠,陈昌,耿柯,等.基于IFWA-BP神经网络的线风速数据融合研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(5):16-23.  
WU Xinzhong, CHEN Chang, GENG Ke, et al. Research on line wind speed data fusion based on IFWA-BP neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35(5): 16-23.
- [23] 陈昌.基于数据融合的矿井风速精确测量研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2021.  
CHEN Chang. Research and application of accurate measurement of mine wind speed based on data fusion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [24] 臧小杰,王焱,宋绍楼,等.模糊控制理论在煤矿通风安全自动化系统中的应用[J].中国安全科学学报,2000,10(3):36-40.  
ZANG Xiaojie, WANG Yan, SONG Shaolou, et al. Application of fuzzy control in the automation system of mine ventilation[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(3): 36-40.
- [25] 杨维,吕振,于健,等.风窗自动监测与调节系统PID参数的整定及有关性能的研究[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1995,14(1):73-76.  
YANG Wei, LÜ Zhen, YU Jian, et al. The PID parameter rectification of the Smith pre-evaluation compensation control of automatic monitoring and regulation system of window ventilator under fire area and the study of some relevant performances[J]. Journal of Fuxin Mining Institute(Natural Science), 1995, 14(1): 73-76.
- [26] 杨维,刘俊波,李勇.风窗自动监测与调节系统预估控制的实现[J].工矿自动化,1998(1):26-27.  
YANG Wei, LIU Junbo, LI Yong. Realization of predictive control of air window automatic monitoring and regulation system[J]. Journal of Mine Automation, 1998(1): 26-27.
- [27] 李军霞,乔博,俞晶.井下风窗风量自动调节控制装置研究[J].煤炭工程,2015,47(3):96-99.  
LI Junxia, QIAO Bo, YU Jing. Research on automatic adjusting and controlling device for air volume of mine windscreen[J]. Coal Engineering, 2015, 47(3): 96-99.
- [28] 朱红青,李峰,姜元刚,等.矿井自动控制均压防火系统设计[J].煤炭科学技术,2012,40(4):95-99.  
ZHU Hongqing, LI Feng, JIANG Yuangang, et al. Design on automatic pressure balanced fire prevention and control system in mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(4): 95-99.
- [29] SJÖSTRÖM S, KLINTENÄS E, JOHANSSON P, et al. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(4): 533-539.
- [30] 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 Xinzhong, 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.
- [31] 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 Xinzhong, HAN Zhenghua, WEI Lianjiang, et al. Intelligent on-demand adjustment algorithm and key technology of mine air flow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 725-734.
- [32] 邵良杉,于保才,陈晓永.矿井智能通风关键技术[J].煤矿安全,2020,51(11):121-124.  
SHAO Liangshan, YU Baocai, CHEN Xiaoyong. Key technology of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 121-124.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] ZHU Yunfei, WANG Deming, SHAO Zhenlu, et al. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 121: 357-366.
- [36] 王德明,邵振鲁,朱云飞.煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J].煤炭学报,2021,46(1):57-64.  
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57-64.